ТАБЛИЦЫ ФИЗИЧЕСКИХ ВЕЛИЧИН

СПРАВОЧНИК

под редакцией
академика
И. К. КИКОИНА

МОСКВА · АТОМИЗДАТ · 1976

УДК 53(031)

Таблицы физических величин. Справочник. Под ред. акад. И. К. Кикоина. М., Атомиздат, 1976, 1008 с.

Справочник содержит данные по механическим, термодинамическим и молекулярно-кинетическим свойствам веществ, электрическим свойствам металлов, диэлектриков и полупроводников, магнитным свойствам диа-, пара- и ферромагнетиков, оптическим свойствам веществ, в том числе и лазерных, оптическим, рентгеновским и мёссбауэровским спектрам, нейтронной физике, термоядерным реакциям, а также геофизике и астрономии.

Материал представлен в виде таблиц и графиков, сопровождаемых краткими объяснениями и определениями соответствующих величин. Для удобства пользования приведены единицы измерения физических величин в различных системах и переводные множители.

В работе над справочником принимали участие

В. Г. АВЕРИН (гл. 7 и 14)
Б. А. АРОНЗОН (гл. 21)
Н. С. БАБАЕВ (гл. 4, 5, 6, 16)
Н. А. БАБУШКИНА (гл. 1, 2, 25, 26)
А. И. БАЗЬ (гл. 40)
В. И. БОЛОШИН (гл. 32)
А. А. ВАРФОЛОМЕЕВ (гл. 45)
Л. И. ВИНОКУРОВА (гл. 27)
Э. Б. ГЕЛЬМАН (гл. 8, 9, 10, 11, 13)
И. С. ГРИГОРЬЕВ (гл. 15, 18, 22, 39, 40, 41, 42, 45, 46)
А. В. ЕЛЕЦКИЙ (гл. 17)
Т. Н. ИГОШЕВА (гл. 20, 28)
К. А. КИКОИН (гл. 3)
В. Ф. КИТАЕВА (гл. 31)
В. М. КУЛАКОВ (гл. 37)
С. Д. ЛАЗАРЕВ (гл. 21)
Т. М. ЛИФШИЦ (гл. 24)
Е. А. ЛОБИКОВ (гл. 43)
М. А. МАЗИНГ (гл. 31)
А. А. МАЛЮТИН (гл. 32, 33, 34)
И. А. МАСЛОВ (гл. 47)
Е. З. МЕЙЛИХОВ (гл. 21)
А. И. МИГАЧЕВ (гл. 12)
С. А. МИРОНОВ (гл. 29)
В. М. НОВИКОВ (гл. 35, 36)
В. И. ОЖОГИН (гл. 30)
Я. С. ПЕТУХОВА (гл. 24)
Р. В. ПИСАРЕВ (гл. 29)
Л. П. ПРЕСНЯКОВ (гл. 31)
А. П. СЕНЧЕНКОВ (гл. 19, 20, 23, 44)
Р. В. СЕРОВ (гл. 33)
В. Г. ШАПИРО (гл. 30)
В. М. ШАТИНСКИЙ (гл. 37)
В. П. ШЕВЕЛЬКО (гл. 22, 31, 32, 34)
С. С. ЯКИМОВ (гл. 38)

На первоначальном этапе работы над справочником координацию деятельности авторов-составителей осуществляли А. П. Сенченков и И. С. Григорьев. Обработка окончательного варианта выполнена И. С. Григорьевым, Ю. А. Даниловым и Е. З. Мейлиховым.

Т $\frac{20400-098}{034(01)-76}$ 15 – 75

© Атомиздат, 1976

ОГЛАВЛЕНИЕ

От редактора 9

I. ОБЩИЙ РАЗДЕЛ

Глава 1. Единицы измерения физических величин

1.1. Международная система единиц (СИ) . 10
1.2. Единицы измерения механических величин 13
1.3. Единицы измерения тепловых величин . 18
1.4. Единицы измерения электромагнитных величин 21
1.5. Единицы измерения акустических величин 21
1.6. Единицы измерения световых величин . . 22
1.7. Единицы измерения радиоактивности и ионизирующих излучений 23
1.8. Некоторые единицы измерения в атомной и ядерной физике 24
Приложение. Некоторые формулы электродинамики, записанные в различных системах единиц 25
Примечание. О проекте нового ГОСТа единиц физических величин 29
Список литературы 30

Глава 2. Фундаментальные физические постоянные

Список литературы 33

Глава 3. Периодическая система элементов

Список литературы 36

II. МЕХАНИКА И ТЕРМОДИНАМИКА

Глава 4. Механические свойства материалов

4.1. Металлы 37
4.2. Стали 38
4.3. Сплавы цветных металлов 40
Сплавы алюминия 40
Сплавы меди 44
Сплавы никеля, кобальта и свинца . . 48
Сплавы олова 49
Сплавы титана 50
Сплавы цинка 51
Сплавы платины 51
Сплавы вольфрама 51
4.4. Металлокерамика, пластмассы и другие материалы 52
Металлокерамические твердые сплавы . 52
Биметаллы 52
Пластмассы 53
Технические резины 54
4.5. Минералы и волокна 54
Твердость минералов 54
Свойства волокон и проволок 55
Список литературы 55

Глава 5. Плотность веществ

5.1. Элементы 56
5.2. Газы и пары 57
5.3. Жидкости 58
5.4. Водные растворы 59
Плотность водного раствора этилового спирта 59
Плотность водного раствора метилового спирта 59
Плотность водных растворов веществ при различных температурах 60
5.5. Сплавы 65
5.6. Дерево, минералы и другие вещества 66
Список литературы 66

Глава 6. Сжимаемость веществ

6.1. Газы 67
6.2. Жидкости 71
6.3. Твердые тела 75
Список литературы 75

Глава 7. Акустика

7.1. Распространение звука в газах и парах 76
7.2. Распространение звука в жидкостях 79
7.3. Распространение звука в твердых телах и расплавах 86
Список литературы 90

Глава 8. Термометрия

8.1. Температурные шкалы 91
8.2. Жидкостно-стеклянные термометры . 93
8.3. Термометры сопротивления 94
8.4. Термоэлектрическая термометрия . 96
8.5. Конденсационные термометры . . . 102
8.6. Оптическая термометрия (пирометрия) и термоиндикаторы 105
Список литературы 109

Глава 9. Температурные коэффициенты расширения и эффект Джоуля — Томсона

9.1. Тепловое расширение анизотропных твердых тел 110
9.2. Тепловое расширение изотропных твердых тел 114
9.3. Тепловое расширение жидкостей и газов 125
9.4. Эффект Джоуля — Томсона 138
Список литературы 141

Глава 10. Теплоемкость

10.1. Теплоемкость элементов и химических соединений при нормальных условиях . 142
10.2. Теплоемкость элементов в зависимости от температуры при нормальном давлении . 147
10.3. Теплоемкость неорганических соединений в зависимости от температуры при нормальном давлении 151

10.4. Теплоемкость органических соединений в зависимости от температуры при нормальном давлении 154
10.5. Теплоемкость C_P и отношение C_P/C_V для газов и жидкостей при различных значениях температуры и давления 155
10.6. Растворы и жидкие смеси 161
10.7. Сплавы 162
10.8. Технические материалы 164
10.9. Теплоемкость при фазовых переходах 165
Список литературы 170

Глава 11. Фазовые переходы, плавление и кипение

11.1. Температура и скрытая теплота фазовых переходов 171
11.2. Плавление 185
11.3. Кипение 192
11.4. Кипение и затвердевание растворов 196
Список литературы 198

Глава 12. Давление пара различных веществ

12.1. Вода и ртуть 199
12.2. Элементы и простейшие соединения . 200
12.3. Неорганические вещества 203
12.4. Органические вещества 211
Список литературы 241

Глава 13. Критические параметры веществ и вириальные коэффициенты

13.1. Вириальные коэффициенты . . . 242
13.2. Параметры критической точки перехода жидкость — пар 245
Список литературы 249

Глава 14. Коэффициент поверхностного натяжения

14.1. Жидкости 250
14.2. Твердые тела 255
Список литературы 255

III. КИНЕТИЧЕСКИЕ ЯВЛЕНИЯ

Глава 15. Теплопроводность

15.1. Элементы 256
15.2. Газы и пары 261
15.3. Жидкости 262
15.4. Сплавы 264
15.5. Огнеупорные материалы и высокотемпературные композиции ядерного горючего . 267
15.6. Строительные и теплоизоляционные материалы, древесные породы и прочие вещества 269
Список литературы 271

Глава 16. Вязкость

16.1. Вязкость газов и паров при давлении выше атмосферного 272
Водород 272
Азот 272
Кислород 272
Гелий 272
Аргон 272
Воздух 273
Окись углерода 273
Углекислый газ 273
16.2. Вязкость газов при давлении ниже атмосферного 274
16.3. Вязкость газов и паров при различных температурах 274
16.4. Вязкость водяного пара 278
16.5. Константы Сезерленда 279
16.6. Вязкость элементов и неорганических соединений 279
16.7. Кинематическая вязкость воды . . . 281
16.8. Вязкость органических соединений . . 281
16.9. Вязкость кремнийорганических соединений 284
16.10. Вязкость углеводородов 284
16 11. Вязкость нуклидов и их соединений . . 286
Список литературы 287

Глава 17. Диффузия атомов и молекул

17.1. Диффузия в газах 287
Коэффициент самодиффузии газов . . 287
Коэффициенты взаимной диффузии в газах 288
Диффузия заряженных частиц в газе. Амбиполярная диффузия 290
17.2. Диффузия в жидкостях 291
17.3. Диффузия в твердых телах 296
Список литературы 301

Глава 18. Эффективные размеры атомов и ионов

Список литературы 303

IV. ЭЛЕКТРИЧЕСТВО И МАГНЕТИЗМ

Глава 19. Электрические свойства металлов и сплавов

19.1. Введение 304
19.2. Чистые металлы 304
19.3. Влияние давления на проводимость металлов 309
19.4. Сверхпроводники 310
19.5. Электрические свойства некоторых металлов и сплавов 312
19.6. Электрические свойства специальных электротехнических сплавов 317
19.7. Электрические свойства сплавов железа и меди 319
Список литературы 320

Глава 20. Электрические свойства диэлектриков

20.1. Введение 320
20.2 Проводимость, пробивное напряжение, диэлектрическая проницаемость и тангенс угла диэлектрических потерь 320
20.3. Электрические свойства наиболее распространенных диэлектриков 328
20.4. Сегнетоэлектрики 333
20.5. Пьезоэлектрики 335
Список литературы 340

Глава 21. Электрические свойства полупроводников

21.1. Введение 341
21.2. Элементарные полупроводники . . 343
21.3. Кремний и германий 346
21.4. Полупроводниковые соединения: . . 357
Соединения типа $A^{I}B^{I}$ — $A^{I}B^{VII}$ . . 357
Соединения типа $A^{II}B^{IV}$ — $A^{II}B^{VII}$ . . 362
Соединения типа $A^{III}B^{IV}$ — $A^{III}B^{VI}$ . . 381
Соединения типа $A^{IV}B^{IV}$ — $A^{IV}B^{VI}$ . . 400
Соединения типа $A^{V}B^{V}$ — $A^{V}B^{VII}$ . . 409
Соединения типа $A^{VI}B^{IV}$ и $A^{VI}B^{VI}$. 410
Соединения типа $A^{VII}B^{III}$ и $A^{VII}B^{VI}$. 414
Соединения типа $A^{VIII}B^{V}$ — $A^{VIII}B^{VI}$ . . 414
Список литературы 415

Глава 22. Потенциалы ионизации и энергии диссоциации

22.1. Потенциалы ионизации атомов 419
22.2. Потенциалы ионизации молекулов и радикалов 421
22.3. Сродство к электрону и протону 423
22.4 Фотоионизация атомов 424
22.5 Переразрядка при атомных столкновениях 425
22.6 Энергии диссоциации молекул 425

22.7. Энергии разрыва связей в молекулах и радикалах 426
Список литературы 427

Глава 23. Газовый разряд

23.1. Введение 427
23.2. Процессы на электродах 427
23.3. Подвижность и рекомбинация заряженных частиц 428
23.4. Слаботочные разряды 431
23.5. Дуговой разряд 433
23.6. Низкотемпературная плазма 436
23.7. Искровой разряд 439
23.8. Высокочастотный разряд 442
Список литературы 444

Глава 24. Электронная эмиссия

24.1. Введение 444
24.2. Работа выхода 444
24.3. Термоэлектронная эмиссия . . . 445
Свойства термокатодов 447
24.4. Фотоэлектронная эмиссия 450
Свойства фотокатодов 451
24.5. Вторичная электронная эмиссия . . 457
Коэффициенты вторичной электронной эмиссии и неупругого отражения электронов . . . 457
Эффективные эмиттеры вторичных электронов 459
24.6. Автоэлектронная эмиссия 460
Список литературы 461

Глава 25. Термоэлектрические явления

25.1. Эффект Зеебека 461
25.2. Эффект Пельтье 465
25.3. Эффект Томсона 466
Список литературы 467

Глава 26. Гальваномагнитные и термомагнитные явления

26.1. Введение 467
26.2. Коэффициенты Холла для металлов и сплавов 470
26.3. Гальваномагнитные явления в мышьяке, висмуте, сурьме и их сплавах 475
26.4. Гальвано- и термомагнитные явления в ферромагнетиках 478
26.5. Влияние магнитного поля на сопротивление металлов при различных температурах . . 496
Список литературы 505

Глава 27. Магнитные свойства диа- и парамагнетиков

Список литературы 520

Глава 28. Магнитные свойства ферромагнетиков

28.1. Введение 523
28.2. Основные физические характеристики ферромагнетиков 523
Намагниченность насыщения и точка Кюри . 523
Намагниченность ферромагнетиков как функция напряженности магнитного поля и температуры 526
Магнитная анизотропия 531
Магнитострикция 534
Коэффициент размагничивания 545
28.3. Ферромагнетики, имеющие важное значение в технике 546
Магнитомягкие материалы 546
Магнитотвердые материалы 557
Список литературы 562

Глава 29. Ферриты

29.1. Ферриты-шпинели 562
Простые ферриты 564
Смешанные ферриты 566
29.2. Ферриты со структурой граната . . 568
Кристаллографические и другие характеристики 574
Магнитные свойства 577
29.3. Гексагональные ферриты 585
29.4. Некоторые ферро- и ферримагнитные диэлектрики 592
29.5. Марки и основные параметры некоторых ферритов, применяемых в СССР. . . . 595
Список литературы 597

Глава 30. Антиферромагнетики

30.1. Введение 600
30.2. Магнитные и магнитооптические свойства легкоосных антиферромагнетиков 600
30.3. Основные магнитные свойства легкоплоскостных антиферромагнетиков 603
30.4. Метамагнетики 604
30.5. Антиферромагнетики с взаимодействием Дзялошинского 604
30.6. Пьезомагнетики и магнитоэлектрики 605
30.7. Органические антиферромагнетики . 605
30.8. Некоторые свойства антиферромагнетиков 605
Список литературы 630

V. ОПТИКА И РЕНТГЕНОВСКОЕ ИЗЛУЧЕНИЕ

Глава 31. Оптические свойства веществ

31.1. Показатели преломления 634
Газы 634
Жидкости 635
Оптические стекла 635
Кварц 636
Кристаллы 637
Различные материалы 639
31.2. Коэффициенты отражения, просветление оптических изделий 639
31.3. Области прозрачности и коэффициенты поглощения 641
31.4. Излучение 643
Излучение абсолютно черного тела . . 643
Тепловое излучение тел 645
Яркость некоторых источников света . 647
31.5. Светочувствительность фотографических материалов 647
Список литературы 647

Глава 32. Спектры элементов и некоторые параметры молекул

32.1. Классификация спектров атомов и молекул 648
32.2. Переход от длин волн, измеренных в воздухе, к длинам волн в вакууме . . . 651
32.3. Вероятности радиационных переходов в атоме водорода 652
32.4. Спектры некоторых элементов и благородных газов 654
32.5. Стандарты длин волн 661
32.6. Параметры молекул 667
Дипольные моменты молекул 667
Электронные термы двухатомных молекул 668
Список литературы 672

Глава 33. Лазеры

33.1. Газовые лазеры на нейтральных атомах 673
33.2. Ионные лазеры 698
33.3. Молекулярные газовые лазеры . . 718
33.4. Лазеры на примесных кристаллах . 738
33.5. Лазеры на основе стекол 752
33.6. Лазеры на полупроводниках . . . 755
33.7. Жидкостные лазеры 757
Лазеры на хелатах редкоземельных элементов 757
Апротонные лазеры 758
33.8. Лазеры на химических красителях . 759
Список литературы 761

Глава 34. Электро-, магнито- и пьезооптические эффекты

34.1. Линейный электрооптический эффект (эффект Поккельса) 761
34.2. Линейный магнитооптический эффект (эффект Фарадея) 767
34.3. Квадратичный электрооптический эффект (эффект Керра) 775
34.4. Пьезооптический эффект 775
34.5. Оптическая активность 778
34.6. Нелинейные оптические эффекты . . 779
Генерация второй гармоники в кристаллах 779
Показатели преломления нелинейных кристаллов 786
Вынужденное рассеяние света 794
Характерные сдвиги частот Ω при ВКР . 794
Список литературы 796

Глава 35. Рентгеновское излучение

35.1. Основные определения и обозначения в спектроскопии рентгеновского излучения . . 796
35.2. Закон Мозли и правило спин-дублетов для диаграммных линий 797
35.3. Таблицы диаграммных линий и краев поглощения линий рентгеновского излучения для различных элементов. 797
K-серия 797
L-серия 799
M-серия 803
N-серия 804
35.4. Относительные интенсивности линий 805
35.5. Ширина и форма линий рентгеновского излучения 806
35.6. Поглощение рентгеновского излучения при прохождении через вещество 809
Список литературы 809

VI. ЯДЕРНАЯ ФИЗИКА

Глава 36. Элементарные частицы

36.1. Введение 810
36.2. Основные группы и характеристики элементарных частиц 810
36.3. Унитарная симметрия и соотношение между массами элементарных частиц . . 811
36.4. Символика элементарных частиц . . 811
36.5. Элементарные частицы, стабильные по отношению к сильным распадам 812
36.6. Мезоны и мезонные резонансы . . . 818
36.7. Барионы и барионные резонансы . . 819
36.8. Магнитные моменты элементарных частиц 824
36.9. Параметры распадов элементарных частиц 824
Список литературы 824

Глава 37. Ядерные свойства нуклидов

37.1. Таблица изотопов 824
37.2. Эталонные энергии γ-квантов 866
37.3. Эталонные группы α-частиц 867
37.4. Квантовые характеристики ядер 867
37.5. Радиоактивные ряды 872
Список литературы 873

Глава 38. Мёссбауэровские ядра

38.1. Введение 874
38.2. Характеристики мёссбауэровских ядер 874
38.3. Параметры мёссбауэровских спектров 880
38.4. Изомерный сдвиг 883
Список литературы 883

Глава 39. Реакции под действием нейтронов

39.1. Основные характеристики нейтрона . 883
39.2. Характеристики пороговых реакций. Энергии возбужденных состояний ядер . . . 883
39.3. Реакции (n, γ) 884
39.4. Реакции (n, n') 886
39.5. Реакции $(n, 2n)$ 887
39.6. Реакции с испусканием заряженных частиц 888
39.7. Характеристики пороговых детекторов нейтронов 889
Список литературы 891

Глава 40. Реакции, приводящие к образованию нейтронов

40.1. Энергия связи нейтронов 891
40.2. Реакции (γ, n) 891
40.3. Реакции (p, n) 893
40.4. Реакции (d, n) 899
40.5. Реакции (α, n) 901
40.6. Реперные точки, используемые для калибровки пучков ускорителей 903
Список литературы 903

Глава 41. Прохождение нейтронов через вещество

41.1. Сечения взаимодействия нейтронов с веществом для нейтронов тепловых энергий 904
41.2. Графики полных нейтронных сечений в интервале энергий $0{,}01—10^7$ *эв* 914
41.3. Резонансные интегралы захвата . . 923
41.4. Диффузионные постоянные веществ . . 924
Замедление нейтронов 924
Диффузия нейтронов 926
41.5. Когерентные явления при прохождении нейтронов через вещество 928
Список литературы 929

Глава 42. Деление ядер

42.1. Введение 929
42.2. Спонтанное деление 930
42.3. Сечения деления ядер 931
42.4. Нейтроны деления 931
42.5. Мгновенное γ-излучение, сопровождающее деление 935
42.6. Энергия, выделяемая при делении . . 936
42.7. Запаздывающие нейтроны 937
42.8. Продукты деления ядер 938
42.9. Фотоделение и деление ядер под действием заряженных частиц 939
Список литературы 942

Глава 43. Термоядерные реакции

43.1. Формула Гамова 942
43.2. Энергетические выходы термоядерных реакций 943

43.3. Звездные циклы 946
43.4. Эффективные сечения термоядерных реакций 947
Список литературы 950

Глава 44. Прохождение ионизирующего излучения через вещество

44.1. Основные обозначения и определения 952
44.2. Кинетические характеристики релятивистских частиц 952
44.3. Прохождение тяжелых заряженных частиц через вещество 952
Прохождение протонов через вещество 953
Пробег дейтонов, α-частиц и других тяжелых заряженных частиц 953
Прохождение осколков деления через вещество 955
44.4. Прохождение быстрых электронов через вещество 956
44.5. Прохождение γ-излучения через вещество 960
Прохождение узкого монохроматического пучка γ-квантов через вещество 961
Ослабление широких пучков γ-квантов . . . 964
Защита от γ-излучения 964
44.6. Относительная биологическая эффективность и допустимые уровни различных видов излучения 965
Список литературы 966

Глава 45. Космическое излучение

45.1. Введение 966
45.2. Первичное космическое излучение . 967
Состав 967
Энергетический спектр 968
45.3. Вторичное космическое излучение . . 968
Высотный ход интенсивности космического излучения 968
Геомагнитные явления 969
Электронно-фотонные каскадные ливни . 971
Список литературы 972

VII. АСТРОНОМИЯ И ГЕОФИЗИКА

Глава 46. Астрономия и астрофизика

46.1. Некоторые астрономические постоянные 973
46.2. Солнце 973
Характеристики Солнца 973
Положение в Галактике 973
Солнце как звезда 973
Излучение 974
Радиоизлучение 974
Солнечные пятна 975
46.3. Планеты и спутники 975
Орбиты планет 975
Физические характеристики планет . . 975
Фотометрические характеристики планет 976
Температурные условия на поверхности планет 976
Атмосферы планет 976
Спутники планет 977
Система колец Сатурна 977
Луна 977
Малые планеты 978
Кометы 978
Метеоры 979
46.4. Звезды 979
Спектральная классификация звезд . . 979
Звездные величины 980
Диаграмма Рессела-Герцшпрунга . . 980
Ближайшие звезды 981
Самые яркие звезды 981
Переменные звезды 981
Пульсары 983
Белые карлики 983
Гиганты 984
46.5. Галактика и Вселенная 984
Галактика 984
Межзвездная среда 985
Поглощение света звезд, межзвездная пыль 986
Межзвездный газ 986
Излучение и поля в межзвездном пространстве 986
Внегалактические туманности (галактики) 986
Вселенная 987
46.6. Космическое радиоизлучение . . . 987
Спектральный состав радиоизлучения различных участков неба 987
Некоторые галактические источники радиоизлучения 988
Внегалактические источники радиоизлучения 988
Квазары 988
46.7. Космические полеты и искусственные спутники Земли 989
46.8. Космическая распространенность элементов 990
Список литературы 991

Глава 47. Геофизика

47.1. Общие характеристики Земли . . . 991
Фигура Земли 991
Строение Земли 992
47.2. Литосфера 992
Состав 992
Гравиметрия 994
Сейсмология 995
Земной магнетизм 996
Геотермика 998
47.3. Гидросфера 998
Распределение запасов воды на поверхности Земли 998
Состав океанической и пресной воды . 999
Плотность и электропроводность воды . 999
Физические свойства морского льда . . . 1000
Звук и свет в океане 1000
Тепловой баланс океана 1000
47.4. Атмосфера 1000
Строение атмосферы 1000
Стандартная атмосфера 1001
Радиационный баланс атмосферы . . 1003
Электрические явления в атмосфере . . 1004
Стратификация атмосферы в зависимости от системы ионизации 1005
Список литературы 1005

ОТ РЕДАКТОРА

Развитие физических наук в последние десятилетия характеризуется неудержимым увеличением потока информации. Эта информация нуждается в систематическом обобщении и концентрации. Таблицы физических величин естественным образом концентрируют ту часть потока информации, которая допускает числовое выражение.

По отдельным узким разделам физики изданы и продолжают издаваться специализированные справочники и таблицы. К таким изданиям обычно обращаются специалисты.

Предлагаемые таблицы предназначены для широкого круга читателей, которым нужно получить информацию из областей физики, лежащих вне их более или менее узкой специальности. Поэтому в предлагаемых таблицах читатель не найдет, например, подробных данных ни о спектрах элементов, ни о свойствах растворов и т. п. «Таблицы физических величин» не претендуют на конкуренцию с такими многотомными изданиями, как знаменитый справочник Landolt-Börnstein либо Technical Tables и др. Для повседневного пользования обычно требуется широко доступный справочник умеренного объема. Удовлетворению этой потребности и призваны служить предлагаемые читателю таблицы.

Составители понимают, что таблицы далеки от совершенства, и надеются, что читатели своими критическими замечаниями будут способствовать улучшению этой книги в последующих изданиях.

И. К. КИКОНИН

I. ОБЩИЙ РАЗДЕЛ

ГЛАВА 1

ЕДИНИЦЫ ИЗМЕРЕНИЯ ФИЗИЧЕСКИХ ВЕЛИЧИН

1.1. МЕЖДУНАРОДНАЯ СИСТЕМА ЕДИНИЦ (СИ)

В октябре 1960 г. XI Генеральная конференция по мерам и весам приняла Международную систему единиц, обозначаемую символом СИ (SI). Эта система утверждена в СССР как Государственный стандарт (ГОСТ 9867—61 «Международная система единиц») и должна предпочтительно применяться во всех областях науки, техники и народного хозяйства.

Международная система единиц измерений физических величин—единая универсальная система. Она связывает единицы измерения механических, тепловых, электрических, магнитных и других величин. В состав системы входят шесть основных единиц (метр, килограмм, секунда, ампер, градус Кельвина, свеча), две дополнительные (радиан и стерадиан) и 27 важнейших производных единиц из различных областей науки (табл. 1.1). В государственных стандартах СССР применяется понятие размера единицы, являющегося количественной мерой физической величины, содержащейся в единице измерения. Размер производных единиц определяется законами, связывающими физические величины, и выражен через размер основных или других производных единиц. Например, единица силы ньютон (*н*) установлена на основе второго закона Ньютона: она равна силе, которая сообщает ускорение 1 *м/сек*^{2} массе 1 *кг*. При выборе размера соблюдается в основном условие когерентности (связности) системы: в уравнениях, определяющих единицы измерения производных величин, коэффициент пропорциональности должен быть величиной безразмерной и равен единице.

В Международной системе единиц четко разграничены единицы массы (килограмм) и силы (ньютон). Для измерения механической, тепловой и электрической энергий установлена одна универсальная единица — джоуль.

Государственный стандарт допускает применение других систем единиц, когда это удобно и необходимо, но преимущественно должна применяться система единиц СИ.

В настоящее время вводится новый стандарт единиц физических величин. Изменения наименований физических величин и их новые обозначения приведены в примечании.

Определение основных единиц системы СИ

Метр—длина, равная 1650763,73 длины волн излучения в вакууме, соответствующего переходу между уровнями $2p_{10}$ и $5d_5$ атома ^{86}Кг.

Килограмм — единица массы — представлен массой международного прототипа килограмма.

Секунда — 1/31556925,9747 часть тропического года для 1900 г. января 0 в 12 *ч* эфемеридного времени.

Ампер — сила неизменяющегося тока, который проходя по двум параллельным прямолинейным проводникам бесконечной длины и ничтожно малого кругового сечения, расположенным на расстоянии 1 *м* один от другого в вакууме, вызывает между этими проводниками силу, равную $2 \cdot 10^{-7}$ единиц силы Международной системы на каждый метр длины.

Градус Кельвина — единица измерения температуры по термодинамической температурной шкале, в которой для температуры тройной точки воды установлено значение 273,16° К (точно).

Свеча — единица силы света, значение которой принимается таким, чтобы яркость полого излучателя при температуре затвердевания платины была равна 60 *св/см*^{2}.

Таблица 1.1

Международная система единиц (СИ)

Наименование величины	Единица измерения	Сокращенное обозначение		Размер единицы
		русскими буквами	латинскими буквами	
Основные единицы				
Длина	метр	*м*	m	
Масса	килограмм	*кг*	kg	
Время	секунда	*сек*	s	
Сила электрического тока	ампер	*а*	A	
Термодинамическая температура	градус Кельвина	°К	°K	
Сила света	свеча	*св*	cd	
Дополнительные единицы				
Плоский угол	радиан	*рад*	rad	
Телесный угол	стерадиан	*стер*	sr	
Производные единицы				
Площадь	квадратный метр	$м^2$	m^2	$(1\ м)^2$
Объем	кубический метр	$м^3$	m^3	$(1\ м)^3$
Частота	герц	*гц*	Hz	$1:(1\ сек)$
Плотность (объемная масса)	килограмм на кубический метр	$кг/м^3$	kg/m^3	$(1\ кг):(1\ м)^3$
Линейная скорость	метр в секунду	*м/сек*	m/s	$(1\ м):(1\ сек)$
Угловая скорость	радиан в секунду	*рад/сек*	rad/s	$(1\ рад):(1\ сек)$
Линейное ускорение	метр на секунду в квадрате	$м/сек^2$	m/s^2	$(1\ м):(1\ сек)^2$
Угловое ускорение	радиан на секунду в квадрате	$рад/сек^2$	rad/s^2	$(1\ рад):(1\ сек)^2$
Сила	ньютон	*н*	N	$(1\ кг)\cdot(1\ м):(1\ сек)$
Давление (механическое напряжение)	ньютон на квадратный метр	$н/м^2$	N/m^2	$(1\ н):(1\ м)^2$
Динамическая вязкость	ньютон-секунда на квадратный метр	$н\cdot сек/м^2$	$N\cdot s/m^2$	$(1\ н)\cdot(1\ сек):(1\ м)^2$
Кинематическая вязкость	квадратный метр на секунду	$м^2/сек$	m^2/s	$(1\ м)^2:(1\ сек)$
Работа, энергия, количество теплоты	джоуль	*дж*	J	$(1\ н)\cdot(1\ м)$
Мощность	ватт	*вт*	W	$(1\ дж):(1\ сек)$
Количество электричества, электрический заряд	кулон	*к*	C	$(1\ а)\cdot(1\ сек)$
Электрическое напряжение, разность электрических потенциалов, электродвижущая сила	вольт	*в*	V	$(1\ вт):(1\ а)$
Напряженность электрического поля	вольт на метр	*в/м*	V/m	$(1\ в):(1\ м)$
Электрическое сопротивление	ом	*ом*	Ω	$(1\ в):(1\ а)$
Электрическая емкость	фарада	*ф*	F	$(1\ к):(1\ в)$
Магнитный поток	вебер	*вб*	Wb	$(1\ к)\cdot(1\ м)$
Индуктивность	генри	*гн*	H	$(1\ вб):(1\ а)$
Магнитная индукция	тесла	*тл*	T	$(1\ вб):(1\ м)^2$
Напряженность магнитного поля	ампер на метр	*а/м*	A/m	$(1\ а):(1\ м)$
Магнитодвижущая сила	ампер	*а*	A	$(1\ а)$
Световой поток	люмен	*лм*	lm	$(1\ св)\cdot(1\ стер)$
Яркость	свеча на квадратный метр или нит	$св/м^2$ или *нт*	cd/m^2, nt	$(1\ св):(1\ м)^2$
Освещенность	люкс	*лк*	lx	$(1\ лм):(1\ м)^2$

Таблица 1.2

Приставки для образования кратных и дольных единиц измерения

Приставка	Числовое значение	Сокращенное обозначение		Приставка	Числовое значение	Сокращенное обозначение	
		русскими буквами	латинскими или греческими буквами			русскими буквами	латинскими буквами
Пико	10^{-12}	*п*	p	Дека	10	*да*	da
Нано	10^{-9}	*н*	n	Гекто	10^{2}	*г*	h
Микро	10^{-6}	*мк*	μ	Кило	10^{3}	*к*	k
Милли	10^{-3}	*м*	m	Мега	10^{6}	*М*	M
Санти	10^{-2}	*с*	c	Гига	10^{9}	*Г*	G
Деци	10^{-1}	*д*	d	Тера	10^{12}	*Т*	T

Таблица 1.3

Единицы измерения механических величин

Наименование	Обозначение, формула определения		МКС			СГС			МКГСС		
	МКС, СГС	МГГСС	Сокращенное обозначение		Размерность в системе МКС	Сокращенное обозначение		Размерность в системе СГС	Сокращенное обозначение		Размерность в системе МКГСС
			русскими буквами	латинскими буквами		русскими буквами	латинскими буквами		русскими буквами	латинскими буквами	
Длина	l, r		*м*	m	—	*см*	cm	—	*м*	m	—
Время	t		*сек*	s	—	*сек*	s	—	*сек*	s	—
Масса	m	$m=F/a$	*кг*	kg	—	*г*	g	—	$кГ \cdot сек^2/м$	$kG \cdot s^2/m$	$м^{-1} \cdot кГ \cdot сек^2$
Сила	$F=ma$	F	*н*	N	$м \cdot кг \cdot сек^{-2}$	*дин*	dyn	$см \cdot г \cdot сек^{-2}$	*кГ*	kG	—
Плоский угол	$\alpha = l/r$		*рад*	rad	—	*рад*	rad	—	*рад*	rad	—
Частота	$\nu = 1/t$		*гц*	Hz	$сек^{-1}$	*гц*	Hz	$сек^{-1}$	*гц*	Hz	$сек^{-1}$
Угловая скорость	$\omega = \alpha/t$		*рад/сек*	rad/s	$сек^{-1}$	*1/сек*	1/s	$сек^{-1}$	*рад/сек*	rad/s	$сек^{-1}$
Угловое ускорение	$\varepsilon = \omega/t$		$рад/сек^2$	rad/s^2	$сек^{-2}$	$1/сек^2$	$1/s^2$	$сек^{-2}$	$рад/сек^2$	rad/s^2	$сек^{-2}$
Скорость	$v = l/t$		*м/сек*	m/s	$м \cdot сек^{-1}$	*см/сек*	cm/s	$см \cdot сек^{-1}$	*м/сек*	m/s	$м \cdot сек^{-1}$
Ускорение	$a = \Delta v/\Delta t$		$м/сек^2$	m/s^2	$м \cdot сек^{-2}$	$см/сек^2$	cm/s^2	$см \cdot сек^{-2}$	$м/сек^2$	m/s^2	$м \cdot сек^{-2}$
Площадь	$S = l^2$		$м^2$	m^2	$м^2$	$см^2$	cm^2	$см^2$	$м^2$	m^2	$м^2$
Объем	$V = l^3$		$м^3$	m^3	$м^3$	$см^3$	cm^3	$см^3$	$м^3$	m^3	$м^3$
Плотность	$\rho = m/V$		$кг/м^3$	kg/m^3	$м^{-3} \cdot кг$	$г/см^3$	g/cm^3	$см^{-3} \cdot г$	$кГ \cdot сек^2/м^4$	$kG \cdot s^2/m^4$	$м^{-4} \cdot кГ \cdot сек^2$
Удельный вес*	$\gamma = mg/V$		$н/м^3$	N/m^3	$м^{-2} \cdot кг \cdot сек^{-2}$	$дин/см^3$	dyn/cm^3	$см^{-2} \cdot г \cdot сек^{-2}$	$кГ/м^3$	kG/m^3	$м^{-3} \cdot кГ$
Момент инерции	$J = mr^2$		$кг \cdot м^2$	$kg \cdot m^2$	$м^2 \cdot кг$	$г \cdot см^2$	$g \cdot cm^2$	$см^2 \cdot г$	$кГ \cdot м \cdot сек^2$	$kG \cdot m \cdot s^2$	$м \cdot кГ \cdot сек^2$
Количество движения	$i = mv$		*кг · м/сек*	kg · m/s	$м \cdot кг \cdot сек^{-1}$	*г · см/сек*	g · cm/s	$см \cdot г \cdot сек^{-1}$	*кГ · сек*	kG · s	*кГ · сек*
Момент силы	$M = Fl$		*н · м*	N · m	$м^2 \cdot кг \cdot сек^{-2}$	*дин · см*	dyn · cm	$см^2 \cdot г \cdot сек^{-2}$	*кГ · м*	kG · m	*м · кГ*
Работа, энергия	$A = Fl \cos\alpha$		*дж*	J	$м^2 \cdot кг \cdot сек^{-2}$	*эрг*	erg	$см^2 \cdot г \cdot сек^{-2}$	*кГ · м*	kG · m	*м · кГ*
Мощность	$W = A/t$		*вт*	W	$м^2 \cdot кг \cdot сек^{-3}$	*эрг/сек*	erg/s	$см^2 \cdot г \cdot сек^{-3}$	*кГ · м/сек*	kG · m/s	$м \cdot кГ \cdot сек^{-1}$
Давление	$P = F/S$		$н/м^2$	N/m^2	$м^{-1} \cdot кг \cdot сек^{-2}$	$дин/см^2$	dyn/cm^2	$см^{-1} \cdot г \cdot сек^2$	$кГ/м^2$	kG/m^2	$м^{-2} \cdot кГ$
Динамическая вязкость	$\eta = (F/S) \times (\Delta l/\Delta v)$		$н \cdot сек/м^2$	$N \cdot s/m^2$	$м^{-1} \cdot кг \cdot сек^{-1}$	*пуаз*	P	$см^{-1} \cdot г \cdot сек^{-1}$	$кГ \cdot сек/м^2$	$kG \cdot s/m^2$	$м^{-2} \cdot кГ \cdot сек$
Кинематическая вязкость	$\zeta = \eta/\rho$		$м^2/сек$	m^2/s	$м^2 \cdot сек^{-1}$	*ст*	st	$см^2 \cdot сек^{-1}$	$м^2/сек$	m^2/s	$м^2 \cdot сек^{-1}$

* g — ускорение свободного падения.

1.2 ЕДИНИЦЫ ИЗМЕРЕНИЯ МЕХАНИЧЕСКИХ ВЕЛИЧИН

Государственный стандарт допускает для измерения механических величин три системы единиц:

1) система СИ (МКС), основные единицы которой метр, килограмм, секунда;

2) система СГС, основные единицы которой сантиметр, грамм, секунда;

3) система МКГСС, основные единицы которой метр, килограмм-сила; секунда.

Преимущественно должна применяться система МКС. Вместе с тем допускается применение внесистемных единиц: длины — микрон; массы — тонна и центнер; времени — час и минута; плоского угла — градус, минута и секунда; площади — ар и гектар; объема — литр; угла поворота — оборот; угловая скорость — оборот в минуту и оборот в секунду; давление — бар и техническая атмосфера и т. д.

В табл. 1.3 приведены наименования основных механических величин, их обозначения, формулы, с помощью которых определяют эти величины, единицы измерения и размерности* в системах МКС, СГС и МКГСС.

* Размерность устанавливает соотношение данной производной единицы с основными единицами системы на основании определяющих уравнений. Формулы размерности имеют важное значение при проверке правильности математических уравнений, выражающих функциональные зависимости между числовыми значениями физических величин.

Таблица 1.4

Соотношение между единицами длины

Единица измерения	Сокращенное обозначение	*X*-единица	Ангстрем	Нанометр	Микрометр	Миллиметр	Сантиметр	Дюйм
X-единица	*X*	1	$1{,}00206\cdot10^{-3}$	$1{,}00206\cdot10^{-4}$	$1{,}00206\cdot10^{-7}$	$1{,}00206\cdot10^{-10}$	$1{,}00206\cdot10^{-11}$	$3{,}945\cdot10^{-12}$
Ангстрем	Å	$0{,}9979\cdot10^{3}$	1	10^{-1}	10^{-4}	10^{-7}	10^{-8}	$3{,}937\cdot10^{-9}$
Нанометр (миллимикрон)	*нм*	$0{,}9979\cdot10^{4}$	10	1	10^{-3}	10^{-6}	10^{-7}	$3{,}937\cdot10^{-8}$
Микрометр (микрон)	*мкм*	$0{,}9979\cdot10^{7}$	10^{4}	10^{3}	1	10^{-3}	10^{-4}	$3{,}937\cdot10^{-5}$
Миллиметр	*мм*	$0{,}9979\cdot10^{10}$	10^{7}	10^{6}	10^{3}	1	10^{-1}	$3{,}937\cdot10^{-2}$
Сантиметр	*см*	$0{,}9979\cdot10^{11}$	10^{8}	10^{7}	10^{4}	10	1	0,3937
Дюйм	*дюйм*	$0{,}2535\cdot10^{12}$	$2{,}540\cdot10^{8}$	$2{,}540\cdot10^{7}$	$2{,}540\cdot10^{4}$	25,40	2,540	1
Фут	*фут*	$0{,}3042\cdot10^{13}$	$3{,}048\cdot10^{9}$	$3{,}048\cdot10^{8}$	$3{,}048\cdot10^{5}$	$3{,}048\cdot10^{2}$	30,48	12
Метр	*м*	$0{,}9979\cdot10^{13}$	10^{10}	10^{9}	10^{6}	10^{3}	10^{2}	39,37
Ярд	*ярд*	$0{,}9125\cdot10^{13}$	$9{,}1440\cdot10^{9}$	$9{,}1440\cdot10^{8}$	$9{,}1440\cdot10^{5}$	$9{,}1440\cdot10^{2}$	91,44	36
Километр	*км*	$0{,}9979\cdot10^{16}$	10^{13}	10^{12}	10^{9}	10^{6}	10^{5}	$3{,}937\cdot10^{4}$
Сухопутная миля	—	$1{,}6060\cdot10^{16}$	$1{,}6093\cdot10^{13}$	$1{,}6093\cdot10^{12}$	$1{,}6093\cdot10^{9}$	$1{,}6093\cdot10^{6}$	$1{,}6093\cdot10^{5}$	$6{,}336\cdot10^{4}$
Морская миля	—	$1{,}8492\cdot10^{16}$	$1{,}853\cdot10^{13}$	$1{,}853\cdot10^{12}$	$1{,}853\cdot10^{9}$	$1{,}853\cdot10^{6}$	$1{,}853\cdot10^{5}$	$7{,}296\cdot10^{4}$
Световой год	—	$9{,}441\cdot10^{28}$	$9{,}46\cdot10^{25}$	$9{,}46\cdot10^{24}$	$9{,}46\cdot10^{21}$	$9{,}46\cdot10^{18}$	$9{,}46\cdot10^{17}$	$3{,}724\cdot10^{17}$

Продолжение табл. 1.4

Единица измерения	Фут	Метр	Ярд	Километр	Сухопутная миля	Морская миля	Световой год
X-единица	$3{,}2876\cdot10^{-13}$	$1{,}00206\cdot10^{-13}$	$1{,}0959\cdot10^{-13}$	$1{,}00206\cdot10^{-16}$	$6{,}2267\cdot10^{-17}$	$5{,}41\cdot10^{-17}$	$1{,}06\cdot10^{-29}$
Ангстрем	$3{,}2808\cdot10^{-10}$	10^{-10}	$1{,}0936\cdot10^{-10}$	10^{-13}	$6{,}214\cdot10^{-14}$	$5{,}40\cdot10^{-14}$	$1{,}06\cdot10^{-26}$
Нанометр (миллимикрон)	$3{,}2808\cdot10^{-9}$	10^{-9}	$1{,}0936\cdot10^{-9}$	10^{-12}	$6{,}214\cdot10^{-13}$	$5{,}40\cdot10^{-13}$	$1{,}06\cdot10^{-25}$
Микрометр (микрон)	$2{,}2808\cdot10^{-6}$	10^{-6}	$1{,}0936\cdot10^{-6}$	10^{-9}	$6{,}214\cdot10^{-10}$	$5{,}40\cdot10^{-10}$	$1{,}06\cdot10^{-22}$
Миллиметр	$3{,}2808\cdot10^{-3}$	10^{-3}	$1{,}0936\cdot10^{-3}$	10^{-6}	$6{,}214\cdot10^{-7}$	$5{,}40\cdot10^{-7}$	$1{,}06\cdot10^{-19}$
Сантиметр	$3{,}2808\cdot10^{-2}$	10^{-2}	$1{,}0936\cdot10^{-2}$	10^{-5}	$6{,}214\cdot10^{-6}$	$5{,}40\cdot10^{-6}$	$1{,}06\cdot10^{-18}$
Дюйм	$8{,}3333\cdot10^{-2}$	$2{,}540\cdot10^{-2}$	$2{,}7777\cdot10^{-2}$	$2{,}5401\cdot10^{-5}$	$1{,}5787\cdot10^{-5}$	$1{,}37\cdot10^{-5}$	$2{,}68\cdot10^{-18}$
Фут	1	0,3048	0,3333	$3{,}048\cdot10^{-4}$	$1{,}8939\cdot10^{-4}$	$1{,}64\cdot10^{-4}$	$3{,}22\cdot10^{-17}$
Метр	3,2808	1	1,0936	10^{-3}	$6{,}2138\cdot10^{-4}$	$5{,}40\cdot10^{-4}$	$1{,}06\cdot10^{-16}$
Ярд	3	0,91440	1	$9{,}1440\cdot10^{-4}$	$5{,}6818\cdot10^{-4}$	$4{,}93\cdot10^{-4}$	$9{,}7\cdot10^{-17}$
Километр	$3{,}2808\cdot10^{3}$	10^{3}	$1{,}0936\cdot10^{3}$	1	0,62138	0,540	$1{,}06\cdot10^{-13}$
Сухопутная миля	$5{,}280\cdot10^{3}$	$1{,}6093\cdot10^{3}$	$1{,}760\cdot10^{3}$	1,6093	1	0,86835	$1{,}7\cdot10^{-13}$
Морская миля	$6{,}080\cdot10^{3}$	$1{,}853\cdot10^{3}$	$2{,}0265\cdot10^{3}$	1,853	1,1516	1	$1{,}95\cdot10^{-13}$
Световой год	$3{,}1033\cdot10^{16}$	$9{,}46\cdot10^{15}$	$1{,}035\cdot10^{16}$	$9{,}460\cdot10^{12}$	$5{,}878\cdot10^{12}$	$5{,}104\cdot10^{12}$	1

Таблица 1.5

Соотношение между единицами площади

Единица измерения	Сокращенное обозначение	Барн	Квадратный микрометр	Квадратный миллиметр	Квадратный сантиметр	Квадратный дюйм	Квадратный фут	Квадратный ярд	Квадратный метр	Ар	Гектар
Барн	*барн*	1	10^{-16}	10^{-22}	10^{-24}	$1{,}55\cdot10^{-25}$	$1{,}0763\cdot10^{-27}$	$1{,}1960\cdot10^{-28}$	10^{-28}	10^{-30}	10^{-32}
Квадратный микрометр	*мкм*^{2}	10^{16}	1	10^{-6}	10^{-8}	$1{,}550\cdot10^{-9}$	$1{,}0763\cdot10^{-11}$	$1{,}1960\cdot10^{-12}$	10^{-12}	10^{-14}	10^{-16}
Квадратный миллиметр	*мм*^{2}	10^{22}	10^{6}	1	10^{-2}	$1{,}550\cdot10^{-3}$	$1{,}0763\cdot10^{-5}$	$1{,}1960\cdot10^{-6}$	10^{-6}	10^{-8}	10^{-10}
Квадратный сантиметр	*см*^{2}	10^{24}	10^{8}	10^{2}	1	0,1550	$1{,}0763\cdot10^{-3}$	$1{,}1960\cdot10^{-4}$	10^{-4}	10^{-6}	10^{-8}
Квадратный дюйм	*дюйм*^{2}	$6{,}4516\cdot10^{24}$	$6{,}4516\cdot10^{8}$	$6{,}4516\cdot10^{2}$	6,4516	1	$6{,}9444\cdot10^{-3}$	$7{,}7216\cdot10^{-4}$	$6{,}4516\cdot10^{-4}$	$6{,}4516\cdot10^{-6}$	$6{,}4516\cdot10^{-8}$
Квадратный фут	*фут*^{2}	$9{,}29030\cdot10^{26}$	$9{,}29030\cdot10^{10}$	$9{,}29030\cdot10^{4}$	$9{,}29030\cdot10^{2}$	$1{,}44\cdot10^{2}$	1	0,111	$9{,}29030\cdot10^{-2}$	$9{,}29030\cdot10^{-4}$	$9{,}29030\cdot10^{-6}$
Квадратный ярд	*ярд*^{2}	$8{,}36137\cdot10^{27}$	$8{,}3613\cdot10^{11}$	$8{,}3613\cdot10^{5}$	$8{,}3613\cdot10^{3}$	$1{,}30\cdot10^{3}$	9	1	0,83613	$8{,}3613\cdot10^{-3}$	$8{,}3613\cdot10^{-5}$
Квадратный метр	*м*^{2}	10^{28}	10^{12}	10^{6}	10^{4}	$1{,}550\cdot10^{3}$	10,764	1,1960	1	10^{-2}	10^{-4}
Ар	*а*	10^{30}	10^{14}	10^{8}	10^{6}	$1{,}550\cdot10^{5}$	$1{,}0764\cdot10^{3}$	$1{,}1960\cdot10^{2}$	10^{2}	1	10^{-2}
Гектар	*га*	10^{32}	10^{16}	10^{10}	10^{8}	$1{,}550\cdot10^{7}$	$1{,}0764\cdot10^{5}$	$1{,}1960\cdot10^{4}$	10^{4}	10^{2}	1

Таблица 1.6

Соотношение между единицами объема

Единица измерения	Сокращенное обозначение	Кубический мнкрометр	Кубический миллиметр	Кубический сантиметр	Кубический дюйм	Литр	Кубический фут	Кубический ярд	Кубический метр
Кубический микрометр	*мкм*^{3}	1	10^{-9}	10^{-12}	$6{,}1023\cdot10^{-14}$	10^{-15}	$3{,}5314\cdot10^{-17}$	$1{,}3079\cdot10^{-18}$	10^{-18}
Кубический миллиметр	*мм*^{3}	10^{9}	1	10^{-3}	$6{,}1023\cdot10^{-5}$	10^{-6}	$3{,}5314\cdot10^{-8}$	$1{,}3079\cdot10^{-9}$	10^{-9}
Кубический сантиметр	*см*^{3}	10^{12}	10^{3}	1	$6{,}1023\cdot10^{-2}$	10^{-3}	$3{,}5314\cdot10^{-5}$	$1{,}3079\cdot10^{-6}$	10^{-6}
Кубический дюйм	*дюйм*^{3}	$1{,}63871\cdot10^{13}$	$1{,}63871\cdot10^{4}$	16,3871	1	$1{,}63871\cdot10^{-2}$	$5{,}787\cdot10^{-4}$	$2{,}1432\cdot10^{-5}$	$1{,}63871\cdot10^{-5}$
Литр	*л*	10^{15}	10^{6}	10^{3}	61,023	1	$3{,}5314\cdot10^{-2}$	$1{,}3079\cdot10^{-3}$	10^{-3}
Кубический фут	*фут*^{3}	$2{,}8317\cdot10^{16}$	$2{,}8317\cdot10^{7}$	$2{,}8317\cdot10^{4}$	$1{,}7279\cdot10^{3}$	28,3168	1	$3{,}7037\cdot10^{-2}$	$2{,}83168\cdot10^{-2}$
Кубический ярд	*ярд*^{3}	$7{,}6455\cdot10^{17}$	$7{,}6455\cdot10^{8}$	$7{,}6455\cdot10^{5}$	$4{,}6653\cdot10^{4}$	$7{,}6455\cdot10^{2}$	27,0	1	0,76455
Кубический метр	*м*^{3}	10^{18}	10^{9}	10^{6}	$6{,}1023\cdot10^{4}$	10^{3}	35,314	1,3079	1

Таблица 1.7

Соотношение между единицами массы

Единица измерения	Сокращенное обозначение	Гран	Микрограмм	Миллиграмм	Грамм	Килограмм	Английская унция	Унция (аптекарская)	Английский фунт
Гран	—	1	$6{,}48 \cdot 10^{4}$	$6{,}48 \cdot 10^{1}$	$6{,}48 \cdot 10^{-2}$	$6{,}47989 \cdot 10^{-5}$	$2{,}2857 \cdot 10^{-3}$	$2{,}0833 \cdot 10^{-3}$	$1{,}4285 \cdot 10^{-4}$
Микрограмм	*мкг*	$1{,}5432 \cdot 10^{-5}$	1	10^{-3}	10^{-6}	10^{-9}	$3{,}5274 \cdot 10^{-8}$	$3{,}2150 \cdot 10^{-8}$	$2{,}2046 \cdot 10^{-9}$
Миллиграмм	*мг*	$1{,}5432 \cdot 10^{-2}$	10^{3}	1	10^{-3}	10^{-6}	$3{,}5274 \cdot 10^{-5}$	$3{,}2150 \cdot 10^{-5}$	$2{,}2046 \cdot 10^{-6}$
Грамм	*г*	15,432	10^{6}	10^{3}	1	10^{-3}	$3{,}5274 \cdot 10^{-2}$	$3{,}2150 \cdot 10^{-2}$	$2{,}2046 \cdot 10^{-3}$
Килограмм	*кг*	$1{,}5432 \cdot 10^{4}$	10^{9}	10^{6}	10^{3}	1	35,274	32,150	2,2046
Английская унция	—	$4{,}375 \cdot 10^{2}$	$2{,}8349 \cdot 10^{7}$	$2{,}8349 \cdot 10^{4}$	28,349	$2{,}8349 \cdot 10^{-2}$	1	0,91144	$6{,}25 \cdot 10^{-2}$
Английский фунт	—	$7{,}00 \cdot 10^{3}$	$4{,}5359 \cdot 10^{8}$	$4{,}5359 \cdot 10^{5}$	$4{,}5359 \cdot 10^{2}$	0,45359	16	14,58	1

Таблица 1.8

Соотношение между единицами плотности

Единица измерения	Сокращенное обозначение	Грамм на кубический сантиметр	Грамм на кубический дюйм	Грамм на кубический фут	Унция на кубический сантиметр	Унция на кубический дюйм	Унция на кубический фут	Фунт на кубический сантиметр	Фунт на кубический дюйм	Фунт на кубический фут
Грамм на кубический сантиметр	$г/см^3$	1	16,4	$2{,}83 \cdot 10^{4}$	$3{,}53 \cdot 10^{-2}$	0,579	$1{,}00 \cdot 10^{3}$	$2{,}20 \cdot 10^{-3}$	$3{,}61 \cdot 10^{-2}$	62,428
Грамм на кубический дюйм	$г/дюйм^3$	$6{,}10 \cdot 10^{-2}$	1	$1{,}73 \cdot 10^{3}$	$2{,}15 \cdot 10^{-3}$	$3{,}53 \cdot 10^{-2}$	61,0	$1{,}34 \cdot 10^{-4}$	$2{,}20 \cdot 10^{-3}$	3,81
Грамм на кубический фут	$г/фут^3$	$3{,}53 \cdot 10^{-5}$	$5{,}79 \cdot 10^{4}$	1	$1{,}25 \cdot 10^{-6}$	$2{,}04 \cdot 10^{-5}$	$3{,}53 \cdot 10^{-2}$	$7{,}79 \cdot 10^{-8}$	$1{,}28 \cdot 10^{-6}$	$2{,}20 \cdot 10^{-3}$
Унция на кубический сантиметр	$унция/см^3$	28,35	$4{,}65 \cdot 10^{2}$	$8{,}03 \cdot 10^{5}$	1	16,4	$2{,}83 \cdot 10^{4}$	$6{,}25 \cdot 10^{-2}$	1,024	$1{,}77 \cdot 10^{3}$
Унция на кубический дюйм	$унция/дюйм^3$	1,73	28,35	$4{,}90 \cdot 10^{4}$	$6{,}10 \cdot 10^{-2}$	1	$1{,}73 \cdot 10^{3}$	$3{,}82 \cdot 10^{-3}$	$6{,}25 \cdot 10^{-2}$	$1{,}08 \cdot 10^{2}$
Унция на кубический фут	$унция/фут^3$	$1{,}00 \cdot 10^{-3}$	$1{,}64 \cdot 10^{-2}$	28,35	$3{,}53 \cdot 10^{-5}$	$5{,}79 \cdot 10^{-4}$	1	$2{,}21 \cdot 10^{-6}$	$3{,}62 \cdot 10^{-5}$	$6{,}25 \cdot 10^{-2}$
Фунт на кубический сантиметр	$фунт/см^3$	$4{,}54 \cdot 10^{2}$	$7{,}43 \cdot 10^{3}$	$1{,}28 \cdot 10^{7}$	16	$2{,}62 \cdot 10^{2}$	$4{,}53 \cdot 10^{5}$	1	16,4	$2{,}83 \cdot 10^{4}$
Фунт на кубический дюйм	$фунт/дюйм^3$	27,680	$4{,}54 \cdot 10^{2}$	$7{,}84 \cdot 10^{5}$	0,976	16	$2{,}76 \cdot 10^{4}$	$6{,}10 \cdot 10^{-2}$	1	$1{,}73 \cdot 10^{3}$
Фунт на кубический фут	$фунт/фут^3$	$1{,}602 \cdot 10^{-2}$	0,262	$4{,}54 \cdot 10^{2}$	$5{,}65 \cdot 10^{-4}$	$9{,}26 \cdot 10^{-3}$	16	$3{,}53 \cdot 10^{-5}$	$5{,}79 \cdot 10^{-4}$	1

Таблица 1.9

Соотношение между единицами времени

Единица измерения	Сокращенное обозначение	Секунда	Минута	Час	Сутки	Неделя	Год
Секунда	*сек*	1	$1{,}667 \cdot 10^{-2}$	$2{,}777 \cdot 10^{-4}$	$1{,}1574 \cdot 10^{-5}$	$1{,}6534 \cdot 10^{-6}$	$3{,}1688 \cdot 10^{-8}$
Минута	*мин*	60	1	$1{,}667 \cdot 10^{-2}$	$6{,}9444 \cdot 10^{-4}$	$9{,}9206 \cdot 10^{-5}$	$1{,}9013 \cdot 10^{-6}$
Час	*ч*	$3{,}6 \cdot 10^{3}$	60	1	$4{,}1667 \cdot 10^{-2}$	$5{,}952 \cdot 10^{-3}$	$1{,}1414 \cdot 10^{-4}$
Сутки	*сутки*	$8{,}640 \cdot 10^{4}$	$1{,}44 \cdot 10^{3}$	24	1	0,14285	$2{,}7378 \cdot 10^{-3}$
Неделя	—	$6{,}048 \cdot 10^{5}$	$1{,}0080 \cdot 10^{4}$	$1{,}68 \cdot 10^{2}$	7	1	$1{,}9165 \cdot 10^{-2}$
Год	*год*	$3{,}1557 \cdot 10^{7}$	$5{,}260 \cdot 10^{5}$	$8{,}7658 \cdot 10^{3}$	$3{,}6524 \cdot 10^{2}$	52,178	1

Таблица 1.10

Соотношение между единицами измерения угла

Единица измерения	Сокращенное обозначение	Радиан	Оборот	Градус	Минута	Секунда
Радиан	*рад*	1	0,159	57,296	$3{,}438 \cdot 10^{3}$	$2{,}063 \cdot 10^{5}$
Оборот (окружность)	*об*	6,28	1	360	$2{,}160 \cdot 10^{4}$	$1{,}296 \cdot 10^{6}$
Градус	°	$1{,}7453 \cdot 10^{-2}$	$2{,}78 \cdot 10^{-3}$	1	60	$3{,}6 \cdot 10^{3}$
Минута	′	$2{,}9089 \cdot 10^{-4}$	$4{,}633 \cdot 10^{-5}$	$1{,}666 \cdot 10^{-2}$	1	60
Секунда	″	$4{,}848 \cdot 10^{-6}$	$7{,}716 \cdot 10^{-7}$	$2{,}778 \cdot 10^{-4}$	$1{,}6666 \cdot 10^{-2}$	1

Таблица 1.11

Соотношение между единицами скорости

Единица измерения	Сокращенное обозначение	Сантиметр в секунду	Метр в секунду	Километр в час	Узел
Сантиметр в секунду	*см/сек*	1	10^{-2}	$3{,}6 \cdot 10^{-2}$	$1{,}9425 \cdot 10^{-2}$
Метр в секунду	*м/сек*	10^{2}	1	3,6	1,9425
Километр в час	*км/ч*	27,778	0,27778	1	0,53959
Узел	узел	51,479	0,5148	1,8532	1

Таблица 1.12

Соотношение между единицами силы

Единица измерения	Сокращенное обозначение	Дина	Ньютон	Стен	Килограмм-сила
Дина	*дин*	1	10^{-5}	10^{-8}	$1{,}0197 \cdot 10^{-6}$
Ньютон	*н*	10^{5}	1	10^{-3}	0,10197
Стен	*сн*	10^{8}	10^{3}	1	101,97
Килограмм-сила	*кГ*	$9{,}8066 \cdot 10^{5}$	9,8066	$9{,}8066 \cdot 10^{-3}$	1

Таблица 1.13

Соотношение между единицами давления

Единица измерения	Сокращенное обозначение	Ньютон на квадратный метр	Дина на квадратный сантиметр	Килограмм-сила на квадратный метр	Бар	Пьеза	Атмосфера физическая	Атмосфера техническая	Миллиметр ртутного столба
Ньютон на квадратный метр (паскаль)	*н/м²*	1	10	0,10197	10^{-5}	10^{-3}	$9{,}8692\cdot10^{-6}$	$1{,}0197\cdot10^{-5}$	$7{,}50\cdot10^{-3}$
Дина на квадратный сантиметр (мкбар)	*дин/см²*	0,1	1	$1{,}0197\cdot10^{-2}$	10^{-6}	10^{-4}	$9{,}8692\cdot10^{-7}$	$1{,}0197\cdot10^{-6}$	$7{,}50\cdot10^{-4}$
Килограмм-сила на квадратный метр (*мм вод. ст.*)	*кГ/м²*	9,8066	98,066	1	$9{,}8066\cdot10^{-5}$	$9{,}8066\cdot10^{-3}$	$9{,}6784\cdot10^{-5}$	10^{-4}	$7{,}356\cdot10^{-2}$
Бар (гектопьеза)	*бар*	10^5	10^6	$1{,}0197\cdot10^4$	1	10^2	0,98692	1,0197	$7{,}50\cdot10^2$
Пьеза	*пз*	10^3	10^4	$1{,}0197\cdot10^2$	10^{-2}	1	$9{,}8692\cdot10^{-3}$	$1{,}0197\cdot10^{-2}$	7,50
Атмосфера физическая	*атм*	$1{,}0133\cdot10^5$	$1{,}0133\cdot10^6$	$1{,}0333\cdot10^4$	1,0133	$1{,}0133\cdot10^2$	1	1,0333	$7{,}6\cdot10^2$
Атмосфера техническая (килограмм на квадратный сантиметр)	*ат (кГ/см²)*	$9{,}8066\cdot10^4$	$9{,}8066\cdot10^5$	10^4	0,98066	98,066	0,96784	1	$7{,}356\cdot10^2$
Миллиметр ртутного столба (торр)	*мм рт. ст.*	$1{,}3332\cdot10^2$	$1{,}3332\cdot10^3$	13,595	$1{,}3332\cdot10^{-2}$	0,13332	$1{,}3157\cdot10^{-3}$	$1{,}359\cdot10^{-3}$	1

Таблица 1.14

Соотношение между единицами работы и энергии

Единица измерения	Сокращенное обозначение	Эрг	Джоуль	Килограммометр	Ватт-час	Калория	Литр-атмосфера	Электрон вольт
Эрг	*эрг*	1	10^{-7}	$1{,}0197\cdot10^{-8}$	$2{,}7778\cdot10^{-11}$	$2{,}3884\cdot10^{-8}$	$9{,}8689\cdot10^{-10}$	$6{,}2419\cdot10^{11}$
Джоуль (ватт-секунда)	*дж (вт·сек)*	10^7	1	0,10197	$2{,}7778\cdot10^{-4}$	0,23889	$9{,}8689\cdot10^{-3}$	$6{,}2419\cdot10^{18}$
Килограммометр	*кГм*	$9{,}8066\cdot10^7$	9,8066	1	$2{,}724\cdot10^{-3}$	2,3427	$9{,}6781\cdot10^{-2}$	$6{,}1205\cdot10^{19}$
Ватт-час	*вт·ч*	$3{,}60\cdot10^{10}$	$3{,}60\cdot10^3$	$3{,}6709\cdot10^2$	1	$8{,}6001\cdot10^2$	35,527	$2{,}25\cdot10^{22}$
Калория	*кал*	$4{,}1868\cdot10^7$	4,1868	0,42685	$1{,}1628\cdot10^{-3}$	1	$4{,}1311\cdot10^{-2}$	$2{,}6126\cdot10^{19}$
Литр-атмосфера	*л·атм*	$1{,}0133\cdot10^9$	$1{,}0133\cdot10^{-2}$	1,0333·10	$2{,}815\cdot10^{-2}$	24,206	1	$6{,}325\cdot10^{20}$
Электрон вольт	*эв*	$1{,}6021\cdot10^{-12}$	$1{,}6021\cdot10^{-19}$	$1{,}634\cdot10^{-20}$	$4{,}450\cdot10^{-23}$	$3{,}8276\cdot10^{-20}$	$1{,}5813\cdot10^{-21}$	1

Таблица 1.15

Соотношение между единицами мощности

Единица измерения	Сокращенное обозначение	Эрг в секунду	Ватт	Килограммометр в секунду	Лошадиная сила	Лошадиная сила (англ йская)	Калория в секунду
Эрг в секунду	*эрг/сек*	1	10^{-7}	$1{,}0197\cdot10^{-8}$	$1{,}3596\cdot10^{-10}$	$1{,}3410\cdot10^{-10}$	$2{,}3884\cdot10^{-8}$
Ватт (джоуль в секунду)	*вт (дж/сек)*	10^7	1	0,10197	$1{,}3596\cdot10^{-3}$	$1{,}3410\cdot10^{-3}$	$2{,}3884\cdot10^{-1}$
Килограммометр в секунду	*кГм/сек*	$9{,}8066\cdot10^7$	9,8066	1	$1{,}3333\cdot10^{-2}$	$1{,}3151\cdot10^{-2}$	2,3427
Лошадиная сила	*л. с.*	$7{,}355\cdot10^9$	$7{,}355\cdot10^2$	75	1	0,9363	175,67
Лошадиная сила (английская)	*л. с.*	$7{,}457\cdot10^9$	$7{,}457\cdot10^2$	76	1,0139	1	178,11
Калория в секунду	*кал/сек*	$4{,}1868\cdot10^7$	4,1868	0,42693	$5{,}6924\cdot10^{-3}$	$5{,}6145\cdot10^{-3}$	1

1.3. ЕДИНИЦЫ ИЗМЕРЕНИЯ ТЕПЛОВЫХ ВЕЛИЧИН

Государственный стандарт ГОСТ 8550—61 «Тепловые единицы» устанавливает систему, основными единицами которой являются: метр (*м*), килограмм (*кг*), секунда (*сек*), градус Кельвина (°К) (по абсолютной термодинамической шкале). Стандарт допускает применение внесистемных единиц, основанных на калории в качестве единицы количества теплоты (табл. 1.16). Согласно ГОСТ 8550—61 1 *кал* = 4,1868 *дж*.

Таблица 1.16

Тепловые единицы

Наименование величины	Тепловые единицы системы (СИ) метр — килограмм — секунда — градус			Тепловые единицы, основанные на калории		
	Обозначение единиц измерения		Размерность	Обозначение единиц измерения		Множитель перевода в единицы СИ
	русскими буквами	латинскими буквами		русскими буквами	латинскими буквами	
Количество теплоты, термодинамический потенциал	*дж*	J	$м^2 \cdot кг \cdot сек^{-2}$	*кал*	cal	4,1868
Теплоемкость системы, энтропия системы	*дж/град*	J/deg	$м^2 \cdot кг \cdot сек^{-2} \times \times град^{-1}$	*кал/град*	cal/deg	4,1868
Удельная теплоемкость, удельная энтропия	*дж/(кг × × град)*	J/(kg·deg)	$м^2 \cdot сек^{-2} \cdot град^{-1}$	*кал/(г·град)*	cal/(g·deg)	$4,1868 \cdot 10^3$
Удельный термодинамический потенциал, удельная теплота фазового превращения, удельная теплота химической реакции	*дж/кг*	J/kg	$м^2 \cdot сек^{-2}$	*кал/г*	cal/g	$4,1868 \cdot 10^3$
Температурный градиент	*град/м*	deg/m	$м^{-1} \cdot град$	—	—	—
Тепловой поток	*вт*	W	$м^2 \cdot кг \cdot сек^{-3}$	*кал/сек*	cal/s	4,1868
Поверхностная плотность теплового потока	*вт/м²*	W/m²	$кг \cdot сек^{-3}$	*кал/(см²·сек)*	cal/(cm²·s)	$4,1868 \cdot 10^4$
Коэффициент теплопередачи	*вт/(м² × × град)*	W/(m²·deg)	$кг \cdot сек^{-3} \cdot град^{-1}$	*кал/(см² × × сек·град)*	cal/(cm²·s·deg)	$4,1868 \cdot 10^4$
Коэффициент теплопроводности	*вт/(м × × град)*	W/(m·deg)	$м \cdot кг \cdot сек^{-3} \times \times град^{-1}$	*кал/(см × × сек·град)*	cal/(cm·s·deg)	$4,1868 \cdot 10^2$
Коэффициент температуропроводности	*м²/сек*	m²/s	$м^2 \cdot сек^{-1}$	*м²/ч*	m²/h	$2,7778 \cdot 10^{-4}$

Температурные шкалы

В настоящее время существует четыре температурных шкалы, установленные международными рекомендациями (табл. 1.17).

Абсолютная термодинамическая шкала, в соответствии с решением X Генеральной конференции по мерам и весам 1954 г., определяется при помощи тройной точки воды в качестве основной реперной точки. Этой точке соответствует температура 273,16°К (точно). Нижней границей шкалы служит точка абсолютного нуля температуры. Температура абсолютной термодинамической шкалы обозначается T°К.

Таблица 1.17

Сравнение температурных шкал*

Шкала	Обозначение	Точка таяния льда	Точка кипения воды	Интервал
Цельсия	t, °С	0	100	100
Абсолютная	T, °К	273,16	373,16	100
Реомюра	t°, R	0	80	80
Фаренгейта	t°, F	32	212	180

* Формула пересчета $\frac{(T-273)°К}{5} = \frac{t°С}{5} = \frac{t°R}{4} = \frac{(t-32)°F}{9}$.

Стоградусная термодинамическая шкала имеет начало отсчета в точке, лежащей на 0,0100° ниже тройной точки воды (т. е. в точке плавления льда при нормальном давлении). Температура на этой шкале $t = (T - 273,15)$°С. Интервал температуры по первой и второй шкалам имеет одно и то же значение.

Стоградусная международная шкала основана на определенном количестве постоянных и экспериментально воспроизводимых температур равновесия (реперных точек), которым присвоены определенные числовые значения (точки кипения кислорода, плавления льда, кипения серы, кипения воды, затвердевания серебра, затвердевания золота). Температура обозначается символом t и выражается в градусах стоградусной шкалы °С.

Абсолютная международная шкала построена по принципам международной шкалы температур, но с началом отсчета от абсолютного нуля. Температура по этой шкале выражается формулой $T = (t + 273,15)$°К, где t — температура по стоградусной международной температурной шкале.

Из этих четырех температурных шкал ГОСТом утверждены две основные шкалы: первая (абсолютная термодинамическая шкала) и третья (стоградусная международная температурная шкала).

Электрические и магнитные единицы

Наименование величины	Формула определения в системе		Наименование и обозначение в системе		Размерность в системе			
	МКСА	СГС	МКСА	СГС и СГСМ	МКСА	СГСЭ	СГСМ	СГС
Количества электричества (кулон)	$q = It$ (t — время)	$q = r\sqrt{f}$ (f — снла) (r — расстояние)	кулон (*к*)	—	*сек·а*	$см^{3/2} \cdot г^{1/2} \cdot сек^{-1}$	$см^{1/2} \cdot г^{1/2}$	$ом^{3/2} \cdot г^{1/2} \cdot сек^{-1}$
Поверхностная плотность зарядов	$\sigma = q/S$ (S — площадь)		кулон на квадратный метр ($к/м^2$)	—	$м^{-2} \cdot сек \cdot а$	$см^{-1/2} \cdot г^{1/2} \cdot сек^{-1}$	$см^{-3/2} \cdot г^{1/2}$	$см^{-1/2} \cdot г^{1/2} \cdot сек^{-1}$
Напряженность электрического поля	$E = f/q$		вольт на метр ($в/м$)	—	$м \cdot кг \cdot сек^{-3} \cdot а^{-1}$	$см^{-1/2} \cdot г^{1/2} \cdot сек^{-1}$	$см^{1/2} \cdot г^{1/2} \cdot сек^{-2}$	$см^{-1/2} \cdot г^{1/2} \cdot сек^{-1}$
Разность электрических потенциалов	$U = A/q$ (A — работа)		вольт (*в*)	—	$м^2 \cdot кг \cdot сек^{-3} \cdot а^{-1}$	$см^{1/2} \cdot г^{1/2} \cdot сек^{-1}$	$см^{3/2} \cdot г^{1/2} \cdot сек^{-2}$	$см^{1/2} \cdot г^{1/2} \cdot сек^{-1}$
Электрическая емкость	$C = q/U$		фарада (*ф*)	сантиметр (*см*)	$м^{-2} \cdot кг^{-1} \cdot сек^4 \cdot а^2$	*см*	$см^{-1} \cdot сек^2$	*см*
Абсолютная диэлектрическая проницаемость	$\varepsilon_a = \varepsilon_0 \cdot \varepsilon$ (ε — относительная диэлектрическая проницаемость)	$\varepsilon_a = \varepsilon$	фарада на метр ($ф/м$)	—	$м^{-3} \cdot кг^{-1} \cdot сек^4 \cdot а^2$	ε_0	$см^{-2} \cdot сек^2$	—
Сила тока (ток)	—	$I = q/t$	ампер (*а*)	—	*а*	$см^{3/2} \cdot г^{1/2} \cdot сек^{-2}$	$см^{1/2} \cdot г^{1/2} \cdot сек^{-1}$	$см^{3/2} \cdot г^{1/2} \cdot сек^{-2}$
Электрическое сопротивление	$R = U/I$		ом (*ом*)	—	$м^2 \cdot кг \cdot сек^{-3} \cdot а^{-2}$	$см^{-1} \cdot сек$	$см \cdot сек^{-1}$	$см^{-1} \cdot сек$
Электрическое смещение (электрическая индукция)	$D = \varepsilon_0 \varepsilon E = \frac{q}{S}$	$D = \varepsilon E$	кулон на квадратный метр ($к/м^2$)	—	$м^{-2} \cdot сек \cdot а$	$см^{-1/2} \cdot г^{1/2} \cdot сек^{-1}$	$см^{-3/2} \cdot г^{1/2}$	$см^{-1/2} \cdot г^{1/2} \cdot сек^{-1}$
Диэлектрическая воспримчивость	$\xi = \varepsilon_0(\varepsilon - 1)$	$\xi = \frac{\varepsilon - 1}{4\pi}$	фарада на метр ($ф/м$)	—	$м^{-3} \cdot кг^{-1} \cdot сек^4 \cdot а^2$	ε_0	$см^{-2} \cdot сек^2$	—

Наименование величины	Формула определения в системе		Наименование и обозначение в системе		Размерность в системе			
	МКСА	СГС	МКСА	СГС и СГСМ	МКСА	СГСЭ	СГСМ	СГС
Поток электрического смещения (поток индукции)	$N = DS$		кулон ($к$)	—	$сек \cdot а$	$см^{3/2} \cdot г^{1/2} \cdot сек^{-1}$	$см^{1/2} \cdot г^{1/2}$	$см^{3/2} \cdot г^{1/2} \cdot сек^{-1}$
Напряженность магнитного поля	$H = \frac{I}{2\pi r}$	$H = \frac{2I}{cr}$ (c—скорость света)	ампер на метр ($а/м$)	эрстед ($э$)	$м^{-1} \cdot а$	$см^{1/2} \cdot г^{1/2} \cdot сек^{-2}$	$см^{-1/2} \cdot г^{1/2} \cdot сек^{-1}$	$см^{-1/2} \cdot г^{1/2} \cdot сек^{-1}$
Абсолютная магнитная проницаемость	$\mu_a = \mu_0 \mu$ (μ— относительная магнитная проницаемость)	$\mu_a = \mu$	генри на метр ($гн/м$)	—	$м \cdot кг \cdot сек^{-2} \cdot а^{-2}$	$см^{-2} \cdot сек^2$	μ_0	—
Магнитная индукция	$B = \mu_0 \mu \frac{I}{2\pi r}$	$B = \mu \frac{2I}{cr}$	тесла ($тл$)	гаусс ($г$)	$кг \cdot сек^{-2} \cdot а^{-1}$	$см^{-3/2} \cdot г^{1/2}$	$см^{-1/2} \cdot г^{1/2} \cdot сек^{-1}$	$см^{-1/2} \cdot г^{1/2} \cdot сек^{-1}$
Магнитный поток	$\Phi = BS$		вебер ($вб$)	максвелл ($мкс$)	$м^2 \cdot кг \cdot сек^{-2} \cdot а^{-1}$	$см^{1/2} \cdot г^{1/2}$	$см^{3/2} \cdot г^{1/2} \cdot сек^{-1}$	$см^{3/2} \cdot г^{1/2} \cdot сек^{-1}$
Индуктивность	$L = \frac{\Phi}{I}$	$L = \frac{\Phi c}{I}$	генри ($гн$)	сантиметр ($см$)	$м^2 \cdot кг \cdot сек^{-2} \cdot а^{-2}$	$см^{-1} \cdot сек^2$	$см$	$см$
Магнитный момент (рамки с током)	$P_m = IS$	$P_m = \frac{1}{c} IS$	ампер × ×кв. метр ($а \cdot м^2$)	—	$м^2 \cdot а$	$см^{7/2} \cdot г^{1/2} \cdot сек^{-2}$	$см^{5/2} \cdot г^{1/2} \cdot сек^{-1}$	$см^{5/2} \cdot г^{1/2} \cdot сек^{-1}$
Магнитодвижущая сила	$F = \Sigma I = nI$ (n — количество витков)	$F = \frac{1}{c} 4\pi \Sigma I$	ампер ($а$), ампер-виток ($ав$)	гильберт ($гб$)	$а$	$см^{3/2} \cdot г^{1/2} \cdot сек^{-2}$	$см^{1/2} \cdot г^{1/2} \cdot сек^{-1}$	$см^{1/2} \cdot г^{1/2} \cdot сек^{-1}$
Интенсивность намагничивания (намагниченность)	$J = P_m / U$		ампер на метр ($а/м$)	—	$м^{-1} \cdot а$	$см^{1/2} \cdot г^{1/2} \cdot сек^{-2}$	$см^{-1/2} \cdot г^{1/2} \cdot сек^{-1}$	$см^{-1/2} \cdot г^{1/2} \cdot сек^{-1}$
Магнитная восприимчивость	$\varkappa_m = \mu - 1$	$\varkappa_m = \frac{\mu - 1}{4\pi}$	—	—	—	—	—	—

1.4. ЕДИНИЦЫ ИЗМЕРЕНИЯ ЭЛЕКТРОМАГНИТНЫХ ВЕЛИЧИН

Согласно системе СИ основными единицами измерения электромагнитных величин являются метр, килограмм, секунда и ампер. Построенная на этих единицах система электромагнитных величин называется МКСА (см. табл. 1.18 на стр. 19). Систему единиц МКСА обычно применяют при написании уравнений электромагнитного поля в рационализированной форме. Рационализация уравнений электромагнитного поля имеет своей целью исключение множителя 4π из наиболее важных и часто применяемых уравнений. В системе МКСА при рационализированной форме уравнений электромагнитного поля электрическая ε_0 и магнитная μ_0 постоянные принимаются равными:

$$\varepsilon_0 = \frac{10^7}{4\pi c^2} = 8{,}854 \cdot 10^{-12}\ ф/м \text{ и } \mu_0 = 4\pi \cdot 10^{-7} =$$

$$= 1{,}256 \cdot 10^{-6}\ гн/м,$$

где c — скорость света в вакууме, *м/сек*.

Государственным стандартом допускается, когда это необходимо, применение систем единиц, построенных на основе системы СГС (СГСЭ, СГСМ, СГС — система Гаусса). При этом единицы всех электрических и магнитных величин выражаются через сантиметр, грамм и секунду при помощи соотношений, описывающих электрические и магнитные закономерности.

Система СГСЭ (абсолютная электростатическая система) основана на законах электростатических взаимодействий зарядов. Система СГСМ (абсолютная магнитная система) основана на магнитных взаимодействиях тока. В абсолютной гауссовой системе (СГС) единицы для всех электрических величин совпадают с единицами СГСЭ, а единицы для всех магнитных величин совпадают с единицами СГСМ.

В системе СГСЭ: $\varepsilon_0 = 1$, $\mu_0 = 1{,}11 \cdot 10^{-21}$.

В системе СГСМ: $\mu_0 = 1$, $\varepsilon_0 = 1{,}11 \cdot 10^{-21}$.

В системе СГС $\varepsilon_0 = \mu_0 = 1$. В случае использования систем единиц СГСЭ, СГСМ, СГС уравнения электромагнитного поля записывают в нерационализированной форме.

В табл. 1.18 приведены единицы измерения электрических и магнитных величин в четырех системах: МКСА, СГСЭ, СГСМ, СГС. Соотношения между единицами электромагнитных величин различных систем приводятся в табл. 1.19.

Таблица 1.19

Соотношение между электромагнитными единицами

Наименование величины	МКСА	СГСЭ	СГСМ	СГС
Сила тока (ток)	1 *а*	$3 \cdot 10^9$	10^{-1}	$3 \cdot 10^9$
Количество электричества (заряд)	1 *к*	$3 \cdot 10^9$	10^{-1}	$3 \cdot 10^9$
Поверхностная плотность заряда	1 *к/м²*	$3 \cdot 10^5$	10^{-5}	$3 \cdot 10^5$
Разность электрических потенциалов	1 *в*	$3{,}34 \cdot 10^{-3}$	10^8	$3{,}34 \cdot 10^{-3}$
Электрическая емкость	1 *ф*	$8{,}99 \cdot 10^{11}$	10^{-9}	$8{,}99 \cdot 10^{11}$
Электрическое сопротивление	1 *ом*	$1{,}11 \cdot 10^{-12}$	10^9	$1{,}11 \cdot 10^{-12}$
Диэлектрическая проницаемость	1 *ф/м*	$1{,}13 \cdot 10^{11}$	$1{,}26 \cdot 10^{-10}$	$1{,}13 \cdot 10^{11}$
Напряженность электрического поля	1 *в/м*	$3{,}34 \cdot 10^{-5}$	10^6	$3{,}34 \cdot 10^{-5}$
Электрическое смещение (электрическая индукция)	1 *к/м²*	$3{,}77 \cdot 10^6$	$1{,}26 \cdot 10^{-4}$	$3{,}77 \cdot 10^6$
Поток электрического смещения (поток индукции)	1 *к*	$3{,}77 \cdot 10^{10}$	1,26	$3{,}77 \cdot 10^{10}$
Магнитный поток	1 *вб*	$3{,}34 \cdot 10^{-3}$	10^8	10^8
Магнитная индукция	1 *тл*	$3{,}34 \cdot 10^{-7}$	10^4	10^4
Напряженность магнитного поля	1 *а/м*	$3{,}77 \cdot 10^8$	$1{,}26 \cdot 10^{-2}$	$1{,}26 \cdot 10^{-2}$
Магнитная проницаемость	1 *гн/м*	$8{,}85 \cdot 10^{-16}$	$7{,}96 \cdot 10^5$	$7{,}96 \cdot 10^5$
Магнитодвижущая сила	1 *а*	$3{,}77 \cdot 10^{10}$	1,26	1,26
Магнитный момент	1 *а·м²*	$3 \cdot 10^{13}$	10^3	10^3
Индуктивность (взаимная индуктивность)	1 *гн*	$1{,}11 \cdot 10^{-12}$	10^9	10^9

1.5. ЕДИНИЦЫ ИЗМЕРЕНИЯ АКУСТИЧЕСКИХ ВЕЛИЧИН

Основными единицами для измерения акустических величин являются: метр, килограмм, секунда (система МКС). Государственным стандартом для измерения акустических величин допускается также применение системы СГС. Государственным стандартом не рекомендуется применять для измерения звукового давления единицу *бар*. Вместо нее рекомендуется ньютон на квадратный метр, а в системе СГС допускается дина на квадратный сантиметр. В табл. 1.20 приведены акустические единицы системы МКС и системы СГС. В табл. 1.21 приведены внесистемные акустические единицы.

Таблица 1.20

Единицы измерения акустических величин

Наименование величины	Система СИ (МКС)			Система СГС			Множитель перевода в единицы МКС
	Сокращенное обозначение		Размерность	Сокращенное обозначение		Размерность	
	русскими буквами	латинскими буквами		русскими буквами	латинскими буквами		
Звуковое давление	*н/м²*	N/m^2	$м^{-1} \cdot кг \cdot сек^{-2}$	*дин/см²*	dyn/cm^2	$см^{-1} \cdot г \cdot сек^{-2}$	10^{-1}
Объемная скорость	*м³/сек*	m^3/s	$м^3 \cdot сек^{-1}$	*см³/сек*	cm^3/s	$см^3 \cdot сек^{-1}$	10^{-6}
Акустическое сопротивление	$н \cdot сек/м^5$	$N \cdot s/m^5$	$м^{-4} \cdot кг \cdot сек^{-1}$	$дин \cdot сек/см^5$	$dyn \cdot s/cm^5$	$см^{-4} \cdot г \cdot сек^{-1}$	10^5
Механическое сопротивление	*н·сек/м*	N·s/m	$кг \cdot сек^{-1}$	*дин·сек/см*	dyn·s/cm	$г \cdot сек^{-1}$	10^{-3}
Интенсивность звука	*вт/м²*	W/m^2	$кг \cdot сек^{-3}$	$эрг/(сек \cdot см^2)$	$erg/(s \cdot cm^2)$	$г \cdot сек^{-3}$	10^{-3}
Плотность звуковой энергии	*дж/м³*	J/m^3	$м^{-1} \cdot кг \cdot сек^{-2}$	*эрг/см³*	erg/cm^3	$см^{-1} \cdot г \cdot сек^{-2}$	10^{-1}

Таблица 1.21

Внесистемные акустические единицы

Наименование величины	Единица измерения	Сокращенное название	Определение единицы измерения
Уровень звукового давления	децибел	*дб*	Уровень звукового давления, двадцать десятичных логарифмов отношения которого к условному порогу давления, равному 0,00002 $н/м^2$, принимаемому за нулевой уровень, равны единице
Уровень громкости	фон	—	Уровень громкости звука, для которого уровень звукового давления равногромкого с ним звука частотой 1000 *гц* равен *1 дб*
Частотный интервал	октава	—	Частотный интервал между двумя частотами, логарифм отношения которых при основании два равен единице

1.6. ЕДИНИЦЫ ИЗМЕРЕНИЯ СВЕТОВЫХ ВЕЛИЧИН

Согласно Международной системе единиц основными единицами для измерения световых величин является: метр, килограмм, секунда, свеча (табл. 1.22).

Таблица 1.22

Световые единицы

Наименование величины	Обозначение и формула	Основные единицы измерения		Внесистемные единицы	
		Название и обозначение	Определение	Название и обозначение	Соотношение единиц
Сила света	*I*	международная свеча, *св*	1/60 силы света, излучаемой в направлении нормали в 1 $см^2$ светового эталона	—	—

Наименование величины	Образование и формула	Основные единицы измерения		Внесистемные единицы	
		Название и обозначение	Определение	Название и обозначение	Соотношение единиц
Световой поток	$\Phi = I\tau$ (τ — телесный угол)	люмен, *лм*	Световой поток, испускаемый точечным источником света силой света 1 *св* внутрь телесного угла 1 *стер*	—	—
Световая энергия (количество света)	$Q = \Phi t$ (t — время)	люмен-секунда, *лм·сек*	—	—	—
Светность (светимость)	$R = \Phi/S$ (S — площадь)	люмен на квадратный метр, *лм/м²*	Светность источника, каждый квадратный метр которого даст световой поток 1 *лм*	—	—
Освещенность (интенсивность светового потока)	$E = \Phi/S$	люкс, *лк*	Освещенность поверхности, на каждый квадратный метр которой падает световой поток 1 *лм*	фот, *ф*	1 *лк* = $= 10^{-4}$ *ф*
Яркость	$B = \frac{1}{\pi} E$	нит, *нт*	Яркость площадки, дающей силу света 1 *св* с каждого квадратного метра в направлении нормали	стильб, *сб*	1 *нт* = 10^{-4} *сб*
Освечивание	$C = It$	свеча-секунда, *св·сек*	—	—	—
Количество освещения	$H = Et$	люкс-секунда, *лк·сек*		—	—

Таблица 1.23

1.7. ЕДИНИЦЫ ИЗМЕРЕНИЯ РАДИОАКТИВНОСТИ И ИОНИЗИРУЮЩИХ ИЗЛУЧЕНИЙ

Наименование величины	Единица измерения	Сокращенное обозначение	
		русскими буквами	латинскими буквами
Активность нуклида в радиоактизном источнике	распад в секунду	*распад/сек*	—
Плотность потока ионизирующих частиц или квантов	частица (квант) в секунду на квадратный метр	*частица (квант)*/ /(*сек·м²*)	$s^{-1} \cdot m^{-2}$
Интенсивность излучения	ватт на квадратный метр	*вт/м²*	W/m^2
Поглощенная доза излучения (доза излучения)	джоуль на килограмм *	*дж/кг*	J/kg
Мощность поглощенной дозы излучения (мощность дозы излучения)	ватт на килограмм	*вт/кг*	W/kg
Экспозиционная доза рентгеновского и γ-излучений	кулон на килограмм**	*к/кг*	k/kg
Мощность экспозиционной дозы рентгеновского и γ-излучений	ампер на килограмм	*а/кг*	A/kg

* Джоуль на килограмм — поглощенная доза излучения, измеряемая энергией 1 *дж* любого вида ионизирующего излучения, переданной массе 1 *кг* облученного вещества.

** Кулон на килограмм — экспозиционная доза рентгеновского и γ-излучений, при которой сопряженная корпускулярная эмиссия на килограмм сухого атмосферного воздуха производит в воздухе ионы, несущие заряд, равный одному кулону электричества каждого знака.

Таблица 1.24

Внесистемные единицы измерения радиоактивности и ионизирующих излучений

Наименование величины	Единица измерения	Сокращенное обозначение		Множитель перевода в единицы системы СИ
		русскими буквами	латинскими буквами	
Активность нуклида в радиоактивном источнике	кюри *	*кюри*	Ci	$3{,}700 \cdot 10^{10}$
Поглощенная доза излучения (доза излучения)	рад	*рад*	rad	10^{-2}
Мощность поглощенной дозы излучения (мощность дозы излучения)	рад в секунду	*рад/сек*	rad/s	10^{-2}
Экспозиционная доза рентгеновского и γ-излучений	рентген 2*	*р*	r	$2{,}57976 \cdot 10^{-4}$
Мощность экспозиционной дозы рентгеновского и γ-излучений	рентген в секунду	*р/сек*	r/s	$2{,}57976 \cdot 10^{-4}$

* Кюри — активность препарата данного нуклида, в котором в 1 *сек* происходит $3{,}700 \cdot 10^{10}$ актов распада. Масса радиоактивного нуклида, активность которого равна 1 *кюри*: $Q = 8{,}9 \cdot 10^{-14}\ AT$ (*T*, *сек*); $Q = 5{,}3 \cdot 10^{-13}\ AT$ (*T*, *мин*); $Q = 3{,}2 \cdot 10^{-10}\ AT$ (*T*, *ч*); $Q = 7{,}7 \cdot 10^{-9}\ AT$ (*T*, день); $Q = 2{,}8 \cdot 10^{-6}\ AT$ (*T*, *год*), где *A* — атомная масса; *T* — период полураспада. *Q* — масса без нуклида-носителя, *г*.

2* Рентген — доза рентгеновского и γ-излучений в воздухе, при которой сопряженная корпускулярная эмиссия 0,001293 *г* воздуха производит в воздухе ионы, несущие заряд 1 ед. СГСЭ электричества каждого знака. (Число 0,001293 *г* — значение массы 1 $см^3$ воздуха при температуре 0°С и давлении 760 *мм рт. ст.* Доза облучения 1 *р* соответствует образованию $2{,}08 \cdot 10^9$ пар ионов в 1 $см^3$ воздуха.)

Биологический эквивалент рентгена (*бэр*)— количество энергии, поглощенной живой тканью (для человека или млекопитающего) при облучении любым видом ионизирующей радиации и вызвавшей такой же биологический эффект, как поглощенная доза 1 *рад* рентгеновского или γ-излучения.

Доза (*бэр*) = доза (*рад*) × КК, где КК — коэффициент качества, зависящий от вида излучения (линейная плотность ионизации) рассматриваемого биологического процесса и значений тканевой дозы и мощности дозы.

I.8. НЕКОТОРЫЕ ЕДИНИЦЫ ИЗМЕРЕНИЯ В АТОМНОЙ И ЯДЕРНОЙ ФИЗИКЕ

1. Атомная (кислородная) единица массы (*а.е.м.*) равна 1/16 массы атома изотопа кислорода ^{16}O:
1 *а.е.м.* = $1{,}6597 \cdot 10^{-27}$ *кг*.

2. Принята новая (углеродная) атомная единица массы, равная 1/12 массы атома изотопа $^{12}_{6}C$:
1. *а.е.м.* = $1{,}6603 \cdot 10^{-27}$ *кг*.

3. *Барн* — единица измерения эффективного поперечного сечения ядерных реакций:
1 *барн* = 10^{-24} $см^2$.

Таблица 1.25

Некоторые формулы электродинамики, записанные в различных системах единиц*

Величина	СИ (МКСА)	СГСМ	СГСЭ	СГС
Закон Кулона	$F = \frac{1}{4\pi\varepsilon_0} \cdot \frac{q_1 q_2}{\varepsilon r^2}$	$F = \frac{1}{\varepsilon_0} \cdot \frac{q_1 q_2}{\varepsilon r^2}$	$F = \frac{q_1 q_2}{\varepsilon r^2}$	
Сила, действующая на заряд в электрическом поле	$F = qE$			
Связь между напряженностью поля и смещением	$D = \varepsilon_0 \varepsilon E$		$D = \varepsilon E$	
Теорема Гаусса (поток смещения сквозь замкнутую поверхность)	$N = \oint D \cos(\widehat{\mathbf{D}, \mathbf{n}})\, ds = q$ (n — нормальный вектор)	$N = \oint D \cos(\widehat{\mathbf{D}, \mathbf{n}})\, ds = 4\pi q$		
Напряженность поля точечного заряда	$E = \frac{1}{4\pi\varepsilon_0} \cdot \frac{q}{\varepsilon r^2}$	$E = \frac{1}{\varepsilon_0} \cdot \frac{q}{\varepsilon r^2}$	$E = \frac{q}{\varepsilon r^2}$	
Напряженность поля в плоском конденсаторе	$E = \frac{\sigma}{\varepsilon_0 \varepsilon}$	$E = \frac{4\pi\sigma}{\varepsilon_0 \varepsilon}$	$E = \frac{4\pi\sigma}{\varepsilon}$	
Напряженность поля в цилиндрическом конденсаторе[2*]	$E = \frac{1}{2\pi\varepsilon_0} \cdot \frac{\tau}{\varepsilon r}$	$E = \frac{1}{\varepsilon_0} \cdot \frac{2\tau}{\varepsilon r}$	$E = \frac{2\tau}{\varepsilon r}$	
Напряженность поля на оси диполя[3*]	$E = \frac{1}{2\pi\varepsilon_0} \cdot \frac{p_э}{\varepsilon r^3}$	$E = \frac{1}{\varepsilon_0} \cdot \frac{2p_э}{\varepsilon r^3}$	$E = \frac{2p_э}{\varepsilon r^3}$	
Электрический момент диполя	$p_э = ql$			
Сила взаимодействия двух диполей, расположенных на одной оси[3*]	$F = -\frac{3}{2\pi\varepsilon_0} \cdot \frac{p_{э1} p_{э2}}{\varepsilon r^4}$	$F = -\frac{6}{\varepsilon_0} \cdot \frac{p_{э1} p_{э2}}{\varepsilon r^4}$	$F = -\frac{6 p_{э1} p_{э2}}{\varepsilon r^4}$	
Поляризованность диэлектрика	$P = \frac{p_э}{V} = E$			
Связь между диэлектрической проницаемостью и диэлектрической восприимчивостью	$\varepsilon_a = \varepsilon_0 \varepsilon = \varepsilon_0 + \xi$	$\varepsilon_a = \varepsilon_0 \varepsilon = \varepsilon + 4\pi\xi$	$\varepsilon = 1 + 4\pi\xi$	

Величина	СИ (МКСА)	СГСМ	СГСЭ	СГС
Связь между напряженностью поля и потенциалом	$E = -\operatorname{grad} U$			
Потенциал поля точечного заряда	$U = \frac{1}{4\pi\varepsilon_0} \cdot \frac{q}{\varepsilon r}$	$U = \frac{1}{\varepsilon_0} \cdot \frac{q}{\varepsilon r}$	$U = \frac{q}{\varepsilon r}$	
Потенциал внутри цилиндрического конденсатора[4*]	$U = U_1 - Er \ln\frac{r}{R_1}$			
Связь между емкостью, зарядом и потенциалом	$q = CU$			
Емкость уединенного шара	$C = 4\pi\varepsilon_0\varepsilon R$	$C = \varepsilon_0\varepsilon R$	$C = \varepsilon R$	
Емкость плоского конденсатора	$C = \frac{\varepsilon_0\varepsilon s}{l}$	$C = \frac{\varepsilon_0\varepsilon s}{4\pi l}$	$C = \frac{\varepsilon s}{4\pi l}$	
Емкость цилиндрического конденсатора	$C = \frac{2\pi\varepsilon_0\varepsilon l}{\ln R_2/R_1}$	$C = \frac{\varepsilon_0\varepsilon l}{2\ln R_2/R_1}$	$C = \frac{\varepsilon l}{2\ln R_2/R_1}$	
Емкость двухпроводной линии[5*]	$C = \frac{\pi\varepsilon_0\varepsilon l}{\ln a/R}$	$C = \frac{\varepsilon_0\varepsilon l}{4\pi \ln a/R}$	$C = \frac{\varepsilon l}{4\pi \ln a/R}$	
Энергия заряженного проводника	$W = \frac{qU}{2} = \frac{U^2C}{2} = \frac{q}{2C}$			
Объемная плотность энергии электрического поля	$w = \frac{ED}{2} = \frac{\varepsilon_0\varepsilon E^2}{2} = \frac{D^2}{2\varepsilon_0\varepsilon}$	$w = \frac{ED}{8\pi} = \frac{\varepsilon_0\varepsilon E^2}{8\pi} = \frac{D^2}{8\pi\varepsilon_0\varepsilon}$	$w = \frac{ED}{8\pi} = \frac{\varepsilon E^2}{8\pi} = \frac{D^2}{8\pi\varepsilon}$	
Определение силы тока проводимости	$I = \frac{dq}{dt}$			
Закон Ома	$I = \frac{U}{R}$			
Мощность тока	$P = UI$			
Сила, действующая на элемент тока в магнитном поле (формула Ампера)	$dF = \mu_0\mu HI \cdot dl \sin(\widehat{\mathbf{H}, \mathbf{dl}})$	$dF = \mu HI \cdot dl \sin(\widehat{\mathbf{H}, \mathbf{dl}})$	$dF = \mu_0\mu HI \cdot dl \sin(\widehat{\mathbf{H}, \mathbf{dl}})$	$dF = \frac{\mu}{c} HI \cdot dl \sin(\widehat{\mathbf{H}, \mathbf{dl}})$
Момент, испытываемый контуром с током в магнитном поле	$M = Bp_m \sin(\widehat{\mathbf{B}, \mathbf{p}_m})$			

Величина	СИ (МКСА)	СГСМ	СГСЭ	СГС
Магнитный момент контура с током	$p_m = Is$		$p_m = \frac{1}{c} Is$	
Работа перемещения контура с током в магнитном поле	$A = I\Delta\Psi$		$A = \frac{1}{c} I\Delta\Psi$	
Связь между индукцией и напряженностью магнитного поля	$B = \mu_0\mu H$	$B = \mu H$	$B = \mu_0\mu H$	$B = \mu H$
Закон Био, Савара и Лапласа	$H = \frac{1}{4\pi} \oint \frac{Idl \sin(\widehat{\mathbf{r}, \mathbf{dl}})}{r^2}$	$H = \oint \frac{Idl \sin(\widehat{\mathbf{r}, \mathbf{dl}})}{r^2}$		$H = \frac{1}{c} \oint \frac{Idl \sin(\widehat{\mathbf{r}, \mathbf{dl}})}{r^2}$
Напряженность магнитного поля бесконечно длинного прямолинейного проводника с током	$H = \frac{I}{2\pi r}$	$H = \frac{2I}{r}$		$H = \frac{1}{c} \cdot \frac{2I}{r}$
Напряженность поля в центре кольца, обтекаемого током	$H = \frac{I}{2R}$	$H = \frac{2\pi I}{R}$		$H = \frac{1}{c} \cdot \frac{2\pi I}{R}$
Напряженность поля на оси длинного соленоида[6*]	$H = I\frac{n}{l} = In_0$	$H = 4\pi I \frac{n}{l} = 4\pi In_0$		$H = \frac{1}{c} 4\pi In_0$
Сила взаимодействия двух параллельных токов	$F = \frac{\mu_0\mu}{2\pi} \cdot \frac{I_1 I_2 l}{2}$	$F = \mu \frac{2I_1 I_2 l}{r}$	$F = \mu_0 \frac{2\mu I_1 I_2 l}{r}$	$F = \frac{\mu}{c^2} \cdot \frac{2I_1 I_2 l}{r}$
Связь между магнитным потоком и магнитной индукцией	$d\Phi = B\,ds \cos(\widehat{\mathbf{B}, \mathbf{n}})$			
Магнитодвижущая сила	$F = \Sigma I$	$F = 4\pi\Sigma I$		$F = \frac{1}{c} 4\pi \Sigma I$
Намагниченность	$J = \frac{p_n}{V} \chi H$			
Связь между магнитной проницаемостью и магнитной восприимчивостью	$\mu = 1 + \chi$	$\mu = 1 + 4\pi\chi$		
Связь между потокосцеплением, силой тока и индуктивностью контура	$\Psi = LI$			$\Psi = \frac{1}{c} LI$
Индуктивность соленоида[7*]	$L = \mu_0\mu \frac{n^2 s}{l} = \mu_0\mu n_0^2 V$	$L = 4\pi\mu \frac{n^2 s}{l} = 4\pi\mu n_0 V$	$L = 4\pi\mu_0\mu \frac{n^2 s}{l} = 4\pi\mu_0\mu n_0^2 V$	$L = 4\pi\mu \frac{n^2 s}{l} = 4\pi\mu n_0^2 V$
Индуктивность двухпроводной линии	$L = \mu_0 \frac{l}{\pi} \ln a/R$	$L = 4l \ln a/R$	$L = 4\mu_0 l \ln a/R$	$L = 4l \ln a/R$
Электродвижущая сила индукции	$\mathcal{E}_i = -\frac{d\Psi}{dt}$			$\mathcal{E}_i = -\frac{1}{c} \cdot \frac{d\Psi}{dt}$

Величина	СИ (МКСА)	СГСМ	СГСЭ	СГС
Электродвижущая сила самоиндукции	$\mathcal{E}_{si} = -L\frac{dI}{dt}$			$\mathcal{E}_{si} = -\frac{1}{c^2}\cdot\frac{dI}{dt}$
Объемная плотность энергии магнитного поля	$w = \frac{BH}{2} = \frac{B^2}{2\mu_0\mu} = \frac{\mu_0\mu H^2}{2}$	$w = \frac{BH}{8\pi} = \frac{B^2}{8\pi\mu} = \frac{\mu H^2}{8\pi}$	$w = \frac{BH}{8\pi} = \frac{B^2}{8\pi\,\mu_0\mu} = \frac{\mu_0\mu H^2}{8\pi}$	$w = \frac{BH}{8\pi} = \frac{B^2}{8\pi\mu} = \frac{\mu H^2}{8\pi}$
Вектор Пойнтинга (плотность потока электромагнитной индукции)	$\mathbf{S} = \mathbf{E}\times\mathbf{H}$	$\mathbf{S} = \frac{1}{4\pi}\mathbf{E}\times\mathbf{H}$		$\mathbf{S} = \frac{c}{4\pi}\mathbf{E}\times\mathbf{H}$
Скорость распределения электромагнитных волн	$v = \frac{1}{\sqrt{\varepsilon_0\varepsilon\,\mu_0\mu}}$	$v = \frac{1}{\sqrt{\varepsilon_0\varepsilon\mu}}$	$v = \frac{1}{\sqrt{\varepsilon\mu_0\mu}}$	$v = \frac{c}{\sqrt{\varepsilon\mu}}$
Уравнения Максвелла 1. Закон Фарадея	$\operatorname{rot}\mathbf{E} = -\frac{\partial\mathbf{B}}{\partial t}$			$\operatorname{rot}\mathbf{E} = -\frac{1}{c}\cdot\frac{\partial\mathbf{B}}{\partial t}$
2. Закон полного тока (закон Ампера)	$\operatorname{rot}\mathbf{H} = \mathbf{j} + \frac{\partial\mathbf{D}}{\partial t}$	$\operatorname{rot}\mathbf{H} = 4\pi\mathbf{j} + \frac{\partial\mathbf{D}}{\partial t}$		$\operatorname{rot}\mathbf{H} = \frac{1}{c}\times\left(4\pi\mathbf{j} + \frac{\partial\mathbf{D}}{\partial t}\right)$
3. Уравнение Пуассона (теорема Гаусса)	$\operatorname{div}\mathbf{D} = \rho$	$\operatorname{div}\mathbf{D} = 4\pi\rho$		
4. Непрерывность силовых линий магнитной индукции (теорема Гаусса)	$\operatorname{div}\mathbf{B} = 0$			

* Все величины должны измеряться единицами соответствующей системы. В частности, для ε_0 и μ_0 должны подставляться значения: в системе СИ (МКСА) $\varepsilon_0 = 8{,}85\cdot10^{-12}$ *ф/м*, $\mu_0 = 1{,}26\cdot10^{-6}$ *гн/м*; в системе СГСМ $\varepsilon_0 = 1{,}11\cdot10^{-21}$, $\mu_0 = 1$; в системе СГСЭ $\varepsilon_0 = 1$, $\mu_0 = 1{,}11\cdot10^{-21}$.

2* τ — плотность заряда на единицу длины конденсатора.

3* Предполагается, что $r \gg l$ (l — плечо диполя).

4* U_1 — потенциал, R_1 — радиус внутреннего цилиндра.

5* l — длина линии; R — радиус проводов; a — расстояние между проводами ($a \gg R$).

6* n — общее число витков; n_0 — число витков на единицу длины.

7* s — площадь сечения соленоида; n — общее число витков; n_0 — число витков на единицу длины.

ПРИМЕЧАНИЕ

О проекте нового ГОСТа единиц физических величин

В настоящее время Комитетом стандартов при Совете Министров одобрен проект нового стандарта единиц физических величин, предусматривающий унификацию единиц, применяемых в нормативно-технических документах и литературе. Новый стандарт устанавливает единицы важнейших физических величин, допускаемых к применению в СССР, их наименования, обозначения и определения. В основу совокупности единиц, устанавливаемой стандартом для обязательного применения, положены единицы Международной системы (СИ) единиц.

В настоящее время в СИ принято шесть основных единиц: метр, килограмм, секунда, кельвин, ампер, кандела. В соответствии с решениями XIII Генеральной конференции по мерам и весам даются новые определения секунды, кельвина и канделы.

Секунда — 9192631770 периодов излучения, соответствующего переходу между уровнями $F = 4$, $m_F = 0$ и $F = 3$, $m_F = 0$ основного состояния атома ^{133}Cs в отсутствие внешних полей.

Кельвин — 1/273,16 часть термодинамической температуры тройной точки воды.

Кандела — единица силы света, определяется на основании того, что яркость черного излучателя при температуре затвердевания платины (около 2042°К) равна 0,6 кд·мм$^{-2}$.

Государственный стандарт предусматривает изменение наименований некоторых физических величин и их новые обозначения. Эти изменения приведятся в табл. 1.26.

Стандартом допускаются к применению наравне с единицами СИ внесистемные единицы (тонна, минута, час, сутки, градус Цельсия, гектар, литр) и их сочетание с единицами СИ, а также единицы, представляющие собой десятичные кратные и дольные от этих единиц. Десятичные кратные и дольные от единиц в первой степени образуются умножением на один из множителей, помещенных в табл. 1.2.

Новый государственный стандарт вводит единицы относительных величин, имеющих собственные наименования (табл. 1.27).

Стандарт вводит некоторые изменения в обозначении единиц физических величин.

1. Разрешается применять русские или международные обозначения; одновременное применение в одном и том же издании обоих видов обозначений не допускается.

2. Для буквенных обозначений единиц должен применяться шрифт текста, в котором они используются: прямой при прямом шрифте текста и курсивный (наклонный) — при курсивном.

3. Обозначения единиц должны печататься строчными (малыми) буквами за исключением обозначений единиц, наименования которых образованы по фамилиям ученых. Эти обозначения должны печататься с прописной (заглавной) буквы. Изменения стандартом русских обозначений единиц физических величин приведены в табл. 1.28.

Таблица 1.26

Изменение наименований физических величин и их новые (соответствующие) обозначения*

Величина	Наименование единицы		Русское обозначение единицы		Международное обозначение
	Принятое ранее	По проекту стандарта	Принятое ранее	По проекту стандарта	
Термодинамическая температура Кельвина	градус Кельвина	кельвин	°К	К	К
Разность температур	градус	1) кельвин 2) градус Цельсия	*град*	1) К 2) °С	1) К 2) °С
Сила света	свеча	кандела	*св*	кд	cd
Давление	ньютон на квадратный метр	паскаль	*н/м*^{2}	Па	Pa
Динамическая вязкость	ньютон-секунда на квадратный метр	паскаль-секунда	*н·сек/м*^{2}	Па·с	P ·s
Акустическое сопротивление	ньютон-секунда на метр в пятой степени	паскаль-секунда на метр в третьей степени	*н·сек/м*^{5}	Па·с/м^3	Pa·s/m^3
Удельное акустическое сопротивление	ньютон-секунда на метр в третьей степени	паскаль-секунда на метр	*н·сек/м*^{3}	Па·с/м	Pa·s/m

* Изменение русских обозначений физических величин приведены в табл. 1.28.

Таблица 1.27

Единицы относительных величин

Наименование	Единица: Наименование	Обозначение: русскими буквами	Обозначение: латинскими буквами	Значение в единицах СИ или определение	Примечание
Относительная величина (безразмерное отношение физической величины к одноименной физической величине, принимаемой за исходную: к. п. д., относительное удлинение, относительная плотность и т. п.)	процент	%	%	10^{-2}	—
	промилле	‰	‰	10^{-3}	—
	миллионная доля	млн$^{-1}$	ppm	10^{-6}	—
Логарифмическая величина (логарифм безразмерного отношения физической величины к одноименной физической величине, принимаемой за исходную)	бел	Б	B	1Б $= \lg (P_2/P_1)$ при $P_2 = 10P_1$,	P_1, P_2 — одноименные энергетические величины (мощности, энергии и т. п.)
				1Б $= 2\lg (F_2/F_1)$ при $F_2 = \sqrt{10}\,F_1$	F_1, F_2 — одноименные «силовые» величины (напряжения, силы тока, давления и т. п.)
Частотный интервал	децибел	ДБ		0,1Б	
	октава	—	—	1 октава $= \log_2(f_2/f_1)$ при $(f_2/f_1) = 2$	f_1, f_2 — частоты
	декада	—	—	1 декада $= \lg (f_2/f_1)$ при $(f_2/f_1) = 10$	
Количество информации	бит	бит	—	—	1 бит — количество информации, получаемое при осуществлении одного из двух равновероятных событий

Таблица 1.28

Изменение русских обозначений единиц физических величин

Наименование величины	Наименование единицы	Принятое ранее	По проекту стандарта	Наименование величины	Наименование единицы	Принятое ранее	По проекту стандарта
Время	секунда	*сек*	с	Электрическое сопротивление	ом	*ом*	Ом
	час	*ч*	ч				
Телесный угол	стерадиан	*стер*	ср	Электрическая проводимость	сименс	*сим*	См
Частота	герц	*гц*	Гц				
Длина	парсек	*пс*	пк	Напряженность магнитного поля	эрстед	*э*	Э
Площадь	барн	*барн*	б (1б $=10^{-28}$ *м*^{2})	Магнитный поток	вебер	*вб*	Вб
					максвелл	*мкс*	Мкс
Сила	ньютон	*н*	Н	Магнитная индукция	тесла	*тл*	Т
Динамическая вязкость	пуаз	*пз*	П		гаусс	*гс*	Гс
Кинематическая вязкость	стокс	*ст*	Ст	Магнитодвижущая сила	гильберт	*гб*	Гб
Работа	джоуль	*дж*	Дж	Индуктивность	генри	*гн*	Г
Энергия	электронвольт	*эв*	эВ	Активность нуклида в радиоактивном источнике (активность нуклида)	распад в секунду	*распад* / *сек*	расп/с
Мощность	ватт	*вт*	Вт		кюри	*кюри*	Ки
Сила электрического тока	ампер	*а*	А	Поток ионизирующих частиц	частица в секунду	*частица* / *сек*	част/с
Количество электричества	кулон	*к*	Кл				
Электрическое напряжение, электрический потенциал, электродвижущая сила	вольт	*в*	В	Плотность потока ионизирующих частиц	частица в секунду на квадратный метр	*частица* / *м*^{2}·*сек*	част/(с·м^2)
Электрическая емкость	фарада	*ф*	Ф				

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Бурдун Г. Д.** Единицы физических величин. М., Стандартгиз, 1967.
2. **Коэффициенты** перевода единиц измерения физико-технических величин. М., Атомиздат, 1967.
3. **Сена А. А.** Единицы физических величин и их размерности. М., «Наука», 1969.

ГЛАВА 2

ФУНДАМЕНТАЛЬНЫЕ ФИЗИЧЕСКИЕ ПОСТОЯННЫЕ

В табл. 2.1 и 2.2 представлены уточненные значения фундаментальных физических постоянных, рекомендованные рабочей группой СОДАТА (август 1973 г.) [3]. Эта наиболее достоверная на сегодняшний день численная информация о фундаментальных физических постоянных получена в результате анализа новейших экспериментальных данных [1]. Значения физических постоянных вычислены методом наименьших квадратов по формулам, которые выражают любую постоянную непосредственно через значения выбранных физических

Таблица 2.1

Значения фундаментальных физических постоянных в системах единиц СИ и СГС [1—3]

Наименование	Обозначение, формула	Значение	Множитель в системе единиц	
			СИ	СГС
Скорость света	c	2,99792458 (12)	10^{8} *м·сек*$^{-1}$	10^{10} *см·сек*$^{-1}$
Постоянная тонкой структуры	α	7,2973506 (60)	10^{-3}	10^{-3}
	α^{-1}	137,03604 (11)	1	1
Заряд электрона	e	1,6021892 (46)	10^{-19} *к*	10^{-20} ед. СГСМ
		4,803242 (14)	—	10^{-10} ед. СГСЭ
Постоянная Планка	h	6,626176 (36)	10^{-34} *дж·сек*	10^{-27} *эрг·сек*
	$\hbar = h/2\pi$	1,0545887 (57)	10^{-34} *дж·сек*	10^{-27} *эрг·сек*
Число Авогадро	N	6,0220943 (61)	10^{26} *кмоль*$^{-1}$	10^{23} *моль*$^{-1}$
Атомная единица массы	*а. е. м.*	1,6605655 (86)	10^{-27} *кг*	10^{-24} *г*
Масса покоя электрона	m_e	9,109534 (47)	10^{-31} *кг*	10^{-28} *г*
	m_e^*	5,4858026 (21)	10^{-4} *а. е. м.*	10^{-4} *а. е. м.*
Масса покоя протона	M_p	1,6726485 (86)	10^{-27} *кг*	10^{-24} *г*
	M_p^*	1,007276470 (11)	*а. е. м.*	*а. е. м.*
Масса покоя нейтрона	M_n	1,6749543 (86)	10^{-27} *кг*	10^{-24} *г*
	M_n^*	1,008665012 (37)	*а. е. м.*	*а. е. м.*
Отношение массы протона к массе электрона	M_p/m_e	1836,15152 (70)	1	1
Отношение заряда электрона к его массе	e/m_e	1,7588047 (49)	10^{11} *к·кг*$^{-1}$	10^{7} ед. СГСМ·*г*$^{-1}$
		5,272759 (16)	1	10^{17} ед. СГСЭ·*г*$^{-1}$
Магнитный квантовый поток	Φ_0	2,0678506 (54)	10^{-15} *тл·м*^{2}	10^{-7} *гс·см*^{2}
	h/e	4,135701 (11)	10^{-15} *дж·сек·к*$^{-1}$	10^{-7} *эрг·сек·*ед. СГСМ
		1,3795234 (46)	—	10^{-17} *эрг·сек·*ед. СГСЭ
Отношение постоянной Планка к массе электрона	$h/2m_e$	3,6369455 (60)	10^{-4} *дж·сек·кг*$^{-1}$	*эрг·сек·г*$^{-1}$
	h/m_e	7,273891 (12)	10^{-4} *дж·сек·кг*$^{-1}$	*эрг·сек·г*$^{-1}$
Число Фарадея	$F = Ne$	9,648456 (27)	10^{7} *к·кмоль*$^{-1}$	10^{3} ед. СГСМ·*моль*$^{-1}$
Постоянная Ридберга	$R_\infty = [\mu_0 c^2/4\pi]^2 (m_e e^4/4\pi\hbar^3 c)$	2,892599 (16)	—	10^{14} ед. СГСЭ·*моль*$^{-1}$
		1,097373143 (10)	10^{7} *м*$^{-1}$	10^{5} *см*$^{-1}$
Боровский радиус	$a_0 = [\mu_0 c^2/4\pi]^{-1}(\hbar^2/m_e c^2) = \alpha/4\pi R_\infty$	5,2917706 (44)	10^{-11} *м*	10^{-9} *см*
Классический радиус электрона	$r_0 = [\mu_0 c^2/4\pi](e^2/m_e c^2) = \alpha^3/4\pi R_\infty$	2,8179380 (70)	10^{-15} *м*	10^{-13} *см*
Магнетон Бора	$\mu_Б = [c](e\hbar/2m_e c)$	9,274078 (36)	10^{-24} *дж·тл*$^{-1}$	10^{-21} *эрг·гс*$^{-1}$
Магнитный момент электрона в магнетонах Бора	$\mu_e/\mu_Б$	1,0011596577 (35)	1	1
Магнитный момент электрона	μ_e	9,284832 (36)	10^{-24} *дж·тл*$^{-1}$	10^{-21} *эрг·гс*$^{-1}$
Гиромагнитное отношение протонов в H_2O	γ_p'	2,6751301 (75)	10^{8} *рад·сек*$^{-1}$*·тл*$^{-1}$	10^{4} *рад·сек*$^{-1}$*·гс*$^{-1}$
	$\gamma_p'/2\pi$	4,257602 (13)	10^{7} *гц·тл*$^{-1}$	10^{3} *гц·гс*$^{-1}$

Наименование	Обозначение, формула	Значение	Множитель в системе единиц	
			СИ	СГС
То же, исправленное на диамагнетизм в H_2O	γ_p $\gamma_p/2\pi$	2,6751987 (75) 4,257707 (13)	10^8 *рад·сек*$^{-1}\times$ $\times$ *тл*$^{-1}$ 10^7 *гц·тл*$^{-1}$	10^4 *рад·сек*$^{-1}\cdot$ *гс*$^{-1}$ 10^3 *гц·гс*$^{-1}$
Магнитный момент протонов в H_2O, магнетонах Бора	$\mu_p'/\mu_Б$	1,52099322 (10)	10^{-3}	10^{-3}
Магнитный момент протонов в магнетонах Бора	$\mu_p/\mu_Б$	1,52102209 (16)	10^{-3}	10^{-3}
Магнитный момент протона	μ_p	1,4106171 (55)	10^{-26} *дж·тл*$^{-1}$	10^{-23} *эрг·гс*$^{-1}$
Магнитный момент протонов в H_2O в ядерных магнетонах	μ_p'/μ_n	2,7927740 (11)	1	1
μ_p'/μ_n, исправленное на диамагнетизм H_2O	μ_p/μ_n	2,792782 (17)	1	1
Ядерный магнетон	$\mu_n = [c]\left(\frac{e\hbar}{2M_pc}\right)$	5,050824 (20)	10^{-27} *дж·тл*$^{-1}$	10^{-24} *эрг··гс*$^{-1}$
Комптоновская длина волны электрона	$\lambda_C = h/m_ec$ $\lambda_C/2\pi$	2,4263089 (40) 3,8615905 (64)	10^{-12} *м* 10^{-13} *м*	10^{-10} *см* 10^{-11} *см*
Комптоновская длина волны протона	$\lambda_{C,p} = h/M_pc$ $\lambda_{C,p}/2\pi$	1,3214099 (22) 2,1030892 (36)	10^{-15} *м* 10^{-16} *м*	10^{-13} *см* 10^{-14} *см*
Комптоновская длина волны нейтрона	$\lambda_{C,n} = h/M_nc$ $\lambda_{C,n}/2\pi$	1,3195909 (22) 2,1001941 (35)	10^{-15} *м* 10^{-16} *м*	10^{-13} *см* 10^{-14} *см*
Газовая постоянная	R_0	8,31441 (26)	10^3 $\frac{дж}{кмоль\cdot град}$	10^7 *эрг·моль*$^{-1}\cdot$ *град*$^{-1}$
Постоянная Больцмана	$k = R_0/N$	1,380662 (44)	10^{-23} *дж·град*$^{-1}$	10^{-16} *эрг·град*$^{-1}$
Постоянная Стефана—Больцмана	$\sigma = \pi^2k^4/60\hbar^3c^2$	5,67032 (71)	10^{-8} *вт·м*$^{-2}\times$ $\times$ *град*$^{-4}$	10^{-5} *эрг·сек*$^{-1}\cdot$ *см*$^{-2}\cdot$ *град*$^{-4}$
Первая постоянная излучения	$C_1 = 8\pi hc$	4,992579 (38)	10^{-24} *дж·м*	10^{-15} *эрг·см*
Вторая постоянная излучения	$C_2 = hc/k$	1,438786 (45)	10^{-2} *м·град*	*см·град*
Гравитационная постоянная	G	6,6720 (41)	10^{-11} *н·м*$^2\cdot$ *кг*$^{-2}$	10^{-3} *дин·см*$^2\cdot$ *г*^{2}
Стандартный объем идеального газа	V_0	22,41383 (70)	*м*$^3\cdot$ *кмоль*$^{-1}$	10^3 *см*$^3\cdot$ *моль*$^{-1}$

Таблица 2.2

Значения фундаментальных физических постоянных в других единицах [1—3]

Название констант	Значение
Атомная единица массы	931,5016 (26) *Мэв*
Масса электрона	0,5110034 (14) *Мэв*
Масса протона	938,2796 (27) *Мэв*
Масса нейтрона	939,5731 (27) *Мэв*
Электронвольт	$1{,}6021892\ (46)\cdot10^{-19}$ *дж*
	$1{,}6021892\ (46)\cdot10^{-12}$ *эрг*
	$2{,}4179696\ (63)\cdot10^{14}$ *гц*
	$8{,}065479\ (21)\cdot10^{5}$ $м^{-1}$
	$8{,}065479\ (21)\cdot10^{3}$ $см^{-1}$
Постоянная Ридберга R_∞	$2{,}179907\ (12)\cdot10^{-18}$ *дж*
	$2{,}179907\ (12)\cdot10^{-11}$ *эрг*
	13,605804 (36) *эв*
	$3{,}28984200\ (25)\cdot10^{15}$ *гц*
Магнетон Бора $\mu_Б$	$1{,}578885\ (49)\cdot10^{5}$ *град*
	$5{,}788378\ (9)\cdot10^{-5}$ $эв\cdot тл^{-1}$
	$1{,}3996108\ (43)\cdot10^{10}$ $гц\cdot тл^{-1}$
	46,68598 (14) $м^{-1}\cdot тл^{-1}$
	46,68598 (14)$\cdot10^{-2}$ $см^{-1}\cdot тл^{-1}$
	0,671733 (29) $град\cdot тл^{-1}$
Ядерный магнетон μ_n	$3{,}1524515\ (53)\cdot10^{-8}$ $эв\cdot тл^{-1}$
	$7{,}622700\ (42)\cdot10^{6}$ $гц\cdot тл^{-1}$
	$2{,}542659\ (14)\cdot10^{-2}$ $м^{-1}\cdot тл^{-1}$
	$2{,}542659\ (14)\cdot10^{-4}$ $см^{-1}\cdot тл^{-1}$
	$3{,}65846\ (16)\cdot10^{-4}$ $град\cdot тл^{-1}$
Газовая постоянная	$8{,}20562\ (35)\cdot10^{-2}$ $м^3\cdot атм\cdot кмоль^{-1}\cdot град^{-1}$

постоянных в комбинации с так называемыми вспомогательными константами, которые можно считать точно известными. Выбранными физическими постоянными являются: α^{-1} — обратная величина постоянной тонкой структуры; e — заряд электрона; N — число Авогадро. Примером вспомогательной константы является R_∞ — постоянная Ридберга для бесконечной массы, значение которой известно с точностью до $1\cdot10^{-7}$.

В табл. 2.1 значения физических постоянных из колонки 3 нужно умножить на соответствующие множители для систем СИ и СГС из колонок 4 и 5. Числа в скобках в табл. 2.1 и 2.2 — стандартные отклонения в последних двух значащих цифрах числа. В формулах для обозначения констант в системе СГС употребляется выражение, стоящее в круглых скобках (в колонке 2). При переходе к системе СИ выражение в круглых скобках нужно умножить на коэффициент в квадратных скобках.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Taylor B. N., Parker W. H., Langenberg D. N.** Rev. Mod. Phys., 1969, v. 41, p. 375; **Тейлор Б., Паркер В., Лангенберг Д.** Фундаментальные константы и квантовая электродинамика. Пер. с англ. Под ред. Б. А. Мамырина. М., Атомиздат, 1972.
2. **Barash—Schmidt N. e.a.** Particle Properties. CERN. April. 1974; Physics Letters, v. 50B, N 1, 1974.
3. **Фундаментальные** константы физики и химии. Рекомендации по представлению в первичной литературе численных экспериментальных данных Пер. с англ. М., ВНИЦ ГСССД, 1975. (CODATA, 1973, No. 11); Успехи физ. наук, 1975, т. 115, в. 4, с. 623.

ГЛАВА 3

ПЕРИОДИЧЕСКАЯ СИСТЕМА ЭЛЕМЕНТОВ

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 определяется главным квантовым числом n, орбитальным квантовым числом l, его проекцией m, спиновым числом s и его проекцией σ. Электроны с разными n и l составляют разные оболочки. С учетом принципа Паули число электронов в оболочке с индексом l не может быть больше $2(2l+1)$. В зависимости от значения $l = 0, 1, 2\ldots$ оболочки обозначают буквами $s, p, d, f, \ldots$.

Современная таблица химических элементов составлена таким образом, что при переходе от какого-либо атома к следующему заряд 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 $1s^2$-оболочка. Второй и третий периоды содержат по 8 элементов, у которых застраиваются сначала s^2-оболочки, ($2s^2$ и $3s^2$), а затем — p^6-оболочки ($2p^6$ и $3p^6$). Первые три периода обычно называют малыми.

Периоды с четвертого по седьмой занимают в таблице по два ряда и обычно называются большими. У элементов четвертого и пятого периодов прежде всего

ПЕРИОДЫ	ГРУППЫ ЭЛЕМЕНТОВ				
	I	II	III	IV	V
2	**Li** 6,939 3 · 6;7 · ЛИТИЙ $2s^1$	**Be** 9,0122 4 · 8;9 · БЕРИЛЛИЙ $2s^2$	5 10,811 **B** · 10;11 · $2s^2 2p^1$ БОР	6 12,01115 **C** · 12;13 · $2s^2 2p^2$ УГЛЕРОД	7 14,0067 **N** · 14;15 · $2s^2 2p^3$ АЗОТ
3	**Na** 22,9898 11 · 23 · НАТРИЙ $3s^1$	**Mg** 24,312 12 · 24–26 · МАГНИЙ $3s^2$	13 26,9815 **Al** · 27 · $3s^2 3p^1$ АЛЮМИНИЙ	14 28,086 **Si** · 28–30 · $3s^2 3p^2$ КРЕМНИЙ	15 30,9738 **P** · 31 · $3s^2 3p^3$ ФОСФОР
4	**K** 39,102 19 · 40 ε, β⁻ · 39;41 · КАЛИЙ $4s^1$	**Ca** 40,08 20 · 40 · 42–44 · 46 48 · КАЛЬЦИЙ $4s^2$	**Sc** 44,956 21 · 45 · СКАНДИЙ $3d^1 4s^2$	**Ti** 47,90 22 · 46–48–50 · ТИТАН $3d^2 4s^2$	**V** 50,942 23 · 50 ε; 51 · ВАНАДИЙ $3d^3 4s^2$
	29 63,546 **Cu** · 63;65 · (3d¹⁰) $4s^1$ МЕДЬ	30 65,37 · 64 · 66–68 · 70 · $3d^{10} 4s^2$ **Zn** ЦИНК	31 69,72 **Ga** · 69;71 · $4s^2 4p^1$ ГАЛЛИЙ	32 72,59 **Ge** · 70;72–74 · 76 · $4s^2 4p^2$ ГЕРМАНИЙ	33 74,9216 **As** · 75 · $4s^2 4p^3$ МЫШЬЯК
5	**Rb** 85,47 37 · 85 · 87 β⁻ · РУБИДИЙ $5s^1$	**Sr** 87,62 38 · 84 · 86–88 · СТРОНЦИЙ $5s^2$	**Y** 88,905 39 · 89 · ИТТРИЙ $4d^1 5s^2$	**Zr** 91,22 40 · 90–92 · 94 96 · ЦИРКОНИЙ $4d^2 5s^2$	**Nb** 92,906 41 · 93 · НИОБИЙ $4d^4 5s^1$
	47 107,868 **Ag** · 107;109 · $4d^{10} 5s^1$ СЕРЕБРО	48 112,40 · 106 108 · 110–112 · 113 114 116 · $4d^{10} 5s^2$ **Cd** КАДМИЙ	49 114,82 · 115 β⁻ · 113 · $5s^2 5p^1$ **In** ИНДИЙ	50 118,69 · 112 · 114–120 · 122 124 · $5s^2 5p^2$ **Sn** ОЛОВО	51 121,75 · 121;123 · $5s^2 5p^3$ **Sb** СУРЬМА
6	**Cs** 132,905 55 · 133 · ЦЕЗИЙ $6s^1$	**Ba** 137,34 56 · 130 132 · 134–138 · БАРИЙ $6s^2$	**La** 138,91 57 · 138 ε 139 · ЛАНТАН $5d^1 6s^2$	* 58–71	**Hf** 178,49 72 · 174 · 176–180 · ГАФНИЙ $5d^2 6s^2$	**Ta** 180,948 73 · 180 · 181 · ТАНТАЛ $5d^3 6s^2$
	79 196,967 · 197 · **Au** · (5d¹⁰) $6s^1$ ЗОЛОТО	80 200,59 · 196 · 198–202 · 204 · $5d^{10} 6s^2$ **Hg** РТУТЬ	81 204,37 · 203;205 · **Tl** · $6s^2 6p^1$ ТАЛЛИЙ	82 207,19 · 204;206–208 · **Pb** · $6s^2 6p^2$ СВИНЕЦ	83 208,980 · 209 · **Bi** · $6s^2 6p^3$ ВИСМУТ
7	**Fr** [223] 87 · 219 · 223 β⁻ · ФРАНЦИЙ $7s^1$	**Ra** [226] 88 · (218) · 220–224 · 226 · РАДИЙ $7s^2$	**Ac** [227] 89 · 225 · 227 α, β⁻ · АКТИНИЙ $6d^1 7s^2$	** 90–103	260Ф (266–270) (272) Ku 104 · КУРЧАТОВИЙ $(6d^2 7s^2)$	273 (271) Ns 105 · НИЛЬСБОРИЙ $(6d^3 7s^2)$

* ЛАНТАНОИДЫ

140,12 $4f^2 6s^2$ 58 **Ce** · 136; 138 · 140 · 142 · ЦЕРИЙ	140,907 $4f^3 6s^2$ 59 **Pr** · 141 · ПРАЗЕОДИМ	144,24 $4f^4 6s^2$ 60 **Nd** · 142–146 · 148–150 · НЕОДИМ	[145] $4f^5 6s^2$ 61 **Pm** · 145 ε; 147 β⁻ · ПРОМЕТИЙ	150,35 $4f^6 6s^2$ 62 **Sm** · 144 146 147; 148–150 · 152 154 · САМАРИЙ	151,96 $4f^7 6s^2$ 63 **Eu** · 151;153 · ЕВРОПИЙ	157,25 $4f^7 5d^1 6s^2$ 64 **Gd** · 150 152 · 154–158 · 160 · ГАДОЛИНИЙ

** АКТИНОИДЫ

232,038 $6d^2 7s^2$ 90 **Th** · 224 · 226–230 · 232 · ТОРИЙ	[231] $5f^2 6d^1 7s^2$ 91 **Pa** · 231 · ПРОТАКТИНИЙ	238,03 $5f^3 6d^1 7s^2$ 92 **U** · 230 · 232–235; 236 · 238 · УРАН	[237] 93 **Np** $5f^4 6d^1 7s^2$ · 237 · НЕПТУНИЙ	[244] $5f^6 7s^2$ 94 **Pu** · 236 · 238–240; 242 244 · ПЛУТОНИЙ	[243] $5f^7 7s^2$ 95 **Am** · 241;243 · АМЕРИЦИЙ	[247] $5f^7 6d^1 7s^2$ 96 **Cm** · 240 242 · 244–246 · КЮРИЙ 247; 248–250Ф

застраиваются s^2-оболочки ($4s^2$ и $5s^2$). После этого заполняются d^{10}-оболочки предыдущих слоев ($3d^{10}$ и $4d^{10}$) и, наконец, p^6-оболочки ($4p^6$ и $5p^6$). Оба эти периода содержат по 18 элементов.

Оболочки элементов шестого и седьмого периодов также застраиваются в одинаковой последовательности: сначала заполняются внешние s^2-оболочки ($6s^2$ и $7s^2$), после этого появляется один электрон на предыдущей d-оболочке (в атомах La и Ac), но в последующих элементах в основном заполняются более глубокие f-оболочки ($4f^{14}$ и $5f^{14}$) и лишь после этого достраиваются d-оболочки ($5d^{10}$ и $6d^{10}$).

Элемеиты, у которых заполняются не внешние, а более глубокие оболочки, иазываются переходными. Так, в четвертом периоде к переходным относятся элементы от Sc до Zn, у которых застраиваются $3d$-оболочки, в

ПЕРИОДИЧЕСКАЯ СИСТЕМА ХИМИЧЕСКИХ ЭЛЕМЕНТОВ

VI	VII	VIII	ПЕРИОДЫ
	1,00797 1;2 **H** 1 $1s^1$ ВОДОРОД	4,0026 3;4 **He** 2 $1s^2$ ГЕЛИЙ	1
8 15,9994 16–18 **O** $2s^2 2p^4$ КИСЛОРОД	9 18,9984 19 **F** $2s^2 2p^5$ ФТОР	20,183 20–22 **Ne** 10 $2s^2 2p^6$ НЕОН	2
16 32,064 32–34;36 **S** $3s^2 3p^4$ СЕРА	17 35,453 35;37 **Cl** $3s^2 3p^5$ ХЛОР	39,948 36 38;40 **Ar** 18 $3s^2 3p^6$ АРГОН	3
Cr 51,996 24 50 52–54 ХРОМ $3d^5 4s^1$	**Mn** 54,9380 25 55 МАРГАНЕЦ $3d^5 4s^2$	ТРИАДЫ ПЕРЕХОДНЫХ ЭЛЕМЕНТОВ →	**Fe** 26 55,847 54 56–58 ЖЕЛЕЗО $3d^6 4s^2$	**Co** 27 58,9332 59 КОБАЛЬТ $3d^7 4s^2$	**Ni** 28 58,71 58 60–62;64 НИКЕЛЬ $3d^8 4s^2$
34 78,96 74 76–78 80 82 **Se** $4s^2 4p^4$ СЕЛЕН	35 79,904 79;81 **Br** $4s^2 4p^5$ БРОМ	83,80 78 80;82–84 86 **Kr** 36 $4s^2 4p^6$ КРИПТОН	4
Mo 95,94 42 92 94–97 98 100 МОЛИБДЕН $4d^5 5s^1$	**Tc** [97] 43 97ε;$98\beta^-$;$99\beta^-$ ТЕХНЕЦИЙ $4d^5 5s^2$	ТРИАДЫ ПЕРЕХОДНЫХ ЭЛЕМЕНТОВ →	**Ru** 44 101,07 96 98–102 104 РУТЕНИЙ $4d^7 5s^1$	**Rh** 45 102,905 103 РОДИЙ $4d^8 5s^1$	**Pd** 46 106,4 102 104–106;108 110 ПАЛЛАДИЙ $4d^{10}$
52 127,60 120 122–126 128 130 **Te** $5s^2 5p^4$ ТЕЛЛУР	53 126,9044 127 **I** $5s^2 5p^5$ ИОД	131,30 124 126 128–132 134 136 **Xe** 54 $5s^2 5p^6$ КСЕНОН	5
W 183,85 180 182–184 186 ВОЛЬФРАМ $5d^4 6s^2$	**Re** 186,2 75 185 $187\beta^-$ РЕНИЙ $5d^5 6s^2$	ТРИАДЫ ПЕРЕХОДНЫХ ЭЛЕМЕНТОВ	**Os** 76 190,2 184 186–190;192 ОСМИЙ $5d^6 6s^2$	**Ir** 77 192,2 191;193 ИРИДИЙ $5d^7 6s^2$	**Pt** 78 195,09 190 192 194;195;196 198 ПЛАТИНА $5d^9 6s^1$
84 [209] $208\varepsilon,\alpha$;$209\varepsilon,\alpha$ 210–214 216 **Po** $6s^2 6p^4$ ПОЛОНИЙ	85 [210] $210\varepsilon,\alpha$ 215 **At** $6s^2 6p^5$ АСТАТ	[222] 212 (214) 216–218 220 222 **Rn** 86 $6s^2 6p^6$ РАДОН	6
106			7

158,924 $4f^9 6s^2$ 65 **Tb** 159 ТЕРБИЙ	162,50 $4f^{10} 6s^2$ 66 **Dy** 156 158 160–164 ДИСПРОЗИЙ	164,930 $4f^{11} 6s^2$ 67 **Ho** 165 ГОЛЬМИЙ	167,26 $4f^{12} 6s^2$ 68 162 164 **Er** 166–168 170 ЭРБИЙ	168,934 $4f^{13} 6s^2$ 69 **Tm** 169 ТУЛИЙ	173,04 $(4f^{14}) 6s^2$ 70 168 **Yb** 170–174 176 ИТТЕРБИЙ	174,97 $5d^1 6s^2$ 71 **Lu** 175 $176\beta^-$ ЛЮТЕЦИЙ

[247] $(5f^8 6d^1 7s^2)$ 97 **Bk** 247 БЕРКЛИЙ	[249] $(5f^9 6d^1 7s^2)$ 98 246 **Cf** 248–252 254Φ КАЛИФОРНИЙ	[254] $(5f^{11} 7s^2)$ 99 **Es** 253 $254\alpha,\beta^-$ ЭЙНШТЕЙНИЙ	[257] $(5f^{12} 7s^2)$ 100 **Fm** 250 252 254–(258) (260) ФЕРМИЙ	$(5f^{13} 7s^2)$ (259) 101 **Md** $252\alpha,\varepsilon$ $254\alpha,\varepsilon$ $255\alpha,\varepsilon$ $258\alpha,\varepsilon$ МЕНДЕЛЕВИЙ	$(5f^{14} 7s^2)$ 102 **No** $251(\varepsilon),\alpha$ $-257(\varepsilon),\alpha$ (258) (260–264) (266) (НОБЕЛИЙ)	$(5f^{14} 6d^1 7s^2)$ 103 **Lr** (265) $256(\varepsilon),\alpha$ $258,$ $259(\varepsilon),\alpha$ ЛОУРЕНСИЙ

пятом — от Y до Cd (*4d*-переходные элементы), в шестом — от La до Hg, в седьмом — все элементы, стоящие после Ac.

Седьмой период остался недостроенным, поскольку у элементоз с $Z > 83$ отсутствуют устойчивые изотопы, причем их нестабильиость возрастает с увеличением Z. Таблица, таким образом, заканчивается последним из полученных искусственным путем элементов Ns. Неустановившиеся названия, недостоверные электронные конфигурации и гипотетические массовые числа наиболее долгоживущих изотопов радиоактивных элементов 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 Cu число *d*-электронов увеличивает-

ся 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 в *d*-оболочку «переходят» оба 5*s*-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 *d*- и *f*-состояния, поэтому у некоторых элементов очередной электрон попадает не в 4*f* (5*f*)-, а в 5*d* (6*d*)-оболочку: это происходит у Gd, Tb, Lu в группе редких земель и у Pa, U, Np, Cm, Bk, 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 помещенном на развороте «коротком» варианте таблицы каждый из больших периодов разбит на два ряда, помещенных один под другим, поэтому наряду с главными группами возникают побочные (промежуточные). 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 конфигурациями внешних оболочек $d^{10}s^1$ и $d^{10}s^2$ (5, 7, 9-й ряды). В группах с III по VII переходные элементы относятся к побочным подгруппам (4, 6, 8, 10-й ряды), а элементы с незаполненными *p*-оболочками — к главным (2, 3, 5, 7, 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 (пунктирная линия в таблице указывает на эти две возможности). У элементов благородных 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) выделяются переходные элементы с почти заполненными *d*-оболочками (группы Fe, Pd и Pt). Особые группы составляют также элементы с застраиваемыми 4*f*- и 5*f*-оболочками (лантаноиды и актиноиды).

Многие физические свойства элементов связаны с положением, которое они занимают в периодической системе. Так, атомные веса элементов возрастают с увеличением порядкового номера (исключение из этого правила составляют пары Ar—K, Co—Ni, Te—J); некоторые свойства элементов в конденсированной фазе определяются их принадлежностью к той или иной группе: все чистые полупроводники входят в четвертую главную подгруппу (C, Si, Ge, Sn), только переходные металлы с незастроенными *d*- или *f*-оболочками обладают ферромагнитными (Fe, Co, Ni, Gd, Tb, Dy, Ho, Er, Tm, Yb) и антиферромагнитными (Cr, Mn, Ce, Pr, Nd, Sm, Eu) свойствами и т. д. Химические свойства элементов, входящих в одну группу, также сходны.

Наряду с рассмотренной здесь короткой формой системы элементов часто используют длинную, в которой нет подгрупп, а всем элементам, имеющим однаковую структуру внешних электронных оболочек, отводится по отдельной группе [1]. «Длинную» таблицу нередко изображают в ступенчатой форме (рис. 3.1),

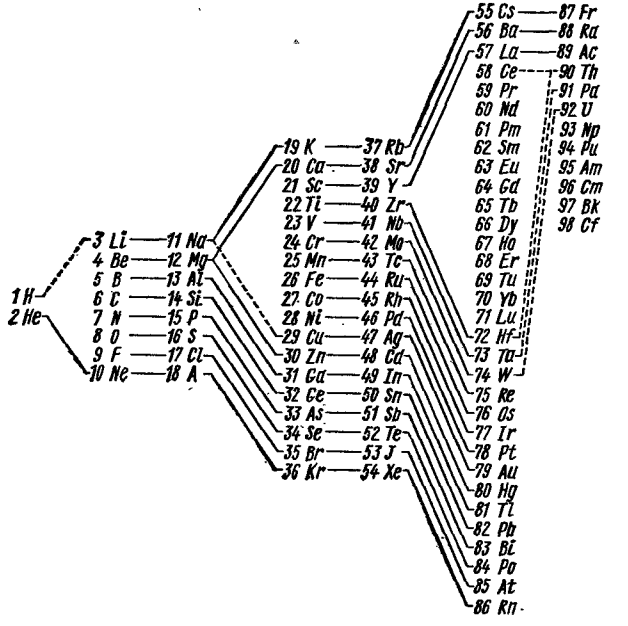


Рис. 3.1. «Длинная» периодическая система элементов

располагая периоды один за другим симметрично относительно оси таблицы, а элементы, принадлежащие к одной группе, соединяя линиями [2]. Предложены также другие варианты изображения системы в виде различных кривых (спиралей, круговых диаграмм и т. п.). Но короткая форма, введенная Д. И. Менделеевым, остается наиболее общеупотребительной.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Lexikon** der Physik. Bd 3. Stuttgart, 1969.
2. **Handbuch** der Physik. Bd 36. Springer Verlag, 1956.

II. МЕХАНИКА И ТЕРМОДИНАМИКА

ГЛАВА 4

МЕХАНИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА МАТЕРИАЛОВ

4.1. МЕТАЛЛЫ

В таблицах приведены предел текучести $\sigma_т$, временное сопротивление разрыву $\sigma_{вр}$, модуль упругости E, модуль сдвига G, вязкость η, твердость материала по Бринеллю $H_Б$ (иногда твердость материала указана по Роквеллу H_R, в обоих случаях твердость пересчитана в единицу системы СИ).

Модуль продольной упругости (модуль Юига) E и модуль сдвига G для однородных и изотропных материалов связаны с коэффициентом Пуассона μ (отношением поперечного сжатия на единицу ширины к продольному удлинению на единицу длины):

$$G = E/2(1+\mu).$$

Твердость материала связана с временным сопротивлением разрыву соотношением $\sigma_{вр} \approx H_\sigma/3$.

Таблица 4.1

Упругие свойства металлов [2, 6]

Материал	$\sigma_{вр}$, 10^7 н/м²	$\sigma_т$, 10^7 н/м²	$H_Б$, 10^7 н/м²	E, 10^{10} н/м²	G, 10^{10} н/м²	μ	η (при t = 30°С), 10^7 кг/см·сек
Алюминий отожженный	8,96—10,75 [1]	5,63—6,44 [1]	18,4 [1]	6,85 [1]	2,45 [1]	0,359—0,369 [1]	1,25
Ваиадий отожженный	56,5	52,2	74,2	14,8	—	—	—
Висмут литой	—	—	—	3,19 [2]	1,2 [2]	0,33 [2]	—
Вольфрам отожженный	69,9—80,9	10,8	196*—245 [2]	34,2—40	8,8—21,5	—	9,37 [5]
Железо литое	1,84—22,5 [2]	—	—	10—13 [2]	3,5—5,3 [2]	0,23—0,31 [2]	14
Золото отожженое	12,4	—	18,9	8,06	2,91	0,422 [3]	12
Индий	5,05 [1]	3,0 [1]	0,98 [1]	5,2 [2]	—	—	10
Иридий	—	—	212 [4]	5,2 [2]	—	—	—
Кадмий литой	—	—	—	4,99 [2]	1,92 [2]	0,3 [2]	—
Кадмий	6,3	—	19,6	5,2	—	—	—
Кальций	6,0[6]	—	41,6[6]	—	—	—	—
Кобальт отожженный	48,9	—	129,2	19,6—20,6	—	—	—
Магний литой	29,4	11,2	4,4	15,6	0,35	—	—
Медь деформированная	20—25 [7]	6,85 [7]	52 [7]	11,2 [7]	4,15 [7]	0,358—0,378 [7]	4,83** [7]
Молибден литой	30,8	29,4	134³* [9]	30900³* [3]	11810³* [3]	0,324	—
Никель отожженный	34,3—56,1	20,5	90—120	20,2 [2]	7,7 [2]	0,300 [2]	6,3 [10]
Ниобий отожженный	32,2—40,6	—	73,5	15,6	—	—	—
Олово литое	1,47—2,4	1,17	4,8—5,2	4,06—5,86	1,64—4,78	0,33	36 [10]
Осмий	—	—	348,7	55,5	—	—	—
Палладий литой	18,2	—	31	11,3 [2]	5,11	0,393 [2]	—
Платина отожженная	14,0	—	29,9	14,7	6,09	0,387 [2]	1,7 [10]
Родий отожженный	55	—	54	27,5	—	—	—
Рутений отожженный	—	—	179,5	42,2	—	—	—
Свинец литой	1,47—1,76	0,49—0,98	3,75—4,18	1,62 [2]	0,562 [2]	0,446	16 [10]
Серебро отожженое	13,5	—	20,6	8,05	2,59	0,38—0,407 [8]	2,24 [8]
Тантал отожженый	31—44,7	—	44,1—122,4	18,6	—	—	—
Титан отожженый	29,6	7,5	102,8	—	—	—	—
Хром отожженный	—	—	68,8	—	—	—	—
Цинк литой	2,94—3,92	—	29,2—44,1	12,7	—	—	410
Цирконий	24,7	11,3	33,3	—	—	—	—

* Для спеченного штабика.
** При t = 15°С.
** При t = 45°С.

Таблица 4.2

Упругие свойства сталей различных марок.

Для сталей различных марок $E = (19{,}5 \div 20{,}6) \cdot 10^{10}$ $н/м^2$, $G = (7{,}9 \div 8{,}9) \cdot 10^{10}$ $н/м^2$, $\mu = 0{,}23 \div 0{,}31$ [17]

Марка	Марка (состав, вес. %)	$\sigma_{вр}$, 10^7 $н/м^2$	$\sigma_т$, 10^7 $н/м^2$	$H_Б$, 10^7 $н/м^2$
Ст. 0,8	(Fe; 0,05—0,1% C; 0,17—0,37% Si)	32,4	20,5	128,3
Ст. 10	(Fe; 0,07—0,013% C; 0,17—0,37% Si)	35,2	21,5	134,1
Ст. 20	(Fe; 0,17—0,24%C; 0,17—0,37%Si; 0,35—0,65% Mn)	52	43	152,1
Ст. 30	(Fe; 0,27—0,35% C; 0,17—0,37% Si; 0,5—0,8% Mn)	50,9—60,9	29,2	175,3
Ст. 40	(Fe; 0,37—0,44% C; 0,17—0,37% Si; 0,5—0,8% Mn)	59—71,3	33,4	212,2
Ст. 55	(Fe; 0,52—0,6% C; 0,17—0,37% Si; 0,5—0,8% Mn)	69,5—81,6	39,2	249,7
Ст. 70	(Fe; 0,67—0,75%C; 0,17—0,37% Si; 0,5—0,8% Mn)	76,4—88	43,0	263,4
Ст. 85	(Fe; 0,82—0,9% C; 0,17—0,37% Si; 0,5—0,8% Mn)	112,6	98	295,7
15Г	(Fe; 0,22—0,18% C; 0,17—0,37% Si; 0,7—0,1% Mn)	43—53	24,5	159,6
30Г	(Fe; 0,27—0,34% C; 0,17—0,37% Si; 0,7—0,1% Mn)	56,9—66,8	31,7	212,4
45Г	(Fe; 0,42—0,49% C; 0,17—0,37% Si; 0,7—0,1% Mn)	67,8—79,1	37,2	236
60Г	(Fe; 0,57—0,65% C; 0,17—0,37% Si; 0,9—1,2% Mn)	78,5—90	43	263,4
70Г	(Fe; 0,67—0,75% C; 0,17—0,37% Si; 0,9—1,2% Mn)	82—94	47	263,4
10Г2	(Fe; 0,07—0,12% C; 0,17—0,37% Si; 1,2—1,6% Mn)	41—57	26,4	182,9
30Г2	(Fe; 0,27—0,34% C; 0,17—0,37% Si; 1,4—1,8% Mn)	64,9—74,4	39,1	237
45Г2	(Fe; 0,42—0,49% C; 0,17—0,37% Si; 1,4—1,8% Mn)	78,2—90	47,8	239,7
50Г2	(Fe; 0,47—0,55% C; 0,17—0,37% Si; 1,4—1,8% Mn)	81,2—93	50,8	242,4
2Х13	(Fe; 0,16—0,24% C; 12,0—14,0% Gr; ⩽0,6%Si; ⩽0,6%Mn; ⩽0,025% S; ⩽0,03% P)	68,6	53	212,4—263,4
25ГЛ	(Fe; 0,2—0,3% C; 1,35—1,55% Si; 0,3—0,45% Mn)	49—54	29,4—34,3	134,1—136,1
25Г2Л	(Fe; 0,2—0,3% C; 1,7—1,9% Si; 0,3—0,45% Mn)	59—68,7	34,3—44	205,6
40ГЛ	(Fe; 0,35—0,45% C; 1,35—1,55% Si; 0,3—0,45% Mn)	60	39,4	195,8
ХН20	(Fe; 0,39% C; 0,86% Mn; 0,37% Si; 0,67% Cr; 1,78% Ni)	80,1	48	—
30ХМЛ	(Fe; 0,3% C; 0,8% Mn; 0,4% Si; 0,8% Cr; 0,2% Mo)	80,1	67,8	216,2
40ХГЛ	(Fe; 0,39% C; 1,38% Mn; 0,57% Si; 0,63% Cr)	89	54	—
30Н2ХГЛМ	(Fe; 0,3—0,35% C; 0,5—1,0% Mn; 0,6—0,9% Cr; 1,75—2,25% Ni; 0,15—0,25% Mo)	73,3—156,7	53,9—127,3	—
Г13Л	(Fe; 1,0—1,5% C; 10—15% Mn; ⩽10% Si)	78,2—98	24,5—39,1	165,3—195,8
30МЛ	(Fe; 0,25—0,35% C; 0,5—0,8% Mn; 0,25—0,45% Si; 0,25—0,3% Cr; 0,3% Ni; 0,05% S; 0,05% P)	46	22,1	123
Х25Н2Л	(Fe; 0,4—0,6% C; 0,4—0,7% Mn; 1,0—2,0% Si; 24—25% Cr; 1,5—2,0% Ni; 0,04% Si; 0,04% P) (при $t = 200°C$)	38,4—43,3	14,4—15,4	198,7
15Х, закаленная	(Fe; 0,12—0,18% C; 0,17—0,37% Si; 0,4—0,7% Mn; ⩽ 0,035% S; ⩽ 0,035% P; 0,7—1,0% Cr; ⩽0,25% Ni; ⩽ 0,2% Cu)	12	57,8	—
20Х, закаленная	(Fe; 0,17—0,23% C; 0,17—0,37% Si; 0,5—0,8% Mn; ⩽ 0,035% S; ⩽ 0,035% P; 0,7—1,0% Gr; ⩽ 0,25% Ni; ⩽ 0,2% Cu)	77	57,8	—
40Х, закаленная	(Fe; 0,37—0,45% C; 0,17—0,37% Si; 0,5—0,8% Mn; ⩽ 0,035% S; ⩽ 0,035% P; 0,8—1,1% Cr; 0,25% Ni; ⩽ 0,2% Cu)	115—121	87,5—88,5	372,5—396,5
30ХМ, закаленная	(Fe; 0,26—0,34% C; 0,17—0,37% Si; 0,4—0,7% Mn; ⩽ 0,035% S; ⩽ 0,035% P; 0,8—1,1% Cr; 0,15—0,25% Mo; ⩽0,025% Ni; ⩽ 0,2% Cu)	96	81,9	—
33ХС, закаленная	(Fe; 0,3—0,38% C; 1,0—1,3% Si; 0,3—0,6% Mn; ⩽ 0,035% S; ⩽ 0,035% P; 1,3—1,6% Cr; ⩽ 0,25% Ni; ⩽ 0,25% Cu)	91	76,9	—
40ХС, закаленная	(Fe; 0,37—0,45% C; 1,2—1,6% Si; 0,3—0,6% Mn; ⩽ 0,035% S; ⩽ 0,035% P; 1,3—1,6% Cr; ⩽ 0,25% Ni; ⩽ 0,2% Cu)	120	106	—
20ХГ, закаленная	(Fe; 0,17—0,23% C; 0,17—0,37% Si; 0,9—1,2% Mn; ⩽ 0,035% S; ⩽ 0,035% P; 0,9—1,2% Cr; ⩽ 0,25% Ni; ⩽ 0,2% Cu)	86,2	72	—
40ХГ, закаленная	(Fe; 0,37—0,45% C; 0,17—0,37% Si; 0,9—1,2% Mn; ⩽ 0,035% S; ⩽ 0,035% P; 0,9—1,2% Cr; ⩽ 0,25% Ni; 0,2% Cu)	96	77	—

Марка (состав, вес. %)	$\sigma_{вр}$, 10^7 н/м²	$\sigma_т$, 10^7 н/м²	$H_Б$, 10^7 н/м²
30ХГТ, закаленная (Fe; 0,24—0,32% C; 0,17—0,37% Si; 0,8—1,1% Mn; ⩽ 0,035% S; ⩽0,035% P; ⩽ 0,2% Cu; 1,0—1,3% Cr; ⩽ 0,25% Ni; 0,06—0,12% Ti)	144	125	—
35СГ, закаленная (Fe; 0,32—0,4% C; 1,1—1,4% Si; 1,1—1,4% Mn; ⩽ 0,35% S; ⩽ 0,35%P; ⩽ 0,25% Cr; ⩽ 0,25% Ni; ⩽ 0,2% Cu)	86,2	—	—
35ХГСА, закаленная (Fe; 0,32—0,39% C; 1,1—1,4% Si; 0,8—1,1% Mn; ⩽ 0,025% S; ⩽ 0,025% P; 1,1—1,4% Cr; ⩽ 0,2% Ni; ⩽ 0,2% Cu)	160	134,1	—
25Н, закаленная (Fe; 0,2—0,3% C; 0,17—0,37% Si; 0,5—0,8% Mn; ⩽ 0,04% S; ⩽ 0,04%P; 0,3% Cr; ⩽ 0,5—0,9% Ni; (⩽ 0,3% Cu)	64,3—73	48—59,5	—
30Н, закаленная Fe; 0,25—0,35% C; 0,17—0,37% Si; 0,5—0,8% Mn; ⩽ 0,04%S; ⩽ 0,04% P; 0,3% Cr; 0,8—1,2% Ni; ⩽ 0,3% Cu)	63,2—73	48—59,5	—
20ХН, закаленная (Fe; 0,17—0,23% C; 0,17—0,37% Si; 0,4—0,7% Mn; ⩽ 0,035% S; ⩽ 0,035% P; ⩽ 0,2% Cu; 0,45—0,75% Cr; 1,0—1,4% Ni)	96	78,7	—
40ХН, закаленная (Fe; 0,45% C; 0,83% Mn; 0,66% Cr; 1,25% Ni)	102,2	91	275,8
12ХН2, закаленная (Fe; 0,16% C; 0,55% Mn; 0,55% Cr; 2,08% Ni)	102	86,2	298,6
20ХН3А, закаленная (Fe; 0,23% C; 0,37% Mn; 0,71% Cr; 3,71% Ni)	39,5	28,0	—
30ХН3А, закаленная (Fe; 0,35% C; 0,56% Mn; 0,71% Cr; 3,34% Ni)	63	57,2	—
12Х2Н4А, закаленная (Fe; 0,28% C; 0,5% Mn; 1,5% Cr; 4,2% Ni)	125,6	108,7	327,4
18Х2Н4ВА, закаленная (Fe; 0,2% C; 1,56% Cr; 4,2% Ni; 0,79% W)	105,9	77	308,2—372,5
38ХМЮА, закаленная (Fe; 0,35—0,42% C; 0,17—0,37% Si; 0,3—0,6% Mn; ⩽ 0,025% S; ⩽ 0,025% P; 1,35—1,65% Cr; ⩽ 0,2% Ni; ⩽ 0,2% Cu; 0,7—0,11% Al; 0,15—0,25% Mo)	96	81,5	—
38ХВФЮ, закаленная (Fe; 0,35—0,43% C; 0,17—0,37% Si; 0,2—0,4% Mn; ⩽ 0,35% S; ⩽ 0,35% P)	96	81,5	—
25Х2ГНТА, закаленная (Fe; 0,23—0,29% C; 0,2—0,5% Si; 0,8—1,1% Mn; 1,4—1,8% Cr)	144	129	—
60С2, закаленная и отпущенная (Fe; 0,58 C; 1,66% Si)	42	76,5	—
70С3, закаленная (Fe; 0,72% C; 2,54% Si)	46,9	76	—
60С2Н2А, закаленная (Fe; 0,5% C; 1,37% Si; 1,4% Ni)	40	68,5	—
Ст. 2 (Fe;0,09—0,15% C; 0,12—0,3% Si; 0,25—0,5%Mn; ⩽ 0,05% S; 0,04% P; ⩽0,3% Nu, Cu; ⩽ 0,08% As)	32,5—40,4	20,1—21,1	—
Ст. 3 (Fe; 0,14 — 0,22% C; 0,12 — 0,3%Si; 0,4 — 0,65% Mn; ⩽ 0,5% S; 0,04%P; ⩽ 0,3% Ni; Cu; ⩽ 0,08% As)	38,4—48,2	22—24	—
Ст. 5 (Fe; 0,21—0,37% C; 0,05 — 0,35% Si; 0,5 — 0,8% Mn; ⩽ 0,05%S; ⩽ 0,04% P; ⩽ 0,3% Cr, Ni; ⩽ 0,08 % As)	48—59,5	27,8—25,9	—

Таблица 4.3

Упругие свойства мартенситостареющих сталей [11]

Марка (состав, вес. %)	$\sigma_{вр}$, 10^7 н/м²	$\sigma_т$, 10^7 н/м²	$H_Б$, 10^7 н/м²
Н12М10К15 (Fe; 12,2% Ni; 14,1% Co: 10% Mo):			
закаленная и состареннаяя	250	245	—
кованая и состаренная	250	245	—
Н12К12М7В7 (Fe; 11,9% Ni; 12% Co; 7,8% Mo; 6,7% W), закаленная и состаренная	255	—	—
Н12М10К12ТЮ (Fe; 12,3% Ni; 9,6% Mo; 12% Co; 0,79% Ti; 0,94% Al), кованая и состаренная	294	289	—

Таблица 4.4

Упругие свойства сплавов алюминия

Для алюминиевых сплавов различных марок $E = (6{,}9 \div 7{,}1) \cdot 10^{10}$ $н/м^2$; $G = (2{,}6 \div 2{,}7) \cdot 10^{10}$ $н/м^2$; $\mu = 0{,}3 \div 0{,}33$ [7, 18]

Марка	Состав, вес. %	Состояние	$\sigma_{вр}$, 10^7 $н/м^2$	$\sigma_т$, 10^7 $н/м^2$	$H_Б$, 10^7 $н/м^2$
АМц	Al; 1,0—1,6% Mn	Нагартованный	21,5	37,12	53,9
		Полунагартованный	12,7	—	39,2
		Отожженный	12,7	4,9	29,4
АМг	Al; 0,15—0,4% Mn; 2,0—2,8% Mg	Полунагартованный	24,5	20,6	58,8
		Отожженный (АМгМ)	18,6	9,8	44,1
АМг5П	Al; 0,2—0,6% Mn; 4,7—5,7% Mg	Отожженный (АМг5 ПМ)	26,4	14,7	68,5
АМгЗ	Al; 0,3—0,6% Mn; 3,2—3,8% Mg; 0,5—0,8%Si	Полунагартованный (АМгЗП)	24,5	17,5	68,5
		Отожженный (АМгЗМ)	19,6	9,8	49
АМг5	Al; 0,3—0,6%Mn; 4,0—0,5% Mg	Полунагартованный (АМг5П)	29,4	19,6	78,3
		Отожженный (АМг5М)	25,4	13,7	63,7
АМг7	Al; 0,3—0,6% Mn; 6,0—7,5% Mg	Полунагартованный (АМг7П)	36,2	24,5	93
		Отожженный (АМг7М)	31,3	16,6	78,3
Д1	Al; 3,8—4,8% Cu; 0,4—0,8% Mn; 0,4—0,8% Mg	Закаленный и естественно состаренный (Д1Т)	41,1	23,5	110,4
Д1П		Отожженный (Д1М)	20,5	10,8	44,1
Д6	Al; 4,6—5,2% Cu; 0,5—1,0%; Mn; 0,65—1,0% Mg	Закаленный и естественно состареный (Д6Т)	45	29,4	—
		Отожженный (Д6М)	21,5	10,8	—
Д16	Al; 3,8—4,9% Cu; 0,3—0,9% Mn; 1,2—1,8% Mg	Плакированные листы, закаленные и естественно состаренные	41,1	17,63	102,7
		Плакированные листы, отожженные	27,3	9,8	48,4
Д3П	Al; 2,6—3,5% Cu, 0,3—0,7% Mn; 0,3—0,7%Mg	Закаленный и естественно состаренный (Д3ПТ)	33,3	16,6	78,3
		Отожженый (Д3ПМ)	21,2	7,83	—
Д18П	Al; 2,2—3,0% Cu; 0,2—0,5% Mg	Закаленный и естественно состаренный (Д18ПТ)	29,4	16,6	68,5
		Отожженный (Д18 М)	15,7	5,9	37,2

Марка	Состав, вес. %	Состояние	$\sigma_{вр}$, 10^7 н/м²	$\sigma_т$, 10^7 н/м²	$H_Б$, 10^7 н/м²
АВ	Al; 0,2—0,6% Cu; 0,15—0,35% Mn; 0,45—0,9% Mg; 0,5—1,2% Si	Закаленный и естественно состаренный	32,4	27,5	93
		Закаленный (АВТ)	21,5	11,7	63,6
		Отожженный (АВМ)	17,7	—	29,4
АК2	Al; 3,5—4,5% Cu; 0,4—0,8% Mg; 0,5—1,0% Si; 1,8—2,8% Ni; 0,5—1,0% Fe	Закаленный	41,1	27,4	112,6
АК4	Al; 1,9—2,5% Cu; 1,4—1,8% Mg; 0,5—1,2% Si; 1,0—1,5% Fe; 1,2—1,6% Ni	Искусственно состаренный	43,1	26,4	117,5
АК4-1	Al; 1,9—2,5% Cu; 1,4—1,8% Mg; 1,0—1,5% Ni; 1,0—1,5% Fe	—	43,1	—	117,5
АК6	Al; 1,8—2,6% Cu; 0,4—1,0% Mn; 0,4—0,8% Mg; 0,7—1,2% Si	—	41,1	29,4	102,8
АК8	Al; 0,4—1,0% Mn; 0,4—0,8% Mg; 3,9—4,8% Cu; 0,6—1,2% Si	—	48	37,2	132,2
В-92	Al; 4,5% Mg; 3,3% Zn	Закаленный и состаренный	43,6—51,3	28,7—45,2	—
В-92ц	Al; 3,2% Zn; 4,1% Mg; 0,7% Mn; 0,1% Zr	То же	44,5	28,7	—
В-95	Al; 1,4—2,0% Cu; 0,4—1,0% Mn; 1,8—2,8% Mg; 5,0—7,0% Zn; 0,1—0,25% Cr	»	53,9	45	146,9
В-96	Al; 8,5% Zn; 2,7% Mg; 2,3% Cu	»	67	63,2	—
В65	Al; 3,9—4,5% Cu; 0,3—0,5% Mn; 0,15—0,3% Mg	Закаленный и естественно состаренный	39,2	—	—
ВД17	Al; 2,6—3,2% Cu; 0,45—0,7% Mn; 2,0—2,2% Mg	Закаленный и искусственно состаренный	43,1	29,4	112,6
Д20	Al; 6—7% Cu; 0,4—0,8% Mn; 0,1—0,2% Ti	То же	41,1	29,4	—

Марка	Состав, вес. %	Состояние	$\sigma_{вр}$, 10^7 н/м²	$\sigma_т$, 10^7 н/м²	$H_Б$, 10^7 н/м²
АЛ1	Al; 1,25—1,75% Mg; 3,75—5,0% Cu; 1,75—2,25% Ni;	Закаленный и частично состареиный	25,4	—	97,9
АЛ2	Al; 10—13% Si	—	21,5	—	53,8
АЛ3	Al; 0,2—0,8% Mg; 1,5—3,5% Cu; 4,0—6,0% Si; 0,2—0,8% Mn	Закаленный и частично состаренный	27,4	—	77,4
АЛ3В	Al; 0,35—0,5% Mg; 1,5—3,5% Cu; 4,0—6,0% Si; 0,2—0,8% Mn	То же	28,4	—	117,5
АЛ4	Al; 0,17—0,3% Mg; 8,0—15,0% Si; 0,25—0,5% Mn	Закаленный и полностью состареиный	26,4	—	68,5
АЛ4В	Al; 0,2—0,4% Mg; 8,0—11,0% Si; 0,2—0,5% Mn	То же	21,5	—	122,4
АЛ5	Al; 0,35—0,6% Mg; 1,0—1,5% Cu; 4,5—5,5% Si	Закаленный и частично состаренный	26,4	—	88,1
АЛ6	Al; 2,0—3,0% Cu; 4,5—6,0% Si	То же	27,5	—	93
АЛ7В	Al; 3,0—5,0% Cu	»	29,4	—	88,1
АЛ8	Al; 9,5—11,5% Mg	Закаленный	32,4	—	78,3
АЛ9	Al; 0,2—0,4% Mg; 6,0—8,0% Si	Закаленный и частично состаренный	27,5	—	88,1
АЛ9В	Al; 0,2—0,5% Mg; 6,0—8,0% Si	То же	28,4	—	112,6
АЛ10В	Al; 0,2—0,5% Mg; 5,0—8,0% Cu; 4,0—6,0% Si	Закаленный и полностью состаренный	27,5	—	122,4
АЛ11	Al; 0,1—0,3% Mg; 6,0—8,0% Si; 10—14% Zn	—	22,6	—	88,1
АЛ12	Al; 9,0—11,0% Cu	Закаленный и полностью состареиный	19,6	—	—

Марка	Состав, вес. %	Состояние	$\sigma_{вр}$, 10^7 н/м²	$\sigma_т$, 10^7 н/м²	$H_Б$, 10^7 н/м²
АЛ13	Al; 4,5—5,5% Mg; 0,8—1,3% Si; 0,1—0,4% Mn	—	19,6	—	87,7
АЛ14В	Al; 0,2—0,4% Mg; 1,5—3,0% Cu; 6,0—8,0% Si; 0,2—0,6% Mn	Закаленный и частично состаренный	29,4	—	117,5
АЛ15В	Al; 3,5—5,0% Cu; 3,0—5,0% Si; 1,3% Fe	То же	27,5	—	117,5
АЛ16В	Al; 2,0—4,0% Cu; 3,0—5,0% Si; 0,2—0,5% Mn; 2,0—4,0% Zn; 1,1% Fe	»	26,4	—	127,3
АЛ18В	Al; 7,9—9,5% Cu; 1,5—2,5% Si; 0,2—0,8% Mn; 1,1—1,8% Fe	»	20,5	—	112,6
AlCoA 132	Al; 0,1—1,3% Mg; 0,5—1,5% Cu; 11,0—13,0% Si; 2,0—3,0% Ni	»	29,4	—	122,4
RR-50	Al; 0,05—0,2% Mg; 0,8—2,0% Cu; 1,5—2,8% Si; 0,8—1,7% Ni; 1,4% Fe; 0,05—0,3% Ti + Nb	Состаренный	20,5	—	73,4
RR53B	Al; 0,65—0,9% Mg; 1,4—1,65% Cu; 0,6—0,8% Si; 1,0—1,4% Ni; 0,8—1,3% Fe; 0,16—0,83% Ti + Nb	Закаленный и полностью состаренный	34,3	—	127,3
АЛ17В	Al; 1,5—3,5% Cu; 3,0—5,0% Si; 0,7—0,6% Mn; 4,0—7,0% Zn; 1,1% Fe	Закаленный и частично состаренный	26,4	—	127,3
ACC-6-5	Al; 5—6% Sb; 4—5% Pb; 0,5—0,7% Mg	Литой в кокиль Прокатанный и отожженный	7,93 7,93	— —	30,7 29,9
ACM	Al; 3,5—5% Sb; 0,5—0,7% Mg; ⩽ 0,5%Si +Fe	Прокатанный и отожженный	8,23	—	28
АН-2,5	Al; 2,7—3,4% Ni	Литой в кокиль То же	13,7 15,6	— —	34,3 68,5
AlCoA 750	Al; 1,0% Ni; 1,0% Cu; 6,5% Sn	» Холоднокатаный	15,2 15,8	— —	44,1 49
XA750	Al; 0,5% Ni; 1,0% Cu; 2,5% Si; 6,5% Sn	Литой в кокиль Литой в кокиль и термообработанный	15,2 20,6	6,85 13,8	9,8 4,9

Марка	Состав, вес. %	Состояние	$\sigma_{вр}$, 10^7 н/м²	$\sigma_т$, 10^7 н/м²	$H_Б$, 10^7 н/м²
ХВ750	Al; 0,8% Mg; 1,2% Ni; 2,0% Cu; 6,5% Sn	Литой в кокиль и термообработанный	20,6	13,7	71,4
ХВ80S	Al; 0,5% Ni; 1,0% Cu; 6,5% Sn; 1,5% Si	Холоднокатаный Холоднокатаный и отожженный	17,6 14,8	16,2 5,6	68,5 93,0
Al—30% Sn	Al; 0—3,0% Cu; 25—30% Sn	Холоднодеформированный и отожженный	8,7—6,9	2,0	21,2—26,4

Таблица 4.5

Упругие свойства сплавов меди [7,8]

Марка	Состав, вес. %	$\sigma_{вр}$, 10^7 н/м²	$\sigma_т$, 10^7 н/м²	$H_Б$, 10^7 н/м²	E, 10^{10} н/м²
ЛА 67-2,5	66—68% Cu; 2—3% Al; Zn	30,6—40,8	—	91,8	—
ЛАЖМц 66-6-3-2	64—68% Cu; 6—7% Al; 2—4% Fe; 1,5—2,0% Mn; Zn	66,3	—	163,2	—
ЛАЖ 60-1-1	58—61% Cu; 1,5—2,0% Al; 0,2—0,7% Si; 0,75—1,5% Fe; 0,1—0,6% Mn; Zn	40,8	25,5	91,8	—
ЛК80-3Л	79—81% Cu; 2,5—4,5% Si; Zn	30,6—46,9	16,3	96,9—112,2	—
ЛКС 80-3-3	79—81% Cu; 2,5—4,5% Si; 2—4% Pb; Zn	30,6—40,8	14,3	91,8—100,2	—
ЛМцС 58-2-2	57—60% Cu; 1,5—2,5% Mn; 1,5—2,5% Pb; Zn	30,6—40,8	24,5	31,4—91,8	—
ЛМцОС 58-2-2-2	56—60% Cu; 1,5—2,5% Mn; 1,5—2,5% Sn; 0,5—2,5% Pb; Zn	30,6	—	91,8—100,2	—

Марка	Состав, вес. %	$\sigma_{вр}$, 10^7 н/м²	$\sigma_т$, 10^7 н/м²	$H_Б$, 10^7 н/м²	E, 10^{10} н/м²
ЛМцЖ 52-4-1	53—58% Cu; 0,5—1,5% Fe: 3—4% Mn; Zn	51	30,6	100,2—142,8	—
ЛМцЖ 55-2-7	50—55% Cu; 0,5—1,5% Fe; 4—5% Mn; Zn	51	—	91,8—122,4	—
ЛС-59-1Л	57—61% Cu; 0,8—1,9% Sb; Zn	20,4—42,8	15,3	91,6—91,8	—
ЛНМцЖА 60-1-2-1-1	58—62% Cu; 0,5—1,5% Al; 0,5—1,1% Fe; 1,5—2,5% Mn; Zn	40,8—48,9	18,4—20,4	100,2—112,2	—
ПМц-48	48% Cu; Zn	21,4	—	133	—
ПМц-54	54% Cu; Zn	35,7	—	130,6	—
Бр. ОФ 10-1 (литье в кокиль)	Cu; 9—11% Sn; 0,8—1,2% P	25,6—35,7	20,4	91,8—122,4	10,5
Бр. ОЦ 10-2 (литье в кокиль)	Cu; 9—11% Sn; 2—4% Zn	20,4—25,5	—	91,8—107,1	10,2
Бр. ОЦН 5-2-5 (литье в кокиль)	Cu; 4,5—5,5 Sn; 1—3% Zn; 4,5—5,5% Ni	35,7	13,4	81,6	—
Бр. ОНС 11-4-3 (литье в кокиль)	Cu; 10—22% Sn; 3% Pb; 4% Ni	20,4—28,6	18,4	—	—
Бр. ОЦС 6-6-3 (литье в кокиль)	Cu; 5,0—6,0% Sn; 5,0—7,0% Zn; 4,0—6,0% Pb	18,4—25,5	8,16—10,2	66,3—76,5	9,18
Бр. ОЦС 5-5-5 (литье в кокиль)	Cu; 4,0—6,0 Sn; 4,0—6,0% Zn; 4,0—6,0% Pb	20,4—25,5	8,16—10,2	61,2—76,5	9,18

Марка	Состав, вес. %	$\sigma_{вр}$, 10^7 н/м²	$\sigma_т$, 10^7 н/м²	$H_Б$, 10^7 н/м²	E, 10^{10} н/м²
Бр. ОЦСН 3-7-5-1 (литье в кокиль)	Cu; 2,5—4,5% Sn; 6,0—9,5% Zn; 3,0—6,0% Pb; 0,5—1,5% Ni	21,4	—	61,2	—
Бр. ОЦС 3-12-5 (литье в кокиль)	Cu; 2,0—4,0% Sn; 8,0—15,0% Zn; 3,0—6,0% Pb	21,4	—	61,2	—
Бр. ОФ 6,5-0,4: мягкая твердая	Cu; 6—7% Sn; 0,3—0,4% P	35,7—45,9 71,4—81,6	20,4—25,5 60,2—66,3	71,4—91,8 163,2—204	— —
Бр. ОФ 4-0,25: мягкая твердая	Cu; 3,5—4% Sn; 0,25% P	34,7 61,2	— 35,7	56,1—71,4 163,2—173,4	10,2 10,2
Бр. ОЦ 4-3: мягкая твердая	Cu; 3,5—4% Sn; 2,7—3,3% Zn	35,7 56,1	— —	61,2 163,2	— 12,65
Бр. ОЦС 4-4-2,5: мягкая твердая	Cu; 3—5% Sn; 3—5% Zn; 1,5—2,5% Pb	80,6—35,7 56,1—64,3	12,9 28,6	61,2 163,2—183,6	— —
Бр. ОФ 7-0,2 мягкая	Cu; 6—8% Sn; 0,1—0,25% P	35,7	23,5	76,5	11,0
Бр.ОЦС 4-4-4 мягкая	Cu; 3,5—4,5% Sn; 4% Zn; 2% Pb	31,6	13,3	63,2	—
Бр. А5: мягкая твердая	Cu 4—6% Al	38,7 81,6	16,3 51	61,2 200,4	10,2 11,2
Бр. А7: мягкая твердая	Cu; 6—8% Al	42,8 102	— —	71,4 157,1	— 11,7—13,3

Марка	Состав, вес. %	$\sigma_{вр}$, 10^7 н/м²	$\sigma_т$, 10^7 н/м²	$H_Б$, 10^7 н/м²	E, 10^{10} н/м²
Бр. АЖ 9-4:	Cu; 8—10% Al; 2—4% Fe				
мягкая	—	56,1	22,4	112,2	11,4
твердая		61,2	25,7	163,2—204	11,8
Бр. АЖН 10-4-4:	Cu; 9,5—11% Al; 3,5—5,5% Fe; 3,5—5,5% Ni				
мягкая	—	61,2	—	141,8—163,3	—
твердая		78,5	—	289,5	13,3
Бр. АМЦ 9-2:	Cu; 8—10% Al; 1,5—2,5% Mn				
мягкая	—	40,8	30,6	163,2	—
твердая		61,2	51	—	—
Бр. АЖНЦ 10-3-1,5:	Cu; 9—11% Al; 2—4% Fe; 1—2% Mn				
мягкая		40	—	—	—
твердая		62,2	50	—	—
Бр. Мц5:	Cu; 4,5—5% Mn				
литая		28,5	15,3	71,4	10,7
мягкая		30,6	—	81,6	—
твердая		61,2	51	163,2	—
Бр. Б2:	Cu; 0,2—0,5% Ni; 1,9—2,2% Be				
литая		51	—	142,8	—
мягкая	—	51	25,5—35,7	119,3	11,9
твердая		132,6—142,8	130,6	357	13,5—14,4
МНЖ 5-1:	Cu; 5—6,5% Ni + Co; 1,0—1,4% Fe; 0,3—0,8% Mn				
мягкий	—	24,5—28,6[a]	—	35,7—51	—
твердый		45,9—51[b]	—	112,2—122,4	—
МНА 13-3:	Cu; 12—15% Ni + Co; 2,3—3% Al				
мягкий		71,4[c]	—	76,5[d]	—
твердый		91,8—10,2[e]	—	255—275,4[e]	—
МНА 6-1,5:	Cu; 5,5—6,5% Ni + Co; 1,5—1,8% Al				
мягкий		36,7[d]	—	61,2—71,4	—
твердый		66,3[e]	—	204[e]	—
МНЦ 15-20:	Cu; 13,5—16,5% Ni + Co; 18—22% Zn				
мягкий		40,8	—	71,4	12,8
твердый		68,3	—	168,3	12,8
МНцС 17-18-1,8:	61—64,9% Cu; 16,5—18,0% Ni + Co; 1,6—2,0% Pb; Zn				
мягкий		40,8	—	—	12,9
твердый		66,3	—	—	12,9

Марка	Состав, вес. %	$\sigma_{вр}$, 10^7 н/м²	$\sigma_т$, 10^7 н/м²	$H_Б$, 10^7 н/м²	E, 10^{10} н/м²
МН 19:	Cu; 18—20% Ni + Co				
мягкий		35,7	—	71,4	14,3
твердый		56,1	—	122,4	14,3
МНЖМц 30-0,8-1:	Cu; 29—30% Ni + Co; 0,6—1,0% Fe; 0,8—1,3% Mn				
мягкий		38,8	—	71,4	15,7
твердый		61,2	—	193,6	15,7
ТП:	Cu; 0,57—0,63% Ni + Co				
мягкий		88,6	—	51—61,2	12,2
твердый		38,7	—	—	12,2
ТБ:	Cu; 15,3—16,3% Ni + Co				
мягкий		32,6	—	71,4	7,9
твердый		56,1	—	122,4	8,5
МНМц 3-12;	Cu; 2,5—3,5% Ni + Co; 11,5—13,5% Mn				
мягкий		43,9	—	122,4	12,9
твердый		86,7	—	—	12,9
МНМц 43-1,5:	Cu; 39—41% Ni + Co; 1—2 %Mn				
мягкий		45,9	—	81,6	16,9
твердый		66,3	—	159,1	16,9
МНМц 43-0,5:	Cu; 42,5—44% Ni + Co; 0,1—1,2% Mn				
мягкий		40,8	—	86,7	12,2
твердый		66,3	—	178,5	12,2

a — отожженный; *b* — деформированный на 50%; *c* — прессованный; *d* — закаленный при 900°С; *e* — отожженный при 500°С после закалки при 900°С.

Таблица 4.6

Упругие свойства сплавов никеля. кобальта и свиица [7, 8]

Марка (состав. вес. %)	$\sigma_{вр}$, 10^7 н/м²	$\sigma_т$, 10^7 н/м²	$H_Б$, 10^7 н/м²	E, 10^{10} н/м²
НМц 2,5, отожженный (Ni + Co; 2,3—3,3% Mn)	45,9—51	16,8—22,4	—	21,4
МШ2, закаленный и состаренный (Pb; 14—16% Sb; 2,7—3,3% As)	—	—	43,9—46,9	—
МСМ1, закалеиный и состаренный (Pb; 9,5—10,5% Sb; 2,0—2,5% As)	—	—	35,7—40,8	—

Упругие свойства сплавов олова [7, 8]

Марка (состав, вес. %)	$\sigma_{вр}$, 10^7 н/м²	$\sigma_т$, 10^7 н/м²	$H_Б$, 10^7 н/м²	E, 10^{10} н/м²
Б83 (Sn; 10—12% Sb; 5,5—6,5% Cu)	9,18	6,83	30,6	4,9
Б89 (Sn; 7,25—8,25% Sb; 2,5—3,5% Cu)	8,16	6,32	24,79	5,81
Б91 (Sn; 4,5% Sb; 4,5% Cu)	8,16	—	22,4	—
Б93 (Sn; 3,5% Sb; 3,5% Cu)	6,83	5,4	14,28	—
Б93А (Sn; 5,0% Sb; 2,0% Cu)	6,0	4,89	16,42	—
БС6 (Pb; 5,5—6,5% Sb; 5,5—6,55% Cu)	6,83	—	17,24	—
Б6 (Pb; 5,0—6,0 Sn; 14—16% Sb; 2,5—3,0 Cu)	6,93	—	32,64	—
БТ (Pb; 9,0—11,0% Sn; 14—16% Sb; 0,7—1,1% Cu)	6,12	5,92	—	—
БН (Pb; 9,0—11,0% Sn; 13—15% Sb; 1,5—2,0% Cu)	7,14	6,12	29,58	—
Б16 (Pb; 15—17% Sn; 15—17% Sb; 1,5—7,0% Cu)	7,96	—	30,6	—
БС (Pb; 16—18% Sb; 1,0—1,5% Cu)	4,28	—	20,4	—
БК2 (Pb; 1,5—2,5% Sn)	9,49	—	20,09	—
Сатко II (Pb; 1,0—2,0% Sn)	7,85	—	27,54	—
БК (Pb; $\leqslant$ 0,25 Sb)	10,2	—	32,64	2,24
Л 199 (57—91,1% Sn; 8,9% Zn; 43% Fe)	7,65	—	14,28	—
Л 183 (60—71% Sn; 30—38,1% Pb; 5,0% Zn)	5,3	—	12,85	—
Л 145 (44,8% Sn; 32,0% Pb; 18,2% Cd)	6,83	—	15,61	—
Л 141 (67—75% Sn; 32,25% Pb)	6,93	—	23,77	—
Л 130 (52% Sn; 30% Pb; 13% Cd)	7,75	—	30,6	—

Марка (состав, вес. %)	$\sigma_{вр}$, 10^7 н/м²	$\sigma_т$, 10^7 н/м²	$H_Б$, 10^7 н/м²	E, 10^{10} н/м²
ПОС 90 (89—90% Sn; ⩽ 0,15% Sb; Pb)	4,39	—	13,26	—
ПОС 50 (49,5% Sn; ⩽ 0,8% Sb; Pb)	3,88	—	15,2	—
ПОС 25	2,86	—	10,71	—
ПОС 20 (18—20% Sn; ⩽ 0,3% Sb; 80—82% Pb)	2,74	—	10,2	—
ПОС 10	3,26	—	11,02	—
ПОСС 5-3 (4,5—5,5% Sn; 2—3% Sb: 92% Pb)	10,81	—	9,89	—
ПСр 2,5 (5,0—6,0% Sn; 2,2—2,8% Ag; 83—91% Pb);	11,22	—	—	—
ПОЦ 60 (60% Sn; 40% Zn)	7,24	5,71	19,04	—
ПСР 1,5А (0,75—1,25% Sn; 1,3—1,7% Ag; ⩽ 0,4% Sb; 97,5% Pb)	3,37	—	23,15	—
ПСР 2,5 А(0,25% Sn; 2,3—2,7% Ag; ⩽ 0,4% Sb; 97,5% Pb)	3,16	—	9,38	—

Таблица 4.8

Упругие свойства сплавов титана [7, 8, 12, 13]

Марка (состав, вес. %)	$\sigma_{вр}$, 10^7 н/м²	$\sigma_т$, 10^7 н/м²	$H_Б$, 10^7 н/м²	E, 10^{10} н/м²	G, 10^{10} н/м³	μ
ВТ3 (Ti; 4—6,2% Al; 2—3% Cr)	96,9—117,3	86,7—107,1	27,5—36,7*	11,2	4,33	0,3
ВТ3-1 (Ti; 4—6,2% Al; 1,5—2,5% Cr; 1—2,8% Mo)	96,9—122,4	86,7—112,2	27,5—36,7*	11,7	4,39	0,3
ВТ4 (Ti; 4—5% Al; 1—2% Mn)	81,6—91,8	71,4—81,6	—	11,2—12,2	4,28	0,31
ОТ4 (Ti; 2—3,5% Al; 1—2% Mn)	71,4—86,7	56,1—66,3	61,2—71,4*	11,2—12,2	4,08	—
ВТ5 (Ti; 5,5% Al)	81,6—96,9	71,4—86,7	—	10,6	4,33	0,3
ВТ6 (Ti; 5,0—6,5% Al; 3,5—4,5% V)	91,8—102	81,6—91,8	326,4—367,2	11,5	—	—
ВТ8 (Ti; 5,8—6,8% Al; 2,8—3,8% Mo)	107,1—120,4	96,9—112,2	316,2—357	11,2	4,33	0,3
ВТ9, закаленный и состаренный (Ti; 2,8—3,8% Mo; 5,8—6,8% Al; 1,8—2,8% Sn)	112—127	98—113	—	—	—	—
ВТ10, отожженный (Ti; 5—6% Al; 2,8—3,5% Cu; 2—3% Sn)	98—115	90—98	—	11,8	—	—
ВТ14, закалеиный и состаренный (Ti; 3,5—4,5% Al; 2,5—3,0% Mo; 0,7—1,5% V)	113—137	106—127	333—363	10,8	—	—
ВТ15, закаленный н состаренный (Ti; 3—4% Al; 7—8% Mo; 10—11,5% Cr)	133—147	123—142	—	—	—	—

* Твердость по Роквеллу, шкала С.

Таблица 4.9

Упругие свойства сплавов цинка [7, 8]

Марка (состав, вес. %)	$\sigma_{вр}$, 10^7 н/м²	$\sigma_т$, 10^7 н/м²	$H_Б$, 10^7 н/м	E, 10^{10} н/м²
(Zn; 4% Al; 0,04% Mg)	25,5—30,0	—	71,4—91,8	—
(Zn; 4% Al; 1% Cu; 0,04% Mg)	27,5—33,7	—	81,6—102	—
(Zn; 4% Al; 3% Cu; 0,05% Mg)	32,6—38,8	—	81,6—122,4	—
ЦАМ 10-5 (Zn; 9—12% Al; 4—4,5% Cu; 0,3—0,06% Mg)	30,6	—	102	—
ЦАМ 9-1,5 (Zn; 8—11% Al; 1,0—2,0% Cu; 0,03—0,06% Mg)	30,6	—	96,9	—
ЦМ-1 (Zn; 0,8—1,2% Cu)	20,4—30,6	—	45,9—76,5	—
ЦАМ 0,2—4 (Zn; 0,2—0,25% Al; 3,5—4,5% Cu)	30,6—36,7	—	76,5—91,8	12,8
ЦАМ 4-1 (Zn; 3,7—4,3% Al; 0,6—1,0% Cu; 0,02—0,05% Mg)	37,7—44,9	—	91,8—107,1	13,3
ЦАМ 10-1 (Zn; 9—11% Al; 0,6—1,0% Cu; 0,02—0,05% Mg)	40,8—46,9	—	91,8—112,2	13,3
ЦАМ 10-5 (Zn; 9—11% Al; 4,5—5,5% Cu)	35,7—45,9	—	91,8—112,2	—
ЦА 15 (Zn; 14—16% Al; 0,04% Mg)	25,5—40,8	—	61,2—102	11,5

Таблица 4.10

Упругие свойства сплавов платиины [7, 8]

Сплав (состав, вес. %)	Состояние	$\sigma_{вр}$, 10^7 н/м²	$\sigma_т$, 10^7 н/м²	$H_Б$, 10^7 н/м²
96,5% Pt; 3,5% Rh	Наклепанный	42,8	—	132,6
	Отожженный	17,8	—	71,4
90% Pt; 10% Rh	Наклепаиный	64,3	—	168,3
	Отожженный	32,1	—	91,8
80% Pt; 20% Rh	Наклепаиный	92,8	—	214,2
	Отожженный	49,9	—	122,4
95% Pt; 5% Ir	Холоднообработанный	50	—	142,8
	Отожженный	28,6	—	91,9
90% Pt; 10% Ir	Холоднообработанный	64,3	—	189,7
	Отожженный	39,3	—	132,6
80% Pt; 20% Ir	Холодиообработанный	103,5	—	270,3
	Отожженный	71,5	—	204
70% Pt; 30% Ir	Холодиообработанный	143	—	285,6
	Отожженный	114,2	—	265,2
95% Pt; 5% Au	Наклепанный	45,4	—	158,1
	Отожженный	32,1	—	93,8
90% Pt; 10% Au	Наклепанный	64,3	—	226,4
	Отожженный	55,4	—	145,9
30% Pt; 70% Au	»	46,4	—	137.7
10% Pt; 90% Au	»	25,7	—	61,2
90,92% Au; 9,08% Cu	»	56,5	—	—

Таблица 4.11

Упругие свойства сплавов вольфрама [7, 8]

Марка (состав, вес. %)	$\sigma_{вр}$, 10^7 н/м²	$\sigma_т$, 10^7 н/м²	H_R, 10^7 н/м²
В2К (47—63% Co; 27—33% Cr; 13—17% W; ⩽ 2% Ni; ⩽ 2% Fe; 1—2% Si; 1,0% Mn; 1,8—2,5%C)	61,2—71,4	—	45,9—47,9
ВЭК (58—62% Co; 28—32% Cr; 4—5% W; ⩽2%Ni; ⩽2% Fe; 2,5% Si; 1,0—2,5% C)	61,2—71,4	—	40,8—42,8

Таблица 4.12

Упругие свойства металлокерамических твердых сплавов [7, 8]

Сплав (состав, вес. %)	$\sigma_{в.\ изг.}$, 10^7 н/м²	$\sigma_{в.\ сж.}$, 10^7 н/м²	H_{R_A}, 10^9 н/м²	E, 10^{10} н/м²
97% WC; 3% Co	102—122,4	601,8	92,8—94,9	68,9
94% WC; 6% Co	163,2—193,6	510	91,8—92,8	64,3
91% WC; 9% Co	153—193,8	489,6	90 8—91,8	60,2
80% WC; 20% Co	204—244,8	346,8	84,7—87,7	51
70% WC; 30% Co	—	—	81,6—83,6	—
94% WC; 1% TiC; 5% Co	142.8—163,2	571,2	90 8—91,8	64,3
86% WC; 5% TiC; 9% Co	153—163,2	469	90,8—91,8	60,2
82% WC; 10% TiC; 8% Co	153—173,4	—	91,8—92,8	—
78% WC; 16% TiC; 6% Co	112,2—127,5	438,6	91,8—93,3	53
69% WC; 25% TiC; 6% Co	91,8—112,2	—	91,8—92,8	—
34% WC; 60% TiC; 6% Co	71,4—81,6	387,6	93,8—94,9	38,8
85% WC; 4% TiC; 1% TaC (NbC); 10% Co	173,4—193,8	—	90,8—91,8	56,1
80,5% WC; 5% TiC; 5,5% TaC (NbC); 9% Co	173,4—204	—	91,8—92,8	57,1
76% WC; 7,5% TiC; 6,9% TaC (NbC); 10% Co	173,4—204	458	90,8—91,8	53
62% WC; 12% TiC; 18% TaC (NbC); 8% Co	122,4—142,8	520,2	92,8—93,8	64,3
59% WC; 12% TiC; 18% TaC (NbC); 11% Co	132,6—153	408	91,8—92,8	57,1
70,5% WC; 13,5% TiC; 7,5% TaC (NbC); 8,5% Co	132,6—153	479,4	92,8—93,8	51
ВК2 (98% WC; 2% Co)	102	—	91,8	—
ВК3 (97% WC; 3% Co)	102	—	90,8	—
ВК6 (94% WC; 6%Co)	122,4	—	89,8	—
ВК8 (92% WC; 8% Co)	132,6	—	89,3	—
ВК4 (96% WC; 4% Co)	122,4	—	91,3	—
ВК6 мелкозернистый (94% WC; 6% Co)	122,4	—	90,8	—

Таблица 4.13

Упругие свойства биметаллов [7, 8]

Марка (состав, вес. %)	$\sigma_{вр}$, 10^9 н/м²	$\sigma_т$, 10^9 н/м²	$H_Б$, 10^7 н/м²	E, 10^{10} н/м²
90/10 (90% Al; 10% Cu):				
мягкий	9,18—11,2	4,08—5,1	34,7—38,8	7,45
твердый	18,4—20,4	13,3—15,3	61,2—65,3	—
5/90/5 (5% Cu; 90% Al; 5% Cu):				
мягкий	9,18—11,2	4,08—5,1	30,6—34,7	7,24
твердый	18,4—20,4	14,3—16,3	61,2—66,3	—
80/20 (20% Cu; 80% Al):				
мягкий	10.2—12,2	4,59—5,61	37,7—41,8	7,65
твердый	19,4—21,4	16,3—18,4	66,3—71,4	—
10/80/10 (10% Cu; 80% Al; 10% Cu):				
мягкий	10,2—12,2	4,59—5,61	32,6—36,7	7,34
твердый	19,4—21,4	16,8—18,4	67,3—71,4	—
70/30 (70% Al; 30% Cu):				
мягкий	12,2—14,3	5,1—6,12	38,8—43,9	8,27
твердый	20,4—23,5	17,3—19,4	71,4—76,5	—
15/70/15 (15% Cu; 70% Al; 15% Cu):				
мягкий	12,2—14,3	5,1—6,12	38,8—42,8	7,55
твердый	30,4—23.5	18,4—20,4	73,4—77,5	—
Д16АМ	23,5—24,5	—	—	—
Д16АТ	42,3—44,4	28,1—28,6	—	—
Д16АТН	44,4—47,4	34,7—35,7	—	—
Д1АМ	23,5—24,5	—	—	—
Д1АТ	37,7—38,8	19,4—20,4	—	—

Упругие и прочностные свойства пластмасс [9, 16]

Наименование	$\sigma_в$, 10^7 н/м²	$\sigma_{в.сж}$, 10^7 н/м²	$\sigma_{в.изг}$, 10^7 н/м²	$H_Б$, 10^{10} н/м²	E, 10^{10} н/м² (при растяжении)
Амиопласт	3,6	9,8	5,9—7,8	34—54	0,74—0,98
Асботекстолит	6,4—11,7	12,3—30,1	10,8—8,6	29,4—44	1,37—1,96
Винипласт	3,92—5,88	7,84—15,7	9,8—11,8	14,7—15,7	0,039
Гетинакс электротехнический (П)	7,84	16,2—28,4	9,8	24,5	1,18—2,06
Гранулированный сополимер	3,9	—	8,3	11,8	0,2—0,26 (при изгибе)
Древесно-слоистый пластик ДСП-Б (длинный лист)	21,6	15,2	25,5	24,5	2,9
Древесный коротковолокнистый волокнит К-ФВ25	2,94	12,7	4,9—6,9	26,5	—
Капроновая смола:					
первичная	5,9	7,8	8,8	9,8—11,8	0,098—0,123
вторичная	6,86—7,8	8,8—9,8	9,8	—	0,098—0,123
Капрон стеклонаполненный	14,7—17,6	11,8	20,6—24,5	19,6—21,6	0,74—0,83
Литьевой материал ПУ-1 А и Б	4,9—5,88	7,8—8,3	6,86—7,8	—	—
ЭЦ-12 А	—	—	5,9	9,8	—
Пенопласт плиточный ПВХ-2	0,44—0,45	0,147	—	—	0,016—0,02
Пенопласт ФК-20	0,17	0,098	—	—	—
Полиамид:					
наполненный П-68 Т20	4,9—5,9	9,3—9,8	9,3—9,8	14,7—17,6	0,118—0,196
стеклонаполненный СП-68	7,35—8,3	10,8	12,25—14,7	27,4—29,4	0,78
Поливинилхлорид неориентированный	2,9—4,9	5,15—5,9	3,8—10,8	—	—
Поликапроамид	5,9—6,37	6,7—7,8	8,8	9,8—11,8	—
Поликапроамид стеклонаполненный	12,7—14,7	11,8—12,85	21,6—24,5	19,6—21,6	—
Поликарбонат (дифион)	5,9—8,7	7,8—8,8	7,8	14,7—15,7	0,216—0,245
Поликарбонат стеклонаполненный	12,35—14,75	13,03	17,15—21,95	—	—
Полипропилен ПП-1	2,45	5,9	7,8	6,17	0,066—0,117 (при изгибе)
Полипропилен стеклонаполненный	5,5	4,8	6,9	—	—
Полистирол:					
эмульсионный А	3,4—3,9	9,8	9,8	13,7—14,7	0,255
суспензионный ПС-С	3,9	—	4,9	—	—
стеклонаполненный	7,25—10,3	9,6—11,7	10,3—13,0	—	—
Полиформальдегид стабилизированный	5,9—6,9	12,7	7,8	19,6—39,2	—
Полиэтилен:					
высокого давления кабельный П-2003-5	1,18—1,37	—	0,74	1,18—2,45	0,015—0,025
высокого давления П-2006-Т	1,37	1,23	1,18—1,67	12,7 (по Роквеллу)	2,015—0,025
низкого давления П-4007-Э	2,16	2,45	2,16	4,4—5,7	0,054 (при изгибе)
среднего давления	2,65—3,23	—	2,45—3,9	5,5—6,4	0,078—0,098
Пресс-материал:					
горячего прессования ВЭИ-11	—	—	2,45	—	—
холодного прессования ВЭИ-11	—	—	1,96	—	—
АГ-4НС	88,2	39,2	58,8	—	—
К-41-5	17,15	12,99	4,9	—	—
Сополимер МСН-А	—	8,8—9,8	—	15,7—17,6	—
Сополимер стирола с метилстиролом	—	—	8,8	—	0,304
Стекло органическое ПА, ПБ, ПВ	4,9	11,8—15,7	7,8—13,7	6,9—11,8	0,314—0,392
Стекло текстолит СТЭР-1-30	29,4	29,4	39,2	—	2,45
Текстолит:					
поделочный ПТК	9,8	24,5	15,7	29,4—34,3	0,39—0,63
металлургический	—	19,6	—	29,4	—
графитированный	8,8	19,6	11,8	—	—
Фаолит А	1,7	3,9	4,9	24,5—32,3	—
Фторопласт-3	2,9—3,9	1,96—5,6	5,9—7,8	—	9,8—12,7
Фторопласт-4	2,2	1,18	1,37	2,9—3,9	0,046—0,083 (при t=60°С)
Фторопласт 4Д-Б	1,37	1,96	1,09	2,9—3,9	0,046—0,083 (при t=60°С)

Наименование	$\sigma_в$, 10^7 н/м²	$\sigma_{в.сж}$, 10^7 н/м²	$\sigma_{в.изг}$, 10^7 н/м²	$H_Б$, 10^{10} н/м²	E, 10^{10} н/м² (при растяжении)
Этрол этилцеллюлозный ЭПТ:					
тропический	2,9	4,4	3,3—3,9	4,4—5,9	0,216
ацетобутиратцеллюлозный АБЦЭ-45-20	1,7—4,6	5,15—14 7	1,47—8,8	3,9—5,9	—
нитроцеллюлозный	2,45—4,9	13,7—19,6	2,9—5,9	5,9—13,7	0,176—0,27
Целлулоид белый технический	3,4	—	4,9	5,9	0,113

Таблица 4.15

Свойства технических резин [7. 8]

Сорт резины	Прочность при растяжении, 10^5 н/м²	Удлинение при разрушении, %	Твердость, 10^5 н/м²
Мягкая эластичная	29,4—58,8	200—100	4,4—6,37
Средней твердости и эластичности	44—73,5	300—600	6,86—10,78
Жесткая, упругая	44—98	250—600	11,2—17,4
Теплостойкая, мягкая	44—127,4	300—800	5,1—6,45
Теплостойкая, неэластичная	29,4—78,5	100—200	12,3—17,4
Маслостойкая, средней и твердой эластичности	49—98	350—650	7,25—10,78
Маслостойкая, неэластичная	44—58,8	300—600	11,8—16,3
Маслостойкая, мягкая	74	600—700	4,2—5,7

4.5. МИНЕРАЛЫ И ВОЛОКНА

Таблица 4.16

Твердость минералов [10, 15]

Минерал	Химическая формула	Микротвердость, 10^7 н/м²	Твердость по шкале Мооса
Азурит	$2\,CuCO_3 \cdot Cu(OH)_2$	—	3,77—3,83
Алмаз (природный, борозол)	C	9859	10
Берилл	$Be_3Al_2[Si_6O_{18}]$	1121—1458	7,5—8,0
Гранат	$Fe_3Al_2[SiO_4]_3$	1203—1264	—
Графит	C	6,8—11,8	1—2
Кварц	SiO_2	1002—1212	7
Корунд	Al_2O_3	2014—2157	9
Опал	$SiO_2 \cdot xH_2O$	—	5,5—6,5
Топаз	$Al_2[SiO_4][FOH]_2$	1388—1439	8
Турмалин	$[Ni, Ca](NaAl)_6[Si_6Al_3B_3 \cdot (O, OH)_{30}]$	1049—1162	—

Таблица 4.17

Свойства волокои и проволок [14, 15]

Материал	Форма	$\sigma_в$, 10^9 $н/м^2$	E, 10^{10} $н/м^2$	Удлинение, %
Ацетат	Волокно	17,6—21,5	—	25
Бамбук	»	34,5	3,3	—
Вискоза	»	26,5—44	—	15—24
Графит	Усы	2050	98	—
Капрон	Волокно	49—63,5	—	15—35
Лен	»	98	—	2,5—3
Медноаммиак	»	20,5—30,5	—	15
Сталь	Проволока	340	19,6	—
Стекло	Волокио	210	—	—
Нитрои	»	44	—	16—21
Шелк	»	41	—	—
Шерсть	»	15,6—17,2	—	—
B	»	590	50	—
Be	Проволока	152	29	—
C	Нити	122	4,1	—
W	Проволока	275	40	—
Al_2O_3	Усы	108—1760	41	—
BeO	»	1900	41	—
SiO_2	Волокио	138—148	55	—
WC	Кристаллы	34,5	49—69	—
ZrC	»	41	19	—
TiC	»	31—41	47	—
SiC	Усы	305	45	—
B_4C	»	980	45	—
TiB_2	Кристаллическое волокно	12,8	37—56	—

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Tellor W.** A Comprehensive Treatise on Inogranic and Theoretical Chemistry. V. 5. Lond. — N. Y. — Toronto, 1942.
2. **Кэй Д., Лэби Т.** Справочник физика-экспериментатора. Пер. с англ. М., Изд-во иностр. лнт., 1949.
3. **Tellor W.** A Comprehensive Treatise on Inorganic and Theoretical Chemistry. V. 3. Lond. — N. Y. — Toronto, 1942.
4. **Tellor W.** Ibid. V. 15. Lond —N. Y. —Toronto, 1942.
5. **Tellor W.** A Comprehensive Treatise on Inorganic and Theoretical Chemistry. V. 11. Lond. —N. Y. — Toronto, 1943.
6. **Кузиецов В. Д.** Физика твердого тела. Т. 4. Томск, Полнграфиздат, 1947.
7. **Справочиик** по машнностронтельным материалам. Под ред. Г. И. Погоднна—Алексеева. Т. 2. М., Машгиз, 1959.
8. **Справочник** конструктора точиых приборов. Под ред. И. Я. Левина. М., Машгиз, 1959.
9. **Суслов Н. И.** Замена металлов пластмассами. М., Машгиз, 1962.
10. **Лебедев С. И.** Определение мнкротвердости мнпералов. М., Изд-во АН СССР, 1963.
11. **Едернол А. Ф., Жуков О. П., Перкас М. Д.** Мартенситностареющие стали с прочностью более 200 $кГ/мм^2$. — «Металловедение и термнческая обработка металлов». 1971, № 4, с. 9.
12. **Титаиовые** сплавы. Ч. I. М., ОНТИ. ВИАМ, 1959.
13. **Толмашов Н. Д., Альтовский Р. М.** Коррозия и защита титана. М., «Машнностроение», 1971.
14. **Волокнистые** композиционные материалы. Пер. с англ. Под ред. Ф. З. Бакштейна. М., «Мир», 1967.
15. **Handbook** of Chemistry and Physics 35 th edition. Cleveland, Ohio.
16. **Альшиц И. Я. Анисимов Н. Ф., Благов Б. Н.** Проектирование деталей из пластмасс. Справочник. М., «Машиностроение», 1969.
17. **Справочник** по машиностроительным материалам. Под ред. Г. И. Погодина—Алексеева. Т. 1. М., Машгиз, 1959.
18. **Металловедеиие** алюминия и его сплавов. Отв. ред. И. Н. Фрндляндер. М., «Металлургия», 1971.

ГЛАВА 5

ПЛОТНОСТЬ ВЕЩЕСТВ

5.1. ЭЛЕМЕНТЫ

Таблица 5.1

Плотность чистых элементов ρ, 10^3 кг/м³ [1—3]

Элемент	t, °С	ρ	Элемент	t, °С	ρ
Алюминий:			Празеодим	20	6,475
твердый	20	2,70	Рений	20	20,53
жидкий	659	2,382	Родий	20	12,44
Барий	20	3,78	Ртуть:	0	13,596
Бериллий	20	1,84	жидкая		
Бор:				20	13,546
кристаллический	20	3,33		—38,8	13,690
аморфный	20	2,34	твердая	—38,8	14,193
Бром жидкий	20	3,12		—188	14,383
Ванадий	20	5,96	Рубидий	20	1,532
Висмут электролитический	20	9,747	Рутений	0	12,06
Вольфрам	20	18,6—19,1	Самарий	20	7,8
Гадолиний	20	5,91	Свинец:		
Галлий	32, 38	6,093	твердый	20	11,342
Гафний	20	13,3		325	11,005
Германий	20	5,46	жидкий	325	10,645
Европий	20	3,217		400	10,597
Железо	20	7,87		850	10,078
Золото	20	19,3	Селен:		
Иридий	20	7,28	аморфный	20	4,8
Иод	20	4,94	кристаллический	20	4,5
Иридий	17	22,42	жидкий	—	4,27
Иттербий	20	5,5	Сера:		
Иттрий	20	3,80	ромбическая	20	2,07
Кадмий	20	8,648	монокристаллическая	20	1,96
Калий	20	0,87	аморфная	20	1,92
Калий:			жидкая	113	1,81
твердый	62,1	0,851	Серебро:		
жидкий	62,1	0,83	литое	20	10,42—10,59
Кальций	29	1,55	жидкое	—	9,51
Кобальт	21	8,71	Скандий	20	2,5
Кремний:			Стронций	20	2,54
кристаллический	20	2,42	Сурьма	20	6,618
аморфный	15	2,35	аморфная	20	6,22
Лантан	—	6,15	Таллий	20	11,86
Литий	20	0,534	Тантал	20	16,6
Магний	5	1,741	Теллур:		
Марганец	20	7,42	кристаллический	20	6,25
Медь:			аморфный	20	6,02
твердая	20	8,93	Тербий	20	4,35
жидкая	—	8,217	Титан	18	4,5
Молибден	20	9,01	Торий	20	11,3—11,1
Натрий:			Углерод (алмаз)	20	3,52
твердый	—188	1,0066	Углерод (графит)	20	2,25
	20	0,9712	Уран	13	18,7
	97,6	0,9519	Фосфор:		
жидкий	97,6	0,9287	белый	20	1,83
Неодим	20	6,96	красный	20	2,20
Никель	20	8,6—8,9	металлический	15	2,34
Ниобий	15	8,4	Хром	20	7,1
Олово:			Цезий	20	1,873
белое	20	7,29	Церий	20	6,9
твердое	226	7,184	Цинк:		
жидкое	226	6,99	твердый	20	6,92
серое	20	5,8	жидкий	—	6,48
Осмий	20	22,5	Циркоиий	20	6,44
Палладий	20	12,16	Эрбий	20	4,77
Платина	20	21,37			

Таблица 5.2

5.2. ГАЗЫ И ПАРЫ

Плотиость газов и паров при 0°С и 760 *мм рт. ст.*, *кг/м*³ [1—4]

Элемент или соединение	Формула	ρ	Элемент или соединение	Формула	ρ
Азот	N_2	1,2505	Неои	Ne	0,8999
Аммиак	NH_3	0,7714	Нитрозил:		
Аргон	Ar	1,7839	фтористый	NOF	2,176*
Ацетилен	C_2H_2	1,1709	хлористый	NOCl	2,992
Бор фтористый	BF_3	2,99	Озон	O_3	2,22
n-Бутан	C_4H_{10}	2,703	Окнсь азота	NO	1,3402
i-Бутан	C_4H_{10}	2,673	Пропан	C_3H_8	2,0037
Водород:	H_2	0,08987	Пропилен	C_3H_6	1,915
бромистый	HBr	3,664	Радон	Rn	9,73
иодистый	HI	5,789	Сера:		
мышьяковистый	H_3As	3,48	двуокись	SO_2	2,9263
селенистый	H_2Se	3,6643	гексафторид	SF_6	6,50*
сернистый	H_2S	1,5392	Снлан:		
теллуристый	H_2Te	5,81	диметил	$SiH_2(CH_3)_2$	2,73
фосфористый	H_3P	1,530	метил	SiH_3CH_3	2,08
хлористый	HCl	1,6391	хлористый	SiH_3Cl	3,03
Воздух	—	1,2928	трифтористый	$SiHF_3$	3,89
Гелий	He	0,1785	Стибин (15°С,	SbH_3	5,30
Германия тетрагидрид	GeH_4	3,420	754 *мм рт. ст.*)		
Диметиламин	$(CH_3)_2NH$	1,966*	Сульфурил фтористый	SO_2F_2	3,72*
Дифтордихлорметан	CF_2Cl_2	5,510	Триметиламин	$(CH_3)_3N$	2,580*
Дициан	C_2N_2	2,335*	Триметилбор	$(CH_3)_3B$	2,52
Закись азота	N_2O	1,978	Углерод:		
Кислород	O_2	1,42904	двуокись	CO_2	1,9768
Кремний:			окись	CO	1,2500
фтористый	SiF_4	4,9605	сероокись	COS	2,72
гексагидрид	Si_2H_6	2,85	Фосфор:		
тетрагидрид	SiH_4	1,44	фтористый	PF_3	3,907*
Криптон	Kr	3,74	оксифторид	POF_3	4,8
Ксенон	Xe	5,89	пентафторид	PF_5	5,81
Метан	CH_4	0,7168	Фтор	F_2	1,695
Метиленхлорид	CH_3Cl	2,307	Фторокись азота	NO_2F	2,90
Метиламин	CH_5N	1,388	Хлор	Cl_2	3,22
Метиловый эфир	C_2H_6O	2,1098	Хлор:		
Метилфторид	CH_3F	1,545	двуокись	ClO_2	3,09*
Метилхлорид	CH_3Cl	2,307	окись	Cl_2O	3,89*
Мышьяк фтористый	AsF_5	7,71	Хлорокись азота	NO_2Cl	2,57
			Этан	C_2H_6	1,356
			Этилен	C_2H_4	1,2605

* При $t = 20°C$.

Таблица 5.3

Плотиость газов в жидком и твердом состояниях, 10^3 *кг/м*³ [1,5]

Газ	Жидкое		Твердое	
	t, °С	ρ	*t*, °С	ρ
Азот	—195,09	0,8043	—253	1,03
Азота окись	—20	1,0	—	—
Аммиак	—10,7	0,65	—	—
»	+16,3	0,61	—	—
Аргон	—183,15	1,3739	—233	1,65
Ацетилен	—23,5	0,52	—	—
Водород:	—249,89	0,0672	—260	0,076
сернистый	—61	0,86	—	—
фосфористый	—90	0,746	—	—
фтористый	+13,6	0,988	—	—
хлористый	—85,8	1,194	—	—
Воздух (20,99 O_2)	—147	0,92	—	—
Гелий	—268,38	0,1139	—	—
Криптои	—147,18	2,3707	—	—
Ксенон	—109,1	3,06	—	—

Продолжение табл. 5.3

Газ	Жидкое		Твердое	
	t, °С	ρ	t, °С	ρ
Кислород	—182,7	1,14	—253	1,41
	—205	1,25	—	—
Метан	—164	0,415	—	—
Метилхлорид	+18	0,920	—	—
Неон	—245,9	1,204	—	—
Озон	—183	1,71	—	—
Серы двуокись	—10	1,46	—	—
Углерод:				
двуокись	—60	1,19	—79	1,53
окись	—190	0,79	—	—
Фтор	—187	1,11	—	—
Хлор	—33,6	1,56	—	—
	+20	1,41	—	—
Этан	—88	0,546	—	—
Этилен	—102	5,566	—	—
	—21	0,41	—	—

5.3. ЖИДКОСТИ

Таблица 5.4

Плотиость жидкостей, 10^3 *кг/м*^{3} [1—4]

Жидкость	t, °С	ρ	Жидкость	t, °С	ρ
Ацетон	20	0,792	Пентан	20	0,626
Бензин	20	0,68—0,72	Ртуть	0	13,596
Бензол	0	0,899	Спирт амиловый	20	0,814
Вода	4	1,00	Спирт:		
Глицерин	20	1,26	бутиловый	20	0,80978
Керосин	20	0,82	изобутиловый	20	0,8011
2-Ксилол	20	0,88	изопропиловый	20	0,7854
Кислота:			пропиловый	20	0,8044
азотная	20	1,502	метиловый	20	0,7928
пальмитиновая	62	0,853	этиловый	20	0,7893
уксусвая	20	1,049	Сероуглерод	0	1,293
Масло:			Углерод четыре ххлористый	20	1,595
назелиновое	20	0,8	Фторбензол	20	1,024
креозот	15	1,04—1,10	Хлорбензол	20	1,066
машиное	20	0,90—0,92	Хлороформ	20	1,489
парафиновое	20	0,87—88	Эфир	0	0,736
скипидарное	20	0,87	Этилацетат	20	0,901
Метилацетат	25	0,9274	Этилбромид	20	1,430
Молоко	20	1,03	Этилиодид	20	1,933
Морская вода	20	1,01—1,05	Этилхлорид	0	0,9214
Нефть	20	0,81—0,85			

Таблица 5.5

Плотиость масел и воска при 15°С по отиошеиию к плотиости воды при 15°С [3, 4]

Вещество	ρ	Вещество	ρ
Воск:		Жир:	
китайский	0,809—0,811	китовый	0,917—0,924
обыкновенный	0,961—0,968	кроличий	0,934—0,936
миртовый	0,995	костный	0,914—0,916
японский	0,970—0,980	конский	0,919—0,933
Жир:		сниной (лярд)	0,913—0,915
бараний	0,937—0,953	свиной (жировая ткань)	0,934—0,938
говяжий	0,931—0,938	спермацет	0,905—0,945
гусиный	0,923—0,930	трескового печени	0,964—0,974
дельфииа	0,926	тюлений	0,915—0,926
кашалота	0,878—0,884	человеческий	0,9178

Вещество	ρ	Вещество	ρ
Масло:		Масло:	
букового ореха	0,922	маковое	0,924—0,926
виноградных зерен	0,917—33	миндальное	0,914—0,921
горчицы белой	0,912—16	мускатное	0,945—0,996
горчицы черной	0,961—69	оливковое	0,915—0,920
грецкого ореха	0,925—27	пальмовое	0,924
земляного ореха	0,917—0,926	ореховое	0,917
касторовое	0,960—0,967	персиковое	0,918—0,925
кокосового ореха	0,926	подсолнечное	0,924—0,926
какао	0,964—0,974	рапсовое	0,913—0,917
конопляное	0,928—0,934	свечного ореха	0,925—0,927
коровье 40°/15°	0,907—0,912	соевое	0,924—0,927
кукурузное	0,921—0,928	тунговое	0,939—0,949
кунжутное 23°/25°	0,919	тыквенное	0,923—0,925
лавровое 100°	0,880	хлопковое	0,917—0,918
льняное	0,930—0,938	Стеарин хлопковый	0,919—0,923

5.4. ВОДНЫЕ РАСТВОРЫ

Таблица 5.6

Плотность водного раствора этилового спирта, отнесенная к плотности воды при 4°С [1]

Концентрация спирта, вес. %	15°С	20°С	25°С	Концентрация спирта, вес. %	15°С	20°С	25°С
0	0,99913	0,99824	0,99708	50	0,91787	0,91386	0,90983
2	0,99543	0,99453	0,99338	52	0,91344	0,90940	0,90533
4	0,99197	0,99102	0,98984	54	0,90895	0,90488	0,90079
6	0,98877	0,98776	0,98651	56	0,90443	0,90034	0,89622
8	0,98581	0,98470	0,98336	58	0,89987	0,89576	0,89162
10	0,98307	0,98185	0,98038	60	0,89528	0,89115	0,88700
12	0,98049	0,97913	0,97752	62	0,89066	0,88651	0,88234
14	0,97803	0,97651	0,97474	64	0,88601	0,88185	0,87766
16	0,97563	0,97393	0,97199	66	0,88134	0,87716	0,87295
18	0,97324	0,97134	0,96922	68	0,87664	0,87244	0,86821
20	0,97080	0,96870	0,96640	70	0,87192	0,86770	0,86344
22	0,96829	0,96599	0,96352	72	0,86716	0,86292	0,85864
24	0,96566	0,96317	0,96052	74	0,86237	0,85812	0,85380
26	0,96289	0,96021	0,95739	76	0,85755	0,85328	0,84893
28	0,95997	0,95711	0,95412	78	0,85270	0,84840	0,84403
30	0,95688	0,95385	0,95071	80	0,84781	0,84349	0,83909
32	0,95360	0,95042	0,94713	82	0,84286	0,83852	0,83410
34	0,95017	0,94684	0,94342	84	0,83786	0,83350	0,82906
36	0,94657	0,94311	0,93957	86	0,83279	0,82842	0,82396
38	0,94282	0,93924	0,93560	88	0,82762	0,82323	0,81876
40	0,93893	0,93524	0,93151	90	0,82035	0,81795	0,81348
42	0,93491	0,93113	0,92732	92	0,81694	0,81255	0,80890
44	0,93078	0,92693	0,92305	94	0,81138	0,80700	0,80256
46	0,92655	0,92264	0,91870	96	0,80564	0,80129	0,79689
48	0,92225	0,91828	0,91429	98	0,79972	0,79541	0,79106
				100	0,79358	0,78933	0,78507

Таблица 5.7

Плотность водного раствора метилового спирта при 15°С, отнесенная к плотности воды при 4°С [1]

Концентрация спирта, вес.%	0	2	4	6	8	Концентрация спирта, вес.%	0	2	4	6	8
0	0,99913	0,99543	0,99198	0,98864	0,98547	60	0,89781	0,89341	0,88890	0,88433	0,87971
10	0,98241	0,97945	0,97660	0,97377	0,97096	70	0,87507	0,87033	0,86546	0,86051	0,85551
20	0,96814	0,96533	0,96251	0,95963	0,95668	80	0,85048	0,84536	0,84009	0,83475	0,82937
30	0,95366	0,95056	0,94734	0,94404	0,94067	90	0,82396	0,81849	0,81285	0,80713	0,80143
40	0,93720	0,93365	0,93001	0,92627	0,92242	100	0,79577	—	—	—	—
50	0,91852	0,91451	0,91044	0,90631	0,90210						

Таблица 5.8

Отношение плотности водных растворов веществ при различных температурах к плотности воды при температуре 4°С [1]

Концентрация, вес. %	$AgNO_3$, 20°С	$AlCl_3$, 18°С	Al_2Cl_6, 15°С	$Al_2(SO_4)_3$, 15°С	$Al(NO_3)_3$, 18°С	$BaBr_2$, 20°С	$Ba(C_2H_3O_2)_2$, 18°С	$BaCl_2$, 20°С	BaI_2, 20°С	$C_3H_6O_3$, 20°С
1	1,0070	1,0075	1,0072	1,0093	1,0065	—	1,0059	—	—	1,0006
2	1,0154	1,0164	1,0144	1,0195	1,0144	1,0156	1,0133	1,0159	1,0154	1,0030
4	1,0327	1,0344	1,0289	1,0404	1,0305	1,0335	1,0282	1,0341	1,0331	1,0077
6	1,0506	1,0526	1,0435	1,0618	1,0469	1,0519	1,0433	1,0528	1,0513	1,0125
8	1,0690	1,0711	1,0585	1,0837	1,0638	1,0710	1,0587	1,0721	1,0701	1,0173
10	1,0882	1,0900	1,0734	1,1062	1,0811	1,0907	1,0745	1,0921	1,0896	1,0221
12	1,1080	1,1093	1,0890	1,1293	1,0989	1,1111	1,0908	1,1128	1,1099	1,0271
14	1,1284	1,1290	1,1047	1,1529	1,1171	1,1323	1,1075	1,1342	1,1308	1,0320
16	1,1495	1,1491	1,1207	1,1779	1,1357	1,1543	1,1246	1,1564	1,1526	1,0370
18	1,1715	—	1,1372	1,2017	1,1549	1,1770	1,1421	1,1793	1,1750	1,0420
20	1,1942	—	1,1537	1,2272	1,1745	1,2006	1,1599	1,2031	1,1984	1,0470
22	—	—	1,1709	1,2534	1,1946	—	1,1782	1,2277	—	1,0520
24	—	—	1,1882	1,2803	1,2153	—	1,1970	1,2531	—	1,0571
26	—	—	1,2058	1,3079	1,2365	—	1,2161	1,2793	—	1,0622
28	—	—	1,2241	—	1,2582	—	1,2356	—	—	1,0674
30	1,3205	—	1,2422	—	1,2805	1,3325	1,2554	—	1,3289	1,0727
35	1,3931	—	1,2905	—	—	1,4087	1,3069	—	1,404	1,0860
40	1,4743	—	1,3415	—	—	1,4926	1,3608	—	1,490	1,0995
45	1,565	—	—	—	—	—	—	—	1,587	1,1128
50	1,668	—	—	—	—	—	—	—	1,698	1,1263
55	1,786	—	—	—	—	—	—	—	1,825	1,1398
60	1,916	—	—	—	—	—	—	—	1,970	1,1533

Продолжение табл. 5.8

Концентрация, вес. %	$CdSO_4$, 18°С	CrO_3, 15°С	$Cr_2(SO_4)_3$ зеленый, 15°С	$Cr_2(SO_4)_3$ фиолетовый, 15°С	$Cu(NO_3)_2$, 20°С	$CuSO_4$, 20°С	$CuCl_2$, 20°С	$FeCl_3$, 20°С	$Fe(NO_3)_3$, 17,5°С	$Fe_2(SO_4)_3$, 17,5°С
1	1,0086	1,006	1,0081	1,0091	1,007	1,009	1,007	1,007	1,0080	1,007
2	1,0182	1,014	1,0172	1,0191	1,015	1,019	1,017	1,015	1,0160	1,016
4	1,0383	1,030	1,0358	1,0395	1,032	1,040	1,036	1,032	1,0320	1,033
6	1,0590	1,045	1,0551	1,0604	1,050	1,062	1,056	1,049	1,0472	1,050
8	1,0803	1,060	1,0751	1,0817	1,069	1,084	1,075	1,067	1,0620	1,067
10	1,1023	1,076	1,0958	1,1034	1,088	1,107	1,096	1,085	1,0770	1,084
12	1,1250	1,093	1,1172	1,1257	1,107	1,131	1,117	1,104	1,0934	1,103
14	1,1485	1,110	1,1392	1,1486	1,126	1,154	1,138	1,123	1,1098	1,122
16	1,1729	1,127	1,1618	1,1722	1,147	1,180	1,160	1,142	1,1268	1,141
18	1,1982	1,145	1,1851	1,1966	1,168	1,206	1,182	1,162	1,1440	1,161
20	1,2243	1,163	1,2091	1,2218	1,189	—	1,205	1,182	1,1692	1,181
22	—	1,181	1,2339	1,2479	—	—	—	—	1,1812	—
24	—	1,200	1,2594	1,2750	—	—	—	—	1,2012	—
26	—	1,220	1,2856	1,3032	—	—	—	—	1,2212	—
28	—	1,240	1,3125	1,3325	—	—	—	—	1,2416	—
30	1,3714	1,260	1,3401	—	—	—	—	1,291	1,2622	1,307
35	1,4551	1,313	1,4123	—	—	—	—	1,353	1,3164	1,376
40	1,5470	1,371	1,4893	—	—	—	—	1,418	1,3746	1,449
50	—	1,505	—	—	—	—	—	1,551	1,4972	1,613
55	—	1,581	—	—	—	—	—	—	1,5722	1,703
60	—	1,663	—	—	—	—	—	—	1,6572	1,798

Продолжение табл. 5.8

Концентрация, вес. %	$C_6H_8O_7 \cdot H_2O$, 15°C	$C_{12}H_{22}O_{11}$, 20°C	$CaBr_2$, 20°C	$CaCl_2$, 20°C	CaI_2, 20°C	$Ca(NO_3)_2$, 18°C	$CdBr_2$, 20°C	$CdCl_2$, 20°C	CdI_2, 20°C	$Cd(NO_3)_2$, 20°C
1	—	1,0021	—	—	—	—	—	—	—	—
2	1,0074	1,0060	1,0152	1,0148	1,0150	1,0137	1,0158	1,0159	1,0153	1,0154
4	1,0149	1,0139	1,0326	1,0316	1,0323	1,0291	1,0339	1,0339	1,0328	1,0326
6	1,0227	1,0219	1,0504	1,0486	1,0500	1,0448	1,0524	1,0524	1,0507	1,0502
8	1,0309	1,0299	1,0688	1,0659	1,0683	1,0608	1,0714	1,0715	1,0690	1,0683
10	1,0392	1,0381	1,0877	1,0835	1,0873	1,0771	1,0910	1,0912	1,0819	1,0869
12	1,0470	1,0465	1,1071	1,1015	1,1069	1,0937	1,1112	1,1115	1,1075	1,1061
14	1,0549	1,0549	1,1272	1,1198	1,1273	1,1106	1,1322	1,1324	1,1278	1,1261
16	1,0632	1,0635	1,1480	1,1386	1,1485	1,1279	1,1540	1,1540	1,1489	1,1468
18	1,0718	1,0721	1,1696	1,1578	1,1703	1,1455	1,1766	1,1762	1,1709	1,1682
20	1,0805	1,0810	1,1919	1,1775	1,1928	1,1636	1,2000	1,1992	1,1937	1,1904
25	—	1,1036	1,2499	1,2284	1,2530	1,2106	1,2605	1,2604	1,2546	1,2488
30	1,1244	1,1270	1,3125	1,2816	1,3195	1,250	1,3286	1,3273	1,3219	1,3124
35	—	1,1513	1,381	1,3373	1,3928	1,311	1,4049	1,4010	1,3967	1,3822
40	1,1709	1,1764	1,457	1,3957	1,4734	1,365	1,4902	1,4833	1,4801	1,4590
45	1,1948	1,2025	1,541	—	—	1,422	—	1,5748	1,5726	1,5438
50	1,2204	1,2296	1,635	—	—	—	—	1,6762	—	1,6356
60	1,2738	1,2865	—	—	—	—	—	—	—	—

Продолжение табл. 5.8

Концентрация, вес. %	$FeSO_4$, 18°C	H_3AsO_4, 15°C	HBr, 20°C	HCOOH, 20°C	$H_2C_4H_4O_6$, 15°C	HCl, 20°C	HClO, 15°C	HF, 20°C	HI, 20°C	HIO_3, 18°C
1	1,0085	1,0057	1,0053	1,0019	1,0045	1,0032	1,0050	—	1,0054	1,0071
2	1,0180	1,0124	1,0124	1,0044	1,0090	1,0082	1,0109	—	1,0127	1,0157
4	1,0375	1,0260	1,0269	1,0093	1,0179	1,0181	1,0228	—	1,0277	1,0334
6	1,0575	1,0398	1,0417	1,0141	1,0273	1,0279	1,0348	—	1,0431	1,0517
8	1,0785	1,0538	1,0568	1,0196	1,0371	1,0376	1,0471	—	1,0589	1,0706
10	1,1000	1,0681	1,0723	1,0246	1,0469	1,0474	1,0597	1,035	1,0751	1,0900
12	1,1220	1,0826	1,0883	1,0296	1,0565	1,0574	1,0726	—	1,0918	1,1100
14	1,1445	1,0975	1,1048	1,0345	1,0661	1,0675	1,0859	—	1,1091	1,1306
16	1,1675	1,1128	1,1219	1,0393	1,0761	1,0776	1,0995	—	1,1270	1,1519
18	1,1905	1,1285	1,1369	1,0441	1,0865	1,0878	1,1135	—	1,1456	1,1740
20	1,2135	1,1447	1,1579	1,0488	1,0969	1,0980	1,1279	1,070	1,1649	1,1969
22	—	1,1614	1,1767	1,0537	1,1072	1,1083	1,1428	—	1,1850	1,2206
24	—	1,1785	1,1961	1,0585	1,1175	1,1187	1,1581	—	1,2059	1,2450
26	—	1,1961	1,2161	1,0633	1,1282	1,1290	1,1738	—	1,2277	1,2700
28	—	1,2143	1,2367	1,0681	1,1393	1,1392	1,1900	—	1,2503	1,2956
30	—	1,2331	1,2580	1,0729	1,1505	1,1493	1,2067	1,101	1,2737	1,3218
35	—	1,2829	1,3150	1,0847	—	—	—	1,116	1,3357	1,3900
40	—	1,3370	1,3772	1,0963	1,2078	1,1980	1,2991	1,130	1,4029	1,4640
45	—	1,3959	1,4446	1,1085	—	—	1,3521	1,143	1,4755	—
50	—	1,4602	1,5173	1,1207	1,2696	—	1,4103	1,155	—	—
55	—	1,5304	1,5953	1,1320	1,3027	—	1,4733	—	—	—
60	—	1,6070	1,6787	1,1424	—	—	1,5389	—	—	—
65	—	1,6904	1,7675	1,1543	—	—	1,6059	—	—	—
70	—	—	—	1,1655	—	—	1,6736	—	—	—

Продолжение табл. 5.8

Концентрация, вес. %	HNO_3, 20°C	H_2O_2, 18°C	H_3PO_4, 20°C	H_2SO_4, 20°C	H_2SeO_4, 20°C	H_2SiF_6, 17,5°C	KBr, 20°C	K_2CO_3, 20°C	$KC_2H_3O_2$, 18°C	$K_2C_4H_4O_6$, 20°C
1	1,0036	1,0022	1,0038	1,0051	1,0050	1,0080	1,0054	1,0072	1,0038	1,0048
2	1,0091	1,0058	1,0092	1,0118	1,0136	1,0161	1,0127	1,0163	1,0089	1,0114
4	1,0201	1,0131	1,0200	1,0250	1,0291	1,0324	1,0275	1,0345	1,0191	1,0248
6	1,0312	1,0204	1,0309	1,0385	1,0447	1,0491	1,0426	1,0529	1,0293	1,0383
8	1,0427	1,0277	1,0420	1,0522	1,0605	1,0661	1,0581	1,0715	1,0395	1,0519
10	1,0543	1,0351	1,0532	1,0661	1,0766	1,0834	1,0740	1,0904	1,0497	1,0657
12	1,0661	1,0425	1,0647	1,0802	1,0931	1,1011	1,0903	1,1096	1,0599	1,0798
14	1,0781	1,0499	1,0764	1,0947	1,1101	1,1190	1,1070	1,1291	1,0703	1,0941
16	1,0903	1,0574	1,0884	1,1094	1,1276	1,1373	1,1242	1,1490	1,0808	1,1087
18	1,1026	1,0649	1,1008	1,1243	1,1455	1,1559	1,1419	1,1692	1,0914	1,1236
20	1,1150	1,0725	1,1134	1,1394	1,1639	1,1748	1,1591	1,1898	1,1022	1,1387
22	1,1276	1,0802	1,1263	1,1548	1,1829	1,1941	1,1788	1,2107	1,1131	1,1540
24	1,1404	1,0880	1,1395	1,1704	1,2026	1,2136	1,1980	1,2320	1,1241	1,1696
26	1,1534	1,0959	1,1529	1,1862	1,2229	1,2335	1,2178	1,2536	1,1353	1,1855
28	1,1666	1,1040	1,1665	1,2023	1,2438	1,2537	1,2383	1,2756	1,1466	1,2017
30	1,1800	1,1122	1,1805	1,2185	1,2653	1,2742	1,2593	1,2979	1,1579	1,2181
35	1,2140	1,1327	1,216	1,2599	—	—	1,3147	1,3548	1,1868	1,2606
40	1,2463	1,1536	1,254	1,3028	1,3819	—	1,3746	1,4141	1,2162	1,3051
45	1,2783	1,1749	1,293	1,3476	—	—	—	1,4759	1,2465	1,3516
50	1,3100	1,1966	1,335	1,3951	1,5186	—	—	1,5104	1,2761	1,4001
55	1,3393	1,2188	1,379	1,4453	—	—	—	—	1,3065	—
60	1,3667	1,2416	1,426	1,4983	1,6850	—	—	—	1,3372	—
65	1,3913	1,2652	1,475	1,5533	—	—	—	—	—	—
70	1,4134	1,2897	1,526	1,6105	1,8870	—	—	—	—	—
75	1,4337	1,3149	1,579	1,6692	—	—	—	—	—	—
80	1,4521	1,3406	1,633	1,7272	2,1220	—	—	—	—	—
90	1,4826	—	1,746	1,8144	—	—	—	—	—	—
100	1,5129	—	1,870	1,8305	—	—	—	—	—	—

Продолжение табл. 5.8

Концентрация, вес. %	KCl, 20°C	K_2CrO_4, 19,5°C	$K_2Cr_2O_7$, 20°C	$K_2Cr_2(SO_4)_4$, 15°C	KF, 18°C	$K_3Fe(CN)_6$, 20°C	$K_4Fe(CN)_6$, 20°C	$KHSO_4$, 20°C	KI, 20°C	KNO_3, 20°C
1	1,0046	1,0080	1,0052	1,007	1,0072	1,0034	1,0051	1,0051	1,0055	1,0045
2	1,0110	1,0161	1,0122	1,016	1,0159	1,0090	1,0119	1,0120	1,0130	1,0108
4	1,0239	1,0325	1,0264	1,034	1,0334	1,0201	1,0256	1,0260	1,0281	1,0234
6	1,0369	1,0492	1,0408	1,052	1,0512	1,0314	1,0395	1,0403	1,0437	1,0363
8	1,0500	1,0663	1,0554	1,070	1,0693	1,0427	1,0536	1,0549	1,0597	1,0494
10	1,0633	1,0837	1,0703	1,089	1,0877	1,0542	1,0678	1,0698	1,0761	1,0627
12	1,0768	1,1014	—	1,109	1,1064	1,0656	1,0823	1,0850	1,0930	1,0762
14	1,0905	1,1195	—	1,129	1,1254	1,0774	1,0971	1,1004	1,1104	1,0899
16	1,1043	1,1380	—	1,150	1,1448	1,0890	1,1120	1,1161	1,1284	1,1039
18	1,1185	1,1570	—	1,171	1,1646	1,1010	—	—	1,1469	1,1181
20	1,1328	1,1765	—	1,193	1,1847	1,1130	—	—	1,1660	1,1326
22	1,1474	1,1964	—	1,216	1,2052	—	—	—	1,1857	1,1473
24	1,1623	1,2169	—	1,239	1,2260	—	—	—	1,2060	1,1623
26	—	1,2379	—	1,263	1,2471	—	—	—	1,2270	—
35	—	1,3386	—	1,383	—	—	—	—	1,3308	—

Продолжение табл. 5.8

Концентрация, вес. %	NaBr, 20°C	$NaBrO_3$, 18°C	$NaC_2H_3O_2$, 20°C	Na_2CO_3, 20°C	NaCl, 20°C	$NaClO_4$, 18°C	$Na_2Cr_2O_7$, 15°C	$NaKC_4H_4O_6$, 20°C	$NaNO_3$, 20°C	NaOH, 20°C
1	1,0060	1,0064	1,0033	1,0052	1,0086	1,0051	1,006	1,0049	1,0049	1,0095
2	1,0139	1,0143	1,0084	1,0123	1,0190	1,0116	1,013	1,0116	1,0117	1,0207
4	1,0298	1,0305	1,0186	1,0266	1,0398	1,0247	1,027	1,0252	1,0254	1,0428
6	1,0462	1,0471	1,0289	1,0410	1,0606	1,0381	1,041	1,0390	1,0392	1,0648
8	1,0631	1,0641	1,0392	1,0555	1,0816	1,0517	1,056	1,0530	1,0532	1,0869
10	1,0803	1,0816	1,0495	1,0702	1,1029	1,0656	1,070	1,0673	1,0674	1,1089
12	1,0981	1,0996	1,0598	1,0851	1,1244	1,0798	1,084	1,0818	1,0819	1,1309
14	1,1164	1,1182	1,0702	1,1002	1,1463	1,0943	1,098	1,0965	1,0967	1,1530
16	1,1352	1,1373	1,0807	1,1150	—	1,1090	1,112	1,1114	1,1118	1,1751
18	1,1546	1,1569	1,0913	1,1313	—	1,1241	1,126	1,1265	1,1272	1,1972
20	1,1745	1,1771	1,1021	1,1471	—	1,1396	1,140	1,1419	1,1429	1,2191
22	1,1951	1,1979	1,1130	1,1630	—	1,1554	1,153	1,1576	1,1589	1,2411
24	1,2163	1,2193	1,1240	1,1797	—	1,1717	1,166	1,1735	1,1752	1,2629
26	1,2382	—	1,1351	1,1963	—	1,1883	1,159	1,1896	1,1917	1,2848
28	1,2608	—	1,1462	—	—	1,2053	1,193	1,2059	1,2085	1,3068
30	1,2841	—	—	—	—	1,2227	1,207	1,2225	1,2256	1,3279
35	1,3462	—	—	—	—	1,2685	1,244	1,2654	1,2701	1,3798
40	1,4138	—	—	—	—	—	1,279	—	1,3175	1,4300
45	—	—	—	—	—	—	1,312	—	1,3683	—

Продолжение табл. 5.8

Концентрация, вес. %	$NaHSO_3$, 15,6°C	Na_2SO_3, 19°C	Na_2SO_4, 15°C	$Na_2S_2O_3$, 20°C	$NiCl_2$, 20°C	$Ni(NO_3)_2$, 20°C	$NiSO_4$ 18°C	$Pb(C_2H_3O_2)_2$, 18°C	$Pb(NO_3)_2$, 18°C	SO_2, 15,6°C
1	1,0069	1,0078	1,0073	1,0065	1,008	1,007	1,009	1,0061	1,0074	1,0069
2	1,0140	1,0172	1,0164	1,0148	1,018	1,015	1,020	1,0137	1,0163	1,0140
4	1,0284	1,0363	1,0348	1,0315	1,037	1,033	1,042	1,0290	1,0344	1,0284
6	1,0432	1,0556	1,0535	1,0483	1,057	1,050	1,063	1,0446	1,0529	1,0432
8	1,0584	1,0751	1,0724	1,0654	1,078	1,069	1,085	1,0605	1,0720	1,0584
10	1,0741	1,0948	1,0915	1,0827	1,009	1,088	1,109	1,0768	1,0918	1,0741
12	1,0902	1,1146	1,1109	1,1003	1,121	1,107	1,133	1,0936	0,1123	1,0902
14	1,1069	1,1346	1,1306	1,1182	1,143	1,127	1,158	1,1109	1,1336	1,1069
16	1,1240	1,1549	1,1506	1,1365	1,167	1,148	1,183	1,1283	1,1557	1,1240
18	1,1417	1,1755	1,1709	1,1551	1,191	1,169	1,209	1,1473	1,1789	1,1417
20	1,1600	—	1,1915	1,1740	1,215	1,191	—	1,1663	1,2030	1,1600
22	1,1789	—	1,2124	1,1932	—	—	—	1,1860	1,2277	1,1789
24	1,1983	—	1,2336	1,2128	—	—	—	1,2063	1,2529	1,1983
26	1,2185	—	—	1,2328	—	—	—	1,2273	1,2783	1,2185
28	1,2393	—	—	1,2532	—	—	—	1,2489	1,3037	1,2393
30	1,2609	—	—	1,2739	1,353	1,311	—	1,2711	1,3289	1,2609
35	1,3182	—	—	1,3273	—	1,377	—	1,3304	—	1,3182
40	—	—	—	1,3827	—	—	—	1,3994	—	—

Продолжение табл. 5.8

Концентрация, вес. %	$SnCl_2$, 15°C	$SnCl_4$, 15°C	$SrBr_2$, 20°C	SrI_2, 20°C	$ZnBr_2$, 20°C	$ZnCl_2$, 20°C	ZnI_2, 20°C	$Zn(NO_3)_2$, 18°C	$ZnSO_4$, 20°C	$Sr(NO_3)_2$, 20°C
1	1,0068	1,007	—	—	—	—	—	—	—	—
2	1,0146	1,015	1,0157	1,0154	1,0167	1,0167	1,016	1,0154	1,0190	1,0150
4	1,0306	1,031	1,0337	1,0331	1,0354	1,0350	1,034	1,0322	1,0403	1,0310
6	1,0470	1,047	1,0522	1,0513	1,0544	1,0532	1,053	1,0496	1,0620	1,0480
8	1,0638	1,064	1,0712	1,0701	1,0738	1,0715	1,072	1,0675	1,0842	1,0650
10	1,0810	1,081	1,0907	1,0896	1,0935	1,0819	1,091	1,0859	1,1071	1,0830
12	1,0986	1,099	1,1109	1,1099	1,1135	1,1085	1,111	1,1048	1,1308	1,1010
14	1,1167	1,117	1,1317	1,1308	1,1338	1,1275	1,131	1,1244	1,1553	1,1190
16	1,1353	1,135	1,1532	1,1526	1,1544	1,1468	1,152	1,1445	1,1806	1,1380
18	1,1545	1,154	1,1757	1,1753	1,1753	1,1665	1,174	1,1652	—	1,1580
20	1,1743	1,173	1,1992	1,1990	1,1965	1,1866	1,197	1,1865	—	1,179
25	—	—	1,2620	1,2608	1,2543	1,2380	1,258	1,2427	—	1,233
30	1,2837	1,278	1,3300	1,3295	1,3170	1,2928	1,325	1,3029	—	1,290
35	1,3461	1,337	1,4050	1,4058	1,3859	1,3522	1,398	1,3678	—	1,352
40	1,4145	1,403	1,4890	1,4904	1,4620	1,4173	1,478	1,4378	—	1,419
45	1,4897	1,475	1,5830	1,5844	1,5470	1,4890	1,566	1,5134	—	—
50	1,5729	1,555	1,6860	—	1,6430	1,5681	1,663	1,5944	—	—
55	1,6656	1,644	—	—	1,7500	1,655	1,770	—	—	—
60	1,7695	1,742	—	—	1,8690	1,749	1,893	—	—	—
65	1,8865	1,851	—	—	2,0020	1,851	2,036	—	—	—
70	—	1,971	—	—	—	1,962	2,202	—	—	—

Продолжение табл. 5.8

Концентрация, вес. %	KOH, 15°C	LiBr, 20°C	LiCl, 20°C	LiI, 20°C	$MgBr_2$, 20°C	$MgCl_2$, 20°C	MgI_2, 20°C	$Mg(NO_3)_2$, 20°C	$MgSO_4$, 20°C	$MnBr_2$, 18°C
1	1,0083	1,0055	1,0041	1,0056	—	—	—	—	—	1,0071
2	1,0175	1,0128	1,0099	1,0131	1,0151	1,0146	1,0149	1,0132	1,0186	1,0157
4	1,0359	1,0277	1,0215	1,0284	1,0324	1,0311	1,0321	1,0285	1,0392	1,0332
6	1,0544	1,0429	1,0330	1,0442	1,0501	1,0478	1,0498	1,0441	1,0602	1,0511
8	1,0730	1,0585	1,0444	1,0604	1,0683	1,0646	1,0680	1,0600	1,0816	1,0695
10	1,0918	1,0746	1,0559	1,0771	1,0871	1,0816	1,0869	1,0762	1,1034	1,0886
12	1,1108	1,0910	1,0675	1,0943	1,1065	1,0989	1,1065	1,0928	1,1256	1,1083
14	1,1299	1,1079	1,0792	1,1120	1,1265	1,1164	1,1268	1,1098	1,1484	1,1287
16	1,1493	1,1253	1,0910	1,1303	1,1471	1,1342	1,1478	1,1272	1,1717	1,1498
18	1,1688	1,1432	1,1029	1,1492	1,1683	1,1523	1,1695	1,1449	1,1955	1,1716
20	1,1884	1,1616	1,1150	1,1688	1,1903	1,1706	1,1920	1,1630	1,2198	1,1942
22	1,2083	1,1806	1,1274	1,1890	—	—	—	1,1815	1,2447	1,2176
24	1,2285	1,2002	1,1399	1,2099	—	—	—	1,2004	1,2701	1,2419
26	1,2489	1,2205	1,1527	1,2315	—	—	—	—	1,2961	1,2672
28	1,2695	1,2414	1,1658	1,2540	—	—	—	—	—	1,2934
30	1,2905	1,2629	1,1791	1,2772	1,3110	1,2688	1,3180	—	—	1,3206
35	1,3440	1,3204	—	1,3393	1,3790	—	1,3914	—	—	—
40	1,3991	1,3836	—	1,4078	1,452	—	1,4730	—	—	—
45	1,4558	1,4535	—	1,4840	1,532	—	—	—	—	—

Концентрация, вес. %	$MnCl_2$, 18°C	$M_n(NO_3)_2$, 18°C	$MnSO_4$, 20°C	NH_3, 20°C	N_2H_4, 15°C	$NH_4C_2H_3O_2$, 25°C	NH_4Cl, 20°C	NH_4I, 18°C	NH_4NO_3, 17,5°C	$(NH_4)_2SO_4$ 20°C
1	1,0069	1,0063	1,0080	0,9939	1,0002	0,9992	1,0013	1,0050	1,0042	1,0041
2	1,0153	1,0140	1,0178	0,9895	1,0013	1,0013	1,0045	1,0114	1,0085	1,0101
4	1,0324	1,0298	1,0378	0,9811	1,0034	1,0055	1,0107	1,0244	1,0170	1,0220
6	1,0498	1,0459	1,0583	0,9730	1,0056	1,0096	1,0168	1,0377	1,0255	1,0338
8	1,0676	1,0624	1,0794	0,9651	1,0077	1,0136	1,0227	1,0513	1,0340	1,0456
10	1,0859	1,0794	1,1012	0,9575	1,0099	1,0176	1,0286	1,0652	1,0425	1,0574
12	1,1046	1,0969	1,1236	0,9501	1,0121	1,0216	1,0344	1,0795	1,0512	1,0691
14	1,1238	1,1149	1,1467	0,9430	1,0143	1,0255	1,0401	1,0942	1,0599	1,0808
16	1,1435	1,1333	1,1705	0,9362	1,0164	1,0294	1,0457	1,1093	1,0686	1,0924
18	1,1638	1,1522	1,1950	0,9295	1,0186	1,0331	1,0512	1,1248	1,0773	1,1039
20	1,1846	1,1717	—	0,9229	1,0207	1,0368	1,0567	1,1407	1,0860	1,1154
22	1,2061	1,1918	—	0,9164	1,0228	1,0404	1,0621	1,1570	1,0950	1,1269
24	1,2283	1,2125	—	0,9101	1,0248	1,0439	1,0674	1,1737	1,1040	1,1383
26	1,2511	1,2338	—	0,9040	1,0267	1,0473	—	1,1908	1,1130	1,1496
28	1,2746	1,2557	—	0,8980	1,0286	1,0507	—	1,2084	1,1220	1,1609
30	1,2988	1,2781	—	0,8920	1,0305	1,0540	—	1,2265	1,1310	1,1721
35	—	—	—	—	1,0350	1,0618	—	1,2745	1,1550	1,2000
40	—	—	—	—	1,0380	1,0691	—	1,3264	1,1790	1,2277
45	—	—	—	0,849*	1,0420	1,0760	—	1,3823	1,2045	1,2552
50	—	—	—	0,832*	1,044	—	—	—	1,2300	1,2825
55	—	—	—	0,815*	1,046	—	—	—	1,2567	—
60	—	—	—	0,796*	1,047	—	—	—	1,2835	—

* При $t = 15°C$.

5.5. СПЛАВЫ

Таблица 5.9

Плотность сплавов, 10^3 кг/м^3 [1.2]

Сплав (состав, вес. %)	ρ
Бронза:	
оловяиистая (Cu; Sn)	8,6—9,3
фосфористая (92,5% Cu; 7% Sn; 0,5% P)	8,7—8,9
Дюралюминий (Cu; Mg; Si; Mn)	2,79
Инвар (63,8% Fe; 3,6% Ni; 0,2% C)	8,00
Константан (60% Cu; 40% Ni)	8,88
Латунь (66% Cu; 34% Zn)	8,4—8,7
Магналиум (90% Ac; 10% Mg)	2,50
Манганин (84% Cu; 12% Mn; 4% Ni)	8,5
Монель-металл (71% Ni; 27% Cu; 2% Fe)	8,9
Платинс-иридиевый сплав (90% Pt; 10% Ir)	21,62
Сплав Вуда (50% Bi; 12,5% Cd; 25% Pb; 12,5% Sn)	9,70
Сталь:	
катаная	7,85—8,0
литая	7,5—7,92

Таблица 5.10

Плотность веществ при 20°С, 10^3 кг/м³ [2]

Вещество	ρ
Дерево (сухое)	
Атласное	0,95
Бальза (пробковое)	0,11—0,14
Бамбук	0,31—0,40
Бук	0,70—0,90
Береза	0,51—0,77
Вишня	0,70—0,90
Гикори	0,60—0,93
Груша	0,61—0,73
Дуб	0,60—0,90
Ель канадская	0,48—0,70
Железное (бакаут)	1,17—1,33
Ива	0,40—0,60
Камедное	1,00
Кедр	0,49—0,57
Кизил	0,76
Клен	0,62—0,75
Красное (Гондурас)	0,66
Красное (Испания)	0,85
Липа	0,32—0,59
Можжевельник	0,56
Ольха	0,42—0,68
Ореховое	0,64—0,70
Остролист	0,76
Платан	0,40—0,60
Рожковое	0,67—0,71
Самшит	0,95—1,16
Сандаловое	0,91
Слива	0,66—0,78
Сосна:	
белая	0,55—0,50
обыкновенная	0,37—0,60
Тик:	
индийский	0,66—0,88
африканский	0,98
Тополь	0,35—0,5
Эбеновое (черное)	1,11—1,33
Эльм	0,54—0,60
Яблоня	0,66—0,84
Ясень	0,65—0,85
Минералы	
Агат	2,5—2,7
Алебастр:	
карбонатный	2,69—2,78
сульфатный	2,26—2,32
Алмаз	3,01—3,52
Альбит	2,62—2,65
Анортит	2,74—2,76
Асбест	2,0—2,8
Асбестовый сланец	1,8
Базальт	2,4—3,1
Берилл	2,69—2,70
Газовый уголь	1,88
Галенит	7,3—7,6
Гематит	4,9—5,3
Гипс	2,31—2,33
Глина	1,8—2,6
Гранат	3,15—4,3
Гранит	2,64—2,76
Доломит	2,84
Известняк	2,68—2,76
Известь гашеная	1,3—1,4
Кальцит	2,6—2,8
Кварц:	
плавленый	2,65
прозрачный	2,21
непрозрачный	2,07
Кокс	1,0—1,7
Копал	1,04—1,14
Корунд	3,9—4,0
Кремень	2,63
Магнетит	4,9—5,2
Малахит	3,7—4,1
Мел	1,9—2,8
Мрамор	2,6—2,84
Наждак	4,0
Опал	2,2
Песчаник	2,14—2,36
Пирит	4,95—5,1
Полевой шпат	2,55—2,75
Порфир	2,6—2,9
Роговая обманка	2,9—3,2
Серпантин	2,5—2,65
Сланец	2,6—3,3
Слюда:	
белая	2,76—3,00
обычная	2,6—3,2
черная	2,7—3,1
Соль каменная	2,18
Тальк	2,7—2,8
Топаз	3,5—3,6
Торф прессованный	0,84
Торианит (*R*)*	9,32—9,33
Торит (*R*)	4,5—5,4
Трогерит (*R*)	3,3
Турмалин	3,0—3,2
Уголь:	
антрацит	1,4—1,8
битумниозный	1,2—1,5
Уранит (*R*)	6,5—9,7
Уранит:	
кальциевый (*R*)	3,05—3,19
медный (*R*)	3,22—3,60
Флюорит	3,18
Другие вещества	
Асфальт	1,1—1,5
Бумага	0,7—1,15
Гуммиарабик	1,3—1,4
Гуммигут	1,2
Деготь, смола	1,02
Желатин	1,27
Камень мыльный	2,6—2,8
Камфара	0,99
Картон	0,69
Киноварь	8,12
Кирпич	1,4—2,2
Кожа сухая	0,86
Кость	1,7—2,0
Кость слоновая	1,83—1,92
Клей	1,27
Крахмал	1,53
Лед	0,917
Линолеум	1,18
Охра	3,5
Парафин	0,87—0,91
Пена морская	0,99—1,28
Пирекс	2,25
Пробка	0,22—0,26
Резина:	
мягкая	1,1
твердая	1,19
чистая	0,91—0,93
Сахар	1,59
Снег (рыхлый)	0,12
Скипидар	1,07
Стекло:	
обыкновенное	2,4—2,8
флинтглас	3,9—5,9
Сургуч	1,8
Уголь древесный:	
дубовый	0,57
сосновый	0,28—0,44
Фарфор	2,3—2,5
Фибра красная	1,45
Целлюлоид	1,4
Цемент затвердевший	2,7—3,0
Шлак	2,0—3,9
Эбонит	1,15
Янтарь	1,1
Каучук:	
чистый	0,906
технический	0,911
мягкий вулканизированный с 20% серы	0,923
Плексиглас	1,18
Шелк	1,56
Шерсть	1,61
Пемза	0,4

* (*R*) — радиоактивные минералы.

Продолжение табл. 5.10

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Handbook** of Chemistry and Physics. 33rd edition, Cleveland, Ohio s. a.
2. **Кэй Д., Лэби Т.** Справочник физика-экспериментатора. Пер. с англ. М., Изд-во иностр. лит., 1949.
3. **Кэй Д., Лэби Т.** Таблицы физических и химических постоянных. Пер. с англ. Под ред. К.П. Яковлева. М., Физматгиз, 1962.
4. **Handbook** of Chemistry and Physics, 35th edition.
5. **Фастовский В. Г.** Разделение газовых смесей. М., Гостехиздат, 1947.

ГЛАВА 6

СЖИМАЕМОСТЬ ВЕЩЕСТВ

Коэффициент сжимаемости есть доля уменьшения объема тела при увеличении давления на 1 *атм* (760 *мм рт. ст.*):

$$\chi = (1/V)\,(\delta V/\delta P),$$

где δV — изменение объема V при изменении давления на δP; температура при этом предполагается постоянной. Коэффициент сжимаемости изменяется с уменьшением температуры тела, а также с изменением давления, под которым оно находится:

$$\chi = \frac{A}{V(P + P_T)},$$

где A — функция, возрастающая с температурой; P — внешнее давление; P_T — давление Ван-дер-Ваальса при температуре T. Для твердых тел $\chi = 1/M$, где $M = E/[\rho\,(1 - 2\mu)]$ — модуль объемной деформации; E — модуль Юнга; ρ — плотность; μ — коэффициент Пуассона.

6.1. ГАЗЫ

В табл. 6.1 приведен относительный объем воздуха при различных давлениях и температурах. Объем при 0°С и 760 *мм рт. ст.* принят за 10^6 [1].

В табл. 6.2—6.15 приведены значения произведений PV, отнесенные к P_0V_0 при нормальных условиях [2].

Таблица 6.1

Упругие свойства воздуха

P, *атм*	0°С	99,4°С	200,4°С	P, *атм*	0°С	99,4°С	200,4°С
100	9730	—	—	600	2450	3180	3883
205	5050	7360	9430	700	2288	2904	3502
300	3658	5170	6622	800	2168	2699	3219
400	3036	4170	5240	900	2070	2544	3000
500	2680	3565	4422	1000	1992	2415	2828

Таблица 6.2

Отношение PV/P_0V_0 для азота N_2

P, *атм*	Температура, °С									
	—130	—100	—50	0	50	100	150	200	300	400
0	0,5243	0,6342	0,8173	1,0005	1,1836	1,3667	1,5499	1,7330	2,0993	2,4655
1	0,5208	0,6319	0,8162	1,0000	1,1836	1,3670	1,5503	1,7336	2,1000	2,4664
10	0,4873	0,6109	0,8059	0,9961	1,1837	1,3698	1,5551	1,7398	2,1084	2,4759
20	0,4466	0,5879	0,7951	0,9924	1,1842	1,3732	1,5606	1,7470	2,1177	2,4865
40	0,3487	0,5406	0,7757	0,9840	1,1866	1,3810	1,5724	1,7618	2,1367	2,5080
60	0,2482	0,4970	0,7596	0,9840	1,1908	1,3901	1,5851	1,7773	2,1560	2,5300
80	—	0,4631	0,7476	0,9838	1,1967	1,4005	1,5989	1,7935	2,1756	2,5523
100	—	0,4471	0,7407	0,9866	1,2044	1,4123	1,6136	1,8105	2,1956	2,5748
200	—	—	0,785	1,036	1,2692	1,990	1,700	1,912	2,313	2,697
400	—	—	1,033	1,237	1,483	1,704	1,920	2,146	2,551	2,945
600	—	—	1,316	1,525	1,741	1,957	2,171	2,396	2,804	3,198
800	—	—	1,593	1,799	2,009	2,221	2,432	2,656	3,062	3,459
1000	—	—	1,857	2,068	2,276	2,486	2,696	2,921	3,317	3,722

Таблица 6.3

Отношение PV/P_0V_0 для аммиака NH_3

P, *атм*	Температура, °С					P, *атм*	Температура, °С				
	100	150	200	250	300		100	150	200	250	300
0	1,3886	1,5747	1,7608	1,9468	2,1329	50	0,997	1,329	1,587	1,819	2,034
1	1,3805	1,5679	1,7546	1,9420	2,1276	60	—	1,274	1,551	1,793	2,016
10	1,323	1,527	1,725	1,919	2,110	70	—	1,215	1,514	1,768	1,997
20	1,254	1,481	1,691	1,892	2,091	80	—	—	1,477	1,742	1,978
30	1,179	1,433	1,657	1,869	2,071	90	—	—	1,438	1,716	1,960
40	1,005	1,383	1,622	1,843	2,053	100	—	—	—	1,690	1,942

Таблица 64

Отношение PV/P_0V_0 для аргона Ar

P, атм	Температура, °С							
	—100	—50	0	50	100	200	300	400
0	0,6345	0,8178	1,0010	1,1842	1,3674	1,7339	2,1003	2,4668
1	0,6316	0,8116	1,0000	1,1837	1,3673	1,7341	2,1008	2,4675
10	0,6048	0,8010	0,9914	1,1795	1,3658	1,7361	2,1054	2,4736
20	0,5730	0,7843	0,9823	1,1651	1,3644	1,7385	2,1105	2,4804
40	0,5029	0,7518	0,9653	1,1634	1,3625	1,7440	2,1211	2,4941
60	0,4237	0,7206	0,9503	1,1611	1,3619	1,7504	2,1321	2,5078
80	0,3340	0,6919	0,9327	1,1563	1,3625	1,7517	2,1434	2,5214
100	—	0,6669	0,9262	1,1529	1,3648	1,7659	2,1550	2,5351
150	—	—	—	—	1,3741	—	—	—
200	—	—	—	—	1,3915	—	—	—

Таблица 6.5

Отношение PV/P_0V_0 для водорода H_2

P, атм	Температура, °С										
	—207,9	—183	—150	—100	—50	0	50	100	200	300	400
0	0,2388	0,3299	0,4506	0,6335	0,8164	0,9994	1,1823	1,3652	1,7311	2,097	2,463
1	0,2373	0,3296	0,4507	0,6339	0,8170	1,0000	1,1830	1,3659	1,7318	2,097	2,463
10	0,2308	0,3278	0,4521	0,6377	0,8219	1,0056	1,1891	1,3721	1,7381	2,104	2,468
20	0,2238	0,3264	0,4540	0,6420	0,8274	1,0119	1,1959	1,3791	1,7451	2,111	2,473
40	0,2134	0,3261	0,4591	0,6513	0,8388	1,0247	1,2094	1,3930	1,7591	2,126	2,484
60	0,2126	0,3288	0,4657	0,6612	0,8506	1,0376	1,2229	1,4069	1,7731	2,141	2,495
80	0,2186	0,3345	0,4739	0,6719	0,8628	1,0508	1,2364	1,4210	1,7872	2,156	2,505
100	—	0,3433	0,4938	0,6833	0,8754	1,0641	1,2500	1,4352	1,8012	2,171	2,516
200	—	—	—	—	0,941	1,133	1,320	1,507	1,885	2,251	2,608
400	—	—	—	—	1,083	1,276	1,464	1,651	2,034	2,398	2,765
600	—	—	—	—	1,230	1,422	1,608	1,796	2,177	2,540	—
800	—	—	—	—	1,376	1,567	1,751	1,938	2,320	2,677	—
1000	—	—	—	—	1,519	1,709	1,892	2,078	2,461	2,813	—

Таблица 6.6

Отношение PV/P_0V_0 для гелия He

P,атм	Температура, °С								
	—252,8	—208	—183	—150	—100	—50	0	50	100
0	0,0745	0,2384	0,3299	0,4506	0,6336	0,8165	0,9995	1,1824	1,3654
1	0,0745	0,2389	0,3305	0,4512	0,6342	0,8171	1,0000	1,1829	1,3658
10	0,0744	0,2428	0,3348	0,4558	0,6390	0,8219	1,0047	1,1876	1,3704
50	0,0891	0,2621	0,3547	0,4768	0,6606	0,8434	1,0257	1,2086	1,3907
100	0,1206	0,2880	0,3816	0,5042	0,6884	0,8707	1,0519	1,2348	1,4161

Продолжение табл. 6.6

P, атм	Температура, °С			P, атм	Температура, °С					
	200	300	400		—70	—35	0	50	100	200
0	1,7313	2,0972	2,4631	200	0,8490	0,9759	1,1036	1,2859	1,4660	1,8283
1	1,7317	2,0975	2,4633	400	0,9491	1,0769	1,2026	1,3848	1,5635	1,9179
10	1,7361	2,1017	2,4674	600	1,0481	1,1744	1,3003	1,4768	1,6553	2,0152
50	1,7559	2,1204	2,4855	800	1,1417	1,2682	1,3924	1,5706	1,7481	2,0983
100	1,7805	2,1439	2,5081	1000	—	—	1,4838	1,6602	1,8359	2,1880

Таблица 6.7

Отношение PV/P_0V_0 для двуокиси углерода CO_2

P, атм	Температура, °С											
	0	10	20	30	40	50	60	80	100	137	198	258
0	1,0068	1,0437	1,0805	1,1174	1,1543	1,1911	1,2280	1,3017	1,3754	1,5118	1,7366	1,9758
50	0,105	0,115	0,680	0,775	0,850	0,920	0,984	1,096	1,207	1,380	1,633	1,893
75	0,153	0,163	0,180	0,219	0,620	0,747	0,841	0,988	1,118	1,318	1,615	1,867
100	0,202	0,213	0,229	0,255	0,309	0,491	0,661	0,873	1,030	1,259	1,582	1,847
150	0,295	0,309	0,326	0,346	0,377	0,419	0,485	0,681	0,878	1,158	1,530	1,818
200	0,385	0,401	0,419	0,440	0,468	0,500	0,543	0,660	0,815	1,096	1,496	1,804
300	0,560	0,578	0,599	0,623	0,649	0,677	0,710	0,790	0,890	1,108	1,494	1,820
400	0,728	0,748	0,771	0,795	0,823	0,852	0,884	0,956	1,039	1,218	1,563	1,883
500	0,991	0,913	0,938	0,963	0,990	1,021	1,054	1,124	1,200	1,362	1,678	—
600	1,050	1,073	1,100	1,128	1,157	1,187	1,219	1,290	1,366	1,518	1,812	—
700	1,206	1,232	1,259	1,289	1,319	1,350	1,383	1,454	1,528	1,676	1,956	—
800	1,358	1,387	1,417	1,448	1,479	1,510	1,544	1,614	1,689	1,836	2,108	—
900	1,509	1,539	1,569	1,633	1,633	1,665	1,700	1,771	1,846	1,994	2,260	—
1000	1,656	1,685	1,716	1,780	1,780	1,814	1,848	1,921	1,999	—	—	—

Таблица 6.8

Отношение PV/P_0V_0 для кислорода O_2

P, атм	Температура, °С						P, атм	Температура, °С					
	0	15,6	50	100	199,5	200		0	15,6	50	100	199,5	200
0	1,0010	—	1,1842	1,3674	—	—	700	1,39	1,4515	—	1,83	2,2415	2,24
1	1,0000	—	1,1837	1,3672	—	—	800	1,50	1,566	—	1,93	2,343	2,34
10	0,991	—	1,180	1,366	—	—	1000	1,74	1,798	—	2,15	—	—
20	0,982	—	1,175	1,365	—	—	1200	1,9620	2,0268	—	—	—	—
40	0,965	—	1,167	1,363	—	—	1400	2,1798	2,247	—	—	—	—
60	0,949	—	1,161	1,363	—	—	1600	2,396	2,464	—	—	—	—
80	0,936	—	1,156	1,363	—	—	1800	2,6073	2,6793	—	—	—	—
100	0,923	1,0045	1,152	1,365	—	—	2000	2,816	2,888	—	—	—	—
200	0,91	0,9945	—	1,40	1,189	1,82	2200	3,0217	3,0932	—	—	—	—
300	0,96	1,042	—	1,45	1,885	1,89	2400	3,2244	3,2976	—	—	—	—
400	1,05	1,125	—	1,53	1,961	1,96	2600	3,4229	3,4996	—	—	—	—
500	1,16	1,227	—	1,62	2,05	2,05	2800	3,6176	3,6946	—	—	—	—
600	1,27	1,337	—	1,72	2,142	2,14	3000	—	3,888	—	—	—	—

Таблица 6.9

Отношение PV/P_0V_0 для криптона Кг

P, атм	При температуре 11,2°С	P, атм	При температуре 11,2°С	P, атм	При температуре 273,3°С
25,88	1,012	53,72	0,937	50,93	1,882
27,91	1,008	57,81	0,918	54,82	1,880
30,31	1,000	63,07	0,901	59,36	1,874
33,15	0,993	69,46	0,884	65,12	1,868
36,60	0,980	72,10	0,863	71,20	1,862
40,89	0,968	87,39	0,841	79,25	1,859
46,29	0,953	101,74	0,821	89,53	1,856
49,58	0,940	—	—	104,09	1,877

Таблица 6.10

Отношение PV/P_0V_0 для ксенона Хе

P, атм	При температуре 11,2°С	P, атм	При температуре 11,2°С	P, атм	При температуре 237,3°С
25,65	0,697	36,39	0,628	53,53	1,397
26,62	0,691	38,42	0,612	57,97	1,389
27,68	0,685	40,69	0,598	63,21	1,377
28,79	0,677	43,24	0,576	69,62	1,375
30,07	0,670	46,22	0,552	77,54	1,359
31,40	0,659	49,39	0,522	88,15	1,354
32,92	0,650	53,20	0,537	102,55	1,357
34,57	0,640	—	—	—	—

Таблица 6.11

Отношение PV/P_0V_0 для неона Ne

P, атм	Температура, °С										
	—207,9	—182,5	—150	—100	—50	0	50	100	200	300	400
0	0,2388	0,3317	0,4506	0,6336	0,8166	0,9995	1,1825	1,3654	1,7313	2,0973	2,4632
1	0,2380	0,3315	0,4507	0,6340	0,8170	1,0000	1,1830	1,3659	1,7318	2,0977	2,4636
10	0,2300	0,328	0,451	0,637	0,821	1,0044	1,1879	1,3710	1,7371	2,1033	2,4691
50	0,196	0,319	0,454	0,649	0,838	1,024	1,209	1,394	1,761	2,128	2,494
100	0,185	0,318	0,465	0,667	0,861	1,050	1,236	1,422	1,791	2,158	2,524
150	—	—	—	—	—	1,077	1,264	1,452	—	—	—
200	—	—	—	—	—	1,105	1,293	1,481	—	—	—

Таблица 6.12

Отношение PV/P_0V_0 для окиси азота NO

P, атм	Температура, °С								
	—70	—50	—25	0	25	50	100	150	200
0	0,744	0,817	0,909	1,0007	1,092	1,184	1,367	1,550	1,733
1	0,743	0,816	0,908	1,000	1,092	1,184	1,367	1,550	1,734
25	0,703	0,790	0,894	0,989	1,087	1,182	1,375	1,570	1,758
50	0,664	0,762	0,877	0,979	1,083	1,183	1,384	1,582	1,776
75	0,632	0,739	0,863	0,973	1,083	1,188	1,395	1,598	1,795
100	0,615	0,726	0,859	0,972	1,084	1,195	1,406	1,615	1,815
150	0,619	0,730	0,866	0,987	1,108	1,219	1,439	1,654	1,860
200	0,663	0,766	0,902	1,015	1,138	1,256	1,479	1,699	1,909
300	0,796	0,877	1,009	1,113	1,234	1,352	1,580	1,805	2,018
400	0,943	1,028	1,140	1,242	1,356	1,472	1,696	1,918	2,138
600	1,239	1,322	1,428	1,524	1,625	1,738	1,956	2,176	2,392
800	1,524	1,610	1,715	1,806	1,990	2,014	2,224	2,444	2,660
1000	1,799	1,687	1,994	2,083	2,186	2,283	2,494	2,714	2,926

Таблица 6.13

Отношение PV/P_0V_0 для метана CH_4

P, атм	Температура, °С								
	—70	—50	—25	0	25	50	100	150	200
0	0,7455	0,8189	0,9106	1,0024	1,0942	1,1859	1,3694	1,5529	1,7365
1	0,7410	0,8150	0,9075	1,0000	1,0922	1,1845	1,3686	1,5525	1,7363
20	0,647	0,740	0,849	0,954	1,056	1,156	1,351	1,543	—
40	0,524	0,655	0,787	0,907	1,020	1,128	1,335	1,536	—
60	0,337	0,555	0,724	0,861	0,986	1,102	1,321	1,530	—
80	0,256	0,460	0,665	0,819	0,955	1,080	1,310	1,526	—
100	0,281	0,409	0,417	0,784	0,930	1,062	1,302	1,524	—
120	0,318	0,410	0,588	0,758	0,910	1,048	1,296	1,525	—
140	0,354	0,430	0,580	0,743	0,898	1,039	1,294	1,527	—
160	0,392	0,460	0,589	0,740	0,893	1,035	1,295	1,532	—
180	0,429	0,429	0,608	0,746	0,894	1,036	1,298	1,539	—
200	0,466	0,527	0,632	0,761	0,903	1,043	1,305	1,548	—
300	0,646	0,703	0,788	0,889	1,006	1,129	1,379	1,623	—
400	0,819	0,875	0,956	1,049	1,150	1,261	1,493	1,727	—
500	0,987	1,043	1,122	1,209	1,306	1,411	1,628	1,854	—
600	1,149	1,207	1,286	1,371	1,466	1,565	1,773	1,994	—
800	1,463	1,525	1,605	1,689	1,780	1,878	2,074	2,283	—
1000	1,766	1,829	1,911	2,000	2,089	2,185	2,376	2,580	—

Таблица 6.14

Отношение PV/P_0V_0 для этана C_2H_6

P, атм	Температура, °С					
	25	50	100	150	200	250
0	1,1044	1,1970	1,3822	1,5674	1,7526	1,9378
10	1,012	1,118	1,325	1,524	1,713	1,911
20	0,909	1,040	1,269	1,482	1,682	1,885
30	0,784	0,950	1,214	1,444	1,656	1,864
40	0,586	0,848	1,158	1,406	1,633	1,843
60	—	0,557	1,040	1,334	1,583	1,809
80	—	—	0,926	1,267	1,541	1,782
100	—	—	—	1,209	1,505	1,760

Таблица 6.15

Отношение PV/P_0V_0 для этилена C_2H_4

P, атм	Температура, °С							
	0	20	40	60	80	100	137,5	198,5
0	1,0073	1,081	1,155	1,229	1,302	1,376	1,514	1,739
50	0,176	0,629	0,814	0,954	1,077	1,192	1,374	1,652
100	0,310	0,360	0,470	0,668	0,846	1,005	1,247	1,580
150	0,441	0,485	0,550	0,649	0,776	0,924	1,178	1,540
200	0,565	0,610	0,669	0,744	0,838	0,946	1,174	1,537
300	0,806	0,852	0,908	0,972	1,048	1,133	1,310	1,628
400	1,036	1,084	1,140	1,202	1,272	1,356	1,510	1,790
500	1,255	1,307	1,367	1,431	1,500	1,577	1,721	1,985
600	1,472	1,525	1,586	1,652	1,721	1,795	1,938	2,191
700	1,683	1,737	1,799	1,867	1,936	2,011	2,153	2,399
800	1,888	1,946	2,010	2,077	2,179	2,294	2,368	2,606
900	2,090	2,153	2,217	2,286	2,359	2,434	2,585	2,810
1000	2,289	2,356	2,421	2,492	2,566	2,642	2,798	—

6.2. ЖИДКОСТИ

Таблица 6.16

Средний коэффициент сжимаемости воды χ, 10^{-6} $атм^{-1}$ [2]

Интервал давлений P_1—P_2, атм	Температура, °С												
	0	5	10	15	20	30	40	50	60	70	80	90	100
1—25	52,5	—	50,0	—	49,1	—	—	—	—	—	—	—	—
25—50	51,6	—	49,2	—	47,6	—	—	—	—	—	—	—	—
1—100	51,1	49,3	48,3	47,3	46,8	46,0	44,9	44,9	45,5	46,2	—	47,8	—
100—200	49,2	47,5	46,1	45,1	44,2	43,6	42,9	42,5	42,7	43,9	—	46,8	80,7
200—300	48,0	46,2	45,3	44,3	43,4	42,9	41,4	41,3	41,5	42,5	43,6	45,9	76,9
300—400	46,6	44,9	44,1	43,3	42,4	41,4	40,7	40,2	40,6	41,1	42,2	44,6	73,1
400—500	45,5	44,4	43,0	42,2	41,5	40,7	40,4	39,9	39,4	39,8	40,8	43,4	68,2
500—600	43,8	43,0	41,8	41,1	40,4	39,2	39,0	39,0	38,8	39,1	39,9	41,6	66,0
600—700	42,9	40,9	40,5	39,8	39,4	38,7	38,2	37,7	38,3	38,0	38,7	40,7	62,7
700—800	41,8	40,7	39,8	39,0	38,8	37,5	37,4	37,1	36,9	37,4	37,8	38,9	61,3
800—900	40,6	39,3	38,9	38,0	37,3	36,8	36,2	36,2	36,3	36,6	36,8	38,2	58,9
900—1000	—	—	—	36,8	36,5	36,0	35,3	35,3	36,0	36,1	36,2	37,1	56,5

Таблица 6.17

Средний коэффициент сжимаемости жидкостей [1—4]

Название	Формула	Давление, *атм*	Температура, °С	χ, 10^{-6} *атм*$^{-1}$
Анилин	$C_6H_5NH_2$	85,5	25	43,2
		181,5	25	40,5
		281,5	25	38,3
		390	25	36,1
Ацетон	$(CH_3)_2CO$	1—500	0	82
		500—1000	0	59
		1000—1500	0	47
		1500—2000	0	40
		8,9—36,5	14,2	111
		8,9—36,5	99,5	276
Бензол	C_6H_6	0,14—18	12,9	87
		1—4	15,4	87
		2—8	34,9	100
		4,5—19	99,9	190
		98,7—296	20	78,7
		296—494	20	67,5
		8	17,9	91,9
Бромоформ	$CHBr_3$	0—98,7	20	51,0
		98,7—197,4	20	47,5
		197,4—296	20	44,0
		296—395	20	42,0
		395—494	20	41,0
Гексан	$CH_3(CH_2)_4CH_3$	0—1	23	159
Гептан	$CH_3(CH_2)_3CH_3$	0—1	23	134
Глицерин	$CHOH(CH_2OH)_2$	1—10	14,8	22,1
			20,5	25,1
Декан	$CH_3(CH_2)_8CH_3$	0—1	23	105
Дифениламин	$(C_6H_5)_2NH$	0—500	65	57
		0—300	100	64
		0—100	185	110
Керосин		—	16,5	69,6
Кислота:				
капроновая	$C_5H_{11}COOH$	20—400	30	68
		20—100	65	90
		20—200	100	109
пальмитиновая	$C_{15}H_{31}COOH$	20—100	65	90
		20—300	185	134
		20—400	310	220
серная	H_2SO_4	1—16	0	302,5
уксусная	CH_3COOH	92,5	25	81,4
		218,5	25	72,6
		494	25	57,1
Кумол (изопропилбензол)	$C_6H_5CH(CH_3)_2$	98,7—296	20	71,3
		296—494	20	61,2
Масло:				
прованское	—	—	20,5	63,28
парафиновое	—	—	14,8	62,67
оливковое	—	—	20	63
Мезэтилен (1,3,5-триметилбензол)	$C_6H_3(CH_3)_3$	98,7—296	20	68,4
		296—494	20	59,1
Нитробензол	$C_6H_5NO_2$	86,5	25	46,1
		192	25	43,0
		303	25	40,1
		419	25	38,1
Октан	$CH_3(CH_2)_6CH_3$	0—1	23	121
		20—100	64	83
		20—400	100	24
		20—400	185	137
		20—400	310	236
Пентан	$CH_3(CH_2)_3CH_3$	1—29	0	174
		1—29	20	242
		0	0	175,9
		484	0	94,6
		967	0	68,9
Пропилбензол	$C_6H_5C_3H_7$	98,7—296	20	70,7
		296—494	20	61,0

Название	Формула	Давление, *атм*	Температура, °С	$10^{-6}\ \gamma$, $атм^{-1}$
Псевдонумол (1,2,4-триметилбензол)	$C_6H_3(CH_3)_3$	98,7—296	20	65,2
		296—494	20	56,9
Сероуглерод	CS_2	1—2	20	80,95
		1—500	0	66
		500—1000	0	53
		1000—1500	0	43
		1500—2000	0	37
		2000—2500	0	33
Спирт:				
аллиловый	$CH_2=CHCH_2OH$	1—500	9,6	69
		500—1000	9,6	51
		1000—1500	9,6	43
		1500—2000	9,6	36
амиловый	$C_4H_9CH_2OH$	8	17,7	90,5
бутиловый	$CH_3(CH_2)_2CH_2OH$	8	17,95	98
изопропиловый	$(CH_3)_2CHOH$	8	5,6	89,5
		8	17,85	103
метиловый	CH_3OH	1—500	0	79,4
		500—1000	0	58,3
		1000—1500	0	47
		1500—2000	0	40
		2000—2500	0	29
		8,5—37,1	14,7	104
		8,7—37,3	100	221
пропиловый	$C_2H_5CH_2OH$	1—500	0	69
		500—1000	0	52
		1000—1500	0	42
		2500—3000	0	27
этиловый	CH_3CH_2OH	1—50	0	96
		100—200	0	85
		300—400	0	73
		500—600	0	64
		600—700	0	60
		900—1000	0	52
		1—50	20	112
		50—100	20	102
		100—200	20	95
		200—300	20	86
		300—400	20	80
		400—500	20	73
		500—600	20	69
		150—400	28	81
		1—50	40	125
		150—400	65	100
		150—400	100	132
		150—400	185	245
		150—400	310	1530
Тимол (5-метил-2-изопропилфенол)	C_3H_2, CH_3, C_6H_3OH	200—100	64	69
		20—400	64	66
		20—400	100	80
		20—400	310	268
n-Толуидин	$CH_3C_6H_2NH_2$	1—150	45	51,2
		20—100	28	56
		20—400	100	77
		20—400	185	112
		20—400	310	243
Углерод четыреххлористый	CCl_4	1—5,25	10	70
		0—98,7	20	91,6
		98,7—197,4	20	89,9
		197,4—296	20	83,5
		296—396	20	75,5
		395—494	20	69,9
		542,5	20	62,5
		664	20	55,0

Название	Формула	Давление, *атм*	Температура, °С	χ, 10^{-6} $атм^{-1}$
Углерода двуокись	CO_2	60	13	1740
		70	13	960
		80	13	660
		90	13	440
Фторбензол	C_6H_5F	1—18,5	13,9	87,7
Хлорбензол	C_6H_5Cl	0,4—18	13,3	67
		0,4—18	35	77
		1—2	80	108,4
		0,4—18	100	127
Хлороформ	$CHCl_3$	1—2	0	87,27
		0—98,7	20	94,9
		98,7—197,4	20	89,8
		197,4—296,1	20	80,1
		296,1—395	20	72,9
		395—494	20	67,8
		1—2	60	139,13
		8—9	100	211
		19—34	100	206
Этил:				
бромистый	C_2H_5Br	1—500	10,1	80
		500—1000	10,1	63
		1000—1500	10,1	50
		2000—2500	10,1	36
		1—18,5	13,7	113,4
иодистый	C_2H_5I	1—500	10,6	74
		500—1000	10,6	56
		1000—1500	10,6	46
		1500—2000	10,6	38
		2000—2500	10,6	34
хлористый	C_2H_5Cl	1—500	0	103
		500—1000	0	69
		1000—1500	0	55
		2000—2500	0	39
		8,7—37,22	15,2	153
		12,77—34,47	99	465
Этилен:				
бромистый	$C_2H_4Br_2$	1—5,25	10	55,8
		1—5,25	64	76,6
хлористый	$C_2H_4Cl_2$	1—5,25	10	67,7
		1—5,25	75	111,1
Эфирбензол:				
побутиловый (бутилбензоат)	$C_6H_5COOC_4H_9$	1—5,25	10	59
валерианобутиловый (бутилвалериат)	$C_4H_9COOC_4H_9$	1—5,25	10	92
валерианометиловый (метилвалериат)	$C_4H_9COOCH_3$	1—5,25	10	91
диэтиловый (этиловый)	$(C_2H_5)_2O$	1000	—100,8	34,5
		100	0	125,7
		200	0	112,2
		500	0	84,5
		1000	0	63,5
		1—8	8,1	163,8
		0,4—17,5	12,2	163
		8,43—25,4	13,5	169
		2—19	34,8	207
		1—2000	35	42,5
		8,6—34,3	63	293
		8,6—34,3	78,5	363
		8,6—36,5	99	523
		100—200	185	741
		100—400	185	478
маслянобутиловый (бутилбутират)	$C_3H_7COOC_4H_9$	1—5;25	10	90

Название	Формула	Давление, *атм*	Температура, °С	$10^{-6}\ \chi$, $атм^{-1}$
маслянометиловый (метилбутират)	$C_3H_7COOCH_3$	1—5,25	10	89
уксуснометиловый (метилацетат)	CH_3COOCH_3	8,1—37,53	14,3	97
уксусноэтиловый (этилацетат)	$CH_3COOC_2H_5$	8,12—37,45 8,13—37,15	13,3 99,6	104 250

6.3. ТВЕРДЫЕ ТЕЛА

Таблица 6.18

Коэффициент сжимаемости твердых тел при температуре 20°С [3]

Элемент	$\chi \cdot 10^{-6}$, $атм^{-1}$	Элемент	$\chi \cdot 10^{-6}$, $атм^{-1}$	Элемент	$\chi \cdot 10^{-6}$, $атм^{-1}$	Элемент	$\chi \cdot 10^{-6}$, $атм^{-1}$	Элемент	$\chi \cdot 10^{-6}$, $атм^{-1}$	Элемент	$\chi \cdot 10^{-6}$, $атм^{-1}$
Алюминий	1,38	Калий	32,4	Молибден	0,47	Ртуть	4,05	Таллий	2,33		
Бром	52,45	Кальций	5,87	Мышьяк	4,56	Рубидий	40,5	Углерод:			
Висмут	3,04	Кремний	0,324	Натрий	15,99	Свинец	2,23	алмаз	0,23	Хром	0,91
Железо	0,597	Литий	9,1	Никель	0,63	Селен	12,15	графит	3,04	Цезий	62,77
Золото	0,617	Магний	2,89	Олово	1,82	Сера	13,16	Фосфор:			
Иод	13,6	Марганец	0,86	Палладий	0,56	Серебро	1,01	белый	20,75	Цинк	1,72
Кадмий	2,13	Медь	0,74	Платина	0,385	Сурьма	2,43	красный	9,31		

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Handbook** of Chemistry and Physics. 33rd ed., Cleveland, Ohio s. a.
2. **Справочник** химика. Т. 1. М., 1962, с. 572—579.
3. **Кэй Д., Лэби Т.** Таблицы физических и химических постоянных. Пер. с англ. Под ред. К. П. Яковлева М., Физматгиз, 1962, с. 40—41.
4. **Бачинский А. И., Путилов В. В., Суворов Н. П.** Справочник по физике. М., Учпедгиз, 1951.

ГЛАВА 7

АКУСТИКА

Скорость звука в газе можно рассчитать по формуле

$$v = \sqrt{(C_P/C_V)\,(P/\rho)}\,,$$

где C_P/C_V — отношение удельных теплоемкостей при постоянных давлении и объеме; P — давление; ρ — плотность газа;

в жидкости

$$v = 1/\sqrt{\beta \cdot \rho}\,,$$

где β — коэффициент адиабатического сжатия.

В твердом теле скорость продольных волн

$$v_{\parallel} = \sqrt{\frac{E}{\rho}} \cdot \sqrt{\frac{1-\sigma}{1+\sigma} \cdot \frac{1}{1-2\sigma}}\,,$$

где E — модуль Юнга; σ — коэффициент Пуассона; скорость поперечных волн

$$v_{\perp} = \sqrt{E/\rho} \cdot \sqrt{1/[2(1+\sigma)]}\,;$$

скорость звука в тонком стержне

$$v = \sqrt{E/\rho}\,.$$

Поглощение звуковых волн в веществе характеризуется коэффициентом

$$\alpha = \frac{1}{d} \ln \frac{A_0}{A_d}\,,$$

где A_0 — первоначальная амплитуда плоской волны; A_d — амплитуда волны на расстоянии d. Коэффициент поглощения звука в газе и жидкости связан с вязкостью и коэффициентом теплопроводности среды выражением:

$$\alpha = \frac{2\pi^2 f^2}{v^3 \rho}\left(\frac{4}{3}\eta + \frac{\gamma - 1}{C_P}\varkappa\right),$$

где f — частота; v — скорость звука; η — динамический коэффициент вязкости; $\varkappa$ — коэффициент теплопроводности.

Коэффициент поглощения α измеряется в *неп/см* ($см^{-1}$); для пересчета в *дб/м* значение α в *неп/см* нужно умножить на 868,6. В качестве характеристики поглощения часто пользуются не зависящим от частоты отношением α/f^2. Мерой поглощения на расстоянии одной длины волны является произведение $\alpha\lambda$.

В твердых телах мерой затухания звука является коэффициент потерь ε, при этом $\alpha = \varepsilon\pi/\lambda$. Затухание звука в твердых телах характеризуют также добротностью Q. В случае продольных колебаний в стержнях $\alpha = \pi f/(Qv)$.

Таблица 7.1

Скорость звука в газах и парах

Вещество	Температура, t, °C	Частота f, кгц	Скорость v, м/сек	$\Delta v/\Delta t$, $\frac{м}{сек \cdot град}$	Литература
Азот	0	—	334,0	0,6	[1]
	19,1	—	349,0	—	[2]
Аргон (рис. 7.1, 7.2)	0	—	319,0	0,56	[1]
	20	—	321	—	[2]
	30,20	83,780	325,23	—	[3]
Аммиак	0	—	415	—	[1]
	18	—	428,2	—	[2]
Амиловый спирт	136	—	218,8	—	[2]
Ацеталь	30	59,6	257	—	[2]
Ацетон	18	—	327	—	[2]
	97	—	239	0,32	[4]
	134	—	251,2	—	[4]
Бензол	97,1	—	202	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 (рис. 7.3)	0	—	331,45	—	[6]
	30,40	83,780	350,70	—	[3]
Водород (рис. 7.4, 7.5)	0	—	1284	2,2	[1]
	18	—	1301	—	[2]
	100	—	1463	—	[2]
Водяной пар	134	—	494	—	[5]
Винилацетат	134	—	203	—	[2]
Гелий	0	—	965	0,8	[1]
	29,99	83,780	1055,63	—	[3]
Гексан	134	94	199,6	—	[2]
Дейтерий	0	—	890	1,6	[5]
Двуокись серы	0	—	213	0,47	[2]
	18	—	216,2	—	[2]
Диметиловый эфир	97,1	—	274	—	[5]
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	—	[5]
Закись азота	0	—	263	0,5	[5]
Иодистый водород	0	—	157	—	[2]
Иодистый этил	76	465	162	—	[2]
Иодистый метил	43	465	154	—	[2]
Иод	0	—	108	—	[2]
Изопропиловый спирт	97,1	95	255	0,4	[2]
	134	95	270,2	—	[2]
Кислород	0	42,3	314	—	[1]
Криптон	30,26	83,780	224,36	—	[3]
Метан	0	—	430	—	[5]
Метиловый спирт	97,1	95	335	0,46	[2]
	134	—	352,2	—	[2]
Метилциклогексан	134	—	185	—	[2]
Метиловый эфир	97,1	95	273,9	—	[2]
Неон	0	—	433,4	—	[1]
	30,46	83,780	461,29	—	[3]
Окись азота	0	—	324	—	[2]
	16	—	332,4	—	[2]
Окись углерода	0	—	337	0,6	[2]
Пентан	134	—	220	—	[2]

Вещество	Температура t, °C	Частота f, кгц	Скорость v, м/сек	$\Delta v/\Delta t$, $\frac{м}{сек \cdot град}$	Литература
Пропиловый спирт	134	95	244,5	—	[2]
Пропионовая кислота	146	—	232	—	[2]
Пропиловый эфир	97,1	50	194	—	[2]
Сероуглерод	97,1	50	220,1	—	[5]
	55	59,5	205	—	[2]
Сероводород	0	—	289,3	—	[5]
Светильный газ	0	—	453	—	[5]
Углекислый газ	0	43,2	256,7	—	[2]
(рис. 7.6)	20	58,5	274,6	—	[2]
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	—	[2]
Хлороформ	97,1	95	171	0,24	[5]
	134	95	179,7	—	[2]
Циклогексан	97,1	—	191	0,3	[5]
	134	95	201,9	—	[2]
Четыреххлористый	97,1	95	145	—	[5]
углерод	134	—	153,6	—	[2]
Четырехфтористый	22	—	178,2	—	[2]
углерод					
Этан (рис. 7.7)	10	—	308	—	[5]
Этилацетат	97,1	—	189	0,27	[5]
	134	95	198,8	—	[5]
Этилен	0	—	317	—	[5]
	20	59,5	329	—	[2]
Этилметилкетон	134	—	223	—	[5]
Этиловый спирт	97,1	95	269	0,4	[2]
	134	95	284	—	[2]
Этиловый эфир	97,1	—	206	0,3	[2]
	134	—	217	—	[2]

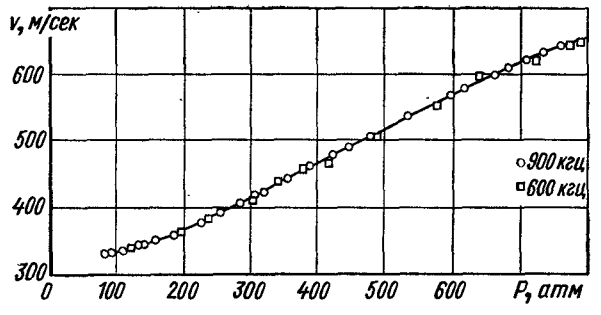


Рис. 7.1. Зависимость скорости звука в аргоне от давления [9].

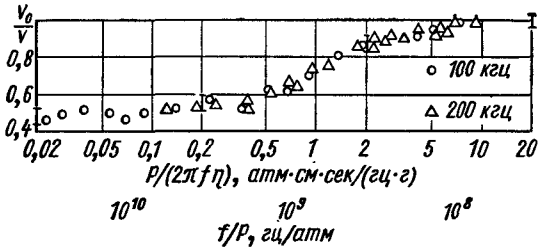


Рис. 7.2. Дисперсия звука в аргоне [v_0 — скорость звука при низких (звукозых) частотах] [10].

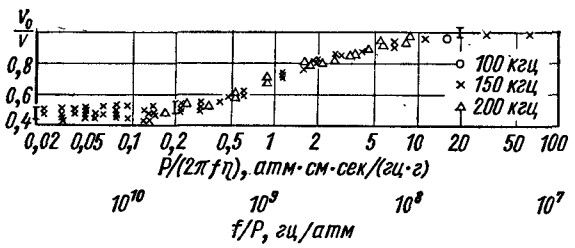


Рис. 7.3. Дисперсия звука в воздухе [10].

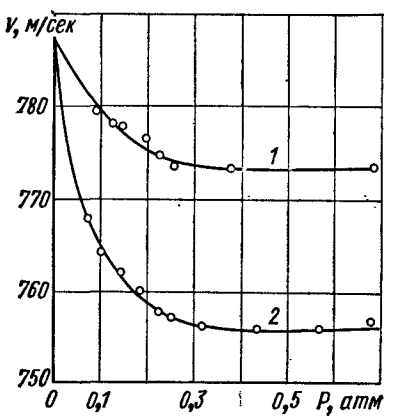


Рис. 7.4. Зависимость скорости звука в водороде ($T = 90{,}3°$ К) от давления [11]:

1 — в нормальном водороде; *2* — в водороде, содержащем 70% параводорода.

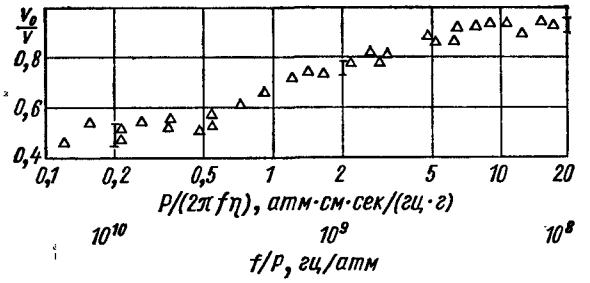


Рис. 7.5. Дисперсия звука в водороде при $f = 200$ кгц [10].

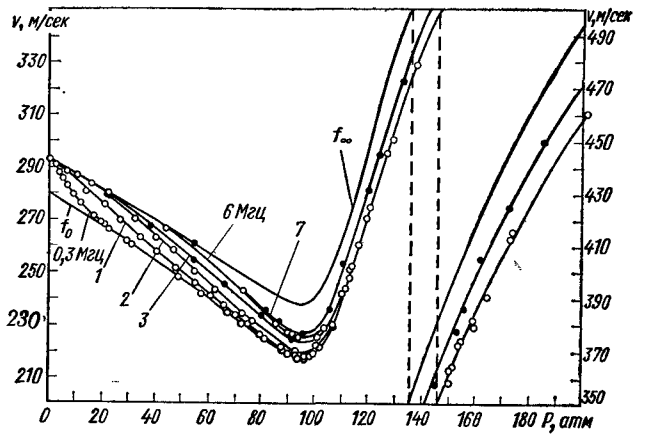


Рис. 7.6. Зависимость скорости звука в углекислом газе ($t = 50{,}8°$ С) от давления (f_0 — низкие и f_∞ — высокие частоты) [12].

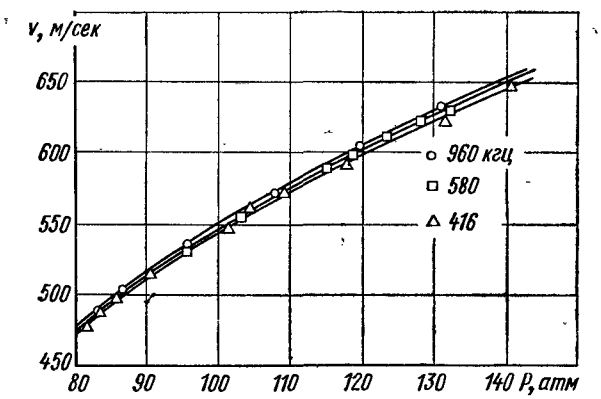


Рис. 7.7. Зависимость скорости звука в этане от давлеиия при различных частотах [9].

Таблица 7.2

Коэффициент поглощения звука α в газах и парах

Вещество	t, °C	f, *кгц*	P, *атм*	α, $см^{-1}$	α/f^2, $10^{-13}\frac{сек^2}{см}$	Литература
Азот	19,9	598,9	0,97	—	1,35	[4]
Аргон (рис. 7.8, 7.9)	20	4250	1	—	1,9	[4]
	—	500	0,574	0,0834	—	[8]
		500	0,477	0,0930	—	[8]
		500	0,329	0,138	—	[8]
		500	0,224	0,212	—	[8]
		500	0,182	0,255	—	[8]
Ацетон	—	97,8	—	0,5	—	[2]
Бензол	—	97,8	—	1,0	—	[2]
Водород (рис. 7.10)	19,9	598,9	1	—	3,58	[4]
Воздух (рис. 7.11, 7.12)	—	—	—	0,697	1,85	[7]
Гелий (см. рис. 7.9)	17,5	598,9	0,99	—	2,96	[4]
Иодистый метил	—	97,8	—	0,15	—	[2]
Иодистый этил	—	97,8	—	0,45	—	[2]
Кислород	19,6	598,9	0,99	—	1,68	[4]
Ксенон	—	500	0,544	—	0,15	[8]
		500	0,243	—	0,345	[8]
		500	0,090	—	0,930	[8]
Метиловый спирт	—	97,8	—	0,05	—	[2]
Неон	19	304,4	0,65	—	5,82	[4]
Окись азота	16,3	598,9	0,95	—	1,83	[4]
Окись углерода	18,7	304,4	0,85	—	5,78	[4]
Сероуглерод	—	97,8	—	1,2	—	[2]
Углекислый газ	16,6	304,4	0,98	—	27,1	[4]
Хлористый метилен	—	97,8	—	0,7	—	[2]
Хлороформ	—	97,8	—	0,7	—	[2]
Четыреххлористый углерод	—	97,8	—	0,35	—	[2]
Этиловый спирт	—	97,8	—	0,7	—	[2]
Этиловый эфир	—	97,8	—	0,2	—	[2]

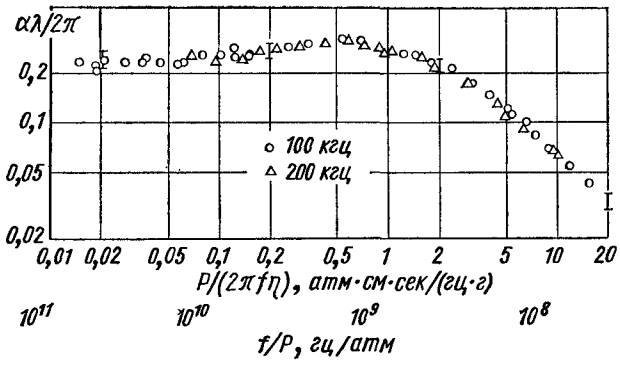


Рис. 7.8. Зависимость коэффициента поглощения звука в аргоне от давления [10].

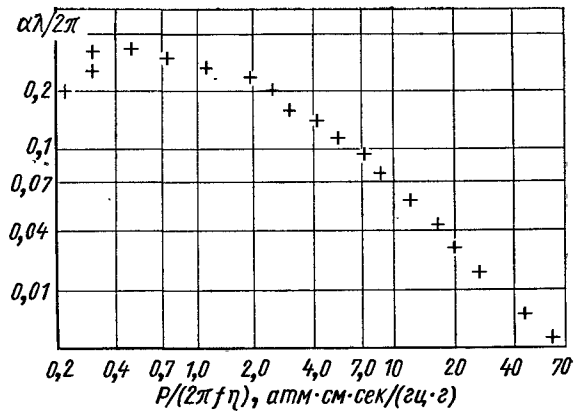


Рис. 7.9. Зависимость коэффициента поглощения звука в инертных газах (He, Ar, Ne, Kr, Xe) от давления при $f = 11$ *Мгц* [13].

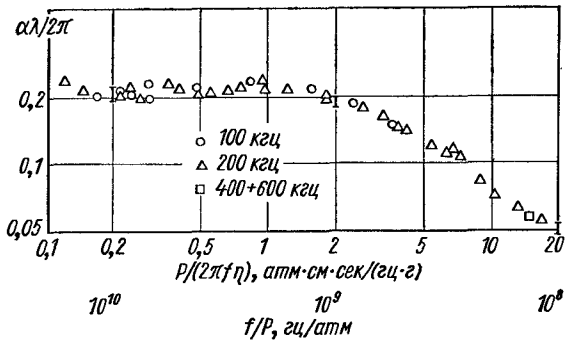


Рис. 7.10. Зависимость коэффициента поглощения звука в водороде от давления [10].

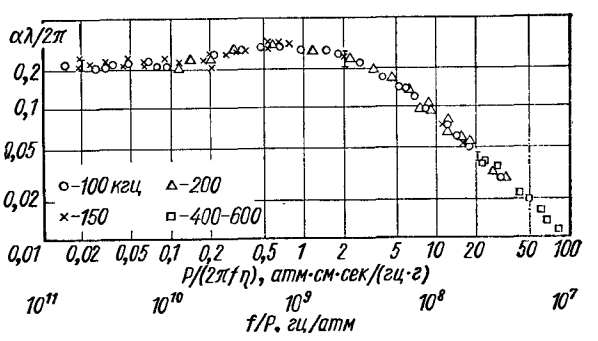


Рис. 7. 11. Зависимость коэффициента поглощения звука в воздухе от давления [10].

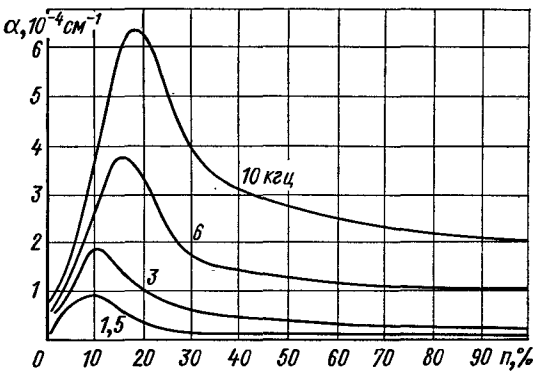


Рис. 7.12. Зависимость коэффициента поглощения звука в воздухе от содержания водяных паров при различных частотах [2].

7.2. РАСПРОСТРАНЕНИЕ ЗВУКА В ЖИДКОСТЯХ

Таблица 7.3

Скорость звука в сжиженных газах

Вещество	T, °K	f, *Мгц*	v, $\frac{м}{сек}$	$\frac{\Delta v/\Delta t,\ м}{сек\cdot град}$	Литература	Вещество	T, °K	f, *Мгц*	v, $\frac{м}{сек}$	$\frac{\Delta v/\Delta t,\ м}{сек\cdot град}$	Литература
Азот	65	—	1007	—	[1]	Гелий (рис.	0,985	—	237,66	—	[18]
	70	1,5—7,5	929	—	[4]	7.13)	1,08	—	237,67	—	[18]
	71	—	937	—	[1]		1,76	—	231,4	—	[17]
	73,9	44,4	962	—10	[14]		2,18	—	221,7	—	[17]
	76	1,5—7,5	869	—	[4]		2,5	—	223,3	—	[17]
	77	—	867	—	[1]		3,0	15	220	—	[19]
Аргон	64	1,5	1322	—	[15]		4,22	16	179,8	—21,5	[17]
	78	1,5	1255	—	[15]		4,223	0,220	180,63	—	[18]
	84	1,5—7,5	863	—	[4]	Гелий II	1,63	—	20	—	[20]
	84,0	—	780	—	[1]		2,18	—	3,4	—	[20]
	85,2	44,4	853	—	[1]	Кислород	53	—	1130	—	[21]
	87	1,5—7,5	837	—	[4]		60	44,8	1119	—	[14]
Водород	14,8	0,527	1340	—	[16]		70	44,4	1094	—	[14]
	16,5	0,523	1265	—	[16]		75	—	1029	—	[1]
	17	44,4	1187	—	[1]		80	—	988	—	[1]
	17,4	0,523	1278	—	[16]		85	—	948	—	[1]
	18,0	0,523	1260	—	[16]		87	44,4	952	—	[16]
	20,3	—	1127	—	[4]		90,1	44,4	912	—6,9	[8]
	20,4	0,523	1229	—	[16]	Метан (рис.	94,9	—	1545	—	[22]
	21,0	0,523	1150	—	[16]	7.14)	111,4	—	1418	—	[22]

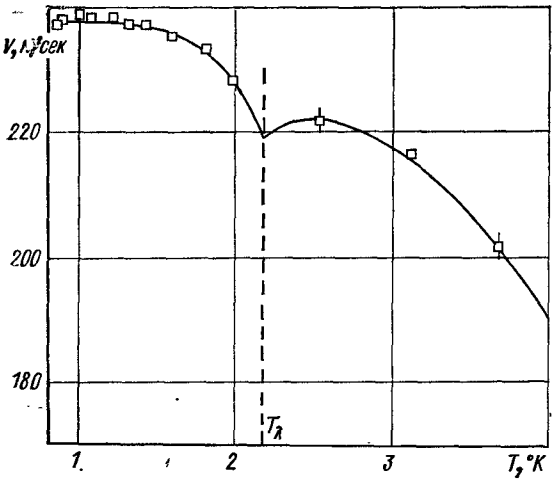


Рис. 7.13. Зависимость скорости звука в жидком гелии от температуры; при температуре T_λ происходит переход обыкновенного гелия He I в сверхтекучее состояние He II [23].

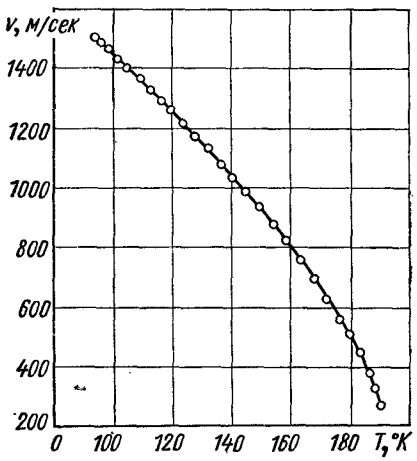


Рис. 7.14. Зависимость скорости звука в жидком метане от температуры [24].

Таблица 7.4

Коэффициент поглощения звука в сжиженных газах

Вещество	T, °K	f, *Мгц*	$\frac{\alpha}{f^2}$, 10^{-17} $\frac{сек^2}{см}$	Литература
Азот	73,9	44,4	10,5	[9]
Аргон	85,2	44,4	10,1	[9]
Водород	17	44,4	5,6	[9]
Гелий (рис. 7.15)	3	15	110	[19]
Кислород	60	44,4	8,6	[9]
	70	44,4	8,6	[9]
	88	44,4	8,6	[9]

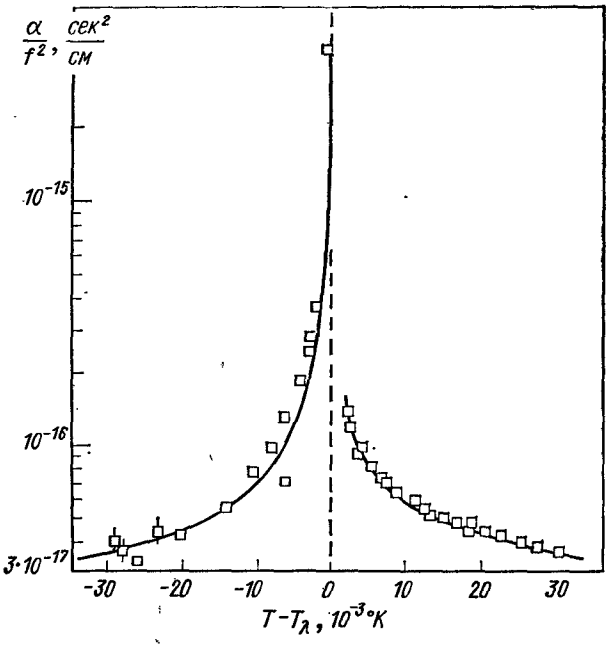


Рис. 7.15. Зависимость коэффициента поглощения звука в жидком гелии от температуры [23].

Таблица 7.5

Скорость звука в жидких и газообразных веществах, *м/сек* [25]

Вещество	T°, К	В жидкости	В газе
Азот	71,9	940	171
	78,0	859	176
	78,4	856	177
	79,2	848	177
Аргон	84,0	875	167,5
	85,8	857	169
Водород	17,2	1210	320
	18,6	1174	340
	19,9	1140	355
	20,4	1128	362
Гелий	3,8	198	102
	4,2	181	104
Кислород	78,4	1007,6	106,8
	82,8	966,8	171,3
	86,5	938,3	173,5
	90,3	917,7	177,7

Таблица 7.6

Скорость звука в жидкостях

Вещество	t, °C	v, $\frac{м}{сек}$	$\frac{\Delta v}{\Delta t}$, $\frac{м}{сек \cdot град}$	Литература
Акролеин	20	1207	—	[26]
Аллил хлористый	28	1088	—	[27]
Амилацетат	26	1168	—	[27]
Амил бромистый	20	981	—3,6	[26]
Амиловый спирт	20	1294	—	[26]
Амиловый спирт третичный	28	1204	—	[27]
Амилформиат	26	1201	—	[27]
Анилин	20	1656	—4,6	[26]
Ацеталь	24	1378	—	[27]
Ацетилацетон	20	1383	—5,2	[26]
Ацетил хлористый	20	1060	—	[26]
Ацетон	20	1192	—5,5	[26]
	22,5	1178	—	[28]
	24,0	1168	—	[28]
Ацетонилацетон	20	1416	—4,8	[26]
Ацетонитрил	20	1304	—5,0	[26]
Ацетоуксусный эфир	25,5	1417	—	[27]
Ацетофеион	20	1496	—3,7	[27]
Бензальдегид	20	1479	—4,0	[26]
Бензилацетон	20	1514	—	[26]
Бензиловый спирт	20	1540	—	[26]
Бензил хлористый	20	1420	—4,6	[26]
Бензоил хлористый	28	1318	—	[27]
Бензол	20	1321	—4,58	[29]
	40	1227	—	[29]
Бензол тяжелый	20	1238	—4,25	[29]
	40	1151	—	[29]
Бромаль	20	966	—3,4	[26]
α-Бромнафталин	20	1372	—3,1	[30]
Бромоформ	20	928	—2,1	[27]
Бутилацетат	26	1271	—	[27]
Бутил: бромистый	20	990	—4,0	[26]
иодистый	20	977	—3,6	[26]
хлористый	20	1133	—4,6	[26]
2,3-Бутиленгликоль	25	1484	—	[31]
Бутиловый спирт	20	1268	—4,0	[26]
Бутиловый спирт третичный	20	1155	—5.0	[26]
Бутилформиат	24	1199	—	[27]
Валериановая кислота	20	1244	—4,8	[26]
Вода обычная (рис. 7.16, 7.17)	25	1497	+2,5	[32]
	74	1555	—	[33]
Вода тяжелая	25	1399	+2,8	[32]
Гексан	20	1083	—	[26]
Гексил: иодистый	20	1081	—3,2	[26]
хлористый	20	1221	—4,2	[26]
Гексиловый спирт	20	1322	—3,9	[26]
Гемеллитол	20	1372	—	[26]
Гептан	20	1162	—4,5	[26]
Гептаион	20	1207	—	[26]
1-Гептен	20	1128	—	[34]
Гептиловый спирт	20	1341	—4,2	[26]
Геранилацетат	28	1328	—	[27]
Гидриден	20	1403	—	[26]
Глицерин	20	1923	—1,8	[30]
	22	1927	—	[28]
1-Децен	20	1250	—	[34]
Ециловый спирт	20	1413	—	[35]
Децил хлористый	20	1318	—4,2	[26]
Диамиловый эфир	26	1153	—	[27]

Продолжение табл. 7.6

Вещество	t, °C	v, $\frac{м}{сек}$	$\frac{\Delta v}{\Delta t}$, $\frac{м}{сек \cdot град}$	Литература
Дибромэтилен	20	1009	—	[26]
Диацетил	25	1236	—4,5	[31]
цис-Дибромэтилен	20	957	—2,4	[36]
транс-Дибромэтилен	20	936	—2,2	[36]
Диметиланилин	20	1509	—3,6	[26]
Диметиловый эфир:				
адипиновой кислоты	21,8	1469	—	[27]
диметилглутаровой кислоты	24	1371	—	[27]
резорцина	26	1460	—	[27]
Диоксан	20	1389	—6,2	[26]
Дипентен	23,8	1328	—	[27]
Дипропиловый эфир	20	1112	—	[26]
Дифенилметан	28	1501	—	[27]
Дифениловый эфир	24	1469	—	[27]
м-Дихлорбензол	28	1232	—	[27]
о-Дихлорбензол	20	1295	—	[27]
Дихлорэтан	20	1034	—4,6	[26]
	23	1240	—	[27]
цис-Дихлорэтилен	20	1090	—3,7	[36]
транс-Дихлорэтилен	20	1031	—3,7	[36]
Диэтиланилин	20	1482	—4,0	[26]
Диэтилеигликоль	25	1586	—2,4	[31]
Диэтилкарбонат	28	1173	—	[27]
Диэтилкетон	24	1314	—	[27]
Диэтиловый эфир	20	1008	—5,4	[26]
Диэтиловый эфир:				
адипиновой кислоты	22	1376	—	[27]
ацетодикарбоиовой кислоты	22,5	1348	—	[27]
дигликолевой кислоты	22	1435	—	[27]
малоновой кислоты	22	1386	—	[27]
тиодигликолевой кислоты	22,5	1449	—	[27]
щавелевой кислоты	22	1392	—	[27]
янтарной кислоты	22	1378	—	[27]
Диэтилфталат	23	1471	—	[27]
Додециловый спирт	22,3	1433	—	[35]
Изобутиловый спирт	20	1278	—	[35]
Изопропилбензол	20	1342	—	[26]
Изопропиловый спирт	20	1247	—	[35]
Инден	20	1475	—	[26]
Иодистый бензол	20	1113	—	[26]
α-Ионон	20	1432	—	[26]
Каприловая кислота	20	1331	—5,0	[26]
Капроиовая кислота	20	1281	—	[35]
Карвакрол	20	1475	—5,0	[26]
Коричный альдегид	25	1554	—3,1	[31]
о-Крезол	25	1506	—3,5	[31]
Кротоновый альдегид	20	1344	—4,0	[26]
м-Ксилол	20	1340	—4,1	[26]
о-Ксилол	20	1360	—4,1	[26]
п-Ксилол	20	1330	—4,8	[26]
Линалоол	20	1341	—	[26]
Малеиновая кислота	20	1352	—3,8	[26]
Масляная кислота	20	1234	—	[35]
Мезитилен	20	1362	—4,8	[26]
N-Метиланилин	20	1586	—	[26]
Метилацетат	25	1154	—3,8	[32]
2-Метилбутанол	30	1225	—	[37]
Метилгексалин	22,5	1528	—	[27]
Метилгексилкетон	24	1324	—	[27]
Метилен бромистый	24	971	—	[27]

Продолжение табл. 7.6

	t, °C	v, $\frac{м}{сек}$	$\frac{\Delta v/\Delta t}{\frac{м}{сек \cdot град}}$	Литература
Метилен:				
иодистый	24	977	—1,8	[27]
хлористый	20	1092	—4,4	[26]
п-Метилизопропилбензол	28	1308	—	[27]
Метил иодистый	20	834	—	[26]
Метиловый спирт	20	1156	—	[35]
Метиловый эфир				
м-крезола	26	1385	—	[27]
феиола	26	1353	—	[27]
хлоруксусной кислоты	26	1331	—	[27]
Метилпропионат	24,5	1215	—	[27]
Метилсалицилат	28	1408	—	[27]
Метилциклогексан	20	1247	—5,6	[26]
2-Метилциклогексанол	25,5	1421	—	[27]
3-Метилциклогексанол	25,5	1406	—	[27]
4-Метилциклогексаиол	25,5	1387	—	[27]
2-Метилциклогексаиои	25,5	1353	—	[27]
4-Метилциклогексаиои	25,5	1348	—	[27]
Метилэтилкетои	20	1207	—5,0	[26]
Моиометиловый эфир резорцина	26	1629	—	[27]
Моиохлорнафталин	27	1462	—	[27]
Морфолии	25	1442	—3,7	[31]
Муравьиная кислота	20	1401	—	[35]
Никотии	20	1491	—5,0	[26]
Нитробензол	20	1473	—3,8	[26]
Нитрометаи	20	1346	—4,8	[26]
м-Нитротолуол	20	1489	—	[26]
о-Нитротолуол	20	1432	—	[26]
Нитроэтиловый спирт	20	1578	—	[26]
Ноиви	20	1248	—4,4	[26]
1-Ноиен	20	1218	—	[34]
Ноииловый спирт	20	1391	—4,3	[26]
Окись мезитила	20	1310	—	[31]
Октан	20	1197	—4,4	[26]
Октадециловый спирт	59,1	1336	—	[35]
1-Октен	20	1184	—	[34]
Октил бромистый	20	1182	—4,8	[26]
хлористый	20	1280	—4,2	[26]
Октиловый спирт	20	1381	—	[35]
цис-Олеииовая кислота	45	1333	—3,3	[36]
Пальметиновая кислота	62,1	1328	—	[35]
Паральдегид	20	1204	—5,0	[26]
1-Пеитадецен	20	1351	—	[34]
Пентан	20	1008	—4,2	[26]
Пеитахлорэтан	20	1113	—	[26]
Перхлорэтилен	20	1066	—	[26]
а-Пиколин	28	1453	—	[27]
β-Пиколин	28	1419	—	[27]
Пинеи	24	1247	—	[27]
Пиперидин	20	1400	—	[26]
Пиридии	20	1445	—4,4	[26]
Пировиноградная кислота	20	1471	—	[26]
Пропилацетат	26	1182	—	[27]
Пропил иодистый	20	929	—4,0	[26]
хлористый	20	1091	—4,4	[26]
Пропиловый спирт	20	1223	—4,0	[26]
Пропиоиитрил	20	1271	—	[26]
Пропиоиовая кислота	20	1270	—	[35]
Псевдобутил-*м*-ксилол	20	1354	—	[26]
Псевдокумол	20	1368	—	[26]
Салициловый альдегид	27	1474	—	[30]
Сероуглерод	20	1158	—3,2	[27]

Продолжение табл. 7.6

Вещество	t, °C	v, $\frac{м}{сек}$	$\frac{\Delta v/\Delta t}{\frac{м}{сек \cdot град}}$	Литература
Тетрабромэтаи	20	1041	—	[30]
Тетрадециловый спирт	38,4	1404	—	[35]
Тетралии	20	1492	—4,5	[26]
Тетраиитрометан	20	1039	—4,0	[26]
Тетрахлорэтаи	20	1171	—	[26]
	28	1155	—	[27]
Тетрахлорэтилеи	28	1027	—	[27]
Тетраэтиленгликоль	25	1586	—3,0	[31]
Тиоуксусная кислота	20	1168	—	[26]
Тиофеи	20	1300	—4,2	[26]
м-Толуидии	20	1620	—	[26]
о-Толуидин	20	1634	—	[26]
Толуол	20	1328	—	[26]
1-Тридецея	20	1313	—	[34]
Триметиленбромид	23,5	1144	—	[27]
Триолеин	20	1482	—	[26]
1, 2, 4-Трихлорбензол	20	1301	—	[26]
Трихлорэтилен	20	1049	—4,4	[26]
Триэтиленгликоль	25	1608	—3,8	[31]
Уксусный ангидрид	24	1384	—	[27]
Уксусная кислота	20	1253	—	[35]
1-Ундецеи	20	1275	—	[34]
Феиилгидразин	20	1738	—	[26]
γ-Фенилпропиловый спирт	30	1523	—	[37]
β-Феиилэтиловый спирт	30	1512	—	[37]
Формамид	20	1550	—	[26]
Фумаровая кислота	20	1303	—3,5	[36]
Фуриловый спирт	25	1450	—3,5	[31]
Хииальдин	20	1575	—	[26]
Хиполин	20	1600	—4,8	[26]
Хлорбензол	20	1291	—4,4	[26]
а-Хлориафталин	20	1481	—	[26]
Хлороформ	20	1005	—3,6	[26]
м-Хлортолуол	20	1326	—	[26]
о-Хлортолуол	20	1344	—	[26]
п-Хлортолуол	20	1316	—	[26]
Циклогексаи	20	1284	—4,0	[26]
Циклогексанол	20	1493	—4,9	[26]
Циклогексаион	20	1449	—5,4	[26]
Циклогексен	20	1305	—5,4	[26]
Циклогексиламин	20	1435	—	[26]
Циклогексил хлористый	20	1319	—4,8	[26]
Циклопеитадиен	20	1421	—	[26]
Циклопеитаион	24	1474	—	[27]
Цитраль	20	1442	—3,8	[26]
Четыреххлористый углерод	20	938	—3,0	[26]
	23,5	924	—	[28]
	58	815	—	[28]
Эваитовая кислота	20	1304	—	[35]
Эланднновая кислота	45	1346	—3,5	[36]
Энаитовая кислота	20	1312	—5,0	[26]
Этилацетат	20	1176	—	[26]
Этилбеизилаиилин	20	1586	—	[26]
Этилбензол	20	1338	—4,4	[26]
Этил бромистый	28	892	—	[27]
иодистый	20	869	—	[26]
Этилбутират	23,5	1171	—	[27]
Этилеигликоль	20	1616	—	[26]
Этилкаприлат	28	1263	—	[27]
Этиловый спирт	20	1165	—	[35]
	23	1155	—	[28]

Продолжение табл. 7.6

Вещество	t, °C	v, м/сек	$\Delta v/\Delta t$, м/сек·град	Литература
Этиловый эфир:				
диэтиленгликоля	25	1458	—	[31]
о-крезола	25	1315	—	[27]
феиола	26	1153	—	[27]
хлоруксусиой кислоты	25,5	1234	—	[27]
Этилпропионат	23,5	1185	—	[27]
Этилфеиилкетои	20	1498	—	[26]
Этилформиат	24	1721	—	[27]
Масла, иефтепродукты				
Акулья ворвань	32,5	1275	—	[38]
Аиисовое	28	1451	—	[38]
Арахисовое	31,5	1562	—	[38]
Бензии	25	1295	—	[28]
Вербеновое	29	1323	—	[38]
Веретенное	32	1342	—	[38]
Газолиновое	34	1250	—	[38]
Гераииевое	27	1192	—	[38]
Горчичное	31,5	1825	—	[38]
Ионовое	34	1331	—	[38]
Кассиевое	28,5	1460	—	[38]
Кедровое	29	1406	—	[38]
Керосин	34	1295	—	[38]
Кокосового ореха	31,5	1490	—	[38]
Ксанторидзевое	29	1394	—	[38]
Кунжутиое	32,5	1432	—	[38]
Куркума ароматическая	32,5	1349	—	[38]
Куркума зедоария	32	1293	—	[38]
Лавандовое	28,5	1310	—	[38]
Лимоиное	29	1076	—	[38]
Линалооловое	32	1397	—	[38]
Льияное	31,5	1772	—	[38]
Оливковое	32,5	1381	—	[38]
Парафиновое	33,5	1420	—	[38]
Пачули	27,5	1266	—	[38]
Сосновое	31	1468	—	[38]
Спермацетовое	33	1210	—	[38]
Сурепное	30,8	1450	—	[38]
Терпентинное	27	1280	—	[38]
Трансформаторное	32,5	1425	—	[38]
Феиилгорчичное	27	1412	—	[27]
Эвкалиптовое	29,5	1276	—	[38]
Эфирное масло:				
померанцевой корки	29	1300	—	[38]
саидалового дерева	34	1454	—	[38]

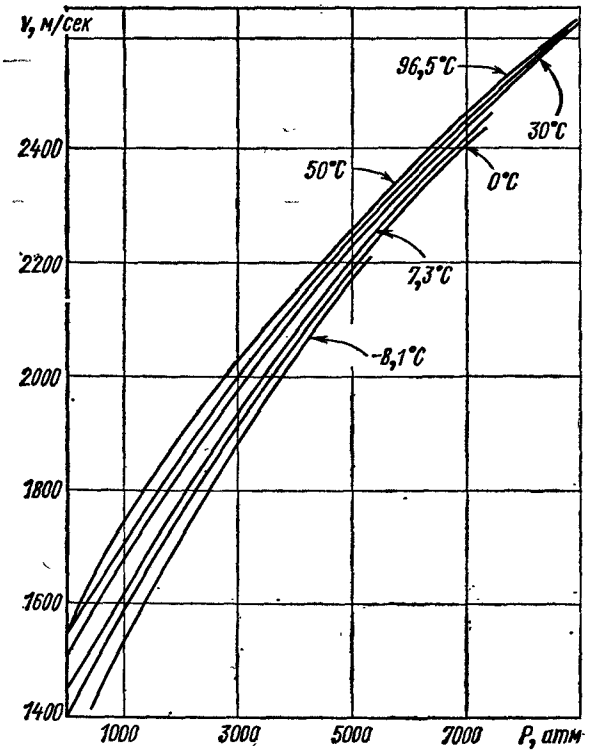


Рис. 7.16. Зависимость скорости звука в воде от давления при различной температуре ($f = 12$ *Мгц*) [33а].

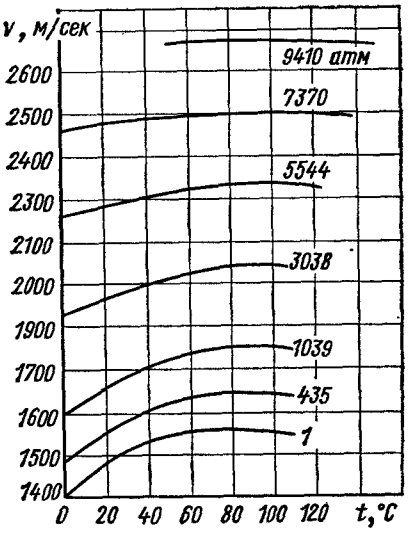


Рис. 7.17. Зависимость скорости звука в воде от температуры при различных давлениях ($f = 12$ *Мгц*) [33а].

Таблица 7.7

Коэффициент поглощения звука в жидкостях

Вещество	t, °C	f, *Мгц*	α/f^2, 10^{-17} $\frac{сек^2}{см}$	Литература
Аллиловый спирт	24,8	104,1	44,1	[39]
	24,8	192,0	45,4	[39]
Амиловый спирт	24,8	104,9	97,0	[39]
	24,8	192,0	96,5	[39]
	24,9	148,0	97,2	[39]
	29	15	106	[39]
Изоамиловый спирт	24,5	148,1	133	[39]
	24,8	192,0	131	[39]
	25,2	107,4	131	[39]
о-Аинзидин	24,8	104,3	58,8	[39]
Аиизол	24,8	104,0	43,8	[39]
Анисальдегид	24,6	104,1	63,6	[39]
Ацеталь	24,6	104,1	56,7	[39]
	24,6	192,1	43,5	[39]
Ацетил хлористый	24,6	104,0	82,8	[39]
Ацетон	20	307	27,2	[44]
	20	482	24,1	[44]
	20	843	23,6	[44]
	24,4	104,3	25,7	[39]
	25	1—4	70	[31]
Бензил хлористый	24,6	104,1	78,8	[39]
	25,3	192,3	74,3	[39]
Бензиловый спирт	24,6	104,0	79,2	[39]
Бензол	20	307	755	[44]
	20	482	495	[44]
	24,4	104,0	849	[39]
	24,9	148,1	800	[39]
	25,0	192,5	775	[39]
Бензол: бромистый	24,8	104,0	144	[39]
иодистый	25	30	210	[40]
Бензотрихлорид	24,4	104,0	110	[39]
	24,8	192,3	105	[39]
п-Броманизол	24,3	104,0	63,6	[39]
	24,6	192,1	61,1	[39]
о-Бромаиизол	24,4	104,0	71,3	[39]
	24,6	192,1	68,5	[39]
Бромоформ	25,1	106,9	262	[39]
	25,2	192,2	248	[39]
	25,3	148,1	256	[39]
Бутил: бромистый	2	15	49	[43]
иодистый	2	15	48	[43]
хлористый	2	15	108	[43]
Изобутилацетат	25,0	104,8	60,8	[39]
	25,0	192.1	53,2	[39]
Бутиловый бензол третичный	24,6	104,0	70,5	[39]
	24,8	192,3	65,5	[39]
	24,8	192,5	79,3	[39]
Бутиловый спирт	24,8	105,0	81,1	[39]
	25,0	148,0	79,1	[39]
	25,1	192,0	81,4	[39]
Изобутиловый спирт	25,0	107,4	153	[39]
	25,0	148,1	146	[39]
	25,1	192.1	140	[39]
Монобутиловый эфир этиленгликоля	24,6	104,1	80,7	[39]
Изовалериановая кислота	25,0	104,8	180	[39]
	25,0	192,5	167	[39]
Вода	20	7—250	25	[46]
	20	307	24,7	[44]
	20	482	23,8	[44]

Продолжение табл. 7.7

Вещество	t, °C	f, *Мгц*	α/f^2, 10^{-17} $\frac{сек^2}{см}$	Литература
Вода	20	843	24,2	[44]
	24,3	192,8	21,2	[39]
Гексан	21	15	77	[43]
	24,9	191,5	56,7	[39]
	25,0	107,5	60,4	[39]
	25,0	148,0	58,5	[39]
Гептан	21	15	80	[43]
Декагидронафталии	24,6	104,0	124	[39]
	24,8	192,6	118	[39]
1,2-Дибромэтан	25	30	311	[41]
Дибутиловый эфир *о*-фталевой кислоты	24,8	192,7	237	[39]
	25,0	148,1	244	[39]
	25,0	107,0	250	[39]
Диметиловый эфир *о*-фталевой кислоты	24,8	192,5	188	[39]
	24,9	148,1	185	[39]
	25,0	107,4	188	[39]
транс-1,2-Диметилциклогексаи	23,9	104,1	78,2	[39]
цис-1,3-Диметилциклогексаи	24,6	104,0	102	[39]
транс-1,3-Диметилциклогексаи	24,6	104,1	84,6	[39]
цис-1,4-Диметилциклогексан	23,9	104,0	87,6	[39]
транс-1,4-Диметилциклогексан	22,9	104,1	112	[39]
1,1-Диметилциклогексан	24,1	104,1	127	[39]
Диоксаи	24,6	104,1	117	[39]
	24,8	192,7	112	[39]
о-Дихлорбензол	24,4	104,1	132	[39]
	25	30	121	[40]
	25,0	192,3	131	[39]
	25,1	148,1	129	[39]
м-Дихлорбензол	25	30	123	[40]
п-Дихлорбензол	60	30	300	[40]
Дихлоруксусная кислота	24,8	192,0	201	[39]
	25,0	104,8	214	[39]
1,1-Дихлорэтаи	30,8	30	103	[41]
1,2-Дихлорэтаи	28,5	30	136	[41]
транс-Дихлорэтилен	19,8	31	356	[41]
цис-Дихлорэтилен	18,8	31	537	[41]
Дициклогексиламин	24,4	104,0	157	[39]
	24,6	192,7	146	[39]
Диэтиламин	24,4	104,1	35,5	[39]
	24,6	192,7	35,3	[39]
Диэтиловый эфир	24,4	104,1	44,5	[39]
Инден	24,6	104,2	133	[39]
	24,7	192,4	132	[39]
Коричный альдегид	24,8	104,2	96,0	[39]
Кротоновый альдегид	24,6	104,2	82,7	[39]
о-Ксилол	24,4	104,1	63,0	[39]
	24,6	192,6	63,0	[39]
м-Ксилол	25	1—15	78	[42]
Мезитилоксид	24,4	104,1	35,7	[39]
Метилаль	24,4	104,1	39,2	[39]
Метилацетат	24,4	104,2	36,4	[39]
	25	1	468	[42]
Метилбутират	24,5	104,1	35,3	[39]
Метилдисульфид	24,9	104,0	58,7	[39]
Метил иодистый	2	15	247	[43]

Продолжение табл. 7.7

Вещество	t, °C	f, *Мгц*	a/f^2, $10^{-17}\frac{сек^2}{см}$	Литература
Метил иодистый	24,4	104,0	309	[39]
	24,8	192,8	306	[39]
	25	1—4	820	[43]
	25,2	148,1	307	[39]
Метилен: бромистый	25	30	567	[41]
иодистый	25	30	250	[41]
хлористый	20	307	349	[44]
	20	482	177	[44]
	20	843	78,2	[44]
	24,8	192,8	550	[45]
	25,0	148,1	670	[39]
	25	30	1114	[41]
	25,2	7,54	1220	[45]
	25,4	107,4	779	[45]
Метиловый спирт	24,1	104,1	30,1	[39]
	24,9	192,4	30,6	[39]
Метиловый эфир трихлоруксусной кислоты	24,4	104,0	42,7	[39]
Метилсалицилат	24,5	104,0	57,5	[39]
Метилформамид	24,6	104,1	32,6	[39]
Метилформиат	24,1	104,0	49,3	[39]
Метилциклогексан	24,8	148,0	93,8	[39]
	24,8	192,3	92,9	[39]
	25,0	107,0	98,3	[39]
2-Метилциклогексанон	24,6	104,1	106	[39]
	25,0	192,1	100	[47]
Муравьиная кислота	17,5	4,0	2270	[48]
	20,5	9,8	1170	[48]
о-Нитроанизол	24,6	104,0	69,8	[39]
	24,8	192,1	69,0	[39]
Нитробензол	24,4	104,0	74,2	[39]
	24,8	192,3	74,1	[39]
	25,0	148,1	72,2	[39]
	25	1—15	80	[42]
Пропилацетат	24,4	104,1	42,9	[39]
	25,0	192,1	40,4	[39]
Изопропилацетат	24,6	104,1	62,0	[39]
	25,0	192,1	64,0	[39]
	—	0,55—2,0	87	[49]
Изопропилбензол	24,6	192,2	63,3	[39]
	25,1	106,8	65,3	[39]
Пропил: бромистый	2	15	39	[43]
иодистый	2	15	54	[43]
хлористый	2	15	42	[43]
Пропиловый спирт	22—28	15—280	75	[50]
Изопропиловый эфир	24,4	104,1	52,5	[39]
β-Пиколин	24,4	104,1	66,1	[39]
	24,8	192,6	64,0	[39]
Пиридин	0	0,25—1,0	334	[49]
Пропионовая кислота	24,4	104,1	131	[39]
Сероуглерод	20	0,10—0,45	6130	[49]
	20	1—10	6000	[51]
	24,8	104,0	2068	[39]
	25,5	189,2	776	[39]
	25,6	148,1	1210	[39]
3,5,5-Триметил-1-гексанол	25,2	107,4	294	[39]
	25,5	192,2	663	[39]
	25,7	148,1	269	[39]
1,1,1-Трихлорэтан	25,1	106,8	436	[39]
	25,0	148,1	434	[39]
	24,8	192,6	431	[39]

Продолжение табл. 7.7

Вещество	t, °C	f, *Мгц*	a/f^2, $10^{-17}\frac{сек^2}{см}$	Литература
Тиофен	20	307	775	[44]
	20	482	469	[44]
	20	843	160,0	[44]
Толуол	20	307	77,8	[44]
	20	482	78,5	[44]
	20	843	81,0	[44]
	20—25	1—75	80	[48]
	24,6	192,7	85,5	[39]
	25,2	106,8	85,6	[39]
	27	0,15	205	[52]
Уксусный ангидрид	24,6	104,0	57,7	[39]
Уксусная кислота	18	0,5	90 000	[53]
	18	67,5	158	[53]
	24,7	104,0	153	[39]
	24,8	192,0	139	[39]
Формамид	24,4	104,0	39,2	[39]
Фторбензол	25	30	278	[40]
Фурфуриловый спирт	24,4	104,0	90,5	[39]
	25,0	192,0	91,8	[39]
о-Хлоранилин	24,4	104,0	56,2	[39]
	24,8	192,1	53,7	[39]
Хлорбензол	24,4	104,0	147	[39]
	24,6	192,3	146	[39]
	25	1—4	124	[42]
	25	30	148	[40]
о-Хлорбензальдегид	24,4	104,0	106	[39]
Хлороформ	20	307	365	[44]
	20	482	310	[44]
	20	843	246,0	[44]
	24,4	103,5	363	[39]
	25,2	192,2	365	[39]
	20—25	1—10	400	[31]
о-Хлортолуол	24,4	104,0	72,1	[39]
	24,8	192,6	68,6	[39]
о-Хлорфенол	24,4	104,0	97,6	[39]
	25,0	192,2	93,9	[39]
2-Хлорэтанол	24,4	104,1	58,8	[39]
Циклогексан	24,8	192,3	182	[39]
	25,0	107,5	192	[39]
	25,0	148,0	190	[39]
Циклогексанон	24,6	104,0	72,8	[39]
	24,8	192,0	70,7	[39]
Циклогексен	25,0	107,0	103	[39]
	25,0	148,1	102	[39]
	25,5	191,8	101	[39]
Циклогексиламин	24,6	104,0	67,8	[39]
п-Цимол	24,4	104,1	52	[39]
	24,7	192,7	64,0	[39]
Четыреххлористый углерод	20	307	522	[44]
	20	482	480	[44]
	20	843	460,0	[44]
	20	1—100	500	[31]
	20	0,25—0,95	530	[49]
	24,6	148,1	556	[39]
	25,1	106,9	546	[39]
	25,1	192,8	545	[39]
Эпихлоргидрин	24,4	104,0	68,1	[39]
Этаноламин	24,8	104,0	166	[39]
	24,8	192,7	159	[39]
Этилацетат	22	69	37	[54]
	25	1	516	[42]

Продолжение табл. 7.7

Вещество	t, °C	f, *Мгц*	α/f^2, 10^{-17} $\frac{сек^2}{см}$	Литература
Этилбензол	24,4	104,1	56,0	[39]
	24,8	192,3	54,3	[39]
Этилбутират	24,4	104,0	38,6	[39]
Этилформиат	24,1	104,0	49,9	[39]
	23—28	3	138	[55]
	23—28	16	70	[55]
Этил: бромистый	2	15	61	[43]
	24,6	192,7	75,5	[39]
	24,8	148,1	78,4	[39]
	25,0	106,9	78,7	[39]
иодистый	2	15	40	[43]
Этилен бромистый	25,0	192,4	297	[39]
	25,1	106,9	303	[39]
	25,3	148,1	295	[39]
Этиловый спирт	20—25	1—220	54	[50]
Бензин	—	0,15—1,0	958	[49]
Глицерин	—18,8	30	12700	[58]
	20—27	0,15—4	2500	[56]
	21—23	6—21	1700	[57]
	32,8	30	1410	[58]
Льняное масло	20,5	3,1	1470	[58]
Оливковое масло	21—25	1—4	1250	[42]
Касторовое масло	18,6	3,16	10 900	[58]
	21,4	15,7	2100	[57]
	21,5	4,3	4500	[57]
	21,6	3,95	8400	[58]

Таблица 7.8

Коэффициент поглощения звука в растворах электролитов (0,1 *моль/л*) при 20°С и различных частотах [59]

Вещество	α, 10^{-8} *дб/м*		α, *дб/м*	α, 10^2 *дб/м*	
	10^4 *гц*	10^5 *гц*	10^6 *гц*	10^7 *гц*	10^8 *гц*
H_2O	0,0217	2,17	0,217	0,217	21,7
$Al_2(SO_4)_3$	⩾0,1	10,0	1,0	1,0	57
$BeSO_4$	1,75	4,8	0,29	0,29	28
$CaCrO_4$	—	⩾3,1	0,31	0,31	29
$CaSO_4$	1,77	162	2,3	0,39	31
$Ca(CH_3COO)_2$	⩾0,036	3,6	0,36	0,36	36
$CuSO_4$	0,282	23	0,43	0,39	39
$MgCrO_4$	⩾0,72	54,7	0,48	0,29	29
$MgSO_4$	3,92	247	0,9	0,3	29
MgS_2O_3	1,42	90	0,57	0,28	23,8
$MnSO_4$	0,55	51	5,2	0,74	29
$NiSO_4$	31,0	86	0,48	0,39	29
$ZnSO_4$	⩾0,05	5	0,5	0,5	36
H_2SO_4	—	—	0,24	0,24	24
$AlCl_3$	—	—	0,223	0,223	22,3
K_2SO_4	—	—	0,227	0,227	22,7
K_2CrO_4	—	—	0,226	0,226	22,6
$La(NO_3)_2$	—	—	—	0,5	34
Li_2CO_3	—	—	0,238	0,238	23,8
Li_2SO_4	—	—	0,229	0,229	22,9
Na_2CO_3	—	—	0,24	0,24	0,24
Na_3PO_4	—	⩾3,9	0,39	0,35	30,7
Na_2SO_4	—	—	0,25	0,25	25
$(NH_4)_2SO_4$	—	—	0,227	0,227	22,7

7.3 РАСПРОСТРАНЕНИЕ ЗВУКА В ТВЕРДЫХ ТЕЛАХ И РАСПЛАВАХ

Таблица 7.9

Скорость звука в твердых телах, *м/сек*

Вещество	t, °C	В стержне	Продольная	Поперечная	Литература
Алюминий	20	5080	6260	3080	[4]
	372	4342	—	—	[60]
Бериллий	—250	—	12660	8900	[61]
	27	—	12550	8830	[61]
Висмут	20	1790	2180	1100	[4]
Вольфрам	20	4310	5460	2620	[4]
Железо	20	5170	5850	3230	[4]
Золото	20	2030	3240	1200	[4]
Иридий	20	4790	—	—	[4]
Кадмий	20	2400	2780	1500	[4]
Константан	20	4300	5240	2640	[4]
Кремний	31,5	—	—	3770	[65]
Латунь	20	3490	4430	2123	[4]
Латунь (70% Cu — 30% Zn)	20	3760	—	—	[62]
Магний	—	4900	—	—	[63]
Манганин	20	3830	4660	2350	[4]
Марганец	—	3830	4660	—	[63]
Медь	20	3710	4700	2260	[4]
	385	3659	—	—	[60]
Нейзильбер	20	3580	4760	2160	[4]
Никель	20	4785	5630	2960	[4]
Олово	20	2730	3320	1670	[4]
Платина	20	2800	3960	1670	[4]
Свинец	20	1200	2160	700	[4]
Серебро	—	2640	3600	1590	[4]
Сталь	—	5050	6100	—	[63]
Сурьма	20	3400	—	—	[63]
Тантал	20	3350	—	—	[63]
Цинк	20	3810	4170	2410	[4]
Чугун	—	3850	4500	2400	[64]
Сплав Mg (50,6% Cd)	—	—	3660	1830	[66]
Германий, кристалл [110], ρ=5,35 *г/см³*	—	—	5390	3540	[65]
Висмут, кристалл, *L*-срез	4,2°K	—	2140	960	[67]
Свинец, кристалл [100]	1,5°K	—	2350	1266	[68]
Олово, кристалл [100]	1,5°K	—	3480	1900	[68]
Кварц, *x*-срез	—	5440	5720	—	[64]
АДР ($NH_4H_2PO_4$), *z*-срез под углом 45°	—	3280	4920	—	[63]
Сегнетова соль:					
y-срез под углом 45°	—	2470	—	—	[63]
x-срез под углом 45°	—	—	5360	—	[63]
Турмалин, *z*-срез	—	—	7540	—	[63]
CaF_2 (флюорит), *x*-срез	—	6740	—	—	[63]
NaCl (каменная соль), *x*-срез	—	4510	4780	—	[63]
NaBr, *x*-срез	—	2790	3200	—	[63]
KCl (сильвин), *x*-срез	—	4140	4380	—	[63]
KBr, *x*-срез	—	3380	3480	—	[63]
Стекло:					
кварцевое	—	5370	5570	3515	[4]
кронглас	—	5300	5660	3420	[4]
тяжелый кронглас	—	4710	5260	2960	[4]
легкий флинтглас	—	4550	4800	2950	[4]
тяжелый флинтглас	—	3490	3760	2220	[4]
Плексиглас	—	—	2670	1121	[4]
Полистирол	—	—	2350	1120	[4]

Продолжение табл. 7.9

Вещество	t, °С	В стержне	Продольная	Поперечная	Литература
Каучук	—	—	1479	—	
Эбонит	—	1570	2405	—	[4]
Пробка	—	500	—	—	[4]
Лед	—	3280	3980	1990	[4]
Фарфор	—	4884	5340	3120	[4]
Парафин	—	1460	—	—	[64]
Гранит	—	3950	—	—	[63]
Мрамор	—	3810	—	—	[63]
Сланец	—	4510	—	—	[63]
Слоновая кость	—	2200	—	—	[4]
Дерево (дуб)	—	4050	—	—	[64]

Таблица 7.10

Коэффициент поглощения звука в твердых телах (продольные волны, частота $f = 2 \div 100$ *кгц*)

Вещество	ρ, $г/см^3$	α, $10^2 \frac{дб}{м}$	α/f^2, $10^{-9} \frac{сек^2}{см}$	Литература
Алюминий	2,68	—	0,61	[1]
Магний	1,705	—	1,08	[1]
Сталь:				
вольфрамоуглеродистая	8,52	—	0,38	[1]
молибденовая	8,39	—	1,42	[1]
Кварц плавленый	2,2	—	1,23	[1]
Стекло:				
пирекс	2,32	—	4,89	[1]
оконное	2,42	—	6,35	[1]
свинцовое	2,48	—	3,21	[1]
зеркальное	—	3,3	—	[69]
Микалекс	3,34	—	2,03	[1]
Дерево (дуб)	—	2,4	—	[69]
Гипс	—	2,3	—	[69]
Штукатурка	—	3,3	—	[69]
Глина	—	1,5	—	[69]

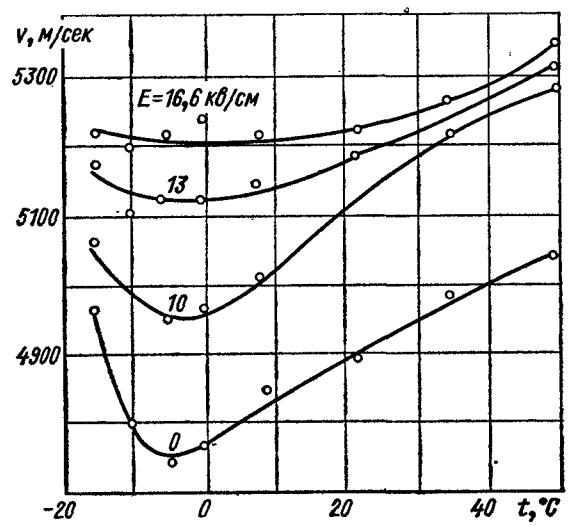


Рис. 7.18. Зависимость скорости звука в титанате бария от температуры в электрических полях с напряженностью E [70].

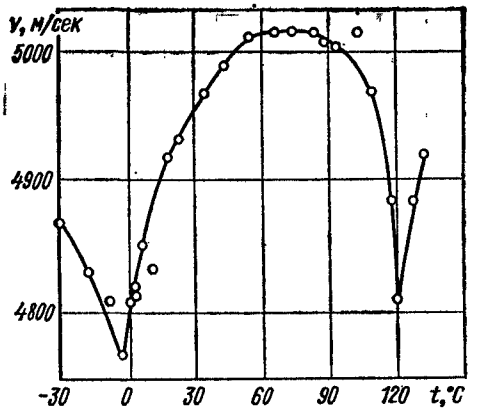


Рис. 7.19. Зависимость скорости звука в титанате бария от температуры [70].

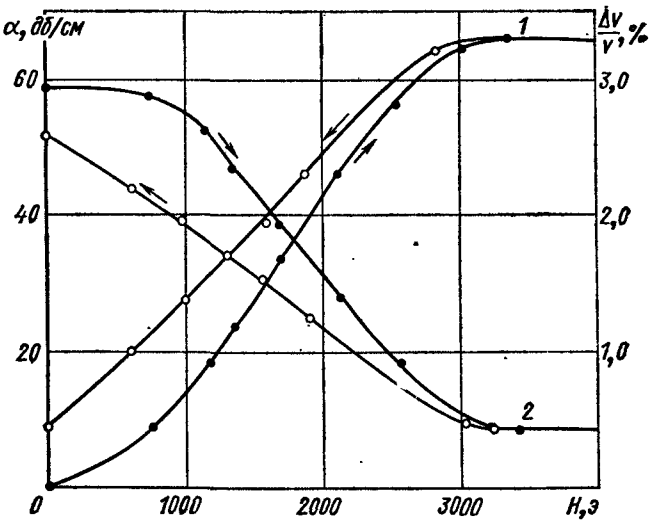


Рис. 7.20. Зависимость изменения скорости (*1*) и коэффициента поглощения (*2*) звука ($f = 3$ *Мгц*) в монокристалле никеля от напряженности магнитного поля (знак изменения поля указан стрелками) [71].

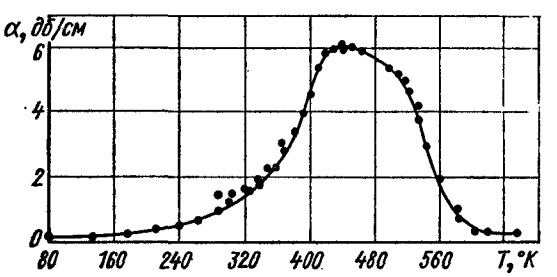


Рис. 7.21. Зависимость коэффициента поглощения звука (продольные волны, $f = 10$ *Мгц*) в монокристалле никеля от температуры [72].

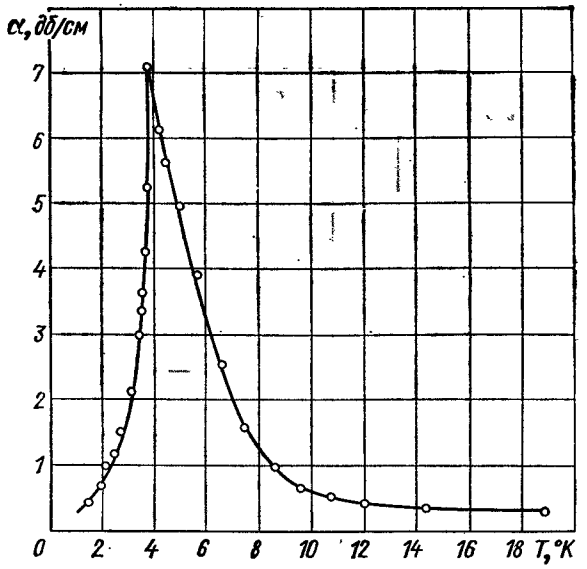


Рис. 7.22. Зависимость коэффициента поглощения звука в чистом олове от температуры ($f = 10{,}3$ *Мгц*) [73].

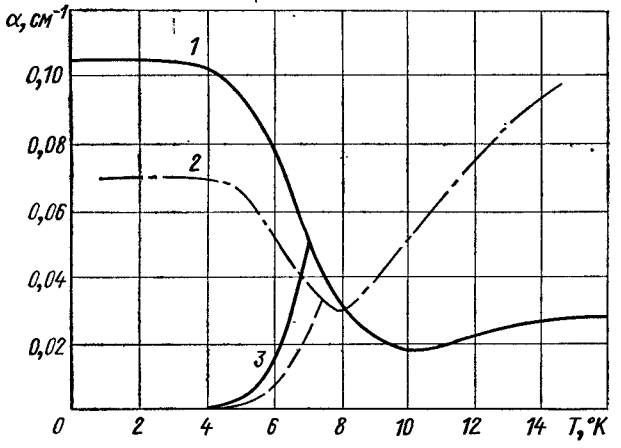
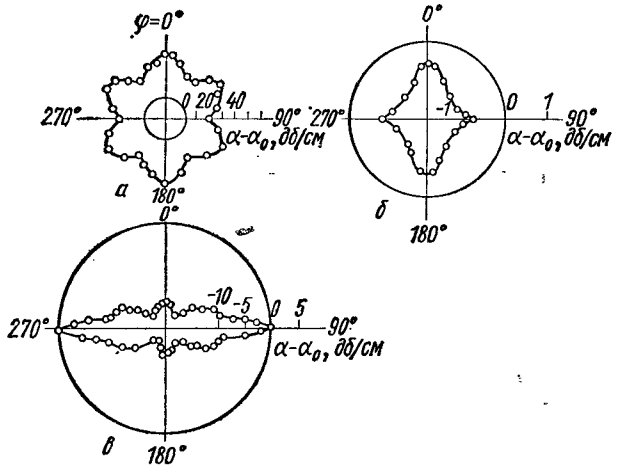


Рис. 7.23. Зависимость коэффициента поглощения звука в свинце от температуры [73]:
1 — продольные волны, $f = 26{,}3$ *Мгц*; *2* — поперечные волны, $f = 10{,}1$ *Мгц*; *3* — сверхпроводящее состояние.



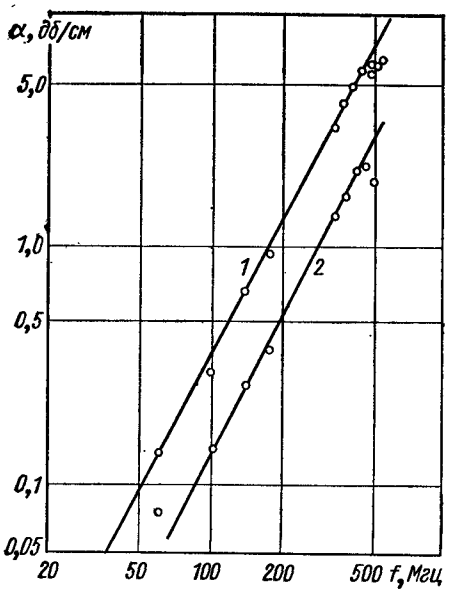


Рис. 7.25. Зависимость коэффициента поглощения звука в германии от частоты для продольной (*1*) и поперечной (*2*) волн [75].

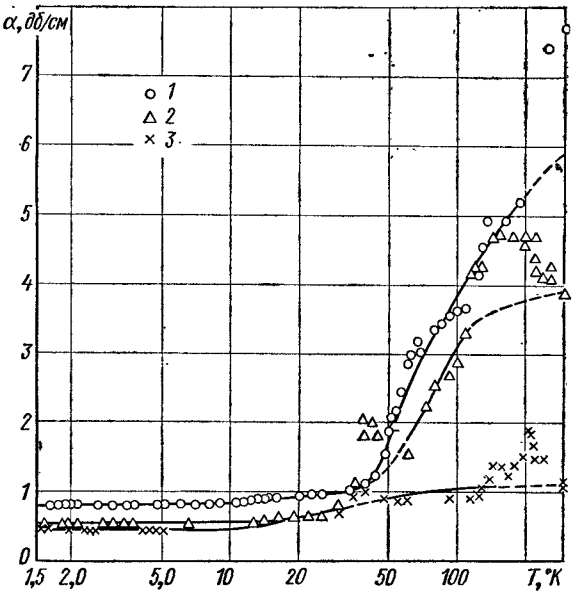
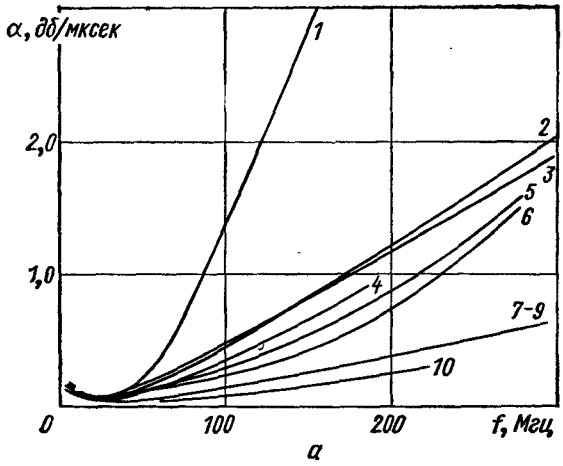


Рис. 7.26. Зависимость коэффициента поглощения звука в германии от температуры [75]:
1 — продольные волны ($f = 508$ *Мгц*); *2* — продольные волны ($f = 340$ *Мгц*); *3* — поперечные волны ($f = 333$ *Мгц*).

Рис. 7.24. Зависимость разности коэффициентов поглощения звука $\alpha_H - \alpha_0$ в монокристалле цинка ($T = 4{,}2°$ K), помещенном в магнитное поле ($H = 7000$ *э*), от угла поворота φ вектора **H** в плоскости, перпендикулярной к волновому вектору **k** звука ($f = 60$ *Мгц*) [74]:
а — вектор **k** направлен по кристаллографической оси [0001]; *б* — по $[10\bar{1}0]$; *в* — по $[1\bar{2}10]$ (α_0 — коэффициент поглощения без магнитного поля).



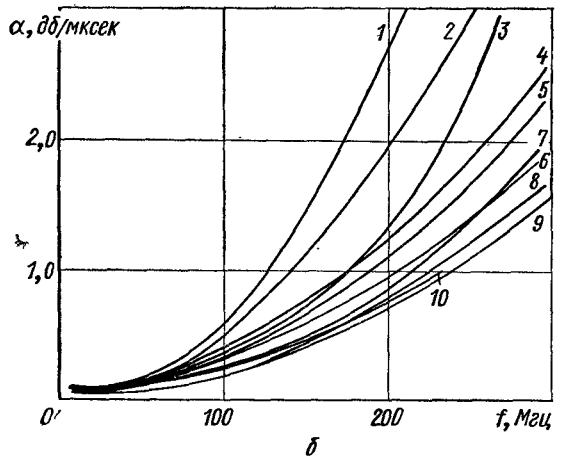


Рис. 7.27. Скорость изменения коэффициента поглощения звука в монокристалле германия от частоты для различных образцов (поперечные (*а*) и продольные (*б*) волны в направлении [100]) [76]:

Номер образца	Тип проводимости	Толщина образца, *см*	Проводимость, $(ом \cdot см)^{-1}$
1	*n*	0,5819	0,55
2	—	1,018	0,2
3	*n*	0,9073	40
4	*n*	1,292	46
5	*n*	0,7615	40
6	—	0,7465	0,25
7	*p*	0,8212	0,6
8	*n*	1,238	0,004
9	*p*	1,270	0,004
10	*n*	1,012	12,7

Таблица 7.11

Скорость звука в расплавах

Вещество	*t*, °C	v, $\frac{м}{сек}$	Δt, °C	$\frac{\Delta v}{\Delta t}$, $\frac{м}{сек \cdot град}$	Литература
Висмут	271	1635	271—365	—0,5	[77]
	271	1620	271—1000	—0,209	[79]
	271	1674	271—580	—0,18	[82]
			580—850	—0,22	
	280	1663	289—356	0	[78]
	280	1650	—	—	[80]
	287	1663	—	—	[83]
	300	1661	—	—	[83]
	305	1650	305—442	—0,8	[81]
Галлий	29,5	2740	30—50	—	[77]
	30	2873	30—80	—	[84]
	30	2872	30—275	—0,225	[85]
			275—850	—0,275	
Индий	156	2215	156—260	—0,5	[77]
	156	2315	156—950	—0,27	[86]
Кадмий	321	2220	321—360	—0,51	[77]
	321	2220	321—750	—0,618	[79]
	321	2256	321—700	—0,29	[85]
	335	2215	—	—	[87]
Калий	64	1880	64—160	—0,52	[81]
	100	1869	—	—0,53	[88]
Медь	1083	3270	1083—1400	—0,978	[89]
	1100	3450	1083—1500	—0,46	[82]
Натрий	98	2395	98—235	—0,3	[77]
	100	2526	—	—0,524	[88]
	100	2526	976—972	—0,524	[90]
	100	2652	100—700	—0,577	[91]
	100	2533	100—180	—0,66	[81]
Олово	232	2270	232—380	—0,7	[77]
	232	2420	232—1000	—0,211	[79]
	232	2464	232—335	—0,236	[92]
	232	2473	232—500	—0,247	[93]
	232	2480	232—560	—0,3	[82]
	240	2470	—	—	[80]
	247	2454	230—335	—0,2	[87]
	247	2454	—	—	[83]
	300	2455	—	—	[83]
Ртуть	20	1461	50—150	—0,7	[94]
	20	1452	20—100	—0,312	[95]
	20	1452	20—100	—0,37	[96]
	25	1450	25—204	—0,44	[97]
Рубидий	—	1260	33—160	—0,4	[98]
Свинец	317	1834	—	—0,3	[78]
	327	1790	327—380	—0,5	[77]
	327	1810	327—1000	—0,381	[79]
	328	1776	328—370	—0,277	[92]
	330	1820	327—800	—0,3	[82]
	340	1760	—	—	[80]
Сера	115	1350	—	—	[77]
Серебро	961	2770	961—1540	—0,466	[89]
	970	2710	961—1400	—0,41	[82]
Сурьма	630	1980	630—880	0	[99]
	630	1904	640—950	Изменяет знак	[82]
Таллий	302	1615	302—310	—	[77]
	305	1660	302—850	—0,231	[85]
Теллур	460	920	460—950	Изменяет знак	[85]
Цезий	—	967	29—130	—0,3	[98]
Цинк	419	2790	—	—	[98]
	419	2840	419—850	—0,268	[99]
	420	2850	419—850	—0,305	[85]
	450	2700	—	—	[80]

Таблица 7.12

Коэффициент поглощения звука в расплавах

Вещество	t, °C	Δt, °C	α/f^2, 10^{-17} $\frac{сек^2}{см}$	Литература	Вещество	t, °C	Δt, °C	α/f^2, 10^{-17} $\frac{сек^2}{см}$	Литература
Висмут	280	271—400	8,05	[80]	Натрий	100	100—150	12,1	[100]
	305	305—442	9,3	[97]		100	104—154	11,7	[101]
Галлий	30	30—80	1,58	[84]	Олово	240	232—400	5,63	[80]
	30	—	2,5	[103]	Ртуть	20	—13÷72	5,4	[103]
	56	56—438	2,9	[103]		24	—	5 5	[102]
Кадмий	360	—	14,5	[80]		25	25—204	6,2	[97]
Калий	74	84—150	29,9	[101]		25	25—130	6,7	[100]
	75	75—150	34,0	[100]	Свинец	340	327—400	9,4	[80]
					Цинк	419	—	3,7	[80]

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Eder F. X.** Moderne Messmethoden der Physik. Bd 1, Berlin, 1960.
2. **Petrallia S.** Nuovo cimento, Suppl., 1952, v. 9, N. 1, p. 1.
3. **Blythe A. R.** Acustica, 1965—1966, v. 16, p. 118.
4. **Бергман Л.** Ультразвук и его применение в науке и технике. Пер. с нем. М., Изд-во иностр. лит., 1956.
5. **Kneser H. O.,** Ergeb. exakt. Naturwiss., 1949, Bd 22, S. 121. **Nomoto O.** Ultrasonic Waves, Velocity and Absorption of Sound. Tokyo, 1940; **Petrallia S.** Nuovo cimento, 1951, v. 9, p. 1.
6. **Hardy H. C., Telfair D., Pielemeier W. H.** J. Acoust. Soc. America, 1942, v. 13, p. 226; **Pielemeier W. H., Hardy H. C.** J. Acoust. Soc. Amer., 1941, v. 13, p. 80.
7. **Краснушкин П. Е.,** «Докл. АН СССР», 1940, т. 27, с 214; Phys. Rev., 1944, v. 65, p. 190.
8. **Вайтонис В. В., Яковлев В. Ф.** «А куст. журн.», 1966, т. 12, с. 296.
9. **Lacam A., Noury J.** J. phys. et radium, 1953, v. 14, p. 272.
10. **Buckel W., Hilsch R.,** Z. Phys., 1957, Bd 149, S. 15.
11. **Van Itterbeek A.** J. Acoust. Soc. Amer., 1957, v. 29, p. 584.
12. **Henderson M. C., Peselnick L.** J. Acoust. Soc. Amer., 1957, v. 29, p. 1074.
13. **Greenspan M.** J. Acoust. Soc. Amer., 1956, v. 28, p. 644; **Перепечко И. И., Яковлев В. Ф.** «Применение ультраакустики к исследованию вещества», 1958, т. 6, с. 223.
14. **Galt J. K.** J. Chem. Phys., 1948, v. 16, p. 505.
15. **Gupill E. W., Hoyt C. K., Robinson D. K.** Canad. J. Phys., 1955, v. 33, p. 397.
16. **Beyer R. T.** J. Chem. Phys., 1951, v. 19, p. 788.
17. **Chase C. E.** Proc. Roy. Soc., 1953 (A), v. 220, p. 116; **Findlay J. C.** e.a. Phys. Rev., 1939, v. 56, p. 122.
18. **Van Itterbeek A., Forrez G., Teirlinck M.** Physica, 1957, v. 23, p. 905.
19. **Pellam J. R., Squire C. F.** Phys. Rev., 1947, v. 72, p. 1245; 1947, v. 71, p. 477.
20. **Пешков В. П.** «Докл. АН СССР», 1944, т. 45, с. 385; **Лифшиц Е. М., Пешков В. П.** «Докл. АН СССР», 1945, т. 4, с. 117.
21. **Михайлов И. Г.** Распространение ультразвуковых волн в жидкостях. М., Гостехиздат, 1949.
22. **Noury J., Lacam A.** J. phys. et radium, 1954, v. 15, p. 301.
23. **Chase C. E.** Proc. Roy. Soc., 1953 (A), v. 220, p. 116.
24. **Van Dael W. e.a.** Physica, 1965, v. 31, p. 1643.
25. **Van Itterbeek A.** Nuovo cimento, Suppl., 1950, v. 7, N 2, p. 218.
26. **Schaaffs W.** Z. Phys., 1939, Bd 114, S. 110; Z. phys. Chem., 1944, Bd 194, S. 28; Z. Naturforsch., 1948, Bd 3, S. 396.
27. **Parthasarathy S.** Proc. Indian Acad. Sci., 1935, v. A2, p. 497; 1936, v. A3, p. 285, 482, 519, 544; 1936, v. A4, p. 59, 213; Current Sci., 1937, v. 6, p. 213.
28. **Richards N. E., Brauner E. J., Bockris J. O. M.** Brit. J. Appl. Phys., 1955, v. 6, p. 387.
29. **Schaaffs W., Nutsch-Kuhnkies R.** Acustica, 1965—1966, v. 10, p. 66.
30. **Freyer E. B., Hubbard J. C., Andrens D. W. J.** Chem. Soc. Amer., 1929, v. 51, p. 759.
31. **Willard G. W.** J. Acoust. Soc. Amer., 1941, v. 12, p. 438.
32. **Zeifen N. Z.** Phys., 1938, Bd 108, S. 681.
33. **Barlow A. J., Yazgan E.** Brit. J. Appl. Phys., 1966, v. 17, p. 807.

33a. **Smith A. H., Lawson A. W.** J. Chem. Phys., 1954, v. 22, p. 35.

34. **Lagemann R. T., McMillan D. R., Woosley M.** J. Chem. Phys., 1948, v. 16, p. 247.
35. **Цветков В., Маринин В.** «Докл. АН СССР», 1949, т. 68, с. 49.
36. **Baccaredda M., Giacomini A.** Ricerca Scient., 1964, v. 16, p. 611; Atti Acad. Naz. Lincei, 1946, v. 1, p. 401.
37. **Weissler A.** J. Chem. Soc. Amer., 1948, v. 70, p. 1634.
38. **Pancholy M., Pande A., Parthasarathy S.** J. Scient. and Indust. Res., 1944, v. 3, p. 5; 1944, v. 3, p. 111; 1944, v. 3, p. 159, 263, 354.
39. **Heasell E. L., Lamb J.** Proc. Phys. Soc., 1956, v. 1369, p. 869.
40. **Sette D.** Colloquium over Ultrasonore Trillingen, Bruxelles, 1951, Kon. VI.
41. **Sette D.** J. Chem. Phys., 1951, v. 19, p. 1337.
42. **Pinkerton I. M. M.** Proc. Phys. Soc., 1949, v. 62, p. 129; **Verma G. S.** J. Chem. Phys., 1950, v. 18, p. 1352; **Willard G. W.** J. Acoust. Soc. Amer., 1941, v. 12, p. 438.
43. **Pellam J. R., Galt J. K.** J. Chem. Phys., 1946, v. 14, p. 608.
44. **Бердиев А. А., Лежнев Н. Б.** «Акуст. журн.», 1966, т. 22, с. 247.
45. **Andreal J. H.** Proc. Phys. Soc., 1957, v. B70, p. 71; 1956, v. 69, p. 869.
46. **Pinkerton I. M. M.** Nature, 1948, v. 162, p. 106; **Stolz A.** Strahlentherapie, 1949, Bd 79, S. 641.
47. **McSkimin H. J.** — J. Acoust. Soc. Amer., 1950, v. 22, p. 413.

48. **Бажулин П. А.** «Ж. эксперим. и теор. физ.», 1938, т. 8, с. 457.
49. **Lawley L. E., Reed R. D.** Acustica, 1955, v. 5, p. 316.
50. **Rapuano R. A.** Phys. Rev., 1947, v. 72, p. 78.
51. **Kishimoto T., Nomoto O.** Bull. Kobayashi Inst. Phys. Res., 1952, v. 2, p. 63.
52. **Matthias B. T.** Nature, 1948, v. 161, p. 325.
53. **Lamb J., Pinkerton I. M. M.** Proc. Roy. Soc., 1949, v. 199, p. 114.
54. **Bär R.** Helv. phys. acta, 1937, v. 10, p. 332.
55. **Parthasarathy S.** Current Sci., 1938, v. 6, p. 501.
56. **Möckel P.** Chem.-Ing. Techn., 1952, v. 24, p. 153.
57. **Бажулин П. А.** «Докл. АН СССР», 1941, т. 31, с. 113.
58. **Hunter J. L.** J. Acoust. Soc. Amer., 1941, v. 13, p. 36.
59. **Tamm K., Kurtze G. Kaiser.** Acustica, 1954, v. 4, p. 380.
60. **Salclanu C.** Compt. rend. Acad. Sci., 1961, v. 252, p. 3021.
61. **Overton W. C.** J. Chem. Phys., 1950, v. 18, p. 113.
62. **Bell J. F. W.** Philos. Mag., 1957, v. 2, p. 1113.
63. **Беранек Л.** Акустические измерения. Пер. с англ. М., Изд-во иностр. лит., 1952.
64. **Красильников В. А.** Звуковые и ультразвуковые волны в воздухе, воде и твердых телах. М., Физматгиз, 1960.
65. **McSkimin H. J.** J. Acoust. Soc. Amer, 1950, v. 22, p. 413.
66. **Smith C. S., Wallace W. E.** J. Chem. Phys., 1953, v. 21, p. 1120.
67. **Walther K.** Phys. Rev. Lett., 1966, v. 16, p. 642.
68. **Mason W. P., Bommel H. E.** J. Acoust. Soc. Amer., 1956, v. 28, p. 930.
69. **Техническая** энциклопедия. Справочник. Т. 10. М., ОГИЗ, 1933.
70. **Федотов И. И., Кузнецов В. Н.** «Применение ультраакустики к исследованию вещества», 1961, т. 14, с. 269.
71. **De Klerk J.** Proc. Phys. Soc., 1959, v. 73, p. 337.
72. **West F. G. J.** Appl. Phys., 1958, v. 29, p. 480.
73. **Mason W. P., Bömmel H. E.** J. Acoust. Soc. Amer., 1956, v. 28, p. 930.
74. **Галкин А. А., Королюк А. П.** «Ж. эксперим. и теор. физ.», 1960, т. 38, с. 1688.
75. **Dobbs E. R., Chick B. B., Truell R.** Phys. Rev. Lett., 1959, v. 3, p. 339.
76. **Granato A., Truell R.** J. Appl. Phys., 1956, v. 27, p. 1219.
77. **Kleppa O. J.** J. Chem. Phys., 1950, v. 18, p. 1331.
78. **Ходов З. Л.** «Физика металлов и металловедение», 1960, т. 10, с. 772.
79. **Пронин Л. А., Филиппов С. И.** «Изв. вузов. Черная металлургия», 1963, т. 5, с. 10.
80. **Plass K. G.** Akust Beih., 1963, Bd 13, S. 240.
81. **Илгунас В. И., Яронис Э. П.** «Акуст. журн.», 1966, т. 12, с. 145.
82. **Гитис М. Б., Михайлов И. Г.** «Акуст. журн.», 1965, т. 11, с. 434.
83. **Полоцкий И. Г., Ходов З. Л.** «Акуст. журн.», 1958, т. 4, с. 184.
84. **Hunter J. L., Hovan K. S.** J. Chem. Phys., 1964, v. 41, p. 4013.
85. **Гитис М. Б., Михайлов И. Г.** «Акуст. журн.», 1966, т. 12, с. 17.
86. **Webler G. M. B.** V Congr. Int. D'Acoust, D-37, Liege, 1965.
87. **Полоцкий И. Г., Таборов В. Ф., Ходов З. Л.** «Акуст. журн.», 1958, т. 5, с. 202.
88. **Abowitz G., Gordon R. B.** J. Chem. Phys., 1962, v. 37, p. 125.
89. **Пронин Л. А., Филиппов С. И.** «Изв. вузов. Черная металлургия», 1963, т. 11, с. 11.
90. **Pochapsky T. E., Quimby S. L.** Phys. Rev., 1950, v. 79, p. 892; 1951, v. 84, p. 553.
91. **Трелин Ю. С., Васильев И. В.** «Применение ультраакустики к исследованию вещества», 1961, т. 13, с. 3.
92. **Gordon R. B.** Acta metallurgica, 1959, v. 7, p. 1; Phys. Chem. Proc. Metall, 1958, v. 1, p. 461.
93. **McSkimin H. J.** J. Acoust. Soc. Amer., 1959, v. 31, p. 283.
94. **Kleppa O. J.** J. Chem. Phys., 1949, v. 17, p. 668.
95. **Полоцкий И. Г., Ходов З. Л.** «Вопр. физики металлов», 1955, т. 6, с. 70.
96. **Голик А. З., Классен И. Ф., Кучак Т. М.** «Акуст. журн.», 1961, т. 7, с. 258.
97. **Jarzynski J.** Proc. Phys. Soc., 1963, v. 81, p. 745.
98. **Schaafs W.** Acustica, 1956, v. 6, p. 382.
99. **Казаков Н. Б., Пронин Л. А., Филиппов С. И.** «Изв. вузов. Черная металлургия», 1964, т. 12, с. 11.
100. **Letcher S. V., Beyer R. T.** J. Acoust. Soc. Amer., 1963, v. 35, p. 1571.
101. **Jarzynski J., Litovitz T. A.** J. Chem. Phys., 1964, v. 41, p. 1290.
102. **Ringo C. R., Fitzgerald J. W., Hurdle B. G.** Phys. Rev., 1947, v. 72, p. 87.
103. **Stephens R. W. B.** Est. Rend. Scholle Int. Fisica, 1963, v. 27, p. 393.

ГЛАВА 8

ТЕРМОМЕТРИЯ

8.1. ТЕМПЕРАТУРНЫЕ ШКАЛЫ

Измерение температуры предполагает построение шкалы температур на основе воспроизведения ряда характерных явлений — реперных или основных точек, присвоения этим точкам численных значений и создания интерполяционных приборов, реализующих шкалу между ними.

XI Генеральная конференции по мерам и весам (1960 г.) приняла (см. приложение в работе [1]) в качестве основной «Международную термодинамическую температурную шкалу (Кельвина)» с обозначением температуры T и единицы измерения °К (градус Кельвина). Эта шкала базируется на законах термодинамики идеального газа и использует в качестве основной температуру тройной точки воды, которой присвоено значение 273,16°К. Термин «основнаи шкала» означает, согласно положению XI Генеральной конференции что должна «существовать возможность в конечном счете отнести к этой шкале результат любого измерения температуры».

Помимо шкалы Кельвина в ряде случаев применяют производные от нее шкалы с единым обозначением температуры t: 1) шкала Цельсия (единица измерения °С): $t = T - 273{,}15$; 2) шкала Реомюра (°R): $t = 0{,}8T - 218{,}52$; 3) шкала Фаренгейта (°F): $t = 1{,}8\,T - 459{,}67$.

Экспериментальные трудности реализации международной термодинамической шкалы привели к созданию ряда практических шкал, реперные точки которых приводятся в табл. 8.1. В области низких температур иногда используют в качестве дополнительных точки перехода в сверхпроводящее состояние. Некоторые из них даны в табл. 8.2.

Таблица 8.1

Значения некоторых температурных реперных точек [2—5]
Все точки, кроме тройных, при давлении $P = 101325$ *н/м²*.

Номер точки	Вещество: Формула	Вещество: Название	Точка	Температура: °К	Температура: °С
1	^4He	Гелий-4	λ-точка	2,18	—270,97
2	^4He	»	Кипения	4,21	—268,94
3	*n*—H_2	Параводо-род	Тройная	13,81	—259,34
4	*н*—H_2	Водород (нормаль-ный)	»	13,97	—259,18
5	*n*—H_2	Параводо-род	Кипения	20,27	—252,88
6	*н*—H_2	Водород (нормаль-ный)	»	20,39	—252,76
7	Ne	Неон	Тройная	24,56	—248,59
8	Ne	»	Кипения	27,07	—246,08
9	N_2	Азот	Фазового перехода	35,5	—237,65
10	O_2	Кислород	То же	43,7	—229,45
11	O_2	Кислород	Тройная	54,36	—218,79
12	N_2	Азот	»	63,14	—210,01
13	N_2	»	Кипения	77,35	—195,80
14	O_2	Кислород	»	90,18	—182,97
15	C_5H_{12}	Изопентан	Затвердевания	113,5	—159,65
16	C_7H_{14}	Метил-циклогексан	»	146,85	—126,30
17	$C_4H_{10}O$	Эфир ди-этиловый	»	156,85	—116,30
18	CS_2	Сероуглe-род	»	161,55	—111,60
19	C_7H_8	Толуол	»	178,05	—95,10
20	CO_2	Углекис-лый газ	Возгонки	194,65	—78,50
21	$CHCl_3$	Хлороформ	Затвердевания	209,65	—63,50
22	Hg	Ртуть	Затвердевания	234,28	—38,87
23	H_2O	Вода	»	273,15	0,00
24	H_2O	Вода	Тройная	273,16	0,0100
25	$C_{12}H_{10}O$	Эфир ди-фениловый	»	300,03	26,88
26	$Na_2SO_4 \times 10H_2O$	Натрий сер-нокислый десятиводный	Фазового перехода	305,43	32,38
27	H_2O	Вода	Кипения	373,15	100,0
28	$C_7H_6O_2$	Бензойная кислота	Тройная	395,51	122,36
29	In	Индий	Затвердевания	429,76	156,61
30	$C_{10}H_8$	Нафталин	Кипения	491,15	218,0
31	Sn	Олово	Затвердевания	505,05	231,9
32	$C_{14}H_{10}O$	Бензофенон	Кипения	579,05	305,9
33	Cd	Кадмий	Затвердевания	594,18	321,03
34	Pb	Свинец	»	600,53	327,3
35	Hg	Ртуть	Кипения	629,73	356,58
36	Zn	Цинк	Затвердевания	692,65	419,505
37	S	Сера	Кипения	717,75	444,60
38	Sb	Сурьма	Затвердевания	903,65	630,5
39	Al	Алюминий	»	934	660,1
40	Ag	Серебро	»	1234	960,8
41	Au	Золото	Затвердевания	1336	1063
42	Cu	Медь	»	1356	1083
43	Ni	Никель	»	1726	1453
44	Co	Кобальт	»	1765	1492
45	Pd	Палладий	»	1825	1552
46	Pt	Платина	»	2042	1769
47	Rh	Родий	»	2233	1960
48	Ir	Иридий	»	2716	2443
49	W	Вольфрам	»	3653	3380

Таблица 8.2

Температура перехода некоторых веществ в сверхпроводящее состояние [3]

Формула	Название	Температура перехода, °К	Напряженность критического магнитного поля, *э*	Формула	Название	Температура перехода, °К	Напряженность критического магнитного поля, *э*
Hf	Гафний	0,37	—	Tl	Таллий	2,392	171
Ti	Титан	0,39	100	In	Индий	3,37—3,42	270
Ru	Рутений	0,47	46	Sn	Олово	3,74	304
Zr	Цирконий	0,55	46,6	Hg	Ртуть	4,160	410
Cd	Кадмий	0,56—0,65	27	Ta	Тантал	4,38	360
Os	Осмий	0,71	65	V	Ванадий	4,89	1340
Rh	Родий	0,9	—	MoC	Карбид молиб-дена	5,76	—
Zn	Цинк	0,93	50				
Ga	Галлий	1,103	48	NbC	Карбид ниобия	6	—
U	Уран	1,1	—	Pb	Свинец	7,22	800
Al	Алюминий	1,175	106	Nb	Ниобий	8,7—8,9	1960
Re	Рений	1,70	188	$MoGa_2$	—	9,5	—

Зависимость некоторых основных точек от давления P выражается следующим образом (P_0=760 *мм рт. ст.*) [5]:

1. Точка кипения кислорода ($660 \leqslant P \leqslant 860$ *мм рт. ст.*)
$t = -182{,}970 + 9{,}530\,(P/P_0 - 1) - 3{,}70\,(P/P_0 - 1)^2 + 2{,}2\,(P/P_0 - 1)^3$, °С.

2. Точка затвердевания воды (h — глубина под поверхностью смеси льда с водой, *мм*):

$$t = 0{,}0099\,(1 - P/P_0) - 0{,}7 \cdot 10^{-6} \cdot h, \text{ °С.}$$

3. Точка кипения воды ($660 \leqslant P \leqslant 860$ *мм рт. ст.*):

$$t = 100{,}0 + 28{,}012\,(P/P_0 - 1) - 11{,}64\,(P/P_0 - 1)^2 + 7{,}1\,(P/P_0 - 1)^3, \text{ °С.}$$

Практические шкалы, в отличие от термодинамической, зависят от свойств термометрического тела, что приводит к появлению таких характеристик шкалы, как воспроизводимость и точность. Кроме того, в некоторых случаях практические шкалы основаны на приближенно выполняющихся закономерностях; возникает понятие инструментальной температуры (магнитной, цветовой и т. п.), отличной от истинных значений шкалы.

Международная практическая температурная шкала (Цельсия) 1948 г. (МПТШ — 48, символ t, °С) принята IX Генеральной конференцией по мерам и весам [2] и определена для температур выше точки кипения кислорода (t = —182,97° С). Шкала Кельвина (T, °К) определена в МПТШ — 48 соотношением $T = t + 273{,}15$. МПТШ — 48 принята взамен аналогичной шкалы 1927 г.; различие между ними представлено в табл. 8.3.

МПТШ — 48 реализуется в интервале от —182,97 до +630 5° С платиновым термометром сопротивления (см. табл. 8.7) по реперным точкам 14, 23, 27 и 37 в табл. 8.1; в интервале от 630,5 до 1063°С термопарой Pt — Pt + 10% Rh (табл. 8.17) по реперным точкам 38; 40 и 41 в табл. 8.1; для температур выше 1063°С спектральным пирометром с реперной точкой 41 в табл. 8.1.

Низкотемпературная практическая шкала принята в СССР для измерения температур от 10 до 90,19°К и реализуется платиновым термометром сопротивления (см. табл. 8.8) [7].

Гелиевая шкала T_{58} рекомендована в 1958 г. Консультативным комитетом по термометрии для измерения температур от 0,5 до 5°К; реализуется с помощью ^{4}Не-конденсационного термометра (см. табл. 8.26) [8].

Гелиевая шкала T_{62} рекомендована в 1962 г. Консультативным комитетом по термометрии для измерений от 0,2 до 3,380°К; реализуется конденсационным ^{3}Не-термометром (см. табл. 8.25) [9].

Таблица 8.3

Отклонение $\Delta t = t - t'$ практических шкал МПТШ — 27 (t') и МПТШ — 48 (t) [6]

t, °С	630,5	650	700	750	800	850	900	950	960,8	1000	1050	1063
Δt. °С	0,00	0,08	0,24	0,35	0,42	0,43	0,40	0,32	0,30	0,20	0,05	0,00

Международная практическая температурная шкала 1968 г. (МПТШ — 68 рекомендована в 1968 г. XIII Генеральной конференцией по мерам и весам для внедрения во всех странах взамен МПТШ—48 и низкотемпературных шкал (выше 13,8°К)[10]. В настоящее время (1975 г.) в СССР продолжает действовать МПТШ—48, а низкотемпературная практическая шкала расширена (в отличие от МПТШ—48) на область низких температур, вплоть до тройной точки водорода (T = 13,8°К) [11].

В этой области температур шкала реализуется платиновым термометром сопротивления по пяти реперным точкам с помощью таблицы стандартных значений относительного сопротивления, подобной табл. 8.8. Отклонения МПТШ—68 от значений табл. 8.8 знакопеременны в пределах от —0,02 до +0,04°К. В области МПТШ—48 отклонения более значительны (1,5°С при 1000°С) и достигают нескольких градусов, что вызвано новыми, уточненными значениями температур реперных точек. В области температур выше 1063°С МПТШ—68 реализуется аналогично МПТШ—48, но установлено новое значение постоянной C_2 = 0,014388 в формуле Планка для распределения энергии в спектре излучения черного тела [12].

МПТШ—68 устанавливает наименование «кельвин» вместо «градус Кельвина» и обозначение К вместо °К.

8.2 ЖИДКОСТНО-СТЕКЛЯННЫЕ ТЕРМОМЕТРЫ

Жидкостно-стеклянная термометрия основана на законах теплового расширения; область применения ограничена снизу температурой затвердевания, а сверху — температурой кипения термометрической жидкости или температурой размягчения стекла. Жидкостные термометры позволяют измерять температуру в интервале от —200 до +1200°С. В табл. 8.4 и 8.5 приведены сведения о свойствах важнейших термометрических жидкостей и стекол, используемых при изготовлении термометров.

Если термометр не полностью погружен в среду, температура которой измеряется, необходимо показания термометра увеличить на $\Delta t = l\alpha(t_1 - t_2)$, где α — температурный коэффициент объемного расширения термометрической жидкости в стекле (см. табл. 8.4); l — длина выступающего столбика в градусах шкалы; t_1 — показания термометра; t_2 — положение середины выступающего столбика на шкале термометра.

Таблица 8.4

Свойства термометрических жидкостей [13—15]

Жидкость	Рабочая температура, °С		Температурный коэффициент объемного расширения при 18 °С, $град^{-1}$	Марка стекла	Жидкость	Рабочая температура, °С		Температурный коэффициент объемного расширения при 18 °С, $град^{-1}$	Марка стекла
	от	до				от	до		
Пентан	—130	36	0,00145	Иена 16'''	Амальгама таллия	—66	—	0,000179	—
Петролейный эфир	—130	—	0,00115	Иена 16'''				0,000155	Иена 16'''
Сероуглерод	—113	46	0,00121	—	*n*-Ксилол	—53	139	0,00101	—
Спирт этиловый	—100	77	0,00104	Иена 16'''	Ртуть	—35	350	0,000179	Кварц
Спирт метиловый	—90	60	0,00122	—				0,000181	—
								0,000158	ГОСТ 1224—41
Спирт амиловый	—80	137	0,00093	—				0,000157	Иена 16'''
Толуол	—90	100	0,00103	Иена 16'''				0,000159	Иена 59'''
Ацетон	—93	56	0,00131	—	Галлий	29,8	1200	—	Кварц

Таблица 8.5

Свойства термометрических стекол [16]

Стекло	Температура размягчения, °С	Температурный коэффициент объемного расширения, $град^{-1}$
Боросиликатное, типа Иена 16'''	300	0,000156
Боросиликатное, типа Иена 59'''	500	0,000163
Термометрическое, ГОСТ 1224—41	300	0,000180
Кварцевое	900	0,000180

Таблица 8.6

Воспроизводимость МПТШ—48 ртутными термометрами [16]

Стекло	Температура, °С							
	0	50	100	150	200	250	300	500
Иена 16'''	0	0,12	0	—0,01	0,29	1,1	2,7	—
Иена 59'''	0	0,03	0	0,23	0,84	2,2	4,4	26,0

8.3. ТЕРМОМЕТРЫ СОПРОТИВЛЕНИЯ

Измерение температуры по электрическому сопротивлению металлического проводника основано на плавной и стабильной зависимости удельного сопротивления от температуры. Нижний предел температур, измеряемых термометрами сопротивления, определяется чувствительностью, которая, вообще говоря, уменьшается с понижением температуры. Верхний предел обусловлен появлением нестабильности сопротивления по мере приближения к температуре плавления или рекристаллизации проводника. В табл. 8.7—8.10 приведены градуировочные значения платинового, медного и титанового термометров сопротивления в относительных единицах.

Таблица 8.7

Стандартная градуировочная таблица платинового термометра сопротивления [13, 17]

Приведены значения электрического сопротивления платины ГОСТ 8588—57 в относительных единицах. Погрешность равна $\pm (0{,}3 + 6 \cdot 10^{-3} t)$ для $t < 0$ °С и $\pm (0{,}3 + 4{,}5 \cdot 10^{-3} t)$ для $t > 0$ °С.

t, °С	0	2	4	6	8
—200	0,1728	—	—	—	—
—190	0,2165	0,2078	0,1991	0,1903	0,1816
—180	0,2598	0,2512	0,2425	0,2339	0,2252
—170	0,3029	0,2943	0,2875	0,2771	0,2685
—160	0,3456	0,3371	0,3285	0,3200	0,3114
—150	0,3880	0,3795	0,3711	0,3626	0,3541
—140	0,4302	0,4218	0,4133	0,4049	0,3965
—130	0,4721	0,4637	0,4553	0,4470	0,4386
—120	0,5138	0,5054	0,4971	0,4888	0,4804
—110	0,5552	0,5469	0,5387	0,5304	0,5221
—100	0,5965	0,5882	0,5800	0,5717	0,5635
—90	0,6375	0,6293	0,6211	0,6129	0,6047
—80	0,6784	0,6702	0,6621	0,6539	0,6457
—70	0,7191	0,7110	0,7028	0,6947	0,6865
—60	0,7596	0,7515	0,7434	0,7355	0,7272
—50	0,8000	0,7920	0,7839	0,7758	0,7677
—40	0,8403	0,8322	0,8242	0,8162	0,8081
—30	0,8804	0,8724	0,8644	0,8563	0,8483
—20	0,9204	0,9124	0,9044	0,8964	0,8884
—10	0,9603	0,9523	0,9443	0,9363	0,9284
—0	1,0000	0,9921	0,9881	0,9762	0,9682
+0	1,0000	1,0079	1,0159	1,0238	1,0317
10	1,0396	1,0475	1,0554	1,0633	1,0712
20	1,0791	1,0870	1,0949	1,1028	1,1107
30	1,1185	1,1264	1,1343	1,1421	1,1500
40	1,1578	1,1657	1,1735	1,1813	1,1891
50	1,1970	1,2048	1,2126	1,2204	1,2282

Продолжение табл. 8.7

t, °C	0	2	4	6	8
60	1,2360	1,2438	1,2516	1,2594	1,2672
70	1,2749	1,2827	1,2905	1,2982	1,3060
80	1,3137	1,3215	1,3292	1,3370	1,3447
90	1,3524	1,3602	1,3679	1,3756	1,3833
100	1,3910	1,3987	1,4064	1,4141	1,4218
110	1,4295	1,4371	1,4448	1,4525	1,4601
120	1,4678	1,4755	1,4831	1,4907	1,4984
130	1,5060	1,5137	1,5213	1,5289	1,5365
140	1,5441	1,5517	1,5593	1,5669	1,5745
150	1,5821	1,5897	1,5973	1,6049	1,6124
160	1,6200	1,6276	1,6351	1,6427	1,6502
170	1,6578	1,6653	1,6728	1,6803	1,6879
180	1,6954	1,7029	1,7104	1,7179	1,7254
190	1,7329	1,7404	1,7479	1,7554	1,7628
200	1,7703	1,7778	1,7852	1,7927	1,8002
210	1,8076	1,8151	1,8225	1,8299	1,8374
220	1,8448	1,8522	1,8596	1,8670	1,8744
230	1,8818	1,8892	1,8966	1,9040	1,9114
240	1,9188	1,9261	1,9335	1,9409	1,9482
250	1,9556	1,9629	1,9703	1,9776	1,9850
260	1,9923	1,9996	2,0069	2,0142	2,0216
270	2,0289	2,0362	2,0435	2,0508	2,0580
280	2,0653	2,0726	2,0799	2,0872	2,0944
290	2,1017	2,1089	2,1162	2,1234	2,1307
300	2,1379	2,1451	2,1524	2,1596	2,1668
310	2,1740	2,1812	2,1885	2,1957	2,2029
320	2,2100	2,2172	2,2244	2,2316	2,2388
330	2,2459	2,2531	2,2662	2,2684	2,2745
340	2,2817	2,2888	2,2960	2,3031	2,3102
350	2,3173	2,3245	2,3316	2,3387	2,3458
360	2,3529	2,3600	2,3671	2,3741	2,3812
370	2,3883	2,3954	2,4024	2,4095	2,4165
380	2,4236	2,4306	2,4377	2,4447	2,4517
390	2,4588	2,4658	2,4728	2,4798	2,4868
400	2,4938	2,5008	2,5078	2,5148	2,5218
410	2,5288	2,5358	2,5427	2,5497	2,5567
420	2,5636	2,5706	2,5775	2,5845	2,5914
430	2,5983	2,6053	2,6122	2,6191	2,6260
440	2,6329	2,6398	2,6467	2,6536	2,6605
450	2,6674	2,6743	2,6812	2,6880	2,6949
460	2,7018	2,7086	2,7155	2,7223	2,7292
470	2,7360	2,7429	2,7497	2,7565	2,7633
480	2,7701	2,7770	2,7838	2,7906	2,7974
490	2,8041	2,8108	2,8176	2,8244	2,8312
500	2,8380	2,8448	2,8516	2,8583	2,8651
510	2,8718	2,8786	2,8853	2,8920	2,8988
520	2,9055	2,9122	2,9189	2,9256	2,9323
530	2,9391	2,9457	2,9525	2,9591	2,9658
540	2,9725	2,9792	2,9858	2,9925	2,9991
550	3,0058	3,0124	9,0191	3,0257	3,0323
560	3,0390	3,0456	3,0512	3,0588	3,0655
570	3,0721	3,0787	3,0853	3,0918	3,0984
580	3,1050	3,1116	3,1182	3,1247	3,1313
590	3,1374	3,1444	3,1510	3,1575	3,1641
600	3,1706	3,1771	3,1837	3,1901	3,1967
610	3,2032	3,2097	3,2162	3,2227	3,2292
620	3,2357	3,2422	3,2487	3,2551	3,2616
630	3,2680	3,2745	3,2810	3,2874	3,2939
640	3,3003	3,3068	3,3132	3,3196	3,3260
650	3,3325	—	—	—	—

Таблица 8.8

Стандартная градуировочная таблица платинового термометра сопротивления при низких температурах [1, 13, 18]

Приведены значения электрического сопротивления платины ГОСТ 8588—57 в относительных единицах; R_0 — сопротивление при 0°С.

$\frac{R(T)}{R_0}$	T, °К	$\frac{R(T)}{R_0}$	T, °К	$\frac{R(T)}{R_0}$	T, °К
0,0008	10,2175	0,0054	21,4067	0,032	36,5242
0,0009	11,0876	0,0056	21,6323	0,034	37,2723
0,0010	11,8013	0,0058	21,8520	0,036	38,0003
0,0011	12,4085	0,0060	22,0662	0,038	38,7015
0,0012	12,9382	0,0062	22,2751	0,040	39,4033
0,0013	13,4091	0,0064	22,4791	0,042	40,0812
0,0014	13,8338	0,0066	22,6784	0,044	40,7453
0,0015	14,2208	0,0068	22,8733	0,046	41,3968
0,0016	14,5774	0,0070	23,0641	0,048	42,0370
0,0017	14,9089	0,0072	23,2510	0,050	42,6663
0,0018	15,2193	0,0074	23,4343	0,052	43,2859
0,0019	15,5118	0,0076	23,6143	0,054	43,8962
0,0020	15,7887	0,0078	23,7911	0,056	44,4987
0,0021	16,0519	0,0080	23,9647	0,058	45,0927
0,0022	16,3032	0,0082	24,1354	0,060	45,6791
0,0023	16,5434	0,0084	24,3033	0,062	46,2586
0,0024	16,7737	0,0086	24,4684	0,064	46,8316
0,0025	16,9950	0,0088	24,6307	0,066	47,3985
0,0026	17,2083	0,0090	24,7905	0,068	47,9597
0,0027	17,4141	0,0092	24,9479	0,070	48,5156
0,0028	17,6131	0,0094	25,1032	0,072	49,0664
0,0029	17,8061	0,0096	25,2563	0,074	49,6124
0,0030	17,9985	0,0098	25,4074	0,076	50,1539
0,0031	18,1754	0,0100	25,5565	0,078	50,6913
0,0032	18,3521	0,0110	26,2737	0,080	51,2247
0,0033	18,5239	0,0120	26,9503	0,082	51,7544
0,0034	18,6912	0,0130	27,5924	0,084	52,2805
0,0035	18,8544	0,0140	28,2046	0,086	52,8013
0,0036	19,0199	0,0150	28,7911	0,088	53,3225
0,0037	19,1698	0,0160	29,3537	0,090	53,8387
0,0038	19,3221	0,0170	29,8963	0,092	54,3520
0,0039	19,4711	0,0180	30,4213	0,094	54,8626
0,0040	19,6270	0,0190	30,9294	0,096	55,3708
0,0041	19,7601	0,0200	31,4224	0,098	55,8766
0,0042	19,9004	0,0210	31,9014	0,100	56,3807
0,0043	20,0328	0,0220	32,3679	0,110	58,8687
0,0044	20,1736	0,0230	32,8234	0,120	61,3143
0,0045	20,3006	0,0240	33,2685	0,130	63,7247
0,0046	20,4372	0,0250	33,7035	0,140	66,1073
0,0047	20,5654	0,0260	34,1288	0,150	68,4697
0,0048	20,6912	0,0270	34,5471	0,160	71,2485
0,0049	20,8149	0,0280	34,9555	0,170	73,1417
0,0050	20,9366	0,0290	35,3577	0,174	74,0709
0,0052	21,1751	0,0300	35,7528	0,182	75,9256

Таблица 8.9

Стандартная градуировочная таблица медного термометра сопротивления [13, 17]

Приведены значения электрического сопротивления в относительных единицах. Погрешность $\pm (0{,}3+6\cdot10^{-3}\,t)$

t, °C	0	2	4	6	8	t, °C	0	2	4	6	8
—50	0,7870	—	—	—	—	70	1,2982	1,3067	1,3152	1,3238	1,3323
—40	0,8296	0,8211	0,8126	0,8040	0,7955	80	1,3408	1,3493	1,3578	1,3664	1,3749
—30	0,8722	0,8637	0,8552	0,8466	0,8381	90	1,3834	1,3919	1,4004	1,4090	1,4175
—20	0,9148	0,9063	0,8978	0,8892	0,8807	100	1,4260	1,4345	1,4430	1,4516	1,4601
—10	0,9574	0,9489	0,9404	0,9318	0,9233	110	1,4686	1,4771	1,4856	1,4942	1,5027
—0	1,0000	0,9915	0,9830	0,9744	0,9659	120	1,5112	1,5197	1,5282	1,5368	1,5453
+0	1,0000	1,0085	1,0170	1,0256	1,0341	130	1,5538	1,5623	1,5708	1,5794	1,5879
10	1,0426	1,0511	1,0596	1,0682	1,0767	140	1,5964	1,6049	1,6134	1,6220	1,6305
20	1,0852	1,0937	1,1022	1,1108	1,1193	150	1,6390	1,6475	1,6560	1,6646	1,6731
30	1,1278	1,1363	1,1448	1,1534	1,1619	160	1,6816	1,6901	1,6986	1,7072	1,7157
40	1,1704	1,1789	1,1874	1,1960	1,2045	170	1,7242	1,7327	1,7412	1,7498	1,7583
50	1,2130	1,2215	1,2300	1,2386	1,2471	180	1,7668	—	—	—	—
60	1,2556	1,2641	1,2726	1,2812	1,2897						

Таблица 8.10

Градуировочная таблица титанового термометра сопротивления [1]

Приведены значения относительного сопротивления.

t, °C	0	10	20	30	40
—200	0,15763	—	—	—	—
—100	0,55284	0,50900	0,46516	0,42194	0,37907
—0	1,00000	0,95433	0,90899	0,86398	0,81917
+0	1,00000	1,04601	1,09234	1,13899	1,18583
100	1.46094	—	—	—	—

t, °C	50	60	70	80	90
—100	0,33751	0,29721	0,25833	0,22150	0,18783
—0	0,77456	0,73003	0,68566	0,64135	0,59707
+0	1,23286	1,27973	1,32643	1,37235	0,41741

8.4. ТЕРМОЭЛЕКТРИЧЕСКАЯ ТЕРМОМЕТРИЯ

Термоэлектрическая термометрия основана на измерении термо-э. д. с. E, возникающей под действием температуры в термопаре — проводнике, состоящем из двух разнородных электродов. Термо-э.д.с. термопары определяется объемной термо-э.д.с., вызванной термодиффузией носителей тока; контактной термо-э. д. с., возникающей в стыке электродов в результате различия температурных зависимостей контактной разности потенциалов, и термо-э.д.с., вызванной эффектом увлечения электронов фононами. В зависимости от температуры и материала термопары любая из этих составляющих может дать наибольший вклад, поэтому зависимость E от температуры, вообще говоря, является немоногонной.

На практике обычно используют участки монотонной зависимости, поэтому один из пределов пригодности определяется чувствительностью термопары dE/dT. Как правило, другой предел обусловлен появлением нестабильности в температурной зависимости термо-э.д.с. либо под действием температур, близких к температуре плавления, рекристаллизации или интенсивного химического взаимодействия со средой, либо в результате недостаточной для измерения данной температуры очистки материалов термопары. Эксплуатационные характеристики термопар, градуировочные таблицы которых приведены в настоящей главе, даны в табл. 8.11.

Таблица 8.11

Эксплуатационные характеристики термопар [14, 19—21]

Термопара	Рабочий интервал, °К	Максимальная термо-э.д.с., *мв*	Погрешность измерений, *град*	Рабочая среда
Медь — константан	2—700	21	± (0,1—1)	Окислительная или воздух
Cu — Au + 2,11 ат % Co	2—300	10	± (0,03—0,7)	Воздух
Cu — Ag + 0,37 ат. % Au	25—300	0,2	±0,05	»
Железо — константан	70—1300	58	±1	Окислительная
Хромель — алюмель	220—1600	52	± (5—10)	Окислительная или вейтральная
Хромель — копель	220—1100	66	± (3—5)	То же
Pt — Pt+10% Rh	250—2100	17	± (1—3,5)	Воздух
Никель — нихром	250—1500	49	±1	Окислительная
W + 5% Re — W + 20% Re	400—2800	30	± (0,1—4)	Вакуум или нейтральная
НК — СА	570—1300	13	±2	Воздух
Pt — Pt+30% Rh	570—2100	14	± (3,3—6)	»
Вольфрам — молибден	1300—2800	8	±5	Вакуум или нейтральная

Ниже приведены градуировочные таблицы различных термопар. При использовании этих таблиц следует учесть, что большинство из них (исключая стандартные) отличаются от реальных ввиду некоторого непостоянства состава электродов; приведены средние значения, и их отклонения от реальных должны быть получены экспериментальной привязкой в нескольких реперных точках (см. табл. 8.1) Градуировочные таблицы стандартных термопар соответствуют реальным в пределах указываемой рабочей погрешности.

Таблица 8.12

Градуировочные значения термо-э.д.с. низкотемпературных термопар, *мкв*, при температуре свободных концов 0°С [3]

T, °К	Cu — константан	Cu — Au+2,11 ат. % Co	Cu — Ag+ +0,37 ат. % Au	*T*, °К	Cu — константан	Cu — Au+2,11 ат. % Co	Cu — Ag+ +0,37 ат. % Au
2	0,70	2,04	—	110	1351,9	2930,5	64,2
4	2,76	8,04	—	120	1566,5	3312,6	71,1
6	6,14	17,76	—	130	1793,1	3700,6	77,9
8	10,79	37,01	—	140	2031,8	4093,2	84,3
10	16,64	47,57	—	150	2282,4	4489,6	90,7
12	23,66	67,23	—	160	2545,0	4888,7	96,9
14	31,78	89,78	—	170	2819,8	5290,1	103,1
16	40,97	115,0	—	180	3106,7	5693,3	109,1
18	51,22	142,9	—	190	3405,2	6098,1	115,9
20	62,48	173,1	—	200	3714,1	6504,0	123,4
25	95,18	259,5	0,65	210	4033,2	6910,6	128,9
30	134,1	360,1	2,05	220	4362,7	7317,6	135,3
35	178,6	472,6	4,25	230	4702,2	7724,8	142,2
40	228,5	595,8	7,40	240	5051,9	8131,9	148,8
45	283,3	728,3	11,15	250	5411,7	8538,8	155,5
50	342,8	869,0	15,25	260	5781,5	8945,3	162,3
60	474,7	1171,1	24,10	270	6161,5	9351,1	169,7
70	622,4	1495,4	33,20	280	6551,7	9756,3	177,1
80	784,4	1836,3	41,70	290	6952,1	10160	184,8
90	960,5	2190,3	49,5	300	7362,9	10564	192,9
100	1149,8	2555,8	51,7				

Таблица 8.13

Градуировочная таблица термо-э.д.с. термопары железо — коистаитан, *мв* [22]
Температура свободных коицов 0°С; состав коистаитана: 60% Cu—40%Ni.

$t_г$ °С	0	10	20	30	40	50	60	70	80	90
—200	—8,27	—	—	—	—	—	—	—	—	—
—100	—4,82	—5,25	—5,66	—6,06	—6,44	—6,80	—7,14	—7,46	—7,75	—8,02
—0	0,00	—0,52	—1,03	—1,53	—2,03	—2,52	—3,00	—3,47	—3,93	—4,38
+0	0,00	0,52	1,05	1,58	2,12	2,66	3,20	3,75	4,30	4,85
100	5,40	5,95	6,51	7,07	7,63	8,19	8,75	9,31	9,87	10,43
200	10,99	11,56	12,12	12,68	13,23	13,79	14,36	14,91	15,47	16,02
300	16,57	17,13	17,68	18,23	18,78	19,33	19,88	20,43	20,98	21,53
400	22,08	22,63	23,18	23,73	24,28	24,83	25,38	25,93	26,48	27,04
500	27,59	28,15	28,71	29,27	29,83	30,40	30,97	31,54	32,12	32,70
600	32,28	33,87	34,46	35,05	35,65	36,25	36,85	37,45	38,06	38,68
700	39,30	39,93	40,56	41,19	41,83	42,47	43,11	43,76	44,41	45,06
800	45,71	46,36	47,02	47,68	48,33	48,99	49,65	50,31	50,96	51,62
900	52,28	52,87	53,47	54,06	54,65	55,25	55,84	56,43	57,03	57,64
1000	58,33	—	—	—	—	—	—	—	—	—

Таблица 8.14

Стандартиая градуировочная таблица термо-э.д.с. термопары хромель — алюмель, *мв* [13, 19]
Допустимая погрешность ±0,16 *мв* при $t<300$°С и $\pm [0{,}16+2\cdot10^{-4}\ (t-300)]$ при $t>300$°С. Электроды: хромель НХ 9,5, алюмель НМц АК 2-2-1. Температура свободных коицов 0°С.

t, °С	0	10	20	30	40	50	60	70	80	90
—0	—0,00	—0,39	—0,77	—1,14	—1,50	—1,86	—	—	—	—
+0	0,00	0,40	0,80	1,20	1,61	2,02	6,43	2,85	3,26	3,68
100	4,10	4,51	4,92	5,33	5,73	6,13	2,53	6,93	7,33	7,73
200	8,13	8,53	8,93	9,34	9,74	10,15	10,56	10,97	11,38	11,80
300	12,21	12,62	13,04	13,45	13,87	14,29	14,71	15,13	15,55	15,97
400	16,39	16,82	17,24	17,66	18,08	18,50	18,93	19,36	19,78	20,21
500	20,64	21,07	21,49	21,92	22,34	22,77	23,20	23,62	24,05	24,48
600	24,90	25,33	25,75	26,18	26,60	27,03	27,45	27,87	28,29	28,72
700	29,14	29,56	29,99	30,40	30,82	31,23	31,65	32,07	32,48	32,90
800	33,31	33,71	34,12	34,54	43,94	35,35	35,75	36,16	36,56	36,96
900	37,36	37,76	38,16	38,56	38,96	39,35	39,75	40,14	40,53	40,92
1000	41,31	41,70	42,08	42,47	42,86	43,24	43,62	44,00	44,38	44,76
1100	45,14	45,52	45,89	46,27	46,64	47,01	47,38	47,75	48,12	48,43
1200	48,85	49,21	49,57	49,95	50,29	50,65	51,00	51,36	51,71	52,06
1300	52,41	—	—	—	—	—	—	—	—	—

Таблица 8.15

Стандартиая градуировочная таблица термо-э.д.с. термопары хромель — копель, *мв* [13, 19]
Допустимая погрешность ±0,2 *мв* при $t<300$°С и $\pm [0{,}2+0{,}6\cdot10^{-4}\ (t-300)]$ *мв* при $t>300$°С. Электроды: хромель НХ 9,5, копель МНМц 43-0,5. Температура свободных концов 0°С.

t, °С	0	10	20	30	40	50	60	70	80	90
—0	0,00	—0,64	—1,27	—1,89	—2,50	—3,11	—	—	—	—
+0	0,00	0,65	1,31	1,98	2,66	3,35	4,05	4,76	5,48	6,21
100	6,95	7,69	8,43	9,18	9,93	10,69	11,46	12,24	13,03	13,84
200	14,65	15,47	16,30	17,12	17,95	18,77	19,60	20,43	21,25	22,08
300	22,91	23,75	24,60	25,45	26,31	27,16	28,20	28,89	29,76	30,62
400	31,49	32,35	33,22	34,08	34,95	35,82	36,68	37,55	38,42	39,29
500	40,16	41,03	41,91	42,79	43,68	44,56	45,45	46,34	47,23	48,12
600	49,02	49,90	50,78	51,66	52,53	53,41	54,28	55,15	56,03	56,90
700	57,77	58,64	59,51	60,37	61,24	62,11	62,97	63,83	64,70	65,56
800	66,42	—	—	—	—	—	—	—	—	—

Таблица 8.16

Градуировочная таблица термо-э.д.с. термопары медь — константан*, *мв* [22]

Константан — сплав 60% Cu—40% Ni. Температура свободных концов 0°С.

t, °С	0	10	20	30	40	50	60	70	80	90
0	0,000	0,389	0,787	1,194	1,610	2,035	2,467	2,908	3,357	3,813
100	4,277	4,749	5,227	5,712	6,204	6,703	7,208	7,719	8,236	8,759
200	9,288	9,823	10,363	10,909	11,459	12,015	12,575	13,140	13,710	14,285
300	14,864	15,447	16,035	16,626	17,222	17,821	18,425	19,032	19,642	20,255
400	20,874	—	—	—	—	—	—	—	—	—

* Низкотемпературную часть градуировки см. в табл. 8.12.

Таблица 8.17

Стандартная градуировочная таблица термо-э. д. с. термопары Pt—Pt + 10% Rh, *мв* [19]

Допустимая погрешность $\pm 0{,}01$ *мв* при $t < 300$°С и $\pm[0{,}01 + 2{,}5 \cdot 10^{-5}(t - 300)]$ *мв* при $t > 300$°С.

Температура свободных концов 0°С.

t, °С	0	2	4	6	8
—20	—0,109	—	—	—	—
—10	—0,055	—0,066	—0,077	—0,087	—0,098
—0	0,000	—0,011	—0,022	—0,033	—0,044
+0	0,000	0,011	0,022	0,034	0,045
10	0,057	0,069	0,080	0,092	0,103
20	0,115	0,127	0,139	0,151	0,164
30	0,176	0,188	0,200	0,212	0,225
40	0,237	0,250	0,263	0,275	0,288
50	0,301	0,314	0,327	0,340	0,353
60	0,366	0,379	0,392	0,406	0,419
70	0,432	0,446	0,459	0,473	0,486
80	0,500	0,514	0,527	0,541	0,555
90	0,569	0,583	0,597	0,611	0,626
100	0,640	0,654	0,669	0,683	0,698
110	0,712	0,727	0,742	0,756	0,771
120	0,786	0,801	0,816	0,831	0,846
130	0,861	0,876	0,891	0,907	0,922
140	0,937	0,952	0,968	0,983	0,999
150	1,014	1,030	1,046	1,061	1,077
160	1,093	1,109	1,125	1,141	1,157
170	1,173	1,189	1,205	1,222	1,238
180	1,254	1,271	1,287	1,304	1,320
190	1,337	1,354	1,370	1,387	1,404
200	1,421	1,438	1,455	1,472	1,490
210	1,507	1,525	1,542	1,560	1,577
220	1,595	1,613	1,630	1,648	1,665
230	1,683	1,701	1,718	1,736	1,754
240	1,771	1,789	1,807	1,824	1,842
250	1,860	1,878	1,896	1,913	1,931
260	1,949	1,967	1,985	2,003	2,021
270	2,039	2,057	2,075	2,093	2,111
280	2,129	2,147	2,165	2,183	2,201
290	2,219	2,237	2,255	2,274	2,292
300	2,310	2,328	2,346	2,365	2,383
310	2,401	2,419	2,438	2,456	2,475
320	2,493	2,511	2,530	2,548	2,567
330	2,585	2,603	2,622	2,640	2,659
340	2,677	2,696	2,715	2,734	2,753
350	2,772	2,791	2,809	2,828	2,846
360	2,865	2,884	2,903	2,921	2,940
370	2,959	2,978	2,997	3,016	3,035

Продолжение табл. 8.17

t, °С	0	2	4	6	8
380	3,053	3,072	3,901	3,110	3,129
390	3,148	3,167	3,186	3,205	3,224
400	3,243	3,262	3,281	3,300	3,319
410	3,338	3,357	3,376	3,395	3,414
420	3,434	3,453	3,472	3,491	3,510
430	3,530	3,549	3,568	3,587	3,606
440	3,626	3,645	3,664	3,683	3,702
450	3,722	3,741	3,760	3,779	3,798
460	3,818	3,837	3,856	3,875	3,895
470	3,915	3,935	3,954	3,974	3,993
480	4,013	4,033	4,052	4,071	4,091
490	4,111	4,131	4,151	4,170	4,190
500	4,210	4,230	4,249	4,268	4,289
510	4,309	4,329	4,349	4,369	4,388
520	4,408	4,428	4,448	4,467	4,487
530	4,507	4,527	4,547	4,567	4,587
540	4,607	4,627	4,647	4,667	4,687
550	4,707	4,727	4,747	4,768	4,788
560	4,808	4,828	4,848	4,869	4,889
570	4,909	4,929	4,949	4,970	4,990
580	5,010	5,030	5,050	5,071	5,091
590	5,111	5,131	5,151	5,172	5,192
600	5,212	5,233	5,253	5,274	5,294
610	5,314	5,335	5,356	5,376	5,397
620	5,417	5,438	5,458	5,479	5,500
630	5,520	5,541	5,561	5,582	5,603
640	5,623	5,644	5,664	5,685	5,706
650	5,726	5,747	5,768	5,789	5,809
660	5,830	5,850	5,871	5,892	5,913
670	5,934	5,955	5,976	5,997	6,018
680	6,039	6,060	6,081	6,102	6,123
690	6,144	6,165	6,186	6,207	6,228
700	6,249	6,270	6,292	6,313	6,334
710	6,354	6,375	6,397	6,418	6,439
720	6,460	6,481	6,503	6,524	6,545
730	6,566	6,588	6,609	6,630	6,652
740	6,673	6,694	6,716	6,737	6,759
750	6,780	6,802	6,823	6,845	6,866
760	6,887	6,909	6,930	6,952	6,973
770	6,994	7,016	7,037	7,059	7,080
780	7,102	7,124	7,146	7,167	7,189
790	7,211	7,232	7,254	7,276	7,298
800	7,320	7,342	7,364	7,385	7,407
810	7,429	7,451	7,473	7,494	7,516
820	7,538	7,560	7,582	7,604	7,626
830	7,648	7,670	7,692	7,714	7,736
840	7,758	7,780	7,802	7,824	7,846

Продолжение табл. 8.17

t, °C	0	2	4	6	8
850	7,868	7,890	7,192	7,935	7,957
860	7,979	8,001	8,023	8,046	8,068
870	8,090	8,112	8,135	8,158	8,180
880	8,202	8,224	8,247	8,270	8,292
890	8,314	8,336	8,359	8,381	8,404
900	8,486	8,449	8,472	8,494	8,516
910	8,538	8,560	8,583	8,606	8,629
920	8,651	8,673	8,696	8,718	8,741
930	8,764	8,787	8,809	8,832	8,855
940	8,878	8,900	8,923	8,946	8,969
950	8,992	9,015	9,037	9,060	9,083
960	9,106	9,129	9,152	9,175	9,197
970	9,220	9,243	9,266	9,289	9,312
980	9,335	9,358	9,381	9,404	9,427
990	9,450	9,473	9,496	9,520	9,543
1000	9,566	9,589	9,612	9,636	9,658
1010	9,682	9,705	9,728	9,752	9,775
1020	9,798	9,821	9,844	9,868	9,891
1030	9,915	9,938	9,961	9,985	10,008
1040	10,032	10,055	10,078	10,102	10,125
1050	10,149	10,173	10,196	10,220	10,243
1060	10,267	10,291	10,314	10,338	10,361
1070	10,385	10,409	10,432	10,456	10,479
1080	10,503	10,527	10,551	10,574	10,598
1090	10,622	10,646	10,670	10,693	10,717
1100	10,741	10,765	10,789	10,812	10,836
1110	10,860	10,884	10,908	10,932	10,956
1120	10,980	11,004	11,028	11,052	11,076
1130	11,100	11,124	11,148	11,172	11,196
1140	11,220	11,244	11,268	11,293	11,317
1150	11,341	11,365	11,390	11,414	11,438
1160	11,462	11,486	11,510	11,535	11,559
1170	11,583	11,607	11,632	11,656	11,681
1180	11,705	11,729	11,754	11,778	11,803
1190	11,827	11,852	11,876	11,901	11,926
1200	11,950	11,974	11,998	12,022	12,046
1210	12,070	12,094	12,118	12,142	12,166
1220	12,190	12,214	12,238	12,262	12,286

Продолжение табл. 8.17

t, °C	0	2	4	6	8
1230	12,311	12,335	12,359	12,383	12,407
1240	12,431	12,455	12,479	12,503	12,527
1250	12,551	12,575	12,599	12,623	12,647
1260	12,671	12,695	12,719	12,743	12,767
1270	12,791	12,815	12,839	12,863	12,887
1280	12,911	12,935	12,959	12,984	13,008
1290	13,032	13,056	13,080	13,105	13,129
1300	13,153	13,177	13,201	13,226	13,250
1310	13,274	13,298	13,322	13,346	13,370
1320	13,394	13,418	13,442	13,467	13,491
1330	13,515	13,539	13,563	13,587	13,611
1340	13,635	13,659	13,683	13,707	13,731
1350	13,755	13,779	13,803	13,827	13,851
1360	13,875	13,899	13,923	13,947	13,971
1370	13,995	14,019	14,043	14,068	14,092
1380	14,116	14,140	14,164	14,188	14,212
1390	14,236	14,260	14,284	14,308	14,332
1400	14,356	14,380	14,404	14,428	14,452
1410	14,476	14,500	14,524	14,548	14,572
1420	14,596	14,620	14,644	14,669	14,693
1430	14,717	14,741	14,765	14,789	14,813
1440	14,837	14,861	14,885	14,909	14,933
1450	14,957	14,981	15,005	15,029	15,053
1460	15,077	15,101	15,125	15,149	15,173
1470	15,197	15,221	15,245	15,270	15,294
1480	15,318	15,342	15,366	15,390	15,414
1490	15,438	15,462	15,486	15,510	15,534
1500	15,558	15,582	15,606	15,630	15,654
1510	15,678	15,702	15,726	15,750	15,774
1520	15,798	15,822	15,846	15,871	15,895
1530	15,919	15,943	15,967	15,991	16,015
1540	16,039	16,063	16,087	16,111	16,135
1550	16,159	16,183	16,207	16,231	16,255
1560	16,279	16,203	16,327	16,351	16,375
1570	16,399	16,423	16,447	16,472	16,496
1580	16,520	16,544	16,568	16,592	16,616
1590	16,640	16,664	16,688	16,712	16,736
1600	16,760	—	—	—	—

Таблица 8.18

Стандартная градуировочная таблица термо-э. д. с. термопары НК — СА*. *мв* [13]

Допустимая погрешность ±0,15 *мв*. Температура свободных концов 0°С.

t, °C	0	10	20	30	40	50	60	70	80	90
300	0,38	0,48	0,58	0,68	0,80	0,92	1,04	1,17	1,31	1,45
400	1,60	1,75	1,92	2,08	2,25	2,43	2,62	2,81	3,00	3,20
500	3,41	3,60	3,79	3,98	4,17	4,37	4,56	4,76	4,96	5,16
600	5,36	5,56	5,77	5,97	6,17	6,38	6,58	6,78	6,98	7,19
700	7,39	7,59	7,79	8,00	8,20	8,40	8,60	8,60	9,01	9,21
800	9,41	9,61	9,82	10,02	10,22	10,42	10,62	10,82	11,02	11,22
900	11,42	11,62	11,82	12,02	12,21	12,41	12,61	12,80	13,00	13,20
1000	13,39	—	—	—	—	—	—	—	—	—

* В интервале 0—80°С термо-э. д. с. практически равна 0.

Таблица 8.19

Градуировочная таблица термо-э. д. с. термопары W + 5% Re — W + 20% Re, *мв* [13, 21, 23]

Температура свободных концов 0°С.

t, °С	0	25	50	75	100	125	150	175	200	225	250	275
0	0,00	0,25	0,6	0,9	1,3	1,6	1,9	2,3	2,6	3,0	3,4	3,8
300	4,2	4,6	5,0	5,4	5,8	6,2	6,6	7,0	7,5	7,9	8,4	8,8
600	9,3	9,7	10,1	10,5	11,0	11,4	11,8	12,2	12,6	13,0	13,4	13,8
900	14,2	14,6	15,0	15,4	15,9	16,3	16,7	17,1	17,5	17,9	18,3	18,7
1200	19,0	19,4	19,8	20,1	20,5	20,8	21,1	21,4	21,7	22,0	22,3	22,6
1500	22,9	23,2	23,5	23,8	24,0	24,3	24,6	24,8	25,1	25,4	25,6	25,9
1800	26,2	26,4	26,6	26,9	27,1	27,3	27,6	27,8	28,0	28,3	28,5	28,8
2100	29,0	29,2	29,4	29,6	29,9	30,1	30,3	30,5	30,7	30,9	31,2	—
2400	31,5	—	32,0	—	32,3	—	32,7	—	33	—	—	—

Таблица 8.20

Стандартная градуировочная таблица термо-э. д. с. термопары Pt + 6%Rh — Pt + 30% Rh, *мв* [13, 19]

Допустимая погрешность градуировки $\pm[0{,}01 + 3{,}3 \cdot 10^{-6}(t - 300)]$, *мв*. Температура свободных концов 0 °С.

t, °С	0	5	*t*, °С	0	5
300	0,456	0,471	680	2,330	2,364
310	0,487	0,503	690	2,398	2,432
320	0,520	0,536	700	2,467	2,501
330	0,553	0,570	710	2,536	2,571
340	0,587	0,604	720	2,607	2,642
350	0,622	0,640	730	2,678	2,714
360	0,658	0,676	740	2,750	2,786
370	0,695	0,714	750	2,823	2,860
380	0,733	0,752	760	2,897	2,934
390	0,772	0,792	770	2,927	3,010
400	0,812	0,832	780	3,048	3,086
410	0,853	0,874	790	3,142	3,162
420	0,895	0,916	800	3,201	3,240
430	0,938	0,960	810	3,279	3,318
440	0,983	1,005	820	3,358	3,398
450	1,028	1,051	830	3,438	3,478
460	1,074	1,097	840	3,519	3,559
470	1,121	1,145	850	3,600	3,641
480	1,169	1,193	860	3,682	3,723
490	1,218	1,243	870	3,765	3,807
500	1,268	1,293	880	3,849	3,891
510	1,319	1,345	890	3,934	3,976
520	1,371	1,397	900	4,019	4,062
530	1,424	1,451	910	4,105	4,148
540	1,478	1,505	920	4,192	4,235
550	1,532	1,560	930	4,279	4,323
560	1,588	1,616	940	4,368	4,412
570	1,645	1,673	950	4,457	4,502
580	1,702	1,731	960	4,547	4,592
590	1,761	1,791	970	4,637	4,682
600	1,821	1,851	980	4,728	4,774
610	1,881	1,912	990	4,820	4,866
620	1,943	1,974	1000	4,913	4,959
630	2,005	2,036	1010	5,006	5,053
640	2,068	2,100	1020	5,100	5,147
650	2,132	2,165	1030	5,195	5,242
660	2,198	2,231	1040	5,290	5,338
670	2,264	2,297	1050	5,386	5,434

Продолжение табл. 8.20

t, °С	0	5	*t*, °С	0	5
1060	5,483	5,532	1500	10,274	10,333
1070	5,581	5,630	1510	10,392	10,451
1080	5,679	5,728	1520	10,511	10,570
1090	5,777	5,826	1530	10,630	10,689
1100	5,876	5,926	1540	10,749	10,809
1110	5,976	6,026	1550	10,869	10,929
1120	6,077	6,127			
1130	6,178	6,229	1560	10,989	11,049
1140	6,280	6,331	1570	11,109	11,169
1150	6,382	6,433			
1160	6,485	6,536	1580	11,229	11,289
1170	6,588	6,640	1590	11,350	11,410
1180	6,692	6,744			
1190	6,797	6,849	1600	11,471	11,531
1200	6,902	6,955	1610	11,592	11,652
1210	7,008	7,061			
1220	7,114	7,167	1620	11,713	11,773
1230	7,221	7,274	1630	11,834	11,895
1240	7,328	7,382			
1250	7,436	7,490	1640	11,956	12,017
1260	7,544	7,598	1650	12,078	12,139
1270	7,653	7,707			
1280	7,765	7,817	1660	12,200	12,261
1290	7,872	7,927	1670	12,323	12,384
1300	7,982	8,037			
1310	8,093	8,148	1680	12,445	12,506
1320	8,204	8,259	1690	12,568	12,629
1330	8,315	8,371			
1340	8,427	8,483	1700	12,691	12,752
1350	8,540	8,596	1710	12,814	12,875
1360	8,653	8,709			
1370	8,766	8,823	1720	12,937	12,998
1380	8,880	8,937	1730	13,060	13,122
1390	8,994	9,051			
1400	9,109	9,166	1740	13,184	13,245
1410	9,224	9,281	1750	13,307	13,369
1420	9,339	9,397			
1430	9,455	9,513	1760	13,431	13,493
1440	9,571	9,629	1770	13,555	13,617
1450	9,687	9,745			
1460	9,804	9,862	1780	13,679	13,741
1470	9,921	9,979	1790	13,803	13,865
1480	10,038	10,097			
1490	10,156	10,215	1800	13,927	—

Таблица 8.21

Градуировочные значения термо-э. д. с. некоторых высокотемпературных термопар, *мв* [4, 24]

Температура свободных концов термопары никель — нихром 20°С, остальных термопар — 0°С.

t, °С	Никель — нихром	Нихром — константан	Ir+10%Ru — Ir+ +10%Rh	Ir—Ir+ +60%Rh	Ir—Ir+ +10%Ru	W—Mo	*t*, °С	Никель — нихром	Нихром — константан	Ir+10%Ru — Ir+ +10%Rh	Ir—Ir+ +60%Rh	Ir—Ir+ +10%Ru	W—Mo
100	3,25	5,62	—	—	—	—	1100	44,80	—	6,83	6,05	2,73	—0,9
200	7,30	11,08	—	1,10	—	—	1200	48,95	—	7,38	6,60	3,00	—0,5
300	11,40	19,09	1,66	1,65	—	—	1300	—	—	7,91	7,11	3,24	+0,5
400	15,50	26,48	—	2,20	—	—	1400	—	—	8,41	7,65	3,47	0,6
500	19,80	34,18	—	2,75	—	—	1500	—	—	8,89	8,20	3,68	1,3
600	24,05	41,95	3,64	3,30	—	—	1600	—	—	9,35	8,70	3,87	2,0
700	28,30	50,02	—	3,85	—	—	1700	—	—	9,81	9,25	4,09	2,9
800	32,30	57,94	—	4,40	—	—	1800	—	—	10,26	9,80	4,19	—
900	36,45	65,76	—	4,95	—	—	2000	—	—	—	10,26	—	9,5*
1000	40,63	—	6,24	5,50	2,45	—1,3							

* Термо-э. д. с. при 2400°С.

8.5. КОНДЕНСАЦИОННЫЕ ТЕРМОМЕТРЫ

Конденсационная термометрия основана на зависимости от температуры давления насыщенного пара термометрической жидкости, заключенной в постоянный объем. Область применения конденсационного термометра ограничена снизу температурой затвердевания, а сверху — критической температурой термометрической жидкости.

Таблица 8.22

Рабочие интервалы некоторых конденсационных термометров [25]

Термометрическая жидкость	Температура, °К	Термометрическая жидкость	Температура, °К	Термометрическая жидкость	Температура, °К	Термометрическая жидкость	Температура, °К
^{3}He	0,3—3,3	Ar	84—149	H_2 (равновесный)	14—20	N_2	63—73
^{4}He	0,5—5,2	O_2	55—90	Ne	24—44,4	C_3H_8	90—191

Таблица 8.23

Давление насыщенного пара пропана [26]

t, °С	*P*, *мм рт. ст.*	*t*, °С	*P*, *мм рт. ст.*	*t*, °С	*P*, *мм рт. ст.*
—130	0,00012	—50	0,721	15	7,442
—120	0,0041	—45	0,908	20	8,498
—110	0,0118	—40	1,137	25	9,676
—100	0,030	—35	1,406	30	11,02
—95	0,045	—30	1,705	35	12,46
—90	0,066	—25	2,057	40	14,01
—85	0,095	—20	2,471	45	15,76
—80	0,133	—15	2,946	50	17,61
—75	0,184	—10	3,472		
—70	0,249	—5	4,094		
—65	0,332	0	4,776		
—60	0,435	5	5,561		
—55	0,563	10	6,464		

Таблица 8.24

Температура конденсации некоторых термометрических жидкостей, °К [26, 27]

P — давление насыщенного пара.

P, мм рт. ст.	H_2, равновесный	H_2, нормальный	N_2	O_2	P, мм рт. ст.	H_2, равновесный	H_2, нормальный	N_2	O_2
2,0	10,02	10,02	—	56,28	200	16,49	16,60	67,57	79,14
2,0	10,23	10,32	—	57,07	210	16,61	16,715	67,88	79,49
3,0	10,38	10,50	—	57,73	220	16,715	16,835	68,18	79,82
3,5	10,53	10,64	—	58,29	230	16,825	16,94	68,48	80,16
4,0	10,65	10,76	—	58,80	240	16,93	17,05	68,75	80,48
5,0	10,88	10,98	—	59,68	250	17,03	17,15	69,02	80,78
6,0	11,08	11,17	—	60,39	260	17,13	17,25	69,28	81,07
7,0	11,23	11,34	—	61,01	270	17,22	17,34	69,53	81,36
8,0	11,36	11,47	—	61,58	280	17,325	17,435	69,77	81,65
9,0	11,50	11,59	—	62,07	290	17,415	17,53	70,01	81,92
10	11,62	11,72	—	62,50	300	17,50	17,62	70,25	82,18
12	11,83	11,92	—	63,32	320	17,67	17,79	70,70	82,68
14	12,02	12,115	—	64,00	340	17,835	17,96	71,13	83,16
16	12,175	12,28	55,65	64,59	360	18,00	18,11	71,54	83,62
18	12,32	12,43	—	65,17	380	18,15	18,26	71,92	84,06
20	12,46	12,57	56,48	65,67	400	18,29	18,405	72,30	84,48
25	12,74	12,85	—	66,74	420	18,435	18,55	72,66	84,89
30	12,99	13,09	58,08	67,67	440	18,57	18,69	73,00	85,29
35	13,21	13,30	—	68,46	460	18,69	18,22	73,34	85,65
40	13,40	13,51	59,28	69,15	480	18,82	18,945	73,66	86,01
45	13,575	13,67	—	69,81	500	18,94	19,06	73,97	86,37
50	13,73	13,83	60,24	70,39	520	19,065	19,185	74,27	86,72
60	14,04	14,15	61,06	71,39	540	19,185	19,30	74,56	87,06
70	14,30	14,42	61,77	72,29	560	19,30	19,41	74,85	87,38
80	14,56	14,68	62,39	73,09	580	19,40	19,52	75,13	87,69
90	14,77	14,89	62,94	73,80	600	19,50	19,62	75,41	87,99
100	15,00	15,10	63,50	74,47	620	19,60	19,72	75,68	88,29
110	15,18	15,29	64,03	75,08	640	19,70	19,825	75,93	88,58
120	15,35	15,47	64,52	75,64	660	19,80	19,92	76,18	88,86
130	15,52	15,64	64,98	76,16	680	19,90	20,02	76,43	89,14
140	15,68	15,80	65,42	76,65	700	20,00	20,11	76,67	49,41
150	15,83	15,95	65,81	77,13	720	20,09	20,21	76,91	89,67
160	15,97	16,10	66,20	77,57	740	20,18	20,30	77,14	89,93
170	16,10	16,23	66,56	77,98	760	20,273	20,39	77,364	90,18
180	16,235	16,365	66,91	78,39	780	20,37	20,48	77,58	90,43
190	16,36	16,485	67,25	78,77	800	20,44	20,56	—	90,69

Таблица 8.25

Градуировочная таблица конденсационного ^{3}He-термометра (низкотемпературная шкала T_{62}) [9]

Приводится давление насыщенного пара ^{3}He, *мм рт. ст.*, при ускорении земного притяжения $g = 980{,}665$ *см/сек*^{2}.

T, °K	0,00	0,01	0,02	0,03	0,04	0,05	0,06	0,07	0,08	0,09
0,2	0,0000121	0,0000244	0,0000463	0,0000835	0,0001441	0,0002388	0,0003819	0,0005917	0,0008911	0,0013082
0,3	0,001877	0,002636	0,003633	0,004291	0,006516	0,008619	0,011173	0,014304	0,018105	0,022673
0,4	0,028115	0,034546	0,042086	0,050864	0,061017	0,072686	0,086022	0,101179	0,118319	0,137610
0,5	0,159224	0,183339	0,210139	0,239811	0,272542	0,308540	0,347992	0,391106	0,438087	0,489145
0,6	0,544490	0,604337	0,668902	0,738402	0,813059	0,893094	0,978729	1,070189	1,167698	1,271483
0,7	1,381771	1,498789	1,622766	1,753428	1,892506	2,038728	2,192821	2,355017	2,525542	2,704626
0,8	2,892496	3,089381	3,295508	3,511105	3,736398	3,971613	4,216976	4,472711	4,739044	5,016198
0,9	5,304397	5,603862	5,916279	6,237476	6,572071	6,918813	7,277923	7,649620	8,034121	8,431641
1,0	8,842	9,267	9,704	10,156	10,622	11,102	11,597	12,106	12,631	13,170
1,1	13,725	14,295	14,881	15,484	16,102	16,737	17,388	18,056	18,741	19,443
1,2	20,163	20,900	21,655	22,428	23,220	24,029	24,857	25,704	26,571	27,456
1,3	28,360	29,285	30,229	31,193	32,177	33,181	34,206	35,252	36,319	37,407
1,4	38,516	39,646	40,799	41,973	43,169	44,388	45,629	46,893	48,179	49,489
1,5	50,822	52,178	53,558	54,961	56,389	57,840	59,316	60,817	62,342	63,897
1,6	65,467	67,068	68,694	70,345	72,022	73,726	75,455	77,211	78,993	80,802
1,7	82,638	84,501	86,391	88,309	90,254	92,228	94,229	96,258	98,315	100,402
1,8	102,516	104,660	106,833	109,035	111,266	113,527	115,818	118,138	120,489	122,870
1,9	125,282	127,724	130,197	132,701	135,236	137,803	140,401	143,031	145,692	148,386
2,0	151,112	153,870	156,661	159,485	162,342	165,232	168,155	171,112	174,102	177,126
2,1	180,184	183,276	186,403	189,564	192,760	195,990	199,256	202,557	205,894	209,266
2,2	212,673	216,117	219,597	223,113	226,665	230,255	233,881	237,544	241,244	244,982
2,3	248,757	252,570	256,420	260,309	264,236	268,202	272,206	276,249	280,331	284,452
2,4	288,613	292,813	297,053	301,333	305,653	310,013	314,414	318,855	323,337	327,861
2,5	332,425	337,031	341,679	346,368	351,100	355,874	360,690	365,549	370,450	375,395
2,6	380,383	385,414	390,489	395,608	400,771	405,599	411,230	416,526	421,868	427,264
2,7	432,686	438,164	443,687	449,256	454,872	460,534	466,242	471,998	477,801	483,651
2,8	489,549	495,495	501,488	507,531	513,622	519,762	525,951	532,189	538,477	544,815
2,9	551,203	557,692	564,131	570,672	577,264	583,907	590,602	597,349	604,149	611,002
3,0	617,907	624,866	631,879	638,945	646,066	653,241	660,472	667,757	675,098	682,496
3,1	689,949	697,459	705,026	712,650	720,332	728,072	735,871	743,728	751,644	759,620
3,2	767,656	775,753	783,910	792,139	800,408	808,750	817,155	825,622	834,153	842,747
3,3	851,406	860,130	868,918	—	—	—	—	—	—	—

Таблица 8.26

Градуировочная таблица конденсационного ^{4}He-термометра (низкотемпературная шкала T_{58}) [27]

Приводится давление насыщенного пара ^{4}He, *мм рт. ст.*, при ускорении земного притяжения $g = 981{,}56$ *см/сек*^{2}.

T, °K	0,00	0,01	0,02	0,03	0,04	0,05	0,06	0,07	0,08	0,09
0,5	0,0000163	0,0000228	0,0000314	0,0000427	0,0000574	0,0000766	0,000101	0,000132	0,000172	0,000221
0,6	0,000282	0,000357	0,000450	0,000563	0,000699	0,000863	0,00106	0,00129	0,00157	0,00190
0,7	0,00228	0,00273	0,00326	0,00387	0,00457	0,00537	0,00630	0,00736	0,00856	0,00993
0,8	0,0115	0,0132	0,0152	0,0174	0,0199	0,0226	0,0257	0,0291	0,0329	0,0371
0,9	0,0417	0,0468	0,0524	0,0585	0,0652	0,0726	0,0806	0,0893	0,0988	0,1091
1,0	0,1203	0,1324	0,1455	0,1596	0,1748	0,1912	0,2088	0,2277	0,2480	0,2697
1,1	0,2930	0,3178	0,3443	0,3725	0,4026	0,4346	0,4686	0,5048	0,5431	0,5837
1,2	0,6267	0,6722	0,7203	0,7711	0,8248	0,8813	0,9409	1,0036	1,0696	1,1390
1,3	1,2118	1,2883	1,3685	1,4527	1,5408	1,6330	1,7296	1,8305	1,9360	2,0462
1,4	2,1612	2,2812	2,4063	2,5366	2,6723	2,8136	2,9606	3,1135	3,2724	3,4374
1,5	3,6088	3,7866	3,9711	4,1624	4,3606	4,5660	4,7786	4,9987	5,2264	5,4619
1,6	5,7054	5,9569	6,2168	6,4850	6,7619	7,0476	7,3422	7,6459	7,9590	8,2815
1,7	8,6136	8,9555	9,3073	9,6692	10,041	10,424	10,817	11,222	11,637	12,063
1,8	12,500	12,949	13,409	13,881	14,365	14,861	15,369	15,889	16,422	16,968
1,9	17,526	18,097	18,681	19,278	19,888	20,511	21,148	21,799	22,463	23,141
2,0	23,832	24,537	25,257	25,990	26,737	27,498	28,273	29,062	29,865	30,682
2,1	31,514	32,359	33,218	34,091	34,978	35,878	36,791	37,717	38,655	39,608
2,2	40,576	41,559	42,559	43,575	44,607	45,655	46,720	47,802	48,901	50,017
2,3	51,151	52,302	53,471	54,657	55,862	57,085	58,326	59,585	60,864	62,161
2,4	63,476	64,811	66,165	67,538	68,930	70,343	71,775	73,227	74,699	76,191
2,5	77,704	79,237	80,791	82,366	83,962	85,579	87,218	88,878	90,559	92,263
2,6	93,988	95,736	97,505	99,297	101,11	102,95	104,81	106,69	108,60	110,53
2,7	112,48	114,45	116,45	118,48	120,52	122,59	124,69	126,81	128,95	131,12
2,8	133,31	135,53	137,77	140,04	142,33	144,65	147,00	149,37	151,76	154,18
2,9	156,63	159,10	161,60	164,13	166,68	169,26	171,87	174,50	177,16	179,85
3,0	182,57	185,31	188,08	190,88	193,71	196,57	199,45	202,37	205,31	208,28
3,1	211,28	214,31	217,37	220,46	223,58	226,73	229,91	233,12	236,35	239,62
3,2	242,92	246,25	249,62	253,01	256,43	259,89	263,37	266,89	270,44	274,02
3,3	277,63	281,28	284,96	288,67	292,41	296,18	299,99	303,83	307,71	311,61
3,4	315,55	319,53	323,53	327,57	331,65	335,76	339,90	344,07	348,29	352,53
3,5	356,81	361,13	365,48	369,86	374,28	378,74	383,23	387,76	392,33	396,93
3,6	401,56	406,23	410,94	415,68	420,46	425,28	430,13	435,03	439,95	444,92
3,7	449,92	454,96	460,04	465,16	470,31	475,51	480,74	486,01	491,32	496,66
3,8	502,05	507,47	512,94	518,44	523,98	529,57	535,19	540,85	546,56	552,30
3,9	558,09	563,91	569,78	575,69	581,64	587,63	593,66	599,74	605,85	612,01
4,0	618,21	624,46	630,74	637,07	643,44	649,86	656,32	662,82	669,37	675,96
4,1	682,59	689,27	695,99	702,76	709,57	716,42	723,32	730,27	751,25	744,29
4,2	751,37	758,49	765,66	772,87	780,13	787,43	794,78	802,17	809,62	817,11
4,3	824,65	832,23	839,87	847,55	855,29	863,07	870,89	878,77	886,70	894,68
4,4	902,71	910,78	918,91	927,09	935,31	943,59	951,92	960,30	968,73	977,21
4,5	985,74	994,32	1003,0	1011,6	1020,4	1029,2	1038,0	1046,9	1055,9	1064,9
4,6	1073,9	1083,1	1092,2	1101,4	1110,7	1120,0	1129,4	1138,9	1148,4	1157,9
4,7	1167,5	1177,2	1186,9	1196,7	1206,5	1216,4	1226,3	1236,3	1246,4	1256,5
4,8	1266,6	1276,9	1287,2	1297,5	1307,9	1318,4	1328,9	1339,5	1350,1	1360,8
4,9	1371,6	1382,4	1393,3	1404,2	1415,2	1426,3	1437,4	1448,6	1459,9	1471,2
5,0	1482,6	1494,0	1505,5	1517,1	1528,7	1540,4	1552,1	1563,9	1575,8	1587,8
5,1	1599,8	1611,9	1624,0	1636,2	1648,5	1660,8	1673,2	1685,7	1698,2	1710,8
5,2	1723,5	1736,2	1749,0	—	—	—	—	—	—	—

8.6. ОПТИЧЕСКАЯ ТЕРМОМЕТРИЯ (ПИРОМЕТРИЯ) И ТЕРМОИНДИКАТОРЫ

Оптическая пирометрия основана на измерении интенсивности излучения нагретого тела, которая связана с его температурой законами теплового излучения или термического равновесия. Различают спектральную (яркостную), радиационную и цветовую пирометрию. Область применимости оптической пирометрии ограничена чувствительностью приемников излучения, поскольку с понижением температуры интенсивность излучения уменьшается.

Спектральная (яркостная) пирометрия основана на измерении интенсивности излучения при фиксированной длине волны. При этом спектральный пирометр калибруется по излучению (на той же длине волны) абсолютно черного тела в градусах *яркостной температуры* T_λ, связанной с термодинамической температурой T соотношением

$$\frac{1}{T} - \frac{1}{T_\lambda} = \frac{\lambda}{1{,}4380} \ln \varepsilon(\lambda, T),$$

где λ — длина волны; $\varepsilon(\lambda, T)$ — излучательная способность тела на длине волны λ при температуре T (табл. 8.27 и 8.28).

Таблица 8.27

Спектральная излучательная способность $\varepsilon(\lambda, T)$ веществ [6, 13, 28]

Дробные значения ε соответствуют температуре плавления: числитель для твердой фазы, знаменатель для жидкой фазы.

Вещество	λ, мкм	T, °К	$\varepsilon(\lambda, T)$
Алюмель	0,66	—	0,37
Алюминий*	0,66	1000	0,12
	0,66	1300	0,13
Бериллий	0,55	—	0,61/0,81
	0,65	—	0,61/0,61
Ванадий	0,55	—	0,29/—
	0,65	—	0,35/0,32
Вольфрам*	0,66	—	0,43/—
Железо*	0,65	—	0,35/0,39
	0,65	1500	0,37
	0,66	1000	0,27
	0,66	1300	0,39
	0,66	1500	0,37
	0,66	1600	0,37
	0,66	1800	0,35
Золото	0,65	—	0,14/0,22
Иридий	0,65	—	0,30/—
Кобальт	0,55	—	0,36/0,37
Константан	0,66	—	0,35
Магний	0,65	—	0,59/0,59
Медь	0,55	—	0,38/0,36
	0,65	—	0,10/0,15
	0,66	1000	0,11
	0,66	1275	0,105
	0,66	1350	0,12
	0,66	1375	0,15
	0,66	1450	0,14
	0,66	1500	0,13
Молибден	0,65	—	0,43/0,50
	0,66	900	0,08
	0,66	1600	0,37
	0,66	2500	0,35
	0,665	300	0,420
	0,665	1300	0,378
	0,665	2000	0,353
	0,665	2750	0,332
Монель	0,66	—	0,37
Никель	0,46	1200—1600	0,450
	0,535	1200—1600	0,425
	0,65	—	0,36/0,37
	0,66	1000	0,38
	0,66	1600	0,38
	0,66	1800	0,39
	0,665	1200—1650	0,375
	0,55	—	0,61/—
	0,65	—	0,49/0,40
	0,66	1300—2200	0,374
Окислы:			
алюминия	0,66	1300	0,14
	0,66	1600	0,17
	0,66	2000	0,21
бериллия	—	—	0,35
ванадия	—	—	0,70
железа	—	—	0,70
иттрия	—	—	0,60
кобальта	—	—	0,75

Продолжение табл. 8.27

Вещество	λ, мкм	T, °К	$\varepsilon(\lambda, T)$
Окислы:			
магния	0,66	1300	0,18
	0,66	1400	0,23
	0,66	1700	0,35
	0,66	2000	0,47
меди	—	—	0,70
никеля	—	—	0,90
ниобия	—	—	0,70
титана	—	—	0,50
тория	—	—	0,50
урана	—	—	0,30
хрома	—	—	0,70
циркония	—	—	0,40
Палладий	0,55	—	0,33/—
Платина*	0,65	—	0,33/0,38
	0,66	1000	0,29
	0,66	2000	0,31
Платинородий (10%Rh)	0,66	—	0,27
Родий	0,65	—	0,29/0,30
Свинец	0,65	—	0,30/0,38
Серебро*	0,65	—	0,04/0,07
	0,66	1000	0,05
	0,66	1300	0,07
Смесь Нернста (85%ZrO_2— 15%V_2O_3)	0,66	1300	0,16
	0,66	1400	0,23
	0,66	1600	0,36
	0,66	1800	0,50
	0,66	2000	0,70
Сталь* Х25Ю5 (окисленная)	—	—	0,75
Сталь Х18Н9 (окисленная)	—	—	0,85
Тантал	0,467	300	0,565
	0,467	1400	0,505
	0,467	2100	0,460
	0,66	1200—2900	0,40
	0,665	300	0,493
	0,665	1400	0,442
	0,665	2100	0,415
	0,665	2800	0,319
Торий	0,55	—	0,65/—
	0,65	—	0,36/0,40
Уголь	0,54—0,66	1000	0,92
	0,54—0,66	1600	0,90
	0,54—0,66	2000	0,87
	0,54—0,66	2500	0,84
Хром	0,55	—	0,53/—
	0,65	—	0,39/0,39
	0,66	1100—1500	0,334
Хромель	—	—	0,35
Цирконий	0,65	—	0,32/0,30

* См. также табл. 8.28.

Таблица 8.28

Спектральная излучательиая способность веществ при разиых длинах волн [28]

Вещество	T, °K	Длиа волны λ, *мкм*								
		0,2	0,3	0,4	0,5	0,6	0,7	1,0	2,0	4,0
Алюминий	300	0,70	0,37	0,24	0,18	0,17	0,17	0,17	0,16	0,08
Вольфрам	300	—	—	—	0,50	0,47	0,46	0,42	0,13	0,07
	1000	—	0,50	0,49	0,47	0,45	0,44	0,40	—	—
	2000	—	0,47	0,47	0,46	0,45	0,43	0,38	0,23	0,13
	3000	—	0,45	0,46	0,44	0,43	0,42	0,36	0,26	0,20
	3400	—	0,48	0,46	0,44	0,40	—	0,36	0,26	0,186
Графит	300	—	—	—	—	0,96	0,91	0,88	0,82	0,77
Железо	300	0,73	0,57	0,47	0,44	0,42	0,41	0,35	0,22	0,11
Платина	300	0,63	0,58	0,48	0,41	0,36	0,31	0,27	0,13	0,10
Серебро	300	0,80	0,87	0,15	0,08	0,06	0,05	0,04	0,02	0,01
Сталь	300	—	0,63	0,50	0,45	0,44	0,42	0,37	0,23	0,13
Уголь	300	—	—	0,86	0,86	0,85	0,84	0,81	0,81	0,75

Цветовая пирометрия основана на сравнении интенсивностей излучения двух различных длин волн λ_1, λ_2. Пирометр калибруется в шкале *цветовой температуры* T_c, связанной с термодинамической шкалой соотношением

$$\frac{1}{T}-\frac{1}{T_c}=\frac{1}{1{,}4380}\left(\frac{1}{\lambda_1}-\frac{1}{\lambda_2}\right)\ln\frac{\varepsilon(\lambda_1, T)}{\varepsilon(\lambda_2, T)}.$$

Цветовая температура так называемых серых тел, характеризующихся условием $\varepsilon(\lambda_1, T)=\varepsilon(\lambda_2, T)$, совпадает с истиииой.

Таблица 8.2[9]

Полная излучательная способность веществ $\varepsilon(T)$ в направлеиии, перпендикулярном к излучающей поверхности [3, 6, 13, 28]

Вещество	T, °K	$\varepsilon(T)$
Алюминий	300	0,022
	375	0,028
	500	0,039
	775	0,060
	900	0,060
Алюминий окисленный	475	0,11
	875	0,19
	311	0,06*
	311	0,32*
	311	0,75[3]*
Алюминия окись	1500	0,23
	2000	0,34
Висмут	300	0,048
	375	0,061
Вода (лед)	270	0,76
Вольфрам	300	0,024
	375	0,032
	775	0,071
	1200	0,138

* Толщина окисной пленки 0,25 *мкм*.
[2]* Толщина окисной пленки 1 *мкм*.
[3]* Толщиа окисной пленки 7 *мкм*.

Радиационная пирометрия основана на измереиии полного излучения; пирометр градуируется по полному излучению абсолютно черного тела в градусах *радиационной температуры* T_r, которая связана с термодинамической температурой соотношеннем

$$T_r = T\sqrt[4]{\varepsilon(T)},$$

где $\varepsilon(T)$ — полная излучательная способность вещества. Применение радиационных пирометров наиболее эффективно при низкнх температурах, когда спектральная излучательиая способность мала.

Продолжение табл. 8.29

Вещество	T, °K	$\varepsilon(T)$
Вольфрам	1500	0,192
	1800	0,236
	2000	0,259
	2200	0,278
	2500	0,301
	2700	0,315
	2900	0,329
	3200	0,341
	3400	0,348
Железо	375	0,05
	450	0,05
Железо: литое	—	0,21
оцинкованное	365	0,07
окисленное	375	0,74
	775	0,84
	1475	0,89
Железа окись	1800	0,80
Золото	375	0,02
	775	0,03
Золото окислеииое	375	0,37
Кальция окись	1300	0,27
Кирпич обожженный	1275	0,75
огнеупорный	800	0,75
	1300	0,82
силикатный	1375	0,85
Латуиь полированная	300	0,035
листовая	300	0,06

Продолжение табл. 8.29

Вещество	T, °К	$\varepsilon(T)$
Латунь окисленная	475	0,61
	875	0,59
Магний	295	0,07
Магния окись	1300	0,16
	1500	0,17
	2000	0,200
Медь	300	0,04
	1400	0,15
Медь: хромированная	300	0,08
черненая	300	0,78
полированная	300	0,03
окисленная	475	0,60
	1275	0,60
Мельхиор	373	0,059
Молибден	1275	0,13
	1775	0,19
	2275	0,24
Монель	366	0,16
Монель окисленный	300	0,41
Никель	300	0,04
	375	0,06
	500	0,07
	775	0,12
	1275	0,19
Никель окисленный	475	0,37
	1475	0,85
Ниобий	1775	0,19
	2275	0,24
Олово	300	0,043
	375	0,05
Платина	300	0,037
	375	0,047
	500	0,054
	775	0,096
	900	0,098
	1300	0,138
	1800	0,176
Ртуть	300	0,10
	375	0,12
Свинец	375	0,05
Свинец окисленный	295	0,28
	475	0,63
Серебро	375	0,020
	500	0,020
	775	0,035
	900	0,032
Смесь Нернста (85% ZrO_2 — 15% V_2O_3)	1300	0,025
	1500	0,027
	1800	0,042
	2000	0,055
Сталь	300	0,65
Сталь жидкая	—	0,28
Стекло	300	0,94
Уголь	375	0,81
Фарфор глазурованный	300	0,92
Хром	375	0,08
Цинк	300	0,05
Чугун: полированный	311	0,21
окисленный	311	0,63

Термоиндикаторы — вещества, изменяющие свой внешний вид (цвет, блеск, прозрачность, свечение и т. д.) при определенной температуре — *критической температуре термоиндикатора* $t_{кр}$ — и используемые для регистрации этой температуры. По природе дей-

Таблица 8.30

Характеристики термокрасок [29]

Краски 1а, 17 и 31 основаны на плавлении и обратимы; остальные — химического взаимодействия и необратимы. Паспортный режим: длительность теплового воздействия при $t_{кр}$ равна 2,5 *мин*.

Номер краски	Цвет при $t < t_{кр}$	$t_{кр}$, °С	Цвет при $t > t_{кр}$
1а	Светло-розовый	45	Голубой
17	»	55	»
31	Розовый	70	Зеленый
46	Светло-зеленый	74	Голубой
32	Светло-розовый	85—90	Ярко-голубой
13	Светло-зеленый	90	Светло-корнчневый
1д	Белый	98	Зеленый
2д	»	105	Черный
50	Розовый	110	Фнолетовый
3д	Светло-зеленый	120	Темно-зеленый
4	Зеленый	125—130	Фиолетовый
30	Желтый	130	Оранжевый
8д	Желтый	140	Зеленый
4д	Оранжевый	140	Красный
19	Бирюзовый	145	Коричневый
5	Фиолетовый	150	Черный
5д	Бледно-сиреневый	150	»
6д	Белый	155	Желтый
7д	»	160	Черный
11д	»	160	Желтый
8*д	Желтый	165	Черный
29	Светло-розовый	175	Светло-коричневый
10д	Бирюзовый	175	Черный
2а	Сиреневый	180	Синнй
14д	Розовый	185	Коричневый
6	Светло-зеленый	190	Черный
11*д	Белый	190	Темно-зеленый
12д	Малиновый	195	Черный
13д	Белый	200	Темно-коричневый
18	Бирюзовый	205	Розовый
230	Зеленый	220	Бежевый
240	Бирюзовый	225	Белый
8	Зеленый	240	Коричневый
320	Лиловый	250	Бежевый
35	Светло-розовый	280	Темно-бежевый
10	Сиреневый	280	Черно-синий
33	Бледно-сиреневый	320	»
26	Сиреневый	350	»
12	Синий	370	Бежевый
6б	Белый	390	»
230*	Бежевый	400	Белый
470	Сине-зеленый	440—450	Серо-белый
47	Горчичный	470	Желтый
15	Оранжевый	470	Серый
480	Голубой	480	Серо-белый
490	Сине-зелеиый	515	Бежевый
14	Ярко-розовый	550	Белый
52а	Черный	555	Темно-зеленый
30*	Оранжевый	570	Белый
7	Бледно-зеленый	690	Ярко-зеленый
100	Сиреневый	830	Светло-фиолетовый

ствия различают термоиндикаторы, меняющие структуру или агрегатное состояние; термоиндикаторы с химическим взаимодействием между компонентами; люминесцентные термоиндикаторы.

Термоиндикаторы, действие которых основано на изменении структуры (поверхностно-градиентные, термохромные индикаторы) или агрегатного состояния (индикаторы плавления) обладают стабильной критической температурой, не зависящей от теплового режима, и являются обратимыми. Критическая температура термоиндикаторов с химическим взаимодействием между компонентами стабильна, но зависит (иногда существенно) от теплового режима и давления. Поэтому при использовании в условиях, отличающихся от паспортных, эти термоиндикаторы нуждаются в предварительной градуировке. Большинство термоиндикаторов с химическим взаимодействием необратимы либо квазиобратимы. Последние регенерируют в результате взаимодействия с окружающей атмосферой. Люминесцентные термоиндикаторы обратимы, но нуждаются в градуировке, так как их свойства зависят от теплового режима и характеристик возбуждающего излучения.

Не обладая большой точностью, метод термоиндикаторов иногда полезен, а иногда и труднозаменим (при исследовании тепловых полей, в аэродинамических измерениях, при измерении температур токонесущих элементов и т. п.). Термоиндикаторы применяют в виде термокрасок (термолаков), термокарандашей и термосвидетелей (таблеток, пленок). В табл. 8.30 и 8.31 приведены характеристики наборов термокрасок и термопокрытий плавления, разработанных в СССР.

Таблица 8.31

Характеристики набора термопокрытий плавления [29]

Марка термопокрытия	Цвет при $t < t_{кр}$	$t_{кр}$, °С	Цвет при $t > t_{кр}$	Марка термопокрытия	Цвет при $t < t_{кр}$	$t_{кр}$, °С	Цвет при $t > t_{кр}$
ТП-36	Светло-розовый	36	Оранжевый	ТП-122	Розовый	122	Красный
ТП-44	Светло-зеленый	44	Зеленый	ТП-123	Голубой	123	Синий
ТП-52	Светло-голубой	52	Синий	ТП-126	»	126	»
ТП-60	Светло-розовый	60	Красный	ТП-130	Светло-зеленый	130	Зеленый
ТП-67	Розовый	67	»	ТП-134	Светло-оранжевый	134	Красный
ТП-79	Светло-зеленый	79	Зеленый	ТП-144	Розовый	144	»
ТП-79	Светло-голубой	79	Синий	ТП-148	»	248	Светло-коричневый
ТП-86	Светло-коричневый	86	Красный	ТП-155	Желтый	155	Оранжевый
ТП-90	Светло-голубой	90	Синий	ТП-167	Белый	167	Зеленый
ТП-95	Светло-зеленый	95	Зеленый	ТП-172	Розовый	172	Красный
ТП-97	Розовый	97	Красный	ТП-179	»	179	»
ТП-98	Белый	98	Зеленый	ТП-182	Светло-зеленый	182	Зеленый
ТП-107	»	107	Черный	ТП-193	Светло-розовый	193	Оранжевый
ТП-107	Светло-зеленый	107	Зеленый	ТП-213	Белый	213	Желтый
ТП-109	Белый	109	Бесцветный	ТП-223	Розовый	223	Красный
ТП-116	Светло-голубой	116	Зеленый	ТП-254	Белый	254	Бесцветный

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Бродский А. Д.** Новые методы измерения низких температур. М., Стандартгиз, 1962.
2. **Положение** о международной практической температурной шкале. Труды ВНИИМ. М., Стандартгиз, 1962, вып. 63 (123), с. 151.
3. **Скотт Р. Б.** Техника низких температур. Пер. с англ. Под ред. М. П. Малкова. М., Изд-во иностр. лит., 1962.
4. **Методы** измерения температур. Сб. статей. Под ред. В. А. Соколова. Ч. 1, 2. М., Изд-во иностр. лит., 1954.
5. **Гордов А. Н.** Температурные шкалы. М., Стандартгиз, 1966.
6. **Smithsonian** physical tables. 9-th ed., Washington, 1954.
7. **Боровик-Романов А. С., Орлова М. П., Стрелков П. Г.** Установление шкалы низких температур между 90, 19°К и 10°К. М., Изд-во Главной палаты мер и измерительных приборов, 1954.
8. **Температура** и ее измерение. Сб. докладов. Под ред. А. Арманда и К. Вульфсона. Пер. с англ. М., Изд-во иностр. лит., 1960.
9. **Sherman R. H., Sydoriak S. G., Roberts T. R. J.** Res. Nat. Bur. Stand., 1964, v. 68A, p. 579.
10. **Comite** International des Poids et Mesures. — Metrologia, 1969, v. 5, p. 35.
11. **Тепловые** измерения. ГОСТ 12442—66. М., Стандартгиз, 1966.
12. **Kostovski H. J.** Metrologia, 1967, v. 3, p. 29.
13. **Геращенко О. А., Федоров В. Г.** Тепловые и температурные измерения. Справочное руководство. Киев, «Наукова думка», 1965.
14. **Методы** измерения температур в промышленности. М., Металлургиздат, 1952. (Авт.: Гордов А. Н., Аржаиов А. С., Билык В. Я. и др.)

15. **Попов М. М.** Термометрии и калориметрия. Изд. 2-е. М., Изд-во МГУ, 1954.
16. **Справочник** химика. Под ред. Б. П. Никольского. Изд. 2-е. Т. 1. М.—Л., Госхимиздат, 1962.
17. **Термометры** сопротивления. ГОСТ 6651—59. М., Стандартгиз, 1963.
18. **Стрелков П. Г., Шаревская Д. И.** «Измерительная техника», 1957, № 6, с. 53.
19. **Термопары.** ГОСТ 3044—61. М., Стандартгиз, 1961.
20. **Самсонов Г. В., Кислый П. С.** Высокотемпературные неметаллические термопары и наконечники. Киев, «Наукова думка», 1965.
21. **Лах В. И., Стаднык Б. И.** «Приборы и средства автоматизации», 1961, № 8, с. 18.
22. **Кей Дж., Лэби Т.** Таблицы физических и химических постоянных. Пер. с англ. Под ред. К. П. Яковлева. М., Физматгиз, 1962.
23. **Данишевский С. К., Ипатова С. И., Павлова Е. И., Смирнова Н. И.** «Заводская лаборатория», 1963, т. 29, № 9, с. 1139.
24. **Гуревич А. М., Каганов В. Ю., Полунин С. Ф., Ширяев В. В.** «Заводская лаборатория», 1954, т. 20, № 1, с. 51.
25. **Мендельсон К.** Физика низких температур. Пер. с англ. Под ред. Н. Е. Алексеевского. М., Изд-во иностр. лит., 1963.
26. **Справочник** по физико-техническим основам глубокого охлаждения. М.—Л. Госэнергоиздат, 1963. (Авт.: Малков М. П., Данилов И. Б., Зельдович А. Г., Фрадков А. Б.).
27. **Уайт Г. К.** Экспериментальная техника в физике низких температур. Справочное руководство. Пер. с англ. Под ред. А. И. Шальникова. М., Физматгиз, 1961.
28. **Эберт Г.** Краткий справочник по физике. Пер. с нем. Под ред. К. П. Яковлева. М., Физматгиз, 1963.
29. **Абрамович Б. Г.** Термоиндикаторы и их применения. М., «Энергия», 1972.

ГЛАВА 2

ТЕМПЕРАТУРНЫЕ КОЭФФИЦИЕНТЫ РАСШИРЕНИЯ И ЭФФЕКТ ДЖОУЛЯ—ТОМСОНА

Тепловым расширением называется эффект изменения размеров тела с изменением температуры при постоянном давлении. Тепловое расширение обусловлено асимметрией кривой потенциальной энергии межатомного взаимодействия относительно равновесного положения, вследствие чего при изменении температур происходит изменение среднего межатомного расстояния. Оно определяется химическим составом, структурой тела, а также давлением, температурой и другими термодинамическими параметрами.

В качестве количественной характеристики теплового расширения обычно используют:

истинный температурный коэффициент линейного расширения

$$\alpha = \frac{1}{L}\left(\frac{\partial L}{\partial T}\right)_P;$$

средний температурный коэффициент линейного расширения

$$\bar{\alpha} = \frac{1}{L}\cdot\frac{\Delta L}{\Delta T};$$

истинный температурный коэффициент объемного расширения

$$\beta = \frac{1}{V}\left(\frac{\partial V}{\partial T}\right)_P;$$

средний температурный коэффициент объемного расширения

$$\bar{\beta} = \frac{1}{V}\cdot\frac{\Delta V}{\Delta T},$$

где L — длина; V — объем; T — температура тела. Размерность всех температурных коэффициентов *град*$^{-1}$.

9.1. ТЕПЛОВОЕ РАСШИРЕНИЕ АНИЗОТРОПНЫХ ТВЕРДЫХ ТЕЛ

Тепловое расширение анизотропного твердого тела (кристалла) может быть описано симметричным тензором второго порядка (тензором теплового расширения), компонентами которого являются температурные коэффициенты линейного расширения в определенных направлениях. Если структура тела известна, то для задания тензора достаточно указать три главных температурных коэффициента расширения α_1, α_2, α_3 соответственно вдоль главной оси симметрии кристалла, перпендикулярно к главной оси в плоскости осей симметрии и в направлении, перпендикулярном к двум первым. В кристаллах одноосной симметрии $\alpha_2 = \alpha_3$, а направление, определяющее α_2, перпендикулярно к главной оси симметрии и лежит в произвольной плоскости, проходящей через нее. Температурный коэффициент линейного расширения в произвольном направлении α_γ выражается через главные коэффициенты:

$$\alpha_\gamma = \alpha_1 \cos\gamma_1 + \alpha_2 \cos\gamma_2 + \alpha_3 \cos\gamma_3,$$

где γ_1, γ_2, γ_3 — углы между направлениями, соответствующими главным коэффициентам, и заданным направлением γ.

Температурный коэффициент объемного расширения

$$\beta \approx \alpha_1 + \alpha_2 + \alpha_3.$$

Главные температурные коэффициенты линейного расширения анизотропных твердых тел (кристаллов). Элементы и неорганические соединения

Приведены значения среднего температурного коэффициента линейного расширения в указанном интервале температур или значения истинного температурного коэффициента линейного расширения при данной температуре. Значения в скобках — первые два ($c = 0$) или три коэффициента интерполяционной формулы:

$$\alpha = a \cdot 10^{-6} + b \cdot 10^{-8} t + c \cdot 10^{-11} t^2.$$

Вещество	t, °C	α_1 или $\overline{\alpha_1}$, 10^{-6} $град^{-1}$	α_2 или $\overline{\alpha_2}$, 10^{-6} $град^{-1}$	α_3 или $\overline{\alpha_3}$, 10^{-6} $град^{-1}$	Литература
AgI	40	—3,97	0,65	0,65	[1]
	20÷70	{—3,97 —4,27}	{0,65 1,38}	{0,65 1,38}	[2]
$3Ag_2S \cdot Sb_2S_3$	20÷70	{0,91 10,5}	{20,1 —2,31}	{20,1 —2,31}	[2]
Al_2O_3	20÷50	6,66	5,0	5,0	[3]
	52÷677	{6,58 0,50 0,26}	{5,42 0,55 0,29}	{5,42 0,55 0,29}	[2]
	20÷1000	9,03	—	—	[3]
As	30÷75	3,2—6,8	—	—	[4]
$BaSO_4$	44÷360	{13,62 1,30 1,19}	{23,95 1,96 1,37}	{14,07 1,52 1,10}	[2]
Be	—150	1,6	2,8	2,8	[4, 5]
	10	8,6	11,7	11,7	[5]
	18÷220	10,4	15,0	15,0	[4, 5]
	18÷455	13,1	15,7	15,7	[4, 5]
	20÷600	16,0	—	—	[4]
Bi	—140	15,9	10,5	10,5	[1, 4, 6]
	30	16,2	11,6	11,6	[1, 4]
	10÷90	—	10,84	10,84	[6]
	20÷240	16,5	12,0	12,0	[4]
Bi_2Te_3	20	22,2	12,9	12,9	[3]
C (графит)	0÷400	—	—1,5	—1,5	[2]
	0÷500	17,2	1,3	1,3	[2]
	0÷800	28,3	—	—	[2]
	500÷1000	20,4	2,2	2,2	[2]
	1000÷1500	24,4	2,6	2,6	[2]
	1500÷2300	27,7	3,2	3,2	[2]
$Ca(OH)_2$	20÷100	33,4	9,8	9,8	[2]
$CaWO_4$	—196÷25	7,9	12,7	12,7	[3]
	25÷500	11,2	18,7	18,7	[3]
	500÷850	13,8	22,0	22,0	[3]
	850÷1025	16,8	27,2	27,2	[3]
Cd	—200	48,2	18,5	18,5	[3]
	—160	59,0	19,2	19,2	[4]
	0	52,0	20	20	[1]
	60	52,25	21,8	21,8	[7]
	100	50,4	18,9	18,9	[7]
CdS	50÷500	3,5	5,0	5,0	[3]
Co	33÷100	16,1	12,6	12,6	[4]
CuS	20	29,27	41,58	4,55	[2]
$FeCO_3$	20÷70	{19,2 2,55}	{6,05 91,7}	{6,05 91,7}	[2]
Fe_2O_3	46÷400	{7, 9 0,53 7,32}	{7,83 1,05 1,17}	{7,83 1,05 1,17}	[2]
Fe_5S_6	20÷70	{2,35 8,64}	{31,2 —1,65}	{31,2 —1,65}	[2]
H_3BO_3	30÷80	—3,68	10,83	255,9	[2]
Hg	—120	49,6	37,5	37,5	[4]
	—188÷—79	47,0	37,5	37,5	[4]
	—190÷—160	42,6	37,4	37,4	[4]
HgS	20÷70	{21,5 1,50}	{17,9 0,63}	{17,9 0,63}	[2]

Вещество	t, °C	α_1 или $\bar{\alpha}_1$, 10^{-6} $град^{-1}$	α_2 или $\bar{\alpha}_2$, 10^{-6} $град^{-1}$	α_3 или $\bar{\alpha}_3$, 10^{-6} $град^{-1}$	Литература
I	18	133,4	95,0	35,1	[2]
In	—17÷9	56	13	13	[4]
	23÷87	45	17	17	[4]
	100	28,4	18,6	18,6	[8]
	200	38,0	5,6	5,6	[8]
	300	54,0	—16,1	—16,1	[8]
KCl	30÷90	134,2	39	29,7	[2]
	90÷150	126,6	33,8	29,2	[2]
	150÷200	148,8	36,8	29,6	[2]
KNO_3	30÷90	22,0	23,5	182,6	[2]
K_2SO_4	0÷96	{36,14 1,44}	{32,25 1,41}	{36,34 4,13}	[2]
KH_2PO_4	—150÷20	34,3	21,6	21,6	[3]
Mg	20÷100	26,4	25,6	25,6	[4]
	20÷200	27,7	26,6	26,6	[4]
$MgCO_3$	20÷70	{21,3 3,39}	{5,99 2,43}	{5,99 2,43}	[2]
MgF_2	0÷500	8,8	13,1	13,1	[3]
$Mg(OH)_2$	20÷100	44,7	11,0	11,0	[2]
$NaNO_3$	18÷200	{75,3 51,0}	{8,8 5,4}	{8,8 5,4}	[2]
	50	12,0	11,0	11,0	[3]
	100	13,2	12,0	12,0	[3]
	150	14,2	11,0	11,0	[2]
	200	18,4	10,5	10,5	[2]
	250	36,8	10,0	10,0	[2]
	295	66,0	10,0	10,0	[2]
$(NH_4)H_2PO_4$	24÷134	1,9	39,3	39,3	[3]
Os	50	5,8	4,0	4,0	[4]
	250	6,6	4,6	4,6	[4]
	500	8,3	5,8	5,8	[4]
$RbSO_4$	0÷96	{33,85 2,14}	{31,95 1,82}	{35,90 9,14}	[2]
Re	20÷1917	12,4	4,7	4,7	[9]
Ru	50	8,8	5,9	5,9	[4]
	250	9,8	6,4	6,4	[4]
	500	11,7	7,6	7,6	[4]
SiO_2 (кварц)	—100÷37	{7,07 2,11}	—	—	[2]
	0÷100	8,0	14,4	14,4	[2]
	0÷300	9,6	16,9	16,9	[4]
	10÷334	—	{13,25 5,52}	{13,25 5,52}	[3]
	0÷360	{7,07 1,67}	—	—	[3]
	360÷450	{25,8 —10,81 20,16}	—	—	[3]
	0÷500	12,2	20,9	20,9	[4]
SiC	200	3,26	—	—	[3]
	400	4,05	—	—	[3]
	600	4,29	—	—	[3]
	800	4,52	—	—	[3]
	1000	4,78	—	—	[3]
	1200	5,0	—	—	[3]
	1400	5,20	—	—	[3]
	1500	5,28	—	—	[3]
Sb	—215÷20	16	7,0	7,0	[4, 10]
	20	15,56	7,96	7,96	[1, 10]
	0÷100	16,8	8,28	8,28	[1, 10]
	20÷400	—	8,1	8,1	[1]
	100÷300	—	10,0	10,0	[10]
Se	20÷55	—17,9	74,1	74,1	[4]

Вещество	t, °C	α_1 или $\overline{\alpha_1}$, 10^{-6} $град^{-1}$	α_2 или $\overline{\alpha_2}$, 10^{-6} $град^{-1}$	α_3 или $\overline{\alpha_3}$, 10^{-6} $град^{-1}$	Литература
Sn	—195÷20	25,9	14,1	14,1	[1]
	20	30,5	15,45	15,45	[4]
	34÷194	45,8	25,7	25,7	[1]
SnO_2	20÷70	{3,19 1,20}	{3,2 0,76}	{3,2 0,76}	[2]
Te	20÷60	—1,7	27,0	27,0	[3, 4]
TiO_2	20÷70	{9,19 2,25}	{7,14 1,10}	{7,14 1,10}	[2, 3]
$(TiO)_2$ /	18	14,5	19,3	22,05	[2]
Tl	32÷91	72	9,0	9,0	[4]
U	0÷100	21,7	—1,5	23,2	[11]
	—190÷18	49,5	11,3	11,3	[1, 4]
	0	60	12,6	12,6	[4]
	0÷250	56	15,6	15,6	[1, 4]
	20÷100	64,0	14,1	14,1	[1, 4]
	20÷400	59	16	16	[1, 4]
ZnO	20÷70	{3,9 1,20}	{3,2 0,76}	{3,2 0,76}	[2, 3]
Zr	0÷100	4,0	13,0	13,0	[4]

Таблица 9.2

Главные температурные коэффициенты линейного расширения анизотропных твердых тел (кристаллов). Минералы и органические соединения

Пояснения те же, что и к табл. 9.1.

Вещество	t, °C	α_1 или $\overline{\alpha_1}$, 10^{-6} $град^{-1}$	α_2 или $\overline{\alpha_2}$, 10^{-6} $град^{-1}$	α_3 или $\overline{\alpha_3}$, 10^{-6} $град^{-1}$	Литература
Антрацен	—190÷20	3,06	25,0	0,73	[2]
Арагонит	—150÷0	{9,87 —0,84 —11,3}	{15,88 0,82 —23,05}	{32,4 0,73 —40,7}	[2]
	20÷70	{10,16 0,64}	{17,19 3,68}	{34,60 3,37}	[2]
Аугит	40	7,91	13,86	2,72	[2]
Берилл	20÷70	{—1,35 0,41}	{1,00 0,46}	{1,00 0,46}	[2]
Брукит	17,5	14,5	19,2	22,05	[1]
Вулканит	20÷70	{7,40 1,74}	{8,39 1,67}	{8,39 1,67}	[2]
Гидрогиллит	20÷100	38,4	10,9	—5,6	[2]
Гипс	40	20,81	41,63	1,57	[2]
Доломит	20÷70	{20,6 3,68}	{4,15 1,93}	{4,15 1,93}	[2]

Вещество	t, °C	α_1 или $\overline{\alpha_1}$, 10^{-6} $град^{-1}$	α_2 или $\overline{\alpha_2}$, 10^{-6} $град^{-1}$	α_3 или $\overline{\alpha_3}$, 10^{-6} $град^{-1}$	Литература
Изумруд	0,85	—1,35	1,0	1,0	[10]
Исландский шпат	0÷80	26,31	5,44	5,44	[12]
Кальцит	—150÷0	24,39 0,53 —30,7	—5,68 0,03 —4,58	—5,68 0,03 —4,58	[3]
	50	26,6	—5,2	—5,2	[10]
	75÷400	24,71 3,78 —3,63	—	—	[2]
	365	—	—3,8	—3,8	[10]
Кризоберилл	20÷70	5,16 1,22	6,01 1,01	6,02 2,20	[2]
Нафталин	—195÷20	212,8	40,3	6,15	[2]
Нитроанилин	—183÷20	150,3	7,5	24	[2]
Пираргирит	40	0,91	20,1	20,1	[1]
Пирротин	40	2,35	31,2	31,2	[1]
Рутил (анатаз)	40	8,19	4,68	4,68	[1]
Слюда (мусковит)	50	8,1	7,5	7,5	[2]
	0÷100	8,5	—	—	[2]
	20÷300	—	8,25	8,25	[4]
Слюда (флогопит)	0÷100	—	13,5	13,5	[2]
Топаз	40	4,44	4,84	5,92	[1]
	20÷70	4,14 1,68	4,84 1,53	5,92 1,83	[2]
Турмалин	20÷70	9,05 3,20	3,79 1,83	3,79 1,83	[2]
	6÷320	8,62 0,56	3,58 0,54	3,58 0,54	[2]
	0÷100	9,37	3,73	3,73	[10]
Фенацит	20÷70	3,79 2,13	2,99 2,30	2,99 2,30	[2]
Шпинель	100÷700	5,9	5,9	5,9	[13]
Циркон	20÷70	4,3 1,41	3,3 1,91	3,3 1,91	[2]

9.2. ТЕПЛОВОЕ РАСШИРЕНИЕ ИЗОТРОПНЫХ ТВЕРДЫХ ТЕЛ

Тепловое расширение изотропного твердого тела характеризуется температурным коэффициентом линейного расширения α (истинным или средним). Температурный коэффициент объемного расширения $\beta \approx 3\alpha$. С погрешностью $\pm 10\%$ температурный коэффициент линейного расширения можно вычислить по формуле Грюнайзена:

$$\alpha = k \frac{\gamma C_V}{V},$$

где C_V — теплоемкость при постоянном объеме; $\gamma = \frac{1}{V}\left(\frac{\partial V}{\partial P}\right)_T$ — коэффициент изотермического сжатия; k — постоянная Грюнайзена.

Если известны параметры потенциала межатомного взаимодействия (m, n) Леннарда—Джонса, то $k = (m + n + 3)/6$.

При температурах, близких к температуре плавления, часто выполняется эмпирическое соотношение $\alpha \cdot T = 69{,}6$ (T, °K).

Таблица 9.3

Температурные коэффициенты линейного расширения изотропных твердых тел (кристаллов)

Пояснения те же, что и к табл. 9.1.

Вещество	t, °C	α или $\bar{\alpha}$, 10^{-6} *град*$^{-1}$	Литература
Ag	—250÷0	14,9	[4]
	—191÷16	17,0	[4]
	—183	13,27	[8]
	—103	16,59	[8]
	20	19,0	[7]
	100	19,45	[8]
	300	20,50	[8]
	500	21,58	[8]
	700	23,99	[8]
	900	26,50	[8]
	1000	27,85	[8]
AgBr	20	34,3	[2]
AgCl	—110÷10	28,62 1,86 —28,2	[2]
	25	30,01	[3]
	200	34,59	[3]
	400	63,19	[3]
	425	69,99	[3]
Al	—250÷—160	9,1	[8]
	—190÷0	18,0	[4]
	—100÷20	19,5	[6]
	0	22,58	[1]
	100	23,57	[1]
	200	24,55	[1]
	300	25,54	[1]
	400	26,53	[1]
	500	27,52	[1]
	600	28,50	[1]
	—200÷0	22,65 33,5 —10,9	[1]
	—100÷600	22,6 17,6	[1]
AlN	25÷200	4,03	[15]
Al_2O_3	20÷1000	8,4	[1]
As	0	5,0	[6]
As_2O_3	20÷1000	8,4	[1]
Au	—183	10,94	[8]
	—103	12,93	[8]
	—100÷500	14,13 5,7 —0,27	[1]
	20	14,0	[8]
	100	14,43	[8]
	300	15,34	[8]
	500	15,88	[8]
	700	17,18	[8]
	900	18,24	[8]
	1100	20,15	[8]
B	20	2,0	[9]
	0÷100	8,0	[9]
	220÷750	8,3	[9]
B_4C	0÷100	4,5	[15]
	24÷500	4,68	[16]
BN	25÷1000	7,51	[15]
Ba	0	19,0	[8]
	0÷300	19,45	[4]
BaB_6	20÷800	6,8	[15]

Продолжение табл. 9.3

Вещество	t, °C	α или $\bar{\alpha}$, 10^{-6} *град*$^{-1}$	Литература
BaF_2	0÷300	18,4	[3]
$Ba(NO_3)_2$	—273÷—195	3,3	[3]
	—195÷—78	6,7	[3]
	—78÷15	17,0	[3]
	75÷250	15,8 3,7	[3]
$BaTiO_3$	30÷120	5,1	[2]
	120	8,6	[3]
	200	9,4	[3]
	400	11,3	[3]
	600	13,2	[3]
	800	15,1	[3]
	1050	17,5	[3]
$BaSi_2$	20÷1100	8,4	[15]
Be	—120÷—100	5,0	[9]
	—100÷—50	7,0	[9]
	—120÷0	8,1	[4]
	—50÷0	9,2	[9]
	0	10,5	[6]
	20÷200	12,8	[6]
	20÷300	13,7	[6]
	20÷400	14,5	[6]
	20÷500	15,2	[6]
	0÷600	10,5 25,2	[17]
	20÷600	15,7	[6]
	20÷700	16,8	[4]
	25÷1000	18,77	[9]
	1200	23,7	[4]
Be_2C	25÷50	5,6	[5]
	0÷200	7,7	[5]
	0÷400	9,5	[5]
	0÷600	10,5	[5]
BeO	25÷1700	10,6	[1]
Bi	—183÷15	12,98	[1]
	0	13,37	[6]
	0÷270	14,6	[1]
	20÷100	13,45	[1]
C (алмаз)	—220÷40	0,6	[8]
	—184÷—79	0,18	[3]
	—79÷0	0,58	[2]
	0÷78	1,2	[4]
	0÷400	2,8	[4]
	0÷555	0,87 0,92 —0,67	[2]
	0÷750	4,5	[4]
	40÷280	2,2	[8]
	280÷830	3,73	[8]
	830÷1530	5,67	[8]
Графит, ρ=1,86 *г/см*^{3}	0	7,0	[5]
	250	8,1	[5]
	500	8,8	[5]
	750	9,4	[5]
	1000	10,0	[5]
	1250	10,8	[5]
	400÷1700	11,0	[1]
Ca	—220÷40	18,5	[8]
	—150	18,0	[4]
	— 50	20,9	[4]
	30	22,5	[4]
	20÷100	25,2	[4]
	0÷300	22,0	[4]

Продолжение табл. 9.3

Вещество	t, °C	α или $\bar{\alpha}$, 10^{-6} $град^{-1}$	Литература
$CaCl_2$	20÷190	22,3	[2]
CaF_2	—179	7,1	[1]
	—117	14,6	[1]
	— 10	18,5	[1]
	—192÷17	18,38 2,511 —21,1	[3]
	43÷637	18,51 1,48 21,52	[2]
CaO	0÷1400	13,8	[1]
Cd	—220	20,6	[4]
	—160	27,4	[4]
	— 50	28,3	[8]
	0	29,0	[8]
	100	30,4	[8]
	200	31,8	[8]
	300	32,5	[8]
	0÷200	29,0 55,0	[18]
CdB_6	20÷800	8,7	[15]
CdF_2	20÷120	27,0	[3]
CdI_2	40	29,1	[1]
CdTe	50	4,5	[3]
Ce	27÷775	7,1	[8]
CeB_6	20÷800	7,3	[15]
Co	0	12,0	[6]
	100	13,1	[5]
	200	14,2	[7]
	300	14,5	[5]
	400	15,7	[5]
	500	16,0	[5]
	0÷500	12,0 11,24 —0,93	[17]
	600	16,0	[5]
	700	16,4	[5]
	900	16,9	[5]
CoSi	20÷800	10,6	[15]
Cr	—200÷0	4,1	[4]
	—100÷0	5,1	[4]
	0	5,88	[6]
	0÷700	5,9 15,48 —1,02	[6]
	0÷200	7,78	[6]
	0÷400	8,4	[6]
	0÷600	9,22	[6]
	0÷900	11,0	[6]
	730÷1100	14,9	[8]
	1100÷1490	19,4	[8]
Cr_4B	20÷1100	8,2	[15]
CrB	20÷1100	9,5	[15]
CrB_2	20÷1100	11,1	[15]
Cr_7C_3	20÷1100	9,4	[15]
Cr_3C_2	20÷1100	11,7	[15]
CrN	20÷800	2,3	[15]
	850÷1040	7,5	[15]
Cr_2N	20÷1100	9,45	[15]
Cs	0	97,0	[6]
CsBr	0	46,6	[3]
	—139÷300	46,6 4,67 —1,78	[3]

Продолжение табл. 9.3

Вещество	t, °C	α или $\bar{\alpha}$, 10^{-6} $град^{-1}$	Литература
CsCl	20÷469	45 4,84	[3]
CsI	30	48,6	[2]
Cu	—272÷—190	1,4	[8]
	—183	9,38	[8]
	—117	14,06	[8]
	—100÷400	16,2 19,0 — 6,0	[1]
	0÷1000	16,7 7,2	[18]
	20	16,61	[8]
	100	17,18	[8]
	300	18,45	[8]
	500	19,15	[8]
	700	20,72	[8]
	900	22,50	[8]
	1100	24,10	[8]
CuB_6	20÷800	6,5	[15]
CuBr	20÷150	19	[19]
CuCl	40÷140	10	[3]
CuI	20÷150	22	[2]
Cu_2O	20÷70	0,93 2,10	[2]
Dy	—100÷1000	11,8	[8]
Er	—170÷950	12,0	[8]
Eu	—200÷780	26	[8]
Fe	—200÷20	9,18	[1]
	—100÷0	10,4	[4]
	0	11,3	[6]
	0÷100	12,1	[1]
	0÷300	13,2	[1]
	0÷500	14,2	[1]
	0÷700	15,0	[1]
	0÷800	11,3 17,6 —1,68	[6]
Fe_4N	25	7,9	[15]
FeS_2	—10	8,43	[1]
	—160÷0	8,50 1,46 —12,0	[2]
	45÷350	8,40 1,12 0,92	[2]
Ga	20	18,1	[2]
GaAs	—233	—0,50	[3]
	—218	0,00	[3]
	—195÷17	3,64	[3]
	18÷287	5,74	[3]
	287÷407	7,44	[3]
GaP	—	5,3	[13]
GaSb	—	6,9	[13]
Gd	30÷950	9,7	[8]
Ge	—243	—0,4	[3]
	—225	0,00	[3]
	—203	0,67	[3]
	—173	2,20	[3]
	—113	4,29	[3]
	—53	5,03	[3]
	—3	5,50	[3]
	27	5,75	[3]
	0÷250	5,8	[8]

Продолжение табл. 9.3

Вещество	t, °C	α или $\bar{\alpha}$, 10^{-6} $град^{-1}$	Литература
Ge	230	6,0	[9]
	450	7,3	[9]
	840	7,5	[9]
CeO_2	100÷500	8,6	[1]
H_2O	—250	—6,1	[4]
(лед)	—210	—1,3	[6]
	—200	0,8	[6]
	—190	3,3	[6]
	—150	16,8	[6]
	—100	33,9	[6]
	— 80	39,2	[6]
	— 50	45,6	[6]
	— 20	50,5	[6]
	0	52,7	[6]
Hf	—200÷0	—1,14	[20]
	—100÷0	—0,53	[20]
	0÷200	1,15	[20]
	0÷400	2,40	[20]
	0÷650	3,61	[20]
	0÷850	5,02	[20]
	0÷975	5,74	[20]
HfB_2	20÷1000	5,73	[15]
HfC	25÷600	6,59	[15]
HfN	20÷1100	6,9	[15]
Hg	—183÷—39	30	[10]
	—78÷—39	41	[10]
Ho	400	9,5	[8]
In	—180÷20	26,7	[4]
	10÷90	24,75 423,8	[1]
	20÷100	30,5	[4]
InAs	—195÷17	3,40	[3]
	17÷300	5,20	[13]
	300÷400	7,04	[3]
InSb	—263	—0,06	[3]
	—243	—1,72	[3]
	—223	—0,33	[3]
	—203	—0,89	[3]
	—173	2,76	[3]
	— 83	4,35	[3]
	— 23	4,78	[3]
	7	4,95	[3]
	27	5,04	[3]
Ir	—183÷20	5,71	[10]
	—150÷—50	5,64	[1]
	—150÷800	6,41 6,39 —1,30	[1]
	0	6,5	[6]
	200	6,8	[8]
	400	7,11	[8]
	600	7,42	[8]
	800	7,72	[8]
	1000	9,02	[1]
	1250	9,60	[1]
	1500	10,18	[1]
	1750	10,76	[1]
I	—190÷17	83,7	[10]
	0	93,0	[6]
K	0	84	[7]
	0÷56	79,7 139,4	[1]
KBr	—160÷300	37,6 4,1	[2]

Продолжение табл. 9.3

Вещество	t, °C	α или $\bar{\alpha}$, 10^{-6} $град^{-1}$	Литература
KBr	0÷79	37	[19]
	45÷680	37,99 4,1	[2]
KCl	—100÷300	36,0 3,9	[2]
	0	36	[2]
	0÷600	34,6 3,5	[2]
	50	37,4	[3]
	200	41,2	[3]
	400	48,0	[3]
	600	54,7	[3]
	745	59,7	[3]
KF	—79÷0	45,0	[2]
	0÷79	33,3	[19]
KI	20÷100	40,6	[2]
La	—173÷310	5,2	[8]
	310÷775	9,6	[8]
La_2Si_3	20÷1100	8,7	[15]
Li	—178	17,0	[4]
	—98	36,3	[4]
	—3	45,7	[4]
	20	56,0	[9]
	0÷100	60	[8]
LiBr	—184÷—79	39,3	[2]
	—79÷0	46,6	[2]
	0÷79	46,6	[19]
LiCl	0÷79	40,6	[19]
LiF	—150÷0	31,95 5,05 —4,07	[19]
	0÷79	30,6	[19]
	47÷794	33,17 3,08 2,40	[2]
LiI	—184÷—79	47	[2]
	—79÷0	55,7	[2]
	0÷79	56	[19]
Lu	400	12,5	[8]
Mg	—190÷20	21,3	[4]
	—100÷0	23,4	[1]
	0	25,07	[6]
	20÷100	25,9	[4]
	20÷300	28,0	[4]
	0÷600	31,71	[6]
	—150÷500	25,0 30,0 —3,48	[1]
MgF_2	25÷100	10,7	[3]
(иртран-1)	25÷200	11,0	[3]
	25÷300	11,5	[3]
	25÷400	11,9	[3]
(иртран-51)	20÷500	11,5	[3]
MgO	20÷1700	15,6	[3]
	27	11,2	[3]
	50÷715	10,89 0,59 0,10	[2]
Mn	—200÷0	20,4	[6]
	0	22,6	[6]

Продолжение табл. 9.3

Вещество	t, °C	α или $\bar{\alpha}$, 10^{-6} $град^{-1}$	Литература
Mn	0÷200	22,2	[6]
	0÷400	23	[6]
	0÷600	24	[6]
	0÷800	26	[6]
α-Mn	—190÷0	15,9	[4]
	10	22,3	[4]
	0÷300	25,2	[4]
β-Mn	—183÷0	12,8÷20,4	[4]
γ-Mn	—70÷0	13,6	[4]
	10	14,8	[4]
MnS	20÷70	15,2	[2]
MnS_2	20÷70	11,1	[2]
Mo	—190÷0	4,2	[4]
	—100÷0	4,8	[4]
	0÷100	5,19	[6]
	0÷300	5,39	[6]
	0÷500	5,59	[6]
	0÷800	5,87	[6]
	0÷1600	6,65	[6]
	30÷2330	7,2	[1]
	0÷2100	5,1 1,93	[17]
Mo_2C	12÷190	7,8	[15]
Mo_2N	20÷1100	6,2	[15]
MoSi	20÷800	16,3	[15]
$MoSi_2$	20÷1480	5,1	[15]
Na	—193÷0	59,8	[4]
	0÷17	68,2	[4]
	0÷95	72	[8]
NaBr	—184÷—79	31,0	[2]
	—79÷0	36,7	[2]
	15÷60	42,52	[2]
	36÷285	38,65 2,24 8,20	[2]
NaCl	—153÷27	38,95 2,98 —25,5	[2]
	0	39	[3]
	0÷300	39,2 3,9	[2]
NaF	—184÷—79	23	[2]
	—79÷0	33	[2]
	30	32,2	[3]
	195	35,9	[3]
	400	40,6	[3]
	625	45,5	[3]
	30÷250	33,13 2,95	[3]
Na_2WO_4	20÷600	17,68 2,77	[2]
Nb	—212÷0	5,8	[4]
	—100÷0	6,9	[4]
	—100÷400	7,06 2,88	[17]
	0	7,06	[6]
	0÷100	7,2	[4]
	0÷400	7,64	[6]
	20÷1500	10,0	[4]
NbB_2	20÷1100	7,9	[15]
Nb_2N	20÷1100	3,26	[15]
NbN	0÷270	10,1	[15]

Продолжение табл. 9.3

Вещество	t, °C	α или $\bar{\alpha}$, 10^{-6} $град^{-1}$	Литература
Nb_2C	12÷190	7,0	[15]
	20÷1100	6,5	[15]
Nd	—173÷850	8,6	[4]
	100÷260	0,4	[4]
NdB_6	20÷800	7.3	[15]
NH_4Br	31÷122	55,53 12,16 185,2	[2]
NH_4Cl	40	62,55	[1]
	31÷128	49,16 21,22 137,2	[2]
Ni	—273÷—130	5,8	[8]
	—253÷10	8,1	[4]
	—200÷350	12,54 17,5 — 2,25	[1]
	—192÷16	10,0	[4]
	—100÷0	11,6	[1]
	0	12,54	[1]
	0÷200	14,0	[6]
	0÷400	14,98	[6]
	25÷600	15,56	[4]
/	0÷800	16,3	[6]
	30÷1000	18,0	[7]
Os	0	6,1	[6]
	50	6,79	[6]
	10÷90	6,95 17,0	[1]
P	0	125	[6]
Pa	17÷1115	11,2	[8]
Pb	—200÷150	28,3 24,0 3,99	[1]
	—200	26,5	[8]
	—100	27,3	[8]
	—100÷300	28,3 20	[14]
	0	28,3	[6]
	100	29,2	[8]
	300	31,3	[8]
$PbCl_2$	20÷120	31	[3]
$PbNO_3$	75÷180	31,6	[2]
PbO_2	25÷93	7,9	[1]
Pd	—200÷—100	9,75	[1]
	—200÷100	11,60 8,3 —2,62	[1]
	—191÷16	10,3	[4]
	—100÷0	11,1	[1]
	16÷100	12,4	[4]
	16÷500	12,8	[4]
	16÷1000	13,8	[4]
Po	—93÷30	20,8	[8]
Pr	—173÷800	6,5	[8]
PrB_6	20÷800	7,5	[15]
Pt	—191÷16	8,0	[4]
	—150÷—50	7,97	[1]
	— 90÷0	8,7	[4]
	0	8,95	[6]
	0÷100	9,0	[4]
	0÷300	9,35	[4]
	0÷500	9,6	[4]
	0÷800	9,9	[6]

Продолжение табл. 9.3

Вещество	t, °C	α или $\overline{\alpha}$, 10^{-6} $град^{-1}$	Литература
Pt	0÷1070	10,35	[1]
	—150÷600	8,79 6,23 —1,56	[1]
	0÷1100	8,95 2,44	[6]
Pu	—180÷100	48,39 191,8	[1]
	—150÷100	42,4	[6]
	122÷206	26,04 148,0	[5]
	130÷200	20,9	[1]
	200÷300	60,0	[8]
	320÷500	—15,4	[8]
	500÷540	—27,5	[8]
	540÷600	36,4	[8]
Rb	0÷30	90	[8]
RbBr	—184÷—79	32,3	[8]
	—79÷0	34,7	[2]
RbCl	—184÷—79	30,5	[2]
	—79÷0	32,8	[2]
RbI	—184÷—79	37,3	[2]
	—79÷0	39,7	[2]
Re	0÷1000	6,7	[8]
Rh	—273÷—90	4,4	[8]
	—174	5,0	[4]
	— 92	7,4	[4]
	— 28	7,9	[4]
	—180÷100	8,19 8,44 —2,1	[1]
	0÷1500	7,85 8,9 —0,33	[18]
	40	8,5	[1]
	0÷200	8,71	[6]
	0÷500	9,7	[4]
	0÷1000	10,8	[4]
	0÷1500	12,1	[4]
Ru	50	9,91	[8]
S (ромбическая)	0	74,0	[6]
S (моноклинная)	0	80	[6]
Sb	—190÷17	10,22	[1]
	0	9,2	[6]
	200	9,6	[6]
	400	10,0	[6]
	600	10,3	[6]
	0÷600	9,2 3,8	[14]
Sb_2O_3	40	19,63	[1]
Sc	400	11,4	[8]
ScB_6	20÷800	6,8÷7,6	[15]
Se (аморфный)	—78÷0	42,7	[4]
	0	43,9	[4]
Se (поликристаллический)	—160÷0	37,3	[4]
	—78÷19	20,3	[4]
	20	37,0	[9]
	20÷100	22,9	[4]
	205	45,2	[4]

Продолжение табл. 9.3

Вещество	t, °C	α или $\overline{\alpha}$, 10^{-6} $град^{-1}$	Литература
Si	—233	—0,05	[3]
	—203	—0,59	[3]
	—191÷18	2,5 15,4	[1]
	—173	—0,31	[3]
	—113	—0,65	[3]
	—83	1,28	[3]
	—3	2,27	[3]
	27	2,33	[3]
	20÷500	2,4	[4]
	25÷900	3,002 0,154 0,203	[3]
	500	3,0	[4]
	1000	3,3	[4]
SiC	41÷605	4,3	[5]
	20÷1000	5,2	[5]
	41÷1205	4,7	[5]
	0÷1700	5,4	[5]
SmB_6	20÷800	6,8	[15]
Sn	0	21	[6]
	0÷100	26,2	[6]
	0÷200	31,6	[6]
SnO_4	40	3,2÷3,9	[1]
Sr	0÷230	20,6	[8]
	230÷500	22,2	[8]
	540÷650	20,0	[8]
$Sr(NO_3)_2$	75÷425	31,6 0,8 4,0	[2]
Ta	—190÷20	6,2	[4]
	0÷400	6,46 1,8	[4]
	20÷100	6,6	[4]
	20÷300	6,6	[4]
	20÷500	6,6	[4]
	20÷1400	7,3	[4]
	27÷2400	7,8	[4]
	1670÷2860	11,2	[4]
TaB_2	20÷1100	8,3	[15]
TaC	20÷1100	8,29	[15]
TaN	20÷700	3,6	[15]
Ta_2N	20÷1000	5,2	[15]
$TaSi_2$	20÷1000	8,85	[15]
Tb	20	11,8	[8]
Te	0÷100	17,0	[8]
	40	16,8	[4]
Th	—216÷20	9,8	[4]
	20÷100	11,3	[4]
	20÷300	13,1	[4]
	20÷600	13,7	[4]
	30÷1000	12,5	[5]
ThB_6	20÷800	7,8	[15]
ThO_2	25÷1700	10,2	[1]
Ti	—273÷—120	2,5	[8]
	—195÷20	6,8	[4]
	0	7,7	[6]
	0÷700	7,7 7,2	[14]
	20÷200	8,09	[9]
	20÷400	9,45	[4]
	20÷600	9,9	[4]
	20÷800	10,1	[4]

Продолжение табл. 9.3

Вещество	t, °C	α или $\bar{\alpha}$, 10^{-6} $град^{-1}$	Литература
Ti	500÷600	11,39	[9]
	700÷800	10,05	[9]
	860÷960	10,5	[4]
TiB_2	17÷400	5,5	[15]
TiB_4	—20÷30	94,0	[2]
TiC	12÷270	7,74	[15]
	24÷605	7,24	[16]
TiI_4	—30÷125	74	[2]
Tl	—216÷—195	26,17	[9]
	—195÷—183	27,61	[9]
	—183÷—160	28,38	[9]
	—160÷—140	29,19	[9]
	—120÷—100	30,13	[9]
	— 80÷—60	31,09	[9]
	— 40÷—20	32,37	[9]
	20	28	[9]
	0÷100	29,4	[4]
	0÷294	33	[1]
TlB_2	25÷1300	8,1	[15]
TlBr	15÷60	51,20	[3]
TlCl	15÷60	54,57	[3]
TlI	40	45,0	[2]
Tu	400	11,6	[8]
U	—260÷150	10,7	[8]
	150÷650	19,2	[8]
	660÷770	10,9	[8]
	780÷1110	19,4	[8]
UB_2	20÷1100	10,4	[15]
UC	20÷1100	7,5	[15]
UO_2	25÷1000	10,52	[1]
V	—210÷50	6,15	[8]
	—183÷0	6,6	[4]
	20	7,8	[4]
	0÷100	8,3	[4]
	0÷500	9,6	[7]
	0÷1000	10,9	[5]
VB_2	0÷1100	7,5	[15]
VC	17÷190	7,2	[15]
VN	20÷1100	8,11	[15]
W	—190÷0	3,8	[10]
	—100÷0	4,2	[4]
	—150÷502	4,28 0,58	[1]
	0	4,3	[6]
	0÷2100	4,3 1,42	[17]
	400	4,45	[1]
	1027	5,19	[10]

Продолжение табл. 9.3

Вещество	t, °C	α или $\bar{\alpha}$, 10^{-6} $град^{-1}$	Литература
W	1300	5,12	[1]
	1700	6,22	[1]
	2027	7,26	[10]
	2600	7,7	[8]
WC	22÷400	3,84	[15]
W_2C	17÷270	5,8	[15]
	0÷2400	7,3	[16]
Y	400	10,8	[8]
YB_6	20÷800	6,2	[15]
YC	20÷1100	1,36	[15]
Yb	27÷700	29,9	[8]
YbB_6	20÷800	5,8	[15]
Zn	—200÷0	22	[6]
	—100÷0	28	[6]
	—170÷60	29,5 43,2 —12,0	[1]
	—100÷400	30 40	[1]
	0	30	[6]
	0÷100	32	[6]
	0÷200	34	[6]
	0÷300	36	[6]
	0÷400	38	[6]
ZnCl	20÷150	29	[2]
ZnS (иртран-2)	—150÷0	6,16 0,517 —11,8	[2]
	25÷100	6,6	[3]
	25÷200	6,9	[3]
	25÷300	7,2	[3]
	25÷400	7,5	[3]
Zr	—273÷320	5,9	[8]
	—183÷0	4÷5,1	[4]
	20	6,3	[9]
	20÷200	5,4	[4]
	20÷400	6,1	[4]
	20÷700	7,1	[4]
	900÷1320	9,5	[4]
ZrB_2	20÷1100	6,88	[15]
ZrC	0÷100	6,3	[16]
	0÷400	8,2	[16]
	0÷700	9,5	[16]
	0÷1000	10,2	[16]
ZrN	20÷1100	7,24	[15]
ZrO_2	0÷79	4,5	[19]

Таблица 9.4

Средний температурный коэффициент линейного расширения специальных сплавов [4, 6, 8, 11]

Сплав (состав, вес. %)	Интервал температур, °С	$\bar{\alpha}$, 10^{-6} *град*$^{-1}$	Сплав (состав, вес. %)	Интервал температур, °С	$\bar{\alpha}$, 10^{-6} *град*$^{-1}$
Дельта-металл (60% Cu; 36% Zn; 2% Sn; 2% Fe)	20÷100	20	96,6% Al; 3,4% Ni	20÷100	21,8
				20÷300	23,7
Инвар (64% Fe; 36% Ni)	0÷100	0,01÷2,0	60% Al; 40% Si	20÷100	14,7
Кантал (68,5% Fe; 23,4% Cr;	20÷100	11,6		20÷300	17,1
6,2% Al; 1,9% Co; 0,06% C)	20÷900	13,9÷15,1	69,5 % Al; 30,5% U	20÷100	19,4
				20÷300	21,3
Ковар (Фернико) (54% Fe;				20÷600	22,1
31% Ni; 15%Co)	25÷300	5,0			
Манганин (84—86% Cu;	20÷100	18,1	97% Be; 3,0% Cu	20÷100	15,9÷17,3
12% Mn; 2—4% Ni)	0÷400	18,9		20÷300	16,4÷17,4
	0÷800	21,1	56% Co; 35% Fe; 9% Cr	20÷60	—1,1
Монель (65—70% Ni;	25÷100	14,0	52% Co; 37,5% Fe; 10,5% Cr	20÷60	1,7
25—30% Cu; 2% Fe; 1,5% Mn)	25÷600	16,3	80,5% Cu; 19,5% Ni	—182÷0	13,0
Стеллит (80% Co; 20% Cr)	20÷100	14,1		0÷40	14,7
	20÷300	15,2	97% Pb; 3% Sb	20÷100	28,3
	20÷600	16,1	80% Pt; 20% Ir	—190÷0	7,5
95,8% Al; 4,2% Be	20÷100	22,4		0÷100	8,3
	20÷500	26,6		0÷1000	9,6
66,8% Al; 33,2% Cu	20÷100	19,7	80% Pt; 20% Rh	0÷500	9,6
	20÷300	20,8		0÷1000	10,4
				0÷1400	11,0

Таблица 9.5

Средний температурный коэффициент линейного расширения $\bar{\alpha}$, 10^{-6} *град*$^{-1}$, сталей в интервале от 20°С до указанной температуры

Марка	Температура, °С							Литература
	100	200	300	400	500	600	700	
Углеродистые стали:								
Ст08 кп	11,66	12,32	13,02	13,65	14,22	14,64	15,01	[21]
Ст15	12,18	12,34	13,12	13,49	14,27	14,30	—	[21]
Ст20	11,16	12,12	12,78	13,38	13,93	14,38	12,91	[21]
Ст25	12,18	12,66	13,08	13,47	13,92	14,41	14,88	[21]
Ст30	11,09	11,89	12,72	13,42	14,02	14,43	14,76	[21]
Ст40	11,21	12,14	13,0	13,58	14,05	14,58	14,85	[21]
Ст45	11,59	12,32	13,09	13,71	14,18	14,67	15,08	[21]
Ст50	12,0	12,4	12,9	13,3	13,9	14,1	14,3	[21]
Легированные стали:								
15Х, 20Х	11,3	11,6	12,5	13,2	13,7	—	—	[21]
30Х	12,2	12,8	13,3	13,7	14,1	14,5	14,8	[6, 21]
15ХФ, 20ХФ	12,0	12,5	13,2	13,6	14,1	14,5	14,8	[6, 21]
25ХФ	11,9	12,4	13,1	13,7	14,2	14,5	14,9	[21]
15М	12,0	12,6	13,2	13,7	14,2	14,7	—	[6, 21]
20М	11,2	12,6	13,0	13,7	14,2	14,7	14,8	[6, 22]
15ХМ	11,9	12,6	13,2	13,7	14,0	14,3	—	[5, 6, 21]
20ХМ, 20ХМА	12,1	12,8	13,0	13,6	14,0	14,3	—	[6, 22]
30ХМ, 30ХМА	12,3	12,5	12,9	13,9	14,4	14,6	—	[6, 21]
35ХМ, 35ХМА	12,3	12,6	—	14,5	14,6	—	—	[21]
15ХС	11,9	12,6	13,2	13,7	14,0	14,3	—	[5, 6, 21]
38ХС, 40ХС	11,7	12,7	—	14,0	—	14,8	—	[21]
Х9С2	11,3	12,1	12,8	14,1	14,3	14,3	14,2	[6]
Х6М	12,6	13,2	13,7	14,0	14,3	—	—	[6]
Х12М	11,2	12,5	12,3	13,7	14,0	14,3	—	[5, 6, 21]

Марка	Температура, °С							Литература
	100	200	300	400	500	600	700	
27СГ, 35СГ	11,5	12,6	—	14,0	—	14,8	—	[21]
50С2Г	10,6	11,2	12,2	12,9	13,4	13,7	14,1	[6]
25Н	12,2	12,2	—	13,8	—	14,4	—	[21]
Н28	13,7	15,3	16,3	17,0	17,5	17,8	18,1	[6]
12ХН2	12,6	13,8	—	14,8	—	14,3	—	[21]
12ХН3А, 20ХН3А	11,8	13,0	—	14,2	—	15,6	—	[21]
Х20Н12	17,3	17,5	17,8	18,0	18,3	18,5	18,8	[6]
2Х25Н20	14,4	15,2	16,1	16,5	16,8	17,2	17,6	[6]
30ХН3, 30ХН3А	11,4	12,3	12,8	13,2	13,4	13,7	13,7	[6]
Х18Н11Б	16,7	16,9	17,1	17,7	18,3	18,8	19,3	[6]
Х18Н9М	17,3	17,5	17,8	18,0	18,3	18,5	18,8	[6]
33ХН3МА	10,8	11,6	—	13,3	13,7	—	—	[21]
4Х14НВ2М(ЭИ-69)	—	—	17,8	—	18,0	—	—	[22]
1Х14Н14В2М (ЭИ-257)	16,6	16,7	17,3	17,2	18,2	19,1	19,1	[6, 22]
10Х2Ф	12,2	12,7	13,0	13,5	13,8	14,2	14,8	[6]
40ХФА	11,0	—	12,0	—	—	14,5	—	[21]
10Х2ФВ	10,5	11,3	12,6	12,9	13,4	13,6	13,8	[6]
12ХМФ	13,6	13,7	14,0	14,2	14,5	14,7	14,8	[6]
12Х1МФ	10,8	11,8	12,35	12,8	13,0	13,65	13,8	[21]
38ХМЮА	13,0	14,0	—	14,8	—	16,0	—	[21]
18Х2Н4ВА	14,5	14,5	—	14,3	—	14,2	—	[21]
25ХНВА	10,7	13,1	—	14,6	—	13,2	—	[21]
Х19Н8В	14,8	16,5	17,1	17,6	18,0	18,4	18,8	[6]
Х18Н9С2	16,2	17,1	17,9	18,6	19,2	19,9	20,5	[6]
Х23Н13(ЭИ-319)	14,9	15,7	16,6	17,1	17,5	17,8	18,2	[6, 22]
25Х2МФА	11,3	11,4	—	13,9	—	14,4	—	[6, 22]
Жаропрочные стали:								
Ж-1 (1Х13)	10,3	11,6	10,7	12,1	12,4	12,6	12,9	[6, 22]
Ж-2 (2Х13)	9,6	10,4	10,6	10,9	11,4	11,8	12,1	[6, 22]
Ж-3 (3Х13)	10,2	11,1	11,6	11,9	12,3	12,5	12,8	[6, 22]
Ж-4 (4Х13)	9,8	11,0	11,6	12,0	12,4	12,5	12,9	[6, 22]
Ж-18	10,0	—	—	—	11,1	11,3	11,5	[21]
Нержавеющие стали:								
Х18Н25С2	14,2	17,5	—	—	—	19,8	—	[22]
Х18Н9 (ЭЯ-1)	17,3	17,5	17,8	18,0	18,3	18,5	18,8	[6]
1Х18Н9Т (ЭЯ-1Т)	16,6	17,0	17,2	17,5	17,9	18,2	19,3	[6, 22]
2Х18Н9 (ЭЯ-2)	17,5	18,2	18,6	19.2	20,1	20,5	20,8	[6, 21]
Специальные стали:								
Г-13	18,01	19,37	20,71	21,71	20,76	19,86	20,49	[6]
Г20Х12Ф	15,4	17,6	18,9	21,2	21,6	23,1	25,0	[6]
Г21Х15Т	15,3	17,6	19,8	21,8	22,7	23,0	24,1	[6]
Р18	11,23	11,71	11,98	12,20	12,41	12,62	12,97	[6]

Таблица 9.6

Температурный коэффициент линейного расширения цветных металлов и сплавов при 20°С

Марка	α, 10^{-6} *град*$^{-1}$	Литература	Марка	α, 10^{-6} *град*$^{-1}$	Литература
Алюминиевые сплавы					
Д1, Д16, Д18	12,9	[5]	АЛ 8	24,5	[5]
Авиаль АВ	23,5	[23]	АЛ 9	21,5	[5]
Магналий АМГ-5	23,9	[23]	АЛ 10	20,5	[5]
АЛ 1	22,3	[5]	А, АМц	24,0	[24]
АЛ 2, АЛ 4, АЛ 6, АЛ 13	20,0	[5, 23]	АМц	23,4	[24]
АЛ 3, АЛ 12	22,0	[5, 23]	АМц-5	23,9	[24]
АЛ 5	21,0	[5]	АК-4, АК-8	22,0	[24]
АЛ 7	22,7	[5]			
Бронзы					
Бр. ОФ 4-0,25	17,6	[23]	Бр. С30	18,4	[23]
Бр. ОФ 6,5-0,4	17,1	[23]	Бр. ОНС 11-4-3	17,0	[5]
Бр. ОФ 7-02	17,1	[23]	Бр. А 7	15,9	[23]
Бр. ОФ 10-1	17,0	[5, 23]	Бр. А 10	17,0	[23]
Бр. ОЦ 4-3	18,0	[7, 10]	Бр. АЖ 9-4	18,1	[23]
Бр. ОЦ 8-4	16,6	[5, 23]	Бр. АЖН 10-4-4	17,1	[23]
Бр. ОЦ 10-2	18,3	[5, 23]	Бр. АЖН 11-6-6	14,9	[23]
Бр. ОЦС 6-6-3	17,1	[5, 23]	Бр. АМц 9-2	17,0	[23]
Бр. ОС 1-22	18,4	[23]	Бр. АЖМц 10-3-1,5	16,0	[23]
Бр. ОС 5-25	17,6	[5]	Бр. Мц 5	20,4	[23]
Бр. ОС 7-17	17,3	[5]	Бр. КМц 3-1	15,8	[23]
Бр. ОС 8-12	17,1	[5]	Бр. Б-2	17,4	[23]
Латуни					
Л 62	20	[5, 23]	ЛМц 58-2	21,2	[5, 23]
Л 68, Л 70	19	[23]	ЛЖМц 59-1-1	22	[5, 23]
Л 80	18,8	[5, 23]	ЛЖМц 52-4-1	22,7	[23]
Л 85	18,7	[5, 23]	ЛО 62-1	19,3	[5]
Л 90, Л 96	17	[5, 23]	ЛО 70-1	19,7	[5, 23]
ЛА 85-0,5	18,6	[23]	ЛО 90-1	18,4	[5]
ЛАН 59-3-2	19	[23]	ЛС 59-1	19	[23]
ЛК 80-3	17	[23]	ЛС 64-2	18	[5]
ЛКС 80-3-3	17	[23]	ЛС 74-3	17,5	[23]
			ЛН-65-5	18,2	[23]
Сплавы магния и никеля					
МА1 — МА3	26	[5]	Монель	14,5	[5, 23]
МЛ2 — МЛ6	26,4	[5]	Монель К	12,9	[23]
ТБ	15,3	[23]	Манганин	16	[23]
ТП	12,0	[5]	Нейзильбер	18,4	[5]
Константан	14,4	[5, 23]	Ферронихром	13	[23]
Алюмель	13,7	[5]	Мельхиор	16	[5]
Хромель	12,8	[23]	Никелевые бронзы	14	[23]
Копель	14	[5]			

Таблица 9.7

Температурный коэффициент линейного расширения строительных материалов

Наименование	t, °С	α, 10^{-6} $град^{-1}$	Литература
Асфальт	18÷25	200	[1]
Бакелит	22÷60	22	[10]
Бетон	20	10÷14	[7]
Бумага (твердая)	0÷50	10	[10]
Гранит	20	8,3	[10]
Глина	25÷100	8,1	[10]
Дерево: бук	20	2,57	[10]
ясень	0÷100	9,51	[10]
каштан	20	6,49	[10]
вяз	20	5,65	[10]
красное	20	3,61	[10]
клен	20	5,38	[10]
дуб	20	4,92	[10]
сосна	20	5,41	[10]
Известняк	20	4÷9	[7]
Кирпич	20	3÷9	[7]
Мрамор	75÷100	15	[10]
Цемент	20	10÷14	[10]
Фибра	18÷25	9	[1]
Шифер	20	6÷10	[10]

Таблица 9.8

Температурный коэффициент линейного расширеиня пластмасс и каучуков

Наименование	t, °С	α, 10^{-6} $град^{-1}$	Литература
Аминопласты	20	25÷53	[21]
Асбовинил	20	33÷40	[21]
Асботекстолит	20	25÷28	[21]
Винипласт	20	40	[21]
Волокнит	20	30	[21]
Воск	0÷100	240	[1, 12]
Гетинакс	20	20	[22]
Капрон	—	100	[21]
Каучук	20	66	[10]
Оргстекло авиационное	—	36	[21]
Оргстекло светотехническое	—	34,3	[21]
Парафин	20	130	[10]
Поликапролактам	—	6÷15	[10]
Полистирол	20	70	[21]
Полиэтилен	20	230	[21]
Резина обыкновенная	20	220	[21]
Резина твердая	20÷60	80	[10]
Стеклотекстолит	20÷100	0,8	[21]
Текстолит	20	33÷40	[21]
Тефлон (фторопласт-3)	20	6÷220	[21]
Целлюлоид	20	130	[21]
Эбонит	25÷35	84,2	[10]
Эпоксидные смолы (твердые)	—	115	[21]
Этролы целлюлозные	—	7÷160	[21]

Таблица 9.9

Температурный коэффициент линейного расширения стекла

Наименование	t, °С	α, 10^{-6} $град^{-1}$	Литература
Белое	0÷500	6	[12]
Кварцевое*	—196÷16	0,256	[10]
	0÷30	0,42	[10]
	0÷100	0,50	[10]
	0÷800	0,546	[10]
	0÷1200	0,585	[10]
Корнинг 790	0÷350	0,8	[12]
Корнинг 774	0÷350	3,2	[12]
Корнинг 8800	0÷350	6,1	[12]
B—S-крон	18÷100	9,12	[1]
	200÷500	9,0	[1]
	540÷560	39,3	[1]
Si-крон	37	9,20	[1]
	93	10,4	[1]
	151	10,61	[1]
	212	11,11	[1]
Крон легкий	2÷400	10,2	[1]
	500÷520	55,5	[1]
Крон	16÷94	9,03	[1]
Крон О 1168	15÷95	9,5	[6]
Ва-крои	23÷500	9,00	[1]
	570÷610	64,9	[1]
Нейтральное	—	8	[6]
Оптическое KRS-5 (42% TlBr; 58% TlI)	—50÷20	61	[3]
	20÷100	58	[3]
Оптическое KRS-6 (40% TlBr; 60% TlI)	—50÷20	55	[3]
Оптическое KRS-13 (65% AgBr; 35% AgCl)	20	39	[3]
Пирекс	0÷100	3	[6, 7]
	20÷200	3,1	[6]
Стекло для рентгеновских трубок	25÷500	3,8	[12]
Термометрическое Иена 16'''2*	0÷100	8,1	[10]
Термометрическое Иена 59'''	—190÷16	4,24	[10]
	0÷100	5,8	[10]
Термометрическое 2954	0÷100	6,28	[12]
Термометрическое тюрингское мягкое	0÷100	9,2	[12]
Ва—Si-флинт легкий	7÷90	5,23	[1]
Ва-флинт	22÷500	8,8	[1]
Ва-флинт легкий	10÷100	9,0	[1]
Флинт легкий	22÷450	8,8	[1]
	490÷510	34,7	[1]
Si-флинт	20÷100	8,03	[1]
Флинт О 118	0÷100	7,3	[6]
Химическое посудное № 23; 846	0÷100	9	[12]

* Применяются интерполяционные формулы:
$\alpha \cdot 10^6 = 0{,}363 + 1{,}813 \cdot 10^{-3} t - 3{,}4 \cdot 10^{-6} t^2$ $(-253 \leqslant t \leqslant 100°C)$;
$\alpha \cdot 10^6 = 0{,}395 + 1{,}292 \cdot 10^{-3} t - 1{,}689 \cdot 10^{-6} t^2$ $(0 \leqslant t \leqslant 500°C)$.

2* Применяются интерполяционные формулы:
$\alpha \cdot 10^6 = 7{,}222 + 5{,}16 \cdot 10^{-3} t + 7{,}49 \cdot 10^{-6} t^2 + 101{,}4 \cdot 10^{-15} t^3$
$(-253 < t < 100°C)$;
$\alpha \cdot 10^6 = 7{,}78 + 2{,}96 \cdot 10^{-3} t$ $(20 < t < 480°C)$.

Таблица 9.10

Средний температурный коэффициент линейного расширения керамических материалов [1]

Наименование	Интервал температуры, °С	$\bar{\alpha}$, 10^{-6} *град*$^{-1}$
Алюминия окись (крупнозернистая, плавленая)	20÷300	6,7
	20÷600	7,6
	20÷900	8,1
	20÷1200	9,0
	20÷1500	10,2
Алюминия окись (крупнозернистая, спекшаяся)	20÷300	5,9
	20÷600	7,2
	20÷900	8,2
	20÷1200	9,0
	20÷1500	9,6
Бериллия окись (спекшаяся)	25÷300	8,0
	25÷600	9,6
	25÷900	10,5
Магния окись (крупнозернистая, плавленая)	20÷300	13,3
	20÷600	13,5
	20÷900	13,9
	20÷1200	15,0
	20÷1500	16,0
Кальция окись (крупнозернистая, плавленая)	20÷300	10,2
	20÷600	11,6
	20÷900	12,8
	20÷1200	13,7
	20÷1500	14,7
Титана окись (крупнозернистая, плавленая)	20÷300	7,1
	20÷600	7,7
	20÷900	8,2
	20÷1200	8,7
	20÷1450	9,1
Тория окись (мелкозернистая, плавленая)	20÷300	7,1
	20÷600	8,5
	20÷900	9,0
	20÷1200	10,3
	20÷1500	10,4
Циркония окись (зернистая, кубической структуры, плавленая)	20÷300	7,6
	20÷600	9,2
	20÷900	10,0
	20÷1200	10,8
	20÷1500	11,6
Циркония окись (крупнозернистая, плавленая)	20÷300	6,9
	20÷600	8,4
	20÷900	8,8
	20÷1200	9,5
	20÷1500	9,4
Смесь $ZrO_2 \cdot SiO_2$ (мелкозернистая)	20÷300	3,7
	20÷600	4,2
	20÷900	4,7
	20÷1200	5,6
	20÷1300	5,8
Смесь $ZrO_2 \cdot V_2O_3$ (масса Нернста)	18÷2000	10,5
Смесь $Al_2O_3 \cdot TiO_2$ (мелкозернистая)	20÷300	0
	20÷600	0,2
	20÷900	1,7
	20÷1200	3,4
	20÷1450	4,4
Смесь $MgO \cdot Al_2O_3$ (крупнозернистая, плавленая)	20÷300	5,2
	20÷600	7,5
	20÷900	8,4
	20÷1200	9,1
	20÷1500	9,6
Карбид кремния SiC (перекристаллизованный)	20÷300	3,8
	20÷600	4,3

Продолжение табл. 9.10

Наименование	Интервал температуры, °С	$\bar{\alpha}$, 10^{-6} *град*$^{-1}$
Карбид кремния SiC (перекристаллизованный)	20÷900	4,5
	20÷1200	4,8
	20÷1500	5,2
Карбид бора B_4C (горячая формовка)	20÷300	5,2
	20÷600	5,3
	20÷900	5,8
Фторид кальция CaF_2 (спекшийся)	20÷300	22,3
	20÷600	24,8
	20÷900	26,1
MgF_2 (мелкозернистый)	20÷300	10,7
	20÷600	13,0
	20÷900	14,5
	20÷1000	14,8
Кирпич карборундовый	20÷600	5,2
	20÷900	5,8
	20÷1200	6,0
Кирпич шамотный	20÷600	7,5
	20÷900	6,7
	20÷1500	5,9
Кирпич динасовый	20÷600	22
	20÷900	13
	20÷1500	8,6
Фарфор берлинский [12]	20÷100	3,0
марквардовский	—	5,2
технический [6]	0	2,5
	20÷800	4,13
	100÷1400	5,53
изоляционный [7]	20	3,3
огнеупорный [7]	20	3÷6
лабораторный [7]	—	2÷5
высоковольтный [10]	—	3,79
Фаянс глиняный [5]	20÷700	5,4
технический [5]	20÷750	5,0
Янтарь (прессованный) [5]	0÷75	57

Таблица 9.11

Температурный коэффициент линейного расширения квасцов [2,3]

Наименование	t, °С	α, 10^{-6} *град*$^{-1}$	Наименование	t, °С	α, 10^{-6} *град*$^{-1}$
Аммиачные квасцы	—160	0,80	Калиевые квасцы	—170	1,54
	—140	1,13		—135	1,74
	—120	1,50		—103	3,10
	—100	2,13		— 72	4,30
	— 80	2,84		— 43	5,34
	— 60	3,75		— 18	7,94
	— 40	5,00		5	9,10
	— 20	6,13			
	0	6,65			

9.3. ТЕПЛОВОЕ РАСШИРЕНИЕ ЖИДКОСТЕЙ И ГАЗОВ

Тепловое расширение жидкостей и газов изотропно и характеризуется температурными коэффициентами объемного расширения (истинным и средним). Температурный коэффициент объемного расширения газов при увеличении температуры приближается к значению температурного коэффициента объемного расширения идеального газа, зависящего только от абсолютной температуры газа, T, °К : $\beta = 1/T$.

Температуриый коэффициент объемного расширения жидкостей и газов. Элементы и неоргаиические соединения

Приведены значения среднего температурного коэффициента объемного расширения в указанном интервале температур или значения истинного температурного коэффициента объемного расширения при данной температуре. Значения в скобках — первые два ($c = 0$) или три коэффициента интерполяционной формулы (t, °C):
$\beta = a \cdot 10^{-3} + b \cdot 10^{-5} \cdot t + c \cdot 10^{-8}\, t^2$.

Вещество	Состояние	P, *атм*	t, °C	β или $\overline{\beta}$, 10^{-3} *град*$^{-1}$	Литература
Ag	Жидкость	1	961÷1100	0,111	[1]
Al	»	1	660÷1100	0,113	[1]
Ar	»	1	—189÷—186	4,54	[25]
	Газ	1	—100	3,648	[12]
		1	100	3,676	[26]
		1	200	3,673	[26]
		1	300	3,672	[26]
		1	400	3,671	[26]
		10	—100	0,3952*	[27]
		10	100	0,3658	[28]
		10	200	0,3680	[28]
		10	300	3,3682*	[27]
		10	400	0,3683	[28]
		100	100	0,3639	[28]
		100	200	0,3822	[28]
		100	300	0,3829*	[27]
		100	400	0,3832	[28]
		1000	100	1,1377	[6]
B_5H_9	Жидкость	1	—45÷10	1,25*	[25]
Bi	»	1	271÷630	0,122	[1]
		1	360÷630	0,121	[1]
Br_2	»	1	0	1,11	[1]
		1	20	1,132	[12]
		1	0÷58	1,06218 1,87714 —0,30854	[12]
C_2N_2	Газ	1	0	3,96	[26]
		1	100	3,83	[26]
		1	200	3,88	[26]
CO	Жидкость	1	—205÷—192	4,91	[25]
	Газ	1	0	3,647	[26]
		1	0÷100	3,671	[26]
		1	0÷100	3,669	[10]
		1	200	3,668	[26]
		100	100	0,4053	[29]
		100	200	0,4073	[6]
		1000	100	1,496	[29]
		1000	200	0,9632	[6]
CO_2	Жидкость	1	—50	4,95	[25]
	Газ	1	0	3,751	[10]
		1	0÷100	3,723	[10]
		1000 *мм рт. ст.*	0	3,6856	[4]
		То же	100	3,7248	[4]
		2621 *мм рт. ст.*	0	1,097	[10]
		То же	64÷100	6,574	[10]
CS_2	Газ	1	20	1,218	[12]
		1	—34÷60	1,1398 1,37065 1,91225	[4]
Cd	Жидкость	1	320÷350	0,170	[1]
		1	320÷544	0,137	[1]
Cl_2	»	1	—101÷—33,6	1,41	[25]
		1	—80÷—33,6	1,49	[28]
		1	—40	1,53	[1]
	Газ	1	0	3,90	[10, 26]
		1	0÷100	3,830	[10, 26]

Вещество	Состояние	*P*, *атм*	*t*, °C	β или $\overline{\beta}$, 10^{-3} *град*$^{-1}$	Литература
Cl_2	Газ	1	100	3,77	[26]
		1	200	3,83	[26]
Cs	Жидкость	1	28÷50	0,341	[1]
		1	50÷123	0,348	[1]
		1	100	0,29*	[27]
Cu	»	1	1083÷1295	0,199	[1]
F_2	»	1	—200	4,243*	[27]
		1	—218÷—188	3,0	[1]
Ga	»	1	100	0,121	[5]
		1	200	0,1143	[9]
		1	300	0,110	[9]
		1	400	0,1066	[9]
		1	600	0,1023	[9]
		1	800	0,0992	[9]
		1	900	0,0973	[5]
H_2	»	1	—259÷—252,8	12,6	[1,5]
		1	—255	13,0	[1]
	Газ	1	—100	3,661	[12]
		1	100	3,659	[12]
		1	200	3,658	[12]
		1	300	3,657	[12]
		1	400	3,656	[12]
		200	0÷100	3,32	[10]
		400	0÷100	2,95	[10]
		600	0÷100	2,61	[10]
		800	0÷100	2,42	[10]
HCl	»	1	0	3,769	[26]
HCN	Жидкость	1	—14	1,95	[26]
H_2O	Жидкость, на линии насыщения	1	0	—0,064	[5]
		1	10	0,070	[5]
		1	20	0,182	[5]
		1	50	0,449	[5]
		1	100	0,752	[5]
		1	200	1,33	[5]
		1	300	2,92	[5]
		1	350	6,68	[5]
	Жидкость	1	20	0,207	[12]
	Газ	1	0÷120	4,187	[10]
		1	0÷140	4,189	[10]
		1	0÷160	4,071	[10]
		1	0÷200	3,938	[10]
		1	0÷250	3,799	[10]
		100 *мм рт. ст.*	100	4,187	[4]
		»	200	3,938	[4]
H_2S	»	1	0	3,82	[26]
		1	100	3,75	[26]
H_2SO_4	Жидкость	1	20	0,5758	[12]
		1	0÷30	$\left\{\begin{array}{c}0,5758\\-0,43\end{array}\right\}$	[4,12]
He	»	1	—269,65	96,14*	[27]
		5	—269,65	57,10*	[27]
		10	—269,65	38,66*	[27]
	Газ	1	—100	3,658	[26]
		1	100	3,658	[12]
		1	200	3,658	[12]
		1	300	3,658	[12]
		1	400	3,658	[12]
		10	—200	0,3805*	[27]
		10	—100	0,361*	[27]
		10	100	0,3704*	[27]
		10	200	0,3680*	[27]
		10	300	0,3672*	[27]
		10	400	0,3668*	[27]

Вещество	Состояние	P, *атм*	t, °C	β или $\overline{\beta}$, 10^{-3} *град*$^{-1}$	Литература
He	Газ	100	—200	0,356*	[27]
		100	—100	0,3116*	[27]
		100	100	0,4161*	[27]
		100	200	0,3902*	[27]
		100	300	0,3813*	[27]
		100	400	0,377*	[27]
		1000	100	0,8359*	[27]
		1000	200	0,5944*	[27]
Hg	Жидкость	1	50	0,181	[5]
		1	0÷100	0,18182 0,0078	[4]
		1	100	0,182	[5]
		1	24÷299	0,18163 0,01155 0,0021187	[12]
		1	200	0,183	[5]
		1	300	0,185	[5]
		1	500	0,186	[5]
		1	800	0,188	[5]
I	»	1	107÷150	0,800	[12]
K	»	1	20÷100	0,280	[1]
		1	100÷150	0,285	[1]
		1	100÷300	0,283*	[27]
		1	500÷700	0,377*	[27]
Kr	Газ	1	100	3,311	[26]
		1	200	3,5935	[26]
		1	300	3,6756	[26]
Li	Жидкость	1	185÷235	0,174	[1]
		1	200÷400	0,198*	[27]
		1	500÷700	0,2004*	[27]
Mg	»	1	650÷800	0,380	[1]
N_2	Жидкость в тройной точке	1	—210	21,0	[25]
	Жидкость	1	—205÷—184	5,88	[25]
	Газ	1	—100	3,681	[12]
		1	0	3,673	[10]
		1	0÷100	3,671	[10]
		1	100	3,670	[12]
		1	200	3,668	[12]
		1	300	3,667	[12]
		1	400	3,666	[12]
		10	—100	0,3883	[28]
		10	100	0,3670	[28]
		10	200	0,3698	[28]
		10	300	0,3694	[28]
		10	400	0,3684	[28]
		100	—100	0,5504	[28]
		100	100	0,4103	[28]
		100	200	0,4038	[28]
		100	300	0,3974	[28]
		100	400	0,3928	[28]
		1000	100	1,443	[28]
		1000	200	1,439	[28]
		1000	300	0,758	[28]
		1000	400	0,670	[28]
NH_3	Жидкость	1	—50	1,93	[25]
	Газ	1	0	3,860	[10]
		1	0÷100	3,800	[10]
		1	100	3,808	[4]
		1	200	3,779	[4]
		1	300	3,759	[4]
		10	100	0,325	[28]
		10	200	0,363	[28]
		10	300	0,370	[28]
		00	300	0,316	[28]

Вещество	Состояние	P, атм	t, °C	β или $\overline{\beta}$, 10^{-3} град$^{-1}$	Литература
NO	»	1	0	3,677	[26]
		1	100	3,673	[26]
		1	200	3,669	[26]
N_2O	»	1	0	3,761	[26]
		1	200	3,72	[26]
Na	Жидкость	1	100÷180	0,275	[1]
		1	100÷700	0,390	[1]
		1	100÷235	0,280 0,286	[1]
NaCl	20,6%-ный раствор в H_2O	1	20	0,414	[12]
		1	0÷29	0,3640 1,237	[12]
Ne	Газ	1	—100	3,66	[10]
		1	100	3,659	[10]
		1	200	3,659	[10]
		1	300	3,659	[10]
		1	400	3,656	[10]
		1	500	3,81	[10]
		10	—200	0,385	[28]
		10	—100	0,3635	[28]
		10	100	0,3708	[28]
		10	200	0,3684	[28]
		10	400	0,3672	[28]
		100	—200	0,407	[28]
		100	—100	0,334	[28]
		100	100	0,420	[28]
		100	200	0,3945	[28]
		100	400	0,3805	[28]
O_2	Жидкость	1	—210÷—182	4,0	[1]
	Газ	1	0÷100	3,67	[4]
		10	—170÷—180	4,831*	[30]
		10	—205÷—189	3,85	[25]
		10	100	3,66	[28]
		100	—170÷—180	4,196*	[30]
		100	0÷100	4,86	[10]
		1000	0÷100	2,41	[10]
O_3	Жидкость	1	—183	2,0	[25]
P	»	1	50÷60	0,52	[1]
PBr_3	»	1	20	0,868	[12]
		1	0÷100	0,8472 0,43672 0,25276	[12]
PCl_3	»	1	20	1,154	[12]
		1	—36÷75	1,12862 0,87288 1,79236	[12]
PH_3	Газ	1	0	3,79	[26]
		1	100	3,738	[26]
$POCl_3$	Жидкость	1	20	1,116	[12]
		1	0÷107	1,06431 1,12666 0,5299	[12]
Pb	»	1	327÷825	0,120	[1]
Pu	»	1	—	0,05	[5]
Rb	»	1	40÷140	0,339	[1]
		1	100	0,3*	[27]
S	»	1	115	0,430	[1]
		1	134	0,439	[1]
		1	152	0,490	[1]
		1	165	0,170	[1]
		1	178	0,298	[1]
		1	210	0,344	[1]

Вещество	Состояние	P, *атм*	t, °C	β или $\bar{\beta}$, 10^{-3} *град*$^{-1}$	Литература
S	Жидкость	1	278	0,366	[1]
		1	357	0,338	[1]
SO_2	»	1	—50	1,70	[25]
	Газ	1	0	3,98	[26]
		1	0÷100	3,903	[10]
		1	100	3,87	[26]
		1	200	3,90	[26]
		1000 *мм рт. ст.*	0÷100	3,980	[10]
SF_6	»	10	100	0,3126	[31]
		10	200	0,3607	[31]
Sb	Жидкость	1	631÷1074	0,041 0,120	[1]
$SiCl_4$	»	1	20	1,430	[12]
		1	—32÷57	1,29412 2,18414 4,08642	[12]
Sn	»	1	232÷400	0,106	[1]
		1	400÷700	0,105	[1]
		1	232÷1600	0,100	[1]
Tl	»	1	302÷351	0,150	[9]
Xe	Газ	1	100	2,977	[26]
		1	200	3,565	[26]
		1	30	3,552	[26]
Zn	Жидкость	1	419÷543	0,147	[1]
		1	419÷918	0,217 0,198	[1]

* Вычислено по плотности, приведенной в указанной работе.

Таблица 9.13

Температурный коэффициент объемного расширения жидкостей и газов. Органические соединения

Пояснения те же, что и к табл. 9.12.

Вещество	Состояние	P, *атм*	t, °C	β или $\bar{\beta}$, 10^{-3} *град*$^{-1}$	Литература
CH_4, метан	Газ	1	—150÷—50	5,798*	[27]
		1	—100÷0	4,471*	[27]
		1	— 50÷50	3,580*	[27]
		100	— 50÷50	8,173*	[27]
CH_4O, метиловый спирт	Жидкость	1	20	1,199	[12]
		1	0÷61	1,1342 1,13635 0,8741	[4]
CH_2O_2, муравьиная кислота	»	1	20	1,025	[12]
		1	5÷104	0,99269 0,62514 0,5965	[12]
CH_3Br, метил бромистый	»	1	20	1,684	[12]
		1	—4÷28	1,41521 3,31528 11,3809	[12]
CH_3I, метил иодистый	»	1	20	1,273	[12]
		1	5÷39	1,144 4,0465 —2,7393	[12]

Вещество	Состояние	P, атм	t, °C	β или $\bar{\beta}$, 10^{-3} град$^{-1}$	Литература
$CHCl_3$, хлороформ	Жидкость	1	20	1,273	[12]
		1	0÷63	1,10715 4,66473 —1,74328	[4]
C_2H_6, этан	»	1	—130÷—73	2,4	[25]
	Газ	1	— 50÷50	3,78*	[32]
		1	100÷300	2,708*	[32]
C_2H_4, этилен	»	1	—100÷0	4,721*	[32]
		1	— 50÷50	3,739*	[32]
		1	0÷100	3,148*	[32]
		100	— 50÷50	2,280*	[32]
		100	0÷100	1,675*	[32]
C_2H_2, ацетилен	»	1	0	3,772	[10]
		1	0÷100	3,739	[10]
C_2H_6O, этиловый спирт	Жидкость	1	20	1,12	[12]
		1	27÷46	1,02 2,20	[4]
$C_2H_6O_2$, этиленгликоль	»	1	20	0,6375	[12]
		1	11÷55	0,5657 1,7074 0,293	[12]
$C_2H_4O_2$, уксусная кислота	»	1	20	1,071	[12]
		1	16÷107	1,063 —0,12636 1,6876	[4]
$C_2H_4O_2$, метилформиат	»	1	20	1,563	[12]
		1	0÷10	0,35824 10,598 — 1,8085	[12]
C_2H_5Br, этил бромистый	»	1	20	1,418	[12]
		1	—32÷54	1,33763 1,50135 1,69	[12]
C_2H_5I, этил иодистый	»	1	20	1,179	[12]
		1	10÷65	1,152 0,26032 1,4181	[12]
C_2H_5Cl, этил хлористый	»	1	20	1,706	[12]
		1	—32÷26	1,57458 2,81366 1,56987	[12]

Вещество	Состояние	P, *атм*	t, °С	β или $\overline{\beta}$, 10^{-3} *град*$^{-1}$	Литература
$C_2H_4Cl_2$, этилен хлористый	Жидкость	1	20	1,161	[12]
		1	28÷84	1,11893 1,0469 0,10342	[12]
C_2HCl_3O, хлораль	»	1	20	0,934	[12]
		1	13÷51	0,9595 —2,2139 5,6392	[12]
C_2H_3N, ацетонитрил	»	1	20	1,301	[4]
		1	6÷66	1,2118 1,778 1,5322	[12]
$C_2H_5NO_3$, азотноэтиловый эфир	»	1	20	1,299	[12]
		1	9÷72	1,0290 4,7913 —1,8413	[12]
C_2H_6S, диметилсульфид	»	1	20	1,082	[12]
		1	0÷111	1,01705 1,57606 0,19072	[12]
C_3H_8, пропан	»	1	—68÷—30	1,9	[25]
	Газ	20	20	3,130*	[30]
		20	40	3,840*	[30]
		100	20	2,480	[32]
		100	40	2,650	[32]
		100	60	3,130	[32]
		100	80	4,00	[32]
		100	100	5,100	[32]
		200	20	2,050	[32]
		200	40	2,040	[32]
		200	60	2,180	[32]
		200	80	2,510	[32]
		200	100	2,940	[32]
C_3H_6, пропилен	Жидкость	1	—50	1,751*	[27]
C_3H_8O, изопропиловый спирт	»	1	20	1,094	[12]
		1	0÷83	1,04345 0,44303 2,7274	[12]
C_3H_8O, пропиловый спирт	»	1	20	0,956	[12]
		1	0÷94	0,7743 4,9689 —1,4069	[12]
C_3H_6O, аллиловый спирт	»	1	20	1,049	[12]
		1	0÷94	0,97019 1,8725 0,36452	[12]
$C_3H_6O_2$, пропионовая кислота	»	1	20	1,102	[12]
		1	0÷133	1,0396 1,5487 0,04301	[12]
$C_3H_6O_2$, метилацетат	»	1	20	1,427	[12]
		1	0÷58	1,34982 0,87098 3,5562	[12]
$C_3H_6O_2$, этилформиат	»	1	20	1,417	[12]
		1	0÷63	0,36446 0,13538 3,9248	[12]
$C_3H_8O_3$, глицерин	»	1	20	0,505	[12]
C_3H_7Cl, пропил хлористый	»	1	20	1,447	[12]
		1	0÷42	1,3306 3,8313 —1,3859	[12]

Вещество	Состояние	P, *атм*	t, °C	β или $\overline{\beta}$, 10^{-3} *град*$^{-1}$	Литература
C_3H_7Cl, изопропил хлористый	Жидкость	1	20	1,591	[12]
		1	0÷34	1,3696 5,5287	[12]
C_3H_7I, пропил иодистый	»	1	20	1,102	[12]
		1	10÷98	1,0276 1,8658 —0,0051	[12]
C_3H_5Br, аллил бромистый	»	1	20	1,241	[12]
		1	0÷69	1,2275 —0,44365 2,5843	[12]
C_3H_5I, аллил иодистый	»	1	20	1,091	[12]
		1	0÷101	1,0539 0,63572 1,0036	[12]
C_3H_5Cl, аллил хлористый	»	1	20	1,475	[12]
		1	9÷44	1,3218 5,078 —4,1915	[12]
C_4H_{10}, бутан	»	1	—20÷30	2,0	[25]
	Газ	20	20	2,26	[32]
		20	40	2,25	[32]
		20	60	2,47	[32]
		20	80	3,21	[32]
		20	100	4,46	[32]
		20	120	5,04	[32]
		100	20	1,95	[32]
		100	40	1,82	[32]
		100	60	1,84	[32]
		100	80	2,23	[32]
		100	100	3,06	[32]
		100	120	3,79	[32]
		200	20	1,69	[32]
		200	40	1,51	[32]
		200	60	1,48	[32]
		200	80	1,83	[32]
		200	100	2,55	[32]
		200	120	3,28	[32]
C_4H_{10}, изобутан (2-метилпропан)	»	20	20	2,40	[32]
		20	40	2,57	[32]
		20	60	3,00	[32]
		20	80	3,91	[32]
		20	100	6,05	[32]
		100	20	2,06	[32]
		100	40	2,08	[32]
		100	60	2,19	[32]
		100	80	2,45	[32]
		100	100	2,93	[32]
		200	20	1,82	[32]
		200	40	1,79	[32]
		200	60	1,82	[32]
		200	80	1,94	[32]
		200	100	2,18	[32]
$C_4H_{10}O$, бутиловый спирт	Жидкость	1	20	0,950	[12]
		1	6÷108	0,83751 2,8634 —0,12415	[12]
$C_4H_{10}O$, этиловый (диэтиловый) эфир	»	1	20	1,656	[12]
		1	—15÷38	1,513243 2,35918 4,0512	[4]

Вещество	Состояние	P, атм	t, °С	β или $\overline{\beta}$, 10^{-8} град$^{-1}$	Литература
$C_4H_8O_2$, масляная кислота	Жидкость	1	20	1,063	[12]
		1	0÷100	1,02573 0,83760 0,34694	[12]
$C_4H_8O_2$, изомасляная кислота	»	1	20	1,068	[12]
		1	16÷118	0,97625 2,3976 —0,32145	[12]
C_4H_8O, метилэтилкетон	»	1	20	1,315	[12]
		1	0÷76	1,18654 3,37043 0,53365	[12]
$C_4H_{10}S$, диэтилсульфид	»	1	20	1,278	[12]
		1	0÷90	1,19643 1,80653 0,78821	[12]
C_5H_{12}, пентан	»	1	20	1,605	[12]
		1	0÷33	1,4646 3,09319 1,6084	[4]
		20	20	1,57	[30]
		20	40	1,67	[30]
		20	60	1,85	[30]
		20	80	2,09	[30]
		20	100	2,44	[30]
		20	120	2,95	[30]
		100	20	1,43	[30]
		100	40	1,49	[30]
		100	60	1,60	[30]
		100	80	1,76	[30]
		100	100	1,97	[30]
		100	120	2,23	[30]
		200	20	1,29	[30]
		200	40	1,35	[30]
		200	60	1,42	[30]
		200	80	1,53	[30]
		200	100	1,67	[30]
		200	120	1,83	[30]
C_5H_{12}, изопентан	»	1	—100	1,25	[25]
		1	— 50	1,328	[25]
		1	0	1,533	[25]
		1	20	1,680	[12]
		1	0÷27	1,46834 5,09626 0,6979	[10]
C_5H_{12}, неопентан	»	1	10÷60	1,6	[25]
C_5H_{10}, *транс*-пентен-2	»	1	0	1,46*	[27]
C_5H_{10}, *цис*-пентен-2	»	1	20	1,47*	[27]
C_5H_8, изопреи	»	1	20	1,567	[13]
		1	0÷33	1,4603 0,99793 5,60149	[10]
$C_5H_{12}O$, амиловый спирт	»	1	20	0,902	[12]
		1	—15÷80	0,9001 0,6573 1,18458	[4]
$C_5H_{10}O$, диэтилкетон	»	1	20	1,233	[12]
		1	0÷95	1,15342 1,88396 0,32021	[12]
				1,487	

Вещество	Состояние	P, *атм*	t, °C	β или $\bar{\beta}$, 10^{-3} *град*$^{-1}$	Литература
$C_5H_{11}Br$, амил бромистый	Жидкость	1	20	1,102	[12]
		1	0÷80	1,02321 1,90086 0,19756	[12]
$C_5H_{11}I$, амил иодистый	»	1	20	0,986	[12]
		1	20÷142	0,92658 1,4647 0,0596	[12]
$C_5H_{11}Cl$, амил хлористый	»	1	20	1,208	[12]
		1	0÷100	1,17155 0,50077 1,35368	[12]
C_6H_{14}, изогексан	»	1	20	1,445	[12]
		1	0÷55	1,37022 0,97642 2,9819	[10]
C_6H_{10}, диаллил	»	1	20	1,357	[12]
		1	0÷60	1,3423 —0,34339 3,8693	[12]
C_6H_6, бензол	»	1	20	1,237	[12]
		1	11÷81	1,17626 1,27776 0,80648	[4]
$C_6H_{12}O_2$, капроновая кислота	»	1	20	0,975	[12]
		1	15÷155	0,94413 0,68358 0,26586	[12]
$C_6H_{14}O$, диизопропиловый эфир	»	1	20	1,452	[12]
		1	0÷67	1,2872 4,2923 —0,58573	[12]
$C_6H_{14}O$, дипропиловый эфир	»	1	20	1,354	[12]
		1	0÷88	1,2132 3,9318 1,3644	[12]
C_6H_8O, диаллиловый эфир	»	1	20	1,346	[12]
		1	0÷88	1,2519 2,2401 0,35775	[12]
C_6H_6O, фенол	»	1	20	1,090	[12]
		1	36÷157	0,8340 0,10732 0,4446	[4]
$C_6H_{10}O_4$, диэтилоксалат	»	1	20	1,136	[12]
		1	0÷141	1,06031 1,0983 2,6657	[12]
C_6H_7N, анилин	»	1	0	0,850	[4]
		1	20	0,858	[12]
		1	0÷141	0,82349 0,8408 0,10741	[12]
$C_6H_5NO_2$, нитробензол	»	1	144÷164	0,8263 0,55249 0,13779	[12]
C_7H_8, толуол	»	1	—50	1,013*	[27]
		1	0	1,050*	[27]
		1	50	1,138	[27]
C_7H_8O, *о*-крезол	»	1	66÷184	0,71072 1,1464 0,2242	[12]

Вещество	Состояние	P, *атм*	t, °C	β или $\overline{\beta}$, 10^{-3} *град*$^{-1}$	Литература
C_7H_8O, *м*-креозол	Жидкость	1.	65÷194	$\begin{Bmatrix}0,77526\\0,27106\\0,3868\end{Bmatrix}$	[12]
C_7H_8O, *п*-креозол	»	1	66÷186	$\begin{Bmatrix}0,86476\\0,53912\\0,64418\end{Bmatrix}$	[12]
$C_7H_{14}O_2$, амилацетат	»	1	20	1,162	[12]
		1	0÷124	$\begin{Bmatrix}1,1501\\-0,09046\\1,3015\end{Bmatrix}$	[12]
C_7H_5OCl, бензоил хлористый	»	1	20	0,880	[12]
		1	12÷46	$\begin{Bmatrix}0,85893\\0,44219\\0,27139\end{Bmatrix}$	[12]
C_8H_{18}, октан	Газ	20	100	1,38	[27]
		20	160	1,74	[27]
		20	200	2,25	[27]
		20	240	3,39	[27]
		20	280	7,00	[27]
		100	100	1,22	[27]
		100	160	1,39	[27]
		100	200	1,57	[27]
		100	240	1,88	[27]
		100	280	2,42	[27]
		200	100	1,11	[27]
		200	160	1,19	[27]
		200	200	1,28	[27]
		200	240	1,33	[27]
		200	280	1,44	[27]
C_8H_{18}, изооктаи	Жидкость	1	0	1,158*	[27]
$C_{18}H_{10}$, этилбензол	»	1	0	0,9926*	[27]
		1	20	0,961	[12]
		1	50	1,067*	[27]
		1	24÷131	$\begin{Bmatrix}0,86172\\2,5344\\-0,18319\end{Bmatrix}$	[12]
C_8H_{10}, *п*-ксилол	»	1	0	1,02	[27]
		1	100	1,036*	[27]
C_8H_{10}, *м*-ксилол	»	1	0	0,99	[27]
		1	50	1,134*	[27]
C_8H_{10}, *о*-ксилол	»	1	0	0,97	[27]
		1	50	0,9978*	[27]
C_9H_{20}, нонан	»	1	0	1,064*	[27]
$C_9H_{10}O_2$, бензойноэтиловый эфир	»	1	20	0,900	[12]
		1	0÷159	$\begin{Bmatrix}0,86606\\0,8229\\0,12084\end{Bmatrix}$	[12]
$C_{10}H_{22}$, декан	Газ	20	40	1,061	[27]
		20	60	1,116	[27]
		20	80	1,187	[27]
		20	100	1,268	[27]
		20	120	1,361	[27]
		100	40	0,970	[27]
		100	60	1,010	[27]
		100	80	1,051	[27]
		100	100	1,096	[27]
		100	120	1,138	[27]
		200	40	0,925	[27]
		200	60	0,956	[27]
		200	80	0,987	[27]
		200	100	1,016	[27]
		200	120	1,043	[27]
$C_{11}H_{24}$, ундекан	Жидкость	1	50	1,056*	[27]

Вещество	Состояние	P, *атм*	t, °C	β или $\bar{\beta}$, 10^{-3} *град*$^{-1}$	Литература
$C_{12}H_{26}$, додекан	Жидкость	1	50	1,020*	[27]
$C_{12}H_{16}O_2$, бензойноамиловый эфир	»	1	0	0,85	[12]
		1	20	0,848	[12]
		1	0÷198	0,81711 0,7377· 0,10593	[12]
$C_{13}H_{28}$, тридекан	»	1	50	0,9883*	[27]
$C_{14}H_{30}$, тетрадекан	»	1	100	1,036*	[27]
$C_{15}H_{32}$, пентадекан	»	1	100	1,019*	[27]
$C_{16}H_{34}$, гексадекан	»	1	100	0,995*	[27]
$C_{17}H_{36}$, гептадекан	»	1	200	1,184*	[27]
$C_{18}H_{38}$, октадекан	»	1	200	1,148*	[27]
$C_{18}H_{34}O_2$, олеиновая кислота	»	1	20	0,721	[12]
		1	—	0,68215 1,14053 —0,539	[12]
$C_{19}H_{40}$, нонадекан	»	1	200	1,117*	[27]
$C_{20}H_{42}$, эйкозан	»	1	200	1,09*	[27]

* Вычислено по плотности, приведенной в указанной работе.

Таблица 9.14

Температурный коэффициент объемного расширения жидкостей и газов. Смеси и сплавы

Пояснения те же, что и к табл. 9.12.

Вещество	Состояние	P, *атм*	t, °C	β или $\bar{\beta}$, 10^{-3} *град*$^{-1}$	Литература
Бензин Б-70	Жидкость	1	40	1,496	[5]
		1	150	1,752	[5]
Воздух	Газ	1	0÷100	3,670	[10]
		10	100	0,3686	[28]
		10	200	0,3693	[28]
		100	100	0,3989	[28]
		100	200	0,3979	[28]
		1000	100	1,376	[28]
		1000	200	0,898	[28]
Керосин Т-1	Жидкость	1	20	0,955	[12]
		1	24÷120	0,8994 1,396	[12]
		1	250	1,646*	[27]
Масло: машинное МС-20	»	1	— 10	0,694	[5]
		1	30	0,638	[5]
		1	70	0,655	[5]
		1	100	0,669	[5]
		1	150	0,692	[5]
машинное МК-22	»	1	10	0,856	[5]
		1	50	0,886	[5]
		1	100	0,928	[5]
		1	150	0,943	[5]
оливковое	»	1	20	0,721	[12]
трансформаторное	»	1	— 20	0,67	[5]
		1	0	0,680	[5]
		1	50	0,705	[5]
		1	100	0,730	[5]

Вещество	Состояние	P, атм	t, °С	β или $\bar{\beta}$, 10^{-8} град$^{-1}$	Литература
Петролейный эфир	Жидкость	1	20	2,26	[12]
	»	1	—190÷0	1,46 1,60	[12]
Смеси:					
50% C_2H_6O — 50% H_2O	»	1	0÷39	0,7450 1,85 0,73	[4]
30% C_2H_6O — 70% H_2O	»	1	18÷39	0,2929 10,790 —11,87	[4]
44,5% Pb — 55,5% Bi	»	1	250	0,117*	[27]
		1	650	0,125*	[27]
25% Na — 75% K	»	1	100	0,293*	[27]
		1	300	0,311*	[27]
		1	500	0,319*	[27]
	—	1	650	0,349*	[27]
	»				
40% $NaNO_2$ — 53% KNO_3 — 7% $NaNO_3$		1	160	0,407*	[27]
		1	500	0,382*	[27]
Сплавы:					
50% Bi — 50% Hg	»	1	163÷280	0,134	[1]
67% Bi — 33% Pb	»	1	130	0,138	
57% Bi — 43% Pb	»	1	140	0,122	
70% Bi — 30% Tl	»	1	212÷325	0,131	
90% Cd — 10% Zn	»	1	255	0,153	
80% Hg — 20% Pb	»	1	250÷300	0,161	
25% Hg — 75% Pb	»	1	250÷300	0,135	
95,1% Hg — 4,9% Tl	»	1	20÷300	0,179	
74% Hg — 26% Tl	»	1	20÷300	0,161	
57,1% Hg — 42,9% Tl	»	1	20÷300	0,157	
86% Hg — 14% Zn	»	1	300÷350	0,184	
60,6% Hg — 39,4% Zn	»	1	300÷350	0,146	
50,7% Hg — 49,3% Zn	»	1	330÷360	0,2	
77% K — 23% Na	»	1	10÷100	0,286	
90% Pb — 10% Sb	»	1	250	0,123	
68% Sn — 32% Cd	»	1	175	0,123	
80% Tl — 20% Sb	»	1	200÷225	0,227	

* Вычислено по плотности, приведенной в указанной литературе.

9.4. ЭФФЕКТ ДЖОУЛЯ—ТОМСОНА

Эффектом Джоуля—Томсона называется явление, заключающееся в изменении температуры газа при его адиабатическом расширении. Количественной характеристикой эффекта служит коэффициент Джоуля—Томсона:

$$\mu = \Delta T/\Delta P, \ град/атм,$$

где ΔT — изменение температуры; ΔP — изменение давления газа. Коэффициент Джоуля—Томсона связан с температурным коэффициентом объемного расширения β и теплоемкостью газа при постоянном давлении C_P соотношением

$$\mu = V(\beta T - 1)/C_P,$$

где V — объем; T — температура газа. Для реальных газов существует замкнутая область температур и давлений, внутри которой $\mu > 0$. Эта область ограничена отрезком оси температур и так называемой кривой инверсии, на которой $\mu = 0$; вне этой области $\mu < 0$. Для идеального газа $\mu = 0$.

Таблица 9.15

Коэффициент Джоуля—Томсона для гелия при давлении до 200 *атм* [4.33]

t, °С	μ, *град/атм*	t, °С	μ, *град/атм*	t, °С	μ, *град/атм*
—190	—0,038	— 50	—0,0605	150	—0,0645
—175	—0,045	0	—0,0616	200	—0,0641
—150	—0,052	50	—0,0631	250	—0,0629
—100	—0,0584	100	—0,0638	300	—0,0597

Таблица 9.16

Коэффициент Джоуля—Томсона, *град/атм*, для аргона [33]

t, °C	Давление, *атм*					
	1	20	50	100	150	200
—150	1,81	—	0,002	—0,025	—0,046	—0,056
—125	1,111	1,045	0,166	0,039	0,000	—0,011
—100	0,860	0,800	0,655	0,285	0,094	0,040
— 75	0,706	0,678	0,618	0,426	0,213	0,130
— 50	0,595	0,574	0,522	0,396	0,265	0,188
— 25	0,505	0,479	0,439	0,352	0,257	0,200
0	0,431	0,406	0,370	0,305	0,236	0,192
25	0,371	0,350	0,317	0,264	0,212	0,175
50	0,322	0,304	0,276	0,231	0,189	0,161
100	0,242	0,224	0,203	0,175	0,146	0,127
150	0,183	0,171	0,154	0,130	0,109	0,096
200	0,137	0,126	0,115	0,095	0,079	0,068
300	0,064	0,060	0,055	0,046	0,037	0,028

Таблица 9.17

Коэффициент Джоуля—Томсона. *град/атм*, для азота [33]

t. °C	Давление, *атм*					
	1	20	50	100	150	200
—150	1,265	1,128	0,083	0,020	—0,008	—0,027
—125	0,855	0,792	0,548	0,133	0,040	0,006
—100	0,649	0,594	0,491	0,274	0,144	0,058
— 75	0,503	0,466	0,396	0,269	0,149	0,078
— 50	0,397	0,376	0,324	0,237	0,152	0,091
— 25	0,322	0,301	0,264	0,200	0,142	0,092
0	0,267	0,250	0,220	0,169	0,124	0,087
25	0,222	0,206	0,181	0,140	0,105	0,078
50	0,186	0,171	0,151	0,117	0,087	0,066
100	0,129	0,119	0,103	0,077	0,055	0,042
150	0,087	0,079	0,068	0,049	0,031	0,022
200	0,056	0,048	0,040	0,026	0,014	0,006
300	0,014	0,009	0,001	—0,007	—0,013	—0,017

Таблица 9.18

Коэффициент Джоуля—Томсона. *град/атм*. для водорода [33]

T. °K	Давление, *атм*					
	0	20	60	100	140	180
60	0,391	0,287	0,132	0,035	—0,017	—
65	0,333	0,259	0,136	0,052	0,000	—0,054
70	0,287	0,234	0,135	0,059	0,005	—0,039
75	0,250	0,212	0,131	0,062	0,004	—0,036
80	0,220	0,192	0,127	0,061	0,001	—0,037
85	0,195	0,174	0,122	0,059	—0,004	—0,040

Таблица 9.19

Коэффициент Джоуля—Томсона, *град/атм*. для ксенона [33]

P, *атм*	Температура, °C					
	25	50	75	100	125	150
1	1,87	1,62	1,43	1,28	1,14	1,02
30	1,72	1,50	1,32	1,17	1,05	0,943
50	1,49	1,36	1,21	1,09	0,983	0,889
100	0,188	0,577	0,786	0,804	0,769	0,725
200	0,0293	0,089	0,165	0,252	0,320	0,362
300	—0,0155	0,0115	0,0435	0,0795	0,120	0,155
600	—0,0625	—0,0551	—0,0450	—0,0374	—0,0296	—0,0203
1000	—0,0820	—0,0791	—0,0737	—0,0740	—0,0734	—0,0718
2000	—0,0949	—0,0934	—0,0893	—0,0934	—0,0980	—0,1011

Таблица 9.20

Коэффициент Джоуля — Томсона. *град/атм*. для кислорода [33]

t. °C	Давление, *атм*					
	1	20	50	100	150	200
—170	2,00	—0,007	—	—	—	—
—160	1,63	0,070	0,013	—0,008	—0,020	—0,032
—150	1,265	1,128	0,083	0,020	0,008	—0,027
—137,5	0,996	0,936	0,402	0,065	0,014	—0,010
—125	0,855	0,792	0,548	0,133	0,040	0,006
—112,5	0,742	0,680	0,529	0,227	0,069	0,035
—100	0,649	0,594	0,491	0,274	0,114	0,058
—75	0,503	0,466	0,396	0,269	0,149	0,078
—50	0,397	0,376	0,324	0,237	0,152	0,091
—25	0,322	0,301	0,264	0,200	0,142	0,092
0	0,267	0,250	0,220	0,169	0,124	0,087
25	0,222	0,206	0,181	0,140	0,105	0,078
50	0,186	0,171	0,151	0,117	0,087	0,066
75	0,155	0,144	0,125	0,094	0,069	0,053
100	0,129	0,119	0,103	0,077	0,055	0,042
150	0,087	0,079	0,068	0,049	0,031	0,022
200	0,056	0,048	0,040	0,026	0,014	0,006
250	0,033	0,026	0,018	0,007	0,000	—0,006
300	0,014	0,009	0,001	—0,007	—0,013	—0,017

Таблица 9.21

Коэффициент Джоуля — Томсона, *град/атм*, для окиси углерода [33]

P, *атм*	Температура, °C					
	0	25	50	75	100	150
1	0,295	0,251	0,213	0,179	0,150	0,104
50	0,240	0,206	0,175	0,147	0,122	0,085
100	0,190	0,162	0,137	0,115	0,095	0,067
200	0,093	0,084	0,072	0,060	0,049	0,032
300	0,034	0,031	0,027	0,022	0,015	0,005
400	—0,001	—0,001	—0,002	—0,004	—0,008	—0,014
600	—0,034	—0,034	—0,034	—0,034	—0,034	—0,039
1000	—0,056	—0,056	—0,056	—0,057	—0,058	—0,059
3000	—0,065	—0,066	—0,067	—0,068	—0,068	—0,071

Таблица 9.22

Коэффициент Джоуля — Томсона, *град/атм*, для углекислого газа [33]

t, °C	Давление, *атм*					
	1	20	60	100	140	200
—75	—	—0,020	—0,021	—0,023	—0,024	—0,029
—50	2,413	—0,014	—0,015	—0,016	—0,018	—0,025
—25	1,650	0,000	—0,003	—0,005	—0,006	—0,012
0	1,290	1,402	0,037	0,022	0,012	0,005
20	1,105	1,136	0,144	0,070	0,042	0,027
40	0,958	0,966	0,971	0,262	0.108	0,066
60	0,838	0,833	0,806	0,625	0,263	0,125
80	0,735	0,724	0,696	0,597	0,405	0,196
100	0,649	0,638	0,608	0,541	0,432	0,256
125	0,560	0,545	0,516	0,475	0,413	0,292
150	0,489	0,470	0,443	0,416	0,376	0,291
200	0,373	0,358	0,340	0,315	0,289	0,246
250	0,308	0,289	0,263	0,242	0,224	0,198
300	0,265	0,243	0,208	0,187	0,170	0,151

Таблица 9.23

Коэффициент Джоуля — Томсона, *град/атм*, для метана [33]

P, *атм*	Температура, °C					
	21,1	37,8	54,4	71,1	87,8	104,4
0	0,405	0,359	0,318	0,283	0,253	0,227
17	0,425	0,375	0,333	0,298	0,267	0,239
34	0,425	0,376	0,334	0,299	0,268	0,241
51	0,410	0,365	0,324	0,290	0,259	0,233
68	0,389	0,346	0,306	0,272	0,243	0,219
85,1	0,362	0,322	0,284	0,251	0,223	0,199
102,1	0,332	0,294	0,258	0,229	0,202	0,180

Таблица 9.24

Коэффициент Джоуля — Томсона, *град/атм*, для этана [33]

P, *атм*	Температура, °C					
	21,1	37,8	54,4	71,1	87,8	104,4
0	0,939	0,833	0,737	0,657	0,586	0,498
17	1,217	1,037	0,882	0,760	0,658	0,572
34	1,55	1,24	1,012	0,849	0,711	0,596
51	—	—	0,996	0,890	0,715	0,586
68	—	—	0,790	0,841	0,669	0,543
85,1	—	—	0,534	0,646	0,579	0,478
102,1	—	—	0,253	0,353	0,429	0,399

Таблица 9.25

Коэффициент Джоуля — Томсона, *град/атм*, для воздуха [4]

t, °C	Давление, *атм*					
	1	20	60	100	140	180
—150	—	—	0,0450	0,0185	—0,0070	—0,0255
—140	1,0755	1,0240	0,1125	0,0440	0,0120	—0,0115
—120	0,7370	0,7155	0,5150	0,1535	0,590	0,0200
—100	0,5895	0,5700	0,4820	0,2775	0,1360	0,0655
—75	0,4795	0,4555	0,3835	0,2880	0,1855	0,1136
—50	0,3910	0,3690	0,3195	0,2505	0,1825	0,1270
—25	0,3225	0,3010	0,2610	0,2130	0,1650	0,1240
0	0,2746	0,2577	0,2200	0,1822	0,1446	0,1097
25	0,2320	0,2173	0,1852	0,1550	0,1249	0,0959
50	0,1956	0,1830	0,1571	0,1310	0,1070	0,0829
75	0,1614	0,1508	0,1293	0,1087	0,0889	0,0707
100	0,1355	0,1258	0,1062	0,0884	0,0726	0,0580
150	0,0961	0,0883	0,0732	0,0600	0,0482	0,0376
250	0,0409	0,0356	0,0254	0,0165	0,0092	0,0027

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Техническая** энциклопедия. Справочник физических, химических и технологических величин. Т. II. М., ОГИЗ, 1930.
2. **Progress** in crystall physics. V. I. Ed. R. S. Krishnan, Wiswawathan, 1958.
3. **Оптические** материалы для инфракрасной техники. Справочное издание. М., «Наука», 1965. (Авт.: Воронкова Е. М., Гречушников Б. И., Дистлер Г. И., Петров И. П.)
4. **Smithsonian** physical tables. 9-th ed., Washington, 1954.
5. **Чиркин В. С.** Теплофизические свойства материалов. М., Физматгиз, 1959.
6. **Теплофизические** свойства веществ. Справочник. Под ред. Н. Б. Варгафтика. М., Госэнергоиздат, 1956.
7. **Кей Дж., Лэби Т.** Таблицы физических и химических постоянных. Пер. с англ. Под ред. К. П. Яковлева. М., Физматгиз, 1962.
8. **Физико-химические** свойства элементов. Справочник. Под ред. Г. В. Самсонова. Киев, «Наукова думка», 1965.
9. **Филянд М. А., Семенова Е. И.** Свойства редких элементов. Справочник. М., Металлургиздат, 1953.
10. **Handbook** of Chemistry and Physics. 37-th ed., Cleveland, Ohio, 1956.
11. **Жданов Г. С.** Физика твердого тела. М., Изд-во МГУ, 1961.
12. **Справочник** химика Т. 1. Под ред. Б. П. Никольского. Изд. 2-е. М.—Л., Госхимиздат, 1962.
13. **Физика** и техника инфракрасного излучения. Пер. с англ. М., «Советское радио», 1965. (Авт.: Джеминсон Э., Мак-Фи Р. Х., Пласс Дж. Н. и др.)
14. **Славинский М. П.** Физико-химические свойства элементов. М., Металлургиздат, 1952.
15. **Самсонов Г. В.** Тугоплавкие соединения. М., Металлургиздат, 1963.
16. **Oriani K., Murphy H. S.** J. Amer. Chem. Soc., 1954, v. 2, p. 345.
17. **Свойства** металлов и сплавов. М., Металлургиздат, 1949.
18. **Энциклопедия** металлофизики. Т. 1. М., ОНТИ, 1937.
19. **Austin I. B.** J. Amer. Ceramic Soc., 1952, v. 35, p. 10.
20. **Редкие** металлы. Справочник. Пер. с англ. М., «Мир», 1965.
21. **Справочник** по машиностроительным материалам. Т. I—IV. М., Машгиз, 1959—1960.
22. **Справочник** по авиационным материалам. Изд. 5-е. Т. 1—5. Под ред. А. Т. Тумакова. М., «Машиностроение», 1959—1964.
23. **Славин Д. О., Штейман Е. Б.** Металлы и сплавы в химическом машиностроении и аппаратостроении. М., Машгиз, 1951.
24. **Либерман Л. Я., Пейсихис М. И.** Справочник по свойствам сталей, применяемых в котлотурбостроении. М., Машгиз, 1955.
25. **Справочник** по физико-техническим основам глубокого охлаждения. М., Госэнергоиздат, 1963. (Авт.: Малков М. П., Данилов И. Б., Зельдович А. Г., Фрадков А. Б.)
26. **Техническая** энциклопедия. Справочник физических, химических и технологических величин. Т. V. М., ОГИЗ, 1930.
27. **Варгафтик Н. Б.** Справочник по теплофизическим свойствам газов и жидкостей. М., Физматгиз, 1963.
28. **Hemming F.** Wärmetechnische Richtwerte, Berlin, 1938.
29. **Michels A.** Physica, 1952, v. 18, p. 121.
30. **Day F., Felsing M.** J. Amer. Chem. Soc., 1951, v. 73, p. 4839.
31. **Scheider W.** J. Chem. Phys., 1951, v. 19, p. 845.
32. **Физико-химические** свойства индивидуальных углеводородов. Справочник. Под ред. В. М. Татевского. М., Гостоптехиздат, 1960.
33. **Landolt-Börnstein.** Zahlenwerte und Funktionen aus Physik, Chemie, Geophysik, Technik. Aufl. 6, Bd 2, Teil 4, Berlin, 1961.

ГЛАВА 10

ТЕПЛОЕМКОСТЬ

Теплоемкость характеризует восприимчивость тела (системы) к нагреванию в конкретных термодинамических условиях и определяется как отношение количества теплоты ΔQ, сообщенной телу, к достигнутому при этом повышению температуры ΔT: $C = \lim_{\Delta T \to 0} \Delta Q / \Delta T$.

Теплоемкость всегда положительна и при низких температурах ($T \to 0\,^{\circ}\mathrm{K}$) стремится к нулю.

Для количественной характеристики теплоемкости вещества обычно используют удельную, мольную или объемную теплоемкости, которые определяются соответственно как теплоемкости единицы массы, одного моля или единицы объема этого вещества. Единицами теплоемкости служат при этом *дж/(г·град)*, *дж/(моль·град)*, *дж/(м³·град)*; аналогичные единицы, основанные на калории (1 *кал* = 4,1855 *дж*), рассматриваются в настоящее время как внесистемные.

Теплоемкость тела (системы) зависит от условий нагревания. В простых системах наиболее употребительны теплоемкость C_P, которая характеризует теплоемкость при нагревании в условиях постоянного давления, и C_V, которая характеризует теплоемкость при нагревании с сохранением постоянного объема. Эти величины связаны соотношением

$$C_P - C_V = \beta^2 TV/\gamma,$$

где β — температурный коэффициент объемного расширения; γ — изотермическая сжимаемость вещества.

Обобщением определения теплоемкости, пригодным для любых систем и процессов, в том числе и при наличии внешних полей, служит соотношение $C = T(\partial S/\partial T)$, где S — энтропия системы.

10.1. ТЕПЛОЕМКОСТЬ ЭЛЕМЕНТОВ И ХИМИЧЕСКИХ СОЕДИНЕНИЙ ПРИ НОРМАЛЬНЫХ УСЛОВИЯХ

Таблица 10.1

Теплоемкость элементов при температуре 298,15°С и давлении 760 *мм рт. ст.*

Вещество	C_P, *дж/(моль·град)*	Литература	Вещество	C_P, *дж/(моль·град)*	Литература	Вещество	C_P, *дж/(моль·град)*	Литература
Ac	27,2	[1]	α-Fe	25,02	[3]	P_4 (газ)	67,2	[1]
Ag	25,49	[1]	β-Fe	26,74	[3]	Pb	26,44	[3]
Al	24,35	[2]	Ga	26,07	[1]	Pd	25,52	[2]
Ar (газ)	20,79	[3]	Gd	36,26	[3]	Pt	25,69	[2]
As	24,64	[1]	Ge	23,4	[1]	Rb	30,88	[3]
As (газ)	20,79	[1]	H (газ)	20,79	[3]	Rb (газ)	20,79	[1]
As_2 (газ)	34,98	[1]	H_2 (газ)	28,83	[3]	Rb_2 (газ)	37,91	[1]
As_4 (газ)	77,32	[1]	HD (газ)	29,20	[3]	Re	25,31	[2]
At	58,6	[1]	Hf	25,5	[1]	Rh	25,52	[2]
At_2 (газ)	37,2	[1]	Hg	27,98	[3]	Ru	23,85	[2]
Au	25,23	[2]	Ho	27,15	[3]	S (ромбическая)	22,60	[3]
B (кристалл)	11,09	[3]	In	26,7	[1]	S (моноклинная)	23,64	[3]
B (аморфный)	11,96	[3]	Ir	25,02	[2]	S (газ)	23,68	[3]
B (газ)	20,80	[3]	I	54,44	[3]	S_2 (газ)	32,47	[3]
B_2 (газ)	30,56	[3]	I (газ)	20,79	[3]	S_8 (газ)	155,5	[3]
Ba	26,36	[1]	I_2 (газ)	36,9	[3]	Sb	25,2	[2]
B_2 (газ)	20,79	[1]	K	29,96	[3]	Sb (газ)	20,79	[1]
Be	16,44	[3]	K (газ)	20,79	[3]	Sb_2 (газ)	36,4	[1]
Bi	25,52	[3]	K_2 (газ)	37,89	[3]	Sb_4 (газ)	80,96	[1]
Br	75,71	[3]	Kr (газ)	20,79	[3]	Se	25,36	[3]
Br (газ)	20,79	[3]	La	27,8	[3]	Se_2 (газ)	35,34	[3]
Br_2 (газ)	36,1	[3]	Li	24,65	[3]	Sm	29,53	[3]
C (графит)	8,53	[3]	Li_2 (газ)	36,07	[3]	Sn (белый)	26,36	[3]
C (алмаз)	6,12	[3]	Mg	24,6	[3]	Sn (серый)	25,77	[3]
C (газ)	20,84	[1]	α-Mn	26,32	[3]	Sr	25,11	[2]
C_2 (газ)	29,3	[1]	γ-Mn	27,57	[3]	T_2 (газ, нормальный)	28,44	[3]
Ca	26,28	[3]	Mo	23,8	[1]			
Cd	26,32	[2]	N (газ)	20,79	[3]	Ta	25,4	[1]
Ce	28,8	[1]	N_2 (газ)	29,12	[3]	Tb	28,95	[3]
Cl (газ)	21,84	[3]	Na	28,12	[3]	Te	25,7	[2]
Cl_2 (газ)	33,84	[3]	Na (газ)	20,79	[3]	Th	27,32	[1]
Co	24,6	[1]	Na_2 (газ)	37,50	[3]	Ti	25,02	[1]
Cr	23,22	[2]	Nb	24,89	[2]	Ti (газ)	24,43	[3]
Cs	31,4	[1]	Nd	27,49	[4]	Tl	26,32	[2]
Cs (газ)	20,79	[5]	Ne (газ)	20,79	[3]	U	27,8	[1]
Cu	24,52	[2]	Ni	25,77	[2]	V	24,7	[1]
D_2 (газ, нормальный)	29,19	[3]	O (газ)	21,90	[3]	W	24,8	[1]
			O_2 (газ)	29,36	[3]	Xe (газ)	20,79	[3]
Dy	28,17	[3]	O_3 (газ)	39,20	[3]	Zn	25,40	[2]
Er	28,11	[3]	Os	24,89	[2]	Zr	25,15	[3]
F (газ)	22,75	[3]	P	24,69	[2]	Zr (газ)	26,64	[3]
F_2 (газ)	31,32	[3]	P_2 (газ)	32,0	[1]			

Теплоемкость неорганических соединений при температуре 298.15°K и давлении 760 *мм рт. ст.*

В скобках приведены расчетные значения.

Вещество	C_p, *дж/(моль·град)*	Литература	Вещество	C_p, *дж/(моль·град)*	Литература	Вещество	C_p, *дж/(моль·град)*	Литература
AgBr	52,38	[3]	B_5Hg (газ)	79,5	[4]	$CaSO_3$	91,63	[3]
AgBr (газ)	36,48	[2]	BN	12,13	[3]	$CaSO_4$	99,62	[3]
Ag_2CO_3	112,1	[3]	BN	20,1	[6]	$CaSiO_3$	90,0	[2]
AgCl	50,78	[3]	BN (газ)	29,46	[2]	Ca_2SiO_4	128,6	[3]
AgCl (газ)	35,77	[2]	BO (газ)	29,20	[3]	$CaTiO_3$	97,65	[3]
$AgClO_2$	87,32	[3]	B_2O_2 (газ)	60,33	[3]	$CdCl_2$	73,22	[3]
Ag_2ClO_4	142,3	[3]	B_2O_3	62,05	[3]	$CdCl_2$	76,64	[7]
AgH	29,25	[4]	$BaCO_3$	85,35	[3]	CdI_2	77,53	[3]
AgI	54,43	[3]	$BaCl_2$	(75,3)	[2]	CdMg	51,66	[3]
AgI (газ)	36,78	[2]	$BaCl_2 \cdot 2H_2O$	155,2	[3]	CdO	43,43	[3]
$AgIO_3$	102,9	[3]	BaF_2	71,21	[3]	CdS	55,2	[3]
AgMg	49,37	[2]	BaH (газ)	29,3	[4]	$CdSO_4$	99,60	[3]
$AgNO_2$	79,2	[3]	$BaMoO_4$	140,6	[4]	CdSb	45,69	[3]
$AgNO_3$	93,05	[2]	$Ba(NO_3)_2$	151,4	[3]	$CdSiO_3$	88,58	[3]
Ag_2O	64,27	[5]	BaO	47,23	[3]	CeN	46,86	[4]
Ag_2O	65,56	[3]	$BaSO_4$	101,8	[3]	CeO_2	65,90	[5]
Ag_2S	75,31	[3]	$BaTiO_3$	102,5	[3]	$Ce(SO_4)_3$	276,1	[3]
Ag_2SO_4	131,4	[3]	BeH (газ)	27,03	[4]	ClF (газ)	32,09	[3]
Ag_3Sb	101,7	[2]	Be_3N_2	69,04	[3]	ClF_3 (газ)	65,06	[3]
Ag_2Se	83,68	[2]	BeO	25,40	[3]	Cl_2O (газ)	45,6	[3]
Ag_2Te	96,65	[2]	$BeSO_4$	87,9	[4]	ClO_2 (газ)	41,84	[3]
$AlAg_2$	75,31	[3]	$BiCl_3$ (газ)	79,58	[2]	$CoCl_2$	78,49	[3]
$AlAg_3$	100,8	[3]	Bi_2O_3	113,5	[3]	CoF_2	68,78	[3]
AlBr (газ)	35,87	[3]	Bi_2Tl	73,85	[3]	CoO	52,72	[3]
$AlBr_3$	102,5	[4]	Bi_3Tl_2	131,8	[3]	CoO	55,31	[8]
Al_4C_3	140,2	[3]	BrCl (газ)	34,98	[3]	Co_3O_4	123,1	[3]
AlCl (газ)	34,66	[3]	BrF (газ)	32,97	[3]	CoS	(47,49)	[2]
AlCu	48,12	[3]	BrF_3	124,4	[3]	$CoSO_4$	(138,3)	[2]
AlF (газ)	31,93	[3]	BrF_3 (газ)	66,71	[3]	Cr_3C_2	99,24	[3]
AlF_3	75,14	[3]	BrF_5 (газ)	100,1	[3]	Cr_4C	108,4	[3]
AlN	32,6	[2]	BrI (газ)	36,48	[3]	$Cr(CO)_6$ (газ)	213,3	[3]
Al_2O_3	79,01	[3]	CN (газ)	29,16	[2]	$CrCl_2$	70,65	[3]
$Al_2O_3 \cdot H_2O$	131,3	[3]	C_3N_2 (газ)	56,90	[3]	$CrCl_3$	91,80	[3]
$Al_2(SO_4)_3$	259,6	[3]	CO (газ)	29,15	[3]	CrF_3	78,74	[3]
Al_2TiO_5	136,4	[3]	CO_2 (газ)	37,12	[3]	Cr_2O_3	118,7	[3]
$AsCl_3$ (газ)	75,7	[2]	COS (газ)	41,63	[3]	Cr_2O_3	104,6	[3]
AsF_3	126,8	[3]	C_3O_2 (газ)	65,75	[3]	CrSb	81,17	[4]
AsF_3 (газ)	65,6	[2]	CP (газ)	29,84	[4]	CsBr	51,88	[4]
AsH_3	38,52	[3]	CS (газ)	29,82	[2]	CsCl	(52,63)	[2]
AsN (газ)	30,42	[4]	CS_2	75,65	[3]	$CsClO_4$	107,6	[3]
As_2O_3	95,65	[3]	CS_2 (газ)	45,65	[3]	CsF	(50,63)	[2]
As_2O_5	116,5	[3]	CSe_2 (газ)	50,04	[3]	CsH (газ)	29,83	[4]
AuCl (газ)	35,44	[2]	CaC_2	62,31	[3]	CsI	51,88	[4]
$AuSb_2$	77,4	[3]	$CaCO_3$	81,80	[2]	CsLi	36,99	[2]
AuSn	52,3	[4]	$CaCl_2$	72,61	[3]	CuBr	54,74	[3]
BBr (газ)	32,83	[3]	CaF_2	71,13	[2]	CuBr (газ)	36,05	[2]
BBr_3 (газ)	67,97	[3]	CaF_2	67,03	[3]	CuCl (газ)	35,1	[2]
B_4C	52,51	[3]	$CaFe_2O_4$	153,7	[3]	$CuCl_2$	79,50	[3]
BCl (газ)	31,69	[3]	Ca_3N_2	113,0	[3]	Cu_2Cl_2	97,03	[3]
BCl_3 (газ)	62,61	[3]	$Ca(NO_3)_2$	149,2	[3]	CuH (газ)	29,20	[4]
BF (газ)	29,61	[3]	CaO	42,8	[3]	CuI	54,04	[3]
BF_3 (газ)	50,53	[3]	$Ca(OH)_2$	87,49	[3]	CuI (газ)	36,36	[2]
BH (газ)	29,18	[3]	$Ca(PO_3)_2$	145,1	[3]	Cu_3N	90,79	[4]
B_2H_6 (газ)	56,40	[3]	$Ca_3(PO_4)_2$	231,6	[3]	CuO	44,78	[3]
$B_{10}H_{14}$	219,3	[3]	β-$Ca_3(PO_4)_2$	228,2	[3]	CuO	42,30	[9]
BH_3O_3	81,34	[3]	CaS	47,40	[3]	Cu_2O	63,64	[3]

Вещество	C_P, дж/ (моль·град)	Литература	Вещество	C_P, дж/ (моль·град)	Литература	Вещество	C_P, дж/ (моль·град)	Литература
CuS	47,82	[3]	HgBr (газ)	36,90	[2]	MgB_2	47,82	[3]
Cu_2S	76,32	[3]	$HgBr_2$ (газ)	60,25	[2]	MgB_4	70,33	[3]
$CuSO_4$	100,0	[2]	HgCl	50,84	[3]	$MgCO_3$	75,52	[3]
CuSb	102,4	[3]	HgCl (газ)	36,19	[2]	$MgCl_2$	71,30	[3]
Cu_2Se	88,7	[3]	$HgCl_2$	(76,90)	[3]	$MgCl_2 \cdot H_2O$	115,0	[3]
D_2O	84,35	[3]	$HgCl_2$ (газ)	58,20	[2]	$MgCr_2O_4$	126,8	[3]
D_2O (газ)	34,27	[3]	HgI_2	77,40	[3]	MgF_2	61,59	[3]
F_2O	43,30	[3]	HgI_2 (газ)	61,09	[2]	$MgFe_2O_4$	143,7	[3]
Fe_3C	106,0	[3]	HgO	44,05	[3]	Mg_3N_2	104,6	[3]
Fe_3C	107,1	[3]	HgS	(50,17)	[2]	MgO	37,78	[3]
$FeCO_3$	82,13	[3]	Hg_2SO_4	132,0	[3]	MgO (газ)	32,97	[2]
$Fe(CO)_5$	174	[3]	IBr (газ)	36,48	[3]	$Mg(OH)_2$	76,99	[3]
$FeCl_2$	76,33	[3]	ICl (газ)	36,56	[3]	$Mg(OH)_2$	74,27	[2]
$FeCl_3$	94,93	[3]	IF (газ)	33,47	[3]	$MgSO_4$	96,48	[3]
$FeCo_2O_4$	143,4	[3]	IF_5 (газ)	99,16	[3]	$MgSiO_3$	81,84	[3]
$FeCr_2O_4$	133,4	[3]	IrO_2	57,32	[3]	Mg_2SiO_4	118,0	[3]
FeF_2	68,12	[3]	KBH_4	96,57	[3]	$MgTiO_3$	91,76	[3]
Fe_2N	(70,0)	[2]	KBO_2	(68,45)	[2]	Mn_3C	93,55	[3]
FeO	52,01	[3]	KBr	52,51	[3]	$MnCO_3$	81,50	[3]
Fe_2O_3	103,7	[3]	KBr (газ)	36,31	[2]	$MnCl_2$	72,87	[3]
Fe_3O_4	143,4	[3]	$KBrO_3$	104,9	[3]	MnF_2	67,94	[3]
Fe_3O_4	151,6	[10]	KCl	51,46	[3]	Mn_3N_2	121,3	[3]
FeS	54,64	[3]	KCl (газ)	36,28	[2]	MnO	44,10	[3]
FeS_2	61,92	[3]	$KClO_3$	100,2	[3]	MnO_2	54,02	[3]
FeSi	50,21	[3]	$KClO_4$	110,2	[3]	Mn_2O_3	98,74	[3]
Fe_2SiO_4	132,8	[3]	K_2CrO_4	146,0	[3]	Mn_2O_3	107,7	[12]
$FeTiO_3$	99,50	[3]	KF	50,00	[3]	Mn_3O_4	139,7	[3]
Ga_2O_3	91,84	[3]	KH (газ)	30,84	[2]	Mn_3O_4	148,1	[3]
$GeBr_4$	101,8	[2]	KH_2AsO_4	126,7	[3]	MnS	49,96	[3]
GeF_4	81,88	[3]	KHF_2	76,82	[3]	$MnSO_4$	100,5	[3]
GeH_4	44,35	[2]	KH_2PO_4	117,0	[3]	MnSe	51,04	[3]
GeH_3Cl	54,77	[3]	KI	(53,22)	[3]	$MnSiO_3$	86,44	[3]
GeI_4	104,2	[3]	KI (газ)	36,74	[2]	MnTe	72,8	[3]
H_3BO_3	81,31	[3]	KIO_3	106,4	[3]	$Mo(CO)_6$	219,0	[3]
HBr (газ)	29,12	[3]	KLi (газ)	36,74	[2]	$Mo(CO)_6$	242,3	[13]
HCN	71,00	[3]	$KMnO_4$	119,2	[3]	Mo_2N	64,02	[3]
HCN (газ)	36,01*	[3]	KNO_3	96,32	[3]	MoO_2	55,98	[3]
HCl (газ)	29,12	[3]	KO_2	77,53	[3]	MoO_3	73,64	[3]
HF (газ)	29,14	[3]	$KReO_3$	122,6	[3]	MoS_2	63,47	[3]
HI (газ)	29,12	[3]	K_2SO_4	129,9	[3]	$MoSi_2$	64,85	[3]
HN_3 (газ)	43,69	[3]	La_2O_3	107,9	[3]	Mo_3Si	92,97	[3]
HNO_2 (газ)	45,81	[3]	$LiAlO_2$	67,78	[3]	NH_3 (газ)	35,52	[3]
HNO_3	109,8	[3]	LiBr	(51,88)	[3]	N_2H_4 (газ)	52,7	[3]
HNO_3 (газ)	53,56	[3]	LiBr (газ)	33,85	[3]	NH_4Cl	89,29	[3]
$HNO_3 \cdot H_2O$	182,5	[3]	Li_2CO_3	97,40	[3]	NH_4Cl	84,1	[3]
H_2O	75,15	[3]	LiCl	(50,25)	[3]	NH_4F	65,27	[3]
H_2O (газ)	33,56	[3]	LiCl (газ)	33,0	[3]	$(NH_4)H_2AsO_4$	151,2	[3]
H_2O_2	89,33	[3]	LiF	41,90	[3]	$(NH_4)H_2PO_4$	142,3	[3]
H_2O_2 (газ)	43,14	[3]	LiF (газ)	33,2	[3]	$(NH_4)HSO_4$	142,9	[3]
HOCl (газ)	37,20	[3]	$LiFeO_2$	82,89	[3]	$(NH_4)NO_3$	139,3	[3]
H_3PO_4	106,1	[3]	LiH (газ)	29,58	[2]	$(NH_4)_2O$	235,8	[3]
HS (газ)	32,32	[3]	LiI	54,68	[3]	$(NH_4)OH$	154,9	[3]
H_2S (газ)	34,22	[3]	Li_3N	77,74	[3]	$(NH_4)_2SO_4$	187,5	[3]
H_2SO_4	138,9	[3]	$LiNO_3$	89,12	[3]	$(NH_4)VO_3$	129,3	[3]
$H_2SO_4 \cdot H_2O$	215,1	[3]	Li_2O	54,09	[3]	NO (газ)	29,83	[3]
H_2Se (газ)	34,56	[3]	LiOH	49,58	[3]	NO_2 (газ)	37,91	[2]
H_2Te (газ)	35,56	[3]	LiOH	40,52	[11]	N_2O (газ)	38,71	[3]
$HfCl_4$	120,5	[3]	$LiOH \cdot H_2O$	79,50	[3]	N_2O_4	78,99	[3]
HfO_2	60,25	[3]	Li_2TiO_3	111,0	[3]	N_2O_5	143,1	[3]

* При $T = 300°K$.

Вещество	C_P, дж/(моль·град)	Литература	Вещество	C_P, дж/(моль·град)	Литература	Вещество	C_P, дж/(моль·град)	Литература
NOCl	39,37	[2]	PbO_2	64,43	[3]	$SrSO_4$	101,7*	[3]
NO_2Cl	53,14	[3]	Pb_2O_3	107,7	[3]	$SrTiO_3$	98,37	[3]
NOF	41,34	[3]	Pb_3O_4	147,0	[3]	T_2O (газ)	34,95	[3]
$NaAlO_2$	73,30	[3]	PbS	49,9	[3]	TaC	36,78	[3]
$NaBH_4$	86,48	[3]	PbS (газ)	35,02	[2]	TaN	42,09	[2]
$NaBO_2$	65,94	[3]	$PbSO_4$	104,3	[3]	Ta_2O_5	135,1	[3]
NaBr	52,30	[3]	PbO	(31,51)	[2]	$TeCl_4$	138,5	[3]
NaBr (газ)	35,98	[2]	PbSb	45,65	[2]	TeF_6 (газ)	116,9	[3]
Na_2CO_3	110,5	[3]	PtS	(50,17)	[2]	TeO_2 (газ)	31,84	[2]
NaCl	50,79	[3]	$PtSb_2$	70,21	[3]	ThF_4	110,7	[3]
NaCl (газ)	35,44	[2]	RbBr	(51,71)	[2]	Th_3N_4	155,9	[2]
$NaClO_3$	100,8	[3]	RbCl	(51,21)	[2]	ThO_2	62,34	[2]
NaF	46,82	[3]	$RbClO_3$	103,2	[3]	TiB_2	44,52	[3]
NaH (газ)	30,12	[2]	RbF	(50,67)	[2]	TiC	33,51	[3]
$NaHCO_3$	87,70	[3]	RbLi	36,90	[2]	TiCl (газ)	34,7	[3]
NaI	54,31	[3]	Rb_2O_7	166,2	[3]	$TiCl_2$ (газ)	51,5	[3]
NaI (газ)	36,23	[2]	RhO	47,82	[2]	$TiCl_3$ (газ)	72,4	[3]
$NaNH_2$	66,15	[3]	Rh_2O	73,30	[2]	$TiCl_4$ (газ)	95,47	[3]
$NaNO_3$	93,05	[2]	Rh_2O_3	104,0	[2]	TiN	37,11	[3]
NaO_2	72,13	[3]	SF_6 (газ)	96,26	[2]	TiO	39,96	[3]
Na_2O	71,43	[3]	SO (газ)	30,26	[3]	Ti_2O_3	97,36	[3]
Na_2O_2	89,33	[3]	SO_2 (газ)	39,87	[3]	Ti_3O_5	185,2	[3]
NaOH	59,45	[3]	SO_3 (газ)	50,63	[3]	Ti_3O_5	154,8	[3]
Na_2SO_3	120,1	[3]	$SOCl_2$ (газ)	66,69	[2]	TiS_2	67,91	[3]
Na_2SO_4	130,8	[3]	SOF_2 (газ)	56,82	[3]	TlBr	52,72	[2]
Na_2SO_4	127,1	[3]	$SbCl_3$ (газ)	77,4	[2]	TlBr (газ)	36,84	[2]
Na_2SiO_3	111,8	[3]	Sb_2O_3	101,4	[3]	TlCl	50,92	[3]
Na_2TiO_3	131,2	[3]	Sb_2O_4	114,6	[3]	TlCl (газ)	39,23	[3]
NbN	43,35	[2]	Sb_2O_5	117,7	[3]	TlF (газ)	34,60	[2]
NbO_2	57,49	[3]	Sb_2S_3	(117,7)	[2]	$TlNO_3$	99,37	[3]
Nb_2O_5	132,1	[3]	Sc_2O_3	104,1	[5]	UCl_3	91,50	[3]
Nd_2O_3	111,3	[3]	SeF_6 (газ)	110,0	[2]	UCl_4	123,4	[3]
Ni $(CO)_4$ (газ)	136,0	[3]	SeO (газ)	31,17	[2]	UF_4	117,6	[3]
$NiCl_2$	71,67	[3]	$SiBr_4$ (газ)	97,07	[2]	UF_6	166,75	[3]
NiF_2	64,06	[3]	SiC	26,65	[2]	UH_3	49,29	[3]
$NiFe_2O_4$	145,6	[3]	$SiCl_4$ (газ)	90,58	[2]	UO_2	63,71	[3]
NiO	44,31	[3]	SiF_4 (газ)	73,47	[2]	UO_3	81,63	[3]
NiS	54,68	[3]	SiH_4 (газ)	42,76	[3]	U_3O_8	237,9	[3]
$NiSO_4$	(138,3)	[2]	Si_3N_4	99,87	[3]	$UOCl_2$	95,06	[3]
NiTe	52,51	[3]	SnAu	49,41	[3]	UO_2F_2	103,2	[3]
NpO_2	66,19	[3]	$SnBr_4$ (газ)	103,4	[2]	VC	33,35	[3]
OsO_4 (газ)	57,57	[3]	$SnCO_2$	78,87	[3]	VCl_2	72,22	[3]
PBr_3 (газ)	76,15	[3]	$SnCl_2$	(79,33)	[2]	VCl_3	93,18	[3]
PCl_3 (газ)	72,05	[3]	$SnCl_4$ (газ)	98,45	[2]	VN	38,03	[3]
PCl_5 (газ)	111,9	[3]	$SnNi_3$	99,66	[3]	VO	45,44	[3]
PF_3 (газ)	56,02	[3]	SnO	44,31	[3]	V_2O_3	103,9	[3]
PH_3 (газ)	37,11	[3]	SnO (газ)	31,71	[2]	V_2O_4	118,0	[3]
PN (газ)	29,66	[3]	SnO_2	52,59	[3]	V_2O_5	137,4	[3]
P_3N_5	149,2	[5]	SnPt	49,87	[3]	WC	36,11	[5]
$POCl_3$ (газ)	84,39	[3]	SnS	49,25	[3]	WO_3	81,50	[3]
P_4O_{10}	204,8	[3]	SnS (газ)	34,43	[2]	Y_2O_3	102,5	[3]
$PbBr_2$	80,12	[3]	SnS_2	74,31	[3]	$ZnCO_3$	80,17	[3]
$PbCl_2$	76,78	[3]	SnS_2	70,13	[14]	$ZnCl_2$	(76,27)	[3]
$PbCO_3$	87,40	[3]	$SnTe_2$	73,22	[3]	ZnF_2	65,65	[3]
PbF_2	(73,7)	[2]	$SrBr_2$	(79,62)	[3]	$ZnFe_2O_4$	138,0	[3]
PbI_2	81,17	[3]	$SrCl_2$	(79,20)	[2]	Zn_2Mg	74,06	[2]
PbO	49,33	[3]	$SrCO_3$	81,42	[3]	ZnO	40,25	[2]
PbO (желтая)	45,81	[3]	SrO	44,50	[3]	ZnO (газ)	31,71	[2]
PbO (газ)	32,43	[3]	SrO (газ)	33,14	[2]	ZnS	46,02	[3]

* При $T = 300°K$.

Вещество	C_P, дж/(моль·град)	Литература	Вещество	C_P, дж/(моль·град)	Литература	Вещество	C_P, дж/(моль·град)	Литература
$ZnSO_4$	97,37	[2]	$ZrCl_4$	119,9	[3]	ZrO_2	55,81	[3]
Zn_2SiO_4	123,3	[3]	ZrN	40,1	[3]	$ZrSiO_4$	98,62	[3]
Zn_2TiO_4	137,3	[3]	Zr_3N_2	123,0	[3]			

Таблица 10.3

Теплоемкость органических соединиений при давлении 760 *мм рт. ст.* и температуре 298,15°K [3,15]

Формула	Название	C_P, дж/(моль·град)	
		Конденсат	Газ
CH_4	Метан	—	35,79
CH_3F	Фторметан	—	37,40
CH_3Cl	Хлорметан	—	40,71
CH_3Br	Бромметан	—	42,43
CH_3I	Иодметан	—	44,10
CH_2F_2	Дифторметан	—	42,97
CH_2ClF	Фторхлорметан	—	47,07
CH_2Cl_2	Дихлорметан	—	51,13
CH_2Br_2	Дибромметан	—	54,79
CHF_3	Трифторметан (фреон-23)	93,10	51,09
CHF_2Cl	Дифторхлорметан (фреон-22)	104,06	55,86
$CHFCl_2$	Фтордихлорметан (фреон-21)	107,10	60,96
$CHCl_3$	Трихлорметан	—	65,40
$CHBr_3$	Трибромметан	—	71,09
CF_4	Тетрафторметан (фреон-14)	—	61,21
CF_3Cl	Трифторхлорметан (фреон-13)	—	66,82
CF_3Br	Трифторбромметан	—	84,43
CF_2Cl_2	Дифтордихлорметан (фреон-12)	126,0	87,85
CF_2ClBr	Дифторхлорбромметан	—	74,56
CF_2Br_2	Дифтордибромметан (фреон-12B2)	—	76,99
$CFCl_3$	Фтортрихлорметан (фреон-11)	121,5	77,88
$CFBr_3$	Фтортрибромметан (фреон-13B1)	214,09	84,43
CCl_4	Углерод четыреххлористый	131,67	83,42
CBr_4	Тетрабромметан	—	91,21
CH_4O	Метанол	81,6	43,89
CH_2O	Формальдегид	—	35,35
CH_2O_2	Муравьиная кислота	99,04	48,69
$COCl_2$	Фосген	—	60,67
CH_4S	Метантиоль	—	50,69
CH_5N	Метиламин	—	51,71
C_2H_6	Этан	—	52,70

Формула	Название	C_P, дж/(моль·град)	
		Конденсат	Газ
C_2H_4	Этен (этилен)	—	43,63
C_2H_2	Этин (ацетилен)	—	43,93
C_2H_5F	Фторэтан	—	58,99
C_2H_5Cl	Хлорэтан	—	62,80
C_2H_3Cl	Хлорэтен	—	53,66
$C_2H_4Cl_2$	1,1-Дихлорэтан	126,3	76,23
$C_2H_4Cl_2$	1,2-Дихлорэтан	129,0	79,50
$C_2H_4Br_2$	1,2-Дибромметан	136,0	—
$C_2H_2Cl_2$	1,1-Дихлорэтен	111,3	67,03
$C_2H_3Cl_3$	1,1,2-Трихлорэтан	144,3	88,99
$C_2F_3Cl_3$	1,2,2-трифтор-1,1,2-трихлорэтан (фреон-113)	178,56	116,1
C_2H_6O	Этанол	111,4	73,60
C_2H_4O	Ацетальдегид	—	54,64
C_2H_4O	Этилена окись	151	48,28
C_2H_2O	Кетен	—	47,82
$C_2H_4O_2$	Уксусния кислота, мономер	123,4	66,53
	Уксусная кислота, димер	—	146,4
C_2H_6S	Этантиоль	117,8	72,68
$C_2H_5O_2N$	Глицин	100,3	—
C_3H_8	Пропан	—	73,51
C_3H_6	Пропен (пропилен)	—	63,89
C_3H_6	Циклопропан	—	55,94
C_3H_4	Пропадиен (аллен)	—	58,99
C_3H_4	Пропин (метилацетилен)	—	60,67
C_3H_7Cl	2-Хлорпропан	—	87,57
C_3H_8O	Пропанол	153,4	—
C_3H_6O	Ацетон	125	74,89
C_4H_{10}	Бутан	—	98,78
C_4H_{10}	2-Метилпропан (изобутан)	—	96,82
C_4H_8	1-Бутен	—	89,33
C_4H_8	*цис*-2-Бутен	—	78,91
C_4H_8	*транс*-2-Бутен	—	87,82
C_4H_8	2-Метилпропен (изобутилен)	—	89,11
C_4H_8	Циклобутан	—	72,22
C_4H_6	1,2-Бутадиен	—	80,12
C_4H_6	1,3-Бутадиен (дивинил)	—	79,54
C_4H_6	1-Бутин (бутилен)	—	81,42
C_4H_6	2-Бутин	125,1	77,95

Продолжение табл. 10.3

Формула	Название	C_P, дж/(моль·град)	
		Конденсат	Газ
C_4H_6	Циклобутен	—	67,07
$C_4H_{10}O$	Бутанол	179	—
C_4H_8O	2-Бутанон	162	—
$C_4H_8O_2$	Уксусноэтиловый эфир	170	—
$C_4H_8O_2$	Диоксан	152,9	—
C_4H_4O	Фуран	114,6	64,44
C_5H_{12}	*н*-Пентан	171,5	122,6
C_5H_{12}	2-Метилбутан (изопентан)	164,9	120,6
C_5H_{12}	2,2-Диметилпропан (неопентан)	—	121,6
C_5H_{10}	1-Пентен	155,3	114,6
C_5H_{10}	*цис*-2-Пентен	151,7	101,8
C_5H_{10}	*транс*-2-Пентен	157,0	112,1
C_5H_{10}	2-Метил-1-бутен	157,2	111,6
C_5H_{10}	3-Метил-1-бутен	156,1	118,6
C_5H_{10}	2-Метил-2-бутен	152,8	106,6
C_5H_{10}	Циклопентан	156,1	82,93
C_5H_8	1,2-Пентадиен	149,0	105,4
C_5H_8	1-*цис*-3-Пентадиен	—	94,6
C_5H_8	1-*транс*-3-Пентадиен	—	103,3
C_5H_8	1,4-Пентадиен	—	105,0
C_5H_8	2,3-Пентадиен	—	101,3

Продолжение табл. 10.3

Формула	Название	C_P, дж/(моль·град)	
		Конденсат	Газ
C_5H_8	2-Метил-1,3-бутадиен (изопрен)	154,6	104,6
C_5H_8	2-Метил-1,2-бутадиен	—	105,4
C_5H_8	1-Пентин	—	106,7
C_5H_8	2-Пентин	—	98,7
C_5H_8	3-Метил-1-бутин	—	104,7
C_5H_8	Циклопентен	122,4	75,10
$C_5H_{12}O$	Пентанол	209	—
C_6H_{14}	Гексан	195,0	146,7
C_6H_{12}	1-Гексен	183,3	138,4
C_6H_{12}	Циклогексан	156,5	106,3
C_6H_{12}	Метилциклопентан	158,7	109,8
C_6H_{10}	1-Гексин	—	130,5
C_6H_{10}	Циклогексен	140,2	105,0
C_6H_6	Бензол	136,1	81,64
C_6H_5F	Фторбензол	146,4	94,43
C_6H_5Cl	Хлорбензол	150,1	97,07
C_6H_5Br	Бромбензол	155,4	—
$C_6H_{14}O$	Гексанол	238	—
C_6H_6O	Фенол	134,7	—
C_6H_7N	Анилин	191	—
$C_6H_5O_2N$	Нитробензол	187,3	—

10.2. ТЕПЛОЕМКОСТЬ ЭЛЕМЕНТОВ В ЗАВИСИМОСТИ ОТ ТЕМПЕРАТУРЫ ПРИ НОРМАЛЬНОМ ДАВЛЕНИИ

Таблица 10.4

Теплоемкость элемеитов при температуре ниже 20°К и давлеиии 760 *мм рт. ст.*

Вещество	T, °К	C_P, кал/(кг·град)	Вещество	T, °К	C_P, кал/(кг·град)
Ag [16]	1	0,0017	Bi [16]	1	0,0014
	2	0,0057		2	0,0110
	4	0,0296		4	0,1180
	6	0,093		6	0,511
	10	0,4302		10	2,49
Al [3, 17]	2	0,0285	Br [17]	10	9,3
	4	0,0679	Ca [17]	10	1,1
	10	0,3970	Cd [16]	1	0,029
Ar [16]	2	0,117		6	1,30
	4	1,042		10	8,0
	6	4,140	Cl_2 [17]	10	4,5
	8	10,60	Cr [17]	10	0,2
	10	19,8	Cu [17]	10	0,2
As [17]	10	0,4	Fe [17]	10	0,2
Au [16]	1	0,0014	Ga [17]	10	1,1
	2	0,0060	Ge [17]	10	1,0
	4	0,0382	H_2 (нормальный) [3]	4	360
	6	0,1200		6	237
	10	0,526		8	254
Be [16]	1	0,0060		10	352
	2	0,0122		12	520
	4	0,0261		13,95	731
	6	0,0430	H_2 (параводород) [13]	4	19,1
	10	0,0951		6	65,7

Вещество	T, °К	C_P, кал/(кг·град)	Вещество	T, °К	C_P, кал/(кг·град)
H_2 (параводород) [13]	8	156	α-Mn [17]	10	0,2
	10	294	Mo [17]	10	0,1
	12	480	N_2 [17]	10	37,9
	13,88	698	Na [16]	1	0,019
D_2 (иормальный) [14]	12	245		2	0,069
	14	348		4	0,383
	16	475		6	1,22
	18,65	693		10	5,69
^4He [3]	0,5	0,723	Nb [16]	1	0,21
	1,0	26,6		6	0,184
	1,2	77,7		10	0,526
	1,5	269	Ne [17]	10	1,385
	1,8	683	Ni [17]	10	0,2
	2,0	1190	O_2 [17]	10	19
	2,1	1640	Pb [17]	10	3,2
	2,2	1160	Pt [17]	10	0,3
	2,4	598	Rb [16]	1	0,048
	2,7	547		6	0,32
	3,4	702		10	0,65
	4,21	1050	S (ромбическая) [17]	10	3,1
^3He [3]	0,1	127	Sb [17]	10	0,5
	0,5	255	Se [17]	10	23
	1,0	343	Si [17]	10	0,2
	2,0	598	Sm [17]	10	4,7
Hf [16]	10	0,14	Sn [16]	1	0,017
Hg (сверхпроводящая) [16]	1	0,007		6	1,27
	2	0,115		10	8,1
	4	0,997	Ta [16]	1	0,008
Hg [16]	1	0,008		4	0,041
	2	0,115		6	0,079
	4	0,978		10	0,280
	6	2,61	Te [17]	10	1,6
	10	5,62	Ti [16]	1	0,017
In [16]	1	0,007		4	0,076
	6	0,858		6	0,129
	10	3,71		10	0,301
I_2 [17]	10	3,7	Tl [17]	10	4,0
K [17]	10	13	V [17]	10	0,2
Kr [17]	10	16,9	W [17]	10	0,1
Li [17]	10	4	Xe [17]	10	14,8
Mg [17]	10	0,4	Zr [17]	10	0,8

Теплоемкость C_P, *дж/(моль·град)*, элементов при температуре выше 20°K и давлении 760 *мм рт. ст.*
Часть строки правее * относится к газовой фазе.

Вещество	Температура, °K									Литература
	20	40	80	150	250	400	600	1000	1500	
Ac	—	—	—	—	—	28,0	29,7	33,1	—	[1]
Ag	1,72	8,39	17,89	22,97	25,06	25,9	27,1	29,8	31,4	[1, 3]
Al	0,23	2,09	9,65	18,52	23,25	25,61	28,12	29,3	—	[3, 2]
Ar	11,76	22,09	32,13	—	—	—	—	—	—	[3]
As	—	—	13,47	20,67	24,10	25,6	27,4	—	—	[1, 3]
As_2	—	—	—	—	—	*35,94	36,74	37,15	37,28	[1]
At	—	—	—	—	—	58,6	83,7	—	—	[1]
At_2	—	—	—	—	—	*37,5	37,7	38,0	38,2	[1]
Au	3,21	11,20	19,63	23,49	24,92	25,77	26,78	28,87	29,3	[2, 3]
B (кристалл)	—	—	0,54	3,23	8,82	—	—	—	—	[3]
B (аморфный)	—	—	0,75	3,60	9,49	13,8	17,5	25,0	—	[2, 3]
Ba	—	—	—	—	—	27,78	30,54	31,38	31,38	[1]
Be	0,014	0,090	0,816	5,73	13,85	19,84	23,43	27,32	32,4	[1, 3]
Bi	—	—	21,38	24,39	25,36	27,82	31,4	31,4	—	[3]
Br	12,72	29,00	40,52	49,20	59,25	—	—	—	—	[3]
Br_2	—	—	—	—	—	*36,7	37,3	37,7	38,0	[3]
C (графит)	0,1	0,35	1,17	3,299	6,816	11,93	16,86	21,51	24,10	[3]
C (алмаз)	0,004	0,01	0,110	1,000	4,135	9,95	15,85	21,04	—	[3]
Ca	1,59	7,78	17,11	29,97	25,65	27,4	30,6	39,7	—	[3]
Cd	5,19	13,21	20,61	24,04	25,51	27,15	29,7	29,7	—	[2, 3]
Ce	13,31	24,52	26,23	26,84	—	31,6	33,9	40,6	—	[1, 3]
Cl	7,74	23,97	38,62	50,96	—	—	—	—	—	[3]
Cl_2	—	—	—	—	—	*35,3	36,6	37,5	38,0	[3]
Co	0,28	2,38	10,83	19,50	23,93	26,6	30,0	37,2	40,2	[1, 3]
Cr	—	—	6,61	16,53	22,05	26,07	29,37	33,93	39,07	[2, 3]
Cs	19,75	23,77	25,27	26,82	29,08	31,8	31,8	—	—	[1, 3]
Cs_2	—	—	—	—	—	*38,39	38,91	39,87	41,13	[3]
Cu	0,48	3,77	12,93	20,52	23,93	25,15	26,40	28,91	31,4	[2, 3]
Dy	5,59	18,69	32,66	45,51	28,15	—	—	—	—	[3]
Er	21,00	24,00	32,53	25,97	27,58	—	—	—	—	[3]
F	12,99	36,73	57,71	—	—	—	—	—	—	[3]
F_2	—	—	—	—	—	*33,01	35,18	37,01	37,94	[3]
α-Fe	0,22	1,54	8,62	18,12	23,56	27,41	31,55	57,74	43,29	[3]
Ga	2,13	7,57	16,57	21,99	24,91	27,8	27,8	27,8	—	[1, 3]
Gd	4,16	15,20	26,51	32,69	41,64	29,13	30,7	33,5	37,0	[1, 3]
Ge	0,939	4,49	11,14	18,64	—	24,9	26,4	28,3	29,3	[1, 3]
H_2	—	—	—	—	—	*29,18	29,32	30,20	32,27	[3]
D_2	—	—	—	—	—	*29,23	29,63	31,66	34,24	[3]
T_2	—	—	—	—	—	*29,32	30,11	32,76	35,25	[3]
Hf	1,69	9,14	19,18	23,72	—	26,0	27,0	29,0	31,5	[1, 3]
Hg	10,3	17,94	33,16	25,92	28,32	27,36	27,15	—	—	[3]
Ho	10,25	20,43	34,02	26,56	26,82	—	—	—	—	[3]
In	7,088	16,13	22,12	25,12	26,32	28,9	29,7	29,7	29,7	[1, 3]
Ir	0,39	4,33	14,43	21,52	24,57	25,65	26,82	29,20	32,17	[2, 3]
I	16,18	31,62	43,32	49,52	53,25	—	—	—	—	[3]
I_2	—	—	—	—	—	*37,2	37,6	37,9	38,2	[3]
K	9,81	18,80	23,79	26,00	28,02	31,51	30,12	30,38	—	[3]
K_2	—	—	—	—	—	*38,16	38,62	39,46	41,7	[3]
Kr	15,36	23,64	28,53	—	—	—	—	—	—	[3]
La	6,19	15,69	22,34	25,25	—	28,5	29,8	—	—	[3]
Li	0,40	2,40	9,71	17,82	22,43	27,61	29,56	28,84	—	[3]
Li_2	—	—	—	—	—	*26,92	37,74	38,58	39,37	[3]
Mg	0,36	3,36	12,47	20,40	23,93	26,3	28,6	—	—	[3]
α-Mn	—	—	11,72	20,00	24,96	28,53	31,92	37,82	—	[3]
γ-Mn	—	—	11,42	20,44	25,69	—	—	—	—	[3]
Mo	0,21	1,96	10,01	18,91	23,10	25,0	26,3	28,0	32,0	[1, 3]
N_2	19,87	37,78	45,61	—	—	*29,25	30,11	32,70	34,85	[3]
Na	—	—	20,71	24,52	26,90	31,46	29,71	29,00	—	[3]
Na_2	—	—	—	—	—	*37,82	38,28	38,99	39,79	[3]
Nb	—	—	—	—	—	25,27	26,11	27,70	29,71	[2]
Nd	7,36	17,24	25,69	28,10	—	—	—	—	—	[3]
Ne	18,03	—	—	—	—	—	—	—	—	[3]

Вещество	Температура, °К									Литература
	20	40	80	150	250	400	600	1000	1500	
Ni	0,34	2,23	10,18	19,30	24,40	28,79	34,64	32,64	36,40	[2, 3]
O_2	13,97	41,51	53,76	—	—	*30,10	32,09	34,87	36,56	[3]
O_3	—	—	—	—	—	*43,68	49,76	54,55	—	[3]
Os	—	—	—	—	—	25,27	26,02	27,49	29,33	[2]
P (кристалл)	—	—	—	—	—	26,36	29,62	—	—	[2]
P_2	—	—	—	—	—	*33,6	35,5	36,8	37,4	[1]
Pb	11,01	19,57	23,69	25,27	26,36	27,45	29,37	29,41	—	[3]
Pd	0,97	5,42	15,01	22,13	25,31	26,57	27,74	30,04	32,93	[2, 3]
Pr	10,25	18,28	25,73	28,33	—	—	—	—	—	[3]
Pf	1,51	7,45	17,15	23,10	25,76	26,28	27,36	29,62	32,43	[2, 3]
Rb	—	22,38	24,98	26,57	28,70	—	—	—	—	[3]
Rb_2	—	—	—	—	—	*38,12	38,49	39,25	40,17	[3]
Re	0,61	4,80	14,93	22,30	25,40	25,86	26,94	26,12	31,84	[1, 3]
Rh	0,28	2,74	11,79	20,17	24,05	26,40	28,16	31,59	35,90	[2, 3]
Ru	0,17	1,88	10,04	18,91	23,93	24,84	25,73	28,24	30,12	[2, 3]
S (ромбическая)	2,57	6,08	10,90	16,62	21,31	—	—	—	—	[3]
S (моноклинная)	2,57	6,08	10,98	16,96	22,14	—	—	—	—	[3]
S_2	—	—	—	—	—	*34,06	35,73	36,99	37,49	[3]
Sb	3,20	10,13	18,54	23,22	24,90	25,9	27,4	—	—	[3]
Sb_2	—	—	—	—	—	*36,8	37,1	37,3	37,4	[1]
Se	3,43	8,70	15,98	21,69	24,28	—	—	—	—	[2, 3]
Se_2	—	—	—	—	—	*36,23	36,86	37,20	37,28	[2]
Si	—	—	5,19	12,01	18,24	22,3	24,4	26,1	—	[3]
Sm	7,23	18,28	32,21	26,29	28,22	—	—	—	—	[3]
Sn (белое)	—	12,80	20,50	24,48	26,11	29,04	30,54	30,54	—	[2, 3]
Sn (серое)	3,85	9,08	17,03	22,76	25,40	29,04	30,54	30,54	—	[2, 3]
Ta	1,36	7,61	17,26	22,68	24,88	26,2	27,0	27,9	28,9	[1, 3]
Tb	4,47	16,94	28,91	37,3	31,59	—	—	—	—	[3]
Te	4,52	11,76	19,79	23,74	25,14	26,3	27,6	—	—	[2, 3]
Th	4,63	14,04	21,47	24,96	26,74	29,29	33,05	40,67	50,17	[1, 3]
Ti	0,33	2,47	10,88	19,54	24,04	26,61	28,62	31,25	—	[1, 3]
Tl	10,29	18,95	23,71	25,27	26,07	27,78	31,38	—	—	[3]
U	3,38	12,33	20,54	24,67	26,93	29,6	34,5	42,5	38,3	[1, 3]
V	—	—	10,17	19,29	23,56	26,1	27,5	30,5	36,6	[1, 3]
W	0,33	3,29	12,80	20,53	23,69	25,1	25,8	27,2	26,9	[1, 3]
Xe	16,86	23,93	26,87	33,57	—	—	—	—	—	[3]
Zn	1,76	8,06	16,87	22,70	24,84	26,40	28,41	31,3	—	[2, 3]
Zr	1,17	6,15	15,86	22,17	24,76	—	—	—	—	[3]

10.3. ТЕПЛОЕМКОСТЬ НЕОРГАНИЧЕСКИХ СОЕДИНЕНИЙ В ЗАВИСИМОСТИ ОТ ТЕМПЕРАТУРЫ ПРИ НОРМАЛЬНОМ ДАВЛЕНИИ

Таблица 10.6

Теплоемкость C_p, *дж/(моль·град)*, неорганических соединений при температуре выше 20°К и давлении 760 *мм рт. ст.*

В скобках приведены расчетные значения. Часть строки правее * относится к газовой фазе.

Вещество	Температура, °К									Литература
	20	40	80	150	250	400	600	1000	1500	
AgBr	—	28,28	42,59	48,87	51,88	58,95	71,84	*37,34	37,36	[2, 3]
AgCl	8,71	22,30	37,95	46,94	50,41	56,86	61,63	*37,24	37,28	[2, 3]
AgI	15,31	28,03	42,72	50,12	53,48	64,68	56,5	*37,36	37,38	[2, 3]
$AgNO_3$	11,30	27,82	52,59	71,04	86,48	112,3	128	—	—	[2, 3]
Ag_2SO_4	12,72	38,49	73,81	99,16	123,5	(144)	(167)	205	—	[2, 3]
AlBr	—	—	—	—	—	36,80	37,70	38,60	39,40	[3]
AlF_3	—	—	17,20	42,76	67,40	84,56	97,11	100,1	—	[3]
Al_2O_3 (сапфир)	0,08	0,71	6,95	31,97	66,90	—	—	—	—	[3]
Al_2O_3 (корунд)	0,076	0,691	6,895	31,98	67,01	96,18	112,50	124,74	—	[3]
AsF_3	11,40	29,12	48,24	68,58	90,71	*71,9	77,2	81,9	—	[2, 3]
AsH_3	18,28	44,97	50,28	46,79	—	*45,4	53,1	63,8	75,7	[2, 3]
AuCl	—	—	—	—	—	*36,28	36,90	37,20	37,28	[2]
B_4C	—	—	2,68	14,73	41,13	77,19	97,29	114,3	128,1	[3]
BF_3	12,3	29,29	47,20	103,05	—	*57,57	67,11	75,82	—	[3]
B_2H_6	5,02	21,30	44,18	75,44	—	*71,71	98,91	135,1	156,9	[3]
BN	0,272	1,075	3,883	8,770	16,33	13,68	16,69	22,76	—	[2, 6]
BN	—	—	—	—	—	*30,63	32,61	34,31	36,99	[2]
B_2O_3 (кристалл)	0,38	3,22	15,82	33,15	53,44	75,60	98,78	128	128	[3]
$BaCO_3$	—	—	41,05	64,14	80,21	99,03	113,0	134,6	—	[3]
BaF_2	2,51	12,47	35,19	58,49	69,64	75,56	84,10	101,2	—	[3]
BaO	—	—	26,78	39,66	46,02	49,86	53,60	56,82	—	[3]
$BaSO_4$	5,48	21,76	49,25	12,38	93,97	119,4	131,6	137,9	—	[3]
$BaTiO_3$	—	—	31,51	66,78	95,48	112,9	121,3	128,1	134,6	[3]
BeO	—	—	1,67	7,95	20,46	33,76	41,71	50,75	—	[3]
Bi_2O_3	—	—	55,72	81,50	107,6	116,9	123,6	—	—	[3]
BrF_3	9,46	25,90	46,40	69,87	90,83	*72,72	78,03	81,20	—	[3]
BrF	—	—	—	—	—	*35,52	36,15	37,32	37,95	[15]
CO	14,02	34,14	—	—	—	*29,34	30,44	33,19	35,23	[3]
CO_2	5,13	19,62	35,91	47,72	—	*41,31	47,31	54,29	58,36	[3]
COS	11,00	27,70	40,25	72,33	—	*45,81	51,09	56,44	59,29	[3]
CS_2	11,97	27,82	41,09	55,64	75,27	*49,58	54,39	58,66	60,58	[3]
$CaCO_3$ (кальцит)	—	—	31,80	55,56	75,23	97,11	110,5	123,8	—	[2, 3]
$CaCl_2$	—	—	40,88	61,30	70,71	75,40	78,78	84,35	103,5	[3]
CaF_2	—	—	20,00	46,19	62,93	73,22	78,66	90,49	123,7	[2, 3]
CaO	0,08	1,26	9,71	27,15	41,46	—	51,38	—	—	[3]
$Ca(OH)_2$	0,92	5,69	22,84	53,56	79,37	98,41	107,0	115,3	—	[3]
$CaSO_4 \cdot 2H_2O$	4,27	20,38	63,35	115,5	167,8	110,5	130,3	159,8	—	[3]
$CaTiO_3$	—	—	26,07	59,71	89,16	112,7	123,1	130,1	134,8	[3]
$CdCl_2$	7,49	19,75	43,18	63,43	72,30	77,32	85,35	—	—	[3, 7]
CeO	—	—	—	—	—	66,9	69,0	73,2	78,5	[5]
Cl_2O	—	—	—	—	—	*49,0	53,1	56,1	57,3	[15]
ClO_2	—	—	—	—	—	*45,86	51,13	55,61	57,49	[15]
ClF_3	8,79	25,31	44,89	66,32	114,6	*71,34	71,19	80,83	82,13	[3, 15]
CoF_2	3,28	9,43	25,78	48,03	64,06	—	—	—	—	[3]
Cr_3C_2	0,84	3,43	20,92	56,40	88,37	113,7	127,9	147,3	—	[3]
CrF_3	3,75	15,29	29,79	51,84	72,68	—	—	—	—	[3]
Cr_2O_3	—	—	15,02	51,04	96,90	113,3	120,5	127,0	132,5	[3]
CuBr	5,61	19,50	36,11	46,78	52,79	*36,63	37,04	37,24	37,31	[2, 3]
CuO	0,59	3,51	12,38	26,12	39,11	46,82	50,84	58,87	—	[3, 9]
Cu_2O	5,23	18,95	36,65	47,53	59,40	71,88	76,65	86,19	—	[3, 9]
Cu_2S	—	—	42,93	61,92	73,55	97,28	97,28	85,02	—	[2]
F_2O	—	—	—	—	—	*47,61	52,43	55,86	57,11	[15]
Fe_3C	—	—	32,30	66,61	101,5	115,6	114,7	119,7	126,0	[3]
$FeCl_2$	—	—	42,17	64,10	74,43	79,66	83,09	102,1	—	[3]
FeS	1,10	6,99	20,90	36,12	47,11	65,10	57,02	61,0	71,3	[3]
Fe_2O_3	0,38	3,99	21,20	56,27	92,22	120,1	140,8	150,6	143,7	[3]
Fe_3O_4	—	—	37,45	92,76	131,8	172,2	212,5	200,8	200,8	[3]
Ga_2O_3	0,46	5,56	23,47	53,30	81,92	(91,42)	(112,5)	—	—	[2, 3]

Вещество	Температура, °К									Литература
	20	40	80	150	250	400	600	1000	1500	
GeF_4	—	—	—	—	—	90,17	98,66	104,3	—	[3]
HBr	11,05	20,50	39,33	46,88	—	*29,21	29,87	32,33	34,74	[3]
HCN	3,494	12,48	28,52	42,32	60,84	*39,42	44,19	50,79	56,40	[3]
HCl	5,86	15,69	27,99	—	—	*29,16	29,71	31,76	—	[3]
HF	2,51	9,04	16,95	25,57	—	*29,15	29,23	30,17	32,23	[3]
HI	14,14	23,26	37,40	45,58	—	*29,29	30,12	32,34	35,27	[2, 3]
HN_3	—	—	—	—	—	*49,12	57,36	67,45	73,98	[3]
HNO_3	5,18	18,69	36,92	51,79	111,5	*63,4	—	—	—	[3]
$HNO_3 \cdot H_2O$	5,14	19,70	43,39	66,40	180,7	—	—	—	—	[3]
H_2O	2,05	6,13	12,87	22,06	34,83	*34,24	36,29	41,20	46,98	[3]
D_2O	2,23	6,38	13,53	25,53	41,20	*35,62	38,82	45,41	51,12	[3]
H_2O_2	1,23	6,90	20,48	35,30	51,46	*45,45	55,69	62,84	68,32	[3]
H_2S	5,23	14,90	30,59	56,32	—	*35,60	38,69	45,85	51,66	[3]
H_2SO_4	7,24	21,84	39,37	59,79	88,58	—	—	—	—	[3]
$H_2SO_4 \cdot H_2O$	5,56	24,24	45,15	73,97	113,1	—	—	—	—	[3]
H_2Se	—	—	37,7	54,85	—	*36,28	40,21	47,24	—	[3]
HfO_2	—	—	17,82	36,40	54,39	67,15	73,93	80,00	85,19	[3]
HgCl	8,03	29,00	37,53	44,64	49,45	36,74	37,11	37,28	37,36	[2, 3]
HgO (красная)	5,44	15,02	25,52	31,40	41,45	—	—	—	—	[3]
IBr	—	—	—	—	—	*36,99	37,40	37,78	38,07	[15]
ICl	—	—	—	—	—	*36,40	37,11	37,66	37,99	[15]
KBr	6,94	23,18	39,92	47,94	50,88	53,93	56,69	62,26	—	[3]
KBr	—	—	—	—	—	*36,94	37,20	37,32	37,36	[2]
KCl	2,84	15,64	34,48	45,18	49,88	52,09	55,31	63,47	—	[2, 3]
KCl	—	—	—	—	—	*36,78	37,11	37,32	37,36	[2]
KF	1,16	7,92	25,48	40,71	47,70	51,34	53,93	59,16	—	[2, 3]
KH_2PO_4	3,21	17,67	46,36	75,06	104,0	—	—	—	—	[3]
$KMnO_4$	12,89	35,23	61,92	87,86	110,6	—	—	—	—	[3]
K_2SO_4	—	—	68,24	98,86	120,5	149,1	175,2	196,7	200	[2, 3]
Li_2CO_3	0,96	6,74	26,07	55,56	85,77	—	—	—	—	[3]
LiF	0,08	0,75	7,78	24,85	38,07	46,62	51,61	59,58	—	[3]
Li_2O	0,063	0,54	5,61	24,45	46,93	63,85	73,85	86,53	—	[3]
$MgCO_3$	—	—	15,82	43,85	68,62	90,12	107,7	—	—	[2, 3]
$MgCl_2$	—	—	31,34	55,44	68,13	76,07	80,25	—	—	[3]
MgF_2	—	—	14,77	37,66	56,48	69,31	74,60	80,46	86,24	[3]
MgO	0,088	0,53	4,54	18,73	33,30	41,67	45,23	49,25	53,22	[2, 3]
$Mg(OH)_2$	0,34	2,83	13,74	40,96	68,78	81,00	94,22	—	—	[2, 3]
Mn_3C	—	—	31,38	62,84	86,61	104,4	115,0	127,4	159,0	[3]
$MnCl_2$	—	—	38,50	60,58	70,71	77,15	81,84	94,56	—	[3]
MnF_2	4,97	17,02	29,65	49,08	64,10	—	—	—	—	[3]
MnO	—	—	21,80	33,14	41,51	47,45	50,33	54,14	58,49	[3]
Mn_2O_3	—	—	41,84	61,84	93,72	109,0	120,8	137,2	—	[12]
MnS	—	—	33,14	49,16	48,95	50,71	52,22	55,23	58,99	[3]
MoO_3	1,63	6,99	23,77	47,70	67,99	84,22	94,52	107,1	—	[3]
Mo_3Si	—	—	34,12	69,02	88,57	97,02	102,3	110,7	120,5	[3]
NF_3	21,05	42,34	71,74	—	—	—	—	—	—	[3]
NH_3	1,54	7,61	20,77	38,65	—	*38,53	44,73	56,2	66,2	[3]
N_2H_4	1,46	8,91	24,96	42,03	59,75	*63,2	76,5	93,3	107	[3]
$(NH_4)H_2PO_4$	4,18	17,77	46,53	131,8	125,2	—	—	—	—	[3]
NO	7,03	17,28	30,21	—	—	*29,97	31,25	34,00	35,82	[3]
N_2O	6,32	21,46	37,45	51,46	—	*42,87	48,86	56,02	60,45	[3]
N_2O_4	8,49	28,70	52,55	76,82	107,2	*90,50	103,6	122,1	—	[2, 3]
$NaBH_4$	1,59	10,54	31,71	57,86	80,00	94,56	108,6	—	—	[3]
NaCl	1,42	10,04	29,37	44,10	48,86	52,47	55,73	62,26	—	[2, 3]
NaCl	—	—	—	—	—	*36,28	36,90	37,20	37,28	[2]
NaF	—	—	16,15	34,23	44,43	49,12	52,89	59,62	68,62	[3]
$NaNO_3$	3,77	17,32	43,56	66,02	84,22	116,1	155,6	—	—	[1, 3]
NaOH	—	—	20,67	41,30	54,44	65,10	86,06	83,72	—	[3]
Na_2SO_4	2,43	17,06	53,39	89,70	117,6	153,4	170,2	202,5	197,4	[3]
Na_2SiO_3	—	—	36,15	73,26	102,2	130,6	148,0	168,9	179,1	[3]
Na_2TiO_3	—	—	34,64	78,16	114,4	140,0	151,3	179,7	196	[3]
$NiCl_2$	3,29	13,08	35,19	57,66	69,04	75,40	79,79	85,94	100,4	[3]

Вещество	Температура, °К									Литература
	20	40	80	150	250	400	600	1000	1500	
NiO	—	—	9,25	24,89	39,41	52,13	51,84	52,23	59,45	[3, 8]
PH_3	10,29	40,88	*50,46	60,51	—	*41,80	50,92	64,31	72,84	[3]
$PbCl_2$	12,55	33,64	55,40	67,95	74,98	80,17	86,86	—	—	[2, 3]
PbO (красная)	—	—	22,94	34,70	43,45	51,04	54,39	—	—	[2, 3]
PbO (желтая)	—	—	22,82	35,20	45,57	53,93	64,64	—	—	[2, 3]
RbI	15,06	34,73	46,02	50,38	52,30	(52,93)	55,15	—	—	[2, 3]
SF_6	22,64	42,93	60,63	75,13	—	*117,9	133,5	147,2	158,1	[2, 3]
SO_2	6,95	24,18	43,18	57,53	86,65	*43,47	48,99	54,52	57,11	[3]
Sb_2O_4	—	—	37,99	72,26	106,9	121,7	135,2	162,3	—	[3]
SeF_6	—	—	—	—	—	*127,9	141,3	150,7	156,6	[2]
SiC	—	—	2,38	10,00	22,07	34,35	41,34	48,62	55,61	[2, 3]
SiH_4	9,41	26,19	51,46	61,35	—	*51,42	65,81	84,47	95,44	[3]
SiO_2 (кварц)	1,00	3,93	11,92	24,94	39,33	53,60	64,39	68,41	72,47	[2, 3]
SiO_2 (кристобалит)	—	—	12,05	25,02	39,29	53,14	65,35	72,97	73,05	[2, 3]
SiO_2 (тридимит)	—	—	12,47	25,52	39,79	61,50	63,68	68,12	73,64	[2, 3]
$SnCl_4$	—	—	—	—	—	102,4	105,2	107,0	—	[3]
SnO_2	—	—	15,48	32,89	49,08	64,42	73,93	81,77	87,99	[3]
SnS	—	—	29,29	41,76	47,82	50,38	55,27	56,57	—	[3, 14]
$SrCO_3$	—	—	34,77	59,62	75,65	95,06	107,2	124,0	—	[3]
SrO	—	—	18,20	34,31	43,26	48,76	52,34	55,56	—	[3]
$SrSO_4$	2,88	16,31	43,91	69,81	92,99	(113,5)	(124,6)	(146,9)	(174,7)	[2, 3]
TaC	—	—	15,65	24,18	34,43	—	—	—	—	[3]
Ta_2O_5	—	—	44,64	86,61	124,3	150,3	167,0	172 7	185,4	[3]
ThO_2	—	—	—	—	—	66,90	71,67	77,66	84,06	[2]
TiC	—	—	4,23	15,73	29,37	41,46	47,32	51,34	53,85	[3]
$TiCl_4$	—	—	—	77,48	91,58	100,8	104,3	106,5	107,6	[2, 3]
TiO	—	—	8,54	22,84	36,07	45,40	51,09	58,94	68,41	[3]
TiO_2 (рутил)	—	—	13,26	31,80	49,75	64,43	70,54	75,02	—	[3]
TiO_2 (анатаз)	—	—	13,26	31,88	49,37	64,18	70,12	74,35	77,19	[3]
Ti_2O_3	—	—	17,03	51,46	87,45	120,2	136,5	146,3	151,3	[3]
TlCl	14,74	28,84	42,38	48,37	50,63	53,56	55,23	*37,29	37,35	[2, 3]
UCl_3	—	—	—	—	—	97,15	105,1	115,2	118,4	[3]
UF_6	17,00	40,31	80,32	118,39	152,40	—	—	—	—	[3]
UO_2	4,19	11,03	23,28	42,13	59,25	72,72	79,79	85,60	89,75	[3]
VC	—	—	6,99	18,37	29,71	38,83	44,43	51,38	58,74	[3]
V_2O_3	—	—	18,20	60,54	95,48	116,6	128,5	140,5	151,7	[3]
WC	—	—	—	—	—	37,03	38,83	42,47	47,03	[5]
WO_3	—	—	24,43	49,92	73,39	83,62	(91,92)	(104,9)	(121,0)	[2, 3]
ZnF_2	0,983	6,95	23,86	46,44	61,76	—	—	—	—	[3]
ZnO	—	—	13,60	25,86	37,03	45,33	49,50	53,18	56,23	[2, 3]
ZnS	1,67	8,20	19,83	34,43	43,26	49,41	52,38	55,48	—	[3]
ZrN	—	—	15,82	24,69	36,78	44,77	48,66	52,76	—	[3]
ZrO_2	—	—	13,05	32,30	50,58	63,85	70,25	75,73	—	[3]

Таблица 10.7

Теплоемкость воды C_p, *дж/(моль·град)*, при давлении 760 *мм рт. ст.*

t, °C	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9
0	4,2174	4,2138	4,2104	4,2074	4,2045	4,2019	4,1996	4,1974	4,1954	4,1936
10	4,1919	4,1904	4,1890	4,1877	4,1866	4,1855	4,1846	4,1837	4,1829	4,1822
20	4,1816	4,1810	4,1805	4,1801	4,1797	4,1793	4,1790	4,1787	4,1785	4,1783
30	4,1782	4,1781	4,1780	4,1780	4,1779	4,1779	4,1780	4,1780	4,1781	4,1782
40	4,1783	4,1784	4,1786	4,1788	4,1789	4,1792	4,1794	4,1796	4,1799	4,1801
50	4,1804	4,1807	4,1811	4,1814	4,1817	4,1821	4,1825	4,1829	4,1833	4,1837
60	4,1841	4,1846	4,1850	4,1855	4,1860	4,1865	4,1871	4,1876	4,1882	4,1887
70	4,1893	4,1899	4,1905	4,1912	4,1918	4,1925	4,1932	4,1939	4,1946	4,1954
80	4,1961	4,1969	4,1977	4,1985	4,1994	4,2002	4,2011	4,2020	4,2029	4,2039
90	4,2048	4,2058	4,2068	4,2078	4,2089	4,2100	4,2111	4,2122	4,2133	4,2145
100	4,2156	—	—	—	—	—	—	—	—	—

10.4. ТЕПЛОЕМКОСТЬ ОРГАНИЧЕСКИХ СОЕДИНЕНИЙ В ЗАВИСИМОСТИ ОТ ТЕМПЕРАТУРЫ ПРИ НОРМАЛЬНОМ ДАВЛЕНИИ

Таблица 10.8

Теплоемкость C_P, *дж/(моль·град)*, органических соединений при давлении 760 *мм рт. ст.* [3, 18]
Верхняя шкала температур относится к конденсированному состоянию, нижняя — к газу.

Формула	Название	Состояние	Температура, °К			
		Конденсат	20	40	80	150
		Газ	400	600	1000	1500
CH_4	Метан	Конденсат	—	28,66	40,58	—
		Газ	40,74	52,49	72,01	86,7
CH_3F	Фторметан	Газ	44,02	57,74	77,11	90,21
CH_3Cl	Хлорметан	Конденсат	6,28	22,51	42,38	62,34
		Газ	48,12	61,25	78,91	91,00
CH_3Br	Бромметан	Конденсат	10,71	26,24	45,15	56,23
		Газ	49,92	62,63	79,50	91,25
CH_2Cl_2	Дихлорметан	Газ	61,46	72,63	87,03	95,98
CHF_3	Трифторметан (фреон-23)	Газ	61,04	75,86	90,92	—
CHF_2Cl	Дифторхлорметан (фреон-22)	Газ	65,46	77,28	92,51	99,62
$CHFCl_2$	Фтордихлорметан (фреон-21)	Газ	70,08	82,47	94,22	100,5
CF_4	Тетрафторметан (фреон-14)	Конденсат	20,29	42,80	67,36	—
		Газ	72,63	87,03	98,95	—
CF_3Cl	Трифторхлорметан (фреон-13)	Газ	77,59	90,37	100,5	104,5
CF_2Cl_2	Дифтордихлорметан (фреон-12)	Газ	98,66	112,0	123,4	128,3
CF_2Br_2	Дифтордибромметан (фреон-12Б2)	Газ	85,60	95,35	102,8	—
$CFCl_3$	Фтортрихлорметан (фреон-11)	Конденсат	21,40	40,05	55,35	83,89
		Газ	87,04	96,66	103,4	105,9
CCl_4	Четыреххлористый углерод	Конденсат	21,33	40,92	58,91	84,89
		Газ	91,71	99,66	104,8	—
CH_4O	Метиловый спирт	Конденсат	5,86	18,33	37,66	55,65
		Газ	51,42	67,03	89,45	—
CH_2O	Муравьиная кислота	Конденсат	4,10	14,16	29,43	44,14
		Газ	56,96	69,66	84,68	94,27
CH_2O	Формальдегид	Газ	39,19	48,10	61,90	71,10
C_2H_6	Этан	Конденсат	6,42	24,87	53,22	70,22
		Газ	65,6	89,3	122,7	146,0
$C_2H_4Cl_2$	Дихлорэтан	Конденсат	12,26	32,55	54,02	91,21
		Газ	92,22	112,4	138,3	155,3
C_2H_4	Этен (этилен)	Конденсат	6,36	23,70	48,33	67,23
		Газ	53,97	71,55	94,43	110,29
C_2H_6O	Этиловый спирт	Кристалл	7,155	17,25	40,80	—
		Аморфный	8,290	24,07	46,38	—
		Газ	87,56	112,2	145,0	167,7
C_2H_6O	Диметиловый эфир	Конденсат	8,20	24,89	47,91	98,91
C_2H_4O	Ацетальдегид	Газ	65,81	85,86	112,8	—
C_2H_4O	Этилена окись	Конденсат	5,98	21,80	42,09	64,39
		Газ	65,90	86,27	114,9	—
$C_2H_4O_2$	Уксусная кислота	Конденсат	—	—	—	59,5
		Газ	81,67	105,2	133,8	152,5
C_2H_2O	Кетен	Газ	56,15	69,58	83,81	93,93
C_2H_2	Этин (ацетилен)	Газ	50,10	57,44	66,62	74,07
C_3H_8	Пропан	Конденсат	6,66	25,08	50,38	88,07
		Газ	94,3	129,2	175,0	206,1
C_3H_6	Пропен	Конденсат	9,58	28,95	53,51	87,11
		Газ	79,91	107,5	144,2	169,0
C_3H_8O	2-Пропиловый спирт	Конденсат	8,41	24,7	46,1	74,1
C_3H_6O	Ацетон	Конденсат	10,3	30,2	56,8	83,2
		Газ	92,05	122,8	163,8	191,3
C_4H_{10}	*н*-Бутан	Конденсат	4,52	27,45	55,65	115,1
		Газ	124,7	169,1	226,8	265,7
C_4H_8	1-Бутен	Конденсат	8,21	28,48	53,89	105,4
		Газ	112,7	149,9	197,7	229,8
C_5H_{12}	*н*-Пентан	Конденсат	10,25	31,00	62,84	140,6
		Газ	154,4	208,7	278,5	325,3
C_5H_{10}	1-Пентен	Конденсат	10,54	32,93	61,92	129,2
		Газ	143,1	189,8	249,4	289,4
C_6H_{14}	Гексан	Конденсат	10,84	34,64	70,08	109,0
		Газ	184,3	248,4	330,3	385,0
C_6H_6	Бензол	Конденсат	8,37	26,53	44,93	64,64
		Газ	111,9	157,9	209,9	241,3

Формула	Название	Состояние	Температура, °К			
		Конденсат	20	40	80	150
		Газ	400	600	1000	1500
C_7H_8	Толуол	Газ	139,1	194,9	260,2	300,3
C_8H_{10}	*о*-Ксилол	Конденсат	11,00	31,80	60,38	96,06
		Газ	171,7	234,2	311,1	359,5
C_8H_8	Стирол	Конденсат	11,71	32,28	56,19	90,75
		Газ	160,3	218,2	284,2	324,6
$C_{10}H_8$	Нафталин	Конденсат	9,37	30,12	51,99	81,75
		Газ	180,7	250,8	328,8	374,4
$C_{10}H_8$	Азулен	Газ	176,4	248,2	327,4	—

10.5. ТЕПЛОЕМКОСТЬ C_P И ОТНОШЕНИЕ C_P/C_V ДЛЯ ГАЗОВ И ЖИДКОСТЕЙ ПРИ РАЗЛИЧНЫХ ЗНАЧЕНИЯХ ТЕМПЕРАТУРЫ И ДАВЛЕНИЯ

Таблица 10.9

Зависимость теплоемкости C_P, *кал/(г·град)*, газов и жидкостей от давления и температуры
Ar, аргон [19, 20]

T, °K	Давление, *атм*					
	1	4	10	40	70	100
110	0,12833	0,14253	—	0,326*	0,313*	0,297
130	0,12678	0,13482	0,1506	0,365	0,334	0,314
150	0,12598	0,13119	0,14825	0,359	—	0,380
170	0,12553	0,12915	0,13731	0,2258	0,330**	0,532
200	0,12514	0,12749	0,13248	0,16467	0,20895	0,25870
220	0,12498	0,12681	0,13069	0,15372	0,18407	0,21890
250	0,12481	0,12614	0,12890	0,14427	0,16218	0,18208
300	0,12466	0,12552	0,12726	0,13631	0,14576	0,15522
350	0,12457	0,12514	0,12637	0,13183	0,13681	0,14527
450	0,12448	0,12482	0,12549	0,12880	0,13208	0,13537
600	0,12443	0,12461	0,12495	0,12666	0,12830	0,12989

* При $T = 120$°K.
** При $T = 180$°K.

T, °K	Давление, *атм*					
	300	500	1000	2000	3000	5000
110	—	0,227	0,196	—	—	—
160	0,264	0,2308	0,2094	0,1945	0,1883	—
190	0,273	0,2398	0,2200	0,2054	0,1978	0,1897
220	0,262	0,2451	0,2301	0,2164	0,2078	0,1982
250	0,2346	0,2370	0,2353	0,2246	0,2135	0,2021
280	0,2083	0,2213	0,2306	0,2201	0,2089	0,2010
320	0,1846	0,1988	0,2090	0,1979	0,1812	0,1745
400	0,1614	0,1674	0,1681	—	—	—
500	0,1498	0,1522	0,1513	—	—	—

Ar, Аргон

P, *атм*	Температура, °К					
	800	1000	1400	1800	2200	3000
1	0,12440	0,12439	0,12438	0,12438	0,12437	0,12437
10	0,12468	0,12456	0,12446	0,12442	0,12440	0,12438
100	0,12726	0,12616	0,12517	0,12482	0,12462	0,12447

H_2, водород [3, 20]

T, °К	Давление, *атм*			T, °К	Давление, *атм*		
	1	10	100		1	10	100
30	2,590	—	—	100	2,683	2,750	3,248
40	2,527	3,413	—	110	2,751	2,804	3,205
50	2,507	2,905	—	130	2,889	2,925	3,198
60	2,508	2,704	3,900	150	3,012	3,039	3,246
70	2,528	2,693	3,732	200	3,235	3,249	3,364
80	2,568	2,684	3,513	300	3,420	3,426	3,476
90	2,620	2,708	3,318	600	3,477	3,479	3,485

N_2, азот [20]

T, °К	Давление, *атм*			T, °К	Давление, *атм*		
	1	10	100		1	10	100
100	0,25627	—	—	400	0,24972	0,25148	0,2676
140	0,25070	0,28074	—	500	0,25248	0,25353	0,26318
180	0,24957	0,26211	—	700	0,26243	0,26292	0,26747
220	0,24911	0,25641	0,347	1000	0,27896	0,27919	0,28122
260	0,24889	0,25370	0,303	1400	0,29450	0,29459	0,29552
300	0,24884	0,25226	0,2852	1800	0,30374	0,30379	0,30426
350	0,24907	0,25146	0,2736	3000	0,31596	0,31597	0,31607

O_2, кислород [20]

T, °К	Давление, *атм*			T, °К	Давление, *атм*		
	1	10	100		1	10	100
120	0,22145	—	—	450	0,22859	0,22990	0,2427
150	0,21950	0,24535	—	550	0,23612	0,23695	0,2450
170	0,21894	0,23474	—	700	0,24642	0,24690	0,2516
210	0,21848	0,22687	0,4024	1000	0,26052	0,26074	0,2628
250	0,21868	0,22400	0,2925	1400	0,27108	0,27118	0,2721
300	0,21985	0,22325	0,2586	1800	0,27863	0,27869	0,2792
350	0,22206	0,22441	0,2475	2200	0,28561	0,28565	0,2860
400	0,22507	0,22679	0,2435	3000	0,29846	0,29847	0,2986

B_2H_6, диборан [21]

T, °K	Давление, *атм*			T, °K	Давление, *атм*		
	1	10	100		1	10	100
190	0,3732	—	—	420	0,6436	0,6543	0,8245
240	0,4135	0,5572	—	440	0,6686	0,6779	0,8117
270	0,4482	0,5195	—	460	0,6932	0,7013	0,8100
300	0,4863	0,5282	1,3266	500	0,7407	0,7472	0,8245
360	0,5656	0,5844	1,0150	800	1,0265	1,0287	1,0498
400	0,6179	0,6306	0,8563	1500	1,3403	1,3409	1,3468

CO, окись углерода [20]

T, °K	Давление, *атм*			T, °K	Давление, *атм*		
	1	10	100		1	10	100
200	0,2495	0,2600	—	600	0,2598	0,2606	0,2682
220	0,2493	0,2575	—	700	0,2660	0,2666	0,2719
280	0,2490	0,2536	0,2902	900	0,2780	0,2783	0,2814
350	0,2495	0,2523	0,2765	1200	0,2916	0,2918	0,2934
450	0,2521	0,2538	0,2589	1800	0,3064	0,3065	0,3070
520	0,2553	0,2565	0,2669	3000	0,3175	0,3175	0,3175

CO_2, двуокись углерода [20, 22]

T, °K	Давление, *атм*			T, °K	Давление, *атм*		
	1	10	100		1	10	100
220	0,1871	—	—	340	0,2127	0,2226	0,4140
240	0,1904	0,3321	—	420	0,2288	0,2339	0,2976
250	0,1924	0,2605	—	490	0,2410	0,2442	0,2695
260	0,1946	0,2316	—	550	0,2502	0,2525	0,2784
270	0,1969	0,2186	0,513*	600	0,2572	0,2589	0,2787
280	0,1992	0,2187	0,559[2]*	700	0,2693	0,2704	0,2830
290	0,2015	0,2191	0,655[3]*	800	0,2794	0,2802	0,2884
300	0,2038	0,2195	—	1000	0,2950	0,2954	0,2998
320	0,2083	0,2207	0,9338	1200	0,3059	0,3063	0,3090
330	0,2105	0,2215	0,5170	1500	0,3170	0,3172	0,3188

* При $T = 273{,}15$°K.
[2]* При $T = 283{,}15$°K.
[3]* При $T = 293{,}15$°K.

H_2O, вода [23]

t, °K	Давление, *атм*					T, °K	Давление, *атм*				
	1	25	100	200	500		1	25	100	200	500
273,15	1,007	—	0,995	0,987	—	613	0,485	0,545	1,028	1,679	—
323,15	0,998	—	0,993	0,988	—	633	0,487	0,573	0,878	2,907	—
373,15	0,492	—	1,001	0,996	—	643	0,489	0,543	0,823	3,768	—
403,15	0,477	—	1,013	1,007	—	663	0,492	0,531	0,755	1,733	—
443,15	0,470	—	1,036	1,028	—	693	0,498	0,535	0,689	1,161	—
473,15	0,472	—	1,063	1,051	—	723	0,502	0,535	0,650	0,938	—
503,2	0,474	0,745	1,103	1,085	—	773	0,510	0,539	0,615	0,785	1,709
513,2	0,474	0,694	1,122	1,100	—	823	0,519	0,544	0,600	0,708	1,198
543,2	0,477	0,613	1,202	1,162	—	873	0,527	0,549	0,590	0,667	0,970
573	0,480	0,574	1,363	1,273	—	973	0,544	0,562	0,583	0,626	0,82
583	0,481	0,565	1,662	1,332	—						

NH_3, аммиак [22]

T, °K	Давление, *атм*			T, °K	Давление, *атм*		
	1	10	50		100	500	1000
300	0,516	0,746	1,14*	310	1,11	1,02	0,91
320	0,519	0,663	1,17	350	1,26	1,06	0,94
340	0,524	0,616	1,26	370	1,41	1,09	0,96
360	0,536	0,599	1,43	380	1,55	1,10	0,97
380	0,538	0,583	1,04	390	1,85	1,12	0,98
400	0,546	0,587	0,88	400	1,81	1,14	0,99
420	0,554	0,587	0,79	420	1,47	1,20	1,00
440	0,563	0,587	0,73	440	1,10	1,24	1,00
480	0,580	0,599	0,70	480	0,86	1,30	1,00
520	0,598	0,616	0,69	520	0,79	1,21	0,97
580	0,624	0,640	0,68	560	0,74	1,01	0,93

* При $T = 310$°K.

CH_4, метан [23]

T, °K	Давление, *атм*			T, °K	Давление, *атм*		
	0	25	100		0	25	100
323,15	0,5481	0,575	0,682	573,2	0,7587	0,765	0,783
373,15	0,5853	0,604	0,664	673,2	0,8435	0,848	0,860
423,15	0,6273	0,640	0,682	773,2	0,9216	0,925	0,933
473,15	0,6700	0,680	0,710	873,2	0,9926	0,996	1,003
523,2	0,7140	0,722	0,744	973,2	1,057	1,052	1,064

C_2H_6, этан [2]

T, °K	Давление, *атм*			T, °K	Давление, *атм*		
	0	17	34		0	17	34
294,25	0,4183	0,4853	0,7673	344,25	0,4661	0,5068	0,5761
310,95	0,4343	0,4900	0,6215	360,95	0,4821	0,5203	0,5801
327,55	0,4502	0,4980	0,5865	377,55	0,4988	0,5355	0,5896

C_2H_2, этин (ацетилен) [19]

T, °K	Давление, *атм*			T, °K	Давление, *атм*		
	0,1	1	10		0,1	1	10
240	0,3657	0,3726	0,4664	290	0,3976	0,4011	0,4422
270	0,3853	0,3895	0,4445	300	0,4034	0,4068	0,4429
280	0,3915	0,3953	0,4429	320	0,4149	0,4184	0,4472

$C_2F_3Cl_3$, трифтортрихлорэтан (фреон-113) [23]

T, °K	Давление, *атм*			T, °K	Давление, *атм*		
	10	20	30		10	20	30
253,15	0,216	0,215	0,214	323,15	0,232	0,229	0,226
263,15	0,218	0,216	0,215	333,15	0,234	0,231	0,228
273,15	0,220	0,218	0,217	343,15	0,237	0,233	0,230
283,15	0,222	0,220	0,218	353,15	0,239	0,236	0,232
293,15	0,225	0,222	0,220	363,15	0,242	0,239	0,234
303,15	0,225	0,224	0,222	373,15	0,246	0,242	0,237
313,15	0,229	0,226	0,224	383,15	0,251	0,246	0,240

C_3H_8, пропан [19]

T, °K	Давление, *атм*						
	0,1	1	5	10	50	100	250
230	0,322	0,537	0,537	0,537	0,528	—	—
240	0,333	0,340	0,540	0,540	0,528	—	—
250	0,342	0,349	0,542	0,542	0,531	—	—
260	0,354	0,360	0,546	0,546	0,535	—	—
270	0,365	0,372	0,558	0,555	0,542	—	—
280	0,374	0,381	0,449	0,574	0,553	0,549	—
290	0,385	0,390	0,435	0,601	0,574	0,567	—
300	0,397	0,401	0,431	0,637	0,599	0,590	—
310	0,406	0,413	0,438	0,517	0,630	0,615	0,585
320	0,417	0,424	0,444	0,499	0,669	0,642	0,596
340	0,440	0,444	0,460	0,483	0,787	0,698	0,621
360	0,463	0,465	0,476	0,492	0,880*	0,764	0,649
380	0,485	0,487	0,497	0,508	—	0,832	0,673
400	0,508	0,510	0,517	0,526	0,737**	0,905	0,696
440	0,553	0,555	0,560	0,567	0,678	0,921	0,739
480	0,596	0,599	0,603	0,608	0,664	0,834	0,778
520	0,637	0,637	0,642	0,646	0,680	0,778	0,798
560	0,669	0,669	0,671	0,676	0,701	0,755	0,789
600	0,696	0,696	0,698	0,701	0,719	0,751	0,782

* При $T = 350$ °K.
** При $T = 420$ °K.

Воздух [3]

T, °K	Давление, *атм*			T, °K	Давление, *атм*		
	1	10	100		1	10	100
110	0,2442	0,3298	—	500	0,2461	0,2472	0,2565
130	0,2424	0,2800	—	700	0,25696	0,2575	0,2619
150	0,2415	0,2637	—	1000	0,2730	0,2732	0,2752
180	0,2408	0,2533	0,580	1500	0,2942	0,2943	0,2951
200	0,2404	0,2492	0,4170	2000	0,3198	0,3165	0,3159
250	0,2403	0,2455	0,3062	2400	0,3762	0,3448	0,3352
300	0,2405	0,2439	0,2776	2800	0,5399	0,4068	0,3634
400	0,2424	0,2441	0,2599	3000	0,6833	0,4613	0,3843

Таблица 10.10

Отношение теплоемкостей $\varkappa = C_P/C_V$ некоторых газов

T, °K	Давление, *атм* 1	10	100
	Азот, N_2 [20]		
100	1,424	—	—
140	1,410	1,526	—
180	1,406	1,462	—
220	1,403	1,437	1,85
260	1,402	1,424	1,65
300	1,401	1,417	1,566
350	1,400	1,411	1,512
400	1,398	1,406	1,480
450	1,396	1,401	1,455
500	1,391	1,396	1,437
600	1,382	1,385	1,410
700	1,371	1,373	1,390
800	1,360	1,361	1,372
900	1,350	1,351	1,359
1000	1,341	1,342	1,347
1200	1,327	1,327	1,331
1500	1,317	1,317	1,319
	Аммиак, NH_3 [22]		
320	1,308	1,410	—
340	1,298	1,356	—
360	1,304	1,343	—
400	1,277	1,315	—
460	1,260	1,279	1,668
520	1,232	1,258	1,447
580	1,230	1,243	1,333
	Аргон, Ar [3, 20]		
100	1,627	—	—
120	1,678	—	—
140	1,675	—	—
160	1,674	1,803	—
180	1,675	1,759	—
200	1,674	1,740	3,021
240	1,673	1,711	2,328
260	1,671	1,709	2,17
280	1,670	—	—
300	1,670	1,697	1,96
320	1,669	1,697	—
360	1,669	1,679	—
400	1,668	1,682	1,80
450	1,668	1,679	1,780
500	1,668	1,676	1,753
550	1,667	1,669	—
600	1,667	1,673	1,721
	Ацетилен, C_2H_2 [19]		
160	1,354	—	—
180	1,333	—	—
200	1,313	—	—
240	1,407	1,479	—
260	1,261	1,392	—
280	1,247	1,339	—
290	1,240	1,318	—
300	1,233	1,299	—
310	1,223	1,288	—
320	1,221	1,273	—

Продолжение табл. 10.10

T, °K	Давление, *атм* 1	10	100
	Водород, H_2 [20]		
30	1,736	—	—
50	1,684	1,913	—
70	1,655	1,738	2,256
90	1,611	1,655	1,945
110	1,563	1,586	1,768
130	1,521	1,536	1,654
150	1,488	1,500	1,579
180	1,455	1,461	1,507
210	1,433	1,437	1,468
240	1,419	1,422	1,442
270	1,410	1,413	1,427
300	1,405	1,406	1,417
340	1,401	1,401	1,409
380	1,399	1,399	1,404
420	1,398	1,398	1,402
460	1,397	1,398	1,400
500	1,397	1,397	1,398
550	1,396	1,397	1,397
600	1,396	1,396	1,396
	Воздух [20]		
120	1,4166	1,6395	—
140	1,4119	1,5350	—
160	1,4089	1,4896	—
180	1,4071	1,4648	—
200	1,4057	1,4489	2,1376
240	1,4040	1,4313	1,7439
280	1,4024	1,4214	1,6094
300	1,4017	1,4177	1,5711
320	1,4008	1,4146	1,5425
360	1,3987	1,4091	1,5024
400	1,3961	1,4041	1,4752
450	1,3920	1,3979	1,4498
500	1,3871	1,3918	1,4321
550	1,3818	1,3854	1,4170
600	1,3760	1,3788	1,4041
650	1,3702	1,3726	1,3931
700	1,3646	1,3664	1,3832
800	1,354	1,355	1,3665
900	1,345	1,345	1,3533
1000	1,336	1,336	1,3423
1200	1,322	1,322	1,3257
1500	1,304	1,304	1,3056
	Кислород, O_2 [3, 20]		
220	1,403	1,441	2,120
260	1,400	1,425	1,721
300	1,396	1,414	1,599
350	1,391	1,403	1,526
400	1,382	1,391	1,478
450	1,374	1,381	1,445
500	1,366	1,371	1,420
600	1,350	1,353	1,383
700	1,337	1,339	1,353
	Пропан, C_3H_8 [19]		
240	1,80	—	—
260	1,125	—	—
280	1,106	—	—
300	1,143	—	—
340	1,111	1,169	—
360	1,109	1,147	—

Продолжение табл. 10.10

T, °K	Давление, *атм*		
	1	10	100
400	1,097	1,124	—
440	1,088	1,112	1,519
480	1,065	1,099	1,421
520	1,076	1,091	1,271
560	1,069	1,090	1,189
600	1,069	1,074	1,150
	Углерода двуокись, CO_2 [20]		
220	1,349	—	—
250	1,324	1,416	—
300	1,293	1,352	—
350	1,271	1,305	2,40
400	1,254	1,276	1,630
450	1,241	1,256	1,463
500	1,230	1,241	1,387
600	1,214	1,220	1,291
700	1,202	1,206	1,247
800	1,193	1,196	1,222
900	1,186	1,188	1,206
1000	1,181	1,183	1,196
1200	1,173	1,174	1,183
1500	1,166	1,167	1,172
	Углерода окись, CO [3]		
280	1,402	1,424	1,698
300	1,401	1,420	1,633
350	1,399	1,414	1,542
400	1,396	1,406	1,494
450	1,392	1,400	1,463
500	1,387	1,393	1,441
600	1,376	1,381	1,409
700	1,364	1,366	1,386
800	1,352	1,354	1,368

10.6. РАСТВОРЫ И ЖИДКИЕ СМЕСИ

Теплоемкость соединенй неиндивидуального состава (смесей, растворов, сплавов и т. п.) приближенно удовлетворяет правилу смешения:

$$C_{\text{смеси}} = \sum_k z_k C_k,$$

где z_k — атомная (мольная, массовая, объемная) доля k-компоненты смеси; C_k — атомная (мольная, удельная или объемная соответственно) теплоемкость этой компоненты.

Для твердых тел правило смешения выполняется и для простой смеси, и для интерметаллического соединения. Отклонения от правила смешения наблюдаются, когда при нагревании происходит изменение состава или структуры вещества, а также в водных растворах электролитов. Плохо выполняется правило смешения для смесей газов при больших давлениях; обычно теплоемкость, рассчитанная по правилу смешения, меньше экспериментальной.

Таблица 10.11

Теплоемкость C_P, *кал/(г·град)*, жидких смесей и растворов при давлении 760 *мм рт. ст.* [23]

t, °C	C_P	t, °C	C_P
Дифенильная смесь*		$H_2O + 6\%$ Na_2SO_4	
20	0,38		
40	0,40	15	0,867
60	0,41	20	0,867
80	0,43	40	0,869
100	0,45	60	0,885
140	0,49	70	0,900
180	0,54	80	0,929
220	0,58	90	1,002
260	0,63	92	1,022
300	0,66	94	1,06
350	0,69		
400	0,72	$H_2O + 9\%$ Na_2SO_4	
$H_2O + 6\%$ NaCl			
		15	0,846
15	0,954	20	0,847
20	0,951	40	0,852
60	0,929	60	0,861
100	0,907	70	0,873
$H_2O + 10\%$ NaCl		80	0,901
		90	0,956
15	0,922	92	0,972
20	0,920	94	0,990
60	0,898	96	1,01
100	0,872		
$H_2O + 15\%$ NaCl		$H_2O + 10\%$ KI_2	
		15	0,846
15	0,842	20	0,849
20	0,841	60	0,869
60	0,830	100	0,897
100	0,793		
		$H_2O + 20\%$ KI_2	
$H_2O + 24{,}26\%$ NaCl			
		15	0,757
15	0,783	20	0,759
20	0,783	60	0,775
60	0,775	100	0,797
100	0,759		
		$H_2O + 30\%$ KI_2	
$H_2O + 1{,}5\%$ Na_2SO_4			
		15	0,644
15	0,911	20	0,646
20	0,912	60	0,666
40	0,921	100	0,686
60	0,959		
70	1,001	$H_2O + 6{,}5\%$ C_2H_6O	
80	1,07		
90	1,167	23	1,030
92	1,185	41	1,032
$H_2O + 3\%$ Na_2SO_4		$H_2O + 37\%$ C_2H_6O	
15	0,886	23	0,858
20	0,886	41	0,874
40	0,892		
60	0,909	$H_2O + 78\%$ C_2H_6O	
70	0,941		
80	0,998	23	0,660
90	1,077	41	0,684

* Даутерм: 73,5% дифенилового эфира + 26,5% дифенила.

Таблица 10.12

Теплоемкость сталей при давлении 760 *мм рт. ст.*

Марка стали	*t*, °C	C_P, *кал/(г·град)*	Литература
Углеродистые стали			
08	900	0,156	[24]
	1300	0,159	[24]
Ст. 15	0÷100	0,112	[25]
	300	0,132	[24]
	500	0,163	[24]
	705	0,316	[24]
	800	0,161	[24]
	1000	0,153	[24]
Ст. 20	100	0,110	[24]
	300	0,125	[24]
	650	0,195	[24]
Ст. 25	0÷100	0,112	[25]
	0÷400	0,125	[25]
	550	0,154	[24]
	900	0,155	[24]
	1100	0,156	[24]
	1300	0,166	[24]
Ст. 10; 30; 35	0÷100	0,112	[25]
	0÷600	0,136	[25]
Ст. 40	100	0,112	[25]
	600	0,137	[25]
	1100	0,152	[24]
	1300	0,166	[24]
Ст. 45	0÷100	0,112	[25]
	0÷400	0,125	[25]
	0÷600	0,137	[25]
	900	0,150	[24]
	1100	0,152	[24]
	1300	0,164	[24]
Ст. 50	100	0,134	[24]
	400	0,153	[24]
	600	0,268	[24]
	640	0,828	[24]
	700	0,160	[24]
	800	0,153	[24]
	900	0,150	[24]
Легированные стали			
1X13	20	0,11	[26]
2X13	200	0,12	[25]
3X13	200	0,117	[25]
	500	0,135	[25]
X17, X28	20	0,11	[26]
X9C2	20	0,111	[27]
	600	0,218	[27]
	900	0,235	[27]
12XC	0÷100	0,115	[25]
10XC2M	200	0,114	[25]
X18H9	20	0,12	[26]
2X18H9	100	0,112	[26]
	600	0,174	[27]
	900	0,24	[27]
0X18H10	20	0,12	[26]
12XH2	60	0,108	[28]
X23H13	20	0,121	[28]

Марка стали	*t*, °C	C_P, *кал/(г·град)*	Литература
X23H18	20	0,12	[26]
X25T	20	0,11	[26]
12XM	20	0,115	[25]
15XMA	0÷100	0,116	[25]
20XM, 20XMA	20÷100	0,113	[25]
	20÷600	0,139	[25]
30XM	20	0,11	[25]
1X18H9T	20	0,12	[28]
X18H10T	20	0,12	[26]
X18H25C2	20	0,123	[25]
X20H14C2	20	0,12	[26]
X20H20C2	20	0,14	[26]
12XH3A	380	0,157	[28]
	425	0,154	[28]
30XH3A	34	0,111	[28]
	512	0,154	[28]
33H3MA	20	0,11	[25]
25X2MФA	20	0,11	[25]
1X14H14B2M	20	0,128	[25]
4X14H14B2M	20	0,124	[25]

Таблица 10.13

Теплоемкость двухкомпонентных сплавов, не содержащих железа [29]

Состав	*t*, °C	C_P, *дж/(г·град)*
67% Al; 33% Cu	—150	0,415
	—100	0,499
	0	0,605
50% Al; 50% Cu	—150	0,35
	—100	0,42
	0	0,51
33% Al; 67% Cu	100	0,46
	500	0,53
25% Al; 75% Cu	—150	0,31
	—100	0,36
	0	0,43
92% Al; 8% Mg	20	1,15
32% Al; 68%V	15÷100	0,655
60% Al; 40% Zn	20÷100	0,565
80% Au; 20% Cu	—136	0,164
	—39	0,180
	12	0,183
x% Bi; (100—x)% Cd	17÷100	$0{,}2294+0{,}001636x$
x% Bi; (100 — x)% Pb ($x < 50\%$)	0÷100	$0{,}1298+0{,}000113x$
x% Bi; (100 — x)% Pb ($50\% < x < 96\%$)	0÷100	$0{,}1471-0{,}000217x$
99% Bi; 1% Sn	0÷100	0,1266
97% Bi; 3% Sn	0÷100	0,1315
94% Bi; 6% Sn	0÷100	0,1340
50% Bi; 50% Sn	0÷100	0,1818
25% Bi; 75% Sn	0÷100	0,2088
7% Bi; 93% Sn	0÷100	0,2236
3% Bi; 97% Sn	0÷100	0,2266
32% Cd; 68% Sn	—77÷20	0,232
	20÷100	0,234

Продолжение табл. 10.13

Состав	t, °C	C_P, дж/(г·град)
67% Cu; 33% Mg	—150	0,30
	0	0,40
	200	0,51
	400	0,57
33% Cu; 67% Mg	—150	0,44
	—100	0,51
	0	0,61
90% Cu; 10% Mn	—136	0,323
	—39	0,376
	12	0,396
68% Cu; 32% Mn	—136	0,346
	—39	0,400
	12	0,414
95% Cu; 5% Ni	—136	0,306
	—39	0,358
	12	0,379
90% Cu; 10% Ni	—136	0,307
	—39	0,366
	12	0,380
40% Cu; 60% Ni (константан)	0	0,410
	100	0,427
x% Cu; $(100-x)$% Ni (бронзы, $10\% < x < 90\%$)	18÷100	$0{,}2273+0{,}00155x$
$(100-x)$% Cu; x% Zn (латунн, $10\% < x < 90\%$)	18÷100	0,387
10% Ir; 90% Pt	20÷100	0,1352
95% Mn; 5% Ni	—136	0,387
	—39	0,435
	12	0,445
90% Mn; 10% Ni	—136	0,386
	—39	0,435
	12	0,459
55% Mn; 45% Ni	—136	0,386
	—39	0,448
	12	0,464
x% Pb; $(100-x)$% Sb ($5\% < x < 96\%$)	20÷100	$0{,}1301+0{,}0008x$
		0,1507
64% Pb; 36% Sn	—179÷—79	
	—79÷18	0,1628
	12÷99	0,1705
36% Pb; 64% Tl	0÷25	0,1281
x% Sn; $(100-x)$% Zn	16÷100	$0{,}2294+0{,}001636x$

Таблица 10.14

Теплоемкость многокомпонентных специальных сплавов

Сплав (состав)	t, °C	C_P, кал/(г××град)	Литература
Алюмель	0	0,125	[30]
Белл-металл	15÷98	0,0858	[30]
Вуда сплав	5÷150	0,0352	[31]
	100÷150	0,0426	[31]
Инвар	—	0,12	[30]
Липовица сплав	5÷50	0,0345	[31]
	100÷150	0,0426	[31]
Манганин (84% Cu; 12% Mn;	18	0,0973	[30]
4% Ni)	100	0,1004	[30]
Монель	20÷1300	0,127	[30]
Розе сплав	—77÷20	0,0356	[31]
	20÷89	0,0552	[31]
Фосфористая бронза	—188÷18	0,081	[31]
	20÷100	0,0876	[31]
Хромель	—	0,107	[30]
(56% Na; 44% K)	200	0,269	[25]
	300	0,261	[25]
	400	0,255	[25]
	800	0,250	[25]
(22% Na; 78% K)	100	0,225	[25]
	600	0,209	[25]
	800	0,213	[25]
(44,5% Pb; 55,5% Bi)	0	0,03	[25]
	100	0,035	[25]
	150	0,035	[25]
(48% Bi; 26% Pb; 13% Sn; 13% Cd)	0	0,031	[25]
(50% Bi; 31% Pb 19% Sn)	0	0,033	[25]
(29,9% Bi; 17,5% Sb; 18,7% Zn; 33,9% Sn)	20÷99	0,0566	[30]
42% Ni; 57% Fe; 1% Mn)	—	0,12	[30]

Таблица 10.15

Теплоемкость технических материалов (неметаллов)

Наименование	t, °С	c_p, кал/(г·град)	Литература
Топлива и масла			
Бензин (Б-70)	20	0,492	[23]
	100	0,587	[23]
	200	0,727	[23]
Бензин, пары	150	0,558	[23]
	250	0,617	[23]
Глицерин технический	15÷50	0,576	[30]
Керосин (Т-1)	20	0,478	[23]
	100	0,568	[23]
	250	0,755	[23]
Керосин, пары	200	0,591	[23]
Масло техническое АМГ-10	20	0,44	[23]
Масло техническое МС-20	20	0,488	[23]
	150	0,584	[23]
Масла растительные	20	0,39÷0,47	[30]
Нефть	20÷60	0,51	[30]
Пластические вещества			
Акриловые пластмассы	—	0,35	[30]
Асфальт	20	0,40	[32]
Винипласт	20	0,24	[24]
Капрон	20	0,55	[24]
Нейлон	20	0,4	[30]
Оргстекло	20	0,34÷0,37	[24]
Парафин	—20÷3	0,377	[30]
Парафин жидкий	60	0,712	[30]
Полистиреновые пластмассы	20	0,32	[24]
Полиэтилен	—173	0,15	[24]
	20	0,60	[16]
Полиэфирные пластмассы	20	0,26÷0,55	[24]
Фторопласт-3	20	0,22	[24]
Фторопласт-4 (тефлон)	—253	0,0183	[33]
	—223	0,0491	[33]
	—196	0,0739	[33]
	—173	0,0931	[33]
	—123	0,1320	[33]
	—73	0,1660	[33]
	7	0,2480	[33]
Этролы целлюлозные	—	0,37	[30]
Каучук, резина			
Каучук вулканизированный	20	0,4	[30]
Резина вулканизированная	20	0,51	[24]
Резина невулканизированная	20	0,45	[30]
Эбонит	20	0,341	[24]
Стекла			
Кварцевое	20	0,213	[24]
	200	0,213	[24]
	400	0,230	[24]
	600	0,240	[24]
	1000	0,260	[24]
	1200	0,273	[24]

Наименование	t, °С	c_p, кал/(г·град)	Литература
Крон	10÷15	0,161	[30]
Натриевое	20÷100	0,1924	[34]
	20÷300	0,2351	[34]
	20÷500	0,2516	[34]
	20÷700	0,2619	[34]
	20÷1000	0,2690	[34]
Оконное	0÷100	0,16	[28]
Пирекс	—100÷0	0,1445	[32]
	20÷100	0,1695	[34]
	0÷300	0,2053	[32]
	0÷500	0,2270	[32]
	40÷800	0,271	[34]
	40÷1000	0,287	[34]
Термометрическое 16'''	19÷100	0,1988	[30]
Флинт	10÷50	0,117	[30]
Стекла из природных силикатов			
Анорит ($CaO \cdot Al_2O_3 \cdot 2SiO_2$)	0÷100	0,1881	[29]
	0÷500	0,2306	[29]
	0÷700	0,2406	[29]
Альбит ($Na_2O \cdot Al_2O_3 \cdot 6SiO_2$)	0÷100	0,1977	[29]
	0÷500	0,2410	[29]
	0÷900	0,2640	[29]
Микроклин ($K_2O \cdot Al_2O_3 \cdot 6SiO_2$)	0÷100	0,1919	[29]
	0÷500	0,2321	[29]
	0÷1100	0,2598	[29]
Волластонит ($CaO \cdot SiO_2$)	0÷100	0,1852	[29]
	0÷700	0,2355	[29]
Диопсид ($CaO \cdot MgO \cdot 2SiO_2$)	0÷100	0,1938	[29]
	0÷700	0,2439	[29]
Природные вещества, минералы			
Андалузит	0÷100	0,168	[30]
Апатит	15÷99	0,190	[30]
Асбест	20÷98	0,195	[30]
Аугит	20÷98	0,193	[30]
Берилл	50	0,201	[30]
Боракс	35	0,161	[30]
Базальт	0	0,204	[30]
	400	0,273	[30]
	1200	0,357	[30]
Гипс	—200	0,077	[30]
	0	0,246	[30]
Гранит	0	0,156	[30]
	400	0,256	[30]
	800	0,311	[30]
Гнейс	0	0,177	[30]
	200	0,242	[30]
Графит	—	0,2	[32]
Доломит	20÷98	0,222	[30]
Каолин	0	0,237	[30]
	400	0,323	[30]
Лава вулканическая	23÷100	0,20	[30]
	31÷776	0,26	[30]
Малахит	15÷99	0,176	[30]
Слюда	20	0,21	[28]
Тальк	59	0,208	[30]
Уголь каменный	20÷1040	0,3145	[30]
Шпиннель	9÷98	0,193	[30]
Шеелит	50	0,096	[30]
Строительные материалы			
Бетон	0	0,20	[32]

Наименование	t, °C	C_P, кал/(г·град)	Литература
Бумага, картон	—	0,36	[32]
Войлок	—	0,45	[28]
Глина	0	0,179	[30]
	400	0,270	[30]
	800	0,361	[30]
Дерево	20	~0,3	[30]
Известняк	0÷100	0,22	[34]
Кирпич красный	0÷100	0,21	[32]
» силикатный	20	0,20	[32]
Камень строительный	—	0,22	[34]
Мел	20	0,21	[28]
Мрамор	20	0,22	[32]
Песок речной	0÷100	0,19	[32]
Пробка	0÷100	0,42	[32]
Пеностекло	—	~0,18	[24]
Текстолит	20	~0,35	[24]
Фанера	0	0,60	[32]
Фибролит	—	0,55	[28]
Шлаки	—	~0,18	[28]
Огнеупоры			
Алундум	100	0,186	[29]
Глинозем	100	0,200	[29]
	500	0,239	[29]
	1000	0,261	[29]
	1500	0,275	[29]
Кирпич:			
динасовый	100	0,201	[29]
	1000	0,263	[29]
	1500	0,297	[29]
карборундовый	100	0,201	[29]
	1000	0,186	[29]
магнезитовый	100	0,222	[29]
	1000	0,277	[29]
	1500	0,296	[29]
хромитовый	100	0,170	[29]
	1000	0,220	[29]
шамотный	100	0,199	[29]
	1000	0,259	[29]
	1500	0,299	[29]
Фарфор технический	95	0,26	[32]
	15÷107	0,254	[29]
Уголь электродный	26÷76	0,168	[29]
	26÷538	0,199	[29]
	56÷1450	0,387	[29]
Керамика высокотемпературная			
Al_2O_3	100	0,206	[35]
	1700	0,280	[36]
	1800	0,299	[36]
AlN	20	0,189	[37]
B_4C	20	0,224	[37]
Be_3N_2	20	0,302	[37]
BeO	20	0,239	[36]
	100	0,299	[35]
	400	0,420	[38]
	800	0,492	[38]
	1000	0,498	[38]
	1200	0,530	[38]
α-CaC_2	20	0,229	[37]
HfO_2	100	0,178	[36]
LaB_6	20	0,136	[37]
MgO	100	0,233	[35]

Продолжение табл. 10.15

Наименование	t, °C	C_P, кал/(г·град)	Литература
$MoSi_2$	20	0,092	[37]
NbC	20	0,085	[37]
TaC	20	0,045	[37]
TaN	20	0,049	[37]
TiB	20	0,179	[37]
TiC	20	0,134	[37]
TiN	20	0,170	[37]
TiO_2	20	0,194	[36]
ThO_2	0÷100	0,056	[36]
UO_2	0÷200	0,056	[35]
VC	20	0,131	[37]
VN	20	0,139	[37]
WC	20	0,043	[37]
ZrO_2	20	0,120	[37]
	1000	0,16	[32]
	1400	0,176	[36]
ZrC	20	0,142	[37]

10.9. ТЕПЛОЕМКОСТЬ ПРИ ФАЗОВЫХ ПЕРЕХОДАХ

При фазовом переходе I рода теплоемкость изменяется скачком, что связано с зародышевым характером процесса образования новой фазы. При этом скачок конечен, но в эксперименте он обычно маскируется более или менее острым пиком, площадь которого равна скрытой теплоте перехода.

При фазовом переходе II рода теплоемкость имеет характерный λ-образный вид, являющийся аномалией собственно теплоемкости, так как теплота фазового перехода II рода равна нулю. Температурный интервал, в котором проявляется λ-особенность теплоемкости, может быть очень узким (например, при переходе в сверхпроводящее состояние этот интервал равен примерно 10^{-12} *град*), и экспериментальные зависимости имеют иногда вид, сходный с аналогичными зависимостями для фазовых переходов I рода. Поведение теплоемкости вблизи фазовых переходов II рода показано на рис. 10.1—10.20.

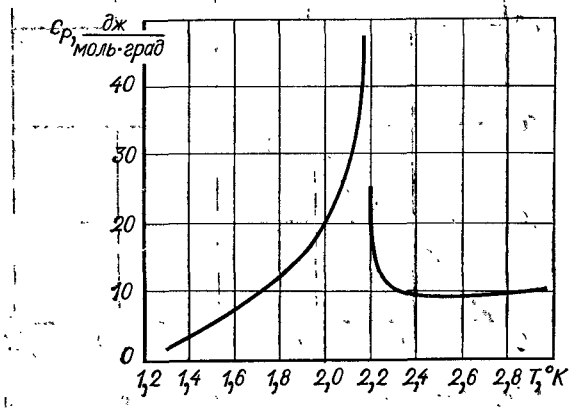


Рис. 10.1. Температурная зависимость теплоемкости ^{4}He вблизи перехода в сверхтекучее состояние [3].

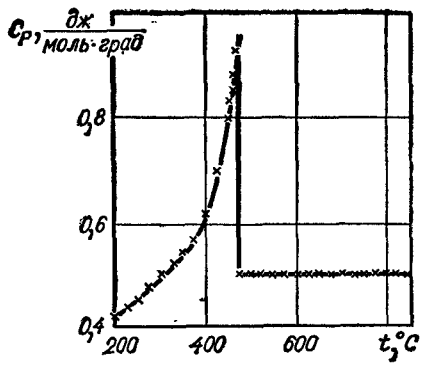


Рис. 10.2. Температурная зависимость теплоемкости β-латуии вблнзи точки упорядочения [3].

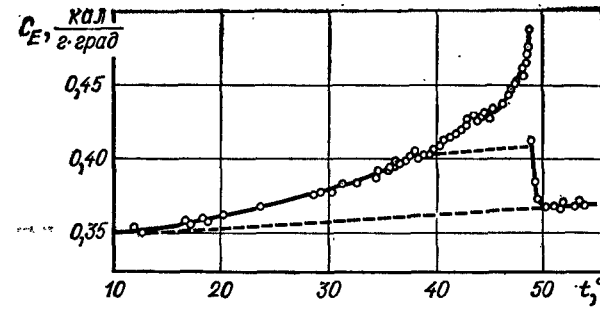


Рис. 10.5. Температурная зависимость теплоемкости C_E короткозамкнутого кристалла триглицинсульфата $(NH_2CH_2COOH)_3 \cdot H_2SO_4$ вблизи сегнетоэлектрического перехода [40].

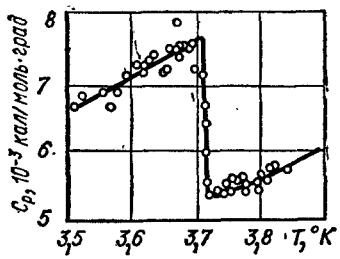


Рис. 10.3. Температуриая зависимость теплоемкости Sn вблизи перехода в сверхпроводящее состояние [39].

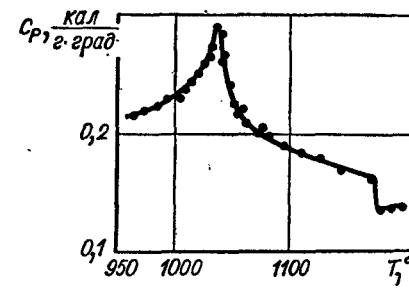


Рис. 10.6. Температуриая зависимость теплоемкости Fe вблнзи ферромагнитного перехода [41].

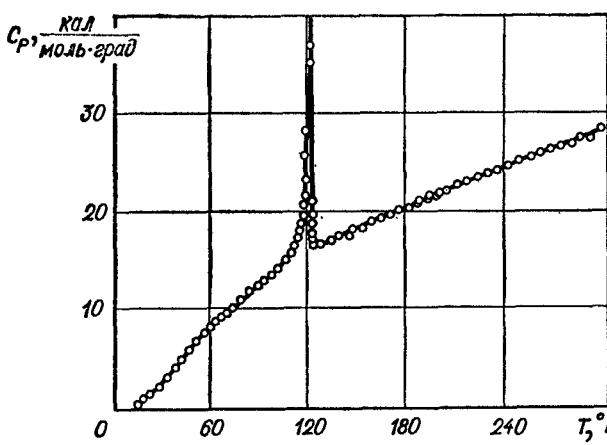


Рис. 10.4. Температурная зависимость теплоемкости KH_2PO_4 вблизи сегнетоэлектрического перехода [31].

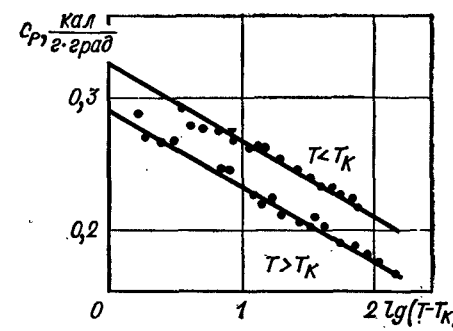


Рис. 10.7. Температуриая зависимость теплоемкости Fe вблизи ферромагнитного перехода (в логарифмической шкале). T_K — температура перехода (точка Кюри) [41].

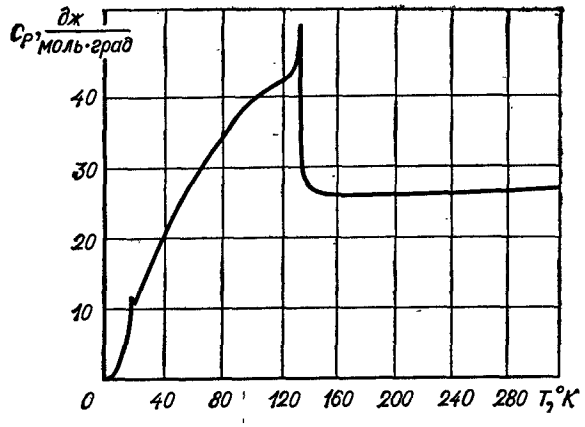


Рис. 10.8. Температурная зависнмость теплоемкости Но вблизи антиферромагнитного перехода [3].

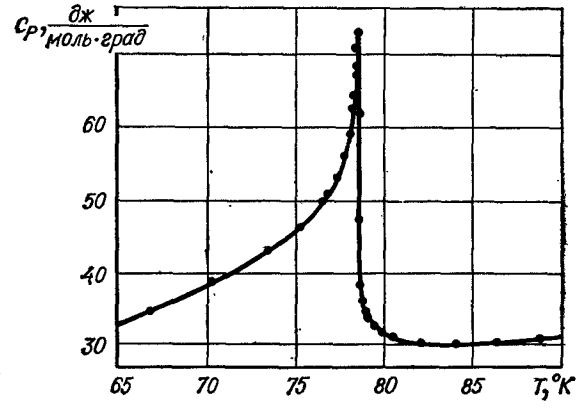


Рис. 10.9. Температурная зависнмость теплоемкости FeF_2 вблизи антиферромагнитного перехода [3].

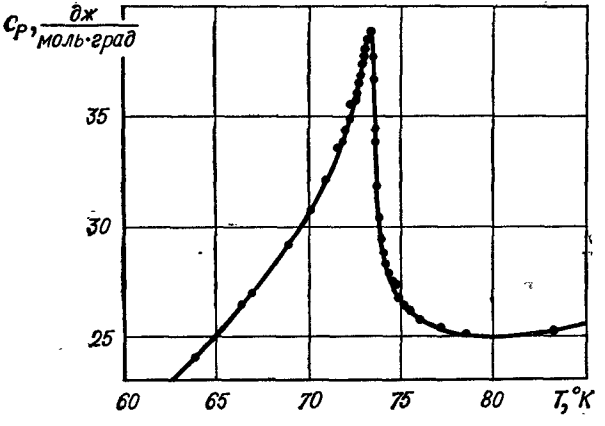


Рис. 10.10. Температурная зависимость теплоемкости NiF_2 вблнзи антиферромагнитного перехода [3].

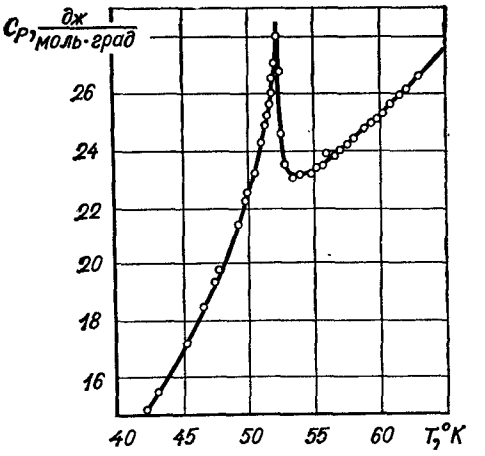


Рис. 10.11. Температурная зависимость теплоемкостн $NiCl_2$ вблизи антиферромагнитного перехода [3].

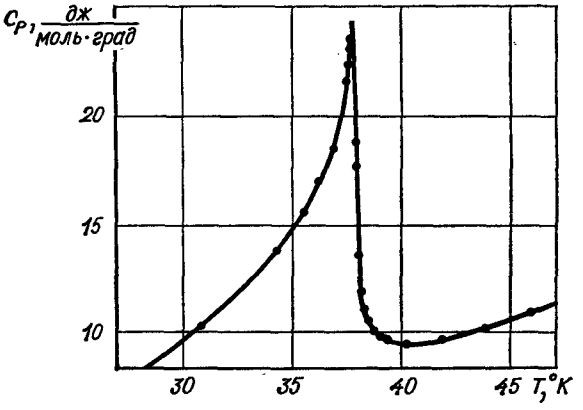


Рис. 10.12. Температурная зависимость теплоемкости CoF_2 вблизи антиферромагнитного перехода [3].

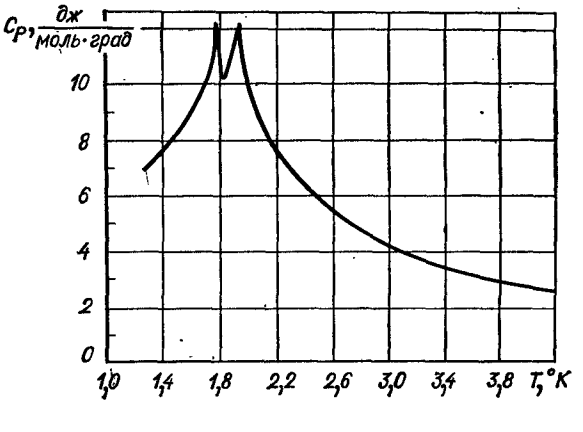


Рис. 10.13. Температурная зависимость теплоемкости $MnCl_2$ вблизи антиферромагнитных переходов II рода [3].

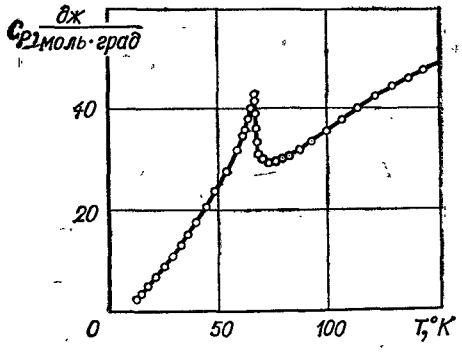


Рис. 10.14. Температурная зависимость теплоемкости MnF_2 вблизи антиферромагнитного перехода [3].

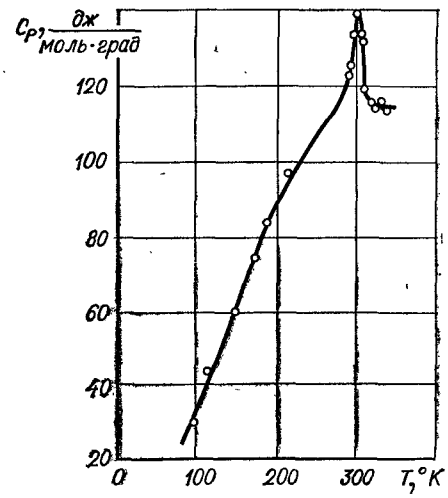


Рис. 10.15. Температурная зависимость теплоемкости Cr_2O_3 вблизи антиферромагнитного перехода [3].

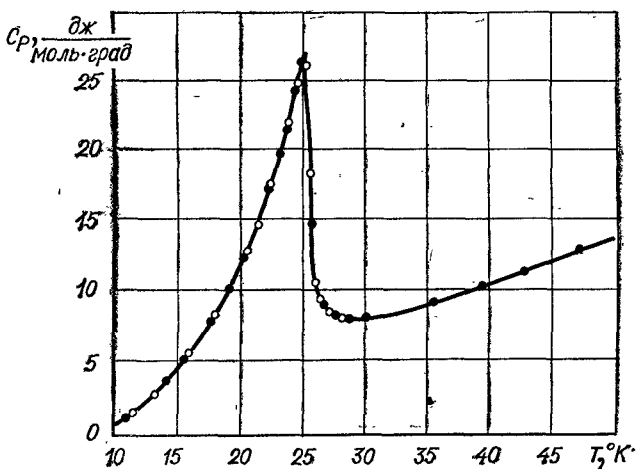


Рис. 10.16. Температурная зависимость теплоемкости NpO_2 вблизи антиферромагнитного перехода [3].

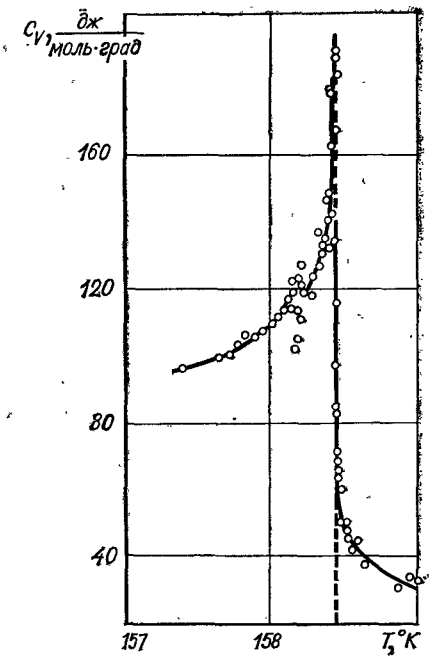


Рис. 10.17. Температурная зависимость теплоемкости O_2 вблизи критической точки парообразования [42].

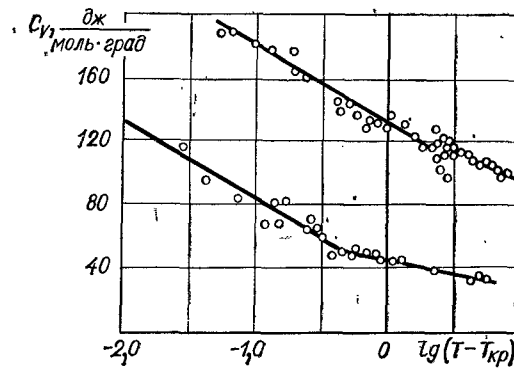


Рис. 10.18. Температурная зависимость теплоемкости O_2 вблизи критической точки парообразования (в логарифмической шкале) [42].

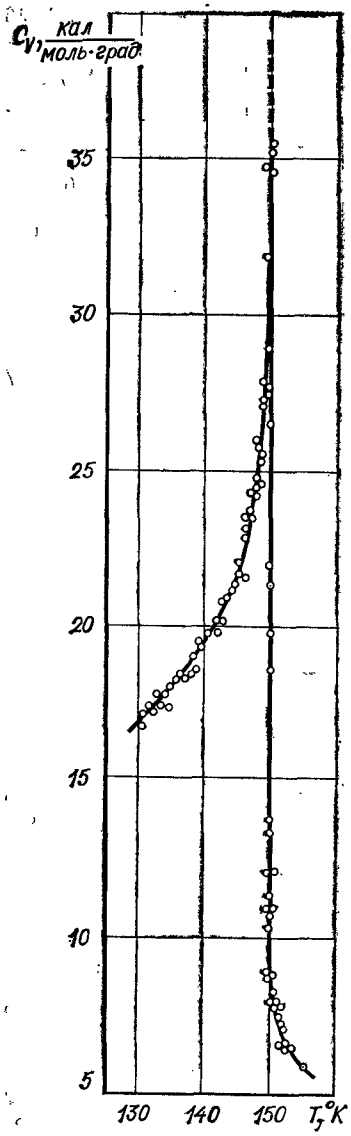


Рис. 10.19. Температурная зависимость теплоемкости Ar вблизи критической точки парообразования вдоль изохоры $\rho = 0{,}521$ г/см³ [43].

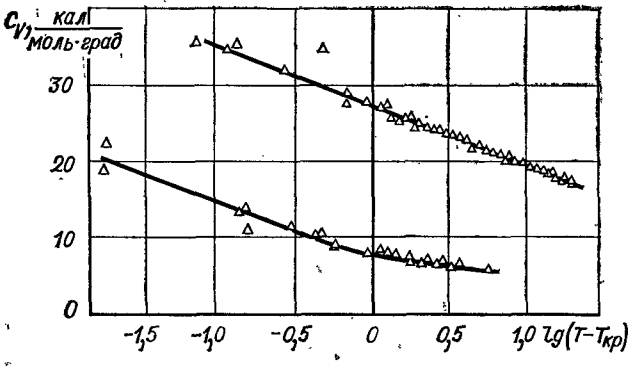


Рис. 10.20. Температурная зависимость теплоемкости Ar вблизи критической точки парообразования (в логарифмической шкале). $T_{кр}$ — критическая температура ($T_{кр} = 150{,}5°$ K) [43]

Таблица 10.16

Скачок теплоемкости ΔC_P элементов и неорганических соединений при фазовом переходе I рода [3, 4]

Обозначения: ΔC_P — разность теплоемкостей C_P вещества в конечной и начальной фазах перехода; T — температура перехода; Пл — плавление; Исп — испарение; Тв — фазовый переход в твердом теле (изменение структуры). Давление 760 *мм рт. ст.*

Вещество	Переход	T, °K	ΔC_P, кал/моль·град
Элементы			
Ag	Пл	1234,0	0,7
Ar	Пл	83,85	2,16
	Исп	87,89	—5,08
Au	Пл	1336,16	—0,53
	Исп	2933	—2,0
Br_2	Пл	265,9	2,0
Ca	Тв	723	—0,5
Cl_2	Пл	172,16	2,75
	Исп	239,10	—8,76
Cu	Пл	1356,2	0,5
F_2	Пл	52,20	1,86
	Исп	85,24	—4,27
Fe	Тв	1180	1,40
	Тв	1673	1
	Пл	1808	—2,8
Ga	Пл	309,94	0,38
H_2	Пл	13,96	1,9
D_2	Пл	18,72	2,2
Kr	Пл	115,95	2,01
	Исп	119,93	—5,67
Na	Пл	371	0,51
Ne	Пл	24,55	2,42
	Исп	27,07	—3,42
Ni	Тв	626	—0,71
	Пл	1728	0,0
O_2	Тв	23,66	0,3
	Тв	43,77	—0,14
	Пл	54,40	1,74
	Исп	90,19	—6,00
S	Тв	368,6	0,24
	Пл	392	1,6
Se	Тв	398	2,2
	Тв	423	0,2
	Пл	490,6	2,7
Te	Пл	723	2,0
Tl	Тв	508,3	0,18
	Пл	576,8	0,43
Неорганические соединения			
AgBr	Пл	703	—3,6
AgCl	Пл	728	—2,31
$AgNO_3$	Тв	433	—0,06
	Пл	483	4,5
Ag_2S	Тв	452	1,2
Ag_2Se	Тв	406	0,2
AsF_3	Пл	267,21	7,3
AuCd	Пл	900	—1,8
$AuSb_2$	Тв	628	2,46
AuSn	Пл	691	—0,2
AuZn	Пл	1033	—2,6
$BaCO_3$	Тв	1083	7,93
C_2N_2	Пл	245,32	5,29
CO	Тв	61,53	—3,2
	Исп	68,10	1,9

Продолжение табл. 10.16

Вещество	Переход	T, °K	ΔC_P, кал/моль·град
COS	Пл	134,34	5,6
CaC_2	Тв	720	—1,20
$CaTiO_3$	Тв	1530	—0,23
Cu_2S	Тв	376	0,2
Cu_2Se	Тв	383	0,5
$FeCl_2$	Пл	950	3,63
FeS	Тв	411	—4,89
GeH_4	Пл	107,26	2,0
HBr	Пл	186,28	1,64
	Исп	206,43	—7,37
HCN	Пл	259,92	1,7
HCl	Тв	98,38	1,15
	Пл	158,94	2,10
	Исп	188,11	—7,14
HF	Пл	190,09	2,55
	Исп	231,1	—10,9
HI	Пл	222,36	1,1
	Исп	237,80	—7,14
HNO_3	Пл	231,56	10,55
$HNO_3 \cdot H_2O$	Пл	235,53	22,51
H_2O	Пл	273,15	8,911
	Исп	373,15	—10,021
D_2O	Пл	276,98	9,48
H_2S	Тв	103,54	1,20
	Тв	126,24	—0,65
	Пл	187,63	1,59
	Исп	212,82	—8,34
H_2S_2	Пл	183,4	12,9
H_2SO_4	Пл	283,51	6,218
$H_2SO_4 \cdot H_2O$	Пл	281,69	25,04
H_2Se	Тв	82,3	1,5
	Тв	172,54	—1,9
	Пл	207,43	1,95
KCl	Пл	1045	0,61
KF	Пл	1129	1,5
KNO_3	Тв	400,9	2,9
	Пл	610	0,7
K_2SO_4	Тв	856	—4,79
	Пл	1324	—6,49
$LiNO_3$	Пл	527	0,45
NF_3	Пл	66,36	0,647
NH_3	Пл	195,43	5,11
NO	Пл	109,1	6,0
	Исп	121,3	11,8
N_2O	Пл	182,3	4,67
N_2O_4	Пл	261,96	6,12
NaCl	Пл	1081	0,8
NaF	Пл	1268	0,65
$NaNO_3$	Пл	583	0,3
NaOH	Пл	593	1,2
Na_2TiO_3	Тв	5,60	—1,31
	Пл	1303	—1,2
SF_6	Тв	94,26	—1,98
	Пл	222,5*	—1,7
SO_2	Пл	197,68	4,50
	Исп	263,14	—11,84
SiH_4	Пл	88,5	1,3
SiO_2	Тв	846	—5,6
SnI_4	Пл	417,7	5,7
$TeCl_4$	Пл	497,3	21,9

Продолжение табл. 10.16

Вещество	Переход	T, °K	ΔC_P, кал/моль·град
V_2O_4	Тв	345	6,9
	Пл	1815	10,1
UF_6	Пл	337,2	8,81

* При давлении 1700 *мм рт. ст.*

Таблица 10.17

Скачок теплоемкости ΔC_P органических соединений при фазовом переходе I рода [3, 4]

Пояснения те же, что и к табл. 10.16.

Формула	Название	Переход	T, °K	ΔC_P, кал/(моль·град)
CH_3Cl	Хлорметан	Пл	175,44	1,5
CCl_4	Четыреххлористый углерод	Пл	250,3	1,1
$CFCl_3$	Фтортрихлорметан	Исп	296,8	—10,4
CH_4O	Метнловый спирт	Пл	175,26	4,2
CH_2O_2	Муравьиная кислота	Пл	281,46	8,8
C_2H_6	Этан	Пл	89,89	2,2
		Исп	184,53	—11,5
C_2H_5Cl	Хлорэтан	Пл	134,83	1,52
$C_2H_4Cl_2$	1,2-Днхлорэтан	Пл	237,5	5,9
C_2H_5Br	Бромэтан	Исп	311,5	—7
$C_2H_4Br_2$	1,2-Днбромэтаи	Тв	249,65	—11,1
		Пл	283,1	7,9
$C_2H_3F_2Cl$	1,1-Днфтор-1-хлор-этан	Пл	142,4	1,3
$C_2F_3Cl_3$	1,1,2-Трнфтор-1,2,2-трихлорэтан	Исп	320,4	—13,1
C_2F_6	Этан шестнфтористый	Тв	103,98	1,2
		Пл	173,10	1,78
C_2H_6O	Этиловый спирт	Пл	158,6	5,70
C_2H_6O	Днметиловый эфнр	Пл	131,66	6,8
		Исп	248,34	—10,6
C_2H_4O	Ацетальдегид	Исп	293,3	—9,3
C_2H_4O	Этилена окись	Пл	160,71	3,45
		Исп	283,72	—9,7
$C_2H_4O_2$	Уксусная кислота	Пл	289,77	9,4
C_2H_6S	Диметнлсульфнд	Пл	174,86	6,95

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Stull D. R., Sinke G. C.** Thermodynamic Properties of the Elements. Ser. 18, 1956.
2. **Kelley K. K.** Contribution to the Data on Theoretical Metallurgy. V. X, Washington, 1949.
3. **Landolt-Börnstein.** Zahlenwerte und Funktionen aus Physik, Chemie, Geophysik, Astronomie, Technik. Aufl. 6. Bd 2. Teil 4. Springer-Verlag, Berlin, 1961.
4. **Selected** Values of Chemical Thermodynamic Properties. Circular of NBS No. 500. Washington, 1952.

5. **Kubaschewski O., Evans E. L.** Metallurgical Termochemistry. London, 1951.
6. **Dworkin A. S., Sasmor D. J., van Artsdalen E. R.** J. Chem. Phys., 1954, v. 22, p. 837.
7. **Ицкевич Е. С., Стрелков П. Г.** «Ж. физ. химии», 1959, т. 33, с. 60.
8. **King E. G. J.** Amer. Chem. Soc., 1957, v. 79, p. 2399.
9. **Hu J.-H., Johnston H. L. J.** Amer. Chem. Soc., 1953, v. 75, p. 2471.
10. **Coughlin J. P., King E. C., Bonnickson K. B. J.** Amer. Chem. Soc., 1951, v. 73, p. 3891.
11. **Shomate C. H., Cohen J. J.** Amer. Chem. Soc., 1955, v. 77, p. 285.
12. **King E. G. J.** Amer. Chem. Soc., 1954, v. 76, p. 3289.
13. **Астров Д. Н., Ицкевич Е. С.** «Ж. физ. химии», 1955, т. 29, с. 424.
14. **Orr R. L., Christensen A. U. J.** Phys. Chem., 1958, v. 62, p. 124.
15. **Evans W. H., Munson Th. R., Wagman D. D. J.** Res. Nat. Bur. Stand., 1955, v. 55, p. 147.
16. **Справочник** по физико-техническим основам глубокого охлаждения. М., Госэнергоиздат, 1963. (Авт.: Малков М. П., Данилов И. Б., Зельдович А. Г., Фрадков А. Б.)
17. **Справочник** химика. Под ред. Б. П. Никольского. Т. 1, 2. М.—Л., «Химия», 1963.
18. **Gelles E., Pitzer K. S. J.** Amer. Chem. Soc., 1953, v. 75, p. 5259.
19. **Din F.** Thermodynamic Functions of Gases. V. 2. London, 1956.
20. **Tables** of Thermal Properties of Gases. Circular of NBS No. 564. Washington, 1955.
21. **Thermodynamic** and transport properties of gases, liquids and solids. Purdue Univ., 1959. (Авт.: Evans W. H., Prosen E. J., Wagman D. D. e.a.)
22. **Din F.** Thermodinamic Functions of Gases. V. 1. London, 1956.
23. **Варгафтик Н. Б.** Справочник по теплофизическим свойствам газов и жидкостей. М., Физматгиз, 1963.
24. **Справочник** по машиностроительным материалам. Т. 1—4. М., Машгиз, 1959—1960.
25. **Чиркин В. С.** Теплофизические свойства материалов. М., Физматгиз, 1959.
26. **Щедров К. П., Гакман Э. Л.** Жаропрочные материалы. М., Металлургиздат, 1956.
27. **Славин Д. О., Штейман Е. Б.** Металлы и сплавы в химическом машиностроении и аппаратостроении. М., Машгиз, 1951.
28. **Теплофизические** свойства веществ. Под ред. Н. Б. Варгафтика. М., Госэнергоиздат, 1956.
29. **Техническая** энциклопедия. Справочник. Т. VII. М., ОГИЗ, 1931.
30. **Smithsonian** Physical Tables. 9th ed. Washington, 1954.
31. **Иона Ф., Ширане Д.** Сегнетоэлектрические кристаллы. Пер. с англ. М., «Мир», 1965.
32. **Теплотехнический** справочник. Под ред. С. Г. Герасимова. Т. 1. М., Госэнергоиздат, 1957.
33. **Скотт Р. Б.** Техника низких температур. Пер. с англ. М., Изд-во иностр. лит., 1962.
34. **Чудновский А. Ф.** Теплофизические характеристики дисперсных материалов. М., Физматгиз, 1962.
35. **Черепанов А. М., Тресвятский С. Т.** Высокоогнеупорные материалы и изделия из окислов. М., Металлургиздат, 1964.
36. **Самсонов Г. В., Кислый П. С.** Высокотемпературные неметаллические термопары и наконечники. Киев, «Наукова думка», 1956.
37. **Самсонов Г. В.** Тугоплавкие соединения. М., Металлургиздат, 1963.
38. **Беляев Р. А.** Окись бериллия. М., Госатомиздат, 1962.
39. **Шенберт Д.** Сверхпроводимость. Пер. с англ. М., Изд-во иностр. лит., 1955.
40. **Смоленский Г. А., Крайник Н. Н.** Сегнетоэлектрики и антисегнетоэлектрики. М., «Наука», 1968.
41. **Крафтмахер Я. А., Ромашкина Т. Ю.** «Физика твердого тела», 1965, т. 7, с. 2533.
42. **Воронель А. В., Чашкин Ю. Р., Попов В. А., Симкин В. Г.** «Ж. эксперим. и теор. физ.», 1963, т. 45, с. 828.
43. **Багацкий М. И., Вороиель А. В., Гусак В. Г.** «Ж. эксперим. и теор. физ.», 1962, т. 43, с. 728.

ГЛАВА 11

ФАЗОВЫЕ ПЕРЕХОДЫ, ПЛАВЛЕНИЕ И КИПЕНИЕ

11.1. ТЕМПЕРАТУРА И СКРЫТАЯ ТЕПЛОТА ФАЗОВЫХ ПЕРЕХОДОВ

Термодинамическими фазами называются термодинамические состояния вещества, которые могут равновесно существовать, находясь в контакте друг с другом; переход вещества из одной фазы в другую называется *фазовым переходом*. В отсутствие внешних полей термодинамические фазы изотропны по всем свойствам, и для соприкасающихся фаз выполняются равенства химических потенциалов компонент, температур и давлений, которые называются *температурой и давлением фазового перехода*.

Различают фазовые переходы I и II рода.

Фазовые переходы I рода характеризуются непрерывностью термодинамического потенциала Ф и разрывом его первой производной в точке перехода. При фазовом переходе I рода происходит поглощение или выделение теплоты, измеряемое скачком энтальпии H и называемое *скрытой теплотой перехода* $L = \Delta H$. Теплоту перехода относят к 1 *г* или 1 *молю* вещества и называют соответственно *удельной* или *мольной теплотой перехода*. К фазовым переходам I рода относятся, в частности, все переходы, связанные с изменением агрегатного состояния вещества, и, в зависимости от названия перехода, теплота перехода называется *теплотой плавления* $L_{пл}$, *испарения* в точке кипения $L_{исп}$ или *сублимации* (возгонки) $L_{субл}$. Давление и температура фазового перехода I рода связаны уравнением Клапейрона—Клаузиуса

$$dP/dT = L/(T \cdot \Delta V),$$

где P — давление; T — температура; ΔV — изменение объема вещества в точке перехода.

Фазовые переходы II рода характеризуются непрерывностью в точке перехода термодинамического потенциала Ф и его первых производных и разрывом вторых производных Ф. При этом переходе не происходит тепловыделения и теплота перехода II рода равна нулю. Фазовыми переходами II рода являются переходы вещества в сверхпроводящее, сегнетоэлектрическое, ферромагнитное и т. п. состояния в отсутствие внешних полей (электрических, магнитных). В противном случае те же переходы могут стать переходами I рода: теплота перехода при этом затрачивается на противодействие внешним силам.

Таблица 11.1

Температура t и скрытая теплота ΔH фазовых переходов элементов и неорганических соединений при давлении 760 *мм рт. ст.*

Обозначения фазовых переходов I рода: Тв — фазовый переход между твердотельными фазами различной структуры; Пл — переход твердое тело — жидкость (плавление); Исп — переход жидкость — пар (испарение); Субл — переход твердое тело — пар (сублимация).

Обозначения фазовых переходов II рода: Ст — переход в сверхтекучее состояние; Свп — переход в сверхпроводящее состояние; Сэ и Асэ — сегнето- и антисегнетоэлектрические переходы; Фм и Афм — ферро- и антиферромагнитные переходы. В скобках приведены расчетные значения.

Вещество	Переход	t, °C	ΔH, *кдж/моль*	Литература
Ac	Пл	(1197)	(14,2)	[1]
	Исп	(3327)	(397)	[1]
Ag	Пл	960,8	11,27	[1,2]
	Исп	2212	254,0	[1]
AgBr	Тв	254	—	[3]
	Пл	430	9,16	[4]
	Исп	1502	198	[1]
AgCl	Пл	455,5	12,73	[1]
	Исп	1547	199	[1]
AgI	Тв	150	6,15	[3]
	Пл	557	9,41	[4]
	Исп	1506	143,9	[5]
$AgNO_3$	Тв	160	2,55	[3]
	Пл	210	11,54	[3]
Ag_2S	Тв	179	4,39	[1]
	Тв	586	—	[6]
	Пл	842	14,05	[4]
Ag_2SO_4	Тв	412	7,9	[2]
	Пл	657	17,9	[3]
Al	Свп	—272,01	0,00	[7]
	Пл	660,1	10,7	[1, 8]
	Исп	2447	293,7	[1]
$AlBr_3$	Пл	97,5	11,3	[1]
	Исп	256,2	23,5	[3]
$AlCl_3$	Пл*	192	34,5	[2]
AlF_3	Тв	454	0,63	[1]
AlNi	Пл	1638	—	[6]
Al_2O_3	Тв	975	86,2	[1, 9]
	Пл	2045	109	[9]
	Исп	3530	—	[1]
AlSb	Пл	1080	65,1	[9]
Am	Пл	1200	—	[10]
	Исп	3153	238	[1]
Ar	Пл	—189,30	1,176	[1]
	Исп	—185,87	6,519	[1]
As	Пл	814	—	[11]
	Субл	615	—	[11]
AsF_3	Пл	—5,95	10,40	[1]
	Исп	58	29,7	[9]
AsH_3	Тв	—167,50	0,548	[1]
	Пл	—116,92	1,195	[1]
	Исп	—62,43	16,686	[1]
At	Пл	(300)	(23,8)	[1]
	Исп	(377)	(90,4)	[1]

* При $P = 1625$ *мм рт. ст.*

Продолжение табл. 11.1

Вещество	Переход	t, °C	ΔH, *кдж/моль*	Литература
Au	Пл	1063	12,77	[1, 8]
	Исп	2700	324,4	[1]
AuCu	Тв	416	3,14	[6]
$AuSb_2$	Тв	355	4,68	[3, 2]
	Тв	405	0,42	[3, 2]
B	Пл	2030	22,2	[1]
	Исп	3900	540	[1]
	Субл	25,0	582	[1]
BBr_3	Пл	—47,5	—	[1]
	Исп	91,2	30,5	[5]
BCl_3	Пл	—107,2	—	[1]
	Исп	12,4	12,77	[1]
B_2Cl_4	Пл	—92,94	10,7	[1]
	Исп	65,5	33,6	[1]
BF_3	Тв	—131,0	4,24	[1]
	Пл	—99,9	18,9	[1]
	Исп	—92,94	10,7	[1]
B_2F_4	Пл	—56,0	—	[1]
	Исп	—34,0	28,0	[1]
B_2H_6	Пл	—164,8	4,47	[1]
	Исп	—92,52	14,28	[1]
B_4H_{10}	Пл	—120,0	—	[1]
	Исп	16	27,1	[5]
BN	Исп	52	26,4	[1]
B_2O_3	Пл	450	23,0	[1, 2]
	Исп	2247	—	[1, 2]
Ba	Тв	370	0,59	[1]
	Пл	710	7,66	[1, 11]
	Исп	1637	150,9	[1, 2]
$BaCO_3$	Тв	806	16,2	[1]
	Тв	968	2,9	[1]
$BaCl_2$	Тв	920	—	[9]
	Пл	960	22,47	[4]
	Исп*	1189	238	[1]
BaF_2	Пл	1290	12,5	[4, 9]
	Исп	2260	292	[1]
BaO	Пл	1923	57,7	[1]
	Исп	2700	—	[1]
$BaSO_4$	Тв	1150	—	[9]
	Пл	1350	40,6	[4]
$BaTiO_3$	Сэ	—80	0,00	[7]
	Сэ	5	0,00	[7]
	Сэ	120	0,00	[7]
Be	Пл	1283	12,5	[1]
	Исп	2477	294	[1]
$BeBr_2$	Пл	488	18,8	[1, 6]
$BeCl_2$	Пл	410	12,6	[6]
	Исп	547	105	[2]
BeF_2	Пл	545	—	[1]
	Исп	1159	212,9	[1]
BeO	Пл	2550	71,1	[1]
	Исп	4120	—	[6]
Bi	Пл	271,3	10,9	[1]
	Исп	1559	151,5	[1]
$BiBr_3$	Тв	155	—	[1]
	Пл	218	—	[1]
	Исп	461	75,4	[5]
$BiCl_3$	Пл	244	10,9	[4]
	Исп	441	72,61	[5]
$BiNa_3$	Пл	775	69,5	[1, 6]

* При $P = 6{,}3$ *мм рт. ст.*

Продолжение табл. 11.1

Вещество	Переход	t, °C	ΔH, кдж/моль	Литература
Bi_2O_3	Тв	704	—	[6]
	Пл	817	28,5	[4]
Bi_3Tl_2	Пл	213	7,32	[1]
Br	Пл	—7,3	10,58	[1, 2]
	Исп	58,2	30,0	[1]
BrCl	Пл	—60,5	7,3	[1]
	Исп	40,76	30,6	[1]
BrF	Пл	—33	—	[1]
	Исп	20	25,1	[1]
BrF_3	Пл	8,78	12,03	[1]
	Исп	125,75	47,57	[1]
C_2N_2	Пл	—27,88	8,11	[1]
	Исп	—21,2	23,33	[1]
CO	Тв	—211,6	0,633	[1]
	Пл	—205,1	0,836	[1]
	Исп	—191,5	6,04	[1]
CO_2	Пл*	—56,6	7,95	[1]
	Субл	—78,50	—	[12]
COS	Пл	—138,8	4,727	[1]
	Исп	—50,28	18,51	[1]
CP	Пл	—110	10,9	[2]
CS_2	Пл	—111,6	4,39	[1, 12]
	Исп	46,25	26,77	[2]
Ca	Тв	440	1,0	[1]
	Пл	850	8,66	[1]
	Исп	1487,1	150,0	[1]
CaC_2	Тв	447	5,56	[1]
	Пл	2300	—	[1]
$CaCl_2$	Пл	782	29,36	[1]
	Исп	2000	230	[6]
CaF_2	Тв	1151	4,77	[1]
	Пл	1418	29,7	[1]
	Исп	2500	317	[1]
CaO	Пл	2603	51,2	[4]
	Исп	3570	—	[1]
$CaSO_4$	Пл	1193	—	[1]
	Исп	1397	28,0	[4]
$CaSi_2$	Пл	1220	—	[1]
$CaSiO_3$	Тв	675	—	[1]
	Тв	1190	—	[1]
	Тв	1243	1,84	[1]
	Пл (α)	1512	—	[4]
	Тв	1983	—	[1]
	Пл (γ)	2130	14,18	[1]
$CaTiO_3$	Тв	1257	2,30	[1]
Cd	Свп	—272,61	0,00	[7]
	Пл	321,03	6,40	[1, 12]
	Исп	765	99,87	[5]
$CdBr_2$	Пл	568	20,9	[4]
	Исп	844	115	[1]
$CdCl_2$	Пл	564	48,58	[1]
	Исп	960	124,3	[1]
CdF_2	Пл	1110	22,6	[4]
	Исп	1748	214	[1]
CdSb	Пл	456	32,04	[1]
Ce	Тв	—133	—	[2]
	Тв	393	—	[2]
	Тв	440	—	[2]
	Пл	777	12,9	[1]
	Исп	2900	314	[1]

Продолжение табл. 11.1

Вещество	Переход	t, °C	ΔH, кдж/моль	Литература
$CeCl_3$	Пл	822	38,5	[1]
	Исп	1925	200,9	[1]
Cl_2	Пл	—101	6,406	[1]
	Исп	—34,01	20,41	[1]
ClF	Пл	—154	—	[1]
	Исп	—100,8	24,0	[1]
ClF_3	Тв	—82,65	1,508	[1]
	Пл	—76,31	7,612	[1]
	Исп	11,76	27,53	[1]
Cl_2O	Пл	—116	—	[1]
	Исп	2,0	25,9	[1]
ClO_2	Пл	—59	—	[1]
	Исп	11,0	30	[1]
Co	Фм	1127	0,00	[7]
	Пл	1492	15,3	[4, 10]
	Исп	2255	383	[1, 10]
$CoCl_2$	Афм	248,3	0,00	[7]
	Пл	740	31,0	[1, 4]
	Исп	1053	144,9	[1]
CoO	Афм	1,78	0,00	[7]
	Пл	1800	40,2	[1]
$CoSi_2$	Свп	—271,88	0,00	[7]
Cr	Афм	200	0,00	[7]
	Тв	1840	1,46	[1]
	Пл	1903	14,6	[1, 2]
	Исп	2642	349	[1]
$CrCl_2$	Пл	815	32,2	[2]
	Исп	1300	197	[6]
Cr_2O_3	Афм	32,8	0,00	[1, 7]
	Пл	2440	—	[1]
CrO_2	Фм	107	0,00	[7]
Cs	Пл	28,64	2,18	[1]
	Исп	685	65,9	[1]
CsBr	Пл	636	7,1	[1]
	Исп	1300	150,5	[5]
CsCl	Тв	445	7,5	[1]
	Пл	642	15,06	[5]
	Исп	1300	149,3	[5]
CsH_2PO_4	Сэ	—113	0,00	[7]
CsOH	Тв	223	7,36	[1]
	Пл	272,3	6,73	[1]
Cu	Пл	1083,0	13,01	[1, 12]
	Исп	2595	304	[1]
CuBr	Тв	380	5,9	[6]
	Тв	465	2,9	[6]
	Пл	488	9,6	[2, 6]
	Исп	1318	140	[6]
CuCl	Пл	430	10,0	[4]
	Исп	1690	165,7	[6]
Cu_2O	Пл	1230	56,0	[4]
CuS	Свп	—271,55	0,00	[7]
Cu_2S	Тв	103	5,60	[4]
	Тв	350	0,837	[6]
	Пл	1125	23,0	[4]
n-D_2	Пл	—254,50	0,197	[1]
	Исп	—249,48	1,226	[1]
o-D_2	Пл	—254,52	0,197	[1]
	Исп	—249,56	1,223	[1]
DF	Пл	—83,6	—	[1]
	Исп	18,36	—	[1]
D_2O	Пл	3,76	6,280	[1]
	Исп	101,4	41,69	[2]
DT	Пл	—253,5	—	[1]
	Исп	—248,9	—	[1]

* При $P = 5.28$ *атм*.

Продолжение табл. 11.1

Вещество	Переход	t, °C	ΔH, *кдж/моль*	Литература
Dy	Фм	—168	0,00	[7]
	Пл	1500	—	[1]
	Исп	2600	—	[11]
Er	Тв	—189	—	[1]
	Пл	1497	—	[11]
	Исп	2900	—	[11]
Eu	Пл	826	—	[1]
	Исп	1489	—	[1]
F	Пл	—218,0	1,556	[1]
	Исп	—188,1	6,538*	[1]
F_2O	Пл	—223,8	—	[1]
	Исп	—144,8	11,09	[1]
Fe	Фм	760	0,00	[3]
	Тв	906	0,878	[3]
	Тв	1401	0,46	[3]
	Пл	1535	15,5	[5]
$FeCO_3$	Афм	—216	0,00	[7]
$FeCl_2$	Афм	—249,7	0,00	[7]
	Пл	677	43,0	[1]
	Исп	1012	125,5	[1]
$FeCl_3$	Пл	303,9	43,1	[1]
	Исп	319	—	[5]
FeF_2	Афм	—194,8	0,00	[1]
	Пл	1100	—	[6]
FeO	Афм	—75	0,00	[7]
Fe_2O_3	Тв	677	0,67	[1]
	Тв	767	—	[1]
Fe_3O_4	Тв	627	—	[1]
	Пл	1594	138	[1]
FeS	Тв	138	2,38	[1]
	Тв	325	0,50	[1]
	Пл	1195	32,34	[1]
Fe_2SiO_4	Пл	1217	92,17	[1]
Ga	Свп	—272,08	0,00	[7]
	Тв[2*]	2,4	2,13	[1]
	Пл	29,78	5,586	[1]
	Исп	2227	254	[1]
$GaCl_3$	Пл	77,0	10,9	[1]
	Исп	200,0	23,9	[1]
Gd	Фм	16	0,00	[7]
Ge	Пл	937,2	29,8	[1]
	Исп	2830	334	[1]
$GeCl_4$	Пл	—49,5	—	[1]
	Исп	83,1	29,7	[1, 5]
GeH_4	Тв	—200,0	0,547	[1]
	Тв	—196,6	0,542	[1]
	Пл	—165,9	0,837	[1]
	Исп	—88,35	14,058	[1]
GeO_2	Тв	707	17,6	[1]
	Пл	1115	43,9	[9]
н-H_2	Пл	—259,20	0,117	[1]
	Исп	—252,76	0,904	[1, 12]
п-H_2	Пл	—259,27	0,117	[1]
	Исп	—252,88	0,900	[1, 12]
HD	Пл	—256,5	0,1548	[1]
	Исп	—251,02	1,109[3*]	[1]
HT	Пл	—254,7	—	[1]
	Исп	—249,6	—	[1]
HBr	Тв	—184,0	0,265	[1]
	Тв	—160,0	0,330	[1]
	Тв	—156,0	0,489	[1]

* При $P = 738$ *мм рт. ст.*
2* При $P = 8{,}8 \cdot 10^6$ *мм рт. ст.*
3* При $P = 93$ *мм рт. ст.*

Продолжение табл. 11.1

Вещество	Переход	t, °C	ΔH, *кдж/моль*	Литература
HBr	Пл	—86,9	2,405	[1]
	Исп	—66,7	17,6	[1]
HCN	Пл	—13,3	8,41	[1]
	Исп	25,6	25,22	[1]
HCl	Тв	—174,7	1,189	[1]
	Пл	—114,2	1,992	[1]
	Исп	—85,02	16,15	[1]
HF	Пл	—83,36	3,928	[1]
	Исп*	19,46	7,489	[1]
HI	Тв	—247	—	[1]
	Тв	—203,0	0,078	[1]
	Тв	—147,6	0,805	[1]
	Пл	—50,79	2,87	[1]
	Исп	—35,34	19,76	[1]
HNO_3	Пл	—41,59	10,47	[1]
$HNO_3 \cdot 3H_2O$	Пл	—18,47	29,09	[1]
H_3PO_4	Пл	42,35	10,5	[2]
H_2S	Тв	—169,59	1,51	[1]
	Тв	—146,88	0,455	[1]
	Пл	—85,6	2,378	[1]
	Исп	—60,38	18,67	[1]
H_2SO_4	Пл	10,38	10,71	[1]
$H_2SO_4 \cdot 2H_2O$	Пл	—39,46	18,24	[1]
H_2Se	Тв	—190,9	1,57	[1]
	Тв	—100,6	1,12	[1]
	Пл	—65,73	2,51	[1]
He	Ст	—270,97	0,00	[1, 12]
	Пл[2*]	—269,7	0,0209	[1]
	Исп	—268,94	0,0837	[1, 12]
^{3}He	Исп[3*]	—271,5	0,04785	[1]
Hf	Свп	—272,80	0,00	[7]
	Тв	1550	—	[1]
	Пл	2220	21,8	[1]
	Исп	5200	661	[1]
Hf $(BH_4)_4$	Пл	29,0	14,2	[1]
	Исп	118	40,2	[1]
HfO_2	Пл	2790	—	[1]
Hg	Свп	—269,0	0,00	[7]
	Пл	—38,86	2,295	[1]
	Исп	356,73	59,11	[1]
$HgCl_2$	Пл	277	17,36	[4]
	Исп	304	58,89	[3]
Hg_2Na	Пл	350	26,3	[1]
HgS	Тв	386	4,2	[2]
Ho	Афм	—141,6	0,00	[1]
	Пл	1461	—	[11]
	Исп	2600	—	[11]
I	Пл	113,6	15,77	[3]
	Исп	182,8	41,71	[1, 3]
ICl	Пл	27,3	11,2	[1]
In	Свп	—269,88	0,00	[7]
	Пл	156,61	3,27	[1, 12]
	Исп	2075	226	[1, 11]
InCl	Тв	120	6,91	[1]
	Пл	225	17,2	[1]
	Исп	609	89,9	[1]
InSb	Пл	525	25,5	[1]
Ir	Пл	2443	—	[1, 12]
	Исп	4350	—	[1]
IrF_6	Пл	44	8,4	[6]
	Исп	53	36,0	[6]

* При $P = 741{,}4$ *мм рт. ст.*
2* При $P = 103$ *атм.*
3* При $P = 152{,}04$ *мм рт. ст.*

Продолжение табл. 11.1

Вещество	Переход	t, °C	ΔH, кдж/моль	Литература
K	Пл	63,4	2,33	[1, 2]
	Исп	753,8	77,5	[1]
KBr	Пл	732	24,8	[1]
	Исп	1303	155,1	[5]
KCl	Пл	772	25,5	[2]
	Исп	1413	161,5	[1]
KD_2PO_4	Сэ	—60	0,00	[7]
KF	Пл	857	27,2	[4]
	Исп	1502	172,7	[5]
KH_2PO_4	Сэ	—150	0,00	[7]
KNO_3	Тв	127,9	5,10	[1]
	Пл	334,3	9,62	[1]
$KNbO_3$	Сэ	435	0,00	[7]
KO_2	Тв	—79,7	—	[1]
	Пл	380	—	[1]
KOH	Тв	249	6,36	[1]
	Пл	410	7,5	[1]
	Исп	1327	129	[1]
K_2SO_4	Тв	583	8,11	[1]
	Пл	1069	36,64	[1]
$KTaO_3$	Сэ	—260	0,00	[7]
K_2WO_4	Тв	350	—	[2]
	Пл	930	18,4	[2]
Kr	Пл	—157,2	1,636	[1, 10]
	Исп	—153,2	9,029	[1]
La	Свп	—268,44	0,00	[7]
	Тв	—163	—	[1]
	Тв	548	—	[1]
	Тв	709	—	[1]
	Пл	920	11,3	[1]
	Исп	3370	400	[1]
$LaCl_3$	Пл	872	43,1	[9]
	Исп	1945	224	[1]
Li	Тв	—196	—	[1]
	Пл	180,5	3,01	[1]
	Исп	1317	148,1	[1]
LiBr	Пл	546	12,95	[1]
	Исп	1310	148,1	[1, 5]
LiCl	Пл	614	13,4	[4]
	Исп	1382	150,5	[5]
LiF	Пл	848	26,4	[2, 6]
	Исп	1681	213,3	[5]
LiH	Пл	688	29,3	[1]
$LiNO_3$	Пл	250	25,5	[4]
Li_2O	Пл	1727	75,3	[1]
	Исп	2327	—	[1]
Li_2WO_4	Пл	742	28,0	[1, 6]
Lu	Пл	1652	—	[11]
	Исп	3327	—	[11]
Mg	Пл	649,5	8,95	[1]
	Исп	1120	131,8	[2]
$MgCl_2$	Пл	714	43,1	[1]
	Исп	1418	136,8	[5]
MgF_2	Пл	1263	58,1	[1]
	Исп	2260	292	[1]
MgO	Пл	2802	77,4	[1, 4]
$MgSO_4$	Пл	1127	14,6	[4]
Mn	Афм	—170	0,00	[7]
	Тв	727	2,24	[1]
	Тв	1101	2,28	[1]
	Тв	1137	1,8	[1]
	Пл	1244	14,6	[2]
	Исп	2095	224,7	[2]

Продолжение табл. 11.1

Вещество	Переход	t, °C	ΔH, кдж/моль	Литература
$MnCl_2$	Пл	650	37,6	[1]
	Исп	1231	149	[1]
MnF_2	Афм	—206,7	0,00	[1, 7]
	Пл	930	—	[6]
MnO	Афм	—151	0,00	[1, 7]
	Пл	1780	54,4	[1]
MnSb	Фм	314	0,00	[7]
Mo	Пл	2625	27,6	[1, 10]
	Исп	4800	594	[1]
MoB	Свп	—268,75	0,00	[7]
Mo_2C	Пл	2672	—	[1]
MoF_6	Пл	17,5	9,2	[1, 2]
	Исп	35	26,2	[1]
MoN	Свп	—261,15	0,00	[7]
MoC_3	Пл	795,2	52,5	[1]
N_2	Тв	—237,65	0,23271	[1, 12]
	Пл	—210,01	0,72074	[1]
	Исп	—195,83	5,577	[1]
$^{15}N_2$	Тв	—237,47	0,23686	[1]
	Пл	—209,96	0,72053	[1]
	Исп	—195,76	5,592	[1]
NF_3	Тв	—216,5	1,514	[1]
	Пл	—206,8	0,398	[1]
	Исп	—129,0	11,58	[1]
N_2F_4	Исп	—73	13,27	[1]
NH_3	Пл	—77,73	5,65	[1]
	Исп	—33,41	23,35	[1]
N_2H_4	Пл	1,54	12,66	[1]
	Исп	113,5	41,8	[1]
NH_4Cl	Тв	—30,6	1,1	[1]
	Пл*	520	—	[1]
$(NH_4)H_2PO_4$	Асэ	—125	0,00	[7]
$(NH_4)NO_3$	Тв	—16	0,54	[1]
	Тв	32,1	1,59	[1]
	Тв	84,2	1,34	[1]
	Тв	125,2	4,22	[1]
	Пл	169,6	6,40	[1]
NO	Пл	—163,60	2,299	[1]
	Исп	—151,73	13,774	[1]
N_2O	Пл	—90,91	6,540	[1]
	Исп	—88,56	16,552	[1]
N_2O_4	Пл	—11,25	14,65	[1]
	Исп	21,10	38,12	[1]
Na	Пл	97,82	2,602	[2]
	Исп	890	89,04	[1]
NaCl	Пл	800	28,8	[4]
	Исп	1461	170	[1]
NaF	Пл	1012	33,60	[1]
	Исп	1704	209	[5, 6]
$NaNO_3$	Тв	275	—	[1]
	Пл	306	14,6	[1]
$NaNbO_3$	Асэ	520	0,00	[7]
Na_2O	Пл	920	46,9	[1]
NaOH	Тв	292,8	6,36	[1]
	Пл	319,1	6,36	[1]
	Исп	1390	144,3	[5, 6]
$NaPO_3$	Тв	577	3,60	[1]
Na_2SO_4	Тв	177	3,10	[1]
	Тв	241	7,03	[1]
	Пл	884	28,7	[1]
Na_2TiO_3	Тв	287	1,7	[1]
	Пл	1030	70,3	[1]

* При $P = 34{,}4$ *атм*.

Продолжение табл. 11.1

Вещество	Переход	t, °C	ΔH, кдж/моль	Литература
$NaTaO_3$	Асэ	475	0,00	[7]
Na_2WO_4	Тв	587,6	31,0	[1]
	Тв	588,8	4,2	[1]
	Пл	695,5	23,8	[1]
Nb	Свп	—263,93	0,00	[7]
	Пл	2487	26,8	[1]
	Исп	4900	696	[1]
NbB	Свп	—267,15	0,00	[7]
NbC	Свп	—262,85	0,00	[7]
NbF_5	Пл	78,9	36,0	[1]
	Исп	233,3	52,3	[1]
NbN	Свп	—258,3	0,00	[7]
Nb_2O_5	Тв	800	—	[6]
	Тв	1100	—	[6]
	Пл	1512	102,9	[1]
Nd	Тв	869	—	[1]
	Пл	1019	14,6	[1]
	Исп	3110	—	[10]
Ne	Пл	—248,60	0,335	[1]
	Исп	—246,05	1,760	[1, 12]
Ni	Фм	354	0,00	[7]
	Пл	1453	17,8	[1, 12]
	Исп	2800	380,6	[2]
$NiCl_2$	Афм	—223,6	0,00	[7]
	Пл	1030	77,28	[1]
NiO	Афм	250	0,00	[1]
	Пл	1960	50,6	[1]
Ni_2S	Пл	645	12,5	[4]
$NpCl_3$	Пл	802	—	[2]
O_2	Тв	—249,50	0,0937	[1]
	Тв	—229,45	0,7431	[1, 12]
	Пл	—218,81	0,444	[1]
	Исп	—183,0	6,819	[1]
O_3	Пл	—192,5	—	[1]
	Исп	—111,5	10,66	[1]
Os	Свп	—272,44	0,00	[7]
	Пл	2700	—	[1]
OsO_4	Пл	40,1	14,27	[6]
	Исп	130	39,5	[5]
P (белый)	Тв	—77	—	[1]
	Пл	44,2	2,51	[1]
(красный)	Пл	590	20,29	[2]
	Исп	281	12,4	[1]
PCl_3	Пл	—92	4,25	[1, 9]
	Исп	74,1	30,5	[5]
PF_5	Пл	—93,8	11,8	[1]
	Исп	—84,6	17,2	[1]
PH_3	Тв	—242,8	0,0824	[1]
	Тв	—223,7	0,778	[1]
	Тв	—185,0	0,485	[1]
	Пл	—133,8	1,130	[1]
	Исп	—87,77	14,598	[1]
Pa	Пл	1600	—	[1]
	Исп	4230	—	[1]
Pb	Свп	—265,93	0,00	[7]
	Пл	327,3	4,772	[1]
	Исп	1751	179,5	[1]
$PbCl_2$	Пл	498	23,6	[4]
	Исп	951	127	[1]
PbO	Тв	489	—	[1]
	Пл	890	11,7	[4]
	Исп	1472	213	[5]
PbS	Пл	1114	17,4	[4]

Продолжение табл. 11.1

Вещество	Переход	t, °C	ΔH, кдж/моль	Литература
$PbTiO_3$	Сэ	490	0,00	[7]
$PbZrO_3$	Асэ	233	0,00	[7]
Pd	Пл	1552	17,2	[4, 12]
	Исп	3560	—	[2]
$PdCl_2$	Пл	678	40,6	[1]
Pm	Пл	1035	—	[11]
	Исп	2730	—	[11]
Po	Пл	954	—	[1]
	Исп	962	102,9	[1]
Pr	Пл	919	11,3	[1, 2]
	Исп	3127	—	[11]
Pt	Пл	1769	21,7	[2]
	Исп	4310	447	[5]
Pu	Пл	639,5	—	[11]
	Исп	3235	—	[11]
$PuCl_3$	Пл	760	63,6	[1]
	Исп	1767	195,6	[1]
PuF_3	Пл	1169	33	[1]
PuF_6	Пл	50,7	19,7	[1]
	Исп	62,3	31,0	[1]
Ra	Пл	700	—	[1]
	Исп	1536	—	[10]
Rb	Пл	38,7	2,20	[1]
	Исп	701	69,20	[1]
RbCl	Пл	717	18,40	[4]
	Исп	1381	154,4	[1]
RbF	Пл	775	17,3	[1, 2]
	Исп	1408	165,3	[5]
RbH_2PO_4	Сэ	—126	0,00	[7]
RbOH	Пл	245	7,11	[1]
	Исп	301	6,77	[1]
RbO_2	Пл	412	—	[1]
Re	Свп	—270,73	0,00	[7]
	Пл	3180	38	[1]
	Исп	5600	707	[1]
ReF_6	Пл	18,8	21	[1]
	Исп	47,6	28,8	[1]
Rh	Пл	1960	—	[1]
	Исп	3960	—	[1]
Rn	Пл	—71,0	2,67	[1]
	Исп	—62	16,4	[1]
Ru	Свп	—272,68	0,00	[7]
	Тв	1035	0,14	[3]
	Тв	1200	—	[3]
	Тв	1500	0,96	[3]
	Пл	2500	—	[3]
	Исп	4110	—	[1]
S	Тв	95,31	0,401	[1]
	Тв	101	0,0016	[1]
	Пл	115,18	1,718	[1]
	Исп	444,60	90,75	[2, 12]
SF_6	Тв	—178,8	1,607	[1]
	Пл*	—50,7	5,02	[2]
SO_2	Пл	—75,51	7,401	[1]
	Исп	—10,08	24,94	[1]
SO_3	Пл(γ)	16,8	2,0	[2]
	Пл(β)	32,5	10,3	[2]
	Пл(α)**	62,2	25,5	[2]
Sb	Тв	94,6	—	[1]
	Тв	413	—	[1]
	Пл	630,5	20,41	[4, 12]
	Исп	1637	128,2	[1]

* При $P = 1700$ *мм рт. ст.*
** При $P = 1760$ *мм рт. ст.*

Продолжение табл. 11.1

Вещество	Переход	t, °C	ΔH, кдж/моль	Литература
$SbCl_3$	Пл	73,3	12,68	[4]
	Исп	221	45,19	[2]
SbF_5	Пл	8,3	—	[1]
	Исп	142,7	9,74	[1]
SbH_3	Пл	—88,5	—	[1]
	Исп	—17,0	21,3	[1]
Sc	Пл	1400	16,1	[1]
	Исп	3900	305	[1]
Se	Тв	150	0,75	[2]
	Пл	217,4	5,42	[1]
	Исп	657	—	[10]
SeF_6	Пл*	—34,6	6,69	[1]
Si	Пл	1423	46,5	[1]
	Исп	2355	394,5	[1]
$SiCl_4$	Пл	—69,9	7,72	[1]
	Исп	56,7	28,7	[5]
Si_2F_6	Пл2*	—18,7	14,6	[2]
	Исп2*	—18,7	27,7	[2]
SiH_4	Субл	—19,1	42,3	[2]
	Тв	—209,7	0,615	[1]
	Пл	—184,67	0,667	[1]
	Исп	—111,4	12,1	[2]
SiF_2Cl_2	Пл	—139,7	—	[1]
	Исп	—32,2	21,2	[5]
SiO_2	Тв	117	0,29	[1]
	Тв	163	0,17	[1]
	Тв	225	0,19	[1]
	Тв	225÷262	1,3	[1]
	Тв	867	0,50	[1]
	Тв	1470	0,21	[1]
(кристалл)	Пл	1610	8,52	[2]
(аморфный)	Пл	1713	7,68	[2]
Sm	Пл	1350	—	[2]
	Исп	1600	—	[10]
Sn	Свп	—269,42	0,00	[7]
	Тв	18	2,5	[1]
	Тв	202,8	0,008	[1]
	Пл	231,9	7,07	[1, 12]
	Исп	2687	290,4	[1]
SnAu	Пл	418	25,60	[1]
$SnCl_4$	Пл	—33,3	9,16	[1]
	Исп	113,9	34,9	[1]
SnH_4	Пл	—150	—	[1]
	Исп	—51,8	19,05	[1]
SnO_2	Тв	410	1,9	[1]
SnO	Исп	1456	161	[1]
Sr	Тв	589	0,84	[1]
	Пл	770	9,2	[1]
	Исп	1367	138,9	[1]
$SrCl_2$	Пл	872	171	[4]
SrO	Пл	2460	69,9	[1, 9]
	Исп	3200	530	[1]
$н$-T_2	Пл	—252,9	—	[1]
	Исп	—251,02	—	[1]
T_2O	Пл	4,49	—	[1]
Ta	Свп	—268,77	0,00	[7]
	Пл	2996	31,4	[1]
	Исп	5400	753	[1]
TaC	Свп	—263,75	0,00	[7]
	Пл	3877	—	[1]
$TaCl_5$	Пл	215,9	46,4	[1, 2]
	Исп	232,9	54,8	[1]

Продолжение табл. 11.1

Вещество	Переход	t, °C	ΔH, кдж/моль	Литература
TaF_5	Пл	91,5	—	[9]
	Исп	229,2	56,9	[1]
Tb	Тв	—45,48	—	[1]
	Пл	1356	—	[11]
	Исп	2800	—	[11]
Tc	Свп	—261,95	0,00	[7]
	Пл	2140	—	[10]
	Исп	4700	—	[10]
Te	Пл	449,5	17,5	[1]
	Исп	989,8	114,06	[1]
$TeCl_4$	Пл	224,1	18,9	[1]
	Исп	388	77,0	[1]
Th	Свп	—272,83	0,00	[7]
	Тв	225	—	[1]
	Тв	1400	2,8	[1]
	Пл	1695	15,65	[1]
	Исп	4200	544	[1]
$ThCl_4$	Пл	770	40,2	[9]
	Исп	921	146,4	[2]
ThO_2	Пл	2950	—	[2]
	Исп	4400	—	[1]
Ti	Свп	—272,78	0,00	[7]
	Тв	1080	3,40	[1]
	Пл	1668	15,5	[1]
	Исп	3280	430	[1]
$TiCl_2$	Афм	—170	0,00	[7]
	Исп	1500	232	[1, 6]
$TiCl_4$	Пл	—24,3	9,37	[1, 4]
	Исп	136,5	36,2	[1]
TiC	Пл	3170	—	[1]
TiN	Пл	2947	84	[1, 9]
TiO	Тв	991	343	[1]
	Пл	2020	58,5	[9]
	Исп	2700	—	[1]
TiO_2	Тв	642	1,3	[2]
	Пл	1855	64,8	[1, 9]
	Исп	2900	—	[1]
Tl	Свп	—270,77	0,00	[7]
	Тв	234	0,40	[1]
	Пл	303,5	4,201	[1]
	Исп	1457	162,4	[5]

* При $P = 1500$ *мм рт. ст.*
2* При $P = 780$ *мм рт. ст.*

Продолжение табл. 11.1

Вещество	Переход	t, °C	ΔH, кдж/моль	Литература
TlCl	Пл	427	16,5	[3]
	Исп	807	102,2	[5]
TlF	Пл	327	14,0	[1]
	Исп	655	—	[1]
Tl_2Hg_5	Пл	14,5	2,03	[1]
$TlNO_3$	Тв	61,0	1,0	[2]
	Тв	143,0	3,18	[2]
	Пл	207	9,58	[4]
	Исп	433	—	[1]
TlNa	Пл	306	15,1	[9]
Tu	Пл	1545	—	[11]
	Исп	1727	—	[11]
U	Свп	—272,35	0,00	[7]
	Тв	662	2,93	[1]
	Тв	772	4,78	[1]
	Пл	1133	19,7	[1]
	Исп	3900	412	[1]
UC	Пл	2427	—	[2]
UCl_4	Пл	598	45,0	[1]
UF_4	Пл	1036	—	[6]
	Исп	1417	—	[6]
UF_6	Пл*	64,06	19,193	[1]
	Исп	56,5	28,7	[1]
UH_3	Фм	—93	0,00	[7]
UO_2	Пл	2730	—	[1]
V	Свп	—268,05	0,00	[7]
	Пл	1730	17,5	[1, 2]
	Исп	3380	458	[1]
VF_5	Пл	19,5	49,96	[1]
	Исп	48,3	44,52	[1]
VN	Свп	—271	0,00	[7]
V_2O_4	Тв	72	8,57	[1]
	Пл	1542	113,8	[1]
	Исп	2700	—	[1]
W	Пл	3380	35,2	[4, 12]
	Исп	5530	799	[1]
WC	Свп	—270	0,00	[7]
	Пл	2867	—	[1]
WCl_6	Тв	169	—	[1]
	Тв	226,9	14,2	[1]
	Пл	284	9,6	[1]
	Исп	348	52,7	[1]

* При $P = 1133$ мм рт. ст.

Продолжение табл. 11.1

Вещество	Переход	t, °C	ΔH, кдж/моль	Литература
WF_6	Тв	—8,2	6,7	[6]
	Пл	2,3	2,1	[6]
	Исп	17,06	26,13	[1]
WO_3	Асэ	737	0,00	[7]
	Пл	1473	62,8	[1, 6]
	Исп	1800	—	[1]
Xe	Пл	—111,9	2,295	[1]
	Исп	—108,1	12,64	[1]
Y	Пл	1500	17,2	[1]
	Исп	3200	393	[1]
Yb	Пл	824	—	[11]
	Исп	1427	—	[11]
Zn	Свп	—272,36	0,00	[7]
	Пл	419,505	7,28	[1, 12]
	Исп	907	114,7	[5]
$ZnCl_2$	Пл	318	23,0	[1, 2]
	Исп	721	126	[1]
ZnF_2	Пл	872	—	[1]
	Исп	1500	190,1	[1]
ZnS	Тв	1020	13,4	[1, 6]
	Пл*	1830	—	[1]
	Исп	1665	250,2	[1]
Zr	Свп	—272,45	0,00	[7]
	Тв	862	3,8	[1]
	Пл	1855	20	[1, 9]
	Исп	4380	582	[1]
ZrC	Свп	—270,85	0,00	[7]
	Пл	3530	—	[1]
$ZrCl_4$	Пл	437	38	[1]
ZrN	Свп	—271,88	0,00	[7]
	Пл	2987	—	[1]
ZrO_2	Тв	1205	5,94	[1]
	Пл	2687	87,0	[1, 4]
	Исп	4300	—	[1]

* При $P = 10{,}2$ атм.

Температура и скрытая теплота фазовых переходов органических соединений при давлении 760 *мм рт. ст.*

Обозначения: Алл — аллотропное превращение; Пл — переход твердое тело — жидкость (плавление); Исп — переход жидкость — пар (испарение).

Формула	Название	Переход	*t*, °С	Δ*H*, *кдж/моль*	Литература
CH_4	Метан	Алл	—252,65	0,0655	[1, 2]
		Пл	—182,6	0,938	[1]
		Исп	—161,58	8,289	[13]
CH_3F	Фторметан	Пл	—141,8	—	[1]
		Исп	— 78,5	17,56	[1]
CH_3Cl	Хлорметан	Пл	— 97,71	6,429	[1]
		Исп	— 24,0	21,63	[1]
CH_3Br	Бромметан	Алл	— 99,4	0,47	[1]
		Пл	— 93,7	5,98	[1]
		Исп	3,5	23,90	[1]
CH_2Cl_2	Дихлорметан	Пл	— 96,5	4,6	[1]
		Исп	40	28,0	[1]
CHF_3	Трифторметан (фреон-23)	Пл	—163	—	[14]
		Исп	— 82,2	18,4	[14]
CHF_2Cl	Дифторхлорметан (фреон-22)	Пл	—160	4,12	[1, 14]
		Исп	— 40,8	20,22	[14]
$CHFCl_2$	Фтордихлорметан (фреон-21)	Пл	—135	—	[1]
		Исп	8,92	24,0	[1]
CF_4	Тетрафторметан (фреон-14) (углерод четырехфтористый)	Алл	—197,1	1,734	[1]
		Пл	—183,7	0,700	[1, 14]
		Исп	128,0	12,33	[1, 14]
CF_3Cl	Трифторхлорметан (фреон-13)	Пл	—180	—	[14]
		Исп	— 81,5	14,63	[14]
CF_2Cl_2	Дифтордихлорметан (фреон-12)	Пл	—155	4,14	[2]
		Исп	— 29,8	19,61	[14]
$CFCl_3$	Фтортрихлорметан (фреон-11)	Пл	—111,0	6,893	[1, 14]
		Исп	23,77	24,9	[1, 14]
CF_3Br	Трифторбромметан (фреон-13B1)	Пл	—175,5	—	[1]
		Пл	—143,2	—	[14]
		Исп	— 57,8	22,7	[1]
CF_2Br_2	Дифтордибромметан (фреон-12B2)	Пл	—110,1	—	[1]
		Исп	24,5	—	[14]
CF_2ClBr	Дифторхлорбромметан	Пл	—159,2	—	[1]
		Исп	— 3,8	—	[14]
CCl_4	Углерод четыреххлористый	Алл	— 47,8	4,56	[1]
		Пл	— 22,9	2,5	[1]
		Исп	76,69	30,0	[1]
CH_4O	Метанол (метиловый спирт)	Алл	—115,8	0,645	[1]
		Пл	— 97,9	3,17	[1]
		Исп	64,6	35,39	[1]
CH_2O	Формальдегид	Пл	— 118	—	[1]
		Исп	— 19,3	24,5	[1, 2]
CH_2O_2	Муравьиная кислота	Пл	8,2	12,68	[1]
		Исп	100,5	22,26	[1]
CCl_2O	Фосген	Пл	—127,8	5,694	[1]
		Исп	7,5	24,40	[1]
CH_5N	Метиламин	Пл	— 33,5	0,134	[1]
		Исп	— 6,3	25,82	[1]
CHON	Циановая кислота	Исп	23,2	29,0	[1]
CH_2N_2	Цианамид	Пл	42,8	8,8	[1]
CClN	Хлорциан	Пл	— 6,90	11,34	[1]
		Исп	12,9	26,31	[2]
C_2H_6	Этан	Пл	—183,3	2,857	[1]
		Исп	— 88,63	14,70	[1, 13]
C_2H_4	Этен (этилен)	Пл	—169,2	3,351	[13]
		Исп	—103,7	13,54	[1]
C_2H_2	Этин (ацетилен)	Пл	— 81,5*	3,76	[1]
		Исп	— 83,6	17,27	[13]

* При $P = 900$ *мм рт. ст.*

Формула	Название	Переход	t, °С	ΔH, кдж/моль	Литература
C_2H_5F	Фторэтан	Пл	—143,2	—	[1]
		Исп	— 32,0	21,07	[1]
C_2H_5Cl	Хлорэтан	Пл	—138,3	4,45	[1]
		Исп	12,2	24,65	[1]
C_2H_3F	Фторэтен	Пл	—160,5	—	[2]
		Исп	72,2	17,1	[2]
C_2H_3Cl	Хлорэтен	Пл	—159,7	4,74	[1]
		Исп	—13,7	20,8	[1]
C_2HCl	Хлорэтин	Исп	— 29,6	22,5	[1]
$C_2H_4Cl_2$	1,1-Дихлорэтан	Пл	— 97,0	7,870	[1]
		Исп	57,4	28,71	[1]
$C_2H_4Cl_2$	1,2-Дихлорэтан	Пл	— 35,9	8,837	[1]
		Исп	82,4	31,45	[15]
$C_2H_4Br_2$	1,2-Дибромэтан	Алл	— 23,6	1,94	[1]
		Пл	9,9	10,94	[1]
		Исп	131,5	36,2	[15]
$C_2H_2Cl_2$	1,1-Дихлорэтен	Пл	—122,56	6,51	[1]
		Исп	31,7	26,4	[2]
$C_2H_3F_3$	1,1,1-Трихлорэтан (фреон-143)	Пл	—111,3	6,19	[14]
		Исп	— 47,6	19,8	[1, 14]
$C_2H_3Cl_3$	1,1,2-Трихлорэтан	Пл	— 36,1	11,38	[1]
		Исп	113,9	36,8	[2]
$C_2H_3F_2Cl$	1,1-Дифтор-1-хлорэтан (фреон-142)	Пл	—130,8	2,69	[14]
		Исп	— 9,8	22,4	[14]
C_2F_4	Тетрафторэтен	Пл	—131,1	7,714	[1]
		Исп	— 75,6	16,82	[1]
C_2Cl_4	Тетрахлорэтен	Пл	— 22	10,5	[1]
		Исп	121,0	34,7	[1]
C_2F_6	Гексафторэтан	Алл	—169,2	3,74	[1]
		Пл	—100,0	2,69	[1]
		Исп	— 78,8	16,15	[1]
C_2F_5Cl	Пентафторхлорэтан (фреон-115)	Алл	—192,9	2,626	[1]
		Пл	—106,0	1,878	[14]
		Исп	— 38,0	19,41	[14]
$C_2F_4Cl_2$	1,1,1,2-Тетрафтор-2,2-дихлорэтан (фреон-114)	Пл	— 93,9	—	[14]
		Исп	3,6	28,51	[14]
$C_2F_3Cl_3$	1,2,2-Трифтор-1,1,2-трихлорэтан (фреон-113)	Пл	— 36,5	—	[14]
		Исп	47,6	27,47	[14]
$C_2F_2Cl_4$	1,2-Дифтор-1,1,2,2-тетрахлорэтан	Пл	24,6	—	[14]
		Исп	92,8	—	[14]
C_2H_6O	Этаиол (этиловый спирт)	Пл	—114,7	5,02	[1]
		Исп	78,4	38,74	[15]
C_2H_4O	Диметиловый эфир	Пл	—141,5	4,94	[1]
		Исп	— 24,8	21,51	[1]
C_2H_4O	Ацетальдегид	Пл	—188	3,22	[2]
		Исп	20,1	27,1	[2]
C_2H_4O	Этилена окись	Пл	—112,5	5,173	[1]
		Исп	10,5	25,53	[1]
C_2H_2O	Кетев	Пл	—151	7,53	[1]
		Исп	— 41	20,25	[1]
$C_2H_6O_2$	Этиленгликоль	Пл	— 12,4	11,6	[1]
		Исп	197,4	57,03	[1]
$C_2H_4O_2$	Уксусная кислота	Пл	16,6	11,73	[1]
		Исп	118,5	23,70	[1]
$C_2H_4O_2$	Метилформиат	Пл	— 99	6,7	[1]
		Исп	32,0	27,89	[15]
$C_2H_4O_3$	Гликолевая кислота	Пл	63	8,4	[2]
		Исп	78	8,8	[2]
C_2H_5ClO	Хлорэтанол	Пл	— 67,5	—	[1]
		Исп	128,6	41,4	[1]
C_2H_7N	Этиламин	Пл	— 81,0	—	[2]
		Исп	16,6	27,30	[1]
C_2H_7N	Диметиламин	Пл	— 92,2	5,939	[1]
		Исп	7,4	26,10	[1]

Формула	Название	Переход	t, °С	ΔH, кдж/моль	Литература
C_2H_3N	Этаннитрил	Пл	— 44,9	8,91	[2]
		Исп	81,5	32,75	[2]
C_2H_5ON	Ацетамид	Пл	71	14,2	[2]
		Исп	221,2	—	[1]
$C_2H_5O_3N$	Этилнитрат	Пл	— 94,6	8,527	[1]
		Исп	87,7	33,9	[1]
C_3H_8	*н*-Пропан	Пл	—187,7	2,524	[1, 13]
		Исп	— 42,06	18,77	[13]
C_3H_6	Пропен (пропилен)	Пл	—186,3	3,002	[1]
		Исп	— 47,75	18,42	[13]
C_3H_6	Циклопропан	Пл	—136,1	4,389	[1, 13]
		Исп	— 34,42	20,92	[13]
C_3H_4	Пропин (метилацетилен)	Пл	—102,7	—	[1]
		Исп	— 23,23	22,03	[13]
C_3H_7Cl	1-Хлорпропан	Пл	—122,3	5,544	[1]
		Исп	45,7	27,6	[1]
C_3H_7Br	1-Бромпропан	Пл	—108,1	6,53	[1]
		Исп	68,8	29,9	[1]
C_3H_5Br	3-Бромпропен	Пл	—119,3	—	[1]
		Исп	70,2	—	[1]
C_3H_8O	1-Пропанол (пропиловый спирт)	Пл	—126,2	5,20	[1]
		Исп	97,8	41,81	[1]
C_3H_8O	2-Пропанол (изопропиловый спирт)	Пл	— 88,5	5,37	[1]
		Исп	82,5	40,48	[15]
C_3H_8O	Метилэтиловый эфир	Исп	7,5	24,73	[15]
C_3H_6O	Ацетон	Пл	— 96,5	5,72	[1]
		Исп	56,1	29,09	[1]
$C_3H_6O_2$	Пропионовая кислота	Пл	— 20,8	7,53	[1]
		Исп	139,3	30,63	[1]
$C_3H_6O_2$	Этилформиат	Пл	— 79,2	9,2	[1]
		Исп	54,3	30,31	[15]
$C_3H_6O_2$	Метилацетат	Пл	— 98,0	—	[1]
		Исп	57,8	31,20	[15]
$C_3H_4O_2$	Акриловая кислота	Пл	12,3	11,1	[1]
		Исп	141,6	—	[1]
$C_3H_8O_3$	Глицерин	Пл	18,2	18,47	[1]
		Исп	290,5	—	[1]
C_3H_9N	Пропиламин	Исп	48,5	29,05	[1]
C_3H_5N	Этилцианид	Пл	— 91,8	6,07	[1]
		Исп	97,10	31,0	[1]
$C_3H_7O_2N$	Уретан	Пл	48,7	15,2	[1]
$C_3H_7O_3N$	Пропилнитрат	Исп	110	37,1	[1]
C_4H_{10}	*н*-Бутан	Алл	—165,60	3,667	[13]
		Пл	—138,35	4,660	[16]
		Исп	— 0,50	22,39	[13]
C_4H_{10}	2-Метилпропан (изобутан)	Пл	—159,60	5,541	[16]
		Исп	— 11,7	21,30	[13]
C_4H_8	1-Бутен (бутилен)	Пл	—185,3	3,848	[1]
		Исп	— 6,25	21,92	[13]
C_4H_8	*цис*-2-Бутен	Пл	—138,91	7,308	[16]
		Исп	3,72	23,35	[13]
C_4H_8	*транс*-2-Бутен	Пл	—105,55	9,757	[16]
		Исп	0,88	22,76	[13]
C_4H_8	2-Метилпропен (изобутилен)	Пл	—140,35	5,933	[16]
		Исп	— 7,01	22,12	[13]
C_4H_8	Циклобутан	Алл	—126,79	5,894	[13]
		Пл	— 90,7	1,008	[1]
		Исп	12,6	24,9	[13]
		Исп	— 7,5	—	[1]
C_4H_8	Метилциклопропан	Пл	—177,32	2,801	[13]
C_4H_6	1,2-Бутадиен	Пл	—136,19	6,961	[13]
		Исп	10,84	—	[13]
C_4H_6	1,3-Бутадиен (дивинил)	Пл	—108,92	7,985	[16]
		Исп	— 4,6	22,59	[13]

Формула	Название	Переход	t, °C	ΔH, *кдж/моль*	Литература
C_4H_6	1-Бутин (этилацетилен)	Пл	—125,72	6,031	[13]
		Исп	8,07	24,52	[13]
C_4H_6	2-Бутин	Пл	—32,2	9,235	[17]
		Исп	27,0	26,54	[13]
C_4H_6	Циклобутен	Исп	2,4	23,54	[13]
C_4H_4	Бутенин (винилацетилен)	Исп	5,1	24,54	[13]
C_4H_2	1,3-Бутадиен	Пл	—36,4	—	[1]
		Исп	10,3	23,32	[13]
C_4H_9F	2-Фторбутан	Пл	—121,4	—	[1]
		Исп	25,1	26,05	[1]
C_4H_9Br	1-Бромбутан	Пл	—112,8	9,241	[1]
		Исп	99,4	32,53	[1]
C_4F_8	Октафторциклобутан	Пл	—40,2*	2,768	[1]
$C_4H_{10}O$	1-Бутанол (*н*-бутиловый спирт)	Пл	— 89,3	8,98	[1]
		Исп	117,6	43,97	[1]
$C_4H_{10}O$	2-Бутанол (бутиловый спирт вторичный)	Пл	—114,7	—	[1]
		Исп	99,5	43,56	[15]
$C_4H_{10}O$	2-Метилпропанол (бутиловый спирт, третичный)	Пл	25,5	6,79	[1]
		Исп	82,9	39,97	[15]
$C_4H_{10}O$	2-Метилпропанол (изобутиловый спирт)	Пл	—108	—	[1]
		Исп	107,2	43,47	[1]
$C_4H_{10}O$	Диэтиловый эфир	Пл	—116,2	6,90	[1]
		Исп	34,6	26,60	[1]
C_4H_8O	2-Бутанон	Пл	— 87,1	8,48	[1]
		Исп	79,6	32,8	[1]
C_4H_6O	Дивиниловый эфир	Пл	—100	7,95	[1]
		Исп	28,3	26,2	[1]
C_4H_4O	Фуран	Пл	— 85,6	3,802	[1]
		Исп	31,4	27,09	[1]
$C_4H_8O_2$	Масляная кислота	Пл	— 5,8	11,07	[1]
		Исп	164,0	42,01	[1]
$C_4H_8O_2$	Изомасляная кислота	Пл	— 46,0	5,0	[1]
		Исп	154,7	41,1	[1]
$C_4H_8O_2$	Пропилформиат	Пл	— 92,9	—	[1]
		Исп	81,3	31,9	[1]
$C_4H_8O_2$	Этилацетат	Пл	— 83,8	10,48	[1]
		Исп	77,1	32,26	[1]
$C_4H_8O_2$	Метилпропионат	Исп	79,8	32,64	[15]
C_4H_6O	Метилакрилат	Исп	99,5	40,29	[1]
C_4H_4S	Тиофен	Пл	— 38,3	5,09	[1]
		Исп	84,2	31,47	[1]
$C_4H_{11}N$	Бутиламин	Пл	— 50,5	—	[1]
		Исп	70	27,2	[1]
$C_4H_{11}N$	Диэтиламин	Пл	— 48,0	—	[1]
		Исп	55,5	28,83	[1]
C_5H_{12}	*н*-Пентан	Пл	—129,7	8,414	[18]
		Исп	36,1	25,77	[1, 13]
C_5H_{12}	2-Метилбутан (изопентан)	Пл	—159,9	5,156	[18]
		Исп	27,8	24,59	[13]
C_5H_{12}	2-2-Диметилпропан (неопентан)	Алл	—133,1	2,575	[13]
		Пл	— 16,6	3,256	[19]
		Исп	9,50	22,75	[20]
C_5H_{10}	1-Пентен	Пл	—165,2	5,807	[19,20]
		Исп	30,0	25,2	[1, 13]
C_5H_{10}	*цис*-2-Пентен	Пл	—151,4	7,113	[20,21]
		Исп	37,0	26,95	[13]
C_5H_{10}	*транс*-2-Пентен	Пл	—140,2	8,368	[20,21]
		Исп	36,4	26,15	[13]
C_5H_{10}	2-Метил-1-бутен	Пл	—137,5	7,912	[20,21]
		Исп	31,2	25,50	[13]
C_5H_{10}	3-Метил-1-бутен	Пл	—168,5	5,36	[20,21]
		Исп	20,06	24,04	[13]

* При $P = 591$ *мм рт. ст.*

Формула	Название	Переход	t, °С	ΔH, *кдж/моль*	Литература
C_5H_{10}	2-Метил-2-бутен	Пл	—133,8	7,598	[20, 21]
		Исп	38,7	26,30	[13]
C_5H_{10}	Циклопентан	Алл	—150,76	4,884	[1]
		Алл	—135,06	0,344	[1, 13]
		Пл	— 93,8	0,609	[13]
		Исп	49,3	27,2	[13]
C_5H_8	1,2-Пентадиен	Пл	—137,3	—	[22]
		Исп	44,9	27,17	[13]
C_5H_8	*цис*-1,3-Пентадиен (*цис*-пипирилен)	Пл	—137,3	—	[22]
		Исп	42,0	27,08	[13]
C_5H_8	*транс*-1,3-Пентадиен (*транс*-пипирилен)	Пл	— 87,5	6,345	[22]
		Исп	42,0	26,84	[13]
C_5H_8	1,4-Пентадиен	Пл	—148,3	6,142	[22]
		Исп	26,1	26,0	[1, 13]
C_5H_8	2,3-Пентадиен	Пл	—125,6	—	[22]
		Исп	48,3	27,78	[13]
C_5H_8	2-Метил-1,3-бутадиен (изопрен)	Пл	—146,7	4,83	[1, 22]
		Исп	34,1	25,82	[13]
C_5H_8	Циклопентен	Алл	—186,08	0,4795	[1, 21]
		Пл	—135,1	3,363	[13]
		Исп	44,24	27,33	[13]
C_5H_8	Спиропентан	Пл	—107,0	6,435	[1]
		Исп	39,0	3,39	[13]
C_5H_8	1-Пентин	Исп	40,25	27,78	[13]
C_5H_6	Циклопентадиен	Исп	40,5	26,79	[13]
$C_5H_{11}Br$	1-Бромпентан	Пл	— 89,3	14,27	[1]
		Исп	128,6	30,5	[1]
$C_5H_{12}O$	1-Пентанол	Пл	— 79,8	9,795	[1]
		Исп	138,2	—	[1]
$C_5H_{12}O$	2-Пентанол	Исп	119,15	—	[1]
$C_5H_{12}O$	2-Метил-2-бутанол	Алл	—127,2	1,96	[1]
		Пл	— 9,1	4,49	[1]
		Исп	102,3	—	[1]
$C_5H_{12}O$	Этилпропиловый эфир	Исп	61,4	28,9	[1]
$C_5H_{12}O$	Метилтретбутиловый эфир	Пл	— 108,6	—	[1]
		Исп	55,1	28,3	[1]
$C_5H_{10}O$	2-Пентанон	Пл	— 77,7	10,6	[1]
		Исп	101,9	—	[1]
$C_5H_{10}O$	Циклопентанол	Алл	— 70,4	3,71	[1]
		Пл	— 16,3	1,54	[1]
		Исп	140,2	—	[1]
$C_5H_{10}O_2$	Валериановая кислота	Пл	— 34,5	7,74	[1]
		Исп	184,7	44,0	[1]
$C_5H_{10}O_2$	Изовалериановая кислота	Пл	— 30,0	7,32	[1]
		Исп	176,7	43,1	[1]
$C_5H_{10}O_2$	Бутилформиат	Пл	—91,9	—	[1]
		Исп	105,1	31,7	[1]
$C_5H_{10}O_2$	Изобутилформиат	Пл	— 95,8	—	[1]
		Исп	92,8	33,85	[1]
$C_5H_{10}O_2$	Пропилацетат	Исп	101,8	34,71	[1]
$C_5H_{10}O_2$	Этилпропионат	Пл	— 73,9	12,6	[1]
		Исп	91,8	34,42	[15]
$C_5H_{10}O_2$	1-Метилбутират	Исп	102,3	34,42	[15]
$C_5H_{10}O_2$	2-Метилбутират	Исп	176,5	—	[1]
$C_5H_{10}S$	Тиациклогексан	Пл	19,10	2,448	[1]
		Исп	141,7	36,14	[1]
$C_5H_{11}N$	Пиперидин	Исп	103,5	32,3	[1]
C_5H_5N	Пиридин	Пл	— 4,7	8,278	[1]
		Исп	115,2	35,11	[1]
C_6H_{14}	*н*-Гексан	Пл	— 95,3	13,03	[18]
		Исп	68,7	28,85	[23]
C_6H_{14}	2-Метилпентан	Пл	—153,6	6,266	[13]
		Исп	60,3	27,79	[23]

Формула	Название	Переход	t, °С	ΔH, *кдж/моль*	Литература
C_6H_{14}	2,2-Диметилбутан (неогексан)	Алл	—123,36	0,285	[1]
		Алл	—146,34	5,409	[1]
		Пл	— 99,7	0,579	[13]
		Исп	49,7	26,3	[23]
C_6H_{12}	1-Гексен	Пл	—139,8	9,347	[19]
		Исп	63,5	28,03	[1]
C_6H_{12}	Циклогексан	Алл	— 87,06	6,65	[1, 18]
		Пл	6,6	2,665	[1]
		Исп	80,7	30,08	[23]
C_6H_{10}	1-Гексин	Пл	—132,09	—	[13]
		Исп	71,4	29,26	[13]
C_6H_6	Бензол	Пл	5,52	9,837	[13]
		Исп	80,10	30,76	[13]
C_6H_5F	Фторбензол	Пл	— 42,2	11,30	[1]
		Исп	84,7	31,20	[1]
C_6H_5Cl	Хлорбензол	Пл	— 45,3	9,556	[1]
		Исп	132,2	35,66	[15]
$C H_5Br$	Бромбензол	Пл	— 30,7	10,63	[1]
		Исп	156,2	36,40	[15]
$C_6H_{14}O$	1-Гексанол (гексиловый спирт)	Пл	— 47,4	15,38	[1]
		Исп	157,0	50,63	[1]
$C_6H_{14}O$	2-Гексанол	Исп	139,9	49,75	[1]
$C_6H_{14}O$	Диизопропиловый эфир	Пл	— 86,8	11,24	[1]
$C_6H_{12}O$	Циклогексанол	Алл	— 9,7	8,2	[1]
		Пл	23,5	1,70	[1]
		Исп	160,5	42,4	[1]
C_6H_6O	Фенол	Пл	41	11,6	[1]
		Исп	181,8	47,30	[1]
$C_6H_{12}O_2$	Капроновая кислота	Пл	— 3,6	15,1	[1]
		Исп	205,3	—	[1]
C_6H_7N	Анилин	Пл	— 6,4	10,54	[1]
		Исп	184,4	45,15	[15]
$C_6H_3O_7N_3$	Пикриновая кислота	Пл	122	19,5	[1]
		Исп	320	87,9	[1]
C_7H_{16}	*н*-Гептан	Пл	— 90,6	14,022	[13]
		Исп	98,4	31,69	[23]
C_7H_{14}	1-Гептен	Пл	—119,03	12,40	[19]
		Исп	93,6	30,92	[13]
C_7H_{14}	Циклогептан	Алл	—138,4	4,966	[1]
		Алл	— 75	0,290	[1]
		Алл	— 60,8	0,450	[1]
		Пл	— 8,03	1,882	[1]
		Исп	114,4	31,80	[13]
$C_7H_5F_3$	Фенилтрифторметан	Пл	— 29,01	13,78	[1]
		Исп	102,03	32,64	[1]
$C_7H_{16}O$	1-Гептанол (гептиловый спирт)	Пл	— 32,8	18,17	[1]
		Исп	175,9	—	[1]
C_7H_8O	Бензиловый спирт	Пл	— 15,6	8,970	[1]
		Исп	204,2	50,46	[1]
C_7H_8O	*о*-Крезол	Исп	191,0	46,94	[1]
$C_7H_5O_6N_3$	2, 4, 6-Тринитротолуол	Пл	80,5	22,6	[1]
		Исп	345	73,22	[1]
C_8H_{18}	*н*-Октан	Пл	— 56,8	20,74	[19]
		Исп	125,3	34,57	[13]
C_8H_8	Этеиилбензол (стирол)	Пл	— 30,6	10,95	[16]
		Исп	145,1	37,54	[13]
$C_8H_{18}O$	1-Октанол	Пл	— 15,0	—	[1]
		Исп	195,3	53,1	[1]
C_9H_{20}	*н*-Нонан	Алл	— 55,96	6,28	[13]
		Пл	— 53,5	15,47	[17]
		Исп	150,8	37,78	[23]
C_9H_{12}	Изопропилбензол (кумол)	Пл	— 96,03	9,6	[18]
		Исп	159,22	38,40	[13]

Формула	Название	Переход	t, °С	ΔH, *кдж/моль*	Литература
$C_{10}H_{22}$	*н*-Декан	Пл	—26,67	28,71	[17]
		Исп	174,12	38,6	[13]
$C_{10}H_8$	Нафталин	Пл	80,28	18,98	[13]
		Исп	217,96	42,8	[1]
$C_{11}H_{24}$	*н*-Ундекан	Алл	—36,6	6,858	[13]
		Пл	—25,6	22,18	[13]
		Исп	195,9	—	[1]
$C_{12}H_{26}$	*н*-Додекан	Пл	—9,6	36,84	[1]
		Исп	216,3	—	[1]
$C_{12}H_{10}$	Дифенил	Пл	68,3	18,6	[1]
		Исп	255	47,95	[1]
$C_{13}H_{28}$	*н*-Тридекан	Пл	—5,4	28,5	[1]
		Исп	235	—	[1]
$C_{14}H_{30}$	*н*-Тетрадекан	Пл	—5,9	45,07	[1]
		Исп	253,6	—	[1]
$C_{15}H_{32}$	*н*-Пентадекан	Пл	10,0	34,59	[1]
		Исп	270,6	—	[1]

11.2. ПЛАВЛЕНИЕ

Плавление — переход вещества из твердого (кристаллического) состояния в жидкое; обратный переход называется *кристаллизацией*. Зависимость температуры плавления от давления (кривая плавления) начинается в тройной точке и, предположительно, нигде не оканчивается, т. е. не имеет критической точки. В общем случае температура плавления $T_{пл}$ возрастает с ростом давления. Теплоту плавления можно оценить (с погрешностью около 10%) по следующим формулам [24]:

для углеводородов и кислородсодержащих органических соединений

$$L_{пл} = 4{,}95 \cdot T_{пл} \cdot 10^{0{,}00324m} \; кал/моль;$$

для неорганических соединений [25]

$$L_{пл} = nT_{пл}f(T_{пл}) \; кал/г,$$

где m — молекулярная масса; n — число атомов в молекуле вещества; $f(T_{пл})$ — эмпирическая функция:

$T_{пл}$, °К	300	600	1000	1300
$f(T_{пл})$, *кал/(г·град)*	1,9	2,5	3,0	3,2

Для более грубых оценок можно использовать эмпирическую формулу [25]

$$L_{пл} = aT_{пл} \; кал/моль,$$

где $a = 2{,}5$ для элементов; $a = 6$ для неорганических соединений и $a = 13{,}5$ для органических соединений.

Изменение температуры плавления $\Delta T_{пл}$, вызванное изменением давления ΔP, можно оценить по эмпирической формуле Джонсона [24]:

$$\Delta T_{пл} = \frac{T_{пл}\Delta P}{41{,}3L_{пл}\rho} \; град,$$

где $L_{пл}$ — теплота плавления, *кал/г*; ρ — плотность твердой фазы, *г/см*^{3}; P — давление, *атм*. Соответствующее изменение теплоты плавления

$$\Delta L_{пл} = \frac{\Delta P}{41{,}3\rho}\left(1 + \frac{T_{пл}}{L_{пл}}\Delta C_p\right) кал/г,$$

где ΔC_P — скачок теплоемкости при плавлении, *кал/(г·град)*.

Плавление сплавов и твердых растворов характеризуется температурным интервалом плавления. Температура начала плавления называется *солидус*, температура конца плавления — *ликвидус*. Различие между этими температурами определяется составом сплава (раствора). В случае эвтектических сплавов солидус и ликвидус совпадают; при плавлении эвтектических сплавов состав фаз не изменяется.

Плавление неиндивидуальных соединений (полимеров, керамик, стекол и т. п.) имеет сложный характер и происходит в температурной области, зависящей от многих факторов (состава, структуры, предыстории нагревания и т. д.). Температурой плавления называют при этом нижнюю границу температурного интервала плавления. Многие из веществ такого типа (например, стекла, смолы, пластмассы) являются переохлажденными жидкостями, т. е. находятся в термодинамически метастабильном состоянии. При повышении температуры они постепенно размягчаются. Температурой плавления при этом считают верхнюю температурную границу процесса размягчения. Обратный процесс (затвердевание) для переохлажденных жидкостей характеризуется аналогично температурой затвердевания. Важными характеристиками процессов размягчения и затвердевания являются соответственно теплостойкость и морозостойкость. Теплостойкость (по Мартенсу) измеряется наименьшей температурой, при которой изгибающее усилие 50 *кГ/см*^{2} вызывает заметную деформацию. Морозостойкость определяется аналогично.

Таблица 11.3

Температура плавления элементов и соединений при различных давлениях

P, атм	t, °C
Ar, аргон [10]	
400	—179,58
750	—173,2
1 000	—166,75
2 000	—146,69
3 000	—128,3
4 000	—111,2
5 000	— 93,2
6 000	— 80,3
8 000	— 53,2
Bi, висмут [10]	
1 000	267,5
2 000	263,5
4 000	256,5
8 000	238,0
10 000	228,8
Cs, цезий [10]	
1 000	51,9
2 000	70,2
3 000	85,7
4 000	98,5
Ga, галлий [10]	
4 000	21,5
8 000	12,6
12 000	2,5
H_2, водород [26]	
1,7	—259,15
33,2	—258,15
67,3	—257,15
103,6	—256,15
142,2	—255,15
183,1	—254,15
227,6	—253,15
272,4	—252,15
318,6	—251,15
366,1	—250,15
414,5	—249,15
464,2	—248,15
745	—243,15
1422	—233,15
2260	—223,15
3249	—213,15
He, гелий [27]	
37,08	—271,16
800	—261,04
1740	—253,15
3280	—243,15
5140	—233,15
7270	—223,15
^{3}He, гелий-3 [27]	
38,20	—272,15
248	—267,15
664	—263,15
1 210	—257,15
1 850	—253,15
3 410	—243,15
3 554,8	—242,97
Hg, ртуть [10]	
2 000	—28,66
4 002	—18,48
8 018	1,87
10 034	12,06
12 064	22,24
K, калий [10]	
1 000	78,7
2 000	92,4
4 000	115,8
8 000	152,5
10 000	167,0
12 000	179,6
Kr, криптон [27]	
184	—152,9
702	—137,9
1 275	—122,5
2 040	—103,2
2 981	—80,6
N_2, азот [26]	
1 000	—190,7
2 000	—175,7
3 000	—162,2
4 000	—149,7
5 000	—138,2
6 000	—126,7
7 000	—115,7
8 000	—104,2
9 000	— 94,7
Na, натрий [10]	
1 000	105,9
2 000	114,2
4 000	128,8
8 000	155,1
10 000	166,7
12 000	177,5
Ne, неон [27]	
19,5	—248,28
102,7	—247,04

Продолжение табл. 11.3

P, атм	t, °C
380	—243,15
1 300	—233,15
2 250	—223,15
3 420	—213,15
4 850	—203,15
O_2, кислород [26]	
14,5	—218,65
56,8	—218,15
100,2	—217,65
144,9	—217,15
190,8	—216,65
P, фосфор [10]	
1 000	72,7
2 000	99,3
3 000	124,4
4 000	151,3
6 000	191,9
Rb, рубидий [10]	
1 000	57,9
2 000	74,5
3 000	89,1
S, сера [10]	
400	126
1 000	140
Xe, ксенон [27]	
240	—103,15
520	—93,15
805	—83,15
1 090	—73,15
1 380	—63,15
1 665	—53,15
1 960	—43,15
2 250	—33,15
2 605	—23,15
2 905	—13,15
CO_2, углекислый газ [10]	
3 000	— 5,5
4 000	8,5
5 000	21,4
6 000	33,1
8 000	55,2
10 000	75,4
12 000	93,5
CS_2, сероуглерод [8, 10]	
5 000	—51
10 000	0
15 000	46
20 000	89
25 000	130
30 000	170
35 000	209
H_2O, вода [8, 10]	
610	— 5,0
1 000	—88
1 590	—15
2 000	—20,15
2 115*	—22,0*
2 510	—20
3 000	—18,40
3 530*	—17,0*
3 140	—20
3 800	—15
4 510	—10
5 440	— 5
6 380*	0,16*
4 790	—15
5 280	—10
5 810	— 5
6 380*	0,16*
7 000	5
7 640	10
8 000	12,8
9 000	20
10 590	30
12 319	40
15 000	52,5
18 000	66
20 000	73,6
25 000	102,8
30 000	137,0
35 000	166,6
40 000	192,3
$NaCl \cdot 2H_2O$, натрий хлористый [10]	
3 690	17,5
5 290	21,2
7 360	24,3
$SiCl_4$, кремний четыреххлористый [10]	
2 000	—10,0
4 000	42,6
6 000	92,5
8 000	139,4
10 000	183,8
CCl_4, углерод четыреххлористый [10]	
1 000	14,2
2 000	45,9
4 000	102,7
6 000	149,5
8 000	192,1

* Тройная точка.

P, атм	t, °C
$CHCl_3$, хлороформ [8, 10]	
3 000	—12,1
4 000	3,4
5 000	10,0
6 000	32,4
8 000	58,6
10 000	83,7
12 000	107,9
15 000	137,0
20 000	192
25 000	243
$CHBr_3$, бромоформ [10]	
1 000	31,5
2 000	53,8
4 000	94,7
6 000	130,8
8 000	163,2
10 000	194,0
CH_2Cl_2, дихлорметан [8, 10]	
5 000	—46
10 000	0
15 000	42
20 000	82
25 000	120
30 000	157
$C_2H_3O_2Cl$, хлоруксусная кислота [10]	
7 540	151,7
9 321	164,8
$C_2H_4O_2$, уксусная кислота [10]	
1 000	37,7
2 000	54,3
4 000	83
6 000	108,2
8 000	129,6
10 000	148,3
$C_2H_4Br_2$, 1,2-дибромметан [10]	
500	27,45
1 000	34,0
C_2H_5ON, ацетамид [10]	
1 000	93,1
2 000	103,1
4 000	119,0
6 000	133,1
8 000	151,1
10 000	166,55
C_2H_5Br, бромэтан [8, 10]	
5 000	—70
10 000	—29
15 000	5
20 000	34
25 000	58
30 000	80
C_2H_6O, этанол [8, 10]	
5 000	—76
10 000	—39
15 000	—5
20 000	25
25 000	54
30 000	82
35 000	109
C_3H_7Br, 1-бромпропан [8, 10]	
5 000	—56
10 000	0
15 000	34
20 000	71
25 000	105
30 000	138
40 000	197
$C_3H_7O_2N$, уретан [10]	
1 000	57,3
2 000	64,2
4 000	75,8
6 000	98
10 000	138,4
$C_4H_6O_4$, диметилоксалат [10]	
1 000	75,8
2 000	95,8
4 000	132,6
8 000	196,8
C_4H_8O, этилацетат [10]	
12 100	25
23 800	75
$C_4H_{10}O$, бутанол [8, 10]	
5 000	—33
10 000	12
15 000	49
20 000	80
25 000	108
30 000	132
35 000	155
$C_6H_5O_2N$, нитробензол [10]	
1 000	27,9
2 000	48,1
4 000	87,6
6 000	122,3
8 000	153,8
10 000	184,5
C_6H_5Cl, хлорбензол [8, 10]	
2 000	—12
4 000	16,7
5 000	25
6 000	41,9
8 000	64,8
10 000	84,5
15 000	130
20 000	166
25 000	222
C_6H_5Br, бромбензол [10]	
1 000	—12,1
2 000	5,3
4 000	35,9
6 000	62,0
10 000	107,6
$C_6H_5O_3N$, нитрофенол [10]	
500	125,5
1 000	137,7
2 000	159,8
4 000	198,8
C_6H_6, бензол [10]	
1 000	32,5
2 000	56,5
3 000	77,7
4 000	96,6
5 000	114,6
6 000	131,2
8 000	162,2
10 000	190,5
C_6H_6O, фенол [10]	
1 000	53,4
2 000	63,3
4 000	99,8
6 000	131,9
8 000	158,8
10 000	184,6
12 000	209,2
C_6H_7N, анилин [10]	
1 000	13,1
2 000	31,6
4 000	64,5
6 000	93,2
8 000	119,1
12 000	165,3
C_7H_8O, *о*-креозол [10]	
1 000	47,4
4 000	81,8
8 000	118,1
$C_{10}H_8$, нафталин [10]	
285	90
580	100
$C_{12}H_{11}N$, дифениламин [10]	
1 000	79,1
4 000	144,9
8 000	212,9
$C_{13}H_{10}O$, бензофенон [10]	
1 000	74,6
4 000	142
8 000	213,7

Таблица 11.4

Продолжение табл. 11.4

Изменение объема $\Delta V = V_{жидк} - V_{тв}$ вещества при плавлении [8]

Формула	Название	P, атм	ΔV, см³/моль
Элементы			
Al	Алюминий	1	1,51
Ar	Аргон	1	3,16
		1000	2,22
Bi	Висмут	1	—0,72
		1000	—0,74
		10 000	—0,87
Br	Бром	1	4,08
Cd	Кадмий	1	0,73
Cs	Цезий	1	1,8
		1000	1,43
Ga	Галлий	1	—0,37
		4 000	—0,407
		17 000	—0,516
H_2	Водород	0,073	4,85
He	Гелий	102	1,10
Hg	Ртуть	1	0,519
I	Иод	1	5,43
K	Калий	1	1,05
		1000	0,926
		10 000	0,328
Kr	Криптон	1	4,49
Li	Литий	1	0,184
N_2	Азот	1	1,01
		1000	0,81
Na	Натрий	1	0,641
		1000	0,584
		10 000	0,358
Ne	Неон	1	2,19
O_2	Кислород	1	0,82
P	Фосфор	1	0,597
		1000	0,555
Pb	Свинец	1	0,705
Rb	Рубидий	1	1,58
		1000	1,24
S	Сера моноклинная	1	0,92
		400	1,28
	» ромбическая	1000	0,45
Sb	Сурьма	1	0,27
Se	Селен	1	1,41
Sn	Олово	1	0,46
Te	Теллур	1	1,57
Tl	Таллий	1	0,55
Xe	Ксенон	1	5,59
Zn	Цинк	1	0,69
Неорганические соединения			
Al_2O_3	Окись алюминия	1	15,3
B_2O_3	Окись бора	1	—0,81
CO_2	Двуокись углерода	3000	4,7
		10 000	2,65
COS	Сероокись углерода	1	4,88
CS_2	Сероуглерод	1	3,27
		10 000	2,17
H_3PO_4	Фосфорная кислота	1	7,8
NaCl	Хлористый натрий	3690	1,26
		7360	0,41
Na_2SO_4	Сернокислый натрий	1	1,18
PH_3	Фосфористый водород	1	2,25
PCl_3	Треххлористый фосфор	1	4,22
SbI_3	Трехиодистая сурьма	816	12,0
SF_6	Шестифтористая сера	1	20,8
$SiCl_4$	Четыреххлористый кремний	2000	8,87
		10 000	5,2
Органические соединения			
CF_4	Четырехфтористый углерод	1	1,6
CCl_4	Четыреххлористый углерод	1	3,97
		10 000	3,09
$CHCl_3$	Хлороформ	3000	6,33
		10 000	4,18
$CHBr_3$	Бромоформ	1	9,87
		1000	8,97
		10 000	4,20
CH_2O_2	Муравьиная кислота	1	5,29
CH_4NO_2	Карбамид	1	0,6
C_2F_4	Тетрафторэтилен	1	13,5
C_2F_6	Гексафторэтан	1	6,8
$C_2F_2Br_4$	Дифтортетрабромэтан	1	6,1
$C_2H_3O_2Cl$	Хлоруксусная кислота	1	10,11
$C_2H_4O_2$	Уксусная кислота	1	9,37
		1000	6,89
		10 000	3,21
$C_2H_4Br_2$	Дибромэтан	1000	7,14
C_2H_5ON	Ацетамид	1	6,486
		1000	5,033
		10 000	2,434
C_2H_5Br	Бромэтан	1	4,53
C_2H_6O	Этиловый спирт	2000	2,00
$C_3H_6O_2$	Пропионовая кислота	1	9,13
C_3H_7Br	1-Бромпропан	2000	2,82
C_4H_8O	Этилацетат	12 100	2,14
$C_4H_8O_2$	Масляная кислота	1	4,19
$C_4H_{10}O$	Бутиловый спирт	10 000	3,54
$C_5H_{10}O_2$	Валериановая кислота	1	10,9
$C_6H_5O_2N$	Нитробензол	1	10,1
		1000	9,019
		10 000	4,959
C_6H_5Cl	Хлорбензол	1	8,0
C_6H_5Br	Бромбензол	1	8,86
C_6H_6	Бензол	1	10,29
		1000	3,01
		10 000	3,30
C_6H_7N	Анилин	1	7,95
		1000	7,30
		10 000	4,20
C_6H_{12}	Циклогексан	1	5,64
$C_6H_{12}O_2$	Капроновая кислота	1	13,66
C_7H_8O	*о*-Креозол	1	8,95
C_7H_8O	*м*-Креозол	1	6,95
C_7H_{14}	Метилциклогексан	13 800	3,47
C_8H_{10}	*п*-Ксилол	1	2,08
$C_{10}H_8$	Нафталин	1	18,74
$C_{10}H_{20}O$	Ментол	1	10,2
$C_{12}H_{11}N$	Дифениламин	1	16,21
$C_{13}H_{10}O$	Бензофенон	1	16,47
$C_{13}H_{12}$	Дифенилметан	1	15,05
$C_{14}H_{14}$	Дифенилэтан	1	20,59
$C_{19}H_{16}$	Трифенилметан	1	18,15

Таблица 11.5

Температуры плавления (солидус t_c и ликвидус $t_л$) сталей и технических сплавов [28, 29, 30]

Марка	t_c, °С	$t_л$, °С
Стали жаростойкие		
Х13 ÷ Х28, Х25Т	—	1500
Х18Н9, Х23Н18	—	1410
Х23Н13	—	1440
0Х18Н10	—	1410
Х18Н9Т	—	1425
Х18Н10Т	—	1400
Х20Н14С2, Х25Н20С2	—	1400
4Х10С2М	—	1480
Латуни		
Л 62	898	905
Л 70	915	955
Л 80	965	1000
Л 90	1020	1045
Л 96	1050	1070
ЛО 59-1 ÷ ЛО 62-1	885	906
ЛО 70-1	900	935
ЛО 90-1	995	1015
ЛО 64-2 ÷ ЛО 74-3	885	910
ЛК 80-3; ЛС 59-1	—	900
ЛС 74-3	—	965
ЛА 77-2	935	975
ЛА 85-0,5	—	1020
ЛАН 59-3-2	892	956
ЛАЖ 60-1-1	—	904
ЛМц 58-2	865	880
ЛЖМц 59-1-1	885	900
ЛН 65-5	—	960
Бронза		
Бр А5	—	1075
Бр А7	—	1050
Бр А10	—	1040
Бр АЖ9-4	—	1040
Бр АЖН10-4-4	—	1084
Бр АЖМц10-3-1,5	—	1045
Бр С30	—	970
Бр Мц5	—	1047
Бр Б2 (бериллиевая)	—	1000
Бр СФ6,5-0,4	—	995
Бр ОФ4-0,25	—	1060
Бр ОЦ10-1	—	935
Бр ОЦ10-2	—	1015
Бр ОЦС6-6-3	—	967
Бр ОЦС5-5-5	—	1000
Бр ОЦС4-4-2,5	—	1020
Бр ОЦСН 3-7-5-1	—	1022
Бр О10	—	1020
Алюминиевые сплавы		
АЛ1	535	629
АЛ10В	488	604
Д1	513	641
Д16	502	638
АВ (авиаль)	543	652
Д18П	510	648
АК-2, АК-8	509	638
В-95	477	638
АМц	643	654
АМг	627	652
АМг3, АМг5, АМг5П	568	638

Продолжение табл. 11.5

Марка	t_c, °С	$t_л$, °С
АМг7	550	620
АСМ	657	750
АН-2,5	640	650
Магниевые сплавы		
МЛ 1, МЛ 7	505	610
МЛ 2	645	650
МЛ 3	561	628
МЛ 4	455	610
МЛ 5	492	607
МЛ 6	440	600
МЛ 11	593	843
МЛ 12	560	685
МА 1	645	646
МА 2	565	632
МА 3	510	615
МА 5	482	602
МА 8	645	650
ВМ 65-1	516	634
Медноникелевые сплавы		
М0	—	1083
М1, М3, М4	—	1080
МН 19	1130	1190
МНА 13-3	—	1183
МНЖ 5-1	1080	1120
МНЦ 15-20	—	1080
МНЦС 17-18-1,8	965	1120
МНЖМц 30-0,8-1	1170	1230
Никелевые сплавы		
Никелевая бронза (НМ-8)	—	1190
» » (НМ 56,6)	—	1290
ТБ (НМ 89)	1120	1170
ТП (НМ 99,4)	—	1084
НМц 2,5	—	1440
НМц 5	—	1410
НММц 3-12	960	1010
Манганин (НММц 85-12)	—	1010
Константан (НММц 58,5-1,5)	—	1270
Алюмель (НМцАК 2-2-1)	—	1450
Хромель (Нх 9,5)	—	1435
Ферронихром (НХМц16-15-1,5)	—	1400
Монель (НМЖМц 28-2,5-1,5)	—	1370
Монель К	—	1349
Припои и баббиты		
ПОС 90	183	222
ПОС 40	183	235
ПОС 18	183	277
ПОС 4-6	245	265
Б 90	241	342
Б 16, БС	240	410
Б 6	232	416
Б 83	240	370
Б Н	240	400
Б К	320	440
Сплавы серебра, золота, платины		
Ср М 500	850	—
Ср М 960	927	—
Зл М 980	1060	—
ПСр 25	755	—
Зл Ср 600	963	—
Зл Пл 10	1200	—

Таблица 11.6

Температура плавления (солидус) двухкомпонентных сплавов при давлении 1 *атм* [8]

Компоненты сплава		Температура плавления, °С, при содержании компонента *B*, %								
A	*B*	10	20	30	40	50	60	70	80	90
Pb	Sn	295	276	262	240	220	190	185	200	216
Pb	Tl	710	790	880	917	760	600	480	410	425
Pb	Ag	460	545	590	620	650	705	775	840	905
Pb	Na	360	420	400	370	330	290	250	200	130
Pb	Cu	870	920	925	945	950	955	985	1005	1020
Pb	Sb	250	275	330	395	440	490	525	560	600
Al	Sb	750	840	925	945	950	970	1000	1040	1010
Al	Cu	630	600	560	540	580	610	755	930	1055
Al	Au	675	740	800	855	915	970	1025	1055	675
Al	Ag	625	615	600	590	580	575	570	650	750
Al	Zn	640	620	600	580	560	530	510	475	425
Al	Fe	860	1015	1110	1145	1145	1220	1315	1425	1500
Al	Sn	645	635	625	620	605	590	570	560	540
Sb	Bi	610	590	575	555	540	520	470	405	330
Sb	Ag	595	570	545	520	500	505	545	680	850
Sb	Sn	600	570	525	480	430	395	350	310	255
Sb	Zn	555	510	540	570	565	540	525	510	470
Ni	Sn	1380	1290	1200	1235	1290	1305	1230	1060	800
Na	Bi	425	520	590	645	690	720	730	715	570
Na	Cd	125	185	245	285	325	330	340	360	390
Cd	Ag	420	520	610	700	760	805	850	895	940
Cd	Tl	300	285	270	262	258	245	230	210	235
Cd	Zn	280	270	295	313	327	340	355	370	390
Au	Cu	910	890	895	905	925	975	1000	1025	1060
Au	Ag	1062	1061	1058	1054	1049	1039	1025	1006	982
Au	Pt	1125	1190	1250	1320	1380	1455	1530	1610	1685
K	Tl	133	165	188	205	215	220	240	280	305
Cu	Ni	1180	1240	1290	1320	1335	1380	1410	1430	1440
Cu	Ag	1035	990	945	910	870	830	788	814	875
Cu	Sn	1055	890	755	725	680	630	580	530	440
Cu	Zn	1040	955	930	900	880	820	780	700	580
Ag	Zn	850	755	705	690	660	630	610	570	505
Ag	Sn	870	750	630	550	495	450	420	375	300

Таблица 11.7

Температура плавления легкоплавких сплавов

Эвт — эвтектические сплавы или близкие к ним; для неэвтектических сплавов приводятся значения солидуса.

Сплав	$t_{пл}$, °С	Литература
(97,2% Hg; 2,8% Na), эвт	—48,2	[31]
(94,5% Cs; 5,5% Na), эвт	—30	[31]
(93% Cs; 7% Na), эвт	—28	[31]
(78% K; 22% Na), эвт	—11,4	[31]
(80% K; 20% Na),	—10	[8]
(91,8% Rb; 8,2% Na), эвт	—4,5	[31]
(70% K; 30% Na)	—3,5	[8]
(60% K; 40% Na)	5	[8]
(50% K; 50% Na)	11	[8]
(90% K; 10%Na)	17,5	[8]
(56% Na; 44% K), эвт	19	[31]
(85,2% Na; 14,8% Hg), эвт	21,4	[31]
(60% Na; 40% K)	26	[8]
(70% Na; 30% K)	41	[8]
(50% Na; 50% Hg)	45	[8]
(44,7% Bi; 19,1% In; 8,3% Sn; 5,3% Cd; 22,6% Pb), эвт	47	[32]
(70% Hg; 30% Na)	55	[8]
(49,4% Bi; 21% In; 11,6% Sn; 18% Pb), эвт	57	[32]

Продолжение табл. 11.7

Сплав	$t_{пл}$, °С	Литература
(80% Na; 20% K)	58	[8]
(60% Na; 40% Hg)	60	[8]
(53,5% Bi; 19% Sn; 17% Pb; 10,5% Hg)	60	[8]
(92,9% Na; 7,1% Tl), эвт	64	[31]
Сплавы Вуда:		
(50,1% Bi; 24,9% Pb; 14,6% Sn; 10,8% Cd)	65,5	[8]
(50,4% Bi; 25,1% Pb; 14,3% Sn; 10,2% Cd)	67,5	[8]
(50% Bi; 25% Pb; 12,5% Sn; 12,5% Cd)	68	[8]
(70% Na; 30% Hg)	70	[8]
(49,5% Bi; 10,1% Cd; 27,27% Pb; 13,13% Sn), эвт	70	[8]
(33,7% Bi; 65,3% In), эвт	72	[32]
(50% Bi; 34,4% Pb; 9,4% Sn; 6,2% Cd)	76,5	[8]
(90% Na; 10% K)	77	[8]
(58% Bi; 17% In; 25% Sn), эвт	79	[32]
(80% Na; 20% Hg)	80	[8]

Продолжение табл. 11.7

Сплав	$t_{пл}$, С	Литература
(96,7% Na; 3,3% Au), эвт	80	[31]
(90% Na; 10% Hg)	90	[8]
(50% Na; 50% Hg)	90	[8]
(55,2% Bi; 33,3% Pb; 11,5% Tl), эвт	91	[32]
(49,1% Bi; 9,2% Tl; 23,4% Sn, 18,2% Cd), эвт	94,6	[32]
(52,5% Bi; 15,5% Sn; 32% Pb), эвт	96	[32]
Сплав Розе (50% Bi; 28% Pb; 22% Sn)	100	[32]
(54,4% Bi; 25,8% Pb; 19,8% Sn), эвт	101	[8]
(67% Bi; 33% Li), эвт	109	[32]
(40% Bi; 40% Pb; 20% Sn)	113	[8]
(50% Bi; 35,7% Sn; 14,3% Tl), эвт	124	[32]
(56,5% Bi; 43,5% Sb), эвт	125	[32]
(43% Bi; 43% Pb; 14% Sn)	128	[8]
(56% Bi; 40% Sn; 4% Zn), эвт	130	[32]
(90% K; 10% Tl)	133	[32]
(70% Hg; 30% K)	135	[8]
(57% Bi; 43% Sn), эвт	138	[8]
(57% Bi; 43% Tl), эвт	139	[32]
(60% Bi; 40% Cd), эвт	144	[8]
(50% Bi; 50% Pb)	145	[8]
(66,2% Bi; 23,1% Sn; 10,7% Pb)	148	[8]
(44,8% Pb; 41,5% Sn; 13,7% Bi), эвт	160	[8]
(80% K; 20% Tl)	165	[8]
(68% Sn; 32% Cd), эвт	177	[8]
(70% Na; 30% Hg)	181	[8]
(62% Sn; 38% Pb), эвт	183	[8]
(44,2% Bi; 9,8% Pb; 48% Tl), эвт	186	[32]
(47,5% Bi; 52,5% Tl), эвт	188	[32]
(76,5% Bi; 23,5% Tl), эвт	198	[32]
(97% Bi; 3% Pb), эвт	218	[32]
(62,7% Tl; 37,3% Na), эвт	238	[32]
(82% Bi; 18% Au)	240	[32]
(99% Bi; 1% Mg)	243	[32]
(97,3% Bi; 2,7% Zn)	254	[32]
(97,5% Bi; 2,5% Ag)	262	[32]

Таблица 11.8

Температура плавления высокотемпературных керамик [1.33]

Вещество	$t_{пл}$, °С	Вещество	$t_{пл}$, °С
HfC	3890±150	NbB_4	2900
TaC	3880±150	VC	2810
ZrC	3530	HfO_2	2790
NbC	3480	W_2B	2770±80
HfB_2	3250±100	W_2C	2730±15
TiN	3205	UO_2	2730
TiC	3147	WC	2720
TaB_2	3100	MoC	2700
TaN	3087±50	ZrO_2	2700
NbB_2	3000	ZrB_{12}	2680
HfN	2982	YN	2670
ZrN	2982	ThC_2	2656±75
TiB_2	2980	ScN	2650
ThO_2	2950	UN	2650±100

Продолжение табл. 11.8

Вещество	$t_{пл}$, °С	Вещество	$t_{пл}$, °С
ThN	2630±50	ScB_2	2250
CoO	2603	Mo_3B_2	2250
NdB_6	2540	VB	2250
SmB_6	2540	Zr_5Si_3	2250
LaB_6	2530	UC_2	2250
Ta_4Si	2510	SrB_6	2235
MgO	2500	UB_{12}	2235
Ta_5Si_3	2500	CaB_6	2230
UB_4	2495	BaB_6	2230
SrO	2460	Ba_3N_2	2220
CeS	2450	ThB_4	2210
BeO	2440	Be_3N_5	2205
Cr_3O_2	2440	BaS	2205
Nb_5Si_3	2440	Be_3N_2	2200
TaB	2430	Ti_2B	2200
ThS	2425	CrB_2	2200±50
TaS	2425	$TaSi_2$	2200
Nb_2N	2420	Nd_2S_3	2200
Y_2O_3	2410	GeB_6	2190
AlN	2400	WSi_2	2165
U_2C	2400	ThB_6	2150
VB_2	2400±50	ZrSi	2150
WB (α)	2400±100	Mo_2B	2140
UB_2	2385	NdS	2140
VN	2360	Ti_5Si_3	2120
MoB	2350	GdB_6	2100
UC	2315	Th_3N_4	2100
La_2O_3	2310	MoB_2	2100
YC_2	2300±50	La_2S_3	2100
W_2B_5	2300±50	V_3B_2	2070
BeB_6	2300	Al_2O_3	2050
YB_6	2300	CrB	2050
CaC_2	2300	Ce_3S_4	2050±75
Th_2S	2300	$MoSi_2$	2030
Th_4S_7	2300	TiO	2020
NbB	2280	$Al_2O_3 \cdot BaO$	2000

Таблица 11.9

Температурная стойкость различных веществ [10,34]

Обозначения: $t_{от}$ — температура отвердевания; $t_н$ — нагревостойкость; $t_р$ — температура размягчения; $t_{пл}$ — температура плавления.

Вещество	Температура, °С
Смолы	
Анилинформальдегидные	$t_н$ = 85
Карбамидные	$t_н$ = 75
Кремнийорганические	$t_н$ = 200
Полиакрилаты	$t_н$ = 65
Полиамидные	$t_н$ = 100
Полистирольные	$t_н$ = 80
Политетрафторэтиленовые	$t_н$ = 190
Полихлорвиниловые	$t_н$ = 60
Полиэтиленовые	$t_н$ = 100
Полиэфирные	$t_н$ = 115
Фенолформальдегидные	$t_н$ = 115
Эпоксидные	$t_н$ = 135

Продолжение табл. 11.9

Вещество	Температура, °С
Полимеры и целлюлозные материалы	
Винипласт	$t_н = 65$
Капрон	$t_н = 60$
	$t_{пл} = 215$
Лавсан	$t_н = 175$
	$t_р = 230$
	$t_{пл} = 265$
Нейлон	$t_{от} = 49$
	$t_н = 60$
	$t_{пл} = 225$
Органическое стекло	$t_н = 55$
	$t_{пл} = 120$
Пенопласт	$t_н = 130$
Поливниилхлорид	$t_{от} = -18$
	$t_{пл} = 100$
Полипропилен	$t_{пл} = 170$
Полиэтилен (высокого давления)	$t_н = 110$
	$t_{пл} = 115$
Полиэтнлен (иизкого давления)	$t_{пл} = 135$
Совенит	$t_н = 110$
Терилен	$t_{от} = 67$
	$t_{пл} = 264$
Триацетатцеллюлоза	$t_н = 110$
Фторопласт-3	$t_н = 90$
Фторопласт-4 (тефлон)	$t_{от} = -113$
	$t_н = 250$
	$t_р = 400$
Целлофан	$t_н = 60$
Целлулоид	$t_н = 40$
Энант	$t_{от} = 190$
	$t_{пл} = 225$
Прессованные и строительные материалы	
Амннопласты	$t_н = 110$
Амннопласты теплостойкие ВЭИ	$t_н = 170$
Волокнит	$t_н = 115$
Гетинакс	$t_н = 150$
Глины обыкновенные	$t_р > 1100$
» огнеупорные	$t_р > 1580$
Дельта-древесина	$t_н = 140$
Стекловолокнит	$t_н = 170$
Стеклотекстолит СТК	$t_н = 170$
Текстолит	$t_н = 130$
Туф лавовый	$t_{пл} = 1200$
Фенопласты	$t_н = 120$
Фибра	$t_н = 100$
Шамот	$t_{пл} > 1500$
Стекла, слюда	
Стекло оконное	$t_н = 400$
№ 23	$t_р = 550$
№ 846	$t_р = 600$
нейтральное	$t_р = 600$
белое	$t_р = 560$
№ 59'''	$t_р = 600$
кварцевое	$t_н = 1500$
	$t_р = 1750$
титановое	$t_н = 1000$
Пирекс	$t_р = 660$
Слюда природная	$t_н = 600$
» синтетическая (фторофлогопит)	$t_н = 800$

Продолжение табл. 11.6

Вещество	Температура, °С
Масла, природные смолы, лаки	
Вазелин	$t_{пл} = 52$
Воск	$t_{от} = 60$
	$t_{пл} = 64$
Канифоль	$t_{пл} = 68$
Мазут	$t_р = 40$
Масло:	
авиационное	$t_{от} < -14$
вазелиновое	$t_{от} < -20$
веретенное	$t_{от} < -15$
конопляное	$t_{от} < -20$
машинное	$t_{от} < -10$
солярное	$t_{от} < -20$
трансформаторное	$t_{от} < -45$
Нефть	$t_{пл} = -20 \div 10$
Олеин	$t_{пл} < -6$
Парафин	$t_{пл} = 45$
Стеарин	$t_р = 33$
Шеллак	$t_{пл} = 110$
Янтарь	$t_{пл} = 360$
Различные материалы	
Бакелит	$t_р = 100$
Битум	$t_р = 70$
Каолин	$t_{пл} = 1700$
Эбонит	$t_н = 70$

11.3 КИПЕНИЕ

Процесс перехода вещества из жидкого состояния в газообразное называется испарением. Испарение, при котором давление паровой фазы равно внешнему давленню, называется кипением; давленне при этом называется *давлением насыщенного пара*. Зависимость температуры кнпения $T_{кип}$ от внешнего давления называется *ортобулической кривой*, а обратная зависимость давления насыщенных паров от температуры — *кривой упругости пара*. Кипение возможно в интервале от температуры тройной точки до критической температуры $T_{кр}$; с увеличением давления $T_{кип}$ увеличивается. Для многих веществ выполняется эмпирическое правило Гульберга—Гюн

$$T_{кип}^{(1)} \approx 0{,}64\, T_{кр},$$

где $T_{кип}^{(1)}$ — температура кипения при $P = 1$ *ата*.

Теплота испарения при кипенин называется *теплотой испарения* в точке кипения $L_{кип}$. С увеличением давления и температуры кипения $L_{кип}$ уменьшается до $L_{кип} = 0$ прн $T = T_{кр}$. Для оценки $L_{кип}$ можно нспользовать формулу

$$L_{кип} = R \frac{d \ln P}{d\,(1/T)}, \quad T \ll T_{кр},$$

где R — газовая постоянная. Эта формула является частным случаем уравнения Клапейрона—Клаузиуса.

Для неполярных веществ найдена эмпирическая зависнмость [24]

$$L_{кип} = 1{,}987\, T_{кип}^{(1)} \ln 82{,}06\, T_{кип}^{(1)} \ \textit{кал/моль},$$

которая выполняется с погрешностью 2—3%.

Таблица 11.10

Теплота испарения при разных температурах кипения

t, °C	$L_{кип}$, ккал/моль
Элементы	
Ar, аргон [27]	
—183	1,524
—173	1,437
—163	1,337
—153	1,212
—143	1,050
—138	0,940
—133	0,795
—128	0,635
Cl_2, хлор [35]	
—90	5,332
—56,67	5,017
—34,04	4,809
—12,22	4,599
10,0	4,366
43,33	3,958
65,56	3,623
87,78	3,202
110,00	2,632
132,22	1,711
137,78	1,321
143,33	0,546
H_2, водород [26]	
—251	0,211
—249	0,201
—247	0,189
—245	0,172
—243	0,147
—241	0,101
—240,4	0,065
—240	0,040
—240,05	0,030
He, гелий [27]	
—271,65	0,02152
—271,45	0,02108
—271,15	0,02232
—270,95	0,02180
—270,75	0,02108
—270,55	0,02232
—270,35	0,02248
—270,15	0,02256
—269,95	0,02252
—269,75	0,02236
—269,55	0,0220
—269,35	0,02152
—269,15	0,0208
^{3}He, гелий-3 [27]	
—272,69	0,00736
—272,45	0,00841
—272,15	0,00910
—271,75	0,01032
—271,35	0,01102
—270,95	0,01105
—270,55	0,01071
—270,15	0,00788
—269,95	0,00591
—268,95	0,00495
—268,65	0,00437
—268,40	0,00363
—268,15	0,00190
Hg, ртуть [35]	
118,5	14,552
161,5	14,396
207,6	14,336
241,0	14,292
328,0	14,176
451,0	13,998
627,1	13,660
677,0	13,534
K, калий [35]	
327	20,057
527	19,273
727	18,357
927	17,417
1027	16,945
1127	16,469
1227	15,982
1327	15,475
1427	14,944
1527	14,387
Kr, криптон [26, 27]	
—153	2,158
—133	1,996
—113	1,767
—93	1,475
—88	1,379
—83	1,266
—73	0,838
Li, литий [35]	
527	36,883
727	36,008
927	34,860
1127	33,649
1327	32,473
1527	31,409
1727	30,485
N_2, азот [34]	
—208	1,421
—193	1,314
—183	1,213
—173	1,102
—168	1,028
—163	0,933
—158	0,806
—153	0,622

Продолжение табл. 11.10

t, °C	$L_{кип}$, ккал/моль
Na, натрий, [35]	
400	23,603
800	21,079
1100	19,563
1300	18,657
1400	18,199
1500	17,735
Ne, неон [27]	
—248	0,4325
—243	0,3915
—241	0,3585
—238	0,3415
—235,65	0,3060
—233	0,2555
—230,65	0,1815
O_2, кислород [26]	
—203	1,760
—183	1,6032
—163	1,440
—153	1,280
—143	1,152
—133	0,960
—123	0,640
S, сера [34]	
200	2,408
300	2,208
400	2,158
500	2,296
600	2,595
620	2,666
640	2,741
646	2,764
Неорганические соединения	
B_2H_6, диборан [35]	
—143	3,941
—123	3,737
—95	3,428
—53	2,899
—13	2,088
7	1,336
9	1,216
11	1,074
13	0,897
15	0,651
CO окись углерода [36]	
—188	1,396
—183	1,328
—178	1,260
—173	1,192
—168	1,125
—163	1,058
—158	0,985
—153	0,884
—148	0,718
—143	0,465
CO_2, двуокись углерода [36]	
—50	3,544
—30	3,184
—20	2,982
—10	2,750
0	2,469
10	2,027
20	1,632
25	1,255
27,5	0,992
30	0,662
H_2O, вода [35]	
0	10,751
40	10,345
100	9,702
180	8,663
260	7,142
340	4,415
370	1,885
372	1,445
374	0,602
NH_3, аммиак [36]	
—50	5,756
—30	5,525
0	5,129
30	4,653
60	4,055
80	3,536
100	2,873
120	1,921
130	0,952
$SnCl_4$, четыреххлористое олово [34]	
100	8,226
140	7,537
180	6,812
200	6,371
220	5,905
240	5,413
260	4,792
280	4,040
Органические соединения	
CH_4, метан [35]	
—180	2,070
—160	1,950
—150	1,880
—140	1,820
—130	1,740
—120	1,630
—110	1,500
—100	1,300
—90	0,970
CH_4O, метиловый спирт [37]	
0	9,248
50	8,768

t, °C	$L_{кип}$, ккал/моль
100	7,872
130	7,184
160	6,336
200	4,864
210	4,320
220	3,616
230	2,688
CH_3Cl, хлористый метил (фреон-40) [38]	
—60	5,500
—40	5,300
—20	5,060
0	4,840
20	4,568
40	4,268
50	4,107
60	3,938
$CHFCl_2$, фтордихлорметан (фреон-21) [38]	
—40	6,508
—20	6,253
0	6,008
10	5,885
20	5,758
30	5,625
35	5,559
40	5,488
CHF_2Cl, дифторхлорметан (фреон-22) [38]	
—100	5,487
—80	5,259
—50	4,919
—20	4,541
0	4,248
20	3,870
40	3,388
50	3,105
$CFCl_3$, фтортрихлорметан (фреон-11) [38]	
—40	6,610
—20	6,399
0	6,188
20	5,957
30	5,848
40	5,712
46	5,644
50	5,576
CF_3Cl, трифторхлорметил (фреон-13) [38]	
—140	4,310
—90	3,834
—50	3,289
—20	2,721
0	2,234
15	1,708
20	1,439
25	1,205
CF_2Cl_2, дифтордихлорметан (фреон-12) [38]	
—70	5,050
—40	4,897
0	4,439
40	3,784
80	2,800
100	1,938
105	1,606
110	0,905
C_2H_6, этан [13]	
—100	3,568
—80	3,395
—40	2,918
—20	2,599
0	2,181
20	1,530
30	0,869
31	0,880
32	0,425
C_2H_4, этен (этилен) [35]	
—120	3,356
—80	2,940
—40	2,385
0	1,282
5	0,954
7	0,754
8	0,616
9	0,320
9,5	0,274
C_2H_2, ацетилен [13]	
—80	4,070
—60	3,730
—40	3,350
—20	2,910
—10	2,680
0	2,440
10	2,170
20	1,800
30	1,190
C_2H_6O, этиловый спирт [35]	
0	11,518
50	10,994
100	10,184
140	9,163
170	8,110
200	6,573
220	5,147
230	4,255
240	3,082
$C_2H_4O_2$, уксусная кислота [37]	
20	5,046
50	5,304
80	5,496
120	5,592
160	5,394
200	5,112
240	4,692
260	4,350
280	3,810

Продолжение табл. 11.10

t, °C	$L_{кип}$, ккал/моль
$C_2F_3Cl_3$, трифтортрихлорэтан (фреон-113) [38]	
—30	7,421
—10	7,180
0	7,049
10	6,918
30	6,659
50	6,380
70	6,101
80	5,952
$C_2F_4Cl_2$ тетрафтордихлорэтан (фреон-114) [38]	
—40	5,950
—20	5,797
0	5,610
20	5,321
30	5,185
40	5,015
50	4,828
60	4,641
C_3H_8, пропан [13]	
—180	5,690
—140	5,400
—100	5,080
—60	4,690
—20	4,220
20	3,640
60	2,720
80	1,970
90	1,370
C_3H_6, пропилен [13]	
—180	5,600
—120	5,120
—60	4,550
0	3,800
20	3,470
50	2,780
70	2,120
80	1,660
90	0,700
C_3H_4, аллен [13]	
—130	5,610
—100	5,440
—50	5,150
—20	4,370
20	4,150
60	3,380
100	2,220
110	1,650
120	0,450
C_3H_4, метилацетилен [13]	
—100	6,090
—60	5,700
—30	5,350
0	4,960
30	4,490
60	3,890
100	2,710
110	2,250
120	1,630
C_3H_8O, пропиловый спирт [37]	
70	12,39
120	10,78
150	9,52
180	8,12
200	7,14
220	5,95
240	4,41
250	3,5
260	2,31
C_4H_{10}, бутан [13]	
—130	6,570
—90	6,250
—50	5,880
0	5,320
50	4,650
90	3,820
130	2,500
140	1,960
150	0,980
C_4H_8, бутен-1 [13]	
—180	6,810
—150	6,630
—100	6,260
—50	5,780
0	5,190
50	4,440
100	3,290
130	2,160
140	1,500
C_4H_8, 2-метилпропен (изобутилен) [13]	
—100	6,210
—50	5,790
0	5,240
50	4,470
100	3,310
120	2,600
130	2,100
140	1,350
C_4H_6, бутин-1 (этилацетилен) [13]	
—120	7,100
—100	6,950
0	5,050
100	4,510
150	3,270
170	2,500
180	1,890
190	0,470
$C_4H_{10}O$, диэтиловый эфир [37]	
30	5,408
60	5,024
90	4,524
120	4,00
150	3,296
160	2,944
170	2,538
180	2,048
190	1,248

t, °C	$L_{кип}$, ккал/моль
$C_4H_8O_2$, этилацетат [37]	
80	7,568
110	7,04
140	6,38
160	5,85
180	5,28
200	4,58
220	3,74
230	3,17
240	2,38
C_5H_{12}, пентан [13]	
—120	7,730
—80	7,410
—60	7,240
—40	7,060
—20	6,850
0	6,630
20	6,380
30	6,250
40	6,120
C_5H_{12}, изопентан [13]	
—150	7,560
—130	7,450
—110	7,310
—90	7,160
—50	6,790
—30	6,580
10	6,130
30	5,870
40	5,720
C_5H_{10}, пентен-1 [13]	
—160	7,710
—80	7,170
0	6,390
50	5,770
100	4,990
150	3,890
180	2,640
190	2,000
200	0,800
C_5H_{10}, циклопентан [13]	
—90	7,870
—50	7,550
0	7,100
50	6,550
100	5,870
150	4,960
210	3,140
220	2,640
230	1,930
C_5H_{10}, *цис*-пентен-2 [13]	
—150	8,240
—100	7,860
—50	7,400
0	6,880
50	6,200
100	5,320
150	4,030
180	2,740
190	2,000

t, °C	$L_{кип}$, ккал/моль
C_5H_8, циклопентен [13]	
—120	8,080
—60	7,580
0	7,020
50	6,470
100	5,740
150	4,750
200	3,170
210	2,670
220	1,970
C_5H_8, 2-метилбутадиен-1,3 (изопрен) [13]	
—140	7,820
—100	7,560
0	6,580
100	5,070
150	3,810
170	3,070
180	2,560
190	1,840
C_6H_{14}, гексан [13]	
—90	9,460
—30	8,110
20	7,580
80	6,770
140	5,510
190	4,060
210	3,200
220	2,600
230	1,700
C_6H_{14}, метилпентан [13]	
—150	8,630
—90	8,230
—30	7,720
30	7,420
90	6,170
150	4,920
200	3,160
210	2,560
220	1,630
C_6H_{12}, гексен-1 [13]	
—100	8,550
—50	8,100
0	7,590
50	6,970
100	6,190
150	5,130
200	3,420
210	2,990
220	2,130
C_6H_{12}, циклогексан [13]	
10	8,020
50	7,590
100	6,970
150	6,110
200	4,960
250	3,440
260	3,000
270	2,300
280	0,850

t, °C	$L_{кип}$, ккал/моль
C_6H_{10}, циклогексен [13]	
—100	9,120
0	8,240
50	7,720
100	7,110
150	6,310
200	5,210
250	3,440
260	2,880
270	2,070
C_6H_6, бензол [35]	
10	8,250
50	7,750
100	7,070
150	6,300
200	5,350
250	3,880
260	3,430
270	2,900
280	2,150
C_7H_6, гептан [13]	
—90	9,760
—60	9,560
0	8,990
60	8,200
90	7,740
180	5,950
240	3,810
250	3,080
260	2,160
C_7H_{14}, гептен [13]	
—180	9,480
—50	9,200
0	8,710
50	8,110
100	7,390
150	6,480
200	5,180
250	2,860
260	1,830
C_7H_{14}, метилциклогексан [13]	
—120	9,670
—100	9,530
0	8,660
100	7,580
150	6,860
200	5,890
250	4,450
280	3,040
290	2,260
C_7H_{14}, 1,1-диметилциклопентан [13]	
—60	8,890
0	8,360
50	7,800
100	7,140
150	6,290
200	5,100
250	3,070
260	2,320

t, °C	$L_{кип}$, ккал/моль
C_7H_8, толуол [13]	
—90	9,950
0	9,310
100	8,160
150	7,450
200	6,560
250	5,330
300	3,240
310	2,470
320	0,670
C_8H_{18}, октан [13]	
—30	10,480
30	9,850
90	8,920
150	7,770
180	7,120
210	6,340
240	5,710
260	4,490
290	2,200
C_8H_{16}, октен-1 [13]	
—100	10,720
0	9,770
50	9,190
100	8,150
150	7,700
200	6,560
250	4,880
280	3,180
290	2,140
C_8H_{16}, этилциклогексан [13]	
—100	10,730
—50	10,370
0	9,930
100	8,760
200	7,110
250	5,840
300	3,750
310	3,050
320	1,950
C_8H_{10}, *м*-ксилол [35]	
—40	10,700
30	10,140
100	9,310
150	8,570
200	7,690
250	6,610
300	4,900
330	3,180
340	2,100
C_8H_{10}, этилбензол [13]	
—90	10,070
0	11,350
100	9,080
150	8,390
200	7,580
250	6,500
300	4,860
330	3,100
340	2,030

Продолжение табл. 11.10

t, °C	$L_{кип}$, *ккал/моль*	t, °C	$L_{кип}$, *ккал/моль*
C_8H_8, винилбензол (стирол) [13]		Силикон (диэтилполисилооксан) [35]	
—30	10,820		
30	10,290	0	31,4
100	9,510	20	31,2
200	8,020	40	31,1
250	6,980	60	31,0
300	5,440	80	30,9
340	3,390	100	30,7
350	2,440	120	30,6
		140	30,5
C_9H_{12}, изопропилбензол (кумол) [13]		160	30,4
		180	30,2
		200	30,1
—90	11,780	220	30,0
0	10,950	240	29,8
100	9,780	260	29,6
200	8,300	280	29,3
250	7,260	290	29,2
300	5,760	300	29,1
350	3,020		
360	1,600		
$C_{12}H_{10}$, дифенил [35]		Даутерм (дифенильная смесь*) [35]	
260	11,55		
280	10,78		
310	10,01	20	90
340	9,394	60	86
350	9,163	90	83,5
		120	80,5
$C_{15}H_{16}$, моноизопропилдифенил [35]		150	78,5
		180	76,5
		210	74
100	15,092	240	71
140	14,70	260	68,5
180	14,31	280	65,5
220	14,11	300	63
260	13,52	320	60,5
300	12,94	340	58
320	12,54	360	55
340	11,96	380	52,5
360	11,37	390	51
380	10,78	400	49,5
400	10,0		

* Эвтектическая, состав: 73,5% дифенилового эфира + 26,5% дифенила.

11.4. КИПЕНИЕ И ЗАТВЕРДЕВАНИЕ РАСТВОРОВ

Температура затвердевания (кристаллизации) $T_{кр.р}$ раствора меньше температуры затвердевания $T_{кр}$ чистого растворителя; температура кипения $T_{кип.р}$ раствора больше температуры кипения $T_{кип}$ растворителя. Это явление наблюдается при любых растворителях для нелетучих растворяемых веществ и описывается криоскопической $K_{кр}$ и эбуллиоскопической $K_э$ постоянными растворителя. Криоскопическая постоянная растворителя определяется разностью температур затвердевания $\Delta T = T_{кр} - T_{кр.р}$, которая наблюдается при растворении в 1000 *г* растворителя 1 *моля* любого нелетучего вещества. Эбуллиоскопическая постоянная определяется аналогично разностью $\Delta T = T_{кип} - T_{кип.р}$. При этом

$$K_{кр} = -RT_{кр}^2 / (1000\, L_{кр}); \quad K_э = RT_{кип}^2 / (1000\, L_{кип}),$$

где R — газовая постоянная; $L_{кр}$ — удельная теплота отвердевания; $L_{кип}$ — удельная теплота испарения при температуре кипения.

В табл. 11.11 и 11.12 приведены криоскопические и эбуллиоскопические постоянные некоторых растворителей.

При кипении и затвердевании происходит в общем случае изменение состава фаз. Не изменяют своего состава при кипении азеотропные растворы (табл. 11.13).

Таблица 11.11

Криоскопические $K_{кр}$ и эбуллиоскопические $K_э$ постоянные неорганических растворителей, *мол.%/град* [10]

Растворитель	$K_{кр}$	Растворитель	$K_{кр}$
$AlBr_3$	26,8	NaCl	18,0
$AsBr_3$	18,2	NaOH	20,8
$BaCl_2$	108	Na_2SO_4	44
Br_2	8,31	$POCl_3$	7,57
$CaCl_2$	38	P_2O_3	11,45
$CaCl_2 \cdot 6H_2O$	4,73	$SrCl_3$	107
HBr	9,41		
HCl	4,98	Растворитель	$K_э$
HI	20,26		
H_2O	1,853	$AsCl_3$	7,1
H_2O_2	2,0	Br_2	5,2
H_2S	3,83	Cl_2	1,73
H_2SO_4	6,17	HBr	1,50
$HgBr_2$	36,7	HCl	0,64
$HgCl_2$	34,0	HF	1,9
I_2	20,4	HI	2,83
K_2CO_3	41	H_2O	0,513
KCl	25	H_2SO_4	5,33
KNO_3	14,0	Hg	11,4
NH_3	0,97	I_2	10,5
NH_4NO_3	22,1	NH_3	0,34
N_2O_4	4,1	PCl_3	5,0
Na_2CO_3	30,0	SO_2	1,45
		$SnCl_4$	10,2

Таблица 11.12

Криоскопические $K_{кр}$ и эбуллиоскопические $K_э$ постоянные органических растворителей, *мол.%/град* [10]

Формула	Название	$K_{кр}$	$K_э$
$C_{12}H_{10}N_2$	Азобензол	8,35	—
$C_5H_{12}O$	Амиловый спирт, третичный	—	2,26
C_6H_7N	Анилин	5,87	3,69
C_2H_5ON	Ацетамид	363	—

Продолжение табл. 11.12

Формула	Название	$K_{кр}$	$K_э$
C_3H_6O	Ацетон	—	1,48
$C_{14}H_{10}O_2$	Бензил	10,5	10,3
$C_7H_6O_2$	Бензойная кислота	8,788	—
C_6H_6	Бензол	5,069	—
$C_{14}H_{10}O$	Бензофенон	9,8	—
C_2H_5Br	Бромистый этил	—	2,53
$CHBr_3$	Бромоформ	14,4	—
C_7H_7Br	*н*-Бромтолуол	8,21	—
C_6H_5OBr	*н*-Бромфенол	11,2	—
C_4H_7O	Бутиловый спирт, третичный	8,30	1,77
C_6H_{14}	Гексан	—	2,78
C_7H_{16}	Гептан	—	4,225
$C_6H_4Br_2$	*н*-Дибромбензол	12,4	—
$C_{12}H_{10}$	Дифенил	8,0	7,06
$C_{12}H_{11}N$	Дифениламин	8,6	—
$C_{13}H_{12}$	Дифенилметан	6,72	—
$C_2H_4Cl_2$	1,1-Дихлорэтан	—	3,20
$C_2H_4Cl_2$	1,2-Дихлорэтан	—	3,12
$C_5H_{11}O$	Изоамиловый спирт	—	2,58
$C_4H_{10}O$	Изобутиловый спирт	—	1,94
C_9H_8	Инден	7,28	—
CH_3I	Иодистый метил	—	4,19
C_2H_5I	Иодистый этил	—	5,01
$C_{10}H_{16}O$	Камфара	39,8	6,09
C_7H_8O	*о*-Креозол	5,62	—
C_7H_8O	*п*-Креозол	7,7	—
$C_4H_8O_2$	Масляная кислота	—	3,94
$C_{10}H_{20}O$	Ментол	12,4	6,15
$C_3H_6O_2$	Метилацетат	—	2,06
CH_4O	Метиловый спирт	—	0,84
CH_2O_2	Муравьиная кислота	2,77	2,4
$C_{10}H_8$	Нафталин	6,899	5,80
$C_6H_5NO_2$	Нитробензол	8,1	5,27
$C_{10}H_7NO_2$	α-Нитронафталин	9,1	—
$C_7H_7NO_2$	*о*-Нитротолуол	7,18	—
$C_7H_7NO_2$	*м*-Нитротолуол	6,78	—
$C_7H_7NO_2$	*п*-Нитротолуол	7,8	—
$C_6H_7NO_2$	*о*-Нитрофенол	7,44	—
C_5H_5N	Пиридин	4,97	2,686
C_3H_8O	Пропиловый спирт	—	1,73
$C_3H_6O_2$	Пропионовая кислота	—	3,51
CS_2	Сероуглерод	—	2,29
CCl_4	Углерод четыреххлористый	29,8	5,3
$C_2H_4O_2$	Уксусная кислота	3,9	3,07
$C_4H_6O_3$	Уксусный ангидрид	—	3,53
C_6H_6O	Фенол	7,27	3,60
C_6H_6Cl	Фосген	—	2,9
$C_{10}H_7Cl$	β-Хлорнафталин	9,76	—
$C_6H_4NO_2Cl$	*о*-Хлорнитробензол	7,50	—
$C_6H_4NO_2Cl$	*м*-Хлорнитробензол	6,07	—
$C_6H_4NO_2Cl$	*п*-Хлорнитробензол	10,2	—
$CHCl_3$	Хлороформ	4,9	3,802
C_7H_7Cl	*п*-Хлортолуол	5,6	—
$C_2H_2O_2Cl$	Хлоруксусная кислота	5,12	—
C_6H_5OCl	*о*-Хлорфенол	7,72	—
C_6H_{12}	Циклогексан	20,2	2,72
$C_6H_{12}O$	Циклогексанол	38,28	—
C_2H_6O	Этиловый спирт	—	1,04
C_2H_6O	Этилформиат	—	2,18
C_2H_6O	Этилацетат	—	2,83

Таблица 11.13

Температура кипения азеотропных двухкомпонентных смесей [10]

Первая компонента	Вторая компонента: Наименование	Вторая компонента: Содержание в смеси, вес. %	$t_{кип}$, °С
Вода	Хлористый водород	61,3	20,7
»	Этиловый эфир	1,3	34,15
»	Пентан	1,4	34,6
»	Сероуглерод	1,4	37,7
»	Дихлорметан	1,5	38,1
Этанол	Сероуглерод	9	42,4
Вода	Этилформиат	5	52,6
Метанол	Хлороформ	12,5	53,5
»	Метилацетат	19	54
»	Четыреххлористый углерод	20,6	55,7
Вода	Метилацетат	5,0	56,1
»	Хлороформ	2,6	56,2
Этанол	Метанол	39,6	58,3
Этанол	Хлороформ	7	59,3
Вода	Гексан	5,6	61,6
Метанол	Этилацетат	44	65
Этанол	Четыреххлористый углерод	15,9	65
Вода	»	4,1	66
Этанол	Бензол	32,4	68,2
Вода	»	8,83	69,25
»	Этилацетат	8,47	70,38
»	Циклогексан	10	70,8
»	Изопропилформиат	23	71,6
Этанол	Этилацетат	30,8	71,8
»	1,2-Дихлорэтан	19,5	72
Вода	Анилин	81,8	75
»	Ацетонитрил	16,3	76,5
Этанол	Толуол	68	76,7
Вода	Этанол	4,43	78,17
»	Гептан	12,9	79,2

Продолжение табл. 11.13

Первая компонента	Вторая компонента: Наименование	Вторая компонента: Содержание в смеси, вес. %	$t_{кип}$, °С
Вода	Третичный бутанол	11,76	79,9
»	1,2-Диметилпропан	11	80
»	Изопропанол	12,1	80,38
»	Вторичный бутанол	26,8	87
»	Пропанол	28,31	87,72
»	Аллиловый спирт	27,7	88,89
»	Изобутанол	33,2	89,92
»	Хлорбензол	28,4	90,2
»	Бутанол	42,5	92,7
»	Пиридин	41,3	93,6
»	*м*-Ксилол	40	94,5
»	Хлораль	7	95
»	Изоамиловый спирт	49,6	95,15
»	Амиловый спирт	54,4	95,8
»	Изомасляная кислота	71,8	98,8
»	Масляная кислота	81,5	99,4
»	Фенол	90,79	99,52
»	Бензиловый спирт	91	99,9
»	Трифторуксусная кислота	21	105
»	Муравьиная кислота	25,5	107,65

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Landolt-Börnstein.** Zahlenwerte und Funktionen aus Physik, Chemie, Geophysik, Astronomie, Technik. 4 Teil. Berlin, Springer-Verlag, 1961.
2. **Selected** Values of Chemical Thermodinamic Properties, Circular NBS No. 500. Washington, 1952.
3. **Kelley K. K.** Contributions to the Data on Theoretical Metallurgy. V. X. Washington, 1949.
4. **Kelley K. K.** Contributions to the Data on Theoretical Metallurgy. V. V. Bulletin 393. Washington, 1936.
5. **Kelley K. K.** Contributions to the Data on Theoretical Metallurgy V. III. Bulletin 383. Washington, 1935.
6. **Kubaschewski O., Evans E. L.** Metallurgical Thermochemistry. Berlin, 1959.
7. **Киттель Ч.** Введение в физику твердого тела. Изд. 2-е. Пер. с англ. М., Физматгиз, 1963.
8. **Smithsonian** Physical Tables. 9th ed. Washington, 1954.
9. **Kubaschewski O., Evans E. L.** Metallurgical Thermochemistry. London, 1951.
10. **Справочник** химика. Под ред. Б. П. Никольского. Т. 1, М.—Л., «Химия», 1963.
11. **Редкие** металлы. Справочник. Пер. с англ. Под ред. В. Е. Плющева. М., «Мир», 1965.
12. **Методы** измерения температур. Т. 1—2. Сб. статей. Под ред. В. А. Соколова. М., Изд-во иностр. лит., 1954.
13. **Физико-химические** свойства индивидуальных углеводородов. Под ред. В. М. Татевского. М., Гостоптехиздат, 1960.
14. **Яковкин Г. А.** Фреоны. Свойства и применения. Л., Изд. ГИПХ, 1959.
15. **O'Hara J. B., Fahien R. W.** — Ind. Engl. Chem., 1951, v. 43, p. 2924.
16. **Glasgow A. R.** — Analyt. Chem., 1948, v. 20., p. 410.
17. **Streiff A. J.** — J. Res. Nat. Bur. Stand., 1947, v. 38, p. 53.
18. **Glasgow A. R.** — J. Res. Nat. Bur. Stand., 1946, v. 37, p. 141.
19. **Streiff A. J.** — J. Res. Nat. Bur. Stand., 1948, v 41, p. 323.
20. **Todd S. S., Oliver G. D., Huffman H. M.** — J. Amer. Chem. Soc., 1947, v. 69, p. 1519.
21. **Streiff A. J.** — J. Res. Nat. Bur. Stand., 1946, v. 37, p. 331.
22. **Streiff A. J.** — J. Res. Nat. Bur. Stand., 1950, v. 45, p. 173.
23. **Selected** Values of Chemical Thermodynamic Properties. Circular of the NBS. Washington, 1947.
24. **Бретшнайдер С.** Свойства газов и жидкостей. М., «Химия», 1966.
25. **Краткий** справочник физико-химических величин. Под ред. К. П. Мищенко и А. А. Равделя. Изд. 3-е. Л., Госхимиздат, 1959.
26. **Справочник** по физико-техническим основам глубокого охлаждения. М.—Л., Госэнергоиздат, 1963. Авт.: Малков М. П., Данилов И. Б., Зельдович А. Г., Фрадков А. Б.).
27. **Фастовский В. Г., Ровинский А. Е., Петровский Ю. В.** Инертные газы. М., Атомиздат, 1964.
28. **Справочник** по машиностроительным материалам. Т. 1, 2. М., Машгиз, 1959.
29. **Головин В. А., Ульянова Э. Х.** Свойства благородных металлов и сплавов. М., «Металлургия», 1964.
30. **Славин Д. О., Штейман Е. Б.** Металлы и сплавы в химическом машиностроении и аппаратостроении. М., Машгиз, 1951.
31. **Натрий** и калий. Л., Госхимиздат, 1959. (Авт.: Алабышев А. Ф., Грачев К. Я., Зарецкий С. А., Лантратов М. Ф.)
32. **Чечеткин А. В.** Высокотемпературные теплоносители. М.—Л., Госэнергоиздат, 1962.
33. **Самсонов Г. В.** Тугоплавкие соединения. М., Металлургиздат, 1963.
34. **Теплофизические** свойства веществ. Под. ред. Н. Б. Варгафтика. М., Госэнергоиздат, 1956.
35. **Варгафтик Н. Б.** Справочник по теплофизическим свойствам газов и жидкостей. М., Физматгиз, 1963.
36. **Tables** of Thermal Properties of Gases. Circular of the NBS. Washington, 1955.
37. **Воляк Л. Д.** — «Теплоэнергетика», 1958, № 7, с. 33.
38. **Бадылькес И. С.** Холодильная техника. Энциклопедический словарь. Т. 1. М., Госторгиздат, 1960.

ГЛАВА 12

ДАВЛЕНИЕ ПАРА РАЗЛИЧНЫХ ВЕЩЕСТВ

12.1. ВОДА И РТУТЬ

Таблица 12.1

Давление пара воды, *кГ/см²* [1]

t, °C	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9
0	0,006228	0,006695	0,007193	0,007724	0,008289	0,008891	0,009532	0,010210	0,010932	0,011699
10	0,012513	0,013376	0,014292	0,015262	0,016289	0,017377	0,018528	0,019746	0,02103	0,02239
20	0,02383	0,02535	0,02695	0,02863	0,03041	0,03229	0,03426	0,03634	0,03853	0,04083
30	0,04325	0,04580	0,04847	0,05128	0,05423	0,05733	0,06057	0,06398	0,06755	0,07129
40	0,07520	0,07931	0,08360	0,08809	0,09279	0,09771	0,10284	0,10821	0,11382	0,11967
50	0,12578	0,13216	0,13880	0,14574	0,15297	0,16050	0,16835	0,17653	0,18504	0,19390
60	0,2031	0,2127	0,2227	0,2330	0,2438	0,2550	0,2666	0,2787	0,2912	0,3043
70	0,3178	0,3318	0,3463	0,3613	0,3769	0,3931	0,4098	0,4272	0,4451	0,4637
80	0,4829	0,5028	0,5234	0,5447	0,5667	0,5894	0,6129	0,6372	0,6623	0,6882
90	0,7148	0,7424	0,7710	0,8004	0,8307	0,8619	0,8942	0,9274	0,9616	0,9971
100	1,0332	1,0707	1,1092	1,1489	1,1898	1,2318	1,2751	1,3196	1,3654	1,4125
110	1,4609	1,5106	1,5618	1,6144	1,6684	1,7239	1,7809	1,8394	1,8995	1,9612
120	2,0245	2,0895	2,1561	2,2245	2,2947	2,3666	2,4404	2,5160	2,5935	2,6730
130	2,7544	2,8378	2,9233	3,011	3,101	3,192	3,286	3,382	3,481	3,582
140	3,685	3,790	3,898	4,009	4,121	4,237	4,355	4,476	4,599	4,725
150	4,854	4,985	5,119	5,257	5,397	5,540	5,686	5,836	5,988	6,144
160	6,302	6,464	6,630	6,798	6,970	7,146	7,325	7,507	7,693	7,883
170	8,076	8,274	8,475	8,679	8,888	9,101	9,317	9,538	9,763	9,992
180	10,225	10,462	10,703	10,950	11,201	11,456	11,715	11,979	12,248	12,522
190	12,800	13,083	13,371	13,664	13,962	14,265	14,573	14,886	15,204	15,528
200	15,857	16,192	16,532	16,877	17,228	17,585	17,948	18,316	18,690	19,070
210	19,456	19,848	20,246	20,651	21,061	21,477	21,901	22,531	22,767	23,209
220	23,659	24,115	24,577	25,047	25,523	26,007	26,497	26,995	27,499	28,011
230	28,531	29,057	29,591	30,133	30,682	31,239	31,803	32,376	32,855	33,544
240	34,140	34,745	35,357	35,978	36,607	37,244	37,890	38,545	39,208	39,880
250	40,56	41,25	41,95	42,66	43,37	44,10	44,83	45,58	46,33	47,09
260	47,87	48,65	49,44	50,24	51,05	51,87	52,71	53,55	54,40	55,26
270	56,14	57,02	57,91	58,82	59,73	60,66	61,60	62,55	63,51	64,48
280	65,46	66,45	67,46	68,47	69,50	70,54	71,59	72,65	73,73	74,82
290	75,92	77,03	78,15	79,29	80,44	81,60	82,78	83,97	85,17	86,38
300	87,61	88,85	90,11	91,38	92,66	93,95	95,26	96,59	97,92	99,28
310	100,64	102,02	103,42	104,83	106,25	107,69	109,15	110,62	112,11	113,61
320	115,12	116,66	118,21	119,77	121,35	122,95	124,56	126,19	127,84	129,50
330	131,18	132,88	134,59	136,33	138,08	139,85	141,63	143,44	145,26	147,10
340	148,96	150,84	152,73	154,65	156,59	158,54	160,52	162,52	164,53	166,57
350	168,63	170,71	172,81	174,93	177,07	179,24	181,43	183,64	185,66	188,13
360	190,42	192,72	195,06	197,41	199,80	202,21	204,64	207,11	209,60	212,12
370	214,68	217,26	219,88	222,53	225,22	—	—	—	—	—

Таблица 12.2

Давление пара ртути

При низких температурах [2]

t, °C	*P*, *мм рт. ст.*	*t*, °C	*P*, *мм рт. ст.*	*t*, °C	*P*, *мм рт. ст.*	*t*, °C	*P*, *мм рт. ст.*
—89	10^{-10}	—42	10^{-6}	46	10^{-2}	254	100
—79	10^{-9}	—25	10^{-5}	82	10^{-1}	357	760
—68	10^{-8}	—6	10^{-4}	125	1,0		
—55	10^{-7}	17	10^{-3}	202	10		

При высоких температурах

t, °C	P, атм	t, °C	P, атм	t, °C	P, атм	t, °C	P, атм	t, °C	P, атм	t, °C	P, атм
400	2,1 [3]	550	13,8 [3]	700	50 [3]	850	137,5 [3]	1000	260 [4]	1250	825 [4]
	2 [4]		12 [4]		46 [4]		115 [4]	1050	330 [4]	1300	1025 [4]
450	4,25 [3]	600	22,3 [3]	750	72 [3]	880	162 [3]	1100	425 [4]	1350	1265 [4]
	4 [4]		22 [4]		63 [4]	900	145 [4]	1150	535 [4]	1400	1625 [4]
500	8 [3]	650	34 [3]	800	102 [3]	950	195 [4]	1200	665 [4]	1435	2020 [4]
	7 [4]		34 [4]		86 [4]						

12.2. ЭЛЕМЕНТЫ И ПРОСТЕЙШИЕ СОЕДИНЕНИЯ

Таблица 12.3

Температуры, °К, при которых устанавливается указанное давление паров элемеитов и некоторых простейших соединенй (ниже 1 *мм рт. ст.*)

Вещество	Формула	Давление пара, *мм рт. ст.*										Литература
		10^{-10}	10^{-9}	10^{-8}	10^{-7}	10^{-6}	10^{-5}	10^{-4}	10^{-3}	10^{-2}	10^{-1}	1,0	
Азот	N_2	—	—	23,7	25,2	27,0	29,0	31,4	34,1	37,5	41,7	47,0	[5]
Алюминий	Al	824	868	917	974	1039	1114	1200	1301	1421	1566	1745	[2]
Алюминий фтористый	AlF	—	—	—	—	—	—	805	962	1028	1103	—	[6]
Алюминий четырехфтористый	AlF_4	—	—	—	—	—	—	—	973	1032	1099	1175	[7]
Аммиак	NH_3	—	—	90,6	95,9	102,0	108,5	116,5	125,5	136,0	148,0	163,0	[5]
Аргон	Ar	—	—	26,8	28,6	30,6	33,1	35,9	39,2	43,2	48,2	54,4	[5]
Барий	Ba	497	526	558	595	638	687	744	812	895	997	1134	[2]
Бериллий	Be	871	918	971	1030	1097	1173	1261	1364	1485	1634	1821	[2]
Бериллий фтористый	BeF_2	—	—	—	—	—	—	—	831	893	963	—	[8]
Бериллия окись	BeO	—	—	—	—	—	2070	2207	2365	2546	—	—	[9]
Бор	B	1468	1543	1626	1718	1821	1939	2072	2226	2409	2631	2898	[2]
Бора окись	B_2O_3	—	—	—	—	—	—	1250	1351	1468	1609	—	[9]
Бром	Br_2	—	—	128,5	135,5	143,5	152,5	163,0	174,5	188,5	204,0	224,0	[5]
Ванадий	V	1292	1358	1431	1513	1604	1708	1826	1963	2123	2317	2555	[2]
Висмут	Bi	484	501	521	543	569	600	638	688	760	887	1040	[2]
Вода	H_2O	—	—	144,5	153,0	162,0	173,0	185,0	198,5	215,0	223,0	256,0	[5]
Водород	H_2	—	—	3,71	4,03	4,40	4,84	5,38	6,05	6,90	8,03	9,55	[5]
Водород бромистый	HBr	—	—	67,6	72,1	77,1	82,9	89,6	97,5	107,0	118,5	132,5	[5]
» фтористый	HF	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	179	[5]
» хлористый	HCl	—	—	64,1	68,1	72,5	77,6	83,4	90,1	98,1	108,5	121,0	[5]
Вольфрам	W	2154	2263	2383	2517	2667	2837	3029	3249	3502	3798	4147	[2]
Гадолиний	Gd	578	609	644	684	728	779	838	906	986	1082	1199	[2]
Галлий	Ga	749	792	840	893	954	1024	1106	1201	1315	1453	1625	[2]
Гафний	Hf	1690	1780	1880	1990	2117	2260	2430	2627	2860	3143	3478	[2]
Гелий	He	—	—	—	—	—	—	—	—	—	0,980	1,268	[5]
Германий	Ge	985	1036	1092	1157	1230	1319	1422	1543	1687	1861	2075	[2]
Германий сернистый	GeS	—	—	—	—	—	—	586	625	668	—	—	[10]
» двухсернистый	GeS_2	—	—	—	—	—	—	—	707	759	803	885	[11]
Европий	Eu	503	532	566	599	640	687	741	805	881	975	1093	[2]
Железо	Fe	1019	1072	1131	1197	1271	1356	1453	1566	1698	1859	2063	[2]
Золото	Au	973	1026	1085	1151	1226	1311	1413	1533	1676	1847	2059	[2]
Индий	In	663	700	745	794	850	914	989	1078	1185	1315	1478	[2]
Иод	I_2	161	169	178	188	199	212	226	242	262	285	312	[2]
Иридий	Ir	1568	1648	1737	1835	1944	2071	2214	2379	2570	2798	3082	[2]
Иттербий	Yb	470	496	526	561	599	644	695	757	830	920	1032	[2]
Иттрий	Y	993	1046	1105	1171	1246	1392	1430	1544	1678	1842	2048	[2]
Кадмий	Cd	310	327	346	368	393	421	454	492	538	594	667	[2]
Кадмий мышьяковистый	$CdAs_2$	—	—	—	—	—	514	548	587	631	683	—	[12, 13]
Кадмий селенистый	CdSe	—	—	—	—	—	—	798	861	934	1021	—	[12, 13]
» теллуристый	CdTe	—	—	—	—	—	—	719	778	847	930	—	[14]
» хлористый	$CdCl_2$	—	—	—	—	339	366	398	436	483	542	617	[5]
Калий	K	262,6	278,1	295,6	315,1	338,5	365,6	397,7	438,0	482,9	542	617	[2]
Калий	K_2	349	369	392	418	448	483	524	573	633	707	804	[2]

Вещество	Формула	Давление пара, *мм рт. ст.*											Литература
		10^{-10}	10^{-9}	10^{-8}	10^{-7}	10^{-6}	10^{-5}	10^{-4}	10^{-3}	10^{-2}	10^{-1}	1,0	
Калий хлористый	KCl	—	—	—	—	—	729	781	842	912	993	1090	[18]
Кальций	Ca	490	518	549	585	625	672	726	790	867	962	1081	[2]
Кислород	O_2	—	—	28,2	29,9	31,9	34,1	36,7	39,8	43,3	48,1	54,1	[5]
Кобальт	Co	886	930	978	1033	1095	1166	1247	1342	1454	1586	1744	[2]
Кремний	Si	970	1020	1075	1136	1204	1282	1370	1475	1600	1750	1938	[2]
Кремния окись	SiO_2	—	—	—	—	—	1489	1635	1814	—	—	—	[9]
Криптон	Kr	—	—	36,8	39,3	42,2	45,5	49,4	53,9	59,4	66,3	74,8	[5]
Ксенон	Xe	—	—	50,8	54,2	58,2	62,7	68,1	74,4	82,1	91,5	103,5	[5]
Лантан	La	1130	1192	1263	1343	1485	1540	1661	1803	1972	2177	2429	[2]
Лантана хлорид	$LaCl_3$	—	—	—	808	853	904	960	1025	1098	1183	—	[19]
Литий	Li	451	477	507	541	579	623	675	737	811	902	1017	[2]
	Li_2	553	584	618	658	702	754	814	885	970	1075	1207	[2]
Литий фтористый	LiF	—	—	—	—	—	675	737	811	902	1017	—	[20]
» хлористый	LiCl	—	—	—	—	—	—	—	792	859	938	—	[21]
Лития окись	Li_2O	—	—	—	—	—	—	—	1377	1489	1620	—	[22]
Лютеций	Lu	841	886	937	993	1057	1130	1213	1310	1424	1560	1726	[2]
Магний	Mg	407	430	455	484	517	554	598	649	710	783	875	[2]
Марганец	Mn	738	777	820	869	924	988	1060	1146	1247	1369	1522	[2]
Медь	Cu	897	945	1000	1060	1130	1207	1298	1406	1537	1692	1890	[2]
Метан	CH_4	—	—	32,0	34,2	36,9	39,9	43,5	47,7	52,9	59,2	67,3	[5]
Молибден	Mo	1677	1764	1861	1969	2090	2228	2386	2572	2797	3046	—	[2]
Мышьяк	As	747	779	812	846	881	937	1012	1110	1246	1440	1696	[2]
	As_2	492	515	545	578	613	649	686	722	758	793	827	[2]
	As_4	342	359	377	397	420	445	474	507	545	590	644	[2]
Натрий	Na	309	327	347	370	397	428	465	509	562	628	712	[2]
	Na_2	379,3	401,3	426,0	454,1	486,2	523	567	618	680	757	855	[2]
Натрий фтористый	NaF	—	—	—	—	—	—	—	—	—	1205	1320	[23]
Неодим	Nd	895	946	1004	1070	1144	1231	1335	1463	1618	1808	2049	[2]
Неон	Ne	—	—	7,34	7,87	8,48	9,19	10,05	11,05	12,30	13,85	15,80	[5]
Никель	Ni	855	898	946	1000	1061	1129	1207	1296	1402	1528	1681	[2]
Ниобий	Nb	1820	1950	2091	2125	2250	2400	2560	2750	2980	3250	3570	[2]
Олово	Sn	855	905	961	1024	1096	1179	1275	1387	1521	1685	1890	[2]
Осмий	Os	1805	1896	1996	2108	2234	2375	2535	2719	2932	3193	3512	[2]
Палладий	Pd	1056	1114	1180	1253	1336	1430	1539	1667	1820	2011	2246	[2]
Платина	Pt	1403	1475	1555	1644	1744	1858	1988	2140	2322	2540	2804	[2]
Полоний	Po	356	375	396	421	448	479	515	560	616	684	771	[2]
	Po_2	364	383	404	427	453	483	517	564	623	698	796	[2]
Радий	Ra	462	489	519	553	593	638	691	754	832	928	1058	[2]
Рений	Re	1982	2085	2201	2332	2480	2649	2844	3069	3333	3648	4036	[2]
Родий	Rh	1395	1467	1546	1635	1735	1847	1976	2124	2303	2529	2794	[2]
Ртуть	Hg	184	194	205	218	231	248	267	290	319	355	398	[2]
Рубидий	Rb	239	253	270	288	310	335	364	400	443	497	568	[2]
	Rb_2	319,0	337,2	357,9	381,5	408,8	440,7	478,6	—	581	652	744	[2]
Рубидий хлористый	RbCl	—	—	—	—	—	—	—	807	876	958	1058	[24]
Рутений	Ru	1657	1741	1833	1936	2051	2180	2328	2496	2692	2929	3213	[2]
Самарий	Sm	577	610	646	687	733	786	846	917	1001	1103	1229	[2]
Свинец	Pb	551	583	619	660	708	762	827	903	995	1110	1254	[2]
Свинец фтористый	PbF_2	—	—	—	—	—	—	737	801	879	973	1089	[25]
Свинца окись	PbO	—	—	—	—	—	—	892	953	1023	1105	1200	[26]
Селен	Se	546	576	610	648	691	741	798	867	948	1047	1170	[2]
	Se_2	—	351	369	389	410	435	464	497	539	590	652	[2]
	Se_6	—	346	362	379	398	419	443	471	508	561	629	[2]
	ΣSe^*	—	340	357	377	394	417	442	470	504	560	623	[2]
Сера	S	—	—	699	742	790	846	911	988	1080	1190	1330	[2]
	S_2	—	—	347	366	387	411	439	472	511	557	613	[2]
	S_8	—	—	261	278	294	312	332	355	380	413	458	[2]
	ΣS^*	231	245	260	275	292	310	330	352	377	410	455	[2]
Серебро	Ag	759	800	846	898	957	1024	1101	1191	1301	1436	1603	[2]
Сероводород	H_2S	—	—	73,5	78,0	83,1	89,0	95,7	103,5	113,5	124,5	138,5	[5]
Скандий	Sc	885	912	987	1045	1110	1187	1275	1375	1497	1636	1820	[2]
Стронций	Sr	457	483	512	545	582	625	676	735	806	894	1006	[2]
Сурьма	Sb	693	730	770	818	870	933	1008	1097	1204	1334	1498	[2]
	Sb_2	579	608	641	677	717	763	816	877	958	1063	1198	[2]

Вещество	Формула	Давление пара, *мм рт. ст.*											Литература
		10^{-10}	10^{-9}	10^{-8}	10^{-7}	10^{-6}	10^{-5}	10^{-4}	10^{-3}	10^{-2}	10^{-1}	1,0	
	Sb_4	486	516	547	580	617	656	700	749	808	880	1024	[2]
	Σ Sb*	486	516	547	580	617	656	700	749	808	880	1024	[2]
Таллий	Tl	493	523	555	591	675	681	736	801	881	979	1101	[2]
Тантал	Ta	2015	2120	2237	2366	2511	2675	2862	3077	3329	3625	3978	[2]
Теллур	Te_2	403	423	445	469	497	527	562	602	649	705	790	[2]
Титан	Ti	1207	1270	1340	1419	1508	1609	1726	1861	2021	2219	2264	[2]
Торий	Th	—	—	1706	1813	1935	2075	—	—	—	—	—	[27]
Тулий	Tu	661	696	734	778	827	885	953	1025	1121	1237	—	[2]
Углекислый газ	CO_2	—	—	76,1	80,6	85,7	91,5	98,1	106,0	114,5	125,0	137,5	[5]
Углерод	C_1	1781	1870	1968	2077	2200	2336	2491	2669	2874	3114	3397	[2]
	C_2	1920	2010	2109	2218	2339	2475	2628	2802	3001	3232	3502	[2]
	C_3	1716	1791	1873	1962	2061	2171	2293	2430	2586	2763	2968	[2]
Углерода окись	CO	—	—	26,7	28,4	30,3	32,5	35,0	38,0	41,5	45,8	51,1	[5]
Уран	U	1265	1337	1409	1498	1600	1717	1854	2014	2206	2439	2729	[2]
Урана двуокись	UO_2	—	—	1592	1682	1780	1894	2023	—	—	—	—	[28]
Уран пятифтористый	α-UF_5	—	—	—	—	—	—	—	—	—	340**	385**	[29]
» четырехфтористый	UF_4	—	—	—	—	—	—	—	—	1080	1157	1250	[30]
Фосфор красный	P_1	942	990	1045	1106	1174	1250	1337	1435	1547	1675	1822	[2]
	P_2	427	448	470	496	524	556	592	633	680	735	800	[2]
	P_4	299	312	327	343	361	380	403	428	457	491	530	[2]
» белый	P_4	156	166	178	191	205	220	238	259	282	311	348	[2]
Франций	Fr	206	21	232	248	267	289	315	346	385	434	497	[2]
Фтор	F_2	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	50,5	[5]
Хлор	Cl_2	—	—	84,4	89,4	95,1	101,5	109,5	117,5	127,5	140,0	155,0	[5]
Хром	Cr	986	1037	1094	1158	1229	1311	1403	1511	1637	1786	1968	[2]
Хрома окись	Cr_2O_3	—	—	—	—	—	—	1730	1858	2005	2177	2382	[31]
Цезий	Cs	227	241	257	274	295	319	348	382	424	476	545	[2]
Цезий хлористый	CsCl	—	—	—	—	—	—	715	770	835	911	1003	[24]
Цинк	Zn	358	377	399	424	453	485	523	566	618	681	763	[2]
Цинк мышьяковистый	Zn_3As_2	—	—	—	—	575	616	663	718	784	—	—	[13]
» селенистый	ZnSe	—	—	—	—	—	—	919	982	1055	1140	—	[32]
» сернистый	ZnS	—	—	—	—	—	—	—	—	1141	1270	1430	[33]
» теллуристый	ZnTe	—	—	—	—	—	—	785	848	921	1008	—	[14]
Цирконий	Zr	1578	1662	1754	1858	1975	2109	2265	2447	2662	2918	3227	[2]

* При суммарном давлении.
** При давлении диспропорционирования.

12.3. НЕОРГАНИЧЕСКИЕ ВЕЩЕСТВА

Температуры, °С, при которых устанавливается указанное давление паров неорганических веществ (ниже 1 *атм*)*

Вещество	Формула	Давление пара, *мм рт. ст.*										Температура плавления, °С	Литература
		1	5	10	20	40	60	100	200	400	760		
Азот	N_2	—226,1	—221,3	—219,1	—216,8	—214,0	—212,3	—209,7	—205,6	—200,9	—195,8	—210,0	[34]
Азота закись	N_2O	—143,4	—133,4	—128,7	—124,0	—118,3	—114,9	—110,3	—103,6	—96,2	—88,5	—90,9	[34]
» окись	NO	—184,5	—180,6	—178,2	—175,3	—171,7	—168,9	—166,0	—162,3	—156,8	—151,7	—161,0	[34]
» фторокись	NO_2F	—143,7	—132,1	—126,2	—119,8	—112,8	—108,4	—102,3	—93,5	—83,2	—72,0	—139,0	[34]
» четырехокись	N_2O_4	—55,6	—42,7	—36,7	—30,4	—23,9	—19,9	—14,7	—5,0	+8,0	21,0	—9,3	[34]
Азотный ангидрид	N_2O_5	—36,8	—23,0	—16,7	—10,0	—2,9	+1,8	7,4	15,6	24,4	32,4	30,0	[34]
Азот трехфтористый	NF_3	—183,8	—175,5	—170,7	—165,7	—160,2	—156,5	—152,3	—145,2	—137,4	—129,0	—183,7	[35]
Алюминий	Al	1472	—	1699	—	—	—	1996	—	—	2348	659	[2]
Алюминий-боргидрид	AlB_3H_{12}	—	—52,2	—42,9	—32,5	—20,9	—13,4	—3,9	+11,2	28,1	45,9	—64,5	[34]
Алюминий бромистый	$AlBr_3$	81,3	103,8	118,0	134,0	150,6	161,7	176,1	199,8	227,0	256,3	97,5	[34]
» иодистый	AlI_3	178,0	207,7	225,8	244,2	265,0	277,8	294,5	322,0	354,0	385,5	—	[34]
» фтористый	AlF_3	1238	1298	1324	1350	1378	1398	1422	1457	1496	1537	1040	[36]
» хлористый	$AlCl_3$	100,0	116,4	123,8	131,8	139,9	145,4	152,0	161,8	171,6	180,2	192,4	[34]
Алюминия окись	Al_2O_3	2148	2306	2385	2465	2549	2599	2665	2766	2874	2977	2050	[34]
Аммиак	NH_3	—109,1	—97,5	—91,9	—85,8	—79,2	—74,3	—68,4	—57,0	—45,4	—33,6	—77,7	[34]
Аммоний бромистый	NH_4Br	198,3	234,5	252,0	270,6	290,0	303,8	320,0	345,3	/370,9	396,0	—	[34]
» иодистый	NH_4I	210,9	247,0	263,5	282,8	302,8	316,0	331,8	355,8	381,0	404,9	—	[34]
» кислый сернистый	NH_4HS	—51,1	—36,0	—28,7	—20,8	—12,3	—7,0	0,0	+10,5	21,8	33,3	—	[34]
» хлористый	NH_4Cl	160,4	193,8	209,8	226,1	245,0	256,2	271,5	293,2	316,5	337,8	520	[34]
» цианистый	NH_4CN	—50,6	—35,7	—28,6	—20,9	—12,6	—7,4	—0,5	+9,6	20,5	31,7	36	[34]
Аммония азид	NH_4N_3	29,2	49,4	59,2	69,4	80.1	86,7	95,2	107,7	120,4	133,8	—	[34]
» карбамат	$NH_4CO_2NH_2$	—26,1	—10,4	—2,9	+5,3	14,0	19,6	26,7	37,2	48,0	58,3	—	[34]
Аргон	Ar	—218,2	—213,9	—210,9	—207,9	—204,9	—202,9	—200,5	—195,6	—190,6	—185,6	—189,2	[34]
Астат	At	160	—	206	—	—	—	269	—	—	334	302	[2]
Барий	Ba	—	984	1049	1120	1195	1240	1301	1403	1518	1638	710	[34]
Бериллий	Be	1548	—	1785	—	—	—	2097	—	—	2471	1283	[2]
Бериллий-боргидрид	BeB_2H_8	1,0	19,8	28,1	36,8	46,2	51,7	58,6	69,0	79,7	90,0	123	[34]
Бериллий бромистый	$BeBr_2$	289	325	342	361	379	390	405	427	451	474	490	[34]
» иодистый	BeI_2	283	322	341	361	382	394	411	435	461	487	488	[34]
» хлористый	$BeCl_2$	291	328	346	365	384	395	411	435	461	487	405	[34]
Бор	B	2625	—	2957	—	—	—	3381	—	—	3860	2027	[2]
Бор трехфтористый	BF_3	—154,6	—145,4	—141,3	—136,4	—131,0	—127,6	—123,0	—115,9	—108,3	—100,7	—126,8	[34]
» треххлористый	BCl_3	—91,5	—75,2	—66,9	—57,9	—47,8	—41,2	—32,4	—18,9	—3,6	+12,7	—107	[34]
Бром	Br_2	—48,7	—32,8	—25,0	—16,8	—8,0	—0,6	+9,3	24,3	41,0	58,2	—7,26	[37]
Бромдихлорфторсилан	$SiBrCl_2F$	—86,5	—68,4	—59,0	—48,8	—37,0	—29,0	—19,5	—3,2	+15,4	35,4	—112,3	[34]
Бром пятифтористый	BrF_5	—69,3	—51,0	—41,9	—32,0	—21,0	—14,0	—4,5	+9,9	25,7	40,0	—61,4	[34]
Бромсилан	SiH_3Br	—	—85,7	—77,3	—68,3	—57,8	—51,1	—42,3	—28,6	—13,3	+2,4	—93,9	[34]
Ванадий	V	2282	—	2578	—	—	—	2953	—	—	3392	1919	[2]
Ванадилтрихлорид	$VOCl_3$	—23,2	+0,2	12,2	26,6	40,0	49,8	62,5	82,0	103,5	127,2	—	[34]

* Буквой Р отмечена температура разложения.

Продолжение табл. 12.4

Вещество	Формула	Давление пара, *мм рт. ст.*										Температура плавления, °С	Литература
		1	5	10	20	40	60	100	200	400	760		
Висмут	Bi	767	—	947	—	—	—	1134	—	—	1427	271	[2]
Висмут пятифтористый	BiF_5	74,8	102,9	116,5	131,1	146,8	156,6	169,6	188,5	209,1	230,0	151,4	[38]
» трехбромистый	$BiBr_3$	—	261	282	305	327	340	360	392	425	461	218	[34]
» трехиодистый	BiI_3	254,3	303,7	327,9	354,3	383,0	401,0	425,3	461,2	500,9	541,7	—	[39]
» треххлористый	$BiCl_3$	—	242	264	287	311	324	343	372	405	441	230	[34]
Вода	H_2O	—17,3	+1,2	11,3	22,2	34,1	41,6	51,6	66,5	83,0	100,0	0,0	[34]
Водород	H_2	—263,3	—261,9	—261,3	—260,4	—259,6	—258,9	—257,9	—256,3	—254,5	—252,5	—259,1	[34]
Водорода перекись	H_2O_2	15,3	38,8	50,4	63,3	77,0	85,8	97,9	116,5	137,4Р	158,0Р	—0,9	[34]
Водород бромистый	HBr	—138,8	—127,4	—121,8	—115,4	—108,3	—103,8	—97,7	—88,1	—78,0	—66,5	—87,0	[34]
» двухсернистый	H_2S_2	—43,2	—24,4	—15,2	—5,1	+6,0	12,8	22,0	35,3	49,6	64,0	—89,7	[34]
» иодистый	HI	—123,3	—109,6	—102,3	—94,5	—85,6	—79,8	—72,1	—60,3	—48,3	—35,1	—50,9	[34]
» мышьяковистый	AsH_3	—142,6	—130,8	—124,7	—117,7	—110,2	—104,8	—98,0	—87,2	—75,2	—62,1	—116,3	[34]
» селенистый	H_2Se	—115,3	—103,4	—97,9	—91,8	—84,7	—80,2	—74,2	—65,2	—53,6	—41,1	—64,0	[34]
» теллуристый	H_2Te	—96,4	—82,4	—75,4	—67,8	—59,1	—53,7	—45,7	—32,4	—17,2	—2,0	—49,0	[34]
» фтористый	HF	—94,6	—75,9	—66,8	—58,1	—45,1	—38,0	—28,3	—13,8	+2,5	19,43	—83	[40]
» хлористый	HCl	—150,8	—140,7	—135,8	—130,0	—123,8	—119,8	—114,0	—105,2	—95,3	—84,8	—114,3	[34]
Вольфрам	W	3874	—	4294	—	—	—	4810	—	—	5372	3387	[2]
Вольфрам шестифтористый	WF_6	—71,4	—56,5	—49,2	—41,5	—33,0	—27,5	—20,3	—10,0	+1,2	17,3	—0,5	[34]
Гадолиний	Gd	926	—	1074	—	—	—	1264	—	—	1497	1327	[2]
Галлий	Ga	1352	—	1573	—	—	—	1871	—	—	2244	30	[2]
Галлий треххлористый	$GaCl_3$	48,0	67,8	76,5	91,3	107,5	118,0	132,0	152,8	176,3	200,0	77,0	[34]
Гафний	Hf	3205	—	3702	—	—	—	3837	—	—	5687	2222	[2]
Гафний четыреххлористый	$HfCl_4$	170,5	198,7	216,8	230,6	245,2	254,0	265,8	282,5	300,2	317,9	434	[41, 42]
Гексафторидсилан	Si_2F_6	—81,0	—68,8	—63,1	—57,0	—50,6	—46,7	—41,7	—34,2	—26,4	—18,9	—18,6	[34]
Гексахлордисилан	Si_2Cl_6	4,0	27,4	38,8	51,5	65,3	73,9	85,4	102,2	120,6	139,0	—12	[34]
Гексахлордисилоксан	$(SiCl_3)_2O$	5,0	17,8	29,4	41,5	55,2	63,8	75,4	92,5	113,6	135,6	—33,2	[34]
Гелий	He	—271,7	—271,5	—271,3	—271,1	—270,7	—270,6	—270,3	—269,8	—269,3	—268,6	—272,0	[34]
Германий	Ge	1802	—	2074	—	—	—	2430	—	—	2852	937	[2]
Германий бромистый	$GeBr_4$	—	43,3	56,8	71,8	88,1	98,8	113,2	135,4	161,6	189,0	26,1	[34]
» хлористый	$GeCl_4$	—45,0	—24,9	—15,0	—4,1	+8,0	16,2	27,5	44,4	63,8	84,0	—49,5	[34]
Германия гидрид	GeH_4	—163,0	—151,0	—145,3	—139,2	—131,6	—126,7	—120,3	—111,2	—100,2	—88,9	—165	[34]
Гидроксиламин	NH_2OH	—	39,0	47,2	55,8	64,6	70,0	77,5	87,9	99,2	110,0	34,0	[34]
Дейтероаммиак	ND_3	—	—	—	—	—	—74,0	—67,4	—57,0	—45,4	—33,4	—74,0	[34]
Дейтероводород	ND	—	—	—259,8	—259,1	—258,2	—257,6	—256,6	—255,0	—253,0	—251,0	—	[34]
Диборан	B_2H_6	—159,7	—149,5	—144,3	—138,5	—131,6	—127,2	—120,9	—111,2	—99,6	—86,5	—169	[34]
Дибромдифторсилан	$SiBr_2F_2$	—	—	—66,8	—57,7	—47,4	—41,0	—31,9	—18,2	—2,6	+13,7	—66,9	[34]
Дибромсилан	SiH_2Br_2	—60,9	—40,0	—29,4	—18,0	—5,2	+3,2	14,1	31,6	50,7	70,5	—70,2	[34]
Дибромхлорфторсилан	$SiBr_2ClF$	—65,2	—45,5	—35,6	—24,5	—12,0	—4,7	+6,3	23,0	43,0	59,5	—99,3	[34]
Дигерман	Ge_2H_6	—88,7	—69,8	—60,1	—49,9	—38,2	—30,7	—20,3	—4,7	+13,3	31,5	—109	[34]
Дигидродекаборан	$B_{10}H_{14}$	60,0	80,8	90,2	100,0	117,4	127,8	142,8	163,8	Р	—	99,6	[34]
Дигидропентаборан	B_5H_9	—	—40,4	—30,7	—20,0	—8,0	—0,4	+9,6	24,6	40,8	58,1	—47,0	[34]
Дииодсилан	SiH_2I_2	—	3,8	18,0	34,1	52,6	64,0	79,4	101,8	125,5	149,5	—132,5	[34]
Дифторсилан	SiH_2F_2	—146,7	—136,0	—130,4	—124,3	—117,6	—113,3	—107,3	—98,3	—87,6	—77,8	—1,0	[34]
Дисилазан	$(SiH_3)_3H$	—68,7	—49,9	—40,4	—30,0	—18,5	—11,0	—1,1	+14,0	31,0	48,7	—105,7	[34]
Дисилан	Si_2H_6	—114,8	—99,3	—91,4	—82,7	—72,8	—66,4	—57,5	—44,6	—29,0	—14,3	—132,6	[34]

Вещество	Формула	Давление пара, *мм рт. ст.*										Температура плавления, °С	Литература
		1	5	10	20	40	60	100	200	400	760		
Дисилоксан	$(SiH_3)_2O$	—112,5	—95,8	—88,2	—79,8	—70,4	—64,2	—55,9	—43,5	—29,3	—15,4	—144,2	[34]
Дихлордифторсилан	$SiCl_2F_2$	—124,7	—110,5	—102,9	—94,5	—85,0	—78,6	—70,3	—58,0	—45,0	—31,8	—139,7	[34]
Европий	Eu	820	—	980	—	—	—	1195	—	—	1469	1200	[2]
Железа карбонил	$Fe(CO)_5$	—	—6,5	+4,6	16,7	30,3	39,1	50,3	68,0	86,1	105,0	—21,0	[34]
Железо	Fe	1787	1957	2039	2128	2224	2283	2360	2475	2605	2735	1535	[34]
Железо хлористое	$FeCl_2$	—	—	700	737	779	805	842	897	961	1026	—	[34]
» хлорное	$FeCl_3$	194,	221,8	235,5	246,0	256,8	263,7	272,5	285,0	298,0	319,0	304	[34]
Золото	Au	1786	—	2055	—	—	—	2412	—	—	2847	1063	[2]
Иридий	In	1205	—	1414	—	—	—	1658	—	—	2050	156	[2]
Иод	I_2	38,7	62,2	73,2	84,7	97,5	105,4	116,5	137,3	159,8	183,0	112,9	[34]
Иод пятифтористый	IF_5	—23,9	—2,0	+8,7	20,2	32,7	40,6	51,0	66,4	83,2	100,0	9,4	[43]
» семифтористый	IF_7	—87,0	—70,7	—63,0	—54,5	—45,3	—39,4	—31,9	—20,7	—8,3	+4,0	5,5	[34]
Иодсилан	SiH_3I	—	—53,0	—43,7	—33,4	—21,8	—14,3	—4,4	+10,7	27,9	45,4	—57,0	[34]
Иттрий	Y	1775	—	2037	—	—	—	3379	—	—	2772	1490	[2]
Кадмий	Cd	394	455	484	516	553	578	611	658	711	765	320,9	[34]
Кадмий иодистый	CdI_2	416	481	512	546	584	608	640	688	742	796	385	[34]
» фтористый	CdF_2	1385	1504	1559	1617	1673	1709	1759	1834	1924	2024	520	[34]
» хлористый	$CdCl_2$	—	618	656	695	736	762	797	847	908	967	568	[34]
Кадмия окись	CdO	1000	1100	1149	1200	1257	1295	1341	1409	1484	1559	—	[34]
Калий	K	378	446	480	518	559	600	620	668	723	798	62,3	[44]
Калий бромистый	KBr	795	882	940	994	1050	1087	1137	1212	1297	1383	730	[34]
» едкий	KOH	719	814	863	918	976	1013	1064	1142	1233	1327	380	[34]
» иодистый	KI	745	840	887	938	995	1030	1080	1152	1238	1324	723	[34]
» фтористый	KF	885	988	1039	1096	1156	1193	1245	1323	1411	1502	880	[45]
» хлористый	KCl	821	919	968	1020	1078	1115	1164	1239	1322	1407	790	[34]
Кальций	Ca	808	926	983	1046	1111	1152	1207	1288	1388	1487	851	[34]
Карбонилборин	BH_3CO	—139,2	—127,3	—121,1	—114,1	—106,6	—101,9	—95,3	—85,5	—74,8	—64,0	—137,0	[34]
Карбонилхлорид (фосген)	$COCl_2$	—92,9	—77,0	—69,3	—60,3	—50,3	—44,0	—35,6	—22,3	—7,6	+8,3	—104	[34]
Кислород	O_2	—219,1	—213,4	—210,6	—207,5	—204,1	—201,9	—198,8	—194,0	—188,8	—183,1	—218,7	[34]
Кобальт	Co	1471	—	1677	—	—	—	1940	—	—	2255	1490	[2]
Кобальта нитрозилтрикарбонил	$Co(CO)_3NO$	—	—	—	—1,3	+11,0	18,5	29,0	44,4	62,0	80,0	—11	[34]
Кобальт хлористый	$CoCl_2$	—	—	—	—	770	801	843	904	974	1050	735	[34]
Кремний	Si	1665	—	1910	—	—	—	2239	—	—	2617	1415	[2]
Кремний четырехфтористый	SiF_4	—144,0	—134,8	—130,4	—125,9	—120,8	—117,5	—113,3	—107,2	—100,7	—94,8	—90	[34]
Кремний четыреххлористый	$SiCl_4$	—63,4	—44,1	—34,4	—24,0	—12,1	—4,8	+5,4	21,0	38,4	56,8	—68,8	[34]
Кремния окись	SiO_2	—	—	1732	1798	1867	1911	1969	2053	2141	2227	1710	[34]
Криптон	Kr	—199,3	—191,3	—187,2	—182,9	—178,4	—175,7	—171,8	—165,6	—159,0	—152,0	—156,7	[34]
Ксенон	Xe	—168,5	—158,2	—152,8	—147,1	—141,2	—137,7	—132,8	—125,4	—117,1	—108,0	—111,6	[34]
Лантан	La	2156	—	2474	—	—	—	2887	—	—	3370	920	[2]
Литий	Li	723	828	881	940	1003	1042	1097	1178	1273	1372	186	[34]
Литий бромистый	LiBr	748	840	888	939	994	1028	1076	1147	1226	1310	547	[34]
» иодистый	LiI	723	802	841	883	927	955	993	1049	1110	1171	446	[34]
» фтористый	LiF	1047	1156	1211	1270	1333	1372	1425	1503	1591	1681	848,1	[34]
» хлористый	LiCl	783	880	932	987	1045	1081	1129	1203	1290	1382	614	[34]

Вещество	Формула	Давление пара, *мм рт. ст*										Температура плавления, °С	Литература
		1	5	10	20	40	60	100	200	400	760		
Лютеций	Lu	1453	—	1659	—	—	—	1938	—	—	2262	1727	[2]
Магний	Mg	621	702	743	789	838	868	909	967	1034	1107	651	[34]
Магний хлористый	$MgCl_2$	778	877	930	988	1050	1088	1142	1223	1316	1418	712	[34]
Марганец	Mn	1292	1434	1505	1583	1666	1720	1792	1900	2029	2151	1260	[34]
Марганец хлористый	$MnCl_2$	—	736	778	825	879	913	960	1028	1108	1190	650	[34]
Медь	Cu	1613	—	1910	—	—	—	2312	—	—	2877	1083	[2]
Медь бромистая (I)	Cu_2Br_2	572	666	718	777	844	887	951	1052	1189	1355	504	[34]
» иодистая (I)	Cu_2I_2	—	610	656	716	786	836	907	1018	1158	1336	605	[34]
» хлористая (I)	Cu_2Cl_2	546	645	702	766	838	886	960	1077	1249	1490	422	[34]
Молибден	Mo	3102	3393	3535	3690	3859	3964	4100	4322	4553	4804	2622	[34]
Молибдена трехокись	MoO_3	734	785	814	851	892	917	955	1014	1082	1151	795	[34]
Молибден шестифтористый	MoF_6	—65,5	—49,0	—40,8	—32,0	—22,1	—16,2	—8,0	+4,1	17,2	36,0	17	[34]
Монобромдиборан	B_2BrH_5	—93,3	—75,3	—66,3	—56,4	—45,4	—38,2	—29,0	—15,4	0,0	+16,3	—104,2	[34]
Мышьяк	As	372	416	437	459	483	498	518	548	579	610	814	[34]
Мышьяка трехокись	As_2O_3	212,5	242,6	259,7	279,2	299,2	310,3	332,5	370,0	412,2	457,2	312,8	[34]
Мышьяк пятифтористый	AsF_5	—117,9	—108,0	—103,1	—98,0	—92,4	—88,5	—84,3	—75,5	—64,0	—52,8	—79,8	[34]
» трехбромистый	$AsBr_3$	41,8	70,6	85,2	101,3	118,7	130,0	145,2	167,7	193,6	220	—	[34]
» трехфтористый	AsF_3	—	—	—	—	—2,5	+4,2	13,2	26,7	41,4	56,3	—5,9	[34]
» треххлористый	$AsCl_3$	—11,4	+11,4	23,5	36,0	50,0	58,7	70,9	89,2	109,7	130,4	—18	[34]
Натрий	Na	433,8	511,6	552,8	587,5	631,1	659,5	696,8	753,2	816,5	882,9	97,83	[47, 48]
Натрий бромистый	NaBr	806	903	952	1005	1063	1099	1148	1220	1304	1392	755	[34]
» иодистый	NaI	767	857	903	952	1005	1039	1083	1150	1225	1304	651	[34]
» фтористый	NaF	1077	1186	1240	1300	1363	1403	1455	1531	1617	1704	992	[45]
» хлористый	NaCl	865	967	1017	1072	1131	1169	1220	1296	1379	1465	800	[34]
» цианистый	NaCN	817	928	983	1046	1115	1156	1214	1302	1401	1497	564	[34]
Натрия гидроокись	NaOH	739	843	897	953	1017	1057	1111	1192	1286	1378	319,1	[34, 46]
Неодим	Nd	1776	—	2091	—	—	—	2530	—	—	3111	1024	[2]
Неон	Ne	—257,3	—255,5	—254,6	—253,7	—252,6	—251,9	—251,0	—249,7	—248,1	—246,0	—248,7	[34]
Никель	Ni	1418	—	1602	—	—	—	2352	—	—	2142	1455	[2]
Никель хлористый	$NiCl_2$	671	731	759	789	821	840	866	901	945	987	1001	[34]
Никеля карбонил	$Ni(CO)_4$	—	—	—	—	—23,0	—15,9	—6,0	+8,8	25,8	42,5	—25	[34]
Ниобий	Nb	3293	—	3727	—	—	—	4237	—	—	4842	2497	[2]
Ниобий пятифтористый	NbF_5	—	—	86,3	103,0	121,5	133,2	148,5	172,2	198,0	225,0	75,5	[34]
Нитрозил фтористый	NOF	—132,0	—120,3	—114,3	—107,8	—100,3	—95,7	—88,8	—79,2	—68,2	—56,0	—134	[34]
Нитрозил хлористый	NOCl	—	—	—	—	—60,2	—54,2	—46,3	—34,0	—20,3	—6,4	—64,5	[34]
Озон	O_3	—180,4	—168,6	—163,2	—157,2	—150,7	—146,7	—141,0	—132,6	—122,5	—111,1	—251	[34]
Октахлортрисилан	Si_3Cl_8	46,3	74,7	89,3	104,2	121,5	132,0	146,0	166,2	189,5	211,4	—	[34]
Олова гидрид	SnH_4	—140,0	—125,8	—118,5	—111,2	—102,3	—96,6	—89,2	—78,0	—65,2	—52,3	—149,4	[34]
Олово	Sn	1613	—	1882	—	—	—	2245	—	—	2722	231,9	[2]
Олово бромное	$SnBr_4$	—	58,3	72,7	88,1	105,5	116,2	131,0	152,8	177,7	204,7	31,0	[34]
» иодное	SnI_4	—	156,0	175,8	196,2	218,8	234,2	254,2	283,5	315,5	348,0	144,5	[34]
» хлористое	$SnCl_2$	316	366	391	420	450	467	493	533	577	623	246,8	[34]
» хлорное	$SnCl_4$	—22,7	—1,0	+10,0	22,0	35,2	43,5	54,7	72,0	92,1	113,0	—30,2	[34]
Осмий	Os	3239	—	3627	—	—	—	4108	—	—	4607	2700	[2]

Вещество	Формула	Давление пара, *мм рт. ст.*										Температура плавления, °С	Литература
		1	5	10	20	40	60	100	200	400	760		
Осмия четырехокись:													
белая	OsO_4	—5,6	+15,6	26,0	37,4	50,5	59,4	71,5	89,5	109,3	130,0	42	[34]
желтая	OsO_4	3,2	22,0	31,3	41,0	51,7	59,4	71,5	89,5	109,3	130,0	56	[34]
Палладий	Pd	1973	—	2271	—	—	—	2658	—	—	3112	1550	[2]
Платина	Pt	2531	—	2857	—	—	—	3266	—	—	3707	1773	[2]
Плутоний шестифтористый	PuF_6	—	—	—	1,3	11,1	16,8	24,2	35,0	46,8	62,16	51,59	[49]
Радий	Ra	785	—	961	—	—	—	1206	—	—	1536	700	[2]
Радон	Rn	—144,2	—132,4	—126,3	—119,2	—111,3	—106,2	—99,0	—87,7	—75,0	—61,8	—71	[34]
Рений	Re	3763	—	4249	—	—	—	4882	—	—	5642	3180	[2]
Рения семиокись	Re_2O_7	212,5	237,5	248,0	261,0	272,0	280,0	289,0	307,0	336,0	362,4	296	[34]
Родий	Rh	2521	—	2843	—	—	—	3270	—	—	3667	1966	[2]
Ртуть	Hg	125	—	202	—	—	—	254	—	—	357,0	—38,9	[2]
Ртуть бромистая (II)	$HgBr_2$	136,5	165,3	179,8	194,3	211,5	221,0	237,8	262,7	290,0	319,0	237	[34]
» иодистая (II)	HgI_2	157,5	189,2	204,5	220,0	238,2	249,0	261,8	291,0	324,2	354,0	259	[34]
» хлористая (II)	$HgCl_2$	136,2	166,0	180,2	195,8	212,5	222,5	237,0	256,5	275,5	304,0	277	[34]
Рубидий	Rb	295	—	390	—	—	—	526	—	—	705	38,5	[2]
Рубидий бромистый	RbBr	781	876	923	975	1031	1066	1114	1186	1267	1352	682	[34]
» иодистый	RbI	748	839	884	935	991	1026	1072	1141	1223	1304	642	[34]
» фтористый	RbF	921	982	1016	1052	1096	1123	1168	1239	1322	1408	760	[45]
» хлористый	RbCl	792	887	937	990	1047	1084	1133	1207	1294	1381	715	[34]
Самарий	Sm	956	—	1117	—	—	—	1338	—	—	1601	1052	[2]
Свинец	Pb	973	1099	1162	1234	1309	1358	1421	1519	1630	1744	327,5	[34]
Свинец бромистый	$PbBr_2$	513	578	610	646	686	711	745	796	856	914	373	[34]
» иодистый	PbI_2	479	540	571	605	644	668	701	750	807	872	402	[34]
» сернистый	PbS	852	928	975	1005	1048	1074	1108	1160	1221	1281	1114	[34]
» фтористый	PbF_2	—	861	904	950	1003	1036	1080	1144	1219	1293	855	[50]
» хлористый	$PbCl_2$	547	615	648	684	725	750	784	833	893	954	501	[34]
Свинца окись	PbO	943	1039	1085	1134	1189	1222	1265	1330	1402	1472	890	[34]
Селен	Se	350	—	428	—	—	—	534	—	—	657	217	[2]
Селена двуокись	SeO_2	157,0	187,7	202,5	217,5	234,1	244,6	258,0	277,0	297,7	317,0	340	[34]
» оксихлорид	$SeOCl_2$	34,8	59,8	71,9	84,2	98,0	106,5	118,0	134,6	151,7	168,0	8,5	[34]
Селен четыреххлористый	$SeCl_4$	74,0	96,3	107,4	118,1	130,1	137,8	147,5	161,0	176,4	191,5Р	—	[34]
» шестифтористый	SeF_6	—118,6	—105,2	—98,9	—92,3	—84,7	—80,0	—73,9	—64,8	—55,2	—45,8	—34,7	[34]
Сера	S	183,8	223,0	243,8	264,7	288,3	305,5	327,2	359,7	399,6	444,6	115,2	[34, 51]
Сера хлористая	S_2Cl_2	—7,4	+15,7	27,5	40,0	54,1	63,2	75,3	93,5	115,4	138,0	—80	[34]
» шестифтористая	SF_6	—132,7	—120,6	—114,7	—108,4	—101,5	—96,8	—90,9	—82,3	—72,6	—63,5	—50,2	[34]
Серебро	Ag	1330	—	1543	—	—	—	1825	—	—	2163	960,5	[2]
Серебро иодистое	AgI	820	927	983	1045	1111	1152	1210	1297	1400	1506	552	[34]
» хлористое	AgCl	912	1019	1074	1134	1200	1242	1297	1379	1467	1564	455	[34]
Серная кислота	H_2SO_4	145,8	178,0	194,2	211,5	229,7	241,5	257,0	279,8	305,0	330,0Р	10,5	[34]
Сернистый ангидрид	SO_2	—95,5	—83,0	—76,8	—69,7	—60,5	—54,6	—46,9	—35,4	—23,0	—10,0	—73,2	[34]
Серный ангидрид (α)	SO_3	—39,0	—23,7	—16,5	—9,1	—1,0	+4,0	10,5	20,5	32,6	44,8	16,9	[34]
» » (β)	SO_3	—34,0	—19,2	—12,3	—4,9	+3,2	8,0	14,3	23,7	32,6	44,8	32,3	[34]
» » (γ)	SO_3	—15,3	—2,0	+4,3	11,1	17,9	21,4	28,0	35,8	44,0	51,6	62,1	[34]
Сероводород	H_2S	—134,3	—122,4	—116,3	—109,7	—102,3	—97,9	—91,6	—82,3	—71,8	—60,4	—85,5	[34]

Продолжение табл. 12.4

Вещество	Формула	Давление пара, *мм рт. ст.*										Температура плавления °С	Литература
		1	5	10	20	40	60	100	200	400	760		
Силан	SiH_4	—179,3	—168,6	—163,0	—156,9	—150,3	—146,3	—140,5	—131,6	—122,0	—111,5	—185	[34]
Синильная кислота	HCN	—71,0	—55,3	—47,7	—39,7	—30,9	—25,1	—17,8	—5,3	+10,2	25,9	—13,2	[34]
Скандий	Sc	1547	—	1777	—	—	—	2097	—	—	2427	1400	[2]
Стронций	Sr	737	—	877	—	—	—	1097	—	—	1357	770	[2]
Стронция окись	SrO	2068	2198	2262	2333	2410	—	—	—	—	—	2430	[34]
Сульфурил хлористый	SO_2Cl_2	—	—35,1	—24,8	—13,4	—1,0	+7,2	17,8	33,7	51,3	69,2	—54,1	[34]
Сурьма	Sb	731	—	960	—	—	—	1289	—	—	1625	630,5	[2]
Сурьма пятифтористая	SbF_5	2,7	27,3	39,2	52,2	66,2	75,0	86,8	104,1	123,1	142,5	8,3	[52]
» пятихлористая	$SbCl_5$	22,7	48,6	61,8	75,8	91,0	101,0	114,1	—	—	—	2,8	[34]
» трехбромистая	$SbBr_3$	93,9	126,0	142,7	158,3	177,4	188,1	203,5	225,7	250,2	275,0	96,6	[34]
» трехиодистая	SbI_3	163,6	203,8	223,5	244,8	267,8	282,5	303,5	333,8	368,5	401,0	167	[34]
» треххлористая	$SbCl_3$	49,2	71,4	85,2	100,6	117,8	128,3	143,3	165,9	192,2	219,0	73,4	[34]
Сурьмы трехокись	Sb_2O_3	574	626	666	729	812	873	957	1085	1242	1425	656	[34]
Таллий	Tl	825	931	983	1040	1103	1143	1196	1274	1364	1457	303,5	[34]
Таллий бромистый	TlBr	—	490	522	559	598	621	653	703	759	819	460	[34]
» иодистый	TlI	440	502	531	567	607	631	663	712	763	823	440	[34]
» пятифтористый	TlF_5	59,3	89,0	103,5	119,2	136,2	146,9	161,2	182,2	205,4	229,0	—	[53]
» хлористый	TlCl	—	487	517	550	589	612	645	694	748	807	430	[34]
Таитал	Ta	3705	—	4135	—	—	—	4677	—	—	5292	2997	[2]
Тантал пятифтористый	TaF_5	—	—	—	—	—	110,3	130,0	159,9	194,0	230,0	96,8	[34]
Теллур	Te	517	—	632	—	—	—	792	—	—	1012	450	[2]
Теллур четыреххлористый	$TeCl_4$	—	—	233	253	273	287	304	330	360	392	224	[34]
шестифтористый	TeF_6	—111,3	—98,8	—92,4	—86,0	—78,4	—73,8	—67,9	—57,3	—48,2	—38,6	—37,8	[34]
»													
Тетраборан	B_4H_{10}	—90,9	—73,1	—64,3	—54,8	—44,3	—37,4	—28,1	—14,0	+0,8	16,1	—119,9	[34]
Тетрагидропентаборан	B_5H_{11}	—50,2	—29,9	—19,9	—9,2	+2,7	10,2	20,1	34,8	51,2	67,0	—	[34]
Тетраметилгерманий	$Ge(CH_3)_4$	—73,2	—54,6	—45,2	—35,0	—23,4	—16,2	—6,3	+8,8	26,0	44,0	—88	[34]
Тетрасилан	Si_4H_{10}	—27,7	—6,2	+4,3	15,8	28,4	36,6	47,4	63,6	81,7	100,0	—93,6	[34]
Тионилбромид	$SOBr_2$	—6,7	+18,4	31,0	44,1	58,8	68,3	80,6	99,0	119,2	139,5	—52,2	[34]
Тионилхлорид	$SOCl_2$	—52,9	—32,4	—21,9	—10,5	+2,2	10,4	21,4	37,9	56,5	75,4	—104,5	[34]
Титан	Ti	2191	—	2490	—	—	—	2833	—	—	3169	1707	[2]
Титан четыреххлористый	$TiCl_4$	—13,9	+9,4	21,3	34,2	48,4	58,0	71,0	90,5	112,7	136,0	—30	[34]
Трибромсилан	$SiHBr_3$	—30,5	—8,0	+3,4	16,0	30,0	39,2	51,6	70,2	90,2	111,8	—73,5	[34]
Трибромфторсилан	$SiBr_3F$	—46,1	—25,4	—15,1	—3,7	+9,2	17,4	28,6	45,7	64,6	83,8	—82,5	[34]
Тригерман	Ge_3H_8	—36,9	—12,8	—0,9	+11,8	26,3	35,5	47,9	67,0	88,6	110,8	—105,6	[34]
Трисилан	Si_3H_8	—68,9	—49,7	—40,0	—29,0	—16,9	—9,0	+1,6	17,8	35,5	53,1	—117,2	[34]
Трифторсилан	$SiHF_3$	—152,0	—142,7	—138,2	—132,9	—127,3	—123,7	—118,7	—111,3	—102,8	—95,0	—131,4	[34]
Трихлоргерман	$GeHCl_3$	—41,3	—22,3	—13,0	—3,0	+8,8	16,2	26,5	41,6	58,3	—	—71,1	[34]
Трихлорсилан	$SiHCl_3$	—80,7	—62,6	—53,4	—43,8	—32,9	—25,8	—16,4	—1,8	+14,5	31,8	—126,6	[34]
Углерода двуокись	CO_2	—134,3	—124,4	—119,5	—114,4	—108,6	—104,8	—100,2	—93,0	—85,7	—78,2	—57,5	[34]
» окись	CO	—222,0	—217,2	—215,0	—212,8	—210,0	—208,1	—205,7	—201,3	—196,3	—191,3	—205,0	[34]
Уран	U	2456	—	2824	—	—	—	3306	—	—	3862	1133	[2]
Уран шестифтористый	UF_6	—30,3	—14,3	—7,6	+1,7	10,6	16,0	23,4	34,0	45,3	54,6	64,02	[17, 29]
Фосфин	PH_3	—	—	—	—	—129,4	—125,0	—118,8	—109,4	—98,3	—87,5	—132,5	[34]
Фосфоний бромистый	PH_4Br	—43,7	—28,5	—21,2	—13,3	—5,0	+0,3	7,4	17,6	28,0	38,3P	—	[34]
» иодистый	PH_4I	—25,2	—9,0	—1,1	+7,3	16,1	21,9	29,3	39,9	51,6	62,3	—	[34]

Вещество	Формула	Давление пара, *мм рт. ст.*										Температура плавления, °С	Литература
		1	5	10	20	40	60	100	200	400	760		
Фосфоний хлористый	PH_4Cl	—91,0	—79,6	—74,0	—68,0	—61,5	—57,3	—52,0	—44,0	—35,4	—27,0	—28,5	[34]
Фосфор желтый	P	76,6	111,2	128,0	146,2	166,7	179,8	197,3	222,7	251,0	280,0	44,1	[34]
» фиолетовый	P	237	271	287	306	323	334	349	370	391	417	590	[34]
» черный	P	290	323	338	354	371	381	393	413	432	453	—	[34]
Фосфора оксихлорид	$POCl_3$	—	—	2,0	13,6	27,3	35,8	47,4	65,0	84,3	105,1	2	[34]
» пятиокись (метастабильная форма)	P_2O_5	189	220	236	253	270	280	294	314	336	358	—	[34]
Фосфора пятиокись (стабильная форма)	P_2O_5	384	424	442	462	481	493	510	532	556	591	569	[34]
» тиобромид	$PSBr_3$	50,0	72,4	83,6	95,5	108,0	116,0	126,3	141,8	157,8	175,0Р	38	[34]
» тиохлорид	$PSCl_3$	—18,3	+4,6	16,1	29,0	42,7	51,8	63,8	82,0	102,3	124,0	—36,2	[34]
» трехокись	P_2O_3	—	39,7	53,0	67,8	84,0	94,2	108,3	129,0	150,3	173,1	22,5	[34]
Фосфор пятихлористый	PCl_5	55,5	74,0	83,2	92,5	102,5	108,3	117,0	131,3	147,2	162,0	—	[34]
» трехбромистый	PBr_3	7,8	34,4	47,8	62,4	79,0	89,8	103,6	125,2	149,7	175,3	—40	[34]
» треххлористый	PCl_3	—51,6	—31,5	—21,3	—10,2	+2,3	10,2	21,0	37,6	56,9	74,2	—111,8	[34]
Франций	Fr	224	—	310	—	—	—	435	—	—	606	27	[2]
Фтор	F_2	—223,0	—216,9	—214,1	—211,0	—207,7	—205,6	—202,7	—198,3	—193,2	—188,2	—219,7	[55]
Фтора окись	F_2O	—196,1	—186,6	—182,3	—177,8	—173,0	—170,0	—165,8	—159,0	—151,9	—145,3	—223,9	[56, 57]
Фторсилан	SiH_3F	—153,0	—145,5	—141,2	—136,3	—130,8	—127,2	—122,4	—115,2	—106,8	—98,0	—	[34]
Фтортрихлорсилан	$SiCl_3F$	—92,6	—76,4	—68,3	—59,0	—48,8	—42,2	—33,2	—19,3	—4,0	+12,2	—120,8	[34]
Хлор	Cl_2	—118,0	—106,7	—101,6	—93,3	—84,5	—79,0	—71,7	—60,2	—47,3	—33,8	—100,7	[34]
Хлора двуокись	ClO_2	—	—	—59,0	—51,2	—42,8	—37,2	—29,4	—17,8	—4,0	+11,1	—59	[34]
» окись	Cl_2O	—98,5	—81,6	—73,1	—64,3	—54,3	—48,0	—39,4	—26,5	—12,5	+2,2	—116	[34]
» шестиокись	Cl_2O_6	7,5	30,5	42,0	54,3	68,0	76,3	87,7	104,7	123,8	142,0	3,5	[34]
Хлорный ангидрид	Cl_2O_7	—45,3	—23,8	—13,2	—2,1	+10,3	18,2	29,1	44,6	62,2	78,8	—91	[34]
Хлорсилан	SiH_3Cl	—117,8	—104,3	—97,7	—90,1	—81,8	—76,0	—68,5	—57,0	—44,5	—30,4	—	[34]
Хлорсульфоновая кислота	HSO_3Cl	32,0	53,5	64,0	75,3	87,6	95,2	105,3	120,0	136,1	151,0Р	—80	[34]
Хлортрифторсилан	$SiClF_3$	—144,0	—133,0	—127,0	—120,5	—112,8	—108,2	—101,7	—91,7	—81,0	—70,0	—142	[34]
Хлор трехфтористый	ClF_3	—	—80,4	—71,8	—62,3	—51,3	—44,1	—34,7	—20,7	—4,9	+11,5	—83	[34]
» фтористый	ClF	—	—143,4	—139	—134,3	—128,8	—125,3	—120,8	—114,4	—107,0	—100,5	—145	[34]
Хром	Cr	1695	—	1922	—	—	—	2221	—	—	2567	1903	[2]
Хрома карбонил	$Cr(CO)_6$	36,0	58,0	68,3	79,5	91,2	98,3	108,0	121,8	137,2	151,0	—	[34]
Хромил хлористый	CrO_2Cl_2	—18,4	+3,2	13,8	25,7	38,5	46,7	58,0	75,2	95,2	117,1	—	[34]
Цезий	Cs	279	341	375	409	449	474	509	561	624	690	28,5	[34]
Цезий бромистый	CsBr	748	838	887	938	993	1026	1072	1140	1221	1300	636	[34]
» иодистый	CsI	738	828	873	923	976	1009	1055	1124	1200	1280	621	[34]
» фтористый	CsF	712	798	844	893	947	980	1025	1092	1170	1251	683	[34]
» хлористый	CsCl	744	837	884	934	989	1023	1069	1139	1217	1300	646	[34]
Цинк	Zn	487	558	593	632	673	700	736	788	844	907	419,4	[34]
Цинк фтористый	ZnF_2	1243	1328	1359	1402	1448	1480	1527	1602	1690	1770	872	[36]
» хлористый	$ZnCl_2$	428	481	508	536	566	584	610	648	689	732	365	[34]
Цирконий четырехбромистый	$ZrBr_4$	207	237	250	266	281	289	301	318	337	357	450	[34]
» четырехиодистый	ZrI_4	264	297	311	329	344	355	369	389	409	431	499	[34]
» четыреххлористый	$ZrCl_4$	185,7	214,7	228,4	242,8	258,1	267,5	279,7	297,3	316,1	334,6	437	[41]

Таблица 12.5

Температуры, °С, при которых устанавливается указаиное давление паров иеорганических веществ (выше 1 *атм*)

Вещество	Формула	Давление пара, *атм*									Критическая температура, °С	Критическое давление, *атм*	Литература
		1	2	5	10	20	30	40	50	60			
Азот	N_2	—195,8	—189,2	—179,1	—169,8	—157,6	—148,3	—	—	—	—147,2	33,5	[34]
Азота закись	NO_2	—88,5	—76,8	—58,0	—40,7	—18,8	—4,3	+8,0	18,0	27,4	36,5	71,7	[34]
» окись	NO	—151,7	—145,1	—135,7	—127,3	—116,8	—109,0	—103,2	—99,0	—94,8	—92,9	64,6	[34]
» четырехокись	N_2O_4	21,0	37,3	59,8	79,4	100,3	112,3	121,4	127,0	132,2	158	99	[34]
Азот трехфтористый	NF_3	—129,0	—	—	—	—	—	—	—	—	—39,3±0,1	44,7±0,2	[35]
Аммиак	NH_3	—33,6	—18,7	+4,7	25,7	50,1	66,1	78,9	89,3	98,3	132,4	111,5	[34]
Аргон	Ar	—185,6	—179,0	—166,7	—154,9	—141,3	—132	—124,9	—	—	—122,0	48,0	[34]
Бор трехфтористый	BF_3	—100,7	—89,4	—72,6	—57,7	—40,0	—28,4	—19,0	—	—	—12,2	49,2	[34]
» треххлористый	BCl_3	12,7	33,2	96,7	135,4	161,5	—	—	—	—	178,8	38,2	[34]
Бром	Br_2	58,2	78,8	110,3	139,8	174,0	197,0	216,0	230,0	243,5	302,2	121	[34]
Вода	H_2O	99,09*	119,62*	151,11*	179,04*	211,38*	232,76*	249,18*	262,70*	274,29*	374,15	225,65	[1]
Водород	H_2	—252,5	—250,2	—246,0	—241,6	—	—	—	—	—	—240,0	12,8	[34]
Водород бромистый	HBr	—66,5	—51,5	—29,1	—8,4	+16,8	33,9	48,1	60,0	70,6	90,0	84,4	[34]
» иодистый	HI	—35,1	—18,9	+7,3	32,0	62,2	83,2	100,7	116,2	127,5	151,0	82,0	[34]
» селенистый	H_2Se	—41,1	—25,2	0,0	+23,4	50,8	69,7	84,6	97,2	108,7	137	91,0	[34]
» фтористый	HF	19,43	37,1	70,4	97,9	130,9	—	—	—	—	—	—	[40]
» хлористый	HCl	—84,8	—71,4	—50,5	—31,7	—8,8	+5,9	17,8	27,9	36,2	51,4	81,6	[34]
Вольфрам шестифтористый	WF_6	17,0	36,4	67,7	97,0	131,5	155,6	172,0	—	—	179,5	45,0	[15]
Гелий	He	—268,6	—268,0	—	—	—	—	—	—	—	—267,9	2,26	[34]
Дихлордифторсилан	$SiCl_2F_2$	—31,8	—15,1	+11,6	36,6	66,2	86,0	—	—	—	95,8	34,5	[34]
Кислород	O_2	—183,1	—176,0	—164,5	—153,2	—140,0	—130,7	—124,1	—	—	—118,9	49,7	[34]
Кремний четырехфтористый	SiF_4	—94,8	—84,4	—67,9	—52,6	—33,4	—21,2	—	—	—	—14,2	36,7	[34]
Криптон	Kr	—152,0	—143,5	—130,0	—118,0	—101,7	—88,8	—78,4	—66,5	—	—63	54	[34]
Молибден шестифтористый	MoF_6	35,0	54,9	88,0	118,3	154,4	178,9	197,5	—	—	211,4	48,7	[16]
Неон	Ne	—246,0	—243,5	—239,9	—236,0	—230,8	—	—	—	—	—228,3	26,9	[34]
Олово хлорное	$SnCl_2$	113,0	141,3	184,3	223,0	270,0	299,8	—	—	—	318,7	37,9	[34]
Перхлорилфторид	$FClO_3$	—46,4	—30,4	—4,7	+18,3	46,0	64,9	79,7	92,3	—	95,17	53,0	[58]
Плутоний шестифтористый	PuF_6	62,16	(85,1)	—	—	—	—	—	—	—	—	—	[49]
Сера шестифтористая	SF_6	—68,2	—53,1	—29,4	—7,8	+18,1	35,7	—	—	—	45,5	37,1	[59]
Сернистый ангидрид	SO_2	—10,0	+6,3	32,1	55,5	83,8	102,6	118,0	130,2	141,7	157,2	77,7	[34]
Серный ангидрид	SO_3	44,8	60,0	82,5	104,0	138,0	157,8	175,0	187,8	198,0	218,3	83,6	[34]
Сероводород	H_2S	—60,4	—45,9	—22,3	—0,4	+25,5	41,9	55,8	66,7	76,3	100,3	88,9	[34]
Синильная кислота	HCN	25,9	45,9	75,8	102,7	135,0	153,8	169,9	183,5	—	183,5	50,0	[34]
Углерода двуокись	CO_2	—78,2	—69,1	—56,7	—39,5	—18,9	—5,3	+5,9	14,9	22,4	31,1	73,0	[34]
» окись	CO	—191,3	—183,5	—170,7	—161,0	—149,7	—141,9	—	—	—	—138,7	34,6	[34]
Уран шестифтористый	UF_6	56,5	—	112,7	139,3	177,3	202,9	222,4	—	—	230,1	45,3	[17]
Фтортрихлорсилан	$SiCl_3F$	12,2	32,4	64,6	94,2	131,8	156,0	—	—	—	165,3	35,3	[34]
Хлор	Cl_2	—33,8	—16,9	+10,3	35,6	65,0	84,8	101,6	115,2	127,1	144,0	76,1	[34]
Хлортрифторсилан	$SiClF_3$	—70,0	—57,3	—37,2	—18,6	+4,1	19,4	—	—	—	34,8	34,2	[34]

* При давлении в *кГ/см²*.

12.4. ОРГАНИЧЕСКИЕ ВЕЩЕСТВА

Температуры, °С, при которых устанавливается указанное давление паров органических веществ (ниже 1 *атм*)* [34]

Вещество	Формула	Давление пара, *мм рт. ст.*										Температура плавления, °С
		1	5	10	20	40	60	100	200	400	760	
Адипиновая кислота	$C_6H_{10}O_4$	159,5	191,0	205,5	222,0	240,5	251,0	265,0	287,8	312,5	337,5	152,0
Азелаиновая кислота	$C_9H_{16}O_4$	178,3	210,4	225,5	242,4	260,0	271,8	286,5	309,6	332,8	356,5P	106,5
Азелаиновый альдегид	$C_9H_{18}O$	33,3	58,4	71,6	85,0	100,2	110,0	123,0	142,1	163,4	185,0	—
Азобензол	$C_{12}H_{10}N_2$	103,5	135,7	151,5	168,3	187,9	199,8	216,0	240,0	266,1	293,0	68,0
Акридин	$C_{13}H_9N$	129,4	165,8	184,0	203,5	224,2	238,7	256,0	284,0	314,3	346,0	110,5
Акриловая кислота	$C_3H_4O_2$	3,5	27,3	39,0	52,0	66,2	75,0	86,1	103,3	122,0	141,0	14,0
Акрилонитрил	C_3H_3N	—51,0	—30,7	—20,3	—9,0	+3,8	11,8	22,8	38,7	58,3	78,5	—82,0
Акролеин	C_3H_4O	—64,5	—46,0	—36,7	—26,3	—15,0	—7,5	+2,5	17,5	34,5	52,5	—87,7
Алантолактон	$C_{15}H_{20}O_2$	157,7	181,3	192,1	203,5	215,2	222,5	232,6	247,1	260,6	275,0	76,0
Аллен	C_3H_4	—120,6	—108,0	—101,0	—93,4	—85,2	—78,8	—72,5	—61,3	—48,5	—35,0	—136
4-Аллилвератрол	$C_{11}H_{14}O_2$	85,0	113,9	127,0	142,8	158,3	169,6	183,7	204,0	226,2	248,0	—
5-Аллилгваякол	$C_{10}H_{12}O_2$	83,6	113,3	127,0	143,2	159,8	170,7	185,5	206,8	229,8	254,0	—
Аллилдихлорэтилсилан	$C_5H_{10}Cl_2Si$	—3,0	+22,0	34,2	47,6	62,7	72,3	85,2	104,8	127,0	150,3	—
Аллилизопропиловый эфир	$C_6H_{12}O$	—43,7	—23,1	—12,9	—1,8	+10,9	18,7	29,0	44,3	61,7	79,5	—
Аллилизотиоцианат	C_4H_5NS	—2,0	+25,3	38,3	52,1	67,4	76,2	89,5	108,0	129,8	150,7	— 80,0
Аллиловый спирт	C_3H_6O	—20,0	+0,2	10,5	21,7	33,4	40,3	50,0	64,5	80,2	96,6	—129
Аллилпропиловый эфир	$C_6H_{12}O$	—39,0	—18,2	—7,9	+3,7	16,4	25,0	35,8	52,6	71,4	90,5	—
Аллилтрихлорсилан [60]	$C_3H_5Cl_3Si$	—20,7	+2,0	16,1	27,5	40,1	48,3	59,4	76,4	95,9	116,8	—
втор-Амилбензол	$C_{11}H_{16}$	27,8	53,0	65,8	79,5	94,1	103,9	116,7	135,8	156,2	178,0	—
Амилизопропионат	$C_8H_{16}O_2$	8,5	33,7	46,3	60,0	75,5	85,2	97,6	117,3	138,4	160,2	—
Амиллевулинат	$C_{10}H_{16}O_3$	81,3	110,0	124,0	139,7	155,8	165,2	180,5	203,1	227,4	253,2	—
Амиловый спирт	$C_5H_{12}O$	13,6	34,7	44,9	55,8	68,0	75,5	85,8	102,0	119,8	137,8	—
трет-Амиловый спирт	$C_5H_{12}O$	—12,9	+7,2	17,2	27,9	38,8	46,0	55,3	69,7	85,7	101,7	—11,9
Амилтриметилсилан	$C_8H_{20}Si$	—9,2	+14,7	26,7	39,8	54,4	63,8	76,2	95,0	116,6	139,0	—
Амилтриэтилсилан	$C_{11}H_{26}Si$	41,8	69,9	83,8	99,2	116,0	126,6	141,2	162,0	186,3	211,0	—
п-трет-Амилфенол	$C_{11}H_{16}O$	—	109,8	125,5	142,3	160,3	172,6	189,0	213,0	239,5	266,0	93,0
Анетол	$C_{10}H_{12}O$	62,6	91,6	106,0	121,8	139,3	149,8	164,2	186,1	210,5	235,3	22,5
Анизол	C_7H_8O	5,4	30,0	42,2	55,8	70,7	80,1	93,0	112,3	133,8	155,5	—37,3
Анилин	C_6H_7N	34,8	57,9	69,4	82,0	96,7	106,0	119,9	140,1	161,9	184,4	— 6,2
2-Анилинэтанол	$C_8H_{11}NO$	104,0	134,3	149,6	165,7	183,7	194,0	209,5	230,6	254,5	279,6	—
Анисовый альдегид	$C_8H_8O_2$	73,2	102,6	117,8	133,5	150,5	161,7	176,7	199,0	223,0	248,0	2,5
Антрахинон	$C_{14}H_{18}O_2$	190,0	219,4	234,2	248,3	264,3	273,3	285,0	314,6	346,2	379,9	286,0
Антрацен	$C_{14}H_{10}$	145,0	173,5	187,2	201,9	217,5	231,8	250,0	279,0	310,2	342,0	217,5
Апиол	$C_{12}H_{14}O_4$	116,0	145,9	160,2	176,2	193,7	204,3	218,0	239,8	262,1	285,0	30,0
Аценафтен	$C_{12}H_{10}$	—	114,8	131,2	148,7	168,2	181,2	197,5	222,1	250,0	277,5	95,0
Ацетальдегид	C_2H_4O	—81,5	—65,1	—56,8	—47,8	—37,8	—31,4	—22,6	—10,0	+4,9	20,2	—123,5
Ацетальдоксим	C_2H_5NO	—5,8	+15,2	25,8	36,5	48,6	56,1	66,2	81,7	98,0	115,0	47,0
Ацетамид	C_2H_5NO	65,0	92,0	105,0	120,0	135,8	145,8	158,0	178,3	200,0	222,0	81,0
Ацетанилид	C_8H_9NO	114,0	146,6	162,0	180,0	199,6	211,8	227,2	250,5	277,0	303,8	113,5
Ацетилен	C_2H_2	—142,9	—133,0	—128,2	—122,8	—116,7	—112,8	—107,9	—100,3	—92,0	—84,0	—81,5
Ацетон	C_3H_6O	—59,4	—40,5	—31,1	—20,8	—9,4	—2,0	+7,7	22,7	39,5	56,5	—94,6
1-Ацетонафтон	$C_{12}H_{10}O$	115,6	146,3	161,5	178,4	196,8	208,6	223,8	246,7	270,5	295,5	—
2-Ацетонафтон	$C_{12}H_{10}O$	120,2	152,3	168,5	185,7	203,8	214,7	229,8	251,6	275,8	301,0	55,5

* Буквой Р отмечена температура разложения, П—температура полимеризации.

Вещество	Формула	Давление пара, *мм рт. ст.*										Температура плавления, °С
		1	5	10	20	40	60	100	200	400	760	
Ацетонитрил	C_2H_3N	—47,0	—26,6	—16,3	—5,0	+7,7	15,9	27,0	43,7	62,5	81,8	—41,0
Ацетофенон	C_8H_8O	37,1	64,0	78,0	92,4	109,4	119,8	133,6	154,2	178,0	202,4	20,5
Бензальдегид	C_7H_6O	26,2	50,1	62,0	75,0	90,1	99,6	112,5	131,7	154,1	179,0	—26,0
Бензантрон	$C_{17}H_{10}O$	225,0	274,5	297,2	322,5	350,0	368,8	390,0	426,5Р	—	—	174,0
Бензгидрол	$C_{13}H_{12}O$	110,0	145,0	162,0	180,9	200,0	212,0	227,5	250,0	275,6	301,0	68,5
Бензил	$C_{14}H_{10}O_2$	128,4	165,2	183,0	202,8	224,5	238,2	255,8	283,5	314,3	347,0	95,0
Бензиламин	C_7H_9N	29,0	54,8	67,7	81,8	97,3	107,3	120,0	140,0	161,3	184,5	—
Бензилацетат	$C_9H_{10}O_2$	45,0	73,4	87,6	102,3	119,6	129,8	144,0	165,5	189,0	213,5	—51,5
Бензилдихлорсилан	$C_7H_8Cl_2Si$	45,3	70,2	83,2	96,7	111,8	121,3	133,5	152,0	173,0	194,3	—
Бензилизотиоцианат	C_8H_7NS	79,5	107,8	121,8	137,0	153,0	163,8	177,7	198,0	220,4	243,0	—
Бензиловый спирт	C_7H_8O	58,0	80,8	92,6	105,8	119,8	129,3	141,7	160,0	183,0	204,7	—15,3
Бензилфениловый эфир	$C_{13}H_{12}O$	95,4	127,7	144,0	160,7	180,1	192,6	209,2	233,2	259,8	287,0	—
Бензилциннамат	$C_{16}H_{14}O_2$	173,8	206,3	221,5	239,3	255,8	267,0	281,5	303,8	326,7	350,0	39,0
Бензилэтиловый эфир	$C_9H_{12}O$	26,0	52,0	65,0	79,6	95,4	105,5	118,9	139,6	161,5	185,0	—
Бензоил хлористый	C_7H_5ClO	32,1	59,1	73,0	87,6	103,8	114,7	128,0	149,5	172,8	197,2	—0,5
Бензоин	$C_{14}H_{12}O_2$	135,6	170,2	188,0	207,0	227,6	241,7	258,0	284,4	313,5	343,0	132,0
Бензойная кислота	$C_7H_6O_2$	96,0	119,5	132,1	146,7	162,6	172,8	186,2	205,8	227,0	249,2	121,7
Бензойный ангидрид	$C_{14}H_{10}O_3$	143,8	180,0	198,0	218,0	239,8	252,7	270,4	299,1	328,8	360,0	42,0
Бензол	C_6H_6	—36,7	—19,6	—11,5	—2,6	+7,6	15,4	26,1	42,2	60,6	80,1	5,5
Бензолсульфонилхлорид	$C_6H_5ClO_2S$	65,9	96,5	112,0	129,0	147,7	158,2	174,5	198,0	224,0	251,5Р	14,5
Бензоинитрил	C_7H_5N	44,5	71,7	85,5	100,2	116,6	127,0	141,0	161,3	185,0	208,0	—13
Бензофенон	$C_{13}H_{10}O$	108,2	141,7	157,6	175,8	195,7	208,2	224,4	249,8	276,8	305,4	48,5
Бистрихлорсилэтан [60]	$C_2H_4Cl_6Si_2$	—	—	77,7	92,9	109,6	120,1	134,2	155,2	178,6	202,9	—
Боринкарбонил	CH_3BO	—139,2	—127,3	—121,1	—114,1	—106,6	—101,9	—95,3	—85,5	—74,8	—64,0	—
d-Борнилацетат	$C_{12}H_{20}O_2$	46,9	75,7	90,2	106,0	123,7	135,7	149,8	172,0	197,5	223,0	29,0
Борнилбутират	$C_{14}H_{24}O_2$	74,0	103,4	118,0	133,8	150,7	161,8	176,4	198,0	222,2	247,0	—
Борнилизобутират	$C_{14}H_{24}O_2$	70,0	99,8	114,0	130,0	147,2	157,6	172,2	194,2	218,2	243,0	—
Борнилпропионат	$C_{13}H_{22}O_2$	64,6	93,7	108,0	123,7	140,4	151,2	165,7	187,5	211,2	235,0	—
Борнилформиат	$C_{11}H_{18}O_2$	47,0	74,8	89,3	104,0	121,2	131,7	145,8	166,4	190,2	214,0	—
Брассидиновая кислота	$C_{22}H_{42}O_2$	209,6	241,7	256,0	272,9	290,0	301.5	316,2	336,8	359,6	382,5Р	61,5
4-Броманизол	C_7H_7BrO	48,8	77,8	91,9	107,8	125,0	136,0	150,1	172,7	197,5	223,0	12,5
Бромбензол	C_6H_5Br	2,9	27,8	40,0	53,8	68,6	78,1	90,8	110,1	132,3	156,2	—30,7
1-Бромбутан	C_4H_9Br	—33,0	—11,2	—0,3	+11,6	24,8	33,4	44,7	62,0	81,7	101,6	—112,4
1-Бром-2-бутанол	C_4H_9BrO	23,7	45,4	55,8	67,2	79,5	87,0	97,6	112,1	128,3	145,0	—
1-Бром-2-бутанон	C_4H_7BrO	6,2	30,0	41.8	54,2	68,2	77,3	89,2	107,0	126,3	147,0	—
цис-1-Бром-1-бутен	C_4H_7Br	—44,0	—23,2	—12,8	—1,4	+11,5	19,8	30,8	47,8	66,8	86,2	—
транс-1-Бром-1-бутен	C_4H_7Br	—38,4	—17,0	—6,4	+5,4	18,4	27,2	38,1	55,7	75,0	94,7	—100,3
2-Бром-2-бутен	C_4H_7Br	—47,3	—27,0	—16,8	—5,3	+7,2	15,4	26,3	42,8	61,9	81,0	—133,4
цис-2-Бром-2-бутен	C_4H_7Br	—39,0	—17,9	—7,2	+4,6	17,7	26,2	37,5	54,5	74,0	93,9	—111,2
транс-2-Бром-2-бутен	C_4H_7Br	—45,0	—24,1	—13,8	—2,4	+10,5	18,7	29,9	46,5	66,0	85,5	—114,6
4-Бромдифенил	$C_{12}H_9Br$	98,0	133,7	150,0	169,8	190,8	204,5	221,8	248,2	277,7	310,0	90,5
2-Бром-4,6-дихлорфенол	$C_6H_3BrCl_2O$	84,0	115,6	130,8	147,7	165,8	177,6	193,2	216,5	242,0	268,0	68,0
Бромистый бензоил	C_7H_5BrO	47,0	75,4	89,8	105,4	122,6	133,4	147,7	169,2	193,7	218,5	0,0
2-Бром-1,4-ксилол	C_8H_9Br	37,5	65,0	78,8	94,0	110,6	121,6	135,7	156,4	181,0	206,7	9,5
1-Бром-3-метилбутан	$C_5H_{11}Br$	—20,4	+2,1	13,6	26,1	39,8	48,7	60,4	78,7	99,4	120,4	—
1-Бромнафталин	$C_{10}H_7Br$	84,2	117,5	133,6	150,2	170,2	183,5	198,8	224,2	252,0	281,1	5,5
2-Бром-2-нитрозопропан	C_3H_6BrNO	—33,5	—14,0	—4,3	+6,0	17,9	25,5	35,2	50,0	66,2	83,0	—

Вещество	Формула	Давление пара, *мм рт. ст.*										Температура плавления, °С
		1	5	10	20	40	60	100	200	400	760	
3-Бромпиридин	C_5H_4BrN	16,8	42,0	55,2	69,1	84,1	94,1	107,8	127,7	150,0	173,4	—
1-Бромпропан	C_3H_7Br	—53,0	—33,4	—23,3	—12,4	—0,3	+7,5	18,0	34,0	52,0	71,0	—109,9
2-Бромпропан	C_3H_7Br	—61,8	—42,5	—32,8	—22,0	—10,1	—2,5	+8,0	23,8	41,5	60,0	—89,0
α-Бромтолуол	C_7H_7Br	32,2	59,6	73,4	88,3	104,8	115,6	129,8	150,8	175,2	198,5	—4,0
2-Бромтолуол	C_7H_7Br	24,4	49,7	62,3	76,0	91,0	100,0	112,0	133,6	157,3	181,8	—28,0
3-Бромтолуол	C_7H_7Br	14,8	50,8	64,0	78,1	93,9	104,1	117,8	138,0	160,0	183,7	—39,8
4-Бромтолуол	C_7H_7Br	10,3	47,5	61,1	75,2	91,8	102,3	116,4	137,4	160,2	184,5	28,5
3-Бром-2,4,6-трихлорфенол	$C_6H_2BrCl_3O$	112,4	146,2	163,2	181,8	200,5	213,0	229,3	253,0	278,0	305,8	—
Бромуксусная кислота	$C_2H_3BrO_2$	54,7	81,6	94,1	108,2	124,0	133,8	146,3	165,8	186,7	208,0	49,5
2-Бром-4-фенилфенол	$C_{12}H_9BrO$	100,0	135,4	152,3	171,8	193,8	207,0	224,5	251,0	280,2	311,0	95,0
1,4-Бромхлорбензол	C_6H_4BrCl	32,0	59,5	72,7	87,8	103,8	114,8	128,0	149,5	172,6	196,9	—
1-Бром-1-хлорэтан	C_2H_4BrCl	—36,0	—18,0	—9,4	0,0	+10,4	17,0	28,0	44,7	63,4	82,7	16,6
1-Бром-2-хлорэтан	C_2H_4BrCl	—28,8	—7,0	+4,1	16,0	29,7	38,0	49,5	66,8	86,0	106,7	—16,6
1-Бром-4-этилбензол	C_8H_9Br	30,4	42,5	74,0	90,2	108,5	121,0	135,5	156,5	182,0	206,0	—45,0
(2-Бромэтил)-бензол	C_8H_9Br	48,0	76,2	90,5	105,8	123,2	133,8	148,2	169,8	194,0	219,0	—
1-Бромэтилен	C_2H_3Br	—95,4	—77,8	—68,8	—58,8	—48,1	—41,2	—31,9	—17,2	—1,1	+15,8	—138,0
2-Бромэтиловый-2-хлорэтиловый эфир	C_4H_8BrClO	36,5	63,2	76,3	90,8	106,6	116,4	129,8	150,0	172,3	195,8	—
(2-Бромэтил)-циклогексан	$C_8H_{15}Br$	38,7	66,6	80,5	95,8	113,0	123,7	138,0	160,0	186,2	213,0	—
1,2-Бутадиен	C_4H_6	—89,0	—72,7	—64,2	—54,9	—44,3	—37,5	—28,3	—14,2	+1,8	18,5	—
1,3-Бутадиен	C_4H_6	—102,8	—87,6	—79,7	—71,0	—61,3	—55,1	—46,8	—33,9	—19,3	—4,5	—108,9
Бутан	C_4H_{10}	—101,5	—85,7	—77,8	—68,9	—59,1	—52,8	—44,2	—31,2	—16,3	—0,5	—135,0
1,3-Бутандиол	$C_4H_{10}O_2$	22,2	67,5	85,3	100,0	117,4	127,5	141,2	161,0	183,8	206,5	77
2,3-Бутандиол	$C_4H_{10}O_2$	44,0	68,4	80,3	93,4	107,8	116,3	127,8	145,6	164,0	182,0	22,5
2-Бутанон	C_4H_8O	—48,3	—28,0	—17,7	—6,5	+6,0	14,0	25,0	41,6	60,0	79,6	—85,9
1,2,3-Бутантриол	$C_4H_{10}O_3$	102,0	132,0	146,0	161,0	178,0	188,0	202,5	222,0	243,5	264,0	—
1-Бутен	C_4H_8	—104,8	—89,4	—81,6	—73,0	—63,4	—57,2	—48,9	—36,2	—21,7	—6,3	—130
цис-2-Бутен	C_4H_8	—96,4	—81,1	—73,4	—64,6	—54,7	—48,4	—39,8	—26,8	—12,0	+3,7	—138,9
транс-2-Бутен	C_4H_8	—99,4	—84,0	—76,3	—67,5	—57,6	—51,3	—42,7	—29,7	—14,8	+0,9	—105,4
Бутенин	C_4H_4	—93,2	—77,7	—70,0	—61,3	—51,7	—45,3	—37,1	—24,1	—10,1	+5,3	—
3-Бутеннитрил	C_4H_5N	—19,6	+2,9	14,1	26,6	40,0	48,8	60,2	78,0	98,0	119,0	—
Бутилакрилат	$C_7H_{12}O_2$	—0,5	+23,5	35,5	48,6	63,4	72,6	85,1	104,0	125,2	147,4	—64,6
Бутилбензол	$C_{10}H_{14}$	22,7	48,8	62,0	76,3	92,4	102,6	116,2	136,9	159,2	183,1	—81,2
втор-Бутилбензол	$C_{10}H_{14}$	18,6	44,2	57,0	70,6	86,2	96,0	109,5	128,8	150,3	173,5	—82,7
трет-Бутилбензол	$C_{10}H_{14}$	13,0	39,0	51,7	65,6	80,8	90,6	103,8	123,7	145,8	168,5	—58,0
втор-Бутилгликолат	$C_6H_{12}O_3$	28,3	53,6	66,0	79,8	94,2	104,0	116,4	135,5	155,6	177,5	—
4-*трет*-Бутил-2-крезол	$C_{11}H_{16}O$	74,3	103,7	118,0	134,0	150,8	161,7	176,2	197,8	221,8	247,0	—
2-*трет*-Бутил-4-крезол	$C_{11}H_{16}O$	70,0	98,0	112,0	127,2	143,9	153,7	167,0	187,8	210,0	232,6	—
4-*трет*-Бутил-2,5-ксиленол	$C_{12}H_{18}O$	88,2	119,8	135,0	151,0	169,8	180,3	195,0	217,5	241,3	265,3	—
4-*трет*-Бутнл-2-6-ксиленол	$C_{12}H_{18}O$	74,0	103,9	119,0	135,0	152,2	163,6	176,0	196,0	217,8	239,8	—
6-*трет*-Бутил-2,4-ксиленол	$C_{12}H_{18}O$	70,3	100,2	115,0	131,0	148,5	158,2	172,0	192,3	214,2	236,5	—
6-*трет*-Бутил-3,4-ксиленол	$C_{12}H_{18}O$	83,9	113,6	127,0	143,0	159,7	170,0	184,0	204,5	226,7	249,5	—
Бутиловый спирт	$C_4H_{10}O$	—1,2	+20,0	30,2	41,5	53,4	60,3	70,1	84,3	100,8	117,5	—79,9

Продолжение табл. 12.6

Вещество	Формула	Давление пара, *мм рт. ст.*										Температура плавления, °С
		1	5	10	20	40	60	100	200	400	760	
втор-Бутиловый спирт	$C_4H_{10}O$	—12,2	+7,2	16,9	27,3	38,1	45,2	54,1	67,9	83,9	99,5	—114,7
трет-Бутиловый спирт	$C_4H_{10}O$	—20,4	—3,0	+5,5	14,3	24,5	31,0	39,8	52,7	68,0	82,9	25,3
Бутилтриметилсилан	$C_7H_{18}Si$	—23,4	—1,3	+9,9	22,1	35,9	44,7	56,3	74,0	93,8	115,0	—
Бутилтриэтилсилан	$C_{10}H_{24}Si$	27,1	53,8	67,5	82,0	98,3	109,3	123,2	144,0	167,5	192,0	—
4-*трет*-Бутилфенилдихлорфосфат	$C_{10}H_{13}Cl_2O_2P$	96,0	129,6	146,0	164,0	184,3	197,2	214,3	240,0	268,2	299,0	—
4-*трет*-Бутилфенилсалицилат	$C_{17}H_{18}O_3$	166,2	206,6	225,0	247,3	270,7	285,5	305,8	336,0	370,6	404,0Р	—
2-(4-*трет*-Бутилфенокси)-этилацетат	$C_{14}H_{20}O_3$	118,0	150,0	165,8	183,3	201,5	212,8	228,0	250,3	277,6	304,4	—
2-*втор*-Бутилфенол	$C_{10}H_{14}O$	57,4	86,0	100,8	116,1	133,4	143,9	157,3	179,7	203,8	228,0	—
2-*трет*-Бутилфенол	$C_{10}H_{14}O$	56,6	84,2	98,1	113,0	129,2	140,0	153,5	173,8	196,3	219,5	—
4-*втор*-Бутилфенол	$C_{10}H_{14}O$	71,4	100,5	114,8	130,3	147,8	157,9	172,4	194,3	217,6	242,1	—
4-*трет*-Бутилфенол	$C_{10}H_{14}O$	70,0	99,2	114,0	129,5	146,0	156,0	170,2	191,5	214,0	238,0	99,0
Бутилформиат	$C_5H_{10}O_2$	—26,4	—4,7	+6,1	18,0	31,6	39,8	51,0	67,9	86,2	106,0	—
втор-Бутилформиат	$C_5H_{10}O_2$	—34,4	—13,3	—3,1	+8,4	21,3	29,6	40,2	56,8	75,2	93,6	—
трет-Бутилформиат	$C_5H_{10}O_2$	—32,7	—11,9	—1,2	+10,2	23,4	31,8	42,8	59,8	78,2	98,0	—
втор-Бутилхлорацетат	$C_6H_{11}ClO_2$	17,0	41,8	54,6	68,2	83,6	93,0	105,5	124,1	146,0	167,8	—
втор-Бутилхлорид	C_4H_9Cl	—60,2	—39,8	—29,2	—17,7	—5,0	+3,4	14,2	31,5	50,0	68,0	—131,3
трет-Бутилхлорид	C_4H_9Cl	—	—	—	—	—19,0	—11,4	—1,0	+14,6	32,6	51,0	—26,5
2-Бутил-2-этилбутан-1,3-диол	$C_{10}H_{22}O_2$	94,1	122,6	136,8	151,2	167,8	178,0	191,9	212,0	233,5	255,0	—
2-*трет*-Бутил-4-этилфенол	$C_{12}H_{18}O$	76,3	106,2	121,0	137,0	154,0	165,4	179,0	200,3	223,8	247,8	—
1-Бутин	C_4H_6	—92,5	—76,7	—68,7	—59,9	—50,0	—43,4	—34,9	—21,6	—6,9	+8,7	—130
2-Бутин	C_4H_6	—73,0	—57,9	—50,5	—42,5	—33,9	—27,8	—18,8	—5,0	+10,6	27,2	—32,5
Бутиронитрил	C_4H_7N	—20,0	+2,1	13,4	25,7	38,4	47,3	59,0	76,7	96,8	117,5	—
Валериановая кислота	$C_5H_{10}O_2$	42,2	67,7	79,8	93,1	107,8	116,6	128,3	146,0	165,0	184,4	—34,5
α-Валеролактон	$C_5H_8O_2$	37,5	65,8	79,8	95,2	101,9	122,4	136,5	157,7	182,3	207,5	—
Валеронитрил	C_5H_9N	—6,0	+18,1	30,0	43,3	57,8	66,9	78,6	97,7	118,7	140,8	—
Ванилин	$C_8H_8O_3$	107,0	138,4	154,0	170,5	188,7	199,8	214,5	237,3	260,0	285,0	81,5
2-Виниланизол	$C_9H_{10}O$	41,9	68,0	81,0	94,7	110,0	119,8	132,3	151,8	172,1	194,0П	—
3-Виниланизол	$C_9H_{10}O$	43,4	69,9	83,0	97,2	112,5	122,3	135,3	154,0	175,8	197,5П	—
4-Виниланизол	$C_9H_{10}O$	45,2	72,0	85,7	100,0	116,0	126,1	139,7	159,0	182,0	204,5П	—
Винилацетат	$C_4H_6O_2$	—48,0	—28,0	—18,0	—7,0	+5,3	13,0	23,3	38,4	55,5	72,5	—
Винилтрихлорсилан [60]	$C_2H_3Cl_3Si$	—	—	—10,7	+1,3	14,5	22,9	34,2	51,3	70,5	90,6	—
Винилтриэтоксисилан [60]	$C_8H_{18}O_3Si$	—	—	49,4	62,6	77,2	86,4	98,9	117,6	138,6	160,5	—
4-Винилфенетол	$C_{10}H_{12}O$	64,0	91,7	105,6	120,3	136,3	146,4	159,8	180,0	202,8	225,0П	—
Гвайол	$C_{15}H_{26}O$	100,0	132,0	148,0	165,0	184,0	195,8	211,9	235,3	261,2	288,0	91,0
Гексадекаметилгептасилоксан	$C_{15}H_{48}O_6Si_7$	93,2	123,6	138,5	154,2	171,8	183,3	198,0	219,5	244,7	270,0	—
Гексадекаметилциклооктасилоксан	$C_{16}H_{48}O_8Si_8$	103,5	135,3	150,5	167,7	186,3	197,5	213,8	236,7	263,0	290,0	31,5
Гексадекан	$C_{16}H_{34}$	105,3	135,2	149,8	164,7	181,3	193,2	208,5	231,7	258,3	287,5	18,5
2-Гексадеканон	$C_{16}H_{32}O$	109,8	151,5	167,3	184,6	203,7	215,0	230,5	254,4	279,8	307,0	—
1-Гексадецен	$C_{16}H_{32}$	101,6	131,7	146,2	162,0	178,8	190,8	205,3	226,8	250,0	274,0	4,0
1,5-Гексадиен-3-ин	C_6H_6	—45,1	—24,4	—14,0	—2,8	+10,0	18,1	29,5	46,0	64,4	84,0	—

Вещество	Формула	Давление пара, *мм рт. ст.*										Температура плавления, °С
		1	5	10	20	40	60	100	200	400	760	
Гексакозан	$C_{26}H_{54}$	204,0	240,0	257,4	275,8	295,2	307,8	323,2	348,4	374,6	399,8	56,6
Гексаметилдисилоксан	$C_6H_8OSi_2$	—29,0	—7,8	+2,8	14,0	26,7	34,7	45,6	61,6	80,0	99,2	—
Гексаметилциклотрисилоксан	$C_6H_{18}O_3Si_2$	—	—	—	—	—	67,5	78,7	95,9	114,7	134,0	64,0
Гексан	C_6H_{14}	—53,9	—34,5	—25,0	—14,1	—2,3	+5,4	15,8	31,6	49,6	68,7	—95,3
1-Гексанол	$C_6H_{14}O$	24,4	47,2	58,2	70,3	83,7	92,0	102,8	119,6	138,0	157,0	—51,6
2-Гексанол	$C_6H_{14}O$	14,6	34,8	45,0	55,9	67,9	76,0	87,3	103,7	121,8	139,8	—
3-Гексанол	$C_6H_{14}O$	2,5	25,7	36,7	49,0	62,2	70,7	81,8	98,3	117,0	135,5	—
2-Гексанон	$C_6H_{12}O$	7,7	28,8	38,8	50,0	62,0	69,8	79,8	94,3	111,0	127,5	—56,9
Гексахлорбензол	C_6Cl_6	114,4	149,3	166,4	185,7	206,0	219,0	235,5	258,5	283,5	309,4	230,0
Гексахлорэтан	C_2Cl_6	32,7	49,8	73,5	87,6	102,3	112,0	124,2	143,1	163,8	185,6	186,6
Гексаэтилбензол	$C_{18}H_{30}$	—	134,3	150,3	168,0	187,7	199,7	216,0	241,7	268,5	298,3	130,0
Гексаэтилциклотрисилоксан	$C_{12}H_{30}O_3Si_3$	—	—	123,0	137,1	152,9	163,1	177,1	198,6	223,6	250,3	—
1-Гексен	C_6H_{12}	—57,5	—38,0	—28,1	—17,2	—5,0	+2,8	13,0	29,0	46,8	66,0	—98,5
Гексиллевулинат	$C_{11}H_{20}O_3$	90,0	120,0	134,7	150,2	167,8	179,0	193,6	215,7	241,0	266,8	—
Гексилтриметилсилан	$C_6H_{22}Si$	6,7	32,0	44,8	58,5	74,0	83,8	97,2	117,0	139,9	163,0	—
Генэйкозан	$C_{21}H_{44}$	152,6	188,0	205,4	223,2	243,4	255,3	272,0	296,5	323,8	350,5	40,4
Гептадекан	$C_{17}H_{36}$	115,0	145,2	160,0	177,7	195,8	207,3	223,0	247,8	274,5	303,0	22,5
2-Гептадеканон	$C_{17}H_{34}O$	129,6	161,6	178,0	196,4	214,3	226,7	242,0	265,8	291,7	219,5	—
Гептакозан	$C_{27}H_{56}$	211,7	248,6	266,8	284,6	305,7	318,3	333,5	359,4	385,0	410,6	59,5
Гептан	C_7H_{16}	—34,0	—12,7	—2,1	+9,5	22,3	30,6	41,8	58,7	78,0	98,4	—90,6
1-Гептанол	$C_7H_{16}O$	42,4	64,3	74,7	85,8	99,8	108,0	119,5	136,6	155,6	175,8	34,6
2-Гептанон	$C_7H_{14}O$	19,3	43,6	55,5	67,7	81,2	89,8	100,0	116,1	133,2	150,2	—
4-Гептанон	$C_7H_{14}O$	23,0	44,4	55,0	66,2	78,1	85,8	96,0	111,2	127,3	143,7	—32,6
2-Гептен	C_7H_{14}	—35,8	—14,1	—3,5	+8,3	21,5	30,0	41,3	58,6	78,1	98,5	—
Гептилбензол	$C_{13}H_{20}$	66,2	94,8	109,0	124,2	141,6	151,5	165,7	186,6	210,0	233,0	—
Гепилтриметилсилан	$C_{10}H_{24}Si$	22,3	48,7	62,1	76,4	92,4	102,9	116,5	137,0	159,8	184,0	—
Геранилацетат	$C_{12}H_{20}O_2$	73,5	102,7	117,9	133,0	150,0	160,3	175,2	196,3	219,8	243,3Р	—
Геранилбутират	$C_{14}H_{24}O_2$	96,8	125,2	139,0	153,8	170,1	180,2	193,8	214,0	235,0	257,4	—
Геранилизобутират	$C_{14}H_{24}O_2$	90,7	119,6	133,0	147,9	164,0	174,0	187,7	207,6	228,5	251,0	—
Геранилформиат	$C_{11}H_{18}O_2$	61,8	90,3	104,3	119,8	136,2	147,2	160,7	182,6	205,8	230,0	—
Гераниол	$C_{10}H_{18}O$	69,2	96,8	110,0	125,6	141,8	151,5	165,3	185,6	207,8	230,0	—
Гидрокоричная кислота	$C_9H_{10}O_2$	102,2	133,5	148,7	165,0	183,3	194,0	209,0	230,8	255,0	279,8	48,5
Гидрохинон	$C_6H_6O_2$	132,4	153,3	163,5	174,6	192,0	203,0	216,5	238,0	262,5	286,2	170,3
Гликольдиацетат	$C_6H_{10}O_4$	38,3	64,1	77,1	90,8	106,1	115,8	128,0	147,8	168,3	190,5	—31,0
Глицерин	$C_3H_8O_3$	125,5	153,8	167,2	182,2	198,0	208,0	220,1	240,0	263,0	290,0	17,9
Глутаровая кислота	$C_5H_8O_4$	155,5	183,8	196,0	210,5	226,3	235,5	247,0	265,0	283,5	303,0	97,5
Глутаровый ангидрид	$C_5H_6O_3$	100,8	133,3	149,5	166,0	185,5	196,2	212,5	236,5	261,0	287,0	—
Глутаронитрил	$C_5H_6N_2$	91,3	123,7	140,0	156,5	176,4	189,5	205,5	230,0	257,3	286,2	—
Глутерилхлорид	$C_5H_6Cl_2O_2$	56,1	84,0	97,8	112,3	128,3	139,1	151,8	172,4	195,3	217,0	—
Дегидрацетовая кислота	$C_8H_8O_4$	91,7	122,0	137,3	153,0	171,0	181,5	197,5	219,5	244,5	269,0	—
Дезоксибензоин	$C_{14}H_{12}O$	123,3	156,2	173,5	192,0	212,0	224,5	241,3	265,2	293,0	321,0	60,0
Декаметилтетрасилоксан	$C_{10}H_{30}O_3Si_4$	35,3	61,5	74,3	88,5	104,0	114,2	127,3	147,4	169,8	193,5	—
Декаметилциклопентасилоксан	$C_{10}H_{30}O_5Si_5$	45,2	72,3	86,2	101,0	117,7	127,8	142,0	162,0	186,0	210,0	—38,0
цис-Декалин	$C_{10}H_{18}$	22,5	50,1	64,2	79,8	97,2	108,0	123,2	145,4	169,9	194,6	—43,3

Вещество	Формула	Давление пара, *мм рт. ст.*										Температура плавления, °С
		1	5	10	20	40	60	100	200	400	760	
транс-Декалин	$C_{10}H_{18}$	—0,8	+30,6	47,2	65,3	85,7	98,4	114,6	136,2	160,1	186,7	—30,7
Декан	$C_{10}H_{22}$	17,1	42,5	55,4	69,1	84,6	94,6	108,0	127,8	149,9	173,0	—29,7
Декан-2-он	$C_{10}H_{20}O$	44,2	71,9	85,8	100,7	117,1	127,8	142,0	163,2	186,7	211,0	3,5
1-Децен	$C_{10}H_{20}$	14,7	40,3	53,7	67,8	83,3	93,5	106,5	126,7	149,2	192,0	—
Децило вый спирт	$C_{10}H_{22}O$	69,5	97,3	111,3	125,8	142,1	152,0	165,8	186,2	208,8	231,0	7,0
Децилтриметилсилан	$C_{13}H_{30}Si$	67,4	96,4	111,0	126,5	144,0	154,3	169,5	191,0	215,5	240,0	—
Децилтриэтилсилан	$C_{16}H_{36}Si$	108,5	140,1	155,6	172,4	191,7	203,5	218,3	241,0	267,5	293,0	—
Диаллилдихлорсилан	$C_6H_{10}Cl_2Si$	9,5	34,8	47,4	61,3	76,4	86,3	99,7	119,4	142,0	165,3	—
Диаллилсульфид	$C_6H_{10}S$	—9,5	+14,4	26,6	39,7	54,2	63,7	75,8	94,8	116,1	138,6	—83,0
Диацетамид	$C_4H_7NO_2$	70,0	95,0	108,0	122,6	138,2	148,0	160,6	180,8	202,0	223,0	78,5
Дибензил	$C_{14}H_{14}$	86,8	119,8	136,0	153,7	173,7	186,0	202,8	227,8	255,0	284,0	51,5
Дибензиламин	$C_{14}H_{15}N$	118,3	149,8	165,6	182,2	200,2	212,2	227,3	249,8	274,3	300,0	—26,0
1,4-Дибромбензол	$C_6H_4Br_2$	61,0	79,3	87,7	103,6	120,8	131,6	146,5	168,5	192,5	218,6	87,5
1,2-Дибромбутан	$C_4H_8Br_2$	7,5	33,2	46,1	60,0	76,0	86,0	99,8	120,2	143,5	166,3	—64,5
dl-2,3-Дибромбутан	$C_4H_8Br_2$	5,0	30,0	41,6	56,4	72,0	82,0	95,3	115,7	138,0	160,5	—
мезо-2,3-Дибромбутан	$C_4H_8Br_2$	1,5	26,6	39,3	53,2	68,2	78,0	91,7	111,8	134,2	157,3	—34,5
1,4-Дибромбутан	$C_4H_8Br_2$	32,0	58,8	72,4	87,6	104,0	115,1	128,7	149,8	173,8	197,5	—20
1,2-Дибромдекан	$C_{10}H_{20}Br_2$	95,7	123,6	137,3	151,0	167,4	177,5	190,2	209,6	229,8	250,4	—
α, β-Дибромма леиновый ангидрид	$C_4H_2Br_2O_3$	50,0	78,0	92,0	106,7	123,5	133,8	147,7	168,0	192,0	215,0	—
Дибромметан	CH_2Br_2	—35,1	—13,2	—2,4	+9,7	23,3	31,6	42,3	58,5	79,8	98,6	—52,8
1,2-Дибром-2-метилпропан	$C_4H_8Br_2$	—28,8	—3,0	+10,5	25,7	42,3	53,7	68,8	92,1	119,8	149,0	—70,3
1,3-Дибром-2-метилпропан	$C_4H_8Br_2$	14,0	40,0	53,0	67,5	83,5	93,7	107,4	117,8	150,6	174,6	—
1,2-Дибромпентан	$C_5H_{10}Br_2$	19,8	45,4	58,0	72,0	87,4	97,4	110,1	130,2	151,8	175,0	—
1,2-Дибромпропан	$C_3H_6Br_2$	—7,0	+17,3	29,4	42,3	57,2	66,4	78,7	97,8	118,5	141,6	—55,5
1,3-Дибромпропан	$C_3H_6Br_2$	9,7	35,4	48,0	62,1	77,8	87,8	101,3	121,7	144,1	167,5	—34,4
2,3-Дибром-1-пропанол	$C_3H_6Br_2O$	57,0	84,5	98,2	113,5	129,8	140,0	153,0	173,8	196,0	219,0	—
2,3-Дибромпропилен	$C_3H_4Br_2$	—6,0	+17,9	30,0	43,2	57,8	67,0	79,5	98,0	119,5	141,2	—
1,2-Дибромэтан	$C_2H_4Br_2$	—27,0	+4,7	18,6	32,7	48,0	57,9	70,4	89,8	110,1	131,5	10
(1,2-Дибромэтил)-бензол	$C_8H_8Br_2$	86,0	115,6	129,8	145,2	161,8	172,2	186,3	207,8	230,0	254,0	—
Ди-(2-бромэтиловый) эфир	$C_4H_8Br_2O$	47,7	75,3	88,5	103,6	119,8	130,0	144,0	165,0	188,0	212,5	—
Дибутилдисульфид	$C_8H_{18}S_2$	34,6	73,4	94,0	117,5	145,1	163,0	188,0	227,8	275,5	330,5	—
2,6-Ди-*трет*-бутил-4-крезол	$C_{15}H_{24}O$	85,8	116,2	131,0	147,0	164,1	175,2	190,0	212,8	237,6	262,5	—
4,6-Ди-*трет*-бутил-2-крезол	$C_{15}H_{24}O$	86,2	117,3	132,4	149,0	167,4	179,0	194,0	217,5	243,4	269,3	—
4,6-Ди-*трет*-бутил-3-крезол	$C_{15}H_{24}O$	103,7	135,2	150,0	167,0	185,3	196,1	211,0	233,0	257,1	282,0	—
Дибутилсульфид	$C_8H_{18}S$	21,7	51,8	66,4	80,5	96,0	105,8	118,6	138,0	159,0	182,0	—79,7
2,4-Ди-*трет*-бутилфенол	$C_{14}H_{22}O$	84,5	115,4	130,0	146,0	164,3	175,8	190,0	212,5	237,0	260,8	—
Дибутилфталат	$C_{16}H_{22}O_4$	148,2	182,1	198,2	216,2	235,8	247,8	263,7	287,0	313,5	340,0	—
2,6-Ди-*трет*-бутил-4-этилфенол	$C_{16}H_{26}O$	89,1	121,4	137,0	154,0	172,1	183,9	198,0	220,0	244,0	268,6	—
4,6-Ди-*трет*-бутил-3-этилфенол	$C_{16}H_{26}O$	111,5	142,6	157,4	174,0	192,3	204,4	218,0	241,7	264,6	290,0	—

Вещество	Формула	Давление пара, *мм рт. ст.*										Температура плавления, °С
		1	5	10	20	40	60	100	200	400	760	
1,3-Дивинилбензол	$C_{10}H_{10}$	32,7	60,0	73,8	88,7	105,5	116,0	130,0	151,4	175,2	199,5П	—66,9
Дигидрокарвеол	$C_{10}H_{18}O$	63,9	91,6	105,0	120,2	136,1	146,3	159,8	180,1	202,8	225,0	—
l-Дигидрокарвон	$C_{10}H_{16}O$	46,6	75,5	90,0	106,0	123,7	134,7	149,7	171,8	197,0	223,0	—
1,4-Дигидроксиантрахинон	$C_{14}H_8O_4$	196,7	239,8	259,8	282,0	307,4	323,2	344,5	377,8Р	413,0Р	450,0Р	194,0
Дигидроцитронеллол	$C_{10}H_{22}O_2$	68,0	91,7	103,0	115,0	127,6	136,7	145,9	160,2	176,8	193,5	—
Диизоамиловый эфир	$C_{10}H_{22}O$	18,6	44,3	57,0	70,7	86,3	96,0	109,6	129,0	150,3	173,4	—
Диизоамилоксалат	$C_{12}H_{22}O_4$	85,4	116,0	131,4	147,7	165,7	177,0	192,2	215,0	240,0	265,0	—
Диизоамилсульфид	$C_{10}H_{22}S$	43,0	73,0	87,6	102,7	120,0	130,6	145,3	166,4	191,0	216,0	—
Диизобутиламин	$C_8H_{19}N$	—5,1	+18,4	30,6	43,7	57,8	67,0	79,2	97,6	118,0	139,5	—70,0
Диизобутилоксалат	$C_{10}H_{18}O_4$	63,2	91,2	105,3	120,3	137,5	147,8	161,8	183,5	205,8	229,5	—
Диизобутил-*d*-тартат	$C_{12}H_{22}O_6$	117,8	151,8	169,0	188,0	208,5	221,6	239,5	264,7	294,0	324,0	73,5
1,2-Диизопропилбензол	$C_{12}H_{18}$	40,0	67,8	81,8	96,8	114,0	124,3	138,7	159,8	184,3	209,0	—
1,3-Диизопропилбензол	$C_{12}H_{18}$	34,7	62,3	76,0	91,2	107,9	118,2	132,3	153,7	177,6	202,0	—105,0
Диизопропиловый эфир	$C_6H_{14}O$	—57,0	—37,4	—27,4	—16,7	—4,5	+3,4	13,7	30,0	48,2	67,5	—60,0
Диизопропилоксалат	$C_8H_{14}O_4$	43,2	69,0	81,9	95,6	110,5	120,0	132,6	151,2	171,8	193,5	—
Диизопропил-*d*-тартат	$C_{10}H_{18}O_6$	103,7	133,7	148,2	164,0	181,8	192,6	207,3	228,2	251,8	275,0	—
Дикарвакрилмоно-(6-хлор-2-ксенил)-фосфат	$C_{32}H_{34}ClO_4P$	204,2	234,5	249,3	264,5	280,5	290,7	304,9	323,8	342,0	361,0	—
Дикарвакрил-2-толилфосфат	$C_{27}H_{33}O_4P$	180,2	209,3	221,8	237,0	251,5	260,3	272,5	290,0	309,8	330,0	—
Диметиламин	C_2H_7N	—87,7	—72,2	—64,6	—56,0	—46,7	—40,7	—32,6	—20,4	—7,1	+7,4	—96,0
N, N-Диметиланилин	$C_8H_{11}N$	29,5	56,3	70,0	84,8	101,6	111,9	125,8	146,5	169,2	193,1	2,5
Диметиларсанилат	$C_8H_{12}AsNO_3$	15,0	39,6	51,8	65,0	79,7	88,6	101,0	119,8	140,3	160,5	—
Ди-(α-метилбензиловый) эфир	$C_{16}H_{18}O$	96,7	128,3	144,0	160,3	179,6	191,5	206,8	229,7	254,8	281,0	—
2,2-Диметилбутан	C_6H_{14}	—69,3	—50,7	—41,5	—31,1	—19,5	—12,1	—2,0	+13,4	31,0	49,7	—99,8
2,3-Диметилбутан	C_6H_{14}	—63,6	—44,5	—34,9	—24,1	—12,4	—4,9	+5,4	21,1	39,0	58,0	—128,2
2,2-Диметилгексан	C_8H_{18}	—29,7	—7,9	+3,1	15,0	28,2	36,7	48,2	65,7	85,6	106,8	—
2,3-Диметилгексан	C_8H_{18}	—23,0	—1,1	+9,9	22,1	35,6	44,2	56,0	73,8	94,1	115,6	—
2,4-Диметилгексан	C_8H_{18}	—26,9	—5,3	+5,2	17,2	30,5	39,0	50,6	68,1	88,2	109,4	—
2,5-Диметилгексан	C_8H_{18}	—26,7	—5,5	+5,3	17,2	30,4	38,9	50,5	68,0	87,9	109,1	—90,7
3,3-Диметилгексан	C_8H_{18}	—25,8	—4,4	+6,1	18,2	31,7	40,4	52,5	70,0	90,4	112,0	—
3,4-Диметилгексан	C_8H_{18}	—22,1	+0,2	11,3	23,5	37,1	45,8	57,7	75,6	96,0	117,7	—
Диметилдиборан	$C_2H_{10}B_2$	—106,5	—90,3	—82,1	—73,0	—62,4	—55,8	—47,0	—33,7	—18,8	—2,6	—150,2
Диметилдихлорсилан [60]	$C_2H_6Cl_2Si$	—	—	—24,8	—13,7	—1,4	+6,5	17,2	33,2	51,4	70,5	—
Диметилитаконат	$C_7H_{10}O_4$	69,3	94,0	106,6	119,7	133,7	142,6	153,7	171,0	189,8	208,0	38,0
Диметил-*l*-малат	$C_6H_{10}O_5$	75,4	104,0	118,3	133,8	150,1	160,4	175,1	196,3	219,5	242,6	—
Диметилмалеат	$C_6H_8O_4$	45,7	73,0	86,4	101,3	117,2	127,1	140,3	160,0	182,2	205,0	—
Диметилмалонат	$C_5H_8O_4$	35,0	59,8	72,0	85,0	100,0	109,7	121,9	140,0	159,8	180,7	—62
транс-Диметилмезаконат	$C_7H_{10}O_4$	46,8	74,0	87,8	102,1	118,0	127,8	141,5	161,0	183,5	206,0	—
Диметиловый эфир	C_2H_6O	—115,7	—101,1	—93,3	—85,2	—76,2	—70,4	—62,7	—50,9	—37,8	—23,7	—138,5
Диметилоксалат	$C_4H_6O_4$	20,0	44,0	56,0	69,4	83,6	92,8	104,8	123,3	143,3	163,3	—
2,7-Диметилоктан	$C_{10}H_{22}$	6,3	30,5	42,3	55,8	71,2	80,8	93,9	114,0	136,0	159,7	—52,8
2,2-Диметилпентан	C_7H_{16}	—49,0	—28,7	—18,7	—7,5	+5,0	13,0	23,0	40,3	59,2	79,2	—123,7
2,3-Диметилпентан	C_7H_{16}	—42,0	—20,8	—10,3	+1,1	13,9	22,1	33,3	50,1	69,4	89,8	—135,0
2,4-Диметилпентан	C_7H_{16}	—48,0	—27,4	—17,1	—5,9	+6,5	14,5	25,4	41,8	60,6	80,5	—119,5
3,3-Диметилпентан	C_7H_{16}	—45,9	—25,0	—14,4	—2,9	+9,9	18,1	29,3	46,2	65,5	86,1	—135,0

Вещество	Формула	Давление пара, *мм рт. ст.*										Температура плавления, °С
		1	5	10	20	40	60	100	200	400	760	
2,5-Диметил-3-пентанон	$C_7H_{14}O$	5,2	26,5	36,7	47,7	59,6	67,2	77,0	91,8	108,0	123,7	—
3,5-Диметил-1,2-пирон	$C_7H_8O_2$	78,6	107,6	122,0	136,4	152,7	163,8	177,5	198,0	221,0	245,0	51,5
2,2-Диметилпропан	C_5H_{12}	—102,0	—85,4	—76,7	—67,2	—56,1	—49,0	—39,1	—23,7	—7,1	+9,5	—16,6
4,6-Диметилрезорцин	$C_8H_{10}O_2$	49,0	76,8	90,7	105,8	122,5	133,2	147,3	167,8	192,0	215,0	—
Диметилсебацинат	$C_{12}H_{22}O_4$	104,0	139,8	156,2	175,8	196,0	208,0	222,6	245,0	269,6	293,5	38,0
Диметилсилан	C_2H_8Si	—115,0	—101,5	—93,1	—84,8	—75,7	—69,7	—61,4	—48,9	—35,0	—20,1	—
2,4-Диметилстирол	$C_{10}H_{12}$	34,2	61,9	75,8	90,8	107,7	118,0	132,3	153,2	177,5	202,0П	—
2,5-Диметилстирол	$C_{10}H_{12}$	29,0	55,9	69,0	84,0	100,2	110,7	124,7	145,6	168,7	193,0П	—
Диметилсульфид	C_2H_6S	—75,6	—58,0	—49,2	—39,4	—28,4	—21,4	—12,0	+2,6	18,7	36,0	—83,2
Диметилсурьма	C_2H_6Sb	44,0	72,0	86,0	101,7	118,3	129,4	143,5	164,0	187,2	211,0	—
Диметил-*dl*-тартрат	$C_6H_{10}O_6$	100,4	131,8	147,5	164,0	182,4	193,8	209,5	232,3	257,4	282,0	89,0
Диметил-*d*-тартрат	$C_6H_{10}O_6$	102,1	133,2	148,2	164,3	182,4	193,8	208,8	230,5	255,0	280,0	61,5
3,3-Диметил-2-тиобутан [61]	$C_5H_{12}S$	—34,7	—13,8	—3,3	+8,4	21,5	29,8	41,2	58,4	78,0	98,9	—88,3
N, N-Диметил-2-толуидин	$C_9H_{13}N$	28,8	54,1	66,2	80,2	95,0	105,2	118,1	138,3	161,5	184,8	—61,0
N, N-Диметил-4-толуидин	$C_9H_{13}N$	50,1	74,3	86,7	100,0	116,3	126,4	140,3	161,6	185,4	209,5	—
Диметилфенилсилан	$C_8H_{12}Si$	5,3	30,3	42,6	56,2	71,4	81,3	94,2	114,2	136,4	159,3	—
Диметилфталат	$C_{10}H_{10}O_4$	100,3	131,8	147,6	164,0	182,8	194,0	210,0	232,7	257,8	283,7	—
1,1-Диметилциклогексан	C_8H_{16}	—24,4	—1,4	+10,3	23,0	37,3	45,7	57,9	76,2	97,2	119,5	—34,0
цис-1,2-Диметилциклогексан	C_8H_{16}	—15,9	+7,3	18,4	31,1	45,3	54,4	66,8	85,6	107,0	129,7	—50,0
транс-1,2-Диметилциклогексан	C_8H_{16}	—21,1	+1,7	13,0	25,6	39,7	48,7	61,0	79,6	100,9	123,4	—88,0
цис-1,3-Диметилциклогексан	C_8H_{16}	—19,4	+3,4	14,9	27,4	41,4	50,4	62,5	81,0	102,1	124,4	—92,0
транс-1,3-Диметилциклогексан	C_8H_{16}	—22,7	0,0	+11,2	23,6	37,5	46,4	58,5	76,9	97,8	120,1	—76,2
цис-1,4-Диметилциклогексан	C_8H_{16}	—20,0	+3,2	14,5	27,1	41,1	50,1	62,3	80,8	101,9	124,3	—87,4
транс-1,4-Диметилциклогексан	C_8H_{16}	—24,3	—1,7	+10,1	22,6	36,5	45,4	57,6	76,0	97,0	119,3	—36,9
Диметилцитраконат	$C_7H_{10}O_4$	50,8	78,2	91,8	106,5	122,6	132,7	145,8	165,8	188,0	210,5	—
α, α-Диметилянтарный ангидрид	$C_6H_8O_3$	61,4	88,1	102,0	116,3	132,3	142,4	155,3	175,8	197,5	219,5	—
1,2-Диметоксиэтан	$C_4H_{10}O_2$	—48,0	—26,2	—15,3	—3,0	+10,7	19,7	31,8	50,0	70,8	93,0	—
Ди-(2-метоксиэтиловый) эфир	$C_6H_{14}O_3$	13,0	37,6	50,0	63,0	77,5	86,8	99,5	118,0	138,5	159,8	—
Ди-(нитрозометил)-амин	$C_2H_5N_3O_2$	3,2	27,8	40,0	53,7	68,2	77,7	90,3	110,0	131,3	153,0	—
Ди-(нитрозоэтил)-амин	$C_4H_9N_3O_2$	18,5	44,5	57,7	71,8	87,6	97,6	111,0	131,4	153,5	176,9	—
1,4-Диоксан	$C_4H_8O_2$	—35,8	—12,8	—1,2	+12,0	25,2	33,8	45,1	62,3	81,8	101,1	10,0
1,4-Диоксан-2,6-дион	$C_4H_4O_4$	—	103,0	116,6	132,0	148,6	158,2	173,2	194,0	217,0	240,0	97,0
Диосфенол	$C_{10}H_{16}O_2$	66,7	95,4	109,0	124,0	141,2	151,3	165,6	186,2	209,5	232,0	—
Дипентен	$C_{10}H_{16}$	14,0	40,4	53,8	68,2	84,3	94,6	108,3	128,2	150,5	174,6	—
Дипропиленгликоль	$C_6H_{14}O_3$	73,8	102,1	116,2	131,3	147,4	156,5	169,9	189,9	210,5	231,8	—
Дипропиленгликоль, изопропиловый эфир	$C_9H_{20}O_3$	46,0	72,8	86,2	100,8	117,0	126,8	140,3	160,0	183,1	205,6	—
Дипропиленгликоль, монобутиловый эфир	$C_{10}H_{22}O_3$	64,7	92,0	106,0	120,4	136,3	146,3	159,8	180,0	203,8	227,0	—

Вещество	Формула	Давление пара, *мм рт. ст.*										Температура плавления, °С
		1	5	10	20	40	60	100	200	400	760	
Дипропиловый эфир	$C_6H_{14}O$	—43,3	—22,3	—11,8	0,0	+13,2	21,6	33,0	50,3	69,5	89,5	—122,0
Дипропилоксалат	$C_8H_{14}O_4$	53,4	80,2	93,9	108,6	124,6	134,8	148,1	168,0	190,3	213,5	—
Дипропилсукцинат	$C_{10}H_{18}O_4$	77,5	107,6	122,2	138,0	154,8	166,0	180,3	202,5	226,5	250,8	—
Дипропил-*d*-тартат	$C_{10}H_{18}O_6$	115,6	147,7	163,5	180,4	199,7	211,7	227,0	250,0	275,6	303,0	—
1,2-Дипропоксиэтан	$C_8H_{18}O_2$	—38,8	—10,3	+5,0	22,3	42,3	55,8	74,2	103,8	140,0	180,0	—
Дифенил	$C_{12}H_{10}$	70,6	101,8	117,0	134,2	152,5	165,2	180,7	204,2	229,4	254,9	69,5
Дифениламин	$C_{12}H_{11}N$	108,3	141,7	157,0	175,2	194,3	206,9	222,8	247,5	274,1	302,0	52,9
1,1-Дифенилгидразин	$C_{12}H_{12}N_2$	126,0	159,3	176,1	194,0	213,5	225,9	242,5	267,2	294,0	322,2	44,0
Дифенилдисульфид	$C_{12}H_{10}S_2$	131,6	164,0	180,0	197,0	214,8	226,2	241,3	262,6	285,8	310,0	61,0
Дифенилдихлорсилан [60]	$C_{12}H_{10}Cl_2Si$	—	—	158,4	175,2	194,0	205,9	222,2	246,8	274,8	304,4	—
Дифенилметан	$C_{13}H_{12}$	76,0	107,4	122,8	139,8	157,8	170,2	186,3	210,7	237,5	264,5	26,5
Дифениловый эфир	$C_{12}H_{10}O$	66,1	97,8	114,0	130,8	150,0	162,0	178,8	203,3	230,7	258,5	27,0
1-Дифенилокси-2,3-эпоксипропан	$C_{15}H_{14}O_2$	135,3	169,9	187,2	205,8	226,3	239,7	255,0	280,4	309,8	340,0	—
1,3-Дифенил-2-пропанон	$C_{15}H_{14}O$	125,5	159,8	177,6	195,7	216,6	229,4	246,6	272,3	301,7	330,5	34,5
Дифенилселенид	$C_{12}H_{10}Se$	105,7	138,4	154,4	172,2	192,2	204,8	220,8	246,1	273,2	301,5	2,5
Дифенилсульфид	$C_{12}H_{10}S$	96,1	129,0	145,0	162,0	182,8	194,8	211,8	236,8	263,9	292,5	—
Дифенил-2-толилтиофосфат	$C_{18}H_{17}O_3PS$	159,7	179,8	201,6	215,5	230,6	240,4	252,5	270,3	290,0	310,0	—
Дифенилхлорфосфат	$C_{12}H_{10}ClPO_3$	121,5	160,5	182,0	203,8	227,9	244,2	265,0	299,5	337,2	378,0	—
1,1-Дифенилэтилен	$C_{14}H_{12}$	87,4	119,6	135,0	151,8	170,8	183,4	198,6	222,8	249,8	277,0	—
транс-Дифенилэтилен	$C_{14}H_{12}$	113,2	145,8	161,0	179,8	199,0	211,5	227,4	251,7	287,3	306,5	124,0
Дифтордифенилсилан	$C_{12}H_{10}F_2Si$	68,4	100,1	115,5	131,8	149,8	160,6	176,3	199,5	225,4	252,5	—
1,1-Дифторэтан	$C_2H_4F_2$	—112,5	—98,4	—91,7	—84,1	—75,8	—70,4	—63,2	—52,0	—39,5	—26,5	—117,0
1,2-Дихлорбензол	$C_6H_4Cl_2$	20,0	46,0	59,1	73,4	89,4	99,5	112,9	133,4	155,8	179,0	—17,6
1,3-Дихлорбензол	$C_6H_4Cl_2$	12,1	39,0	52,0	66,2	82,0	92,2	105,0	125,9	149,0	173,0	—24,2
1,4-Дихлорбензол	$C_6H_4Cl_2$	—	—	54,8	69,2	84,8	95,2	108,4	128,3	150,2	173,9	53,0
1,2-Дихлорбутан	$C_4H_8Cl_2$	—23,6	—0,3	+11,5	24,5	37,7	47,8	60,2	79,7	100,8	123,5	—80,4
2,3-Дихлорбутан	$C_4H_8Cl_2$	—25,2	—3,0	+8,5	21,2	35,0	43,9	56,0	74,0	94,2	116,0	—
1 5-Дихлоргексаметилтрисилоксан	$C_8H_{18}Cl_2O_2Si_3$	26,0	52,0	65,1	79,0	94,8	105,0	118,2	138,3	160,2	184,0	—53,0
Дихлордиизопропиловый эфир	$C_6H_{12}Cl_2O$	29,6	55,2	68,2	82,2	97,3	106,9	119,7	139,0	159,8	182,7	—
Дихлордиметилсилан	$C_2H_6Cl_2Si$	—53,5	—33,8	—23,8	—12,7	—0,4	+7,4	17,5	33,9	51,9	70,3	—86,0
Дихлордифенилсилан	$C_{12}H_{10}Cl_2Si$	109,6	142,4	158,0	176,0	195,5	207,5	223,8	248,0	275,5	304,0	—
Дихлордифторметан	CCl_2F_2	—118,5	—104,6	—97,8	—90,1	—81,6	—76,1	—68,6	—57,0	—43,9	—29,8	—
1,2-Дихлор-1,2-дифторэтилен	$C_2Cl_2F_2$	—82,0	—65,6	—57,3	—48,3	—38,2	—31,8	—23,0	—10,0	+5,0	20,9	—112
Дихлордиэтилсилан	$C_4H_{10}Cl_2Si$	—9,2	+13,7	25,4	37,7	51,6	60,0	71,8	89,8	110,0	130,4	—
Дихлорметан	CH_2Cl_2	—70,0	—52,1	—43,3	—33,4	—22,3	—15,7	—6,3	+8,0	24,1	40,7	—96,7
Дихлорметиларсин	CH_3AsCl_2	—11,1	+12,2	24,3	37,0	51,5	60,6	73,0	91,8	112,7	134,5	—59
1,1-Дихлор-2-метилпропан	$C_4H_8Cl_2$	—31,0	—8,8	+2,6	15,2	29,3	38,0	50,0	67,7	85,8	105,0	—
1,2-Дихлор-2-метилпропан	$C_4H_8Cl_2$	—25,8	—4,2	+6,7	18,7	32,0	40,2	51,7	68,9	87,8	108,0	—
1,3-Дихлор-2-метилпропан	$C_4H_8Cl_2$	—3,0	+20,6	32,0	44,8	58,6	67,5	78,8	95,1	115,4	135,0	—

Вещество	Формула	Давление пара, *мм рт. ст*										Температура плавления, °С
		1	5	10	20	40	60	100	200	400	760	
Дихлорметилсилан	CH_4Cl_2Si	—75,0	—56,9	—47,8	—37,7	—26,2	—18,9	—9,0	+6,2	23,7	41,9	—
Дихлорметилфенилсилан [60]	$C_7H_8Cl_2Si$	35,7	63,5	77,4	92,4	109,5	120,0	134,2	155,5	180,2	205,5	—
Дихлор-1-нафтилсилан	$C_{10}H_8Cl_2Si$	106,2	134,6	149,2	164,5	181,7	192,0	205,9	225,5	249,7	273,3	—
1,7-Дихлороктаметилтетрасилоксан	$C_8H_{24}Cl_2O_3Si_4$	53,3	81,7	95,8	111,0	127,8	139,0	152,7	174,2	197,8	222,0	—62,0
1,2-Дихлорпропан	$C_3H_6Cl_2$	—38,5	—17,0	—6,1	+6,0	19,4	28,0	39,4	57,0	76,0	96,8	—
1,3-Дихлор-2-пропанол	$C_3H_6Cl_2O$	28,0	52,2	64,7	78,0	93,0	102,0	114,8	133,3	153,5	174,3	—
2,3-Дихлорстирол	$C_8H_6Cl_2$	61,0	90,1	104,6	120,5	137,8	149,0	163,5	185,7Р	210,0Р	235,0Р	—
2,4-Дихлорстирол	$C_8H_6Cl_2$	53,5	82,2	97,4	111,8	129,2	140,0	153,8	176,0Р	200,0Р	225,0Р	—
2,5-Дихлорстирол	$C_8H_6Cl_2$	55,5	83,9	98,2	114,0	131,0	142,0	155,8	178,0Р	202,5Р	227,0Р	—
2,6-Дихлорстирол	$C_8H_6Cl_2$	47,8	75,7	90,0	105,5	122,4	133,3	147,6	169,0Р	193,5Р	217,0Р	—
3,4-Дихлорстирол	$C_8H_6Cl_2$	57,2	86,0	100,4	116,2	133,7	144,6	158,2	181,5Р	205,7Р	230,0Р	—
3,5-Дихлорстирол	$C_8H_6Cl_2$	53,5	82,2	97,4	111,8	129,2	140,0	153,8	176,0Р	200,0Р	225,0Р	—
1,3-Дихлортетраметилдисилоксан	$C_4H_{12}Cl_2OSi_2$	—7,4	+16,3	28,3	41,0	55,7	64,8	76,9	95,8	116,3	138,0	—37
1,2-Дихлор-1,1,2,2-тетрафторэтан	$C_2Cl_2F_4$	—95,4	—80,0	—72,3	—63,5	—53,7	—47,5	—39,1	—26,3	—12,0	+3,5	—94
1,2-Дихлортетраэтилбензол	$C_{14}H_{20}Cl_2$	105,6	138,7	155,0	172,5	192,2	204,8	220,7	245,6	272,8	302,0	—
1,4-Дихлортетраэтилбензол	$C_{14}H_{20}Cl_2$	91,7	126,1	143,8	162,0	183,2	195,8	212,0	238,5	265,8	296,5	—
Дихлор-4-толилсилан	$C_7H_8Cl_2Si$	46,2	71,7	84,2	97,8	113,2	122,6	135,5	153,5	175,2	196,3	—
α, α-Дихлортолуол	$C_7H_6Cl_2$	35,4	64,0	78,7	94,3	112,1	123,4	138,3	160,7	187,0	214,0	—16,1
3,4-Дихлор-α, α, α-трифтортолуол	$C_7H_3Cl_2F_3$	11,0	38,3	52,2	67,3	84,0	95,0	109,0	129,0	150,5	172,8	—12,1
Дихлоруксусная кислота	$C_2H_2Cl_2O_2$	44,0	69,8	82,6	96,3	111,8	121,5	134,0	152,3	173,7	194,4	9,7
Дихлорфениларсин	$C_6H_5AsCl_2$	61,8	100,0	116,0	133,1	151,0	163,2	178,9	202,8	228,8	256,5	—
α, α-Дихлорфенилацетонитрил	$C_8H_5Cl_2N$	56,0	84,0	98,1	113,8	130,0	141,0	154,5	176,2	199,5	223,5	—
2,4-Дихлорфенол	$C_6H_4Cl_2O$	53,0	80,0	92,8	107,7	123,4	133,5	146,0	165,2	187,5	210,0	45,0
2,6-Дихлорфенол	$C_6H_4Cl_2O$	59,5	87,6	101,	115,5	131,6	141,8	154,6	175,5	197,7	220,0	—
Дихлорфторметан	$CHCl_2F$	—91,3	—75,5	—67,5	—58,6	—48,8	—42,6	—33,9	—20,9	—6,2	+8,9	—135
1,1-Дихлорэтан [62]	$C_2H_4Cl_2$	—61,4	—42,4	—32,8	—22,3	—10,7	—3,3	+6,8	21,9	39,1	57,1	—97,0
1,2-Дихлорэтан	$C_2H_4Cl_2$	—44,5	—24,0	—13,6	—2,4	+10,0	18,1	29,4	45,7	64,0	82,4	—35,3
1,2-Дихлор-3-этилбензол	$C_8H_8Cl_2$	46,0	75,0	90,0	105,9	123,8	135,0	149,8	172,0	197,0	221,1	—40,8
1,2-Дихлор-4-этилбензол	$C_8H_8Cl_2$	47,0	77,2	92,3	109,6	127,5	139,0	153,3	176,0	201,7	226,6	—76,4
1,4-Дихлор-2-этилбензол	$C_8H_8Cl_2$	38,5	68,0	83,2	99,8	118,0	129,0	144,0	166,2	191,5	216,3	—61,2
1,1-Дихлорэтилен	$C_2H_2Cl_2$	—77,2	—60,0	—51,2	—41,7	—31,1	—24,0	—15,0	—1,0	+14,8	31,7	—122,5
цис-1,2-Дихлорэтилен	$C_2H_2Cl_2$	—58,4	—39,2	—29,9	—19,4	—7,9	—0,5	+9,5	24,6	41,0	59,0	—80,5
транс-1,2-Дихлорэтилен	$C_2H_2Cl_2$	—65,4	—47,2	—38,0	—28,0	—17,0	—10,0	—0,2	+14,3	30,8	47,8	—50,0
Ди-(хлорэтиловый) эфир	$C_4H_8Cl_2O$	23,5	49,3	62,0	76,0	91,5	101,5	114,5	134,0	155,4	178,5	—
1,2-Дихлорэтилтрихлорсилан [60]	$C_2H_3Cl_5Si$	—	—	61,1	75,7	91,6	101,7	115,2	135,2	157,6	180,6	—
Дихлорэтилфенилсилан	$C_8H_9Cl_2Si$	48,5	77,8	92,3	108,7	126,2	137,8	152,3	175,7	200,0	225,5	—
Ди-(2-хлорэтокси)-метан	$C_5H_{10}Cl_2O$	53,0	80,4	94,0	109,5	125,5	135,8	149,6	170,0	192,0	215,0	—
Дихлорэтоксиметилсилан	$C_3H_8Cl_2OSi$	—33,8	—12,1	—1,3	+11,3	24,4	32,6	44,1	61,0	80,3	100,6	—

Вещество	Формула	Давление пара, *мм рт. ст.*										Температура плавления, °С
		1	5	10	20	40	60	100	200	400	760	
Дихлорэтоксифенилсилан	$C_8H_{10}Cl_2OSi$	52,4	80,7	94,6	110,0	126,2	137,5	151,4	172,6	197,2	222,2	—
Дициан	C_2N_2	—95,8	—83,2	—76,8	—70,1	—62,7	—57,9	—51,8	—42,6	—33,0	—21,0	34,4
Дициклопентадиен	$C_{10}H_8$	—	34,1	47,6	62,0	77,9	88,0	101,7	121,8	144,2	166,6Р	32,9
Диэтиладипат	$C_{10}H_{18}O_4$	74,0	106,6	123,0	138,3	154,6	165,8	179,0	198,2	219,1	240,0	—21,0
Диэтиламин	$C_4H_{11}N$	—	—	—33,0	—22,6	—11,3	—4,0	+6,0	21,0	38,0	55,5	—38,9
N-Диэтиланилин	$C_{10}H_{15}N$	49,7	78,0	91,9	107,2	123,6	133,8	147,3	168,2	192,4	215,5	—34,4
Диэтиларсанилат	$C_{10}H_{16}AsNO_3$	38,0	62,6	74,8	88,0	102,6	111,8	123,8	141,9	161,1	181,0	—
Диэтилацеталь	$C_6H_{14}O_2$	—23,0	—2,3	+8,0	19,6	31,9	39,8	50,1	66,3	84,0	102,2	—
1,2-Диэтилбензол	$C_{10}H_{14}$	25,6	50,6	63,3	76,9	92,0	101,7	114,7	133,6	154,3	176,5	—
1,3-Диэтилбензол	$C_{10}H_{14}$	21,7	47,8	60,9	75,5	91,4	101,7	115,4	135,8	157,9	182,2	—84,2
1,4-Диэтилбензол	$C_{10}H_{14}$	19,4	45,8	59,0	73,4	89,8	100,0	114,0	134,8	157,7	182,5	—
Диэтилгексадециламин	$C_{20}H_{43}N$	139,8	175,8	194,0	213,5	235,0	248,5	265,5	292,8	324,6	355,0	—
Диэтилглутарат	$C_9H_{16}O_4$	65,6	94,7	109,7	125,4	142,8	153,2	167,8	189,5	212,8	237,0	—
Диэтилдиоксисукцинат	$C_8H_{10}O_6$	70,0	98,0	112,0	126,8	143,8	153,7	167,7	188,0	210,8	233,5	—
Диэтилдифторсилан	$C_4H_{10}F_2Si$	—56,8	—38,1	—28,8	—18,6	—7,3	—0,2	+9,8	24,2	40,5	58,0	—
Диэтилдихлорсилан [60]	$C_4H_{10}Cl_2Si$	—	—	21,0	33,7	47,9	56,9	69,1	87,5	108,4	130,4	—
Диэтиленгликоль	$C_4H_{10}O_3$	91,8	120,0	133,8	148,0	164,3	174,0	187,5	207,0	226,5	244,8	—
Диэтиленгликоль, бутиловый эфир	$C_8H_{18}O_3$	70,0	95,7	107,8	120,5	135,5	146,0	159,8	181,2	205,0	231,2	—
Диэтиленгликоль, этиловый эфир	$C_6H_{14}O_3$	45,3	72,0	85,8	100,3	116,7	126,8	140,3	159,0	180,3	201,9	—
Диэтиленгликоль-бис-хлорацетат	$C_8H_{12}Cl_2O_5$	148,3	180,0	195,8	212,0	229,0	239,5	252,0	271,5	291,8	313,0	—
Диэтилизосукцинат	$C_8H_{14}O_4$	39,8	66,7	80,0	94,7	111,0	121,4	134,8	155,1	177,7	201,3	—
Диэтилитаконат	$C_9H_{14}O_4$	51,3	80,2	95,2	111,0	128,2	139,9	154,3	177,5	203,1	227,9	—
Диэтилкарбонат	$C_5H_{10}O_3$	—10,1	+12,3	23,8	36,0	49,5	57,9	69,7	86,5	105,8	125,8	—43
Диэтилмалат	$C_8H_{14}O_5$	80,7	110,4	125,6	141,2	157,8	169,0	183,9	205,3	229,5	253,4	—
Диэтилмалеинат	$C_8H_{12}O_4$	57,3	85,6	100,0	115,3	131,8	142,4	156,0	177,8	201,7	225,0	—
Диэтилмалонат	$C_7H_{12}O_4$	40,0	67,5	81,3	95,9	113,3	123,0	136,2	155,5	176,8	198,9	—49,8
Диэтилмезаконат	$C_2H_{11}O_4$	62,8	91,0	105,3	120,3	137,3	147,9	161,6	183,2	205,8	229,0	—
Диэтиловый эфир	$C_4H_{10}O$	—74,3	—56,9	—48,1	—38,5	—27,7	—21,8	—11,5	+2,2	17,9	34,6	—116,3
Диэтилоксалат	$C_6H_{10}O_4$	47,4	71,8	83,8	96,8	110,6	119,7	130,8	147,9	166,2	185,7	—40,6
Диэтил-γ-оксоазелат	$C_{11}H_{18}O_5$	121,0	150,3	165,7	181,0	197,7	208,3	221,6	242,6	264,5	286,0	—
Диэтилсебацинат	$C_{14}H_{26}O_4$	125,3	156,2	172,1	189,8	207,5	218,4	234,4	255,8	280,3	305,5	1,3
Диэтилселенид	$C_4H_{10}Se$	—25,7	—4,0	+7,0	19,0	131,2	40,3	51,8	69,0	88,0	108,0	—
2,5-Диэтилстирол	$C_{12}H_{16}$	49,7	78,4	92,6	108,5	125,8	136,8	151,0	173,2	198,0	223,0П	—
Диэтилсукцинат	$C_8H_{14}O_4$	54,6	83,0	96,6	111,7	127,8	138,2	151,1	171,7	193,8	216,5	—20,8
Диэтилсульфат	$C_4H_{10}O_4S$	47,0	74,0	87,7	102,1	118,0	128,6	142,5	162,5	185,5	209,5Р	—25,0
Диэтилсульфид	$C_4H_{10}S$	—39,6	—18,6	—8,0	+3,5	16,1	24,2	35,0	51,3	69,7	88,0	—99,5
Диэтилсульфит	$C_4H_{10}O_3S$	10,0	34,2	46,4	59,7	74,2	83,8	96,3	115,8	137,0	159,0	—
Диэтил-*d*-тартат	$C_8H_{14}O_6$	102,0	133,0	148,0	164,2	182,3	194,0	208,5	230,4	254,8	280,0	—
Диэтил-*dl*-тартат	$C_8H_{14}O_6$	100,0	131,7	147,2	163,8	181,7	193,2	208,0	230,0	254,3	280,0	—
3,5-Диэтилтолуол	$C_{11}H_{16}$	31,8	59,0	72,7	87,8	104,0	115,3	129,1	150,1	174,0	199,0	—
Диэтилфталат	$C_{12}H_{14}O_4$	108,8	140,7	156,0	173,6	192,1	204,1	219,5	243,0	267,5	294,0	—
Диэтилфумарат	$C_8H_{12}O_4$	53,2	81,2	95,3	110,2	126,7	137,7	151,1	172,2	195,8	218,5	0,6
Диэтилцинк	$C_4H_{10}Zn$	—22,4	0,0	+11,7	24,2	38,0	47,2	59,1	77,0	97,3	118,0	—28
цис-Диэтилцитраконат	$C_9H_{14}O_4$	59,8	88,3	103,0	118,2	135,7	146,2	160,0	182,3	206,5	230,3	—

Вещество	Формула	Давление пара, *мм рт. ст.*										Температура плавления, °С
		1	5	10	20	40	60	100	200	400	760	
Диэтилэтилмалонат	$C_9H_{16}O_4$	50,8	77,8	91,6	106,0	122,4	132,4	146,0	166,0	188,7	211,5	—
Диэтилэтилметилмалонат	$C_{10}H_{18}O_4$	44,7	72,0	85,7	100,3	116,7	126,7	140,8	161,0	184,1	207,5	—
1,15-Диэтоксигексадекаметилоктасилоксаи	$C_{20}H_{58}O_9Si_8$	133,7	164,5	179,7	196,0	213,8	224,7	240,0	261,8	286,0	311,5	—
1,5-Диэтоксигексаметилтрисилоксан	$C_{10}H_{28}O_4Si_3$	41,8	68,0	80,7	94,5	110,0	120,0	133,2	152,0	174,0	196,6	—
1,9-Диэтоксидекаметилпентасилоксан	$C_{14}H_{40}O_6Si_5$	89,0	117,5	131,5	146,3	162,2	172,5	187,0	207,0	230,0	253,3	—
Диэтоксидиметилсилан	$C_6H_{16}O_2Si$	—19,1	+2,4	13,3	25,3	38,0	46,3	57,6	74,2	93,2	113,5	—
Диэтоксидифенилсилан	$C_{16}H_{20}O_2Si$	111,5	142,8	157,6	174,3	193,2	205,0	220,0	243,8	259,7	296,0	—
1,11-Диэтоксидодекаметилгексасилоксан	$C_{16}H_{46}O_7Si_6$	103,6	133,4	147,5	163,0	180,0	190,5	205,5	226,7	250,0	273,5	—
Диэтоксиметилфенилсилан	$C_{11}H_{18}O_2Si$	56,5	83,6	97,2	112,0	127,5	137,8	151,2	171,6	193,8	216,5	—
1,7-Диэтоксиоктаметилтетрасилоксан	$C_{12}H_{34}O_5Si_4$	67,7	95,2	108,6	123,0	139,0	148,5	162,0	182,3	204,0	227,5	—
1,13-Диэтокситетрадекаметилгептасилоксан	$C_{18}H_{52}O_8Si_7$	119,0	149,2	163,5	180,0	197,0	208,2	223,2	244,7	268,2	293,5	—
1,3-Диэтокситетраметилдисилоксан	$C_6H_{22}O_3Si_2$	14,8	39,3	51,2	64,3	78,7	87,9	100,3	118,8	139,8	160,7	—
1,2-Диэтоксиэтан	$C_6H_{14}O_2$	—33,5	—10,2	+1,6	14,7	29,7	39,0	51,8	71,8	94,1	119,5	—
Дициан	C_2N_2	—95,8	—83,2	—76,8	—70,1	—62,7	—57,9	—51,8	—42,6	—33,0	—21,0	—34,4
Додекаметилпентасилоксан	$C_{12}H_{36}O_4Si_5$	56,6	84,1	98,0	112,7	128,8	139,4	162,8	173,8	196,5	220,5	—
Додекаметилциклогексасилоксаи	$C_{12}H_{36}O_6Si_6$	67,3	95,6	110,0	124,7	141,8	151,8	166,3	187,4	210,6	236,0	—3,0
Додекан	$C_{12}H_{26}$	47,7	75,7	89,9	104,3	121,4	131,7	145,5	165,8	188,4	214,5	—9,6
Додекан-2-он	$C_{12}H_{24}O$	77,1	106,0	120,4	136,0	152,4	163,8	177,5	199,0	222,5	246,5	—
1-Додецен	$C_{12}H_{24}$	47,2	74,0	87,8	102,4	118,6	128,5	142,3	162,2	185,5	208,0	—31,5
Додециламин	$C_{12}H_{27}N$	82,8	111,8	127,8	141,6	157,4	168,0	182,1	203,0	225,0	248,0	—
Додециловый спирт	$C_{12}H_{26}O$	91,0	120,2	134,7	150,0	167,2	177,8	192,0	213,0	235,7	259,0	24,0
Додецилтриметилсилан	$C_{15}H_{34}Si$	91,2	122,1	137,7	153,8	172,1	184,2	199,5	222,0	248,0	273,0	—
Докозаметилдекасилоксан	$C_{22}H_{66}O_9Si_{10}$	160,3	189,8	202,8	217,5	233,8	243,0	255,0	273,5	293,8	314,0	—
Докозан	$C_{22}H_{46}$	157,8	195,4	213,0	233,5	254,5	268,3	286,0	314,2	343,5	376,0	44,5
Изоамилацетат	$C_7H_{14}O_2$	0,0	23,7	35,2	47,8	62,1	71,0	83,2	101,3	121,5	142,0	—
Изоамилбензоат	$C_{12}H_{16}O_2$	72,0	104,5	121,6	139,7	158,3	171,4	186,8	210,2	235,8	262,0	—
Изоамилбутират	$C_9H_{18}O_2$	21,2	47,1	59,9	74,0	90,0	99,8	113,1	133,2	155,3	178,6	—
Изоамилизобутират	$C_9H_{18}O_2$	14,8	40,1	52,8	66,6	81,8	91,7	104,4	124,2	146,0	168,8	—
Изоамилизоналерат	$C_{10}H_{20}O_2$	27,0	54,4	68,6	83,8	100,6	111,3	125,1	146,1	169,5	194,0	—
Изоамиллевулинат	$C_{10}H_{18}O_3$	75,6	104,0	118,8	134,4	151,7	162,6	177,0	198,1	222,7	247,9	—
Изоамилнитрат	$C_5H_{11}NO_3$	5,2	28,8	40,3	53,5	67,6	76,3	88,6	106,7	126,5	147,5	—
Изоамиловый спирт	$C_5H_{12}O$	10,0	30,9	40,8	51,7	63,4	71,0	80,7	95,8	113,7	130,6	—117,2
Изоамилформиат	$C_6H_{12}O_2$	—17,5	+5,4	17,1	30,0	44,0	53,3	65,4	83,2	102,7	123,3	—
Изобутиламин	$C_4H_{11}N$	—50,0	—31,0	—21,0	—10,3	+1,3	8,8	18,8	32,0	50,7	68,6	—85,0
Изобутилацетат	$C_6H_{12}O_2$	—21,2	+1,4	12,8	25,5	39,2	48,0	59,7	77,6	97,5	118,0	—98,9
Изобутилбензоат	$C_{11}H_{14}O_2$	64,0	93,6	108,6	124,2	141,8	152,0	166,4	188,2	212,8	237,0	—
Изобутилбензол	$C_{10}H_{14}$	—9,8	+21,1	37,3	54,7	73,2	84,1	99,0	120,7	145,2	170,5	—
Изобутилбутират	$C_8H_{16}O_2$	4,6	30,0	42,2	56,1	71,7	81,3	94,0	113,9	135,7	156,9	—80,7

Вещество	Формула	Давление пара, *мм рт. ст.*										Температура плавления, °С
		1	5	10	20	40	60	100	200	400	760	
Изобутилдихлорацетат	$C_6H_{10}Cl_2O_2$	28,6	54,3	67,5	81,4	96,7	106,6	119,8	142,0	160,0	183,0	—
Изобутилизобутират	$C_8H_{16}O_2$	4,1	28,0	39,9	52,4	67,2	75,9	88,0	106,3	126,3	147,5	—80,7
Изобутилизовалерат	$C_9H_{18}O_2$	16,0	41,2	53,8	67,7	82,7	92,4	105,2	124,8	146,4	168,7	—
Изобутилкарбамат	$C_5H_{11}NO_2$	—	83,7	96,4	110,1	125,3	134,6	147,2	165,7	186,0	206,5	65,0
Изобутиллевулинат	$C_9H_{16}O_3$	65,0	92,1	105,9	120,2	136,2	147,0	160,2	181,8	205,5	229,9	—
Изобутиловый спирт	$C_4H_{10}O$	—9,0	+11,0	21,7	32,4	44,1	51,7	61,5	75,9	91,4	108,0	—108,0
Изобутилпропионат	$C_7H_{14}O_2$	—2,3	+20,9	32,3	44,8	58,5	67,6	79,5	97,0	116,4	136,8	—71,0
4-Изобутилфенол	$C_{10}H_{14}O$	72,1	100,9	115,5	130,3	147,2	157,0	171,2	192,1	214,7	237,0	—
Изобутилформиат	$C_5H_{10}O_2$	—32,7	—11,4	—0,8	+11,0	24,1	32,4	43,4	60,0	79,0	98,2	—95,3
Изобутилхлорид	C_4H_9Cl	—53,8	—34,3	—24,5	—13,8	—1,9	+5,9	16,0	32,0	50,0	68,9	—131,2
2-Изобутиронафтон	$C_{14}H_{14}O$	133,2	165,4	181,0	197,7	215,6	227,6	242,3	264,0	288,2	313,0	—
Изобутирофенон	$C_{11}H_{14}O$	58,3	87,0	101,4	116,8	133,8	144,6	158,0	180,1	204,2	228,0	—
Изовалериановая кислота	$C_5H_{10}O_2$	34,5	59,6	71,3	84,0	98,0	107,3	118,9	136,2	155,2	175,1	—37,6
Изокапролактон	$C_6H_{10}O_2$	38,3	66,4	80,3	95,7	112,3	123,2	137,2	157,8	182,1	207,0	—
Изокапронафтон	$C_{15}H_{16}O$	136,0	167,9	184,0	201,6	219,7	231,5	246,7	269,7	294,0	320,0	—
Изокапроновая кислота	$C_6H_{12}O_2$	66,2	83,0	94,0	107,0	120,4	129,6	141,4	158,3	181,0	207,7	—35,0
Изомасляная кислота	$C_4H_8O_2$	14,7	39,3	51,2	64,0	77,8	86,3	98,0	115,8	134,5	154,5	—47
Изопрен	C_5H_8	—79,8	—62,3	—53,3	—43,5	—32,6	—25,4	—16,0	—1,2	+15,4	32,6	—146,7
Изопропилацетат	$C_5H_{10}O_2$	—38,3	—17,4	—7,2	+4,2	17,0	25,1	35,7	51,7	69,8	89,0	—
4,4-Изопропилиденбисфенол	$C_{15}H_{16}O_2$	193,0	224,2	240,8	255,5	273,0	282,9	297,0	317,5	339,0	360,5	—
Изопропилизобутират	$C_7H_{14}O_2$	—16,3	+5,8	17,0	29,0	42,4	51,4	62,3	80,2	100,0	120,5	—
Изопропиллевулинат	$C_8H_{14}O_3$	48,0	74,5	88,0	102,4	118,1	127,8	141,8	161,6	185,2	208,2	—
2-Изопропилнафталин	$C_{13}H_{14}$	76,0	107,9	123,4	140,3	159,0	171,4	187,6	211,8	238,5	266,0	—
4-Изопропилстирол	$C_{11}H_{14}$	34,7	62,3	76,0	91,2	108,0	118,4	132,8	153,9	178,0	202,5Р	—
2-Изопропилфенол	$C_6H_{12}O$	56,6	83,8	97,0	111,7	127,5	137,7	150,3	170,1	192,6	214,5	15,5
3-Изопропилфенол	$C_9H_{12}O$	62,0	90,3	104,1	119,8	136,2	146,6	160,2	182,0	205,0	228,0	26,0
4-Изопропилфенол	$C_9H_{12}O$	67,0	94,7	108,0	123,4	139,8	149,7	163,3	184,0	206,1	228,2	61,0
Изопропилформиат	$C_4H_8O_2$	—52,0	—32,7	—22,7	—12,1	—0,2	+7,5	17,8	33,6	50,5	68,3	—
Изопропилхлорацетат	$C_5H_9ClO_2$	3,8	28,1	40,2	53,9	68,7	78,0	90,3	108,8	128,0	148,6	—
Изофорон	$C_9H_{14}O$	38,0	66,7	81,2	96,8	114,5	125,6	140,6	163,3	188,7	215,2	—
Изохиолии	C_9H_7N	63,5	92,7	107,8	123,7	141,6	152,0	167,6	190,0	214,5	240,5	24,6
Изоэвгенол	$C_{10}H_{12}O_2$	86,3	117,0	132,4	149,0	167,0	178,2	194,0	217,2	242,3	267,5	—10,0
Инден	C_9H_8	16,4	44,3	58,5	73,9	90,8	100,8	114,7	135,6	157,8	181,6	—2,0
Иодбензол	C_6H_5I	24,1	50,6	64,0	78,3	94,4	105,0	118,3	139,8	163,9	188,6	—28,5
1-Иод-3-метилбутан	$C_5H_{11}I$	—2,5	+21,9	34,1	47,6	62,3	71,9	84,4	103,8	125,8	148,2	—
1-Иод-2-метилпропан	C_4H_9I	—17,0	+5,8	17,0	29,8	42,8	51,8	63,5	81,0	100,3	120,4	—90,7
Иодноnан	$C_9H_{19}I$	70,0	96,2	109,0	123,0	138,1	147,7	159,8	179,0	199,3	219,5	—
1-Иодоктан	$C_8H_{17}I$	45,8	74,8	90,0	105,9	123,8	135,4	150,0	173,3	199,3	225,5	—45,9
1-Иодпропаи	C_3H_7I	—36,0	—13,5	—2,4	+10,0	23,6	32,1	43,8	61,8	81,8	102,5	—98,8
2-Иодпропан	C_3H_7I	—43,3	—22,1	—11,7	0,0	+13,2	21,6	32,8	50,0	69,5	89,5	—90
2-Иодтолуол	C_7H_7I	37,2	65,9	79,8	95,6	112,4	123,8	138,1	160,0	185,7	211,0	—
α-Ионон	$C_{13}H_{20}O$	79,5	108,8	123,0	139,0	155,6	166,3	181,2	202,5	225,2	250,0	—
Кадинен	$C_{15}H_{24}$	101,3	131,0	146,0	161,8	179,8	191,0	205,6	226,8	250,7	275,0	—
Камфен	$C_{10}H_{16}$	—	—	47,2	60,4	75,7	85,0	97,9	117,5	138,7	160,5	50,0
Камфиламин	$C_{10}H_{19}N$	45,3	74,0	83,7	97,6	112,5	122,0	134,6	153,0	173,8	195,0	—

Продолжение табл. 12.6

Веществ	Формула	Давление пара, *мм рт. ст.*										Температура плавления, °С
		1	5	10	20	40	60	100	200	400	760	
Камфоленовая кислота	$C_{10}H_{16}O_2$	97,6	125,7	139,8	153,9	170,0	180,0	193,7	212,7	234,0	256,0	—
d-Камфора	$C_{10}H_{16}O$	41,5	68,6	82,3	97,5	114,0	124,0	138,0	157,9	182,0	209,2	178,5
Каприловая кислота	$C_8H_{16}O_2$	92,3	114,1	124,0	136,4	150,6	160,0	172,2	190,3	213,9	237,5	16,0
Каприловый альдегид	$C_8H_{16}O$	73,4	92,0	101,2	110,2	120,0	126,0	133,9	145,4	156,5	168,5	—
Каприлонитрил	$C_9H_{15}N$	43,0	67,6	80,4	94,6	110,6	121,2	134,8	155,2	179,5	204,5	—
Каприновая кислота	$C_{10}H_{20}O_2$	125,0	142,0	152,2	165,0	179,9	189,8	200,0	217,1	240,3	268,4	31,5
Каприновый альдегид	$C_{10}H_{20}O$	51,9	78,8	92,0	106,3	122,2	132,0	145,3	164,8	186,3	208,5	—
Капронитрил	$C_6H_{11}N$	9,2	34,6	47,5	61,7	76,9	86,8	99,8	119,7	141,0	163,7	—
Капроновая кислота	$C_6H_{12}O_2$	71,2	89,5	99,5	111,8	125,0	133,3	144,0	160,8	181,0	202,0	—1,5
Карбазол	$C_{12}H_9N$	—	—	—	—	—	248,2	265,0	292,5	323,0	354,8	244,8
Карбонилселеинд	$COSe$	—117,1	—102,3	—95,0	—86,3	—76,4	—70,2	—61,7	—49,8	—35,6	—21,9	—
Карвакрол	$C_{10}H_{14}O$	70,0	98,4	113,2	127,9	145,2	155,3	169,7	191,2	213,8	237,0	0,5
Карвон	$C_{10}H_{14}O$	57,4	86,1	100,4	116,0	133,0	143,8	157,3	179,6	203,5	227,5	—
Коричная кислота	$C_9H_8O_2$	127,5	157,8	173,0	189,5	207,1	217,8	232,4	253,3	276,7	300,0	133,0
Коричный альдегид	C_9H_8O	76,1	105,8	120,0	135,7	152,2	163,7	177,7	199,3	222,4	246,0	—7,5
Коричный спирт	$C_9H_{10}O$	72,6	102,5	117,8	133,7	151,0	162,0	177,8	199,8	224,6	250,0	33,0
2-Крезол	C_7H_8O	38,2	64,0	76,7	90,5	105,8	115,5	127,4	146,7	168,4	190,8	30,8
3-Крезол	C_7H_8O	52,0	76,0	87,8	101,4	116,0	125,8	138,0	157,3	179,0	202,8	10,9
4-Крезол	C_7H_8O	53,0	76,5	88,6	102,3	117,7	127,0	140,0	157,7	179,4	201,8	35,5
β-Кротоновая кислота	$C_4H_6O_2$	33,5	57,4	69,0	82,0	96,0	104,5	116,3	133,9	152,2	171,9Р	15,5
α-Кротоновая кислота	$C_4H_6O_2$	—	—	80,0	93,0	107,8	116,7	128,0	146,0	165,5	185,0	72,0
цис-Кротононитрил	C_4H_5N	—29,0	—7,1	+4,0	16,4	30,0	38,5	50,1	68,0	88,0	108,0	—
транс-Кротононитрил	C_4H_5N	—19,5	+3,5	15,0	27,8	41,8	50,9	62,8	81,1	101,5	122,8	—
2-Ксенилдихлорфосфат	$C_{12}H_9Cl_2PO$	138,2	171,7	187,0	205,0	223,8	236,0	251,5	275,3	301,5	328,5	—
2,4-Ксилальдегид	$C_9H_{10}O$	59,0	85,9	99,0	114,0	129,7	139,8	152,2	172,3	194,1	215,5	75,0
2,3-Ксиленол	$C_8H_{10}O$	56,0	83,8	97,6	112,0	129,2	139,5	152,2	173,0	196,0	218,0	75
2,4-Ксиленол	$C_8H_{10}O$	51,8	78,0	91,3	105,0	121,5	131,0	143,0	161,5	184,2	211,5	25,5
3,4-Ксиленол	$C_8H_{10}O$	66,2	93,8	107,7	122,0	138,0	148,0	161,0	181,5	203,6	225,2	62,5
3,5-Ксиленол	$C_8H_{10}O$	62,0	89,2	102,4	117,0	133,3	143,5	156,0	176,2	197,8	219,5	68,0
2,4-Ксилидин	$C_8H_{11}N$	52,6	79,8	93,0	107,6	123,8	133,7	146,8	166,4	188,3	211,5	—
2,6-Ксилидин	$C_8H_{11}N$	44,0	72,6	87,0	102,7	120,2	131,5	146,0	160,5	193,7	217,9	—
2-Ксилол	C_9H_{10}	—3,8	+20,2	32,1	45,1	59,5	68,8	81,3	100,2	121,7	144,4	—25,2
3-Ксилол	C_8H_{10}	—6,9	+16,8	28,3	41,1	55,3	64,4	76,8	95,5	116,7	139,1	—47,9
4-Ксилол	C_8H_{10}	—8,1	+15,5	27,3	40,1	54,4	63,5	75,9	94,6	115,9	138,3	13,3
Кумарин	$C_9H_6O_2$	106,0	137,8	153,4	170,0	189,0	200,5	216,5	240,0	264,7	291,0	70,0
4-Кумидин	$C_9H_{13}N$	60,0	88,2	102,2	117,8	134,2	145,0	158,0	180,0	203,2	227,2	—
Куминаль	$C_{10}H_{12}O$	58,0	87,3	102,0	117,9	135,2	146,0	160,0	182,8	206,7	232,0	—
Куминовый спирт	$C_{10}H_{14}O$	74,2	103,7	118,0	133,8	150,3	161,7	176,2	197,9	221,7	246,6	—
Кумол	C_9H_{12}	2,9	26,8	38,3	51,5	66,1	75,4	88,1	107,3	129,2	152,4	—96,0
Лауриновая кислота	$C_{12}H_{24}O_2$	121,0	150,6	166,0	183,6	201,4	212,7	227,5	249,8	273,8	299,2	48,0
Лауриновый альдегид	$C_{12}H_{24}O$	77,7	108,4	123,7	140,2	157,8	168,7	184,5	207,8	231,8	257,0	44,5
Левулиновая кислота	$C_5H_8O_3$	102,0	128,1	141,8	154,1	169,5	178,0	190,2	208,3	227,4	245,8Р	33,5
Левулиновый альдегид	$C_5H_8O_2$	28,1	54,9	68,0	82,7	98,3	108,4	121,8	142,0	164,0	187,0	—
d-Лимонен	$C_{10}H_{16}$	14,0	40,4	53,8	68,2	84,3	94,6	108,3	128,5	151,4	175,0	—96,9
Линалилацетат	$C_{12}H_{20}O_2$	55,4	82,5	96 0	111,4	127,7	138,1	151,8	173,3	196,2	220,0Р	—
d-Линалоол	$C_{10}H_{18}O$	40,0	66,5	79,8	93,8	109,9	120,0	133,3	153,0	175,6	198,0	—
Малеиновый ангидрид	$C_4H_2O_3$	44,0	63,4	78,7	95,0	111,8	122,0	135,8	155,9	179,5	202,0	58
Масляная кислота	$C_4H_8O_2$	25,5	49,8	61,5	74,0	88,0	96,5	108,0	125,5	144,5	163,5	—4,7

Вещество	Формула	Давление пара, *мм рт. ст.*										Температура плавления, °С
		1	5	10	20	40	60	100	200	400	760	
Мезитила окись	$C_8H_{10}O$	—8,7	+14,1	26,0	37,9	51,7	60,4	72,0	90,0	109,8	130,0	—59,0
Ментан	$C_{10}H_{20}$	9,7	35,7	48,3	62,7	78,3	88,6	102,1	122,7	146,0	169,5	—
Ментилацетат	$C_{12}H_{22}O_2$	57,4	85,8	100,0	115,4	132,1	143,2	156,7	178,8	202,8	227,0	—
Ментилбензоат	$C_{17}H_{24}O_2$	123,2	154,2	170,0	186,3	204,3	215,8	230,4	253,2	277,1	301,0	54,5
Ментилформиат	$C_{11}H_{20}O_2$	47,3	75,8	90,0	105,8	123,0	133,8	148,0	169,8	194,2	219,0	—
l-Ментол	$C_{10}H_{20}O$	56,0	83,2	96,0	110,3	126,1	136,1	149,4	168,3	190,2	212,0	42,5
Меркаптоуксусная кислота	$C_2H_4O_2S$	60,0	87,7	101,5	115,8	131,8	142,0	154,0Р.	—	—	—	—16,5
Метакрилнитрил	C_4H_5N	—44,5	—23,3	—12,5	—0,6	+12,8	21,5	32,8	50,0	70,3	90,3	—
Метакриловая кислота	$C_4H_6O_2$	25,5	48,5	60,0	72,7	86,4	95,3	106,6	123,9	142,5	161,0	15
Метан	CH_4	—205,9	—199,0	—195,5	—191,8	—187,7	—185,1	—181,4	—175,5	—168,8	—161,5	—182,5
Метанол	CH_4O	—44,0	—25,3	—16,2	—6,0	+5,0	12,1	21,2	34,8	49,9	64,7	—97,8
Метилакрилат	$C_4H_6O_2$	—43,7	—23,6	—13,5	—2,7	+9,2	17,3	28,0	43,9	61,8	80,2П	—
Метиламин	CH_5N	—95,8	—81,3	—73,8	—65,9	—56,9	—51,3	—43,7	—32,4	—19,7	—6,3	—93,5
N-Метиланилин	C_7H_9N	36,0	62,8	76,2	90,5	106,0	115,8	129,8	149,3	172,0	195,5	—57,0
Метилантранилат	$C_8H_9NO_2$	77,6	109,0	124,2	141,5	159,7	172,0	187,8	212,4	238,5	266,5	24,0
N-Метилацетанилид	$C_9H_{11}NO$	—	103,8	118,6	135,1	152,2	164,2	179,8	202,3	227,4	253,0	102,0
Метилацетат	$C_3H_6O_2$	—57,2	—38,6	—29,3	—19,1	—7,9	—0,5	+9,4	24,0	40,0	57,8	—98,7
Метилацетилен	C_3H_4	—111,0	—97,5	—90,5	—82,9	—74,3	—68,8	—61,3	—49,8	—37,2	—23,3	—102,7
α-Метилбензиловый спирт	$C_8H_{10}O$	49,0	75,2	88,0	102,1	117,8	127,4	140,3	159,0	180,7	204,0	—
Метилбензоат	$C_8H_8O_2$	39,0	64,4	77,3	91,8	107,8	117,4	130,8	151,4	174,7	199,5	—12,5
2-Метилбензотиазол	C_8H_7NS	70,0	97,5	111,2	125,5	141,2	150,4	163,9	183,2	204,5	225,5	15,4
2-Метилбутан	C_5H_{12}	—82,9	—65,8	—57,0	—47,3	—36,5	—29,6	—20,2	—5,9	+10,5	27,8	—159,7
3-Метил-2-бутанон	$C_5H_{10}O$	—19,9	—1,0	+8,3	18,3	29,6	36,2	45,5	59,0	73,8	88,9	—92,0
2-Метил-1-бутен	C_5H_{10}	—89,1	—72,8	—64,3	—54,8	—44,1	—37,3	—23,0	—13,8	+2,5	20,2	—135,0
2-Метил-2-бутен	C_5H_{10}	—75,4	—57,0	—47,9	—37,9	—26,7	—19,4	—9,9	+4,9	21,6	38,5	—133,0
Метилбутират	$C_5H_{10}O_2$	—26,8	—5,5	+5,0	16,7	29,6	37,4	48,0	64,3	83,1	102,3	—
Метилбромид	CH_3Br	—96,3	—80,6	—72,8	—64,0	—54,2	—48,0	—39,4	—26,5	—11,9	+3,6	—93,0
2 Метилгексан	C_7H_{16}	—40,4	—19,5	—9,1	+2,3	14,9	28,0	34,1	50,8	69,8	90,0	—118,2
3-Метилгексан	C_7H_{16}	—39,0	—18,1	—7,8	+3,6	16,4	24,5	35,6	52,4	71,6	91,9	—119,4
2-Метилгептадекан	$C_{18}H_{38}$	119,8	152,0	168,7	186,0	204,8	216,3	231,5	254,5	279,8	306,5	—
2-Метилгептан	C_8H_{18}	—21,0	+1,3	12,3	24,4	37,9	46,6	58,3	76,0	96,2	117,6	—109,5
3-Метилгептан	C_8H_{18}	—19,8	+2,6	13,3	25,4	38,9	47,6	59,4	77,1	97,4	118,9	—120,8
4-Метилгептан	C_8H_{18}	—20,4	+1,5	12,4	24,5	38,0	46,6	58,3	76,1	96,3	117,7	—121,1
2-Метил-2-гептен	C_8H_{16}	—16,1	+6,7	17,8	30,4	44,0	52,8	64,6	82,3	102,2	122,5	—
6-Метил-3-гептен-2-ол	$C_8H_{16}O$	41,6	65,0	76,7	89,3	102,7	111,5	122,6	139,5	156,6	175,5	—
6-Метил-5-гептен-2-ол	$C_8H_{16}O$	41,9	66,0	77,8	90,4	104,0	112,8	123,8	140,0	156,6	174,3	—
Метилгликолат	$C_3H_6O_3$	9,6	33,7	45,3	58,1	72,3	81,8	93,7	111,8	131,7	151,5	—
α-Метилглутаровый ангидрид	$C_6H_8O_3$	93,8	125,4	141,8	157,7	177,5	189,9	205,0	229,1	255,5	282,5	—
2-Метилдисилазан	CH_9NSi_2	—76,3	—59,0	—50,1	—40,5	—29,6	—22,4	—13,1	+1,3	17,2	34,0	—
Метилдифениламин	$C_{13}H_{13}N$	103,5	134,0	149,7	165,8	184,0	195,4	210,1	232,8	257,0	282,0	—7,6
Метилдифенилсилан	$C_{13}H_{14}Si$	88,0	118,2	132,8	148,8	166,4	178,0	193,7	215,9	241,5	266,8	—
Метилдихлорацетат	$C_3H_4Cl_2O_2$	3,2	26,7	38,1	50,7	64,7	—73,6	85,4	103,2	122,6	143,0	—
Метилдихлорсилан [60]	CH_4Cl_2Si	—	—	—47,1	—36,9	—25,5	—18,3	—8,5	+6,3	32,2	40,9	—
Метилизобутират	$C_5H_{10}O_2$	—34,1	—13,0	—2,9	+8,4	21,0	28,9	39,6	55,7	73,6	92,6	—84,7
Метилизовалерат	$C_6H_{12}O_2$	—19,2	+2,9	14,0	26,4	39,8	48,2	59,8	77,3	96,7	116,7	—

Вещество	Формула	Давление пара, *мм рт. ст.*										Температура плавления, °С
		1	5	10	20	40	60	100	200	400	760	
Метилизотиоцианат	C_2H_3NS	—34,7	—8,3	+5,4	20,4	38,2	47,5	59,3	77,5	97,8	119,0	35,5
Метилиодид	CH_3I	—	—55,0	—45,8	—35,6	—24,2	—16,9	—7,0	+8,0	25,3	42,4	—64,4
Метилкаприлат	$C_9H_{18}O_2$	34,2	61,7	74,9	89,0	105,3	115,3	128,0	148,1	170,0	193,0 Р	—40,0
Метилкапринат	$C_{11}H_{22}O_2$	63,7	93,5	108,0	123,0	139,0	148,6	161,5	181,6	202,9	224,0 Р	—18,0
Метилкапронат	$C_7H_{14}O_2$	5,0	30,0	42,0	55,4	70,0	79,7	91,4	109,8	129,8	150,0	—
Метилкоричная кислота	$C_{10}H_{10}O_2$	125,7	155,0	169,8	185,2	201,8	212,0	224,8	245,0	266,8	288,0	—
Метиллауринат	$C_{13}H_{26}O_2$	87,8	117,9	133,2	149,0	166,0	176,8	190,8	Р	Р	Р	5,0
Метиллевулинат	$C_6H_{10}O_3$	39,8	66,4	79,7	93,7	109,5	119,3	133,0	153,4	175,8	197,7	—
Метилмиристинат	$C_{15}H_{30}O_2$	115,0	145,7	160,8	177,8	195,8	207,5	222,6	245,3	269,8	295,8	18,5
Метилмеркаптан	CH_4S	—90,7	—75,3	—67,5	—58,8	—49,2	—43,1	—34,8	—22,1	—7,9	+6,8	—121,0
Метилметакрилат	$C_5H_8O_2$	—30,5	—10,0	+1,0	11,0	25,5	34,5	47,0	63,0	82,0	101,0	—
Метиловый эфир коричной кислоты	$C_{10}H_{10}O_2$	77,4	108,1	123,0	140,0	157,9	170,0	185,8	209,6	235,0	263,0	33,4
Метилпальмитат	$C_{17}H_{34}O_2$	134,3	166,8	184,3	202,0 Р	—	—	—	—	—	—	30,0
2-Метилпентан	C_6H_{14}	—60,9	—41,7	—32,1	—21,4	—9,7	—1,9	+8,1	24,1	41,6	60,3	—154,0
3-Метилпентан	C_6H_{14}	—59,0	—39,8	—30,1	—19,4	—7,3	+0,1	10,5	26,5	44,2	63,3	—118,0
2-Метил-1-пентанол	$C_6H_{14}O$	15,4	38,0	49,6	61,6	74,7	83,4	94,2	111,3	129,8	147,9	—
2-Метил-2-пентанол	$C_6H_{14}O$	—4,5	+16,8	27,6	38,8	51,3	58,8	69,2	85,0	102,6	121,1	—103,0
2-Метил-4-пентанол	$C_6H_{14}O$	—0,3	+22,1	33,3	45,4	58,2	67,0	78,0	94,9	113,5	131,7	—
4-Метил-2-пентанон	$C_6H_{12}O$	—1,4	+19,7	30,0	40,8	52,8	60,4	70,4	85,6	102,0	119,0	—84,7
2-Метилпропан	C_4H_{10}	—109,2	—94,1	—86,4	—77,9	—68,4	—62,4	—54,1	—41,5	—27,1	—11,7	—145,0
2-Метилпропен	C_4H_8	—105,1	—96,5	—81,9	—73,4	—63,8	—57,7	—49,3	—36,7	—22,2	—6,9	—140,3
4-Метилпропиофенон	$C_{10}H_{12}O$	59,6	89,3	103,8	120,2	138,0	149,3	164,2	187,4	212,7	238,5	—
Метилпропиловый эфир	$C_4H_{10}O$	—72,2	—54,3	—45,4	—35,4	—24,3	—17,4	—8,1	+6,0	22,5	39,1	—
Метилпропионат	$C_4H_8O_2$	—42,0	—21,5	—11,8	—1,0	+11,0	18,7	29,0	44,0	61,8	79,8	—87,5
2-Метилпропионил бромид	C_4H_7BrO	13,5	38,4	50,6	64,1	79,4	88,8	101,6	120,5	141,7	163,0	—
Метилсалицилат	$C_8H_8O_3$	54,0	81,6	95,3	110,0	126,2	136,7	150,0	172,6	197,5	223,2	—8,8
Метилсилан	CH_6Si	—138,5	—126,3	—120,0	—113,0	—104,8	—99,8	—93,0	—82,4	—70,3	—56,9	—
α-Метилстирол	C_9H_{10}	7,4	34,0	47,1	61,8	77,8	88,3	102,2	121,8	143,0	165,4 П	—23,2
β-Метилстирол	C_9H_{10}	17,5	43,8	57,0	71,5	87,7	97,8	111,7	132,0	154,7	179,0	—30,1
4-Метилстирол	C_9H_{10}	16,0	42,0	55,1	69,2	85,0	95,0	108,6	128,7	151,2	170,0 П	—
2-Метилтиофен	C_5H_6S	—27,4	—5,1	+6,0	18,3	32,3	41,2	53,1	71,1	91,8	112,5	—63,5
3-Метилтиофен	C_5H_6S	—24,5	—2,3	+9,1	21,5	35,4	44,0	55,8	73,6	93,8	115,4	—68,9
Метилтиоцианат	C_2H_3NS	—14,0	+9,8	21,6	34,5	49,0	58,1	70,4	89,8	110,8	132,9	—51,0
Метилтрихлорсилан [60]	CH_3Cl_3Si	—	—	—27,3	—16,5	—4,6	+3,1	13,5	29,3	47,3	66,4	—
Метилуретан	$C_4H_9NO_2$	26,5	51,0	63,2	76,1	91,0	100,0	112,0	130,0	149,8	170,0	—
Метилформиат	$C_2H_4O_2$	—74,2	—57,0	—48,6	—39,2	—28,7	—21,9	—12,9	+0,8	16,0	32,0	—99,8
Метилфторид	CH_3F	—147,3	—137,0	—131,6	—125,9	—119,1	—115,0	—109,0	—99,9	—89,5	—78,2	—
2-Метилхинолин	$C_{10}H_9N$	75,3	104,0	119,0	134,0	150,8	161,7	176,2	197,8	211,7	246,5	—1,0
Метилхлорацетат	$C_3H_5ClO_2$	—2,9	+19,0	30,0	41,5	54,5	63,0	73,5	90,5	109,5	130,3	—31,9
Метилхлорид	CH_3Cl	—	—99,5	—92,4	—84,8	—76,0	—70,4	—63,0	—51,2	—38,0	—24,0	—97,7
Метилциклогексан	C_7H_{14}	—35,9	—14,0	—3,2	+8,7	22,0	30,5	42,1	59,6	79,6	100,9	—126,4
Метилциклопентан	C_6H_{12}	—53,7	—33,8	—23,7	—12,8	—0,6	+7,2	17,9	34,0	52,3	71,8	—142,4
Метилциклопропан	C_4H_8	—96,0	—80,6	—72,8	—64,0	—54,2	—48,0	—39,3	—26,0	—11,3	+4,5	—
2-Метил-3-этилпентан	C_8H_{18}	—24,0	—1,8	+9,5	21,7	35,2	43,9	55,7	73,6	94,0	115,6	—114,5
3-Метил-3-этилпентан	C_8H_{18}	—23,9	—1,4	+9,9	22,3	36,2	45,0	57,1	75,3	96,2	118,3	—90,0

Вещество	Формула	Давление пара, *мм рт. ст.*										Температура плавления, °С
		1	5	10	20	40	60	100	200	400	760	
2-Метоксианилин	C_7H_9NO	61,0	88,0	101,7	116,1	132,0	142,1	155,2	175,3	197,3	218,5	5,2
2-Метоксифенол	$C_7H_8O_2$	52,4	79,1	92,0	106,0	121,6	131,0	144,0	162,7	184,1	205,0	28,3
2-Метоксиэтанол	$C_3H_8O_2$	—13,5	+10,2	22,0	34,3	47,8	56,4	68,0	85,3	104,3	124,4	—
Метоуксусиая кислота	$C_3H_6O_3$	52,5	79,3	92,0	106,5	122,0	131,8	144,5	163,5	184,2	204,0	—
Миристиловая кислота	$C_{14}H_{28}O_2$	142,0	174,1	190,8	207,6	223,5	237,2	250,5	272,3	294,6	318,0	57,5
Миристиловый альдегид	$C_{14}H_{28}O$	99,0	132,0	148,3	166,2	186,0	198,3	214,5	240,4	267,9	297,8	23,5
Миристицин	$C_{11}H_{12}O_3$	95,2	126,1	142,0	158,0	177,7	189,5	205,0	228,1	253,5	280,0	—
Мирцен	$C_{10}H_{16}$	14,5	40,0	53,2	67,0	82,6	92,6	106,0	126,0	148,3	171,5	—
Моноизопропиловый эфир тетрапропиленгликоля	$C_{15}H_{32}O_5$	116,6	147,8	163,0	179,8	197,7	209,0	223,3	245,0	268,3	292,7	—
Муравьиная кислота	CH_2O_2	—20,0	—5,0	+2,1	10,3	24,0	32,4	43,8	61,4	80,3	100,6	8,2
Мускон	$C_{16}H_{30}O$	118,0	152,6	170,0	189,8	210,0	223,2	241,5	267,7	297,2	328,0	—
Нафталин	$C_{10}H_8$	52,6	74,2	85,8	101,7	119,3	130,2	145,5	167,7	193,2	217,9	80,2
1-Нафтиламин	$C_{10}H_9N$	104,3	137,7	153,8	171,6	191,5	203,8	220,0	244,9	272,2	300,8	50,0
2-Нафтиламин	$C_{10}H_9N$	108,0	141,6	157,6	175,8	195,7	208,1	224,3	249,7	277,4	306,1	111,5
1-Нафтойная кислота	$C_{11}H_8O_2$	156,0	184,0	196,8	211,2	225,0	234,5	245,8	263,5	281,4	300,0	160,5
2-Нафтойная кислота	$C_{11}H_8O_2$	160,8	189,7	202,8	216,9	231,5	241,3	252,7	270,3	289,5	308,5	184,0
1-Нафтол	$C_{10}H_8O$	94,0	125,5	142,0	158,0	177,8	190,0	206,0	229,6	255,8	282,5	—
2-Нафтол	$C_{10}H_8O$	—	128,6	145,5	161,8	181,7	193,7	209,8	234,0	260,6	288,0	122,5
Нерилформиат	$C_{11}H_{18}O_2$	57,3	85,3	99,7	114,8	131,5	142,0	155,6	176,8	200,0	224,5	—
Нерол	$C_{10}H_{18}O$	61,7	90,0	104,0	119,4	136,1	146,3	159,8	181,0	203,5	226,0	—
Никотин	$C_{10}H_{14}N_2$	61,8	91,8	107,2	123,7	142,1	154,7	169,5	193,8	219,8	247,3	—
2-Нитроанилин	$C_6H_6N_2O_2$	104,0	135,7	150,4	167,7	186,0	197,8	213,0	236,3	260,0	284,5Р	71,5
3-Нитроанилин	$C_6H_6N_2O_2$	119,3	151,5	167,8	185,5	204,2	216,5	232,1	255,3	280,2	305,7Р	114,0
4-Нитроанилин	$C_6H_6N_2O_2$	142,4	177,6	194,4	213,2	234,2	245,9	261,8	284,5Р	310,2Р	336,0Р	146,5
2-Нитробензальдегид	$C_7H_5NO_3$	85,8	117,7	133,4	150,0	168,8	180,7	196,2	220,0	246,8	273,5	40,9
3-Нитробензальдегид	$C_7H_5NO_3$	96,2	127,4	142,8	159,0	177,7	189,5	204,3	227,4	252,1	278,3	58,0
Нитробензол	$C_6H_5NO_2$	44,4	71,6	84,9	99,3	115,4	125,8	139,9	161,2	185,8	210,6	5,7
Нитроглицерин	$C_3H_5N_3O_9$	127	167	188	210	235	251	Взр.	—	—	—	11,0
4-Нитро-1,3-ксилол	$C_8H_9NO_2$	65,6	95,0	109,8	125,8	143,3	153,8	168,5	191,7	217,5	244,0	2,0
Нитрометан	CH_3NO_2	—29,0	—7,9	+2,8	14,1	27,5	35,5	46,6	63,5	82,0	101,2	—29,0
1-Нитропропан	$C_3H_7NO_2$	—9,6	+13,5	25,3	37,9	51,8	60,5	72,3	90,2	110,6	131,6	—108,0
2-Нитропропан	$C_3H_7NO_2$	—18,8	+4,1	15,8	28,2	41,8	50,3	62,0	80,0	99,8	120,3	—93,0
2-Нитротиофен	$C_4H_3NO_2S$	48,2	77,7	92,0	108,2	125,8	137,0	151,5	174,0	199,6	224,5	46,0
2-Нитротолуол	$C_7H_7NO_2$	50,0	79,1	93,8	109,6	126,3	137,6	151,5	173,7	197,7	222,3	—4,1
3-Нитротолуол	$C_7H_7NO_2$	50,2	81,0	96,0	112,8	130,7	142,5	156,9	180,3	206,8	231,9	15,5
4-Нитротолуол	$C_7H_7NO_2$	53,7	85,0	100,5	117,7	136,0	147,9	163,0	186,7	212,5	238,3	51,9
2-Нитрофенилацетат	$C_6H_7NO_4$	100,0	128,0	142,0	155,8	172,8	181,7	194,1	213,0	233,5	253,0	—
2-Нитрофенол	$C_6H_5NO_8$	49,3	76,8	90,4	105,8	122,1	132,6	146,4	167,6	191,0	214,5	45,0
Нитроэтан	$C_2H_5NO_2$	—21,0	+1,5	12,5	24,8	38,0	46,5	57,8	74,8	94,0	114,0	—90,0
Нонадекан	$C_{19}H_{40}$	133,2	166,3	183,5	200,8	220,0	232,8	248,0	271,8	299,8	330,0	32,0
Нонакозан	$C_{29}H_{60}$	234,2	269,8	286,4	303,6	323,2	334,8	350,0	373,2	397,2	421,8	63,8
Нонан	C_9H_{20}	2,4	26,3	38,0	51,0	65,6	74,1	86,0	104,7	126,8	149,5	—53,7
1-Нонанол	$C_9H_{20}O$	59,5	86,1	99,7	113,8	129,0	139,0	151,3	170,5	192,1	213,5	—5,0
2-Нонанон	$C_9H_{18}O$	32,1	59,0	72,3	87,2	103,4	113,8	127,4	148,2	171,2	195,0	—19,0
4-Оксибензальдегид	$C_7H_6O_2$	121,2	153,2	169,7	186,8	206,0	217,5	233,5	256,8	282,6	310,0	115,5
α-Оксибутиронитрил	C_5H_9NO	41,0	65,8	77,8	90,7	104,8	113,9	125,0	142,0	159,8	178,8	—

Вещество	Формула	Давление пара, *мм рт. ст.*										Температура плавления, °С
		1	5	10	20	40	60	100	200	400	760	
α-Оксиизомасляная кислота	$C_4H_8O_3$	73,5	98,5	110,5	123,8	138,0	146,4	157,7	175,2	193,8	212,0	79,0
4-Окси-3-метил-2-бутанон	$C_5H_{10}O_2$	44,6	69,3	81,0	94,0	108,2	117,4	129,0	146,5	165,5	185,0	—
4-Окси-4-метил-2-пентанон	$C_6H_{12}O_2$	22,0	46,7	58,8	72,0	86,7	96,0	108,2	126,8	147,5	167,9	—47,0
3-Оксипропионитрил	C_3H_5NO	58,7	87,8	102,0	117,9	134,1	144,7	157,7	178,0	200,0	221,0	—
Октадекаметилоктасилоксан	$C_{18}H_{54}O_7Si_8$	105,8	137,5	152,3	169,2	187,5	199,0	214,5	237,5	263,5	290,0	—
Октадекав	$C_{18}H_{36}$	119,6	152,1	169,6	187,5	207,4	219,7	236,0	260,6	288,0	317,0	28,0
1-Октадеканол	$C_{18}H_{38}O$	150,3	185,6	202,0	220,0	240,4	252,7	269,4	293,5	320,3	349,5	58,5
Октакозан	$C_{28}H_{58}$	226,5	260,3	277,4	295,4	314,2	326,8	341,8	364,8	388,9	412,5	61,6
Октаметилтрисилоксан	$C_8H_{24}O_2Si_3$	7,4	31,5	43,1	56,0	70,0	78,8	91,1	109,2	129,4	150,2	—
Октаметилциклотетрасилоксан	$C_8H_{24}O_4Si_4$	21,7	46,6	59,0	72,4	87,4	96,8	110,0	128,3	149,6	171,2	17,4
Октан	C_8H_{18}	—14,0	+8,3	19,2	31,5	45,1	53,8	65,7	83,6	104,0	125,6	—56,8
1-Октанол	$C_8H_{18}O$	54,0	76,5	88,3	101,0	115,2	123,8	135,2	152,0	173,8	195,2	—15,4
2-Октанол	$C_8H_{18}O$	32,8	57,6	70,0	83,3	98,0	107,4	119,8	138,0	157,5	178,5	—38,6
2-Октанон	$C_8H_{16}O$	23,6	48,4	60,9	74,3	89,8	99,0	111,7	130,4	151,0	172,9	—16,0
Октилакрилат	$C_{11}H_{20}O_2$	58,5	87,7	102,0	117,8	135,6	145,6	159,1	180,2	204,0	227,0	—
Олеиновая кислота	$C_{18}H_{34}O_2$	176,5	208,5	223,0	240,0	257,2	269,8	286,0	309,8	334,7	360,0Р	14,0
Пальмитиновая кислота	$C_{16}H_{32}O_2$	153,6	188,1	205,8	223,8	244,4	256,0	271,5	298,7	326,0	353,8	64,0
Пальмитиновый альдегид	$C_{16}H_{32}O$	121,6	154,6	171,8	190,0	210,0	222,6	239,5	264,1	292,3	321,0	34,0
Пальмитонитрил	$C_{16}H_{31}N$	134,3	168,3	185,8	204,2	223,8	236,6	251,5	277,1	304,5	332,0	31,0
Параформальдегид	$C_6H_{12}O_3$	—9,4	+13,1	24,1	36,1	49,5	57,7	69,0	85,8	104,3	124,0	155±5
Пеларгоновая кислота	$C_9H_{18}O_2$	108,2	126,0	137,4	149,8	163,7	172,3	184,4	203,1	227,5	253,5	—12,5
Пентадекан	$C_{15}H_{32}$	91,6	121,0	135,4	150,2	167,7	178,4	194,0	216,1	242,8	270,5	10,0
1,3-Пентадиен	C_5H_8	—71,8	—53,8	—45,0	—34,8	—23,4	—16,5	—6,7	+8,0	24,7	42,1	—
1,4-Пентадиен	C_5H_8	—83,5	—66,2	—57,1	—47,7	—37,0	—30,0	—20,6	—6,7	+8,3	26,1	—
Пентакозан	$C_{25}H_{52}$	194,2	230,0	248,2	266,1	285,6	298,4	314,0	339,0	365,4	390,3	53,3
Пентан	C_5H_{12}	—76,6	—62,5	—50,1	—40,2	—29,2	—22,2	—12,6	+1,9	18,5	36,1	—129,7
2-Пентаиол	$C_5H_{12}O$	1,5	22,1	32,2	42,6	54,1	61,5	70,7	85,7	102,8	119,7	—
2-Пентанон	$C_5H_{10}O$	—12,0	+8,0	17,9	28,5	39,8	47,3	56,8	71,0	86,3	103,3	—77,8
3-Пентанон	$C_5H_{10}O$	—12,7	+7,5	17,2	27,9	39,4	46,7	56,2	70,6	86,3	102,7	—42,0
2,3,4-Пентантриол	$C_5H_{12}O_3$	155,0	189,3	204,5	220,5	239,6	249,8	263,5	284,5	307,0	327,2	—
Пентахлорбензол	C_6HCl_5	98,6	129,7	144,3	160,0	178,5	190,1	205,5	227,0	251,6	276,0	85,5
Пентахлорфенол	C_6HCl_5O	—	—	—	192,2	211,2	223,4	239,6	261,8	285,0	309,3Р	188,5
Пентахлорэтан	C_2HCl_5	1,0	27,2	39,8	53,9	69,9	80,0	93,5	114,0	137,2	160,5	—22,0
Пентахлорэтилбензол	$C_8H_5Cl_5$	96,2	130,0	148,0	166,0	186,2	199,0	216,0	241,8	269,3	299,0	—
Пентаэтилбензол	$C_{16}H_{26}$	86,0	120,0	135,8	152,4	171,9	184,2	200,0	224,1	250,2	277,0	—
Пентаэтилхлорбензол	$C_{16}H_{25}Cl$	90,0	123,8	140,7	158,1	178,2	191,0	208,0	230,3	257,2	285,0	—
1-Пентен	C_5H_{10}	—80,4	—63,3	—54,5	—46,0	—34,1	—27,1	—17,7	—3,4	+12,8	30,1	—
Пивалофеион	$C_{11}H_{14}O$	57,8	85,7	99,0	114,3	130,4	140,8	154,0	175,0	197,7	220,0	—
2-Пиколин	C_6H_7N	—11,1	+12,6	24,4	37,4	51,2	59,9	71,4	89,0	108,4	128,8	—70,0
Пимелиновая кислота	$C_7H_{12}O_4$	163,4	196,2	212,0	229,3	247,0	258,2	272,0	294,5	318,5	342,1	103,0
α-Пинен	$C_{10}H_{16}$	—1,0	+24,6	37,3	51,4	66,8	76,8	90,1	110,2	132,3	155,0	—55,0
β-Пинен	$C_{10}H_{16}$	4,2	30,0	42,3	58,1	71,5	81,2	94,0	114,1	136,1	158,3	—
Пиперидин	$C_5H_{11}N$	—	—7,0	+3,9	15,8	29,2	37,7	49,0	66,2	85,7	106,0	—9,0
Пиридин	C_5H_5N	—18,9	+2,5	13,2	24,8	38,0	46,8	57,8	75,0	95,6	115,4	—42,0

Вещество	Формула	Давление пара, *мм рт. ст.*										Температура плавления, °С
		1	5	10	20	40	60	100	200	400	760	
Пировиноградный ангидрид	$C_5H_6O_3$	69,7	99,7	114,2	130,0	147,8	158,0	173,8	196,1	221,0	247,4	—
Пирогаллол	$C_6H_6O_3$	—	151,7	167,7	185,3	204,2	216,3	232,0	255,3	281,5	309,0 Р	133,0
Пирокатехин	$C_6H_6O_2$	—	104,0	118,3	134,0	150,6	161,7	176,0	197,7	221,5	245,5	105,0
Пробковая кислота	$C_8H_{14}O_4$	172,8	205,5	219,5	283,2	254,6	265,4	279.0	300,5	322,8	345,5	142,0
Пропан	C_3H_8	—128,9	—115,4	—108,5	—100,9	—92,4	—87,0	—79,6	—68,4	—55,6	—42,1	—187,1
1,2-Пропандиол	$C_3H_8O_2$	45,5	70,8	83,2	96,4	111,2	119,9	132,0	149,7	168,1	188,2	—
1,3-Пропандиол	$C_3H_8O_2$	59,4	87,2	100,6	115,5	131,0	141,1	153,4	172,8	193,8	214,2	—
1-Пропанол	C_3H_8O	—15,0	+5,0	14,7	25,3	36,4	43,5	52,8	66,8	82,0	97,8	—127,0
2-Пропанол	C_3H_8O	—26,1	—7,0	+2,4	12,7	23,8	30,5	39,5	53,0	67,8	82,5	—85,8
Пропенилбензол	C_9H_{10}	17,5	43,8	57,0	71,5	87,7	97,8	111,7	132,0	154,7	179,0	—30,1
Пропиламин	C_3H_9N	—64,4	—46,3	—37,2	—27,1	—16,0	—9,0	+0,5	15,0	31,5	48,5	—83,0
Пропилацетат	$C_5H_{10}O_2$	—26,7	—5,4	+5,0	16,0	28,8	37,0	47,8	64,0	82,0	101,8	—92,5
Пропилбензоат	$C_{10}H_{12}O_2$	54,6	83,8	98,0	114,3	131,8	143,3	157,4	180,1	205,2	231,0	—51,6
Пропилбензол	C_9H_{12}	6,3	31,3	43,4	56,8	71,6	81,1	94,0	113,5	135,7	159,2	—99,5
Пропилбутират	$C_7H_{14}O_2$	—1,6	+22,1	34,0	47,0	61,5	70,3	82,6	101,0	121,7	142,7	—95,2
Пропилен	C_3H_6	—131,9	—120,7	—49,0	—104,7	—96,5	—91,3	—84,1	—73,3	—60,9	—47,7	—185,0
Пропилена окись	C_3H_6O	—75,0	—57,8	—112,1	—39,3	—28,4	—21,3	—12,0	+2,1	17,8	34,5	—112,1
Пропилизовалерат	$C_8H_{16}O_2$	8,0	32,8	45,1	58,0	72,8	82,3	95,0	113,9	135,0	155,9	—
Пропилкарбамат	$C_4H_9NO_2$	52,4	77,6	90,0	103,2	117,7	126,5	138,3	155,8	175,8	195,0	—
Пропиллевулинат	$C_8H_{14}O_3$	59,7	86,3	99,9	114,0	130,1	140,6	154,0	175,6	198,0	221,2	—
Пропилмеркаптан	C_3H_8S	—56,0	—36,3	—26,3	—15,4	—3,2	+4,6	15,3	31,5	49,2	67,4	—112,0
Пропилпропионат	$C_6H_{12}O_2$	—14,2	+8,0	19,4	31,6	45,0	53,8	65,2	82,7	102,0	122,4	—76,0
Пропилформиат	$C_4O_8O_2$	—43,0	—22,7	—12,6	—1,7	+10,8	18,8	29,5	45,3	62,6	81,3	—92,9
Пропилхлорглиоксилат	$C_5H_7ClO_3$	9,7	32,3	43,5	55,6	68,8	77,2	88,0	104,7	123,0	150,0	—
Пропионамид	C_3H_7NO	65,0	91,0	105,0	119,0	134,8	144,3	156,0	174,2	194,0	213,0	79,0
1-Пропионафтон	$C_{13}H_{12}O$	124,0	155,5	171,0	188,1	206,9	218,2	233,5	255,5	280,2	306,0	—
Пропионитрил	C_3H_5N	—35,0	—13,6	—3,0	+8,8	22,0	30,1	41,4	58,2	77,7	97,1	—91,9
Пропионовая кислота	$C_3H_6O_2$	4,6	28,0	39,7	52,0	65,8	74,1	85,8	102,5	122,0	141,1	—22,0
Пропионовый ангидрид	$C_6H_{10}O_3$	20,6	45,3	57,7	70,4	85,6	94,5	107,2	127,8	146,0	167,0	—45,0
Пропиофенон	$C_9H_{10}O$	50,0	77,9	92,2	107,6	124,3	135,0	149,3	170,2	194,2	218,0	21,0
Пулегон	$C_{10}H_{16}O$	58,3	82,5	94,0	106,8	121,7	130,2	143,1	162,5	189,8	221,0	—
Резорцин	$C_6H_6O_2$	108,4	138,0	152,1	168,0	185,3	195,8	209,8	230,8	253,4	276,5	110,7
Салициловая кислота	$C_7H_6O_3$	113,7	136,0	146,2	156,8	172,2	182,0	193,4	210,0	230,5	256,0	159,0
Салициловый альдегид	$C_7H_6O_2$	33,0	60,1	73,8	88,7	105,2	115,7	129,4	150,0	173,7	196,5	—7,0
Салол	$C_{13}H_{10}O_3$	117,8	150,7	167,0	185,6	205,0	217,2	233,8	257,8	284,8	313,0	42,5
Сафрол	$C_{10}H_{10}O_2$	63,8	93,0	107,6	123,0	140,1	150,3	165,1	186,2	210,0	233,0	11,2
Себациновая кислота	$C_{10}H_{18}O_4$	183,0	215,7	232,0	250,0	268,2	279,8	294,5	313,2	332,8	352,3 Р	134,5
Селенофен	C_4H_4Se	—39,0	—16,0	—4,0	+9,1	24,1	33,8	47,0	66,7	88,8	114,3	—
Сероселенуглерод	$CSSe$	—47,3	—26,5	—16,0	—4,4	+8,6	17,0	28,3	45,7	65,2	85,6	—75,2
Сероуглерод	CS_2	—73,8	—54,3	—44,7	—34,3	—22,5	—15,3	—5,1	+10,4	28,0	46,5	—110,8
Синильная кислота	HCN	—70,8	—55,6	—48,2	—40,3	—31,3	—25,8	—18,8	—5,9	+9,8	25,8	—14,0
Скатол	C_9H_9N	95,0	124,2	139,6	154,3	171,9	183,6	197,4	218,8	242,5	266,2	95,0
Сукцинамид	$C_4H_5NO_2$	115,0	143,2	157,0	174,0	192,0	203,0	217,4	240,0	263,5	287,5	125,5
Сукцинхлорид	$C_4H_4Cl_2O_2$	39,0	65,0	78,0	91,8	107,5	117,2	130,0	149,3	170,0	192,5	17,0
Стеариновая кислота	$C_{18}H_{36}O_2$	173,7	209,0	225,0	243,4	263,3	275,5	291,0	316,5	343,0	370,0 Р	69,3
Стеариновый альдегид	$C_{18}H_{36}O$	140,0	174,6	192,1	210,6	230,8	244,2	260,0	285,0	313,8	342,5	63,5

Продолжение табл. 12.6

Вещество	Формула	Давление пара, *мм рт. ст.*										Температура плавления, °С
		1	5	10	20	40	60	100	200	400	760	
Стирол	C_8H_8	—7,0	+18,0	30,8	44,6	59,8	69,5	82,0Р	101,3Р	122,5Р	145,2Р	—30,6
α-Терпинеол	$C_{10}H_{18}O$	52,8	80,4	94,3	109,8	126,0	136,3	150,1	171,2	194,3	217,5	35,0
Терпинолен	$C_{10}H_{16}$	32,3	58,0	70,6	84,8	100,0	109,8	122,7	142,0	163,5	185,0	—
1,1,1,2-Тетрабромэтан	$C_2H_2Br_4$	58,0	83,3	95,7	108,5	123,2	132,0	144,0	161,5	181,0	200,0	—
1,1,2,2-Тетрабромэтан	$C_2H_2Br_4$	65,0	95,5	110,0	126,0	144,0	155,1	170,0	192,5	217,5	243,5	—
Тетрадекаметилгексасилоксан	$C_{14}H_{42}O_5Si_6$	73,7	102,6	117,6	132,8	149,8	160,0	175,2	196,5	220,5	245,5	—
Тетрадекаметилциклогептасилоксан	$C_{14}H_{42}O_7Si_7$	86,3	116,3	131,5	147,5	165,3	176,5	191,8	214,5	239,2	264,0	—32,0
Тетрадекан	$C_{14}H_{80}$	76,4	106,0	120,7	135,6	152,7	164,0	178,5	201,8	226,8	252,5	5,5
2-Тетрадеканон	$C_{14}H_{28}O$	99,3	130,0	145,5	161,3	179,8	191,4	206,0	228,2	253,3	278,0	—
Тетрадециламин	$C_{14}H_{31}N$	102,6	135,8	152,0	170,0	189,0	200,2	215,7	239,8	264,6	291,2	—
Тетрадецилтриметилсилан	$C_{17}H_{38}Si$	120,0	150,7	166,2	183,5	201,5	213,3	227,8	250,0	275,0	300,0	—
Тетраизобутилен	$C_{16}H_{32}$	63,8	93,7	108,5	124,5	142,2	152,6	167,5	190,0	214,6	240,0	—
Тетракозаметилундекасилоксан	$C_{24}H_{72}O_{10}Si_{11}$	175,2	203,5	216,7	230,5	246,2	254,8	266,3	284,0	303,7	322,8	—,
Тетракозан	$C_{24}H_{50}$	183,8	219,6	237,6	255,3	276,3	288,4	305,2	330,3	358,0	386,4	51,1
Тетралин	$C_{10}H_{12}$	38,0	65,3	79,0	93,8	110,4	121,3	135,3	157,2	181,8	207,2	—31,0
1,2,3,4-Тетраметилбензол	$C_{10}H_{14}$	42,6	68,7	81,8	95,8	111,5	121,8	135,7	155,7	180,0	204,4	—4,0
1,2,3,5-Тетраметилбензол	$C_{10}H_{14}$	40,6	65,8	77,8	91,0	105,8	115,4	128,3	149,9	173,7	197,9	—24,0
1,2,4,5-Тетраметилбензол	$C_{10}H_{14}$	45,0	65,0	74,6	88,0	104,2	114,8	128,1	149,5	172,1	195,9	79,5
Тетраметилбор	$C_4H_{14}B_2$	—59,6	—38,1	—27,4	—16,1	—3,4	+4,6	15,3	31,6	49,8	68,6	—72,5
2,2,3,3-Тетраметилбутан	C_8H_{18}	—17,4	+3,2	13,5	24,6	36,8	44,5	54,8	70,2	87,4	106,3	—102,2
Тетраметилолово	$C_4H_{12}Sn$	—51,3	—31,0	—20,6	—9,3	+3,5	11,7	22,8	39,8	58,5	78,0	—
Тетраметилпиперазин	$C_8H_{18}N_2$	23,7	48,8	61,7	75,6	90,0	100,0	113,8	134,3	157,8	183,5	—
Тетраметилсвинец	$C_4H_{12}Pb$	—29,0	—6,8	+4,4	16,6	30,3	39,2	50,8	68,8	89,0	110,0	—27,5
Тетраметилсилан	$C_4H_{12}Si$	—83,8	—66,7	—58,0	—48,3	—37,4	—30,3	—20,9	—6,5	+10,0	27,0	—102,1
Тетранитрометан	CH_4O_8	—	—	22,7	35,2	48,4	57,3	68,9	86,0	105,9	125,7Р	13,0
Тетрахлоранил	$C_6Cl_4O_2$	70,7	89,3	97,8	106,4	116,1	122,0	129,5	140,3	151,3	162,6	290
1,2,3,4-Тетрахлорбензол	$C_6H_2Cl_4$	68,5	99,6	114,7	131,2	149,2	160,0	175,7	198,0	225,5	254,0	46,5
1,2,3,5-Тетрахлорбензол	$C_6H_2Cl_4$	58,2	89,0	104,1	121,6	140,0	152,0	168,0	193,7	220,0	246,0	54,5
1,2,4,5-Тетрахлорбензол	$C_6H_2Cl_4$	—	—	—	—	146,0	157,7	173,5	196,0	220,5	245,0	139
1,1,2,2-Тетрахлор-1,2-дифторэтан	$C_2Cl_4F_2$	—37,5	—16,0	—5,0	+6,7	19,8	28,1	38,6	55,0	73,1	92,0	26,5
3,4,5,6-Тетрахлор-1,2-ксилол	$C_8H_6Cl_4$	94,4	125,0	140,3	156,0	174,2	185,8	200,5	223,0	248,3	273,5	—
Тетрахлорсилан [60]	$SiCl_4$	—	—	—35,1	—24,4	—12,6	—5,0	+5,3	20,9	38,6	57,3	—
2-α,α,α-Тетрахлортолуол	$C_7H_4Cl_4$	69,0	101,8	117,9	135,8	155,0	167,8	185,0	208,0	238,0	262,1	28,7
2,3,4,6-Тетрахлорфенол	$C_6H_2Cl_4O$	100,0	130,3	145,3	161,0	179,1	190,0	205,2	227,2	250,4	275,0	69,5
1,1,1,2-Тетрахлорэтан	$C_2H_2Cl_4$	—16,3	+7,4	19,3	32,1	46,7	56,0	68,0	87,2	108,2	130,5	—68,7
1,1,2,2-Тетрахлорэтан	$C_2H_2Cl_4$	—3,8	+20,7	33,0	46,2	60,8	70,0	83,2	102,2	124,0	145,9	—36
1,2,3,5-Тетрахлор-4-этилбензол	$C_8H_6Cl_4$	77,0	110,0	126,0	143,7	162,1	175,0	191,6	215,3	243,0	270,0	—
Тетрахлорэтилен	C_2Cl_4	—20,6	+2,4	13,8	26,3	40,1	49,2	61,3	79,8	100,0	120,8	—19,0
1,2,3,4-Тетраэтилбензол	$C_{14}H_{22}$	65,7	96,2	111,6	127,7	145,8	156,7	172,4	196,0	221,4	248,0	11,6
Тетраэтилдистибин	$C_8H_{20}Sb_2$	97,0	133,5	151,2	171,0	193,2	207,3	225,6	254,3	286,2	320,3	—
Тетраэтиленгликоль	$C_8H_{18}O_5$	153,9	183,7	197,1	212,3	228,0	237,8	250,0	268,4	288,0	307,8	—

Вещество	Формула	Давление пара, *мм рт. ст.*										Температура плавления, °С
		1	5	10	20	40	60	100	200	400	760	
Тетраэтиленгликольхлоргидрин	$C_8H_{17}ClO_4$	110,1	141,8	156,1	172,6	190,0	200,5	214,8	236,5	258,2	281,5	—
Тетраэтилсвинец	$C_8H_{20}Pb$	38,4	63,6	74,8	88,0	102,4	111,7	123,8	142,0	161,8	183,0	—136,0
Тетраэтилсилан	$C_8H_{20}Si$	—1,0	+23,9	36,3	50,0	65,3	74,8	88,0	108,0	130,2	153,0	—
Тетраэтоксисилан	$C_8H_{20}O_4Si$	16,0	40,3	52,6	65,8	81,1	90,7	103,6	123,5	146,2	168,5	—
Тиглиновый альдегид	C_5H_8O	—25,0	—1,6	+10,0	23,2	37,0	45,8	57,7	75,4	95,5	116,4	—
Тимол	$C_{10}H_{14}O$	64,3	92,8	107,4	122,6	139,8	149,8	164,1	185,5	209,2	231,8	51,5
2,2′-Тиодиэтанол	$C_4H_{10}O_2S$	42,0	96,0	128,0	165,0	210,0Р	240,5Р	285,0Р	—	—	—	—
Тиофен	C_4H_4S	—40,7	—20,8	—10,9	0,0	+12,5	20,1	30,5	46,5	64,7	84,4	—38,3
4-Толилгидразин	$C_7H_{10}N_2$	82,0	110,0	123,8	138,6	154,1	165,0	178,0	198,0	219,5	242,0	65,5
2-Толилизоцианид	C_8H_7N	25,2	51,0	64,0	78,2	94,0	104,0	117,7	137,8	159,9	183,5	—
2-Толуидин	C_7H_9N	44,0	69,3	81,4	95,1	110,0	119,8	133,0	153,0	176,2	199,7	—16,3
3-Толуидин	C_7H_9N	41,0	68,0	82,0	96,7	113,5	123,8	136,7	157,6	180,6	203,3	—31,5
4-Толуидин	C_7H_9N	42,0	68,2	81,8	95,8	111,5	121,5	133,7	154,0	176,9	200,4	44,5
2-Толунитрил	C_8H_7N	36,7	64,0	77,9	93,0	110,0	120,8	135,0	156,0	180,0	205,2	—13,0
4-Толунитрил	C_8H_7N	42,5	71,3	85,8	101,7	109,5	130,0	145,2	167,3	193,0	217,6	29,5
Толуол	C_7H_8	—26,7	—4,4	+6,4	18,4	31,8	40,3	51,9	69,5	89,5	110,6	—95,0
Толуол-2,4-диамин	$C_7H_{10}N_2$	106,5	137,2	151,7	167,9	185,7	196,2	211,5	232,8	256,0	280,0	99,0
Трибромацетальдегид	C_2HBr_3O	18,5	45,0	58,0	72,1	87,8	97,5	110,2	130,0	151,6	174,0Р	—
1,1,2-Трибромбутан	$C_4H_7Br_3$	45,0	73,5	87,8	103,2	120,2	131,6	146,0	167,8	192,0	216,2	—
1,2,2-Трибромбутан	$C_4H_7Br_3$	41,0	69,0	83,2	98,0	116,0	127,0	141,8	163,5	188,0	213,8	—
2,2,3-Трибромбутан	$C_4H_7Br_3$	38,2	66,0	79,8	94,6	111,8	122,2	136,3	157,8	182,2	206,5	—
Трибромметан	$CHBr_3$	—	22,0	34,0	48,0	63,6	73,4	85,9	106,1	127,9	150,5	8,5
1,2,3-Трибромпропан	$C_3H_5Br_3$	47,5	75,8	90,0	105,8	122,8	134,0	148,0	170,0	195,0	220,0	16,5
1,1,2-Трибромэтан	$C_2H_3Br_3$	32,6	58,0	70,6	84,2	100,0	110,0	123,5	143,5	165,4	188,4	—26,0
2,4,6-Три-*трет*-бутилфенол	$C_{18}H_{30}O$	95,2	126,1	142,0	158,0	177,4	188,0	203,0	226,2	250,6	276,3	—
Тридекан	$C_{13}H_{28}$	59,4	98,3	104,0	120,2	137,7	148,2	162,5	185,0	209,4	234,0	—6,2
Тридекановая кислота	$C_{13}H_{26}O_2$	137,8	166,3	181,0	195,8	212,4	222,0	236,0	255,2	276,5	299,0	41,0
2-Тридеканон	$C_{13}H_{26}O$	86,8	117,0	131,8	147,8	165,7	176,6	191,5	214,0	238,3	262,5	28,5
Триизобутиламин	$C_{12}H_{27}N$	32,3	57,4	69,8	83,0	97,8	107,3	119,7	138,0	157,8	179,0	—22,0
Триизобутилен	$C_{12}H_{24}$	18,0	44,0	56,5	70,0	86,7	96,7	110,0	130,2	153,0	179,0	—
Трикозан	$C_{23}H_{48}$	170,0	206,3	223,0	242,0	261,3	273,8	289,8	313,5	339,8	366,5	47,7
Триметаллилфосфат	$C_{12}H_{21}PO_4$	93,7	131,0	149,8	169,8	192,0	207,0	225,8	255,0	288,5	324,0	—
Триметиламин	C_3H_9N	—97,1	—81,7	—73,8	—65,0	—55,2	—48,8	—40,3	—27,0	—12,5	+2,9	—117,1
2,4,5-Триметиланилин	$C_9H_{13}N$	68,4	95,9	109,0	123,7	139,8	149,5	162,0	182,3	203,7	234,5	67,0
2,3,5-Триметилацетофенон	$C_{11}H_{14}O$	79,0	108,0	122,3	137,5	154,2	165,7	179,7	201,3	224,3	247,5	—
1,2,3-Триметилбензол	C_9H_{12}	16,8	42,9	55,9	69,9	85,4	95,3	108,8	129,0	152,0	176,1	—25,5
1,2,4-Триметилбензол	C_9H_{12}	13,6	38,4	50,7	64,5	79,8	89,5	102,8	122,7	145,4	169,2	—44,1
1,3,5-Триметилбензол	C_9H_{12}	9,6	34,7	47,4	61,0	76,1	85,8	98,9	118,6	141,0	164,7	—44,8
Триметилбор	C_3H_9B	—118,0	—99,6	—92,4	—84,0	—74,7	—68,9	—60,8	—48,5	—34,7	—20,1	—
2,2,3-Триметилбутан	C_7H_{16}	—	—	—18,8	—7,5	+5,2	13,3	24,4	41,2	60,4	80,9	—25,0
Триметилгаллий	C_3H_9Ga	—62,3	—42,0	—31,7	—20,3	—9,0	—1,6	+8,0	23,0	39,0	55,6	—19
Триметилдиборан	$C_3H_{12}B_2$	—74,0	—54,7	—44,8	—33,9	—22,0	—14,7	—4,4	+10,8	27,8	45,5	—122,9
Триметилоктилсилан	$C_{11}H_{26}Si$	41,8	68,8	82,3	96,6	113,0	123,2	136,5	156,0	179,5	202,0	—
2,2,3-Триметилпентан	C_8H_{18}	—29,0	—7,1	+3,9	16,0	29,5	38,1	49,9	67,8	88,2	109,8	—112,3

Вещество	Формула	Давление пара, *мм рт. ст.*										Температура плавления, °С
		1	5	10	20	40	60	100	200	400	760	
2,2,4-Триметилпентан	C_8H_{18}	−36,5	−15,0	−4,3	+7,5	20,7	29,1	40,7	58,1	78,0	99,2	−107,3
2,3,3-Триметилпентан	C_8H_{18}	−25,8	−3,9	+6,9	19,2	33,0	41,8	53,8	72,0	92,7	114,8	−101,5
2,3,4-Триметилпентан	C_8H_{18}	−26,3	−4,1	+7,1	19,3	32,9	41,6	53,4	71,3	91,8	113,5	−109,2
2,2,4-Триметил-2-пентанон	$C_8H_{16}O$	14,7	36,0	46,4	57,6	69,8	77,3	87,6	102,2	118,4	135,0	—
Триметилпропилолово	$C_6H_{16}Sn$	−12,0	+10,7	21,8	34,0	48,5	57,5	69,8	88,0	109,6	131,7	—
Триметилпропилсилан	$C_6H_{16}Si$	−46,0	−24,7	−13,9	−2,1	+11,3	19,9	31,6	49,0	69,2	90,0	—
2,4,5-Триметилстирол	$C_{11}H_{14}$	48,1	71,0	91,6	107,1	124,2	135,5	149,8	171,8	196,1	221,2Р	—
2,4,6-Триметилстирол	$C_{11}H_{14}$	37,5	65,7	79,7	94,8	111,8	122,3	136,8	157,8	182,3	207,0Р	—
Триметилфосфат	$C_3H_9O_4P$	26,0	53,7	67,8	83,0	100,0	110,0	124,0	145,0	167,8	192,7	—
Триметилхлорсилан [60]	C_3H_9ClSi	—	—	−34,9	−24,2	−12,3	−4,7	+5,6	21,2	38,9	57,6	—
Триметилцитрат	$C_9H_{14}O_7$	106,2	146,2	160,4	177,2	194,2	205,5	219,6	241,3	264,2	287,0Р	78,5
1,2,4-Триметил-5-этилбензол	$C_{11}H_{16}$	43,7	71,2	84,6	99,7	106,0	126,3	140,3	160,3	184,5	208,1	—
1,3,5-Триметил-2-этилбензол	$C_{11}H_{16}$	38,8	67,0	80,5	96,0	113,2	123,8	137,9	158,4	183,5	208,0	—
Триметилянтарный ангидрид	$C_7H_{10}O_3$	53,5	82,6	97,4	113,8	131,0	142,2	156,5	179,8	205,5	231,0	—
Трипропиленгликоль	$C_9H_{20}O_4$	96,0	125,7	140,5	155,8	173,7	184,6	199,0	220,2	244,3	267,2	—
Трипропиленгликоль, монобутиловый эфир	$C_{13}H_{28}O_4$	101,5	131,6	147,0	161,8	179,8	190,2	204,4	224,4	247,0	269,5	—
Трипропиленгликоль, моноизопропиловый эфир	$C_{12}H_{26}O_4$	82,4	112,4	127,3	143,7	161,4	173,2	187,8	209,7	232,8	256,6	—
Тритолифосфат	$C_{21}H_{21}O_4P$	154,6	184,2	198,0	213,2	229,7	239,8	252,2	271,8	292,7	313,0	—
Трифенилметан	$C_{19}H_{16}$	169,7	188,4	197,0	206,8	215,5	221,2	228,4	239,7	249,8	259,2	93,4
Трифенилфосфат	$C_{18}H_{15}O_4P$	193,5	230,4	249,8	269,7	290,3	305,2	322,5	349,8	379,2	413,5	49,4
α,α,α-Трифтортолуол	$C_7H_5F_3$	−32,0	−10,3	+0,4	12,2	25,7	34,0	45,3	62,5	82,0	102,2	−29,3
Трифторфенилсилан	$C_6H_5F_3Si$	−31,0	−9,7	+0,8	12,3	25,4	33,2	44,2	60,1	78,7	98,3	—
2,4,6-Трихлоранилин	$C_6H_4Cl_3N$	134,0	157,8	170,0	182,6	195,8	204,5	214,6	229,8	246,4	262,0	78,0
Трихлорацетальдегид	C_2HCl_3O	−37,8	−16,0	−5,0	+7,2	20,2	29,1	40,2	57,8	77,5	97,7	−57
Трихлорацетилбромид	C_2BrCl_3O	−7,4	+16,7	29,3	42,1	57,2	66,7	79,5	98,4	120,2	143,0	—
1,2,3-Трихлорбензол	$C_6H_3Cl_3$	40,0	70,0	85,6	101,8	119,8	131,5	146,0	168,2	193,5	218,5	52,5
1,2,4-Трихлорбензол	$C_6H_3Cl_3$	38,4	67,3	81,7	97,2	114,8	125,7	140,0	162,0	187,7	213,0	17
1,3,5-Трихлорбензол	$C_6H_3Cl_3$	—	63,8	78,0	93,7	110,8	121,8	136,0	157,7	183,0	208,4	63,5
1,2,3-Трихлорбутан	$C_4H_7Cl_3$	0,5	27,2	40,0	55,0	71,5	82,0	96,2	118,0	143,0	169,0	—
Трихлоризопропилсилан	$C_3H_7Cl_3Si$	−24,3	−1,5	+9,9	22,5	36,5	45,7	57,8	75,8	96,8	118,5	—
Трихлорметан	$CHCl_3$	−58,0	−39,1	−29,7	−19,0	−7,1	+0,5	10,4	25,9	42,7	61,3	−63,5
Трихлорметилсилан	CH_3Cl_3Si	−60,8	−40,7	−30,7	−19,3	−7,0	+1,0	12,1	28,1	47,0	66,4	−90
1,1,1-Трихлорпропан	$C_3H_5Cl_3$	−28,8	−7,0	+4,2	16,2	29,9	38,3	50,0	67,7	87,5	108,2	−77,7
1,2,3-Трихлорпропан	$C_3H_5Cl_3$	9,0	33,7	46,0	59,3	74,0	83,6	96,1	115,6	137,0	158,0	14,7
Трихлорсилан [60]	$SiHCl_3$	—	—	−53,9	−43,9	−32,9	−25,8	−16,2	−1,8	+14,6	31,9	—
α,α,α-Трихлортолуол	$C_7H_5Cl_3$	45,8	73,7	87,6	102,7	119,8	130,0	144,3	165,6	189,2	213,5	−21,2
1,1,2-Трихлор-1,2,2-трифторэтан	$C_2Cl_3F_3$	−68,0	−49,4	−40,3	−30,0	−18,5	−11,2	−1,7	+13,5	30,2	47,6	−35
Трихлоруксусная кислота	$C_2HCl_3O_2$	51,0	76,0	88,2	101,8	116,3	125,9	137,8	155,4	175,2	195,6	57
Трихлоруксусный ангидрид	$C_4Cl_6O_3$	56,2	85,3	99,6	114,3	131,2	141,8	155,2	176,2	199,8	223,0	—
Трихлорфенилсилан	$C_6H_5Cl_3Si$	33,0	60,4	74,2	89,5	105,8	116,3	130,5	151,3	175,7	201,0	—

Вещество	Формула	Давление пара, *мм рт. ст.*										Температура плавления, °С
		1	5	10	20	40	60	100	200	400	760	
Три-2-хлорфенилтиофосфат	$C_{18}H_{12}Cl_3O_3PS$	188,2	217,2	231,2	246,7	261,7	271,5	283,8	302,8	322,0	341,3	—
2,4,5-Трихлорфенол	$C_6H_3Cl_3O$	72,0	102,1	117,3	134,0	151,5	162,5	178,0	201,5	226,5	251,8	62
2,4,6-Трихлорфенол	$C_6H_3Cl_3O$	76,5	105,9	120,2	135,8	152,2	163,5	177,8	199,0	222,5	246,0	68,5
Трихлорфторметан	CCl_3F	—84,3	—67,6	—59,0	—49,7	—39,0	—32,3	—23,0	—9,1	+6,8	23,7	—
1,1,1-Трихлорэтан	$C_2H_3Cl_3$	—52,0	—32,0	—21,9	—10,8	+1,6	9,5	20,0	36,2	54,6	74,1	—30,6
1,1,2-Трихлорэтан	$C_2H_3Cl_3$	—24,0	—2,0	+8,3	21,6	35,2	44,0	55,7	73,3	93,0	113,9	—36,7
Трихлорэтилен	C_2HCl_3	—43,8	—22,8	—12,4	—1,0	+11,9	20,0	31,4	48,0	67,0	86,7	—73
Трихлорэтилсилан	$C_2H_5Cl_3Si$	—27,9	—6,8	+3,6	15,2	27,9	35,7	46,3	62,2	80,3	99,5	—40
Трихлорэтоксисилан	$C_2H_5Cl_3OSi$	—32,4	—10,9	0,0	+12,1	25,3	33,8	45,2	62,3	82,2	102,4	—
1,2,4-Триэтилбензол	$C_{12}H_{18}$	46,0	74,2	88,5	104,0	121,7	132,2	146,8	168,3	193,7	218,0	—
1,3,4-Триэтилбензол	$C_{12}H_{18}$	47,9	76,0	90,2	105,8	122,6	133,4	147,7	168,3	193,2	217,5	—
Триэтилгексилсилан	$C_{12}H_{28}Si$	52,4	81,8	96,4	112,3	130,0	141,7	156,0	179,0	204,6	230,0	—
Триэтилгептилсилан	$C_{13}H_{30}Si$	70,0	99,8	114,6	130,3	148,0	158,2	174,0	196,0	221,0	247,0	—
Триэтиленбор	$C_6H_{15}B$	—	—	—148,0	—140,6	—131,4	—125,2	—116,0	—101,0	—81,0	—56,2	—
Триэтиленгликоль	$C_6H_{14}O_4$	114,0	144,0	158,1	174,0	191,3	201,5	214,6	235,2	256,6	278,3	—
Триэтилкамфоронат	$C_{15}H_{26}O_6$	—	150,2	166,0	183,6	201,8	213,5	228,6	250,8	276,0	301,0	135,0
Триэтилметилсилан	$C_7H_{18}Si$	—18,2	+5,2	16,6	29,8	44,0	53,2	65,6	84,0	105,3	127,0	—
Триэтилоктилсилан	$C_{14}H_{32}Si$	73,7	104,8	120,6	137,7	155,7	168,0	184,3	208,0	235,0	262,0	—
Триэтилпропилсилан	$C_9H_{22}Si$	15,2	40,8	54,0	68,0	83,7	93,8	107,4	127,0	149,8	173,0	—
Триэтилталлий	$C_6H_{15}Tl$	9,3	37,6	51,7	67,7	85,4	95,7	112,1	136,0	163,5	192,1Р	—63,0
Триэтилортоформиат	$C_7H_{16}O_3$	5,5	29,2	40,5	53,4	67,5	76,0	88,0	106,0	125,7	146,0	—
Триэтилфосфат	$C_6H_{15}O_4P$	39,6	67,8	82,1	97,8	115,7	126,3	141,6	163,7	187,0	211,0	—
Триэтилцитрат	$C_{12}H_{20}O_7$	107,0	138,7	144,0	171,1	190,4	202,5	217,8	242,2	267,5	294,0	—
Триэтоксиметилсилан	$C_7H_{18}O_3Si$	—1,5	+22,8	34,6	47,2	61,7	70,4	82,7	101,0	121,8	143,5	—
Триэтоксифенилсилан	$C_{12}H_{20}O_3Si$	71,0	98,8	112,6	127,2	143,5	153,2	167,5	188,0	210,5	233,5	—
α-Туйон	$C_{10}H_{16}O$	38,3	65,7	79,3	93,7	110,0	120,2	134,0	154,2	177,8	201,0	—
Углерода двуокись	CO_2	—134,3	—124,4	—119,5	—114,4	—108,6	—104,8	—100,2	—93,0	—85,7	—78,2	—57,5
» недокись	C_3O_2	—94,8	—79,0	—71,0	—62,2	—52,0	—45,5	—36,9	—23,3	—8,9	+6,3	—107
» окись	CO	—222,0	—217,2	—215,0	—212,8	—210,0	—208,1	—205,7	—201,3	—196,3	—191,3	—205,0
» сероокись	COS	—132,4	—119,8	—113,3	—106,0	—98,3	—93,0	—85,9	—75,0	—62,7	—49,9	—138,8
Углерод подсернистый	C_3S_2	14,0	41,2	54,9	69,3	85,6	96,0	109,9	130,8	—	—	+0,4
» четырехбромистый	CBr_4	—	—	—	—	96,3	106,3	119,7	139,7	163,8	189,5	90,1
» четырехфтористый	CF_4	—184,6	—174,1	—169,3	—164,3	—158,8	—155,4	—150,7	—143,6	—135,5	—127,7	—183,7
» четыреххлористый	CCl_4	—50,0	—30,0	—19,6	—8,2	+4,3	12,3	23,0	38,3	57,8	76,7	—22,6
Уксусная кислота	$C_2H_4O_2$	—17,2	+6,3	17,5	29,9	43,0	51,7	63,0	80,0	99,0	118,1	16,7
Уксусный ангидрид	$C_4H_6O_3$	1,7	24,8	36,0	48,3	62,1	70,8	82,2	100,0	119,8	139,6	—73
Ундекан	$C_{11}H_{24}$	31,4	58,4	72,2	86,3	103,1	113,9	126,8	148,0	170,6	194,5	—25,6
Ундекановая кислота	$C_{11}H_{22}O_2$	101,4	133,1	149,0	166,0	185,6	197,2	212,5	237,8	262,8	290,0	29,5
Уидекан-2-ол	$C_{11}H_{24}O$	71,1	99,0	112,8	127,5	143,7	153,7	167,2	187,7	209,8	232,0	—
Ундекан-2-он	$C_{11}H_{22}O$	68,1	95,5	108,9	123,1	139,0	148,6	161,0	181,2	202,3	224,0	15,0
10-Ундеценовая кислота	$C_{11}H_{20}O_2$	114,0	142,8	156,3	172,0	188,7	199,5	213,5	232,8	254,0	275,0	24,5
Уретан	$C_3H_7NO_2$	—	65,8	77,8	91,0	105,6	114,8	126,2	144,2	164,0	184,0	48,5
α-Фелландрен	$C_{10}H_{16}$	20,0	45,7	58,0	72,1	87,8	97,6	110,6	130,6	152,0	175,0	—

Вещество	Формула	Давление пара, *мм рт. ст.*										Температура плавления, °С
		1	5	10	20	40	60	100	200	400	760	
Феиантрен	$C_{14}H_{10}$	118,2	154,3	173,0	193,7	215,8	229,9	249,0	277,1	308,0	340,2	99,5
2-Фенетидин	$C_8H_{11}NO$	67,0	94,7	108,6	123,7	139,9	149,8	163,5	184,0	207,0	228,0	—
Фенетиловый спирт	$C_8H_{10}O$	58,2	85,9	100,0	114,8	130,5	141,2	154,0	175,0	197,5	219,5	—
Фенетол	$C_8H_{10}O$	18,1	43,7	56,4	70,3	86,6	95,4	108,4	127,9	149,8	172,0	—30,2
Фенилацетат	$C_8H_8O_2$	38,2	64,8	78,0	92,3	108,1	118,1	131,6	151,2	173,5	195,9	—
Феннлацетилхлорид	C_8H_7ClO	48,0	75,3	89,0	103,6	119,8	129,8	143,5	163,8	186,0	210,0	—
Фенилацетонитрнл	C_8H_7N	60,0	89,0	103,5	119,4	136,3	147,7	161,8	184,2	208,5	233,5	—23,8
Фенилбензоат	$C_{13}H_{10}O_2$	106,8	141,5	157,8	177,0	197,6	210,8	227,8	254,0	283,5	314,0	70,5
4-Фенил-3-бутен-2-он	$C_{10}H_{10}O$	81,7	112,2	127,4	143,8	161,3	172,6	187,8	211,0	235,4	261,0	41,5
Фенилгидразин	$C_6H_8N_2$	71,8	101,6	115,8	131,5	148,2	158,7	173,5	195,4	218,2	243,5Р	19,5
Фенилглиоксаль	$C_8H_6Cl_4$	—	75,0	87,8	100,7	115,5	124,2	136,2	153,8	173,5	193,5	73
1,3-Фенилдиамин	$C_6H_8N_2$	99,8	131,2	147,0	163,8	182,5	194,0	209,9	233,0	259,0	285,5	62,8
Фенилдихлорфосфат	$C_6H_5Cl_2O_2P$	66,7	95,9	110,0	125,9	143,4	153,6	168,0	189,8	213,0	239,5	—
1,2-Фенилендиацетат	$C_{10}H_{10}O_4$	98,0	129,8	145,7	161,8	179,8	191,6	206,5	228,7	253,3	278,0	—
Фенилизотиоцианат	C_7H_5NS	47,2	75,6	89,8	115,5	122,5	133,3	147,7	169,6	194,0	218,5	—21,0
Фенилизоцианат	C_7H_5NO	10,6	36,0	48,5	62,5	77,7	87,7	100,6	120,8	142,7	165,6	—
Фенилизоцианид	C_7H_5N	12,0	37,0	49,7	63,4	78,3	88,0	101,0	120,8	142,3	165,0	—
N-Фениламинодиэтанол	$C_{10}H_{15}NO_2$	145,0	179,2	195,8	213,4	233,0	245,3	260,6	284,5	311,3	337,8	—
Фенилмеркаптан	C_9H_6S	18,6	43,7	56,0	69,7	84,2	93,9	106,6	125,8	146,7	168,0	—
1-Фенил-1,3-пентандион	$C_{11}H_{12}O_2$	98,0	128,5	144,0	159,9	178,0	189,8	204,5	226,7	251,2	276,5	—
3-Фенил-1-пропанол	$C_9H_{12}O$	74,7	102,4	116,0	131,2	147,4	156,8	170,3	191,2	212,8	235,0	—
Фенилтрихлорсилан [60]	$C_6H_5Cl_3Si$	—	—	75,3	89,8	105,9	116,3	130,3	151,5	175,5	201,0	—
Фенилуксусная кислота	$C_8H_8O_2$	97,0	127,0	141,3	156,0	173,6	184,5	198,2	219,5	243,0	265,5	76,5
2-Фенилфенон	$C_{12}H_{10}O$	100,0	131,6	146,2	163,3	180,3	192,2	205,9	227,9	251,8	275,0	56,5
4-Фенилфенон	$C_{12}H_{10}O$	—	—	176,2	193,8	213,0	225,3	240,9	263,2	285,5	308,0	164,5
Фенилциклогексан	$C_{12}H_{16}$	67,5	96,5	111,3	126,4	144,0	154,2	169,3	191,3	214,6	240,0	7,5
2-Феноксиэтанол	$C_8H_{10}O_2$	78,0	106,6	121,2	136,0	152,2	163,2	176,5	197,6	221,0	245,3	11,6
2-Феноксиэтилацетат	$C_{10}H_{12}O_3$	82,6	113,5	128,0	144,5	162,3	104,0	189,2	211,3	235,0	259,7	—6,7
Фенол	C_6H_6O	40,1	62,5	73,8	86,0	100,1	108,4	121,4	139,0	160,0	181,9	40,6
dl-Фенхиловый спирт	$C_{10}H_{18}O$	45,8	70,3	82,1	95,6	110,8	120,2	132,3	150,0	173,2	201,0	35,0
Фенхолевая кислота	$C_{10}H_{16}O_2$	101,7	128,7	142,3	155,8	171,8	181,5	194,0	215,0	237,8	264,1	19,0
d-Фенхон	$C_{10}H_{16}O$	28,0	54,7	68,3	83,0	99,5	109,8	123,6	144,0	166,8	191,0	5,0
Флюорен	$C_{13}H_{10}$	—	129,3	146,0	164,2	185,2	197,8	214,7	240,3	268,6	295,0	113,0
Формальдегид	CH_2O	—	—	—88,0	—79,6	—70,6	—65,0	—57,3	—46,0	—33,0	—19,5	—92,0
Формамид	CH_3NO	70,5	96,3	109,5	122,5	137,5	147,0	157,5	175,5	193,5	210,5	—
Форон	$C_9H_{14}O$	42,0	68,3	81,5	95,6	111,3	121,4	134,0	153,5	175,3	197,2	28,0
Фосген	CCl_2O	—92,9	—77,0	—69,3	—60,3	—50,3	—44,0	—35,6	—22,3	—7,6	+8,3	—104,0
Фталевый ангидрид	$C_8H_4O_3$	96,5	121,3	134,0	151,7	172,0	185,3	202,3	228,0	256,8	284,5	130,8
Фталид	$C_8H_4Cl_2O_2$	95,5	127,7	144,0	161,3	181,0	193,5	210,0	234,5	261,8	290,0	73,0
Фталилхлорид	$C_8H_4Cl_2O_2$	86,3	118,3	134,2	151,0	170,0	182,2	197,8	222,0	248,3	275,8	88,5
Фторбензол	C_6H_5F	—43,4	—22,8	—12,4	—1,2	+11,5	19,6	30,4	47,2	65,7	84,7	—42,1
2-Фтортолуол	C_7H_7F	—24,2	—2,2	+8,9	21,4	34,7	43,7	55,3	73,0	92,8	114,0	—80,0
3-Фтортолуол	C_7H_7F	—22,4	—0,3	+11,0	23,4	37,0	45,8	57,5	75,4	95,4	116,0	—110,8
4-Фтортолуол	C_7H_7F	—21,8	+0,3	11,8	24,0	37,8	46,5	58,1	76,0	96,1	117,0	—
1-Фторэтилен	C_2H_3F	—149,3	—138,0	—132,2	—125,4	—118,0	—113,0	—106,2	—95,4	—84,0	—72,2	—160,5
транс-Фумарилхлорид	$C_4H_2Cl_2O_2$	15,0	38,5	51,8	65,0	79,5	89,0	101,0	120,0	140,0	160,0	—
Фурфуриловый спирт	$C_5H_6O_2$	31,8	56,0	68,0	81,0	95,7	104,0	115,9	133,1	151,8	170,0	—

Вещество	Формула	Давление пара, *мм рт. ст.*										Температура плавления, °С
		1	5	10	20	40	60	100	200	400	760	
Фурфурол	$C_5H_4O_2$	18,5	42,6	54,8	67,8	82,1	91,5	103,4	121,8	141,8	161,8	—36,5
Хинолин	C_9H_7N	59,7	89,6	103,8	119,8	136,7	148,1	163,2	186,2	212,3	237,7	—15,0
Хлоральгидрат	$C_2H_3Cl_3O_2$	—9,8	+10,0	19,5	29,2	39,7	46,2	55,0	68,0	82,1	96,2Р	51,7
2-Хлоранилин	C_6H_6ClN	46,3	72,3	84,8	99,2	115,6	125,7	139,5	160,0	183,7	208,8	—
3-Хлоранилин	C_6H_6ClN	63,5	89,8	102,0	116,7	133,6	144,1	158,0	179,5	203,5	228,5	—10,4
4-Хлоранилин	C_6H_6ClN	59,3	87,9	102,1	117,8	135,0	145,8	159,9	182,3	206,6	230,5	70,5
Хлорбензол	C_6H_5Cl	—13,0	+10,6	22,2	35,3	49,7	58,3	70,7	89,4	110,0	132,2	—45,2
1-Хлорбутан	C_4H_9Cl	—49,0	—28,9	—18,6	—7,4	+5,0	13,0	24,0	40,0	58,8	77,8	—123,1
Хлордиметилфенилсилан	$C_8H_{11}ClSi$	29,8	56,7	70,0	84,7	101,2	111,5	124,7	145,5	168,6	193,5	—
2-Хлордифенил	$C_{12}H_9Cl$	89,3	109,8	134,7	151,2	169,9	182,1	197,0	219,6	243,8	267,5	34,0
4-Хлордифенил	$C_{12}H_9Cl$	96,4	129,8	146,0	164,0	183,8	196,0	212,5	237,8	264,5	292,9	75,5
Хлордифторметан	$CHClF_2$	—122,8	—110,2	—103,7	—96,5	—88,6	—83,4	—76,4	—65,8	—53,6	—40,8	—160
α-Хлоркротоновая кислота	$C_4H_5ClO_2$	70,0	95,6	108,0	121,2	135,6	144,4	155,9	173,8	193,2	212,0	—
Хлорметилдифенилсилан	$C_{13}H_{13}ClSi$	105,0	137,5	152,7	170,0	189,2	200,5	216,0	240,5	266,5	295,5	—
Хлорметилсилан	CH_5ClSi	—95,0	—79,2	—71,0	—62,0	—51,7	—45,2	—36,4	—22,9	—7,8	+8,7	—
1-Хлорнафталин	$C_{10}H_7Cl$	80,6	104,8	118,6	134,4	153,2	165,6	180,4	204,2	230,8	259,3	—20,0
Хлорпикрин	CCl_3NO_2	—25,5	—3,3	+7,8	20,0	33,8	42,3	53,8	71,8	91,8	111,9	—64,0
2-Хлорпиридин	C_5H_4ClN	13,3	38,8	51,7	65,8	81,7	91,6	104,6	125,0	147,7	170,2	—
1-Хлорпропан	C_3H_7Cl	—68,3	—50,0	—41,0	—31,0	—19,5	—12,1	—2,5	+12,2	29,4	46,4	—122,8
2-Хлорпропан	C_3H_7Cl	—78,8	—61,1	—52,0	—42,0	—31,0	—23,5	—13,7	+1,3	18,1	36,5	—117
1-Хлорпропилен	C_3H_5Cl	—81,3	—63,4	—54,1	—44,0	—32,7	—25,1	—15,1	+1,3	18,0	37,0	—99,0
3-Хлорпропилен	C_3H_5Cl	—70,0	—52,0	—42,9	—32,8	—21,2	—14,1	—4,5	+10,0	27,5	44,6	—136,4
γ-Хлорпропилтрихлорсилан [60]	$C_3H_6Cl_4Si$	—	—	62,3	76,4	91,9	101,8	115,3	135,4	158,3	182,3	—
3-Хлорстирол	C_8H_7Cl	25,3	51,3	65,2	80,0	96,5	107,2	121,2	142,0Р	165,7Р	190,0Р	—
4-Хлорстирол	C_8H_7Cl	28,0	54,5	67,5	82,0	98,0	108,5	122,0	143,5Р	166,0Р	191,0Р	—15,0
1-Хлортетрадекан	$C_{14}H_{29}Cl$	98,5	131,8	148,2	166,2	187,0	199,8	215,5	240,3	267,5	296,0	0,9
α-Хлортолуол	C_7H_7Cl	22,0	47,8	60,8	75,0	90,7	100,5	114,2	134,0	155,8	179,4	—39,0
2-Хлортолуол	C_7H_7Cl	5,4	30,6	43,2	56,9	72,0	81,8	94,7	115,0	137,1	159,3	—
3-Хлортолуол	C_7H_7Cl	4,8	30,3	43,2	57,4	73,0	83,2	96,3	116,6	139,7	162,3	—
4-Хлортолуол	C_7H_7Cl	5,5	31,0	43,8	57,8	73,5	83,3	96,6	117,1	139,8	162,3	7,3
Хлортриметилсилан	C_3H_9ClSi	—62,8	—43,6	—34,0	—23,2	—11,4	—4,0	+6,0	21,9	39,4	57,9	—
Хлортрифторметан	$CClF_3$	—149,5	—139,2	—134,1	—128,5	—121,9	—117,3	—111,7	—102,5	—92,7	—81,2	—
2-Хлор-α, α, α-трифтортолуол	$C_7H_4ClF_3$	0,0	24,7	37,1	50,6	65,9	75,4	88,3	108,3	130,0	152,2	—6,0
1-Хлор-1, 2,2-трифторэтилен	C_2ClF_3	—116,0	—102,5	—95,9	—88,2	—79,7	—74,1	—66,7	—55,0	—41,7	—27,9	—157,5
Хлортриэтилсилан	$C_6H_{15}ClSi$	—4,9	+19,8	32,0	45,5	60,2	69,5	82,3	101,6	123,6	146,3	—
Хлоруксусная кислота	$C_2H_3ClO_2$	43,0	68,3	81,0	94,2	109,2	118,3	130,7	149,0	169,0	189,5	61,2
Хлоруксусный ангидрид	$C_4H_4Cl_2O_3$	67,2	94,1	108,0	122,4	138,2	148,0	159,8	177,8	197,0	217,0	46,0
4-Хлорфенетиловый спирт	C_8H_9ClO	84,0	114,3	129,0	145,0	162,0	173,5	188,1	210,0	234,5	259,3	—
2-Хлор-3-фенилфенол	$C_{12}H_9ClO$	118,0	152,2	169,7	186,7	207,4	219,6	237,0	261,3	289,4	317,5	6,0
2-Хлор-6-фенилфенол	$C_{12}H_9ClO$	119,8	153,7	170,7	189,8	208,2	220,0	237,1	261,6	289,5	317,0	—
2-Хлорфенол	C_6H_5ClO	12,1	38,2	51,2	65,9	82,0	92,0	106,0	126,4	149,8	174,5	7,0
3-Хлорфенол	C_6H_5ClO	44,2	72,0	86,1	101,7	118,0	129,4	143,0	164,8	188,7	214,0	32,5
4-Хлорфенол	C_6H_5ClO	49,8	78,2	92,2	108,1	125,0	136,1	150,0	172,0	196,0	220,0	42,0
бис-2-Хлорэтилацеталь	$C_6H_{12}Cl_2O_2$	56,2	83,7	97,6	112,2	127,8	138,0	150,7	169,8	190,5	212,6	—

Вещество	Формула	Давление пара, *мм рт. ст.*										Температура плавления, °С
		1	5	10	20	40	60	100	200	400	760	
1-Хлор-2-этилбензол	C_8H_9Cl	17,2	43,0	56,1	70,3	86,2	96,4	110,0	130,2	152,2	177,6	—80,2
1-Хлор-3-этилбензол	C_8H_9Cl	18,6	45,2	58,2	73,0	89,2	99,6	113,6	133,8	156,7	181,1	—53,3
1-Хлор-4-этилбензол	C_8H_9Cl	19,2	46,4	60,0	75,5	91,8	102,0	116,0	137,0	159,8	184,3	—62,6
1-Хлорэтилен	C_2H_3Cl	—105,6	—90,8	—83,7	—75,7	—66,8	—61,1	—53,2	—41,3	—28,0	—13,8	—153,7
2-Хлорэтил-α-метилбензиловый эфир	$C_{10}H_{13}ClO$	62,3	91,4	106,0	121,8	139,6	150,0	164,8	186,3	210,8	235,0	—
2-Хлорэтилхлорацетат	$C_4H_6Cl_2O_2$	46,0	72,1	86,0	100,0	116,0	126,2	140,0	159,8	182,2	205,0	—
2-Хлорэтил-2-хлоризопропиловый эфир	$C_5H_{10}Cl_2O$	24,7	50,1	63,0	77,2	92,4	102,2	115,8	135,7	156,5	180,0	—
2-Хлорэтил-2-хлорпропиловый эфир	$C_5H_{10}Cl_2O$	29,8	56,5	70,0	84,8	101,5	111,8	125,6	146,3	169,8	194,1	—
1-Хлор-2-этоксибензол	C_8H_9ClO	45,8	72,8	86,5	101,5	117,8	127,8	141,8	162,0	185,0	208,0	—
Хлорэтоксиметилфенилсилан	$C_9H_{13}ClOSi$	44,8	72,3	94,6	101,3	117,8	128,0	142,6	163,5	187,7	212,0	—
2-(-2-Хлорэтокси)-этанол	$C_4H_9ClO_2$	53,0	78,3	90,7	104,1	118,4	127,5	139,5	157,2	176,5	196,0	—
Цетиламин	$C_{16}H_{35}N$	123,6	157,8	176,0	195,7	215,7	228,8	245,8	272,2	300,4	330,0	—
Цетиловый спирт	$C_{16}H_{34}O$	122,7	158,3	177,8	197,8	219,8	234,3	251,7	280,2	312,7	344,0	49,3
Циан бромистый	$BrCN$	—35,7	—18,3	—10,0	—1,0	+8,6	14,7	22,6	33,8	46,0	61,5	58,0
Циан иодистый	ICN	25,2	47,2	57,7	68,6	80,3	88,0	97,6	111,5	126,1	141,1	—
2-Циано-2-бутилацетат	$C_7H_{11}NO_2$	42,0	68,7	82,0	96,2	111,8	121,5	133,8	152,2	173,4	195,2	—
Циан фтористый	FCN	—134,4	—123,8	—118,5	—112,8	—106,4	—102,3	—97,0	—89,2	—80,5	—72,6	—
Циан хлористый	$ClCN$	—76,7	—61,4	—53,8	—46,1	—37,5	—32,1	—24,9	—14,1	—2,3	+13,1	—6,5
Циклобутан	C_4H_8	—92,0	—76,0	—67,9	—58,7	—48,4	—41,8	—32,8	—18,9	—3,4	+12,9	—50,0
Циклобутен	C_4H_6	—99,1	—83,4	—75,4	—66,6	—56,4	—50,0	—41,2	—27,8	—12,2	+2,4	—
Циклогексан	C_6H_{12}	—45,3	—25,4	—15,9	—5,0	+6,7	14,7	25,5	42,0	60,8	80,7	6,6
Циклогексанол	$C_6H_{12}O$	21,0	44,0	56,0	68,8	83,0	91,8	103,7	121,7	141,4	161,0	23,9
Циклогексанон	$C_6H_{10}O$	1,4	26,4	38,7	52,5	67,8	77,5	90,4	110,3	132,5	155,6	—45,0
Циклогексанэтанол	$C_8H_{16}O$	50,4	77,2	90,0	104,0	119,8	129,8	142,7	161,7	183,5	205,4	—
2-Циклогексил-4,6-динитрофенол	$C_{12}H_{14}N_2O_5$	132,8	161,8	175,9	191,2	206,7	216,0	229,0	248,7	269,8	291,5	—
Циклопентан	C_5H_{10}	—68,0	—49,6	—40,4	—30,1	—18,6	—11,3	—1,3	+13,8	31,0	49,3	—93,7
Циклопропан	C_3H_6	—116,8	—104,2	—97,5	—90,3	—82,3	—77,0	—70,0	—59,1	—46,9	—33,5	—126,6
Цимол	$C_{10}H_{14}$	19,0	44,6	57,6	71,5	87,0	96,8	110,1	130,0	151,8	175,0	—
Цинеол	$C_{10}H_{18}O$	15,0	40,9	54,1	68,5	84,2	94,3	108,2	128,7	151,6	176,0	1,0
Цитраксновый ангидрид	$C_5H_4O_3$	47,1	74,8	88,9	103,8	120,3	131,3	145,4	165,8	189,8	213,5	—
α-Цитраль	$C_{10}H_{16}O$	61,7	90,0	103,9	119,4	135,9	146,3	160,0	181,8	205,0	228,0Р	—
d-Цитронеллаль	$C_{10}H_{18}O$	44,0	71,4	84,8	99,8	116,1	126,2	140,1	160,0	183,8	206,5	—
Цитронеллилацетат	$C_{12}H_{22}O_2$	74,7	100,2	113,0	126,0	140,5	149,7	161,0	178,8	197,8	217,0	—
Цитронелловая кислота	$C_{10}H_{18}O_2$	99,5	127,3	141,4	155,6	171,9	182,1	195,4	214,5	236,6	257,0	—
Цитронеллол	$C_{10}H_{20}O$	66,4	93,6	107,0	121,5	137,2	147,2	159,8	179,8	201,0	221,5	—
Эвгенилацетат	$C_{12}H_{14}O_3$	101,6	132,3	148,0	164,2	183,0	194,0	209,7	232,5	257,4	282,0	29,5
Эвгенол	$C_{10}H_{12}O_2$	78,4	108,1	123,0	138,7	155,8	167,3	182,2	204,7	228,3	253,5	—
Эйкозаметилнонасилоксан	$C_{20}H_{60}O_8Si_9$	144,0	173,5	189,0	205,0	220,5	231,0	244,3	264,2	286,0	307,5	—
Элаидиновая кислота	$C_{18}H_{34}O_2$	171,3	206,7	223,5	242,3	260,8	273,0	288,0	312,4	337,0	362,0	51,5
Энантилхлорид	$C_7H_{13}ClO$	34,2	54,6	64,6	75,0	86,4	93,5	102,7	116,3	130,7	145,0	—
Энантовая кислота	$C_7H_{14}O_2$	78,0	101,3	113,2	125,6	139,5	148,5	160,0	179,5	199,6	221,5	— 10,0
Энантовый альдегид	$C_7H_{14}O$	12,0	32,7	43,0	54,0	66,3	74,0	84,0	102,0	125,5	155,0	— 42,0

Вещество	Формула	Давление пара, *мм рт. ст.*										Температура плавления, °С
		1	5	10	20	40	60	100	200	400	760	
Энантонитрил	$C_7H_{13}N$	21,0	47,8	6,16	76,3	92,6	103,0	116,8	137,7	160,0	184,6	—
Энантофенон	$C_{13}H_{18}O$	100,0	130,3	145,5	161,0	178,9	189,9	204,2	225,0	248,3	271,3	—
Эпихлоргидрин	C_3H_5ClO	— 16,5	+5,6	16,6	29,0	42,0	50,6	62,0	79,3	98,0	117,9	—25,6
1,2-Эпокси-2-метилпропан	C_4H_8O	— 69,0	— 50,0	—40,3	— 29,5	—17,3	—9,7	+1,2	17,5	36,0	55,5	—
Эруковая кислота	$C_{22}H_{42}O_2$	206,7	239,7	254,5	270,6	289,1	300,2	314,4	336,5	358,8	381,5 Р	33,5
Эстрагол	$C_{10}H_{12}O$	52,6	80,0	93,7	108,4	124,6	135,2	148,5	168,7	192,0	215,0	—
Этан	C_2H_6	—159,5	—148,5	—142,9	—136,7	—129,8	—125,4	—119,3	—110,2	—99,7	—88,6	—183,2
Этанол	C_2H_6O	— 31,3	— 12,0	—2,3	+8,0	19,0	26,0	34,9	48,4	63,5	78,4	—112
Этилакрилат	$C_5H_8O_2$	— 29,5	—8,7	+2,0	13,0	26,0	33,5	44,5	61,5	80,0	99,5	— 71,2
α-Этилакрилнитрил	C_5H_7N	— 29,0	—6,4	+5,0	17,7	31,8	40,6	53,0	71,6	92,2	114,0	—
α-Этилакриловая кислота	$C_5H_8O_2$	47,0	70,7	82,0	94,4	108,1	116,7	127,5	144,0	160,7	179,2	—
Этиламин	C_2H_7N	— 82,3	— 66,4	— 58,3	—48,6	—39,8	—33,4	— 25,1	—12,3	+2,0	16,6	—80,6
2-Этиланизол	$C_9H_{12}O$	29,7	55,9	69,0	83,1	98,8	109,0	122,3	142,1	164,2	187,1	—
3-Этиланизол	$C_9H_{12}O$	33,7	60,3	73,9	88,5	104,8	115,5	129,2	149,7	172,8	196,5	—
4-Этилаиизол	$C_9H_{12}O$	33,5	60,2	73,9	88,5	104,7	115,4	168,4	149,2	172,3	196,5	—
N-Этиланилин	$C_8H_{11}N$	38,5	66,4	80,6	96,0	113,2	123,6	137,3	156,9	180,8	204,0	— 63,5
4-Этиланилин	$C_8H_{11}N$	52,0	80,0	93,8	109,0	125,7	136,0	149,8	170,6	194,2	217,4	— 4,0
Этилацетат	$C_4H_8O_2$	— 43,4	— 23,5	—13,5	—3,0	+ 9,1	16,6	27,0	42,0	59,3	77,1	— 82,4
Этилацетоацетат	$C_6H_{10}O_3$	28,5	54,0	67,3	81,1	96,2	106,0	118,5	138,0	158,2	180,8	— 45,0
Этилбензоат	$C_9H_{10}O_2$	44,0	72,0	86,0	101,4	118,2	129,0	143,2	164,8	188,4	213,4	— 34,6
Этилбензоилацетат	$C_{11}H_{12}O_8$	107,6	136,4	150,3	165,8	181,8	191,9	205,0	223,8	244,7	265,0Р	—
Этилбензол	C_8H_{10}	— 9,8	+ 13,9	25,9	38,6	52,8	61,8	74,1	92,7	113,8	136,2	— 94,9
Этилбромид	C_2H_5Br	— 74,3	— 56,4	—47,5	— 37,8	— 26,7	—19,5	—10,0	+4,5	21,0	38,4	—117,8
Этил-α-бромизобутират	$C_6H_{11}BrO_2$	10,6	35,8	48,0	61,8	77,0	86,7	99,8	119,7	141,2	163,6	—
Этилбутират [60]	$C_6H_{12}O_2$	— 18,4	+ 4,0	15,3	27,8	41,5	50,1	62,0	79,8	100,0	121,0	— 93,3
Этилвинилдихлорсилан	$C_4H_8Cl_2Si$	—	—	15,5	28,1	42,1	51,0	63,1	81,3	102,0	123,7	—
3-Этилгексан	C_8H_{18}	— 20,0	+ 2,1	12,8	25,0	38,5	47,1	58,9	76,7	97,0	118,5	—
2-Этилгексилакрилат	$C_{11}H_{20}O_2$	50,0	77,7	91,8	106,3	123,7	134,0	147,9	168,2	192,2	216,0	—
Этилгликолат	$C_4H_8O_3$	14,3	38,8	50,5	63,9	78,1	87,6	99,8	117,8	138,0	158,2	—
2-Этилдисилазан	$C_2H_{11}NSi_2$	— 62,0	— 42,3	— 32,3	— 21,0	—8,3	—0,3	+10,4	27,0	45,9	65,9	—127,0
Этилдифениламин	$C_{14}H_{15}N$	98,3	130,2	146,0	162,8	182,0	193,7	209,8	233,0	258,8	286,0	—
Этилдихлорацетат	$C_4H_6Cl_2O_2$	9,6	34,0	46,3	59,5	74,0	83,6	96,1	115,2	135,9	156,5	—
Этилдихлорсилан [60]	$C_2H_6Cl_2Si$	—	—	— 24,4	— 12,0	+0,8	9,1	20,4	37,8	56,0	75,5	—
Этил-N, N-диэтилоксамат	$C_8H_{15}NO_3$	76,0	106,3	121,7	137,7	154,4	166,0	180,3	202,8	226,5	252,0	—
Этилен	C_2H_4	—168,3	158,3	—153,2	—147,6	—141,3	—137,3	—131,8	—123,4	—113,9	—103,7	—169,0
Этилена окись	C_2H_4O	— 89,7	— 73,8	— 65,7	— 56,6	— 46,9	— 40,7	— 32,1	— 19,5	— 4,9	+ 10,7	—111,3
1,2-Этиленгликоль	C_2H_6O	53,0	79,7	92,1	105,8	120,0	129,5	141,8	158,5	178,5	197,3	— 15,6
Этилендиамин	$C_2H_8N_2$	— 11,0	+ 10,5	21,5	33,0	45,8	53,8	62,5	81,0	99,0	117,2	8,5
Этилен-*бис*-(хлорацетат)	$C_9H_8Cl_2O_4$	112,0	142,4	158,0	173,5	191,0	201,8	215,0	237,3	259,5	283,5	—
Этиленхлоргидрин	C_2H_5ClO	—4,0	+ 19,0	30,3	42,5	56,0	64,1	75,0	91,8	110,0	128,8	— 69,0
Этилизобутират	$C_6H_{12}O_2$	—24,3	— 2,4	+8,4	20,6	33,8	42,3	53,5	71,0	90,0	110,1	— 88,2
Этилизовалерат	$C_7H_{14}O_2$	— 6,1	+ 17,0	28,7	41,3	55,2	64,0	75,9	93,8	114,0	134,3	— 99,3
Этилизокапроат	$C_8H_{16}O_2$	11,0	35,8	48,0	61,7	76,3	85,8	98,4	117,8	139,2	160,4	—
Этилизотиоцианат	C_3H_5NS	— 13,2	+ 10,6	22,8	36,1	50,8	59,8	71,9	90,0	110,1	131,0	— 5,9
Этилиодид	C_2H_5I	— 54,4	— 34,3	— 24,3	— 13,1	— 0,9	+ 7,2	18,0	34,1	52,3	72,4	—105,0
Этилкамфороновый ангидрид	$C_{11}H_{16}O_5$	118,2	149,8	165,0	181,8	199,8	211,5	226,6	248,5	272,8	298,0	—
Этилкарбанилат	$C_9H_{11}NO_2$	107,8	131,8	143,7	155,5	168,8	177,3	187,9	203,8	220,0	237,0	52,5

Вещество	Формула	Давление пара, *мм рт. ст.*										Температура плавления, °С
		1	5	10	20	40	60	100	200	400	760	
4-Этил-1,3-ксилол	$C_{10}H_{14}$	23,2	49,8	63,0	77,5	93,4	103,8	117,2	138,0	160,2	184,5	—
5-Этил-1,3-ксилол	$C_{10}H_{14}$	23,2	49,7	62,8	77,3	93,4	103,7	117,2	138,0	160,4	185,0	—
2-Этил-1,4-ксилол	$C_{10}H_{14}$	24,1	50,6	64,0	78,3	94,1	104,3	118,0	138,4	161,0	185,0	—
3-Этилкумол	$C_{11}H_{16}$	28,3	55,5	68,8	83,6	99,9	110,2	124,3	145,4	168,2	193,0	—
4-Этилкумол	$C_{11}H_{16}$	31,5	58,4	72,0	86,7	103,3	113,8	127,2	148,3	171,8	195,8	—
Этиллевулинат	$C_7H_{12}O_3$	47,3	74,0	87,3	101,8	117,7	127,6	141,3	160,2	183,0	206,2	—
Этил-*l*-лейцинат	$C_8H_{17}NO_2$	27,8	57,3	72,1	88,0	106,0	117,8	131,8	149,8	167,3	184,0	—
Этилмеркаптан	C_2H_6S	— 76,7	— 59,1	— 50,2	— 40,7	— 29,8	— 22,4	— 13,0	+ 1,5	17,7	35,0	—121,0
Этилметиловый эфир	C_3H_8O	— 91,0	— 75,6	— 67,8	— 59,1	— 49,4	— 43,3	— 34,8	— 22,0	— 7,8	+ 7,5	—
1-Этилнафталин	$C_{12}H_{12}$	70,0	101,4	116,8	133,8	152,0	164,1	180,0	204,6	230,8	258,1 Р	— 27,0
Этил-3-нитробензоат	$C_9H_9NO_4$	108,1	140,2	155,0	173,6	192,6	205,0	220,3	244,6	270,6	298,0	47,0
Этилоксилат	$C_4H_5ClO_8$	— 5,1	+ 18,0	29,9	42,0	56,0	65,2	76,6	94,5	114,7	135,0	—
3-Этилпентан	C_7H_{16}	— 37,8	— 17,0	— 6,8	+ 4,7	17,5	25,7	36,9	53,8	73,0	93,5	—118,6
Этилпропиловый эфир	$C_5H_{12}O$	— 64,3	— 45,0	— 35,0	— 24,0	— 12,0	— 4,0	+ 6,8	23,3	41,6	61,7	—
Этилпропионат	$C_5H_{10}O_2$	— 28,0	— 7,2	+ 3,4	14,3	27,2	35,1	45,2	61,7	79,8	99,1	— 72,6
Этилсалицилат	$C_8H_{10}O_3$	61,2	90,0	104,2	119,3	136,7	147,6	161,5	183,7	207,0	231,5	1,3
3-Этилстирол	$C_{10}H_{12}$	28,3	55,0	68,3	82,8	99,2	109,6	123,2	144,0	167,2	191,5 П	—
4-Этилстирол	$C_{10}H_{12}$	26,0	52,7	66,3	80,8	97,3	107,6	121,5	142,0	165,0	189,0 П	—
2-Этилтолуол	C_9H_{12}	9,4	34,8	47,6	61,2	76,4	86,0	99,0	119,0	141,4	165,1	—
3-Этилтолуол	C_9H_{12}	7,2	32,3	44,7	58,2	73,3	82,9	95,9	115,5	137,8	161,3	—104,7
4-Этилтолуол	C_9H_{12}	7,6	32,7	44,9	58,5	73,6	83,2	96,3	116,1	136,4	162,0	—
Этилтриметилолово	$C_5H_{14}Sn$	— 30,0	— 7,6	+ 3,8	16,1	30,0	38,4	50,0	67,3	87,6	108,8	—
Этилтриметилсилан	$C_5H_{14}Si$	— 60,6	— 41,4	— 31,8	— 21,0	— 9,0	— 1,2	+ 9,2	25,0	42,8	62,0	—
Этилтрифторсилан	$C_2H_5F_3Si$	— 95,4	— 81,0	— 73,7	— 65,8	— 56,8	— 51,1	— 43,6	— 32,2	— 19,1	— 5,4	—
Этилтрихлорацетат	$C_4H_5Cl_3O_2$	20,7	45,5	57,7	70,6	85,5	94,4	107,4	125,8	146,0	167,0	—
Этилтрихлорсилан [60]	$C_2H_5Cl_3Si$	—	—	— 1,6	+ 9,7	22,3	30,4	41,5	58,4	77,9	98,8	—
Этилтриэтоксисилан [63]	$C_8H_{20}O_3Si$	—	—	50,5	63,4	77,7	86,8	99,2	117,7	138,8	160,9	—
4-Этилфенетол	$C_{10}H_{14}O$	48,5	75,7	89,5	103,8	119,8	129,8	143,5	163,2	185,7	208,0	—
2-Этилфенол	$C_8H_{10}O$	46,2	73,4	87,0	101,5	117,9	127,9	141,8	161,6	184,5	207,5	— 45,0
3-Этилфенол	$C_8H_{10}O$	60,0	86,8	100,2	114,5	130,0	139,8	152,0	171,8	193,3	214,0	— 4,0
4-Этилфенол	$C_8H_{10}O$	59,3	86,5	100,2	115,0	131,3	141,7	154,2	175,0	197,4	219,0	46,5
Этилформиат	$C_3H_6O_2$	—60,5	—42,2	—33,0	—22,7	—11,5	—4,3	+5,4	20,0	37,1	54,3	—79,0
Этилфторид	C_2H_5F	—117,0	—103,8	—97,7	—90,0	—81,8	—76,4	—69,3	—58,0	—45,5	—32,0	—
Этил-2-фуроат	$C_7H_8O_3$	37,6	63,8	77,1	91,5	107,5	117,5	130,4	150,1	172,5	195,0	34,0
Этилхлорацетат	$C_4H_7ClO_2$	1,0	25,4	37,5	50,4	65,2	74,0	86,0	103,8	123,8	144,2	—26,0
Этилхлорид	C_2H_5Cl	—89,8	—73,9	—65,8	—56,8	—47,0	—40,6	—32,0	—18,6	—3,9	+12,3	—139,0
Этил-α-хлорпропионат	$C_5H_9ClO_2$	6,6	30,2	41,9	54,3	68,2	77,3	83,9	107,2	126,2	146,5	—
Этилцетиламин	$C_{18}H_{39}N$	133,2	168,2	186,0	205,5	226,5	239,8	256,8	283,3	313,0	342,0 Р	—
Этилцианацетат	$C_5H_7NO_2$	67,8	93,5	106,0	119,8	133,8	142,1	152,8	169,8	187,8	206,0	—
Этилциклогексан	C_8H_{16}	—14,5	+9,2	20,6	33,4	47,6	56,7	69,0	87,8	109,1	131,8	—111,3
Этилциклопентан	C_7H_{14}	—32,2	—10,8	—0,1	+11,7	25,0	33,4	45,0	62,4	82,3	103,4	—138,6
Этил-*транс*-циннамат	$C_{11}H_{12}O_2$	87,6	108,5	134,0	150,3	169,2	181,2	196,0	219,3	245,0	271,0	12,0
Этил-α-этилацетоацетат	$C_8H_{14}O_3$	40,5	67,3	80,2	94,6	110,3	120,6	133,8	153,2	175,6	198,0	—
Этоксидиметилфенилсилан	$C_{10}H_{16}OSi$	36,3	63,1	76,2	91,0	107,2	127,5	131,4	151,5	175,0	199,5	—
Этоксиметилдифенилсилан	$C_{15}H_{18}OSi$	109,0	138,5	152,7	168,2	186,0	196,7	211,8	234,0	256,8	282,0	—
Этокситриметилсилан	$C_5H_{14}OSi$	—50,9	—31,0	—20,7	—9,8	+3,7	11,5	22,1	38,1	56,3	75,7	—
Этокситрифенилсилан	$C_{20}H_{20}OSi$	167,0	198,2	213,5	230,0	247,0	258,3	273,5	295,0	319,5	344,0	—
Янтарный ангидрид	$C_4H_4O_3$	92,0	115,0	128,2	145,3	163,0	174,0	189,0	212,0	237,0	261,0	119,6

Температура, °С, при которой устанавливается указанное давление паров органических веществ (выше 1 *атм*) [34]

Вещество	Формула	Давление пара, *атм*									Критическая температура, °С	Критическое давление, *атм*
		1	2	5	10	20	30	40	50	60		
Анилин	C_6H_7N	184,4	212,8	254,8	292,7	342,0	375,5	400,0	422,4	—	426,0	52,4
Ацетилен	C_2H_2	—84,0	—71,6	—50,2	—32,7	—10,0	+4,8	16,8	26,8	34,8	36,0	62,0
Ацетон	C_3H_6O	56,5	78,6	113,0	144,5	181,0	205,0	214,5	—	—	235,0	47,0
Бензол	C_6H_6	80,1	103,8	142,5	178,8	221,5	249,5	272,3	290,3	—	290,5	50,1
Бромбензол	C_6H_5Br	156,2	186,2	232,5	274,5	327,0	359,8	387,5	—	—	397,0	44,6
1,3-Бутадиен	C_4H_6	—4,5	+15,3	47,0	76,0	114,0	139,8	160,0	—	—	161,8	42,6
Бутан	C_4H_{10}	—0,5	+18,8	50,0	79,5	116,0	140,6	—	—	—	152,8	36,0
Бутиловый спирт	$C_4H_{10}O$	117,5	139,8	172,5	203,0	237,0	259,0	277,0	—	—	287	48,4
втор-Бутнловый спирт	$C_4H_{10}O$	99,5	118,2	147,5	172,0	204,0	230,0	251,1	—	—	265	48,0
трет-Бутиловый спирт	$C_4H_{10}O$	82,9	102,0	130,0	154,2	184,5	207,0	222,5	—	—	235,0	49,0
Гексан	C_6H_{14}	68,7	93,0	131,7	166,6	209,4	—	—	—	—	234,8	29,6
Гептан	C_7H_{16}	98,4	124,8	165,7	202,8	247,5	—	—	—	—	266,8	26,9
Двуокись углерода	CO_2	—78,2	—69,1	—56,7	—39,5	—18,9	—5,3	+5,9	14,9	22,4	31,1	73,0
1,2-Дибромэтаи	$C_2H_4Br_2$	131,5	157,7	200,0	237,0	269,0	286,0	295,0	300,0	304,5	309,8	70,6
Диметиламин	C_2H_7N	7,4	25,0	53,9	80,0	111,7	132,2	149,8	162,6	—	164,5	52,4
2,3-Диметилбутан	C_6H_{14}	58,0	82,0	120,3	155,7	198,7	225,5	—	—	—	227,4	30,7
Диметиловый эфир	C_2H_6O	—23,7	—6,4	+20,8	45,5	75,7	96,0	112,1	125,2	—	126,9	52,0
Диметилоксалат	$C_4H_6O_4$	163,3	189,6	228,7	—	—	—	—	—	—	260,0	9,5
2,2-Диметилпропан	C_5H_{12}	9,5	29,5	61,1	90,7	127,6	152,5	—	—	—	159,0	33,0
Диметилсульфид	C_2H_6S	36,0	57,8	92,3	124,5	163,8	188,5	209,0	224,5	—	229,9	54,6
Дихлордифторметан	CCl_2F_2	—29,8	—12,2	+16,1	42,4	74,0	95,6	—	—	—	111,5	39,6
Дихлорфторметан	$CHCl_2F$	8,9	28,4	59,0	87,0	121,2	144,0	162,6	177,5	—	178,5	51,0
1,2-Дихлор-1,1,2,2-тетрафторэтан	$C_2Cl_2F_4$	3,5	22,8	54,0	82,3	117,5	140,9	—	—	—	145,7	32,3
1,1-Дихлорэтан	$C_2H_4Cl_2$	57,3	80,2	117,3	150,3	192,7	220,0	243,0	261,5	—	261,5	50,0
1,2-Дихлорэтан	$C_2H_4Cl_2$	83,7	108,1	147,8	183,5	226,5	254,0	272,0	285,0	—	288,4	53,0
цис-1,2-Дихлорэтилен	$C_2H_2Cl_2$	59,0	82,1	119,3	152,3	194,0	221,5	244,5	260,0	—	271,0	57,9
транс-1,2-Дихлорэтилен	$C_2H_2Cl_2$	47,8	69,8	104,0	135,7	174,0	199,8	220,0	236,5	—	243,3	54,5
Дициан	C_2N_2	—21,0	—4,4	+21,4	44,6	72,6	91,6	106,5	118,2	—	126,6	58,2
Диэтиламин	$C_4H_{11}N$	55,5	77,8	113,0	145,3	184,5	210,0	—	—	—	223,3	36,6
Диэтиловый эфир	$C_4H_{10}O$	34,6	56,0	90,0	122,0	159,0	183,3	—	—	—	193,8	35,5
Диэтилсульфид	$C_4H_{10}S$	88,0	112,0	153,8	190,2	234,0	263,0	—	—	—	283,8	39,1
Додекан	$C_{12}H_{26}$	214,5	248,2	300,0	345,8	—	—	—	—	—	385	17,5
Изобутиловый спирт	$C_4H_{10}O$	108,0	127,3	156,2	182,0	212,5	232,0	251,0	—	—	265	48,0
Изобутилформиат	$C_5H_{10}O_2$	98,2	121,8	157,8	192,4	234,0	261,0	—	—	—	278,0	38,0
Изомасляная кислота	$C_4H_8O_2$	154,5	179,8	217,0	250,0	289,0	315,0	336,0	—	—	336	40,0
Иодбензол	C_6H_5I	188,6	220,0	270,0	315,7	371,5	406,0	437,2	—	—	448,0	44,7
Масляная кислота	$C_4H_8O_2$	163,5	188,3	225,0	257,0	295,0	319,0	338,0	352,0	—	355	52,0
Метан	CH_4	—161,5	—152,3	—138,3	—124,8	—108,5	—96,3	—86,3	—	—	—82,1	45,8
Метанол	CH_4O	64,7	84,0	112,5	138,0	167,8	186,5	203,5	214,0	224,0	240,0	78,7
Метиламин	CH_5N	—6,3	+10,1	36,0	59,5	87,8	106,3	121,8	133,7	144,6	156,9	73,6
Метилацетат	$C_3H_6O_2$	57,8	79,5	113,1	144,2	181,0	205,0	225,0	—	—	233,7	46,3
Метилбромид	CH_3Br	3,6	23,3	54,8	84,0	121,7	147,5	170,2	190,0	—	194	51,6
2-Метилбутан	C_5H_{12}	27,8	48,8	82,8	114,5	154,0	180,3	—	—	—	187,8	32,8
Метилбутират	$C_5H_{10}O_2$	102,3	127,5	166,7	203,0	244,5	272,0	—	—	—	281,2	34,2
Метилизобутират	$C_5H_{10}O_2$	92,6	116,7	155,2	190,2	232,0	259,5	—	—	—	267,5	33,9
Метилиодид	CH_3I	42,4	65,5	101,8	138,0	176,5	206,0	228,5	248,0	—	255	54,6
Метилмеркаптан	CH_4S	6,8	26,1	55,9	83,4	117,5	140,0	157,7	172,0	185,0	196,8	71,4

Продолжение табл 12.7

Вещество	Формула	Давление пара, *атм*									Критическая температура, °С	Критическое давление, *атм*
		1	2	5	10	20	30	40	50	60		
2-Метилпропан	C_4H_{10}	—11,7	+7,5	39,0	69,3	108,7	137,5	—	—	—	134,0	37,0
Метилпропионат	$C_4H_8O_2$	79,3	103,0	139,8	172,6	212,5	239,0	—	—	—	257,4	39,3
Метилформиат	$C_2H_4O_2$	32,0	51,9	83,5	112,0	147,2	169,7	188,5	213,0	—	214,0	59,1
Метилфторид	CH_3F	—78,2	—64,5	—42,0	—21,0	+2,6	15,5	26,5	36,0	43,5	44,9	62,0
Метилхлорид	CH_3Cl	—24,0	—6,4	+22,0	47,3	77,3	97,5	113,8	126,0	137,5	143,8	65,8
Окись углерода	CO	—191,3	—183,5	—170,7	—161,0	—149,7	—141,9	—	—	—	—138,7	34,6
Октан	C_8H_{18}	125,6	152,7	196,2	235,8	281,4	—	—	—	—	296,2	24,7
Пентан	C_5H_{12}	36,1	58,0	92,4	124,7	164,3	191,3	—	—	—	197,2	33,0
Пропадиен	C_3H_4	—35,0	—18,4	+8,0	33,2	64,5	85,5	103,5	118,0	—	120,7	51,8
Пропан	C_3H_8	—42,1	—25,6	+1,4	26,9	58,1	78,7	94,8	—	—	96,8	42,0
1-Пропанол	C_3H_8O	97,8	117,0	149,0	177,0	210,8	232,3	250,0	—	—	263,7	49,9
2-Пропанол	C_3H_8O	82,5	101,3	130,2	157,0	186,0	205,0	220,2	232,0	—	235	53
Пропиламин	C_3H_9N	48,5	69,8	102,8	133,4	170,0	194,3	214,5	—	—	223,8	46,8
Пропилацетат	$C_5H_{10}O_2$	101,8	126,8	165,7	200,5	242,8	269	—	—	—	276,2	33,2
Пропилен	C_3H_6	—47,7	—31,4	—4,8	+19,8	49,5	70,0	85,0	—	—	91,4	45,4
Пропилформиат	$C_4H_8O_2$	81,8	104,3	142,0	176,4	217,5	245,0	—	—	—	264,8	39,5
Пропин	C_3H_4	—23,3	—7,1	+19,5	43,8	74,0	94,0	111,5	125,0	—	128,0	52,8
Пропионовая кислота	$C_3H_6O_2$	141,1	160,0	186,0	203,5	220,0	228,0	233,0	238,0	—	239,5	53,0
Сероуглерод	CS_2	46,5	69,1	104,8	136,3	175,5	201,5	222,8	240,0	256,0	273,0	72,9
Синильная кислота	HCN	25,8	45,5	75,5	103,5	134,2	154,0	170,2	183,5	—	183,5	50,0
Тетраметилсилан	$C_4H_{12}Si$	27,0	48,0	82,0	113,0	152,0	178,0	—	—	—	185,0	33,0
Толуол	C_7H_8	110,6	136,5	178,0	215,8	262,5	292,8	319,0	—	—	320,6	41,6
Трихлорметан	$CHCl_3$	61,3	83,9	120,0	152,3	191,8	216,5	237,5	254,0	—	260,0	54,9
1,1,2-Трихлор-1,2,2-трифторэтан	$C_2Cl_3F_3$	47,6	70,0	105,5	138,0	177,7	205,0	—	—	—	214,1	33,7
Трихлорфторметан	CCl_3F	23,7	44,1	77,3	108,2	146,7	172,0	194,0	—	—	198,0	43,2
Уксусная кислота	$C_2H_4O_2$	118,1	143,5	180,3	214,0	252,0	276,5	297,0	312,5	—	321,6	57,2
Уксусный ангидрид	$C_4H_6O_3$	139,6	162,0	194,0	221,5	253,0	272,8	288,5	—	—	296,0	46,0
Фенол	C_6H_6O	181,9	208,0	248,2	283,8	328,7	358,0	382,1	400,0	418,7	419,0	60,5
Фосген	CCl_2O	8,3	27,3	57,2	85,0	119,0	141,8	159,8	174,0	—	181,7	56,0
Фторбензол	C_6H_5F	84,7	109,9	148,5	184,4	227,6	257,0	279,3	—	—	286,5	44,7
Хлорбензол	C_6H_5Cl	132,2	160,2	205,0	245,3	292,8	324,4	349,8	—	—	359,2	44,6
Хлордифторметан	$CHClF_2$	—40,8	—24,7	+0,3	24,0	52,0	70,3	85,3	—	—	96,0	48,7
Хлортрифторметан	$CClF_3$	—81,2	—66,7	—42,7	—18,5	+12,0	34,8	52,8	—	—	53,0	40,3
1-Хлор-1,2,2-трифторэтилен	C_2ClF_3	—27,9	—11,1	+15,5	40,0	71,1	91,9	—	—	—	107,0	39,0
Циклогексан	C_6H_{12}	80,7	106,0	146,4	184,0	228,4	257,5	—	—	—	279,9	39,8
Четыреххлористый углерод	CCl_4	76,7	102,0	141,7	178,0	222,0	251,2	276,0	—	—	283,1	45,0
Этан	C_2H_6	—88,6	—75,0	—52,8	—32,0	—6,4	+10,0	23,6	—	—	32,3	48,2
Этанол	C_2H_6O	78,4	97,5	126,0	151,8	183,0	203,0	218,0	230,0	242,0	243,5	63,1
Этиламин	C_2H_7N	16,6	35,7	65,3	91,8	124,0	146,0	163,0	176,0	—	183,2	55,5
Этилацетат	$C_4H_8O_2$	77,1	100,6	136,6	169,7	209,5	235,0	—	—	—	250,1	37,9
Этилбензол	C_8H_{10}	136,2	163,5	207,5	246,3	294,5	326,5	—	—	—	346,4	38,1
Этилбромид	C_2H_5Br	38,4	60,2	95,0	126,8	164,3	188,0	206,5	220,0	229,5	230,8	61,5
Этилен	C_2H_4	—103,7	—90,8	—71,1	—52,8	—29,1	—14,2	—1,5	+8,9	—	9,6	50,7
Этилизобутират	$C_6H_{12}O_2$	110,1	135,5	174,2	210,0	253,0	280,0	—	—	—	280,0	30,0
Этилмеркаптан	C_2H_6S	35,0	56,6	90,7	121,9	159,5	184,3	204,7	220,0	—	225,5	54,2
Этилметиловый эфир	C_3H_8O	7,5	26,5	56,4	84,0	108,0	141,4	160,0	—	—	164,7	43,4
Этилпропиловый эфир	$C_5H_{12}O$	61,7	85,3	123,1	156,2	197,2	223,0	—	—	—	227,4	32,1
Этилпропионат	$C_5H_{10}O_2$	99,1	123,8	162,7	197,8	240,0	264,5	—	—	—	272,8	33,2
Этилформиат	$C_3H_6O_2$	54,3	76,0	110,5	142,2	180,0	205,0	225,0	—	—	235,3	46,8
Этилфторид	C_2H_5F	—32,0	—16,7	+7,7	30,2	57,5	75,7	90,0	—	—	102,2	49,6
Этилхлорид	C_2H_5Cl	12,3	32,5	64,0	92,6	127,3	149,5	167,0	185,0	—	187,2	52,0

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Вукалович М. П.** Термодинамические свойства воды и водяного пара. М., Машгиз, 1955.
2. **Несмеянов А. Н.** Давление пара химических элементов. М., Изд-во АН СССР, 1961.
3. **Cailletet L., Colardeau, Riviere.** Compt. rend., 1900, v. 130, p. 1585.
4. **Bernhardt F.** Phys. Z., 1926, Bd 26, S. 265.
5. **Honig R. E., Hook H. O.** R. C.A. Rev., 1960, v. 21, p. 360.
6. **Witt W. P., Barrow R. F.** Trans. Faraday Soc., 1959, v. 55, p. 730.
7. **Давление** пара фтористого алюминия.— «Ж. неорган. химии», 1959, т. 4, с. 2196 (Авт.: Евсеев А. М., Пожарская Г. В., Несмеянов А. Н., Герасимов Я. И.)
8. **Давление** насыщенного пара фтористого бериллия.— «Ж. неорган. химии», 1959, т. 4, с. 2192 (Авт.: Хандамирова Н. Э., Евсеев А. М., Пожарская Г. В. и др.)
9. **Несмеянов А. Н., Фирсов Л. П.** «Изв. АН СССР. Отд. техн. наук. Металлургия и топливо», 1959, № 3, с. 150.
10. **Shimazaki Wada.** Bull. Chem. Soc. Japan, 1956, v. 29, p. 294.
11. **Диев Н. П., Давыдов В. Н.** «Изв. вост. филиалов АН СССР», 1957, № 7, с. 60.
12. **Несмеянов А. Н., Ильичева И. А.** «Ж. физ. химии», 1958, т. 32, с. 422.
13. **Измерение** давления насыщенного пара твердых сплавов методом радиоактивных индикаторов.— «Ж. физ. химии», 1956, т. 30, с. 1250 (Авт.: Несмеянов А. Н., Иофа Б. З., Стрельников А. А., Фирсов В. Г.)
14. **Корнеева И. В., Беляев А. В., Новоселова А. В.** «Ж. неорган. химии», 1960, т. 5, с. 3.
15. **Малышев В. В.** «Теплофизика высоких температур», 1974, т. 12, с. 743.
16. **Малышев В. В.** «Теплофизика высоких температур», 1973, т. 11, с. 1010.
17. **Малышев В. В.** «Атомная энергия», 1973, т. 34, с. 42; В сб.: «Теплофизические свойства газов». М., «Наука», 1973.
18. **Несмеянов А. Н., Сазонов А. А.** «Ж. неорган. химии», 1957, т. 2, с. 1183.
19. **Несмеянов А. Н., Сазонов А. А.** «Ж. неорган. химии», 1959, т. 4, с. 230.
20. **Давление** пара фтористого лития. «Ж. неорган. химии», 1959, т. 4, с. 2189 (Авт.: Евсеев А. М., Пожарская Г. В., Несмеянов А. Н., Герасимов Я. И.)
21. **Несмеянов А. Н., Сазонов А. А.** «Ж. неорган. химии», 1959, т. 4, с. 231.
22. **Несмеянов А. Н., Белых Л. П.** «Ж. физ. химии», 1960, т. 34, с. 841.
23. **The Vapour** pressure of sodium fluoride. J. Phys. Chem., 1957, v. 61, p. 384. (Aufh.: Sense K. A., Alexander C. A., Bowman R. E. e. a.)
24. **Treadwell W. D., Werner W.** Z. angew. Math. und Phys., 1953, Bd 4, S. 459.
25. **Несмеянов А. Н., Иофа Б. З.** «Ж. неорган. химии», 1959, т. 4, с. 486.
26. **Horbe R., Knacke O.**—Z. Erzbergbau und Metallenhüttenwesen, 1959, Bd 12, S. 321.
27. **Darnell A. J., McCollum W. A., Milne T. A.** J. Phys. Chem., 1960, v. 64, p. 341.
28. **Ackermann R. J., Gilles P. W.** J. Chem. Phys., 1956, v. 25, p. 1089.
29. **Кац Дж., Рабинович Е.** Химия урана. Пер. с англ. М., Изд-во иностр. лит., 1954.
30. **Попов М. М., Костылев Ф. А., Зубова Н. В.** «Ж. неорган. химии», 1959, т. 4, с. 1708.
31. **Wang Ke-Chin.** J. Amer. Ceram. Soc., 1960, v 43, p. 509.
32. **Корнеева И. В., Соколов В. В., Новоселова А. В.** «Ж. неорган. химии», 1960, т. 5, с. 241.
33. **Авербух Б. Д., Ветренко Е. А., Чуфаров Г. И.** «Ж. прикл. химии», 1959, т. 32, с. 1221.
34. **Кэй Дж., Лэби Т.** Справочник физика-экспериментатора. Пер. с англ. М., Изд-во иностр. лит., 1949.
35. **Jarry R. L., Miller H. C.** J. Phys. Chem., 1956, v. 60, p. 1412.
36. **Ruff O., Le Boucher L.** Z. anorgan. Chem., 1934, Bd 219, S. 376.
37. **Hildenbrandt D. L.** J. Amer. Chem. Soc., 1958, v. 80, p. 4129.
38. **Fischer J., Rudzitis E.** J. Amer. Chem. Soc., 1959, v 81, p. 6375.
39. **Cubicciotti D., Keneshea F. J.** J. Phys. Chem., 1959, v. 63, p. 295.
40. **Рысс И. Г.** Химия фтора и его неорганических соединений. М., Госхимиздат, 1956.
41. **Palko A. A., Ryon A. D.** J. Phys. Chem., 1958, v. 62, p. 319.
42. **Сун Инь-Чжу, Морозов И. С.** «Ж. неорган. химии», 1959, т. 4, с. 492.
43. **Iodine** pentafluoride. Freezing and boiling point, heat of vaporisation and Vapour pressure temperature relation.— J. Amer. Chem. Soc., 1954, **v. 76**, p. 4843 (Auth.: Rogers M. T., Speirs J. L., Thompson H. B., Panish M. B.)
44. **Грачев Н. С., Кириллов П. Л.** «Инж.-физ. журн.», 1960, т. 3, с. 62.
45. **Wartenberg H., Schulz H.** Z. Elektrochemie, 1921, Bd 27, S. 568.
46. **Douglas T. B., Dever J. L.** J. Res. Nat. Bur. Standards, 1954, v. 53, p. 81.
47. **Makansi M. M., Muendel C. H.** J. Phys. Chem., 1955, v. 59, p. 40.
48. **Ситтиг М.** Натрий, его производство, свойства и применения. Пер. с англ. М., Госатомиздат, 1961.
49. **Weinstok B., Weaver E. E., Malm J. G.** J. Inorg. and Nucl. Chem., 1959, v. 11, p. 104.
50. **Wartenberg H., Bosse O.** Z. Elektrochemie, 1922, Bd 28, S. 384.
51. **West Estal D.** J. Amer. Chem. Soc., 1959, v. 81, p. 29.
52. **Hoffman C. J., Jolly W. H.** J. Phys. Chem., 1957, v. 61, p. 1574.
53. **Fairbrother F., Frith W. C.** J. Chem. Soc., 1951, Nov., p. 3051.
54. **Oliver G. D., Milton H. T., Grisard J. W.** J. Amer. Chem. Soc., 1953, v. 75, p. 2827.
55. **Hu J.-H., White D., Johnston H. L.** J. Amer. Chem. Soc., 1953, v. 75, p. 5642.
56. **Schnitzlein Q. O.** J. Phys. Chem., 1952, v. 56, p. 233.
57. **Ruff O., Clusius K.** Z. anorgan. Chem., 1930, Bd 190, S. 267.
58. **Jarry R. L.** J. Phys. Chem., 1957, v. 61, p. 498.
59. **Clegg H. P., Rowlinson J. S., Sutton J. R.** Trans. Faraday Soc., 1955, v. 51, p. 1327.
60. **Jenkins A. S., Chambers G. F.** Ind. Engng Chem., 1954, v. 46, p. 2367.
61. **3,3-dimethyl-2-thiabutane:** chemical thermodinamic properties and barriers to internal rotation.— J. Chem. Phys. 1962, v. 36, p. 406 (Auth.: Scott D. W., Good W. D., Todd S. S. e.a.)
62. **Li J. C., Pitzer K. S.** J. Amer. Chem. Soc., 1956, v. 78, p. 1077.
63. **Douglas T. B., Dever J. L.** J. Amer. Chem. Soc., 1954, v. 76, p. 4826.

ГЛАВА 13

КРИТИЧЕСКИЕ ПАРАМЕТРЫ ВЕЩЕСТВ И ВИРИАЛЬНЫЕ КОЭФФИЦИЕНТЫ

13.1. ВИРИАЛЬНЫЕ КОЭФФИЦИЕНТЫ

Термодинамическое уравнение состояния определяется как соотношение экспериментальных P, V, T-данных, выраженное в произвольной аналитической форме:

$$f(P, V, T) = 0, \qquad (13.1)$$

где P — давление; T — температура; V — мольный объем газа. Теоретическая форма изотермы уравнения состояния реального неионизованного газа имеет вид так называемого вириального разложения:

$$\frac{PV}{RT} = 1 + \frac{B(T)}{V} + \frac{C(T)}{V^2} + \frac{D(T)}{V^3} + \ldots, \qquad (13.2)$$

где R — универсальная газовая постоянная. Коэффициенты $B(T)$, $C(T)$, ... называются соответственно вторым, третьим и т. д. вириальными коэффициентами; они зависят только от температуры и полностью определяются температурой и потенциалами взаимодействия молекул газа. В частности.

$$B(T) = \frac{1}{2}\int_V \left(1 - \overline{e}^{U(r)/kT}\right) dV,$$

где $U(r)$ — бинарный межмолекулярный потенциал; k — постоянная Больцмана. Аналогичные выражения для $C(T)$, $D(T)$, ... используются как для вычисления вириальных коэффициентов при известном межмолекулярном потенциале, так и для решения обратной задачи. В табл. 13.1 приведены значения второго вириального коэффициента для некоторых газов в зависимости от температуры.

Таблица 13.1

Второй вириальный коэффициент некоторых газов

T, °K	B, см³/моль	T, °K	B, см³/моль
Ar, аргон [1]		373,2	— 6,87
84,80	—413,98	398,2	— 1,59
88,30	—381,69	423,2	2,42
92,31	—351,63	447,2	6,18
95,07	—333,50	473,2	8,28
101,41	—269,75	573,2	17,88
108,16	—266,10	673,2	26,13
133,16	—279,28	773,2	29,48
142,60	—156,10	873,2	32,34
150,66	—142,7		
163,20	—121,62	F_2 фтор [2]	
176,70	—103,30	293,2	—21
188,20	— 91,03	400	—2,0
203,20	— 77,24	500	8,0
223,2	— 62,10	600	14
239,8	— 52,10	700	18
248,2	— 47,43	800	21
273,2	— 36,69	900	23
295,0	— 27,40	1000	25
298,2	— 26,60	1200	27
323,2	— 18,55	1400	28
348,2	— 12,24		

Продолжение табл. 13.1

T, °K	B, см³/моль	T, °K	B, см³/моль
H_2, водород [2—4]		600	10,51
14	—255	700	10,32
16	—212	800	10,13
18	—181	1000	9,81
20	—156	1200	9,58
25	—114		
30	— 87	^{3}He, гелий-3 [5]	
35	— 69	0,2	—1350
40	— 56	0,4	— 672,5
45	— 50	0,6	— 446,7
50	— 38	0,8	— 333,8
55	— 30	1,0	— 266,0
60	— 24	1,2	— 220,9
65	— 19	1,4	— 188,6
300	12,1	1,6	— 164,4
400	12,3	1,8	— 145,6
500	14,4	2,0	— 130,6
600	15,0	2,2	— 118,2
700	15,7	2,4	— 108,0
800	16,4	2,6	— 99,3
900	16,7	2,8	— 91,8
1000	16,7	3,0	— 85,4
1200	16,7		
1400	16,6	Kr, криптон [2,6]	
He, гелий [2,4]		107,55	—387
14	—11,5	109,94	—365
15	—10,5	112,28	—350
16	— 8,9	115,35	—331
17	— 7,5	118,50	—315
18	— 6,2	121,47	—302
19	— 5,1	128,14	—271
20	— 4,0	132,13	—255
21	— 3,1	138,07	—237
293,2	11,5	293,2	— 54
400	10,94	400	— 23
500	10,72	500	— 7,25

T, °K	B, $см^3/моль$
600	2,56
700	9,23
800	14,01
900	17,6
1000	20,3
1200	24,2
1400	26,8

N_2, азот [2]

298,2	—4,85
400	9,31
500	17,05
600	21,84
700	25,03
800	27,26
900	28,9
1000	30
1200	31,5
1400	32,6

Ne, неон [2]

293,2	13,02
400	12,47
500	13,19
600	13,62
700	13,77
800	13,87
900	13,91
1000	13,88
1200	13,75
1400	13,61

O_2, кислород [2]

293,2	—17
400	0,03
500	8,5
600	13,9
700	17,5
800	20
900	22
1000	23
1200	25
1400	26

O_3, озон [2]

293,2	—107
500	— 28
900	14

Xe, ксенон [2]

298,15	—130,8
400	— 71
500	— 39
600	— 20
700	— 6,9
800	2,6
900	9,7
1000	15,3
1200	23
1400	28,5

BCl_3, треххлористый бор [2]

293,2	—398
400	—231
500	—152
600	—105
700	— 72
800	— 49
900	— 31
1000	— 18
1200	1,4
1400	4,6

BF_3, трехфтористый бор [2]

298,2	—89,8
400	—42,6
500	—17,1
600	— 1,1
700	9,8
800	17,7
900	23,6
1000	28
1200	34
1400	39

C_2N_2, дициан [2]

298,2	—367
400	—172
500	— 66
600	— 0,8
700	44
800	77
900	101,4
1000	120
1200	146,6
1400	164

Продолжение табл. 13.1

T, °K	B, $см^3/моль$
1000	16,0
1200	17,8
1400	18,8

N_2O, закись азота [2,7]

273,2	—161
298,2	—133
398,2	— 68,4
600	— 9,9
700	0,4
800	7,9
900	13,4
1000	17,7
1200	23,8
1400	27,9

SF_6, шестифтористая сера [2]

298,2	—281
400	—139
500	— 64
600	— 16
700	16,4
800	40
900	57
1000	70
1200	90
1400	102

SO_2, двуокись серы [2]

298,2	—524
400	—339
500	—123
600	— 85
700	— 61
800	— 46
900	— 33
1000	— 27
1200	— 15
1400	— 8

SiF_4, четырехфтористый кремний [2]

298,2	—137
400	— 50
500	— 3
600	26,5
700	47
800	61
900	72
1000	80
1200	92
1400	100

CO, окись углерода [2]

298,2	—8,88
400	7,64
500	16,57
600	22,14
700	25,85
800	28,49
900	30,39
1000	31,80
1200	33,48
1400	34,76

CO_2, двуокись углерода [2]

298,2	—94
400	—49
500	—25
600	— 9,9
700	0,4
800	7,9
900	13,4
1000	17,7
1200	23,8
1400	27,9

H_2O, вода (пар) [2]

400	—332
500	—163
600	— 98
700	— 66
800	— 47
900	— 35
1000	— 26
1200	— 15
1400	— 8

NH_3, аммиак [2]

298,2	—285
400	—120
500	— 68
600	— 46
700	— 30
800	— 21
900	— 15
1000	— 10
1200	— 4,2
1400	— 0,38

NO, окись азота [2]

298,2	—17,3
400	— 4,0
500	3,4
600	7,9
700	11,0
800	13,2
900	14,8

Продолжение табл. 13.1

T, °K	B, см³/моль
CH_4, метан [2]	
298,2	—367
400	—172
500	— 66
600	— 0,8
700	45
800	77
900	101
1000	120
1200	147
1400	164
C_2H_4, этен (этилен) [2]	
298,2	—140
400	— 72
500	— 36
600	— 13
700	2,5
800	14
900	22
1000	29
1200	38
1400	44
C_2H_2, этин (ацетилен) [2]	
298,2	—157
400	— 87
500	— 51
600	— 28
700	— 12
800	— 1,0
900	7
1000	14
1200	23
1400	19
C_3H_8, пропан [8]	
295,4	—399
306,5	—369
317,6	—339
327,6	—324
337,8	—299
347,9	—274
357,9	—265
368,2	—244
377,7	—229
388,5	—213
400,1	—201
412,9	—182
C_4H_{10}, бутан [8]	
296,4	—720
307,5	—667
318,2	—619
328,9	—568
337,8	—533
348,4	—501
358,4	—466
368,4	—440
377,9	—410
387,6	—383
400,4	—353
413,4	—322
C_5H_{12}, пентан [8]	
298,2	—1194
306,1	—1117
318,1	—1011
329,0	— 923
339,0	— 863
349,0	— 800
358,0	— 758
368,0	— 701
378,9	— 652
388,4	— 612
401,0	— 578
413,6	— 517
C_6H_{14}, гексан [8]	
313,5	—1676
318,1	—1637
324,0	—1496
332,1	—1419
338,5	—1326
339,9	—1310
342,4	—1289
347,3	—1239
354,0	—1194
360,2	—1147
368,0	—1075
378,4	— 981
387,2	— 913
398,3	— 895
413,1	— 771
C_7H_{16}, гептан [8]	
349,4	—1819
358,3	—1691
368,5	—1560
378,1	—1446
384,1	—1325
400,8	—1212
413,7	—1108
C_8H_8, октан [8]	
373,0	—2122
378,2	—2048
383,2	—1939
384,1	—1869
388,2	—1829
393,5	—1778
403,5	—1641
413,5	—1518
$C_2H_4O_2$, метилформиат [9]	
319,2	—840
326,7	—760
333,2	—710
342,3	—660
348,2	—640
351,3	—610
366,2	—550
378,0	—500
386,3	—470
396,7	—440

Продолжение табл. 13.1

T, °K	B, см³/моль
$C_3H_6O_2$, метилацетат [9]	
323,2	—1240
328,4	—1210
335,8	—1150
338,2	—1080
345,5	—1000
353,2	— 960
359,8	— 890
368,2	— 850
374,3	— 820
378,8	— 810
383,6	— 785
391,0	— 740
$C_3H_6O_2$, этилформиат [9]	
323,0	—1090
329,8	—1000
333,2	— 960
337,7	— 930
340,7	— 875
348,3	— 830
368,2	— 730
382,0	— 650
388,2	— 625
394,8	— 590
$C_4H_8O_2$, этилацетат [9]	
330,2	—1550
333,5	—1490
336,8	—1470
343,2	—1300
348,2	—1260
353,2	—1240
358,6	—1160
368,2	—1080
375,1	—1040
383,6	— 950
390,2	— 930
398,7	— 875
$C_4H_8O_2$, пропилформиат [9]	
228,6	—1530
333,2	—1440
337,6	—1390
342,3	—1370
347,4	—1270
351,4	—1190
361,1	—1140
367,2	—1060
377,1	— 960
385,0	— 900
397,1	— 860
400,1	— 845
$C_4H_8O_2$, метилпропионат [9]	
228,6	—1610
333,2	—1540
339,6	—1455
347,0	—1340

Продолжение табл. 13.1

T, °K	B, $см^3/моль$
352,4	—1310
353,2	—1240
360,8	—1230
368,2	—1110
381,7	—1070
387,4	— 940
398,9	— 905
CF_4, четырехфтористый углерод (фреон-14) [2, 10]	
273,2	—111
298	— 88,3
303	— 84
323	— 70
348	— 56
373	— 43,5
398	— 33,2
423	— 24,4
448	— 16,8
473	— 10,1
498	— 4,25
523	1,0
548	5,6
573	9,80
593	13,6
623	17,05
700	26,03
800	34,9
900	41,5
1000	46,5
1200	53,6
1400	58,2

T °K	B, $см^3/моль$
CF_2Cl_2, дифтордихлорметан (фреон-12) [2]	
298,2	—449
400	—264
500	—167,5
600	—108
700	— 69
800	— 40
900	— 18,4
1000	— 1,6
1200	22,1
1400	38,5
$CHFCl_2$, фтордихлорметан (фреон-21) [2]	
298,2	—562,3
400	—335
500	—223
600	—156
700	—111
800	— 79
900	— 55,2
1000	— 36,8
1200	— 10,4
1400	— 7,5
$CHCl_3$, хлороформ [2]	
298,2	—1354
400	— 581
500	— 348
600	—241
700	—181
800	—142

Продолжение табл. 13.1

T, °K	B, $см^3/моль$
900	—116
1000	— 96
1200	— 69,8
1400	— 52,5
CH_3Cl, метил хлористый (фреон-40) [2]	
298,2	—420
400	—208
500	—128
600	— 86
700	— 44
800	— 31,6
1000	— 10
1200	— 1,8
1400	3,9
50% H_2—50% He [11]	
14	—38
15	—33
16	—28
17	—25
18	—22
19	—19
20	—17
21	—15
50% Ar—50% Kr [6]	
108	—236
111	—225
115	—208
119	—198
124	—186
50% CO_2—50% He [11]	
303,2	21,6
333,2	24,6
363,2	22,6
50% CO_2—50% Ar [11]	
303,2	—31,8
333,2	—25,8
363,2	—19,6

13.2. ПАРАМЕТРЫ КРИТИЧЕСКОЙ ТОЧКИ ПЕРЕХОДА ЖИДКОСТЬ — ПАР

Уравнение состояния (13.1) имеет единственную точку с параметрами $P_{кр}$, $T_{кр}$, $V_{кр}$, определяемую из условий

$$(\partial P/\partial V)_{кр} = (\partial^2 P/\partial V^2)_{кр} = 0.$$

Эта точка называется критической, а параметры — соответственно критическим давлением, критической температурой и критическим объемом. Критическая точка является одним из концов линии перехода жидкость — пар: при температурах выше критической переход жидкость — пар осуществляется без скачка плотности. Критическая точка характеризуется исчезновением мениска в капилляре, обращением в нуль теплоты испарения и обращением в бесконечность сжимаемости $(dV/dP)_T$. Критические параметры веществ приведены в табл. 13.2.

Помимо вириального разложения (13.2) для аппроксимации экспериментальных данных часто используют уравнение состояния Ван-дер-Ваальса:

$$\left(P + \frac{a}{V^2}\right)(V - b) = RT,$$

коэффициенты которого связаны с параметрами критической точки:

$$a = (27/8)\, RT_{кр}b, \quad b = RT_{кр}/8P_{кр}.$$

Коэффициент b приблизительно равен учетверенному собственному объему молекул газа. За некоторыми исключениями (водород в органических соединениях и т. п.), для коэффициентов Ван-дер-Ваальса справедливы отношения аддитивности:

$$\sqrt{a_A} + \sqrt{a_B} = \sqrt{a_{AB}}; \quad b_A + b_B = b_{AB},$$

где a_A и b_A — коэффициенты Ван-дер-Ваальса для газа, состоящего из молекул типа A; a_B и b_B — коэффициенты для газа, состоящего из молекул типа B; a_{AB} и b_{AB} — коэффициенты для смеси этих газов.

Таблица 13.2

Критические параметры и коэффициенты Ван-дер-Ваальса некоторых газов и смесей

Формула	Название	$P_{кр}$, *атм*	$T_{кр}$, °К	Критическая плотность $\rho_{кр}$, *г/см³*	$V_{кр}$, *см³/моль*	Литература	a, $\frac{н \cdot м^4}{моль^2}$	b, *см³/моль*
	Элемеиты							
Ar	Аргон	48,0	150,71	0,531	75,2	[2, 12]	0,1344	32,213
Br_2	Бром	102	584,15	1,18	135	[2, 13]	0,8947	58,758
Cl_2	Хлор	76,1	417,15	0,573	124	[2, 12, 13]	0,6497	56,241
Cs	Цезий	145	2057±40	—	311	[14]	—	—
F_2	Фтор	55	144	—	—	[13]	0,1071	26,861
H_2	Водород равновесный	12,8	33	0,032	61,8	[15]	0,0242	26,451
	» нормальный	12,797	33,244	0,031	64,99	[2, 13]	0,0245	26,653
	Параводород	12,759	32,976	—	—	[13]	0,0242	26,517
D_2	Дейтерий равновесный	16,3	38,4	—	—	[2]	0,0257	24,170
	» нормальный	16,432	38,35	0,067	60,3	[2, 13]	0,0254	23,946
DH	Дейтеро-водород	14,645	35,908	0,048	62,8	[2, 13]	0,0250	25,1562
T_2	Тритнй нормальный	20,8	43,7	0,112	53,7	[2, 13]	0,0261	21,556
HT	Водород-тритий	16,4	38,3	—	60,3	[2]	0,0254	23,961
DT	Дейтеро-тритий	17,3	39,5	0,085	58,5	[2, 13]	0,0233	21,290
He	Гелий	2,26	5,20	0,0639	57,8	[2, 13, 15]	0,00338	23,606
^3He	Гелий-3	1,17	3,35	—	—	[13]	0,00272	29,376
Hg	Ртуть	1640±50	1460±20	5 (4,2)	48	[2, 10, 17]	—	—
I	Иод	—	826	—	—	[16]	—	—
K	Калий	160	2228±330	—	209	[2]	—	—
Kr	Криптон	54,27	209,38	0,908	92,2	[2, 12, 13]	0,2295	39,584
Li	Литий	680	3200±600	—	66	[14]	—	—
Na	Натрий	350	2570±350	—	116	[14]	—	—
N_2	Азот	33,54	126,25	0,311	90,1	[2, 16]	0,1350	38,620
Ne	Неон	26,86	44,43	0,484	41,7	[2, 12, 13]	0,2088	16,971
O_2	Кислород	50,14	154,78	0,41	78	[13, 16]	0,1358	31,671
O_3	Озон	54,6	261,05	0,54	89,4	[2, 13, 15]	0,3546	49,054
P	Фосфор	824	968	—	—	[2, 13]	0,3231	12,053
Rb	Рубидий	157	2093±35	—	247	[14]	—	—
Rn	Радои	62,43	377,5	—	—	[13]	0,6485	62,038
S	Сера	116,0	1313	0,403	80	[2]	0,4051	111,421
Xe	Ксенон	57,64	289,74	1,155	119,5	[2, 12]	0,4365	54,405
	Неорганические соединения							
BBr_3	Трехбромистый бор	—	573,2	0,90	278	[18]	—	—
BCl_3	Трехххлористый бор	38,2	452	0,79	148	[2]	1,5196	121,399
BF_3	Трехфторнстый бор	49,2	260,9	—	—	[2]	0,3931	54,406
B_2H_6	Дибораи	39,52	289,65	0,166	167	[2, 19]	0,6032	75,197
CO	Окись углерода	34,529	132,91	0,301	93,06	[2, 16]	0,14536	39,492
CO_2	Двуокись углерода	72,85	304,19	0,468	94,04	[2, 16]	0,36088	42,840
COS	Сероокись углерода	62	375,4	—	—	[2]	0,6458	62,122
CS_2	Сероуглерод	78	552	0,44	170	[2, 16]	1,1099	72,608
C_2N_2	Дициан	59	400	—	—	[2]	0,7705	69,558
$FClO_3$	Перхлорилфторид	53,0	368,32	—	—	[2]	0,7272	71,300
F_2O	Окись фтора	48,9	215,15	0,562	97,6	[2, 13]	0,26896	45,140
$GeCl_4$	Четыреххлористый германиий	38,0	550	—	—	[18]	2,2618	148,498
HBr	Бромистый водород	84,0	362,95	0,825	98	[2, 12, 13]	0,4456	44,331
HCl	Хлористый водород	81,5	324,55	0,42	48	[2, 12, 13]	0,3672	40,857
HCN	Цианистый водород	53,5	456,65	0,195	138,6	[2]	1,1074	87,573
HF	Фтористый водород	55	144	0,29	69	[2, 13]	0,10712	26,861
HI	Иодистый водород	80	423	1,09	117	[2, 13]	0,6355	54,249
H_2O	Вода	218,39	647,3	0,32	56	[2, 13, 16]	0,5451	30,410
D_2O	Окись дейтерия (тяжелая вода)	215,70	644,05	0,338	54,8	[2, 13, 19]	0,5464	30,634
H_2O_2	Перекись водорода	214	730	—	—	[2]	0,7075	34,998
H_2S	Сероводород	88,9	373,6	0,349	97,7	[2, 12, 16]	0,4461	43,116
H_2Se	Селенистый водород	91,0	410,2	—	—	[18]	0,5251	46,225
NF_3	Трехфтористый азот	44,72	233,9	—	—	[2]	0,3473	53,623
NH_3	Аммиак	111,3	405,5	0,235	72,48	[2, 12]	0,4197	37,380
NO	Окись азота	64	180	0,52	58	[2, 12]	0,14384	28,856
NOCl	Хлористый нитрозил	92,4	438,2	—	—	[18]	0,5898	48,603

Формула	Название	$P_{кр}$, *атм*	$T_{кр}$, °К	Критическая плотность $\rho_{кр}$, *г/см³*	$V_{кр}$, *см³/моль*	Литература	a, $\frac{н \cdot м^4}{моль^2}$	b, *см³/моль*
NO_2	Перекись азота	100	413	0,56	82	[2, 15]	0,4846	42,373
N_2H_4	Гидразин	145	653	—	—	[2]	0,8355	46,204
N_2O	Закись азота	71,7	309,7	0,457	96,3	[2, 16]	0,3801	44,316
N_2O_4	Двуокись азота	99	431,2	0,56	164	[18]	0,5336	44,687
PF_3	Трехфтористый фосфор	42,69	271,1	—	—	[2]	0,4891	65,154
PH_3	Фосфористый водород	64,5	324,4	0,30	113,5	[18]	0,4635	51,601
PH_4Cl	Хлористый фосфоний	72,7	322,2	—	—	[18]	0,4057	45,471
SF_4	Четырехфтористая сера	—	347	—	—	[2]	—	—
SF_6	Шестифтористая сера	37,113	318,7	0,751	194,3	[2]	0,7776	88,103
SO_2	Двуокись серы	77,8	430,7	0,524	122	[2]	0,6775	56,798
SO_3	Трехокись серы	83,8	491,4	0,633	126	[2]	0,8187	60,163
SbI_3	Трехиодистая сурьма	2,3	718,2	—	—	[18]	0,6372	32,036
SeF_4	Четырехфтористый селен	—	563	—	—	[18]	—	—
$SiCl_4$	Четыреххлористый кремний	37,1	506,8	—	—	[2, 18]	1,9670	140,153
$SiCl_3F$	Фтортрихлорсилан	35,3	438,4	—	—	[18]	1,5470	127,420
$SiCl_2F_2$	Дифтордихлорсилан	34,5	369,0	—	—	[18]	1,1214	109,736
SiF_3Cl	Трифторхлорсилан	34,2	308	—	—	[18]	0,7881	92,399
SiF_4	Четырехфтористый кремний	36,6	259,0	—	—	[2]	0,5207	72,594
SiH_4	Силан	47,8	269,6	—	—	[15, 18]	0,4320	57,867
$SnCl_4$	Четыреххлористое олово	37,0	591,8	0,742	351	[18]	2,6875	163,983
UF_6	Шестнфтористый уран	45,5	503	1,39	—	[18]	1,5799	113,422
	Органические соединения							
	I. Углеводороды							
CH_4	Метан	45,8	190,7	0,162	99	[15, 18, 20, 21]	0,2256	42,719
C_2H_6	Этан	48,8	305,3	0,203	148	[15, 16, 20, 21]	0,5427	64,187
C_2H_4	Этен (этилен)	50,5	282	0,227	124	[15, 16]	0,4474	57,292
C_2H_2	Этин (ацетилен)	61,6	309	0,230	113	[15]	0,4403	51,454
C_3H_8	Пропан	42,0	368,8	0,225	200	[15, 18, 19, 20]	0,9200	90,081
C_3H_6	Пропен (пропилен)	45,6	365	0,233	181	[15, 18]	0,8301	82,123
C_3H_6	Циклопропан	54,2	397,1	—	—	[18]	0,8265	75,159
C_3H_4	Пропин (аллилен)	52,8	401	—	—	[19]	0,8653	77,920
C_3H_4	Пропадиен		393	—	—	[15]	—	—
C_4H_{10}	Бутан	37,5	426,2	0,228	255	[15, 18, 20]	1,3763	116,607
C_4H_{10}	Изобутан	36,0	408,1	0,221	263	[15, 18]	1,3143	116,297
C_4H_8	1-Бутен	39,7	419,6	0,234	240	[15]	1,2601	108,439
C_4H_8	2-Бутен	41	430	0,238	236	[15, 18]	1,2814	107,604
C_4H_8	2-Метилпропен	39,5	417,9	0,235	239	[15, 18]	1,2562	108,547
C_4H_6	1,3-Бутадиен (дивинил)	42,7	425	0,245	221	[15, 18]	1,2019	102,118
C_4H_6	1-Бутин (этилацетилен)	—	463,7	—	—	[15]	—	—
C_4H_6	2-Бутин (диметилацетилен)	—	488,7	—	—	[15]	—	—
C_5H_{12}	Пентан	33,3	470,4	0,232	311	[15, 18, 20]	1,8880	144,932
C_5H_{12}	2-Метилбутан	32,9	461,0	0,234	308	[15, 19]	1,8354	143,763
C_5H_{12}	2,2-Диметилпропан (неопентан)	31,6	433,8	0,238	303	[15, 19]	1,6920	140,846
C_5H_{10}	1-Пентен	40	474	—	—	[15]	1,5958	121,570
C_5H_{10}	2-Пентен	40,4	475,6	—	—	[15]	1,5907	120,771
C_5H_{10}	Изоамилен	33,9	464,8	—	—	[15]	1,8107	140,672
C_5H_{10}	2-Метил-2-бутен	34	470	—	—	[15]	1,8458	141,817
C_5H_{10}	Циклопентен	44,6	511,8	0,270	260	[15, 18]	1,8349	117,735
C_5H_{10}	Циклопентан	44,9	504	0,277	251	[18]	1,6074	115,166
C_5H_8	Пропилацетилен	—	493,5	—	—	[15]	—	—
C_6H_{14}	Гексан	29,9	508,0	0,234	368	[15, 18, 20]	2,4523	174,315
C_6H_{12}	Циклогексан	40,0	553	0,273	308	[15]	2,1722	141,843
C_6H_6	Бензол	48,6	562	0,304	260	[15, 19]	1,8465	118,642
C_7H_{16}	Гептан	27,01	540,2	0,235	426	[15, 18, 20]	3,0697	205,197
C_7H_8	Толуол	41,6	594	0,29	320	[15, 18]	2,4097	146,489

Формула	Название	$P_{кр}$, *атм*	$T_{кр}$, °К	Критическая плотность $\rho_{кр}$, *г/см³*	$V_{кр}$, *см³/моль*	Литература	a, $\frac{н \cdot м^4}{моль^2}$	b, *см³/моль*
C_8H_{18}	Октан	24,6	569,4	0,233	490	[15, 18, 20]	3,7445	237,468
C_8H_{10}	*о*-Ксилол	36,9	631,6	0,28	379	[15, 18]	3,0715	175,603
C_9H_{20}	Нонан	22,86	595,4	0,236	543	[18, 20, 22]	2,7513	267,223
$C_{10}H_{22}$	Декан	21,24	619,3	0,236	602	[18, 20, 22]	5,1292	299,071
$C_{10}H_8$	Нафталин	39,3	742	0,314	408	[18]	3,9804	193,711
$C_{11}H_{24}$	Ундекан	19,32	642,6	0,237	659	[18, 20, 22]	6,0728	341,252
$C_{12}H_{26}$	Додекан	18,59	663,8	0,237	718	[18, 20, 22]	6,7346	366,352
$C_{12}H_{10}$	Дифенил	43	803,1	0,343	449	[19]	4,2615	191,611
$C_{13}H_{28}$	Тридекан	17,55	683,2	0,24	767	[18, 20, 22]	7,5567	399,404
$C_{14}H_{30}$	Тетрадекан	16,56	695	0,24	826	[18, 22]	8,2875	430,593
$C_{15}H_{32}$	Пентадекан	15,75	710,6	0,24	888	[18, 22]	9,1093	462,900
$C_{16}H_{34}$	Гексадекан	14	725,3	0,24	942	[18, 19]	10,6761	531,525
$C_{17}H_{36}$	Гептадекан	13	735,0	0,24	1001	[18, 19]	11,8070	580,068
$C_{18}H_{38}$	Октадекан	13	753,2	0,24	1059	[18]	12,4052	594,732
$C_{19}H_{40}$	Нонадекан	12	760	0,24	1118	[18]	13,6759	649,783
$C_{20}H_{42}$	Эйкозан	11	775	0,24	1176	[18]	15,5139	722,846
II. Кислородсодержащие соединения								
CCl_2O	Фосген	56	445	0,52	190	[2]	1,0046	81,519
CH_4O	Метиловый спирт (метаиол)	78,5	513,2	0,272	118	[15]	0,9532	67,074
C_2H_6O	Этиловый спирт (этаиол)	63,0	516	0,276	167	[15]	1,2008	84,033
C_2H_6O	Диметиловый эфир	53	400,1	0,242	190	[15, 18]	0,8582	77,452
$C_2H_6O_2$	Этилгликоль	—	798	—	—	[23]	—	—
C_2H_4O	Ацетальдегид	—	461	—	—	[18]	—	—
C_2H_4O	Окись этилена	50,7	468	0,36	122	[18]	1,2273	94,696
$C_2H_4O_2$	Уксусиая кислота	57,1	594,8	0,351	171	[15, 18]	1,7603	106,865
$C_2H_4O_2$	Метилформиат	59,2	487,2	0,349	172	[15, 18]	1,1392	84,836
C_3H_8O	Пропиловый спирт (пропанол)	50,2	537	0,273	220	[15]	1,6320	109,742
C_3H_8O	Изопропиловый спирт (изопропаиол)	53	508,8	0,274	219	[15]	1,3877	98,485
C_3H_8O	Метилэтиловый эфир	43,4	437,9	0,272	221	[15, 18]	1,0077	83,098
C_3H_6O	Ацетон	46,6	508,7	0,273	213	[15, 18]	1,5776	111,990
$C_3H_6O_2$	Пропионовая кислота	53	612	0,32	230	[15, 18]	2,0077	118,462
$C_3H_6O_2$	Метилацетат	46,3	506,9	0,325	228	[15, 18]	1,5766	112,316
$C_3H_6O_2$	Этилформиат	46,8	508,5	0,323	229	[15, 18]	1,5697	111,467
$C_4H_{10}O$	Бутиловый спирт (бутанол)	50,6	561	—	—	[15, 19]	1,7670	113,740
$C_4H_{10}O$	Изобутиловый спирт (изобутаиол)	48,0	538	—	—	[18]	1,7132	114,986
$C_4H_{10}O$	Диэтиловый эфир	35,6	467	0,265	281	[15, 18, 19]	1,7405	134,578
C_4H_8O	Метилэтилкетон	39,5	533	0,25	290	[15, 18]	2,0435	138,443
$C_4H_8O_2$	Масляная кислота	52	628	0,304	290	[15, 18]	2,1548	123,898
$C_4H_8O_2$	Изомасляная кислота	40	609	0,302	292	[15, 18]	2,6344	156,207
$C_4H_8O_2$	Пропилформиат	40,1	538,1	0,309	285	[15, 18]	2,0514	137,666
$C_4H_8O_2$	Метилпропионат	39,3	530,5	0,312	282	[18]	2,0345	138,485
$C_4H_8O_2$	1,4-Диоксан	50,7	585	0,36	240	[15]	1,9176	118,372
$C_4H_6O_3$	Уксусный ангидрид	46,2	569	—	—	[15, 18]	1,9911	126,361
$C_4H_6O_4$	Диметилоксалат	9,5	533	—	—	[18]	8,4966	575,632
$C_5H_{12}O$	Этилпропиловый эфир	32,1	500,6	0,260	339	[15, 18]	2,2182	160,003
C_6H_6O	Фенол	60,5	692,4	—	—	[15]	2,2600	117,420
C_7H_8O	*м*-Креозол	45,0	705	0,35	310	[15]	3,1380	160,727
C_7H_8O	Метилфеиоловый спирт (аиизол)	41,3	642	—	—	[18]	2,7644	155,497
$C_8H_{10}O$	Фенетол	33,8	647	—	—	[18]	3,5189	196,395
$C_{12}H_{10}O$	Дифениловый эфир	35,2	769	—	—	[19]	4,7731	224,133
III. Галогензамещенные углеводороды								
CF_4	Углерод четырехфтористый (фреои-14)	38,13	227	0,633	136	[2, 24]	0,386	61,268

Формула	Название	$P_{кр}$, *атм*	$T_{кр}$, °К	Критическая плотность $\rho_{кр}$, *г/см³*	$V_{кр}$, *см³/моль*	Литература	a, $\frac{н\cdot м^4}{моль^2}$	b, *см³/моль*
CF_3Cl	Трифторхлорметан (фреон-13)	39,36	301,9	0,580	218	[2, 24]	0,658	78,695
CF_2Cl_2	Дифтордихлорметан (фреон-12)	39,6	384,6	0,555	218	[15, 24]	1,061	99,645
$CFCl_3$	Фтортрихлорметан (фреон-11)	43,2	471,2	0,554	248	[15, 24]	1,460	111,899
CCl_4	Углерод четыреххлористый	45	556,4	0,558	257	[2, 18]	1,955	126,847
CF_2Br_2	Дифтордибромметан (фреон-12B2)	41,68	464	—	—	[2, 24]	1,468	114,217
CF_3Br	Трифторбромметан (фреон-13B1)	44,29	340	—	—	[24]	0,742	78,761
CF_2ClBr	Дифторхлорбромметан (фреон-12B1)	42,53	428	—	—	[24]	1,224	103,249
CHF_3	Трифторметан (фреон-23)	48,4	288,2	0,516	136	[24]	0,488	61,093
CHF_2Cl	Дифторхлорметан (фреон-22)	50,33	369,2	0,525	165	[24]	0,770	75,261
$CHFCl_2$	Фтордихлорметан (фреон-21)	52,7	451,6	0,522	197	[24]	1,099	87,919
$CHCl_3$	Хлороформ	54	536,6	0,50	240	[2, 18]	1,515	101,942
CH_2F_2	Дифторметан	—	356	—	—	[2]	—	—
CH_2Cl_2	Дихлорметан	60	510	—	—	[2]	1,2317	87,209
CH_2Br_2	Дибромметан	70,6	583	0,525	165	[15]	1,3679	84,732
CH_3F	Фтористый метил	58,0	317,8	0,300	113	[2, 18]	0,4948	56,217
CH_3Cl	Хлористый метил (фреон-40)	65,9	416	0,353	143	[2, 16]	0,7461	64,766
C_2F_4	Тетрафторэтилен	38,9	306,45	0,578	173	[2]	0,6861	80,825
$C_2H_2F_2$	1,1-Дифторэтилен	40,7	303,2	0,435	147	[18]	0,6418	76,432
C_2F_5Br	Пентафторхлорэтан (фреон-115)	31	353	—	—	[24]	1,6539	116,923
$C_2F_4Cl_2$	Тетрафтор-1,1-дихлорэтан (фреон-114)	32,6	418,6	0,582	276	[2]	1,5271	131,736
$C_2F_3Cl_3$	Трифтортрихлорэтан (фреон-113)	34,65	487,0	0,576	325	[24]	1,9448	144,201
$C_2H_4F_2$	1,1-Дифторэтан	44,4	386,6	0,365	181	[18]	0,9564	89,335
$C_2H_4Cl_2$	1,2-Дихлорэтан	53	561	0,44	220	[15]	1,6872	108,600
$C_2H_3F_2Cl$	1,1-Дифтор-1-хлорэтан (фреон-142)	40,7	410,2	0,435	231	[18]	1,1746	103,395
$C_2H_3F_3$	1,1,1-Трифторэтан (фреон-143)	42	346,2	0,434	194	[24]	0,8108	84,570
$C_3H_6Cl_2$	Гексафтордихлорпропан (фреон-216)	28,9	449	0,62	356	[24]	1,9820	159,401
C_4F_{10}	Перфторбутан (фреон-31-10)	24,75	386	0,63	378	[24]	1,7105	160,012
C_4F_8	Октафторциклобутан (фреон-ФС-318)	28,6	388,6	—	—	[19]	1,5002	139,405
C_6H_5F	Фторбензол	44,6	559,8	0,354	271	[15]	1,9964	128,777
C_6H_5Cl	Хлорбензол	46,1	632,4	0,365	208	[15, 19]	2,4649	140,745
$C_6H_3Cl_3$	1,2,4-Трихлорбензол	39,3	735,0	0,472	384	[18]	3,9057	191,883
$C_6H_4Cl_2$	*о*-Дихлорбензол	40,5	697	0,408	360	[18]	3,4082	176,571
C_6F_{12}	Перфторметилциклогексан	24	486,6	—	—	[15]	2,8032	208,019
$C_7H_5F_3$	Бензотрифторид	35,1	562,6	0,427	342	[18]	2,5620	164,440
C_7F_{16}	Перфторгептан	16,0	474,8	0,584	664	[15]	4,0033	304,462
IV. Азот- и серосодержащие углеводороды								
CH_5N	Метиламии	73,6	430,1	0,223	254	[15]	0,7141	59,956
$C_4H_{11}N$	Диэтиламин	36,6	496	0,246	297	[15, 18]	1,9098	139,041
C_6H_7N	Анилин	52,4	698,8	0,314	274	[15, 18]	2,6478	136,824
CH_4S	Метилмеркаптан	71,4	470,0	0,323	149	[18]	0,8790	67,537
C_4H_4S	Тиофен	48	590	0,34	247	[18]	2,0605	126,110
	Смеси							
	Воздух	37,2	413,8	0,35	—	[12]	1,3078	114,127
	Даутерм (42%-дибензил; 58%-нафталин)	—	801	—	—	[23]	—	—
	Даутерм (73,5%-дифениловый эфир; 26,5%-дифенил)	41	801	—	—	[19]	4,4462	200,432

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Rossi J. C., Danon F.** Disc. Faraday Soc., 1965, v. 40, p. 97.
2. **Термодинамические** свойства индивидуальных веществ. Справочник. Под ред. В. П. Глушко. Т. 1. М., Изд-во АН СССР, 1962.
3. **Knaap H. F. P.** Physica, 1962, v. 28, p. 21.
4. **Varekamp F. H., Beenakker J. J. M.** Physica, 1959, v. 25, p. 889.
5. **Sherman R. H., Sydoriak S. G., Roberts T. R. J.** Res. Nat. Bur. Standarts, 1964, v. 68A, p. 579.
6. **Fender B. E. F., Haisey G. D** J. Chem. Phys., 1962, v. 36, p. 1881.
7. **Schamp H. W., Mason E. A., Su K.** Phys. Fluids, 1962, v. 5, p. 772.

8. **McGlashan M. L., Potter D. J. B.** Proc. Roy. Soc., 1962, v. A267, p. 478.
9. **Lambert J. D.** Proc. Roy. Soc., 1959, v. A249, p. 414.
10. **Douslin D. R.** J. Chem. Phys., 1961, v. 35, p. 1364.
11. **Cottrell T. L., Hamilton R. A.** Trans. Faraday Soc., 1956, v. 52, part 2, p. 156; 1956, v. 52, part 10, p. 1311.
12. **Pickering S.** A Review of the literature relating to the critical constants. Washington, 1926.
13. **Термические** константы веществ. Справочник. Под ред. В. П. Глушко. Вып. 1. М., Изд-во АН СССР, 1965.
14. **Dillon J. G., Nelson P. A., Swanson B. S.** J. Chem. Phys., 1966, v. 44, p. 4229.
15. **Kobe K. A., Lynn R. E.** Chem. Revs, 1953, v. 52, p. 117.
16. **Smithsonian** Physical Tables. 9th ed. Washington, 1954.
17. **Кикоин И. К., Сенченков А. П.** «Физика металлов и металловедение», 1967, т. 24, с. 843.
18. **Справочник** химика. Под ред. Б. П. Никольского. Т. 2. М.—Л., «Химия», 1963.
19. **Варгафтик Н. Б.** Справочник по теплофизическим свойствам газов и жидкостей. М., Физматгиз, 1963.
20. **Varshni Y. P.** J. Chem. Phys., 1953, v. 21, p. 2335.
21. **Mitra S. S.** J. Chem. Phys., 1953, v. 21, p. 2334.
22. **Kurata M., Isida K.** J. Chem. Phys., 1955, v. 23, p. 1127.
23. **Строение** и физические свойства вещества в жидком состоянии. Киев. Изд. Киевск. ун-та, 1962.
24. **Яковкин Г. А.** Фреоны. Свойства и применения. Л., Изд. ГИПХ, 1959.

ГЛАВА 14

КОЭФФИЦИЕНТ ПОВЕРХНОСТНОГО НАТЯЖЕНИЯ

Коэффициент поверхностного натяжения жидкости σ равен работе, необходимой для увеличения поверхности жидкости на единицу площади при постоянной температуре, и зависит не только от свойств самой жидкости, но и от свойств среды, с которой жидкость граничит. Зависимость σ жидкости от температуры выражается равенством [1]

$$d\sigma/dT = -B\,(\rho/\mu)^{2/3},$$

где ρ — плотность; μ — молекулярная масса; $B = 2{,}1$ *г·см²/(сек²·град)*.

Коэффициент поверхностного натяжения твердого тела также определяется как работа образования единицы площади поверхности. Иногда вместо поверхностного натяжения экспериментально определяется работа адгезии, представляющая собой работу против сил притяжения при разделении граничащих тел. В случае, когда твердое тело граничит с жидкостью, работа адгезии $W_{тж} = \sigma_{тг} + \sigma_{жг} - \sigma_{тж}$, где $\sigma_{тг}$ и $\sigma_{тж}$ — поверхностные натяжения на границах твердого тела соответственно с газом и жидкостью; $\sigma_{жг}$ — поверхностное натяжение жидкости на границе с газом.

14.1. ЖИДКОСТИ

Таблица 14.1

Коэффициент поверхностного натяжения элементов в жидком состоянии

Вещество		Газовая среда	t, °С	σ, *эрг/см²*	Литература
Наименование	Символ				
Алюминий	Al	—	$t_{пл}$	914	[2]
Барий	Ba	—	$t_{пл}$	330	[3]
Бериллий	Be	—	$t_{пл}$	1145	[4]
Бром	Br	Воздух	—21	62,1	[6]
		»	13,0	44,1	[6]
Ванадий	V	—	$t_{пл}$	1750	[3]
Висмут	Bi	—	$t_{пл}$	390	[5]
		CO_2	264	429,5	[6]
		CO_2	265	464,9	[6]
		H_2	300	388	[7]
		H_2	962	340	[7]
		Вакуум	293	389,0	[7]

Продолжение табл. 14.1

Вещество		Газовая среда	t, °С	σ, *эрг/см²*	Литература
Наименование	Символ				
Висмут	Bi	Вакуум	365	300	[6]
		»	600	343,0	[7]
Вольфрам	W	—	$t_{пл}$	2300	[8]
Гадолиний	Gd	—	$t_{пл}$	650	[3]
Галлий	Ga	—	$t_{пл}$	707	[9]
Гафний	Hf	—	$t_{пл}$	1460	[10]
Германий	Ge	—	$t_{пл}$	600	[11]
Гольмий	Ho	—	$t_{пл}$	650	[3]
Диспрозий	Dy	—	$t_{пл}$	640	[3]
Европий	Eu	—	$t_{пл}$	450	[3]
Железо	Fe	—	$t_{пл}$	1840	[3]
		—	1550	1788	[12]
		Воздух	$t_{пл}$	949,7	[6]
				—997	
		H_2	1267	936	[7]
Золото	Au	—	$t_{пл}$	1134	[13]
		Воздух	700	1207	[14]
		»	1070	612,2	[6]
		H_2	1120	1128	[14]
Индий	In	—	$t_{пл}$	559	[15]
Иридий	Ir	—	$t_{пл}$	2400	[3]
Иттербий	Yb	—	$t_{пл}$	450	[3]
Иттрий	Y	—	$t_{пл}$	900	[3]
Кадмий	Cd	—	$t_{пл}$	558	[13]
		CO_2	$t_{пл}$	815,2	[6]
		CO_2	312	832,4	[6]
		H_2	336	570	[7]
		H_2	600	585	[7]
		Вакуум	350	546,4	[6]
		»	355	636,9	[7]
		»	589	589,9	[7]
Калий	K	—	$t_{пл}$	101	[12]
		CO_2	62	411,5	[6]
Кальций	Ca	—	$t_{пл}$	420	[3]
Кобальт	Co	—	$t_{пл}$	1870	[16]
		—	1550	1886	[12]
Кремний	Si	—	$t_{пл}$	860	[17]
Лантан	La	—	$t_{пл}$	700	[3]
Литий	Li	—	$t_{пл}$	398	[12]

Продолжение табл. 14.1

Вещество		Газовая среда	t, °C	σ, эрг/см²	Литература
Наименование	Символ				
Лютеций	Lu	—	$t_{пл}$	950	[3]
Магний	Mg	—	$t_{пл}$	569	[18]
Марганец	Mn	—	$t_{пл}$	1750	[3]
Медь	Cu	—	$t_{пл}$	1351	[19]
		Воздух	$t_{пл}$	581	[6]
		H_2	1140	1120	[14]
		H_2	1335	1251	[14]
Молибден	Mo	—	$t_{пл}$	2050	[3]
Натрий	Na	—	$t_{пл}$	191	[12]
		CO_2	90	293,6	[6]
		Вакуум	100	222	[7]
		»	258	211	[7]
Неодим	Nd	—	$t_{пл}$	680	[3]
Никель	Ni	—	$t_{пл}$	1810	[16]
		—	1550	1934	[20]
Ниобий	Nb	—	$t_{пл}$	2150	[3]
Олово	Sn	—	$t_{пл}$	554	[21]
		CO_2	226	612,4	[6]
		Вакуум	247	539,8	[6]
		»	250	575,1	[6]
		»	600	505,6	[6]
		H_2	253	526	[7]
		H_2	964	514	[7]
		Воздух	259	652,7	[6]
		»	408	616,4	[6]
Осмий	Os	—	$t_{пл}$	2600	[3]
Палладий	Pd	—	$t_{пл}$	1600	[3]
Платина	Pt	—	$t_{пл}$	1740	[22]
		—	1800	1699	[20]
		—	2000	1819	[6]
Празеодим	Pr	—	$t_{пл}$	690	[3]
Радий	Ra	—	$t_{пл}$	450	[3]
Рений	Re	—	$t_{пл}$	2500	[3]
Родий	Rh	—	$t_{пл}$	2050	[3]
Ртуть	Hg	—	$t_{пл}$	478	[23]
		Воздух	17,5	547,2	[6]
		»	18	505	[6]
		O_2	18	504	[6]
		N_2	18	495	[6]
		CO_2	18	487	[6]
		H_2	18	554	[6]
		CO_2	19	473,2	[7]
		CO_2	201	429,1	[7]
		Вакуум	15	436,3	[7]
		Пар	12,5	438,4	[14]
		»	20	471,6	[6]
		»	15	435,6	[6]
		Пар	67,0	423,9	[14]
Рубидий	Rb	—	$t_{пл}$	90	[3]
Рутений	Ru	—	$t_{пл}$	2050	[3]
Самарий	Sm	—	$t_{пл}$	620	[3]
Свинец	Pb	—	$t_{пл}$	480	[15]

Продолжение табл. 14.1

Вещество		Газовая среда	t, °C	σ, эрг/см²	Литература
Наименование	Символ				
Свинец	Pb	CO_2	325	509,5	[6]
		CO_2	330	535,9	[6]
		CO_2	335	473	[6]
		H_2	350	453	[7]
		H_2	750	423	[7]
		H_2	982	414	[7]
		H_2	1036	397	[7]
		Вакуум	370	465,4	[7]
		»	377	394,2	[6]
		»	657	415,5	[7]
Селен	Se	—	$t_{пл}$	106	[3]
		Воздух	217	92,5	[6]
Сера	S	»	141	58,3	[6]
Серебро	Ag	—	$t_{пл}$	930	[24]
		Воздух	1000	782,4	[6]
		—	1000	751	[6]
		H_2	995	923	[14]
		—	1163	902	[14]
Скандий	Sc	—	$t_{пл}$	800	[25]
Стронций	Sr	—	$t_{пл}$	350	[3]
Сурьма	Sb	—	$t_{пл}$	384	[26]
		CO_2	432	317,2	[6]
		H_2	640	350	[7]
		H_2	970	342	[7]
		H_2	750	368	[7]
		H_2	1100	348	[7]
		Вакуум	640	367	[7]
Таллий	Tl	—	$t_{пл}$	490	[27]
		Вакуум	300	357	[14]
		—	320	496	[14]
Тантал	Ta	—	$t_{пл}$	2400	[3]
Тербий	Tb	—	$t_{пл}$	650	[3]
Титан	Ti	—	$t_{пл}$	1390	[10]
Торий	Th	—	$t_{пл}$	1050	[3]
Туллий	Tu	—	$t_{пл}$	620	[3]
Уран	U	—	$t_{пл}$	1300	[3]
Фосфор	P	CO_2	$t_{пл}$	52,3	[6]
Хром	Cr	—	$t_{пл}$	1590	[28]
Цезий	Cs	—	$t_{пл}$	60	[3]
		—	62	67,5	[29]
		—	146	62,9	[29]
		—	152	62,4	[29]
Церий	Ce	—	$t_{пл}$	680	[3]
Цинк	Zn	—	$t_{пл}$	810	[13]
		Воздух	360	967,4	[6]
		Вакуум	470	772,2	[7]
		»	635	728,1	[7]
		H_2	510	785	[14]
		H_2	600	787	[7]
		H_2	640	761	[14]
		H_2	700	763	[7]
Цирконий	Zr	—	$t_{пл}$	1400	[10]
Эрбий	Er	—	$t_{пл}$	620	[3]

Таблица 14.2

Коэффициент поверхностного натяжения воды * [6]

t, °C	0	10	20	30	40	50	60	70	80	90	100
σ, *эрг/см²*	75,62	74,11	72,58	71,03	69,41	67,79	66,04	64,27	62,50	60,68	58,80

* При 20°С коэффициент поверхностного натяжения D_2O $\sigma = 67{,}8$ *эрг/см²* [14]

Таблица 14.3

Коэффициент поверхностного натяжения ртути [6]

t, °C	20	40	60	80	100	120	140	160	180
σ, *эрг/см²*	471,6	468,2	464,4	460,5	456,2	452,0	447,2	442,0	436,8

Продолжение табл. 14.3

t, °C	200	220	240	260	280	300	320	340	360
σ, *эрг/см²*	431,2	425,2	419,0	412,7	406,4	399,5	392,3	384,6	376,4

Таблица 14.4

Коэффициент поверхностного натяжения сжиженных газов [14]

Вещество	Формула	t, °C	σ, *эрг/см²*	Вещество	Формула	t, °C	σ, *эрг/см²*
Азот	N_2	—203,1	10,53	Метиловый эфир	$(CH_3)_2O$	—40,1	21,0
		—196,0	8,7	Неон	Ne	—248,4	5,61
Аммиак	NH_3	—29	41,2	Окись азота	NO	—163,0	27,79
Аргон	Ar	—188,1	13,2	Окись углерода	CO	—203,1	12,11
Ацетилен	C_2H_2	—78,1	18,2	Окись этилена	$(CH_2)_2O$	— 50,1	35,8
Водород	H_2	—252,8	2,13	Сернистый газ	SO_2	— 50,57	37,20
Гелий	He	—271,6	0,354			—25	32,6
Диметиламин	$(CH_3)_2NH$	— 78	25,20	Триметиламин	$(CH_3)_3N$	—73	24,8
Закись азота	N_2O	—89,3	26,3	Углекислый газ	CO_2	—52,2	16,54
		—50	14,39	Фтористый водород	HF	—81,8	17,60
Кислород	O_2	—203,1	18,3	Хлор	Cl_2	—72	33,0
		—182,9	13,2	Этиламин	$(C_2H_5)NH_2$	—74	28,9
Метиламин	CH_3NH_2	— 70	29,2				

Таблица 14.5

Коэффициент поверхностного натяжения неорганических соединенй в жидком состоянии [6]

Вещество	Формула	Газовая среда	t, °С	σ, *эрг/см²*
Азотноватый ангидрид	N_2O_4	Пар	1,6	29,52
			19,8	26,56
Бария хлорид	$BaCl_2$	»	$t_{пл}$	150,5
		—	$t_{пл}$	171
Висмута бромид	$BiBr_3$	—	250,0	66,5
			442,0	46,2
» хлорид	$BiCl_3$	—	271,0	66,2
		—	382,0	52,0
Калия бихромат	$K_2Cr_2O_7$	Азот	420	140,1
		»	535	135,0
» бромид	KBr	»	775	85,7
		»	920	75,4
» вольфрамат	K_2WO_4	»	925,0	161,0
		»	1520,3	105,6
» иодид	KI	»	737	75,2
		»	873	66,5
» метаборат	KBO_3	»	992	124
		»	1142	97
» метафосфат	KPO_3	»	897	155,5
		»	1536,0	100,3
» молибдат	K_2MoO_4	»	930,6	150,5
		»	1522,3	112,5
» нитрат	KNO_3	»	380,0	110,4
		»	771,6	80,2
» сульфат	K_2SO_4	»	1070,6	143,7
		»	1656,0	106,8
» фторид	KF	»	912,7	138,4
		»	1310	104,9
» хлорид	KCl	»	799,5	95,8
		»	1167	69,6

Продолжение табл. 14.5

Вещество	Формула	Газовая среда	t, °С	σ, *эрг/см²*
Калия цианид	KCN	Воздух	$t_{пл}$	96
Кальция хлорид	$CaCl_2$	»	$t_{пл}$	98,7
Лития карбонат	Li_2CO_3	»	$t_{пл}$	152,5
» метаборат	$LiBO_2$	Азот	879,2	261,8
		»	1520	192,4
» метасиликат	Li_2SiO_3	»	1254	374,6
		»	1601	346,6
» нитрат	$LiNO_3$	»	358,5	111,5
		»	609,4	96,2
» сульфат	Li_2SO_4	»	860	223,8
		»	1214	200,3
» фторид	LiF	»	868,5	249,5
		»	1270	201,1
» хлорид	LiCl	»	614,0	137,8
		»	1074,6	104,6
Мышьяка трибромид	$AsBr_3$	»	49,6	49,6
		»	179,7	36,1
» трихлорид	$AsCl_3$	»	—21,0	43,8
		»	110,0	31,0
Натрия ацетат	$NaCH_3COO$	Воздух	$t_{пл}$	38,8
» аммониевый фосфат	$Na(NH_4)HPO_4$	»	$t_{пл}$	207,8
» бромид	NaBr	Азот	760,9	105,8
		»	1165,7	78,0
» вольфрамат	Na_2WO_4	»	710	203,3
		»	1595	142,6
» иодид	NaI	—	705,5	85,6
		—	860,7	77,6

Продолжение табл. 14.5

Вещество	Формула	Газовая среда	t, °С	σ, эрг/см²
Натрия карбонат	Na_2CO_3	Воздух	$t_{пл}$	179,0
» метаборат	$NaBO_2$	Азот	1015,6	193,7
		»	1441	126,2
» метафосфат	$NaPO_3$	»	827	197,5
		»	1516,5	147,5
» молибдат	Na_2MoO_4	»	698,5	214,0
		»	1212	174,6
» нитрат	$NaNO_3$	»	321,5	119,7
		»	738,5	93,7
» сульфат	Na_2SO_4	»	900	194,8
		»	1077	184,7
» тетраборат	$Na_2B_4O_7$	Воздух	1000	211,9
» фторид	NaF	—	1010	199,5
		—	1546	143,5
» хлорид	NaCl	—	802,6	113,8
		—	1171,8	88,0
Олова дихлорид	$SnCl_2$	Азот	307	97,0
		»	480	81,6
Рубидия бромид	RbBr	»	729,2	87,7
		»	1121	60,6
» иодид	RbI	»	673,4	79,4
		»	1016	55,4
» нитрат	$RbNO_3$	»	326,5	107,5
		»	726,2	77,7
» сульфат	Rb_2SO_4	»	1086	132,5
		»	1545	108,9
» фторид	RbF	»	802,6	127,2
		»	1085,4	102,2
» хлорид	RbCl	»	750	95,7
		»	1150	61,4
Свинца и калия хлорид	$PbCl_2 \cdot KCl$	Воздух	457	105,3
		»	616	94,4
Серебра бромид	AgBr	»	$t_{пл}$	121,4
» хлорид	AgCl	»	$t_{пл}$	212,7
		»	450,2	125
		»	550,0	113
Серы монохлорид	S_2Cl_2	Азот	0,0	45,4
		»	121,0	29,4
Стронция хлорид	$SrCl_2$	Воздух	$t_{пл}$	111,1
Таллия нитрат	$TlNO_3$	Азот	210,0	117,3
		»	430,0	99,5
Фосфора оксихлорид	$POCl_3$	Пар	18,0	31,91
		»	46,1	28,37
» трибромид	PBr_3	Азот	—20	45,8
		»	170	26,3
» триодид	PI_3	»	75,3	56,5
		»	15,0	51,4
» трихлорид	PCl_3	»	—70	37,4
		»	75,1	21,9
		Пар	16,4	28,71
Цезия иодид	CsI	Азот	653,6	75,1
		»	1030,0	51,1
» нитрат	$CsNO_3$	»	425,5	91,8
		»	686,4	72,5
» сульфат	Cs_2SO_4	»	1036	111,3
		»	1530	83,0
» фторид	CsF	»	722,5	104,5
		»	1100,0	78,9
» хлорид	CsCl	»	663,7	89,2
		»	1080	56,3

Таблица 14.6

Коэффициенты поверхностного натяжения органических соединений в жидком состоянии [6]

Вещества приведены в порядке возрастания числа атомов углерода

Вещество	Формула	Газовая среда	t, °С	σ, эрг/см²
Муравьиная кислота	CH_2O_2	Пар	16,8	37,47
Хлороформ	$CHCl_3$	N_2	25,0	26,2
Метиловый спирт	CH_4O	Пар	20	23,02
Метиламин	CH_5N	N_2	—12	21,7
Четыреххлористый углерод	CCl_4	Пар	20	25,68
Формамид	CH_4ON	Воздух	34,5	55,53
Уксусная кислота	$C_2H_4O_2$	Пар	20	23,46
Диметиламин	C_2H_7N	N_2	—78,0	25,2
Хлораль	C_2HOCl_3	Пар	19,4	24,48
Иодистый этил	C_2H_5I	»	19,1	30,0
Бромистый этилен	$C_2H_4Br_2$	»	12,2	38,91
Хлористый этилен	$C_2H_4Cl_2$	N_2	29,9	30,1
Этиламин	C_2H_7N	N_2	9,9	20,4
Этиловый спирт	C_2H_6O	Пар	20	22,03
Четырехбромистый ацетилен	$C_2H_2Br_4$	N_2	30,4	46,7
Четыреххлористый ацетилен	$C_2H_2Cl_4$	N_2	47,4	30,5
Хлористый ацетил	C_2H_3OCl	Пар	14,8	25,79
Ацетонитрил	C_2H_3N	Воздух	13,8	29,18
Ацетон	C_3H_6O	Пар	16,8	23,35
Этилсульфоцианат	C_3H_5SN	»	17,6	35,52
Аллиловый спирт	C_3H_6O	»	14,8	25,99
Глицерин	$C_3H_8O_3$	Воздух	18,0	64,7
Этилацетат	$C_4H_8O_2$	N_2	25,1	22,2
Этиловый эфир	$C_4H_{10}O$	N_2	25,3	16,7
Цианистый этилен	$C_4H_4N_2$	Воздух	80,1	34,32
Диэтиламин	$C_4H_{11}N$	N_2	23,4	18,3
Ацетилацетон	$C_5H_7O_2$	N_2	25,2	29,2
Фурфурол	$C_5H_4O_2$	N_2	0	43,5
Пиридин	C_5H_5N	Пар	17,5	36,69
Анилин	C_6H_7N	»	19,5	40,84
Бензол	C_6H_6	Воздух	17,5	29,16
Бромбензол	C_6H_5Br	N_2	35,6	35,2
Хлорбензол	C_6H_5Cl	N_2	25,0	32,9
Циклогексан	C_6H_{12}	Воздух	11,9	27,98
Гексан	C_6H_{14}	Пар	8,2	18,54
Иодид бензола	C_6H_5I	N_2	25,4	37,1
Капронитрил	$C_6H_{11}N$	N_2	47,9	23,1
Толуол	C_7H_8	Воздух	17,5	28,52
Бензонитрил	C_7H_5N	Пар	8,0	39,61
Ацетофенон	C_8H_8O	N_2	24,8	40,1
Этиланилин	$C_8H_{11}N$	Пар	7,4	37,26
Октан	C_8H_{18}	»	15,5	21,31
Хиолин	C_9H_7N	»	10,5	47,34
Нафталин	$C_{10}H_8$	»	127,0	27,98
Кровь	—	Воздух	37,0	45,4
Масло арахисовое (ρ=0,9149 г/см³)	—	»	18,0	32,77
Масло цитроновое (ρ=0,8197 г/см³)	—	»	25,0	26,9

Таблица 14.7

Коэффициент поверхностного натяжения σ, *эрг/см²*, циклогексана при различных давлениях водорода [30]

P, *атм*	*t*, °C				
	20	25	50	75	100
1	25,3	24,7	21,9	19,1	—
50	23,7	23,2	20,4	17,7	15,1
100	22,5	22,0	19,3	16,6	14,0
150	21,5	21,0	18,4	15,9	13,4
200	20,7	20,25	17,8	15,4	13,0
300	19,2	18,75	16,5	14,3	12,1

Таблица 14.8

Коэффициент поверхностного натяжения сплавов в жидком состоянии в водороде [7, 14]

Сплав	*t*, °C	σ, *эрг/см²*
81% Au — 19% Cu	1250	1097
51% Au — 49% Cu	1250	1123
71,9% Ag — 28,1% Cu	1125	1027
19% Ag — 81% Cu	1130	1114
85% Cu — 15% Sb	1100	797
24% Cu — 76% Sb	1100	405
82% Cu — 18% Sn	1000	922
25% Cu — 75% Sn	1000	538
87,3% Bi — 12,7% Sn	1000	339
15% Bi — 85% Sn	1000	449
48,7% Bi — 51,3% Pb	1000	352
10% Bi — 90%Pb	1000	388

14.2. ТВЕРДЫЕ ТЕЛА

Таблица 14.9

Коэффициенты поверхностного натяжения твердых тел [11, 29]

Вещество	Формула	*t*, °C	σ, *эрг/см²*
Бария сульфат	$BaSO_4$	25	1250
Воск пчелиный	—	—	46
Калия бромид	KBr	—	91,6
» иодид	KI	—	74,0
» хлорид	KCl	—	107,5
Кальция фторид	CaF_2	30	2500
Натрия бромид	NaBr	—	118,7
» иодид	NaI	—	95,9
» хлорид	NaCl	—	150,2
Парафин	—	—	40,4
Свинца иодид	PbI_2	30	130
» фторид	PbF_2	25	900
Серебра хромат	Ag_2CrO_4	26	575
Соль каменная	—	—	315
Стекло	—	—	130
Стронция сульфат	$SrSO_4$	30	1400

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Кнконн И. К., Киконн А. К.** Молекулярная физика. М., Физматгиз, 1963.
2. **Pelzel E.** Berg- und Hüttenmann. Monatsh., 1948, Bd 93, S. 278.
3. **Еременко В. Н.** «Укр. хим. журн.», 1962, т. 28, с. 4; **Еременко В. Н., Иващенко Ю. Н., Богатыренко Б. Б.** Поверхностные явления в расплавах и их роль в процессах порошковой металлургии. Киев, Изд-во АН УССР, 1961.
4. **Еременко В. Н., Ниженко В. И., Тай Шоу-вей.** — «Изв. АН СССР. ОТН. Металлургия и топливо», 1960, т. 3, с. 116.
5. **Семенченко В. К.** Поверхностные явления в металлах и сплавах. М., Гостехиздат, 1957.
6. **Landolt-Börnstein.** Physikalisch-Chemische Tabellen, Bd 1, Berlin, 1923, S. 198.
7. **Landolt-Börnstein.** Physikalisch-Chemische Tabellen, Bd 2. Ergänzungsband, Berlin, 1931, 1 Teil, S. 148.
8. **Calvery A.** Proc. Phys. Soc. (B), 1957, v. 70, p. 1040.
9. **Mack D. L., Davis J. K., Bartell F. E. J.** Phys. Chem., 1941, v. 45, p. 846.
10. **Surface** Tension of Titanium, Zirconium and Hafnium. Г. Appl. Phys., 1958, v. 29, p. 213. (Auth.: Peterson A. W., Hedesdy H., Keck P. H., Schwartz E.)
11. **Keck P. H., Van Horn W.** Phys. Rev., 1955, v. 91, p. 512.
12. **Taylor J. W.** Philos. Mag., 1955, v. 46, p. 867.
13. **Кунин Л. Л.** Поверхностные явления в металлах. М., Металлургиздат, 1955.
14. **Landolt-Börnstein.** Physikalisch-Chemische Tabellen, Bd 3. Ergänzungsband, Berlin, 1935, 1 Teil, S. 200.
15. **Melford D. A., Hoar T. P.** J. Inst. Metals, 1957, v. 85, p. 197.
16. **Еременко В. Н., Нниженко В. И.** «Укр. хим. ж.», 1960, т. 26, с. 423.
17. **Kingeri W. D., Humenik M.** J. Phys. Chem., 1953, v. 57, p. 359.
18. **Живов В. Г.** «Труды Всесоюз. алюминиево-магниевого ин-та», 1947, т. 14, с. 99.
19. **Найдич Ю. В., Еременко В. Н.** «Физика металлов и металловедение», 1961, т. 11, с. 5.
20. **Kozakevitch P., Urrain G.** Compt. rend. Acad. Sci., 1961, v. 20, p. 253.
21. **Еременко В. Н., Иващенко Ю. Н., Ниженко В. И.** Экспериментальная техника и методы высокотемпературных исследований. М., Изд-во АН СССР, 1959, с. 295.
22. **Еременко В. Н., Найдич Ю. В.** «Изв. АН СССР. ОТН. Металлургия и топлнво», 1959, т. 6, с. 139.
23. **Пугачевич П. П., Константинов В. А.** «Докл. АН СССР», 1947, т. 57, с. 797.
24. **Василиу М. И., Еременко В. Н., Фесенко В. Н.** Строенне вещества и спектроскопия. Л., Изд-во АН СССР, 1960, с. 78.
25. **Астахов К. В., Панин Н., Добкина З.** «Ж. физ. химин», 1946, т. 20, с. 4.
26. **Greenway H. T.** J. Inst. Metals, 1947, v. 74, p. 133.
27. **Филянд М. А., Семенова Е. И.** Свойства редких элементов. М., Металлургиздат, 1953.
28. **Еременко В. Н., Найдич Ю. В.** «Изв. АН СССР. ОТН. Металлургия и топливо», 1959, т. 2, с. 111.
29. **Тримофеичева О. А., Лазарев В. Б.** «Изв. АН СССР, Отд. хим. наук», 1962, т. 2, с. 358.
30. **Ефремов Ю. В., Голубев И. Ф.** «Ж. физ. химии», 1962, т. 6, с. 36.

III. КИНЕТИЧЕСКИЕ ЯВЛЕНИЯ

ГЛАВА 15

ТЕПЛОПРОВОДНОСТЬ

Коэффициент теплопроводности λ может быть определен из уравнения:

$$Q_x = -\lambda\, \partial t/\partial x,$$

где Q_x — плотность теплового потока в направлении x; t — температура тела, °C. В системе СИ плотность теплового потока определяется как количество тепла, проходящего в 1 *сек* через 1 $м^2$ поверхности, расположенной нормально к направлеиию x. Размерность λ — $вт/(м \cdot град)$.

Таблица 15.1

Коэффициенты перевода единиц измерения коэффициента теплопроводности [1—3]

Единица измерения	$\frac{вт}{м \cdot град}$	$\frac{вт}{см \cdot град}$	$\frac{кал}{см \cdot сек \cdot град}$	$\frac{ккал}{м \cdot ч \cdot град}$	$\frac{Btu}{ft \cdot h \cdot °F}$	$\frac{CHU}{ft \cdot h \cdot °F}$
$\frac{вт}{м \cdot град}$	1	0,01	0,0023885	0,85984	0,57780	0,32100
$\frac{вт}{см \cdot град}$	100,0	1	0,23885	85,984	57,780	32,100
$\frac{кал}{см \cdot сек \cdot град}$	418,68	4,1868	1	360,0	241,91	134,39
$\frac{ккал}{м \cdot ч \cdot град}$	1,1630	0,011630	0,0027778	1	0,67198	0,37332
$\frac{Btu}{ft \cdot h \cdot °F}$	1,7307	0,017307	0,0041338	1,4881	1	0,55556
$\frac{CHU}{ft \cdot h \cdot °F}$	3,1152	0,031152	0,0074410	2,6787	1,800	1

Теплопроводность тел независимо от их химического состава существенно зависит от их физического состояния. Коэффициент теплопроводности может меняться в широких пределах в зависимости от того, находится ли тело в аморфном (стекловидном) состоянии или представляет собой монокристалл. Поликристаллические тела обладают промежуточной теплопроводностью между теплопроводностями монокристалла и аморфного тела. Их теплопроводность тем ближе к теплопроводности аморфного тела, чем меньше размеры кристаллов.

Сильное влияние на теплопроводность тел могут оказывать кристаллическая система, примеси, влажность, пористость и т. д.

На практике часто случается, что теплопроводность внутри тела и вблизи его границ различна. Это различие может быть вызвано как изменением условий протекания процессов теплопередачи, так и изменением структуры вещества (в результате термообработки, наклепа и т. д.) [3].

В таблицах приведены коэффициенты теплопроводности для части тела, удаленной на достаточное расстояние от границ.

15.1. ЭЛЕМЕНТЫ

В табл. 15.2 приведены коэффициенты теплопроводности элементов. В первой колонке таблицы даны атомные номера элементов Z, во второй — химические символы элементов или их соединений (например, N_2, O_2 и т. д.), для которых приведены значения коэффициентов теплопроводности. Для каждого значения коэффициента теплопроводности внизу в скобках указана температура, °C, при которой измерена теплопроводность.

Коэффициенты теплопроводности паров и газов даны при давлении 1 *атм*. В тех случаях, когда значения коэффициента теплопроводности приведены для температуры фазового перехода, агрегатное состояние вещества указано буквой, стоящей рядом со значением температуры, например (182 ж.). При этом к. означает кристаллическое состояние; ж. — жидкость; г — газ; т. — твердое вещество; ам. — вещество в аморфном состоянии, мк.— монокристалл. Если коэффициент теплопроводности проявляет сильную зависимость от агрегатного состояния вещества при данной температуре, то буква указывает на состояние, для которого приведено значение λ.

Погрешности приводимых значений колеблются от ± 10 до $\pm 20\%$.

Таблица 15.2

Коэффициенты теплопроводности элементов

Z	Химический символ	Коэффициент теплопроводности λ, $\frac{вт}{м \cdot град}$ (при температуре t, °С)								Литература
1	H_2	0,108 (—257)	0,141 (—243)	0,053 (—193)	0,131 (—73)	0,168 (0)	0,368 (500)	0,568 (1027)	0,878 (1727)	[1]
2	He	0,018 (—270,8)	0,027 (—268,9)	0,058 (—203)	0,115 (—73)	0,143 (0)	0,278 (427)	0,479 (1227)	0,941 (4000)	[1, 3]
3	Li	418 (—250)	71 (—50)	71 (182 т.)	42,8 (182 ж.)	52,9 (627)	62,1 (1027)	160 (1427)	110 (1727)	[1,4—6]
4	Be	206 (—173)	194 (—73)	182 (27)	156 (227)	120 (527)	83* (800)	76 (1227)	62,8* (1500)	[1,6,7]
5	B	1,5 (27—87)								
6	C [2*]	114 (20)	86 (200)	61 (600)	47 (900)	40 (1200)	34 (1500)	25 (1800)		[6]
7	N_2	0,0078 (—193)	0,0243 (0)	0,0449 (300)	0,0583 (600)	0,0772 (900)	0,087 (1127)	0,142 (2000)	0,949 (5000)	[1,6]
8	O_2	0,161 (—193)	0,0092 (—173)	0,025 (7)	0,0649 (627)	0,0923 (1127)	0,131 (1727)	2,924 (3527)	0,396 (5727)	[1,6,8]
9	F_2	0,0086 (—173)	0,0182 (—73)	0,0248 (0)	0,0269 (27)	0,0344 (127)	0,0416 (227)	0,0628 (527)	0,0774 (727)	[9]
10	Ne	0,117 (—248)	0,092 (—243)	0,0205 (—183)	0,0464 (0)	0,0598 (127)	0,0839 (377)	0,101 (577)	0,133 (1027)	[1,3,6]
11	Na	168 (—240)	142 (—150)	143 (—53)	133 (27)	123 (97)	84 (98)	72 (377)	43 (927)	[1,6,8]
12	Mg	800* (—267)	1380* (—254)	180* (—203)	165 (0)	112 (500)	130 (649)	100 (651)	98 (900)	[3,6]
13	Al	1340* (—270)	4520* (—258)	1675* (—233)	197 (—173)	207 (27)	233 (327)	282 (627)	62 (927)	[3,6]

[2*] Указан коэффициент теплопроводности $\lambda_\perp$ реакторного графита с плотностью 1,65—1,72 $г/см^3$ поперек направления прессования. Коэффициент теплопроводности вдоль направления прессования $\lambda_\parallel$ обычно в 1,5 раза выше, чем $\lambda_\perp$.

z	Химический символ	Коэффициент теплопроводности λ, $\frac{вт}{м \cdot град}$ (при температуре t, °C)								Литература
14	Si	167 (0)	25,9 (1414)							[3]
16	S	0,64 (—190)	0,208 (0)							[10]
17	Cl_2	0,0054 (—73)	0,0079 (0)	0,0088 (27)	0,0106 (77)	0,0124 (127)	0,0158 (227)	0,0188 (327)	0,0215 (427)	[1,3]
18	Ar	0,006 (—183)	0,0126 (—73)	0,0167 (7)	0,0222 (127)	0,0436 (727)	0,0667 (1727)	0,102 (3227)	0,131 (4727)	[1,6]
19	K	110 (—53)	100 (7)	90 (63,4)	49 (63,9)	38 (527)	29 (827)	21,1 927	24,3 1227	[1,3,6]
20	Ca	98 (0)								[5]
22	Ti	15,1 (—173)	15,5 (20)	16,9 (300)	19,4 (700)	10,5* (1000)	8,8*! (1660)			[3,6]
23	V	32,1 (—173)	33,2 (20)	34,4 (200)	35,7 (400)	37,2 (600)	39,5 (900)	42,3 (1200)	45,6 1500	[6]
24	Cr	72 (—73)	67 (27)	58 (127)	50 (227)	45 (327)	35 (527)	31 (727)	29 (1127)	[3,6]
26	Fe	561 (—252)	151 (—190)	75 (0)	68 (127)	50 (427)	41 (727)	39 (1127)	35,6 (1530)	[3,6,8]
27	Co	37,5 (—173)	70,9 (17)	94,0 (97)	117 (297)	126,8 (497)	107 (797)	66 (1097)	11 (1397)	[6]
28	Ni	127 (—173)	92 (20)	83 (100)	68 (300)	62 (500)	58 (700)	56 (900)	55 (1300)	[3,6]
29	Cu	1000* (—270)	5200* (—254,3)	1500* (—229,1)	600* (—210,2)	395÷402 (20)	373 (300)	321 (900)	301 (1083 т.)	[3,6]

z	Химический символ	Коэффициент теплопроводности λ, $\frac{вт}{м \cdot град}$ (при температуре t, °С)								Литература
30	Zn	1300* (—268,5)	1500* (—261,5)	440* (—249,8)	160* (—226,4)	111 (20)	110 (100)	59 (419)	57 (619)	[3,4]
31	Ga	41 (0)	33 (27)	26 (31)	27 (100)					[6]
32	Ge	105 (—100)	60,3 (0)	13,4 (957)						[3,5]
33	As	36,8 (20)								[9]
34	Se	0,13 (25)								[9]
36	Kr	0,0042 (—148)	0,0072 (—48)	0,0097 (27)	0,0149 227	0,0196 427	0,0238 627	0,0275 827	0,0307 1027	[1,3]
37	Rb	35,5 (20)	29,3 (39 ж.)	29,8 (227)	25,9 (427)	22,2 (627)	0,0118 (727)	0,0125 (1027)	0,0141 (1227)	[1,6]
40	Zr	22,3 (—173)	21,4 (20)	20,9 (200)	20,4 (400)	19,9 (700)	19,7 (1000)	19,6 (1300)	19,6 (1600)	[6]
41	Nb	49 (—173)	50 (—73)	53 (27)	59 (327)	67 (727)	76 (1227)	91 (1827)	102 (2427)	[6]
42	Mo	205 (—173)	169 (—73)	162 (27)	158 (327)	158 (727)	114 (1227)	100 (2127)	73,3 (2620 т.)	[3,6]
44	Ru	108 (20)								[3]
45	Rh	2380 (—252)	211 (—190)	125 (18)	120 (100)					[3,7,8]
46	Pd	76,2 (20)								[3]

Z	Химический символ	Коэффициент теплопроводности λ, $\frac{вт}{м \cdot град}$ (при температуре t, °С)								Литература
47	Ag	7000* (—269)	10 800* (—265)	3810* (—252)	800* (—230)	422 —(100)	418 (27)	362 (300)	5,82 (960 т.)	[3,5,6]
48	Cd	950* (—272)	1200* (—271)	550* (—266)	96 (—100)	93 (20)	91,9 (100)	45,2 (321 ж.)	44 (700)	[3,5,6]
49	In	500* (—272)	800* (—269)	190* (—263)	90* (—243)	88 (20)	71,5 (40)	71,0 (140)		[3,6]
50	Sn	80,4 (—160)	74 (—100)	65 (20)	60 (100)	34,3 (232 ж.)	33,8 (300)	33,1 (400)	32,5 (500)	[3—6]
51	Sb	23 (—100)	23 (20)	17 (100)	17 (300)	21,8 (630 ж.)	21 (700)	20,9 (730)		[3, 5]
52	Te	3,64 (0 м.к.)	58,15 (20)	1,38 (452 к.)						[3,6]
53	I	0,419 (24,4)	0,444 (30)	0,486 (42,86)						[9,10]
54	Xe	0,0033 (—98)	0,0052 (0)	0,0067 (77)	0,0090 (227)	0,0121 (427)	0,0149 (627)	0,0176 (827)	0,0200 (1027)	[1]
55	Cs	~23,8 (20)	19,0 (28,5 ж.)	19,3 (127)	19,2 (427)	17,7 (627)	8,28 (727)	9,09 (1027)	10,1 (1227)	[1,6]
72	Hf	20,9 (20)	22,6* (100)	21 (300)	18,6* (1000)	17,6 (2130 т.)	16,7* (2300)			[3,5]
73	Ta	63 (—173)	63 (—73)	63 (27)	68 (527)	74 (927)	86 (1527)	100 (2427)	110 (3000)	[3,6]
74	W	3435 (—252)	232,5 (—190)	130 (27)	126 (327)	115 (927)	101 (1827)	92 (2427)	88 (3650 т.)	[3,68]
75	Re	50,2 (20)								[3]
76	Os	88 (20)								[3]

Z	Химический символ	Коэффициент теплопроводности λ, $\frac{вт}{м \cdot град}$ (при температуре t, °С)								Литература
77	Ir	151 (—100)	148 (0)	138 (20)	143 (100)					[3,5,7, 10]
78	Pt	~333 (—252)	77,8 (—190)	74,1 (20)	75,3* (300)	83,7* (1000)	~90 (1755 т.)	100* (3000)		[3,8]
79	Au	1500* (—270)	2900* (—263)	1000* (—249)	500 (—239)	330 (—100)	310 (0)	310 (100)		[3,5]
80	Hg	48 (—173)	29,6 (—73)	7,639 (—38,87 ж.)	8,447 (20)	9,475 (100)	11,69 (300)	14,04 (600)	14,98 (800)	[1,6]
81	Tl	1150* (—272)	1370* (—270)	500* (—263)	150* (—243)	63 (—173)	47 (27)	40 (127)	36 (227)	[3,6]
82	Pb	53,6 (—250)	47,3 (—200)	40,6 (—100)	34,89 (20)	28,14 (300)	15,9 (327,3 ж.)	15,58 (600)	19,77 (800)	[3,5,6,8]
83	Bi	12 (—200)	8 (20)	7—8,8 (270)	11,3 (271 ж.)	14 (300)	15 (400)	17 (600)	19 (800)	[3,6]
90	Th	40,4 (—173)	35,6 (27)	33,3 (127)	28,6 (327)	21,7 (627)	12,0 (1027)	7,5 (1227)	2,8 (1427)	[3,6]
92	U	17,8 (—73)	22,5 (27)	26,5 (127)	31,8 (327)	32,4 (627)	22,4 (927)	13,7 (1137)	13,8 (1227)	[6]
94	Pu	4,1 (—173)	4,65 (—73)	5,23 (27)	5,80 (127)	6,40 (227)	6,98 (327)	8,20 (5,27)	9,30 727	[6]

* Получено путем пересчета с графиков, приведенных в оригинале.

15.2. ГАЗЫ И ПАРЫ

Коэффициент теплопроводности газа связан с его молекулярными характеристиками выражением $\lambda \approx \approx vlnmc_V$, где v — скорость молекул; l — длина свободного пробега молекулы; n — число молекул в единице объема; m — масса молекулы; c_V — теплоемкость единицы массы при постоянном объеме. Связь λ с коэффициентом вязкости газа μ выражается формулой $\lambda = S\mu c_V$. Число Стантона S меняется от 2,5 для одноатомного газа до~1 при увеличении числа атомов в молекуле до бесконечности. Коэффициент теплопроводности газов слабо зависит от давления, поскольку увеличение числа молекул в единице объема n приводит к пропорциональному уменьшению длины свободного пробега l. Небольшое уменьшение коэффициента теплопроводности с уменьшением давления (в среднем ~1% на 1 *атм*) вызвано изменением удельной теплоемкости [3]. Если длина свободного пробега сравнима с размерами слоя (сосуда) или больше, то предыдущее условие не выполняется, и коэффициент теплопроводности пропорционален числу молекул n, т. е. давлению газа, и стремится к нулю с уменьшением давления.

Таблица 15.3

Коэффициенты теплопроводности газов, содержащих углерод [3] (при давлении 1 *атм*)

Газ	Химическая формула	t, °C	λ, 10^{-6} $\frac{кал}{см \cdot сек \cdot град}$
Ацетальдегид	CH_3COH	100	42,0
Ацетилен	C_2H_2	0	44
Ацетон	CH_3COCH_3	100	40,5
Ацетонитрил	CH_3CN	100	33,0
Бензол	C_6H_6	100	40,1
Изобутан	C_4H_{10}	0	30,4
н-Бутан	C_4H_{10}	0	29,4
Гексан	C_6H_{14}	100	48,0
Диоксан	$(C_2H_4O)_2$	100	40,0
Диэтиламин	$(C_2H_5)_2NH$	100	52,0
Метан	CH_4	0	69,6
Метилацетат	CH_3COOCH_3	100	42,1
Метил бромистый	CH_3Br	100	28,0
» хлористый	CH_3Cl	0	27,5
Метилен хлористый	CH_2Cl_2	100	25,2
Нитрометан	CH_3NO_2	100	30,0
Изопентан	C_5H_{12}	0	29,0
н-Пентан	C_5H_{12}	0	29,3
Пропан	C_3H_8	0	35,5
Спирт метиловый	CH_3OH	100	53,0
» изопропиловый	C_3H_7OH	100	52,5
» *н*-пропиловый	C_3H_7OH	100	49,3
» этиловый	C_2H_5OH	100	54,0
Триэтиламин	$C_6H_{15}N$	100	60,0
Углерод четыреххлористый	CCl_4	100	20,5
Углерода двуокись	CO_2	0	34,6
Углерода окись	CO	0	51,1
Фреон-11	CCl_3F	100	30,0
Фреон-12	CCl_2F_2	0	20,5
Фреон-21	$CHCl_2F$	0	21,5
Фреон-22	$CHClF_2$	0	24,5
Фреон-113	$C_2Cl_3F_3$	100	23,0
Хлороформ	$CHCl_3$	100	23,4
Циклогексан	C_6H_{12}	100	40,0
Циклопропан	C_3H_6	0	27,0
Этан	C_2H_6	0	43,5
Этил хлористый	C_2H_5Cl	100	40
Этилацетат	$CH_3COOC_2H_5$	100	38,6
Этилен	C_2H_4	0	41,5
Этилен хлористый	$C_2H_4Cl_2$	100	32,2
Этилена окись	C_2H_4O	100	46
Этилнитрат	$C_2H_5NO_3$	100	38,0
Этилформиат	$HCOOC_2H_5$	100	44,0
Эфир диэтиловый	$C_2H_5OC_2H_5$	100	53,0

15.3. ЖИДКОСТИ

Коэффициент теплопроводности жидкостей при температуре 0°C и атмосферном давлении с погрешностью ±10% может быть рассчитан по полуэмпирической формуле [3]

$$\lambda \approx 10^{-6} \frac{90 C_P}{N^{0,25}} \sqrt{\rho T_{кип}},$$

Таблица 15.4

Коэффициент теплопроводности газов, не содержащих углерода (при давлении 1 *атм*)

Газ или пар	Химическая формула	Температура кипения, °C	t, °C	λ, 10^{-6} $\frac{кал}{см \cdot сек \cdot град}$	Литература
Азот	N_2	—196	0	57,4	[3]
Азота двуокись	NO_2	—	55	95,7	[10]
» закись	N_2O	—88	0	33,6	[3]
» окись	NO	—152	0	56,4	[3]
Аммиак	NH_3	—33	0	52,2	[3]
Аргон	Ar	—185	0	39,0	[3]
Вода	H_2O	100	100	56,1—58,9	[1,3,6]
			300	103,9	[1, 6]
			500	164	[1, 6]
			700	234	[1, 6]
Вода тяжелая	D_2O	101,4	100	57	[1]
			300	106	[1]
			500	173	[1]
Водород	H_2	—253	0	401	[3]
Воздух			—191,1	18,2	[10]
			0	57,5	[3,1]
			200	88	[3]
Гелий	He	—269	0	342	[3]
Кислород	O_2	—183	0	57,5	[3]
Криптон	Kr	—153	0	20,9	[3]
Ксенон	Xe	—107	0	12,3	[3]
Неон	Ne	—246	0	109,5	[3]
Сероводород	H_2S	—62	0	30,4	[3]
Серы двуокись	SO_2	—10	0	19,8	[3]
Уран шестифтористый	UF_6	56	100	21,4	[3]
Хлор	Cl	—35	0	17,8	[3]

где λ — коэффициент теплопроводности, *кал/(см·сек·град)*; $T_{кип}$ — температура кипения, °K; ρ — плотность жидкости, *г/см*^{3}; C_P — удельная теплоемкость при постоянном давлении, *кал/(г·град)*; N — число атомов в молекуле жидкости. С понижением температуры коэффициенты теплопроводности жидкостей увеличиваются. В интервале температур $-50 < t < +50$°C зависимость $\lambda(t)$ может быть приближенно представлена выражением:

$$\lambda(t) \simeq \lambda(0)\left[1 + 0{,}01\, t\left(\sqrt{T_{кип}}/23{,}5 - 1\right)\right].$$

Вода и глицерин представляют исключение.

У всех жидкостей коэффициент теплопроводности возрастает с ростом давления. Это увеличение практически несущественно до давлений 50 *атм*. При высоких давлениях P, достигающих 12 000 *атм*, коэффициент теплопроводности при температуре 0°C можно рассчитать по формуле:

$$\lambda(p) \approx \lambda(0)\left[1 + (\rho T_{кип})^{-1/2}\,(P/144)^{2/3}\right],$$

где P — избыточное давление, *атм*.

В табл. 15.5 приведены коэффициенты теплопроводности жидкостей при температуре 0°C (если не указано другое значение температуры).

Таблица 15.5

Коэффициенты теплопроводности жидкостей

Жидкость	Формула	$t_{кип}$, °C	$\lambda \cdot 10^{-6}$, $\frac{кал}{см \cdot сек \cdot град}$	Литература
Аллил бромистый	C_3H_5Br	71	278	[3]
Аммиак	NH_3	—33	1200	[2]
Анилин	$C_6H_5NH_2$	184	432	[3, 4]
Ацетальдегид	CH_3COH	21	415	[3]
Ацетон	CH_3COCH_3	56	406	[3]
Бензол	C_6H_6	80	365	[3, 4]
Бромбензол	C_6H_5Br	56	280	[3]
Бромоформ	$CHBr_3$	149	254	[3]
о-Бромфенол	C_6H_4OHBr	195	318	[3]
Бутилацетат	$CH_3COOC_4H_9$	125	402	[3]
Вода при t=0°C	H_2O	100	1350	[3]
100°C			1631	[1, 6]
200°C			1569	[1]
350°C			978	[1]
Вода тяжелая при t=0°C	D_2O	101.4	1335	[3]
100°C			1522	[1, 6]
200°C			1419	[1, 6]
350°C			833	[1, 6]
Гексан	C_6H_{12}	69	355	[3]
Глицерин	$(CH_2OH)_2CHOH$	290	680	[3]
Дихлорметан	CH_2Cl_2	41	372	[3]
Дихлорпропан	$C_3H_6Cl_2$	97	310	[3]
Дихлорэтан	$C_2H_4Cl_2$	83	350	[3]
Кислота муравьиная	$CHOOH$	101	648	[3]
» пропионовая	CH_3CH_2COOH	141	420	[3]
» серная	H_2SO_4	330	715	[3]
» стеариновая	$CH_3(CH_2)_{16}COOH$	387	400	[3]
» уксусная	CH_3COOH	118	450	[3]
Метилацетат	CH_3COOCH_3	57	390	[3]
Метил иодистый	CH_3I	42	237	[3]
Метилформиат	$HCOOCH_3$	33	480	[3]
Нитробензол	$C_6H_5NO_3$	211	397	[3]
Нитрометан	CH_3NO_2	101	508	[3]
о-Нитротолуол	$C_6H_4CH_3NO_2$	222	366	[3]
Пентахлорэтан	C_2HCl_5	162	305	[3]
Пиридин	C_5H_5N	115	440	[3]
Пропанол	C_3H_7OH	97	410	[3]
Сероуглерод	CS_2	46	336	[3]
Спирт аллиловый	C_3H_5OH	103	455	[3]
» метиловый	CH_3OH	65	530	[3]
» этиловый	C_2H_5OH	78	440	[3]
Тетрахлорэтан	$C_2H_2Cl_4$	146	285	[3]
Тетрахлорэтилен	C_2Cl_4	121	308	[3]
Трихлорэтилен	C_2HCl_3	87	290	[3]
Толуол	$C_6H_5CH_3$	111	330	[3]
Углерод четыреххлористый	CCl_4	77	268	[3]
Фреон-11	CCl_3F	22	250	[3]
Фреон-12	CCl_2F_2	—30	225	[3]
Фреон-21	$CHCl_2F$	9	290	[3]
Фреон-22	$CHClF_2$	—41	265	[3]
Фреон-113	$C_2Cl_3F_3$	46	225	[3]
Фреон-114	$C_2Cl_2F_4$	4	215	[3]
Фторбензол	C_6H_5F	85	312	[3]
Хлорбензол	C_6H_5Cl	133	317	[3]
Хлороформ	$CHCl_3$	61	300	[3]
о-Хлорфенол	C_6H_4OHCl	76	364	[3]
Этил бромистый	C_2H_5Br	38	269	[3]
» иодистый	C_2H_5I	72	230	[3]
Этиленгликоль	CH_2OHCH_2OH	198	635	[3]
Этилформиат	$HCOOC_2H_5$	54	407	[3]

15.4. СПЛАВЫ

В табл. 15.6—15.15 приведены коэффициенты теплопроводности сплавов при различных температурах. Для некоторых сплавов и сталей в первой колонке таблиц дано название или сокращенное наименование согласно ГОСТу. В скобках приведены устаревшие названия. Число перед химическим символом элемента, входящего в сплав, означает его массовое содержание в сплаве.

Таблица 15.6

Коэффициенты теплопроводности сталей [6]

Марка стали	t, °С	λ, $\frac{кал}{см \cdot сек \cdot град}$
Ст. 20	27	0,136
	527	0,10
	927	0,0645
Ст. 35	27	0,115
	527	0,0955
	927	0,0715
Ст. 45	27	0,115
	527	0,0885
	927	0,055
Ст. 65Г	27	0,107
	727	0,0575
Ст. У8	27	0,12
	527	0,0815
	927	0,062
13Н2ХА, 15ХА, 15Х, 20Х	27	0,093
	927	0,072
30ХГС, 30ХГСА	27	0,0925
	927	0,084
15ХМ	27	0,10
	927	0,075
30ХМ, 30ХМА	27	0,092
	927	0,0835
1Х11МФ, 1Х12ВНМФ	27	0,10
	927	0,074
12Х1МФ	27	0,10
	927	0,086
15Л, 20Л÷55Л	27	0,109
	927	0,0785
Х5М	—73	0,105
	1127	0,081
1Х13 (ЭЖ1)	—73	0,0735
	1127	0,079
2Х12ВМБФР (ЭИ 993)	—73	0,079
	1127	0,072
4Х13 (ЭЖ4)	—73	0,078
	1127	0,0755
1Х12В2МФ (ЭИ756)	—73	0,0727
	1127	0,0768
Х18Н9Т (1Х18Н9Т, ЭЯ1Т)	—73	0,0323
	427	0,048
	1127	0,067
0Х18Н12Б(Х18Н11Б, ЭИ402)	—73	0,0325
	427	0,0484
	927	0,0622
Х23Н18 (ЭИ417)	—73	0,0323
	1127	0,0434
Х17Н13М2Т (Х18Н12М2Т, ЭИ448)	—73	0,033
	1127	0,0424
1Х16Н13М2Б (ЭИ680),	—73	0,0328
3Х19Н9МВБТ (ЭИ572)	1127	0,0419
Х16Н25М6 (ЭИ395)	—73	0,0304
	1127	0,0461

Продолжение табл. 15.6

Марка стали	t, °С	λ, $\frac{кал}{см \cdot сек \cdot град}$
ХН35ВТ (ЭИ612), ХН35ВТР (ЭИ725), ХН35ВМТ (ЭИ692)	—73	0,0316
	1127	0,0455
Х22Н26, ВЖ100	—73	0,0258
	727	0,056
ХН78Т (ЭИ435, Нимоник-80, США)	27	0,030
ХН77ТЮР (ЭИ437Б),	627	0,0545
ХН77ТЮ (ЭИ437А)	—73	0,0263
ХН80ТБЮ (ЭИ607,	727	0,0575
Инконель X, США)	—73	0,0263
ХН70ВМЮТ (ЭИ765),	1127	0,0645
ХН70ВМТЮ (ЭИ617)	—73	0,0167
	1127	0,0575
ХН60Ю (ЭИ559)	—73	0,0191
	1127	0,070
ХН60В (ЭИ868)	—73	0,0215
	727	0,054
Армко-железо (0,023% С; 0,007% Si; 0,025% Mn; 0,007% P; 0,02% S; остальное Fe)	0	0,186
Чугун	27	0,07—0,14

Таблица 15.7

Коэффициенты теплопроводности сплавов меди [3, 6]

Сплав (состав, вес. %)	t, °С	λ, $\frac{вт}{м \cdot град}$
Бронза:		
ОФ 10-1	27	34
	627	52
ОЦ 10-2	27	55
	627	77
ОС 10-10	27	45
	527	67
А-5	27	105
	627	153
АЖМЦ 10-3-1-5	27	59
	527	84
КМЦ 3-1	27	42
	427	54
МЦС 8-20	27	32
	627	53
Константан МНМц 40-1,5 (40%Ni+ + примесь Co; 1,5% Mn; 58,5%Cu)	0	20,9
	400	37,2
Копель МНМц 43-0,5 (56,5% Cu; 0,5% Mn; 43% Ni + примесь Co)	0	24,2
Латунь ЛАН 59-3-2, алюминиево-никелевая	27	84
	627	152
Латунь ЛМц 58-2, марганцовистая	27	70
	627	122
Латунь ЛС 59-1В, свинцовистая	27	105
	627	183
Латунь ЛО 70-1, оловянистая	27	92
	327	136
Манганин МНМц 3-12 (3% Ni; 12% Mn; 85% Cu)	0	21,7
	300	36,0

Продолжение табл. 15.7

Сплав (состав, вес. %)	t, °C	λ, $\frac{вт}{м \cdot град}$
Нейзильбер МНЦ 15-20 (15% Ni; 20% Zn; 65% Cu)	0	125
	600	229,1
Мельхиор МНЖМц 30-0,8-1	0	37,1
Томпак ЛТ 96, волоченый	27	244
	527	260
» РТ 90, прокатный	27	114
	527	288
Cu — Al (99,29% Cu; 0,71% Al)	20	175
(95,39% Cu; 4,61% Al)	20	82,9
(90,0% Cu; 10,0% Al)	20	46,9
Cu — Si (99% Cu; 1% Si)	20	82,5
(96,09% Cu; 3,91% Si)	20	36,4
Cu — P (99,925% Cu; 0,075% P)	20	238,6
(99,520% Cu; 0,480 P)	20	90,5
Cu — Mn (85% Cu; 15% Mn)	20	21,7
(70% Cu; 30% Mn)	20	12,6
Cu — Ni (98,03% Cu; 1,97 Ni)	20	171,6
(90% Cu; 10% Ni)	27	59
(82,7% Cu; 17,3% Ni)	20	34
(54% Cu; 46% Ni)	20	20,3
Cu — Zn (70% Cu; 30% Zn)	17	109 [4]
(61,5% Cu; 38,5% Zn)	20	78,7
Cu — Sn (99,01% Cu; 0,99 Sn)	20	228
(95,08% Cu; 4,92% Sn)	20	81,6
(75% Cu; 25% Sn)	27	25,1

Таблица 15.8

Коэффициенты теплопроводности сплавов никеля [3,6]

Сплав (состав, вес. %)	t, °C	λ, $\frac{вт}{м \cdot град}$
Алюмель НМцАК 2-2-1	0	32,7
Инвар (35% Ni; 65% Fe)	0	11,0
	300	12,7
Монель (68% Ni; 28% Cu; 2,5% Fe; 1,5% Mn)	0	22,1
	400	33,7
	800	46,0
Нихром (90% Ni; 10%Cr)	0	17,1
	400	24,1
Нихром (80% Ni; 20% Cr)	0	12,2
	600	22,6
Ферронихром (61% Ni; 20% Fe; 15% Cr; 4% Mn)	0	11,6
	600	13,1
Хромель ХН9 (91% Ni; 9% Cr)	0	16,0
	400	23,5

Таблица 15.9

Коэффициенты теплопроводности сплавов алюминия [3, 6]

Сплав (состав, вес. %)	t, °C	λ, $\frac{вт}{м \cdot град}$
А (примесь $<0,2\%$)	—	225
А1, А2, АД1, АД2 (примесь $<1\%$)	20	206
АВ (Al: 0,6% Cu; 0,7% Mg; 0,25% Mn)	—	209
АК4, АК4-1	27	144
	427	167
АК8 (Al; 4,4% Cu; 0,5% Mg; 0,8% Mn; 0,8% Si)	—	186
АЛ3, АЛ3В	27	163
АЛ4 (Al; 9,2% Si; 0,25% Mg; 0,38% Mn; 0,9% Fe)	27	146
Al—Li (99% Al; 1% Li)	20	125
(95% Al; 5% Li)	20	75
(90% Al; 10% Li)	20	54
АМг (Al; 2,5% Mg; 0,3% Mn; 0,1% Cu)	—	126
АМг (Al; 5% Mg; 0,35% Mn; 0,2% Cu)	—	116
АМц (Al; 0,2% Cu; 0,03% Mg; 1,3% Mn)	—	186
В95 (Al; 1,7% Cu; 2,3% Mg; 0,6% Mn; 6% Zn)	—	143
Д1 (Al; 4,3% Cu; 0,6% Mg; 0,6% Mn)	—	170
Д16 (Al; 4,4% Cu; 1,5% Mg; 0,6% Mn)	—	169
Д18 (Al; 2,6% Cu; 0,35% Mg; 0,2% Mn)	—	174
Al—Si (95% Al; 5% Si)	20	142
(88% Al; 12% Si)	20	176
(80% Al; 20% Si)	20	160
$\alpha\gamma$ (Al; 12% Si; 0,35% Mg; 0,28% Fe; 0,29% Mn)	20	186
RR-77 (Al; 2,2% Cu; 2,5% Mg; 4,96% Zn)	20	163
Y (Al; 3,76% Cu; 1,85% Ni; 1,33% Mg)	20	182

Таблица 15.10

Коэффициенты теплопроводности сплавов титана [3. 6]

Сплав (состав, вес. %)	t, °C	λ, $\frac{кал}{см \cdot сек \cdot град}$
ВТ, ВТ1-1 (Ti; 0,1% C; 0,3%Fe; 0,15% Si; 0,15% O)	27	0,0397
ВТ3 (Ti; ~5% Al; ~2,5% Cr)	27	0,017
ВТ4 (Ti; ~4,2% Al; ~1,4% Mn)	27	0,0215
ВТ5-1 (Ti; 5% Al; 2,5% Sn)	27	0,0179
ВТ6 (Ti; ~5,5% Al; 4% V)	27	0,0179
ВТ8 (Ti; ~6,3% Al; 3,3% Mo)	27	0,017
ВТ14 (Ti; 4% Al; 3% Mo; 1% V)	27	0,020
ВТ15 (Ti; 3% Al; 8% Mo; 11% Cr)	27	0,0191
ВТ16 (Ti; 2,5% Al; 7,5% Mo)	27	0,0251
ОТ3 (Ti; ~2%Al; ~1,4% Mn)	27	0,0217
ОТ4 (Ti; 3% Al; 1,5% Mn)	27	0,0198
(92,5% Ti; 2,5% Sn; 5,0% Al)	50	0,0183
	400	0,0277
(89,5% Ti; 4,0% Al; 4,0% Mo; 2,0% Sn; 0,5% Si)	50	0,0185
	400	0,0275
(96% Ti; 2,0% Mn; 2,0% Al)	50	0,0237
	400	0,033

Таблица 15.11

Коэффициенты теплопроводности сплавов магния [3, 6]

Сплав (состав, вес.%)	t, °C	λ, $\frac{вт}{м \cdot град}$
МА1 (Mg; 0,3% Al; 0,1% Zn; 2,5% Mn)	—	151
МА2 (Mg; 4% Al; 0,8% Zn; 0,5% Mn)	—	104
МА3 (Mg; 6% Al; 1% Zn; 0,5% Mn)	—	96
МА5 (Mg; 8% Al; 0,5% Zn; 0,5% Mn)	—	83,7
Магнокс А12 (Mg; 1,15% Al; 0,45% Be)	0	120
МЛ2 (Mg; 0,2% Al; 0,2% Zn)	—	127
МЛ3 (Mg; 3,6% Al; 1,5% Zn; 0,5% Mn)	—	106
МЛ4 (Mg; 6% Al; 2,5% Zn; 0,5% Mn)	—	79
МЛ5 (Mg; 8,5% Al; 0,5% Zn; 0,3% Mn)	—	75
МЛ6 (Mg; 10% Al; 0,3% Mn)	—	74
AZ61 (Mg; 6,5% Al; 1,1% Ir; 0,5% Mn)	27	82,9
M15Z (Mg: 0,5% Zr; 0,1% Mn; 0,53% Zn)	27	120
M25 (Mg; 0,37% Zr; 0,24% Mn)	27	114
M15C (Mg; 0,57% Zr; 0,1% Mn; 1,36% Ce)	27	109
W1635 (Mg; 5,56% Ni)	50	142
W1662 (Mg; 3,17% Ce; 1,8% Mn)	50	117
W1648 (Mg; 2,65% Ce; 5,36% Ni)	50	130
W1702 (Mg; 2,2% Ce; 2,4% Co; 1,6% Mn)	50	132
ZW1 (Mg; 0,7% Ir; 1,5% Zr)	27	133

Таблица 15.12

Коэффициенты теплопроводности сплавов урана [6]

Сплав (состав, вес.%)	t, °C	λ, $\frac{вт}{м \cdot град}$
99,0% U; 1,0% Al	—73	14,1
	227	13,9
	627	13,6
90% U; 10% Al	—73	10,1
	227	9,9
	627	9,8
70% U; 30% Al	—73	30,6
	227	29,3
	527	27,9
50% U; 50% Al	—73	68,2
	427	34,4
10% U; 90% Al	27	186,0
99,65% U; 0,35% V	300	28,9
99,89% U; 0,11% Cr	300	31,0
95% U; 5% Zr	27	14,5
90% U; 10% Zr	27	14,0
80% U; 20% Zr	27	9,0
30% U; 70% Zr	27	6,0
95% U; 5% Mo	27	25,08
70% U; 30% Mo	27	26,75
30% U; 70% Mo	27	67,45
10% U; 90% Mo	27	108,16
95% U; 5% Fe	27	24
90% U; 10% Fe	27	22

Продолжение табл. 15.12

Сплав (состав, вес. %)	t, °C	λ, $\frac{вт}{м \cdot град}$
80% U; 20% Fe	27	18
30% U; 70% Fe	27	33
67% U; 33% Be	77	105
	427	75
	1027	45
53,1% U; 46,9% Bi	27	21
36,3% U; 63,6% Bi	27	17
70% U; 20% Pu; 10% продукты деления	50	9,63
	300	15,91
	600	23,86
	800	30,14
20% U; 80% Th	600	41
10% U; 90% Th	600	42

Таблица 15.13

Коэффициенты теплопроводности сплавов свинца [6]

Сплав (состав, вес.%)	λ, $\frac{вт}{м \cdot град}$
Баббит Б6	21
Б16	25
Б83	33
Б89	39
Припой ПОС-18	38
ПОС-30	39
Сплав 90,25% Pb; 8% Sb; 1,75% As	11,3

Таблица 15.14

Коэффициенты теплопроводности сплавов циркония [3, 6]

Сплав (состав, вес.%)	t, °C	λ, $\frac{вт}{м \cdot град}$
92% Zr; 8% U	100	14,5
	450	17,0
91% Zr; 8% U; 1% H	100	19,5
	400	17,2
99,06% Zr; 0,1% C; 0,84% Sn	250	15,9
97,5% Zr; 2,3% Sn; 0,1% C; 0,1% O	250	12,5
92,2% Zr; 7,6% Mo; 0,1% C; 0,1% O	250	14,6
90% Zr; 9,8% Nb; 0,2% C	250	14,6

Таблица 15.15

Коэффициенты теплопроводности сплавов Na, K, Bi и других металлов

Сплав (состав, вес.%)	t, °C	λ, $\frac{кал}{см \cdot сек \cdot град}$	Источник
56% Na; 44% K; $t_{пл} = 19°$ C, $t_{кип} = 825°$C	19	0,059	[6]
	427	0,066	[6]
	927	0,0744	[6]
22% Na; 78% K; $t_{пл} = -11,5°$C, $t_{кип} = 784°$C	—11,7	0,0495	[6]
	427	0,063	[6]
	927	0,0574	[6]
55,5% Bi; 44,5% Pb; $t_{пл} = 123,4°$C	150	0,0268	[6]
	700	0,0400	[6]
50% Bi; 31% Pb; 19% Sn	0	0,0406	[6]
48% Bi; 26% Pb; 13% Sn; 13% Cd	0	0,0311	[6]
67% Be; 33% Al	27	0,0458	[6]
64% Be; 36% Al	27	0,0511	[6]
57% Be; 43% Al	27	0,046	[6]
90% Pt; 10% Ir	17	0,074	[4]
90% Pt; 10% Rh	17	0,072	[4]
Сплав Вуда	—	0,0319	[4]
92% Au; 8% Pt	18	0,191	[8]
55% Au; 45% Pt	18	0,050	[8]
4% Au; 96% Pt	18	0,110	[8]

15.5. ОГНЕУПОРНЫЕ МАТЕРИАЛЫ И ВЫСОКОТЕМПЕРАТУРНЫЕ КОМПОЗИЦИИ ЯДЕРНОГО ГОРЮЧЕГО

Таблица 15.16

Коэффициент теплопроводности огнеупорных материалов

Материал (состав, вес.%)	ρ, $\frac{г}{см^3}$	t, °C	λ, $\frac{вт}{м \cdot град}$	Литература
Графит реакторный (вдоль направления прессования)	1,7	—173	210	[6]
		423	100	[6]
		1423	46,9	[6]
Графит реакторный (перпендикулярно к направлению прессования)	1,7	—173	160	[6]
		423	75,7	[6]
		1423	40,2	[6]
Карборунд (19,52% Al_2O_3; 25,64% SiO_2; 49,39% SiC; 5,01% MgO; 0,44% Fe_2O_3)	2,19	300	4,81	[3]
		1100	3,89	[3]
Корунд (81,54% Al_2O_3; 15,35% SiO; 1,27% MgO; 1,84% Fe_2O_3)	2,72	300	2,36	[3]
		1100	2,08	[3]
Муллит ($3Al_2O_3 \cdot 2SiO_2$)	~2,5	100	5,73	[7]
		1200	3,64	[7]
Периклаз	—	0	41,8	[3]
		1100	5,86	[3]
Силлиманит (62,96% Al_2O_3; 34,87% SiO_2; 0,91% MgO; 1,26% Fe_2O_3)	2,12	300	1,31	[3]
		1100	1,50	[3]
Шамот (68,80% SiO_2; 31,06% Al_2O_3; 1,19% Fe_2O_3; 1,95% MgO)	1,84	300	0,88	[3]
		1100	1,09	[3]
Шпинель ($MgO \cdot Al_2O_3$)	3,27	100	13,8	[7]
		1200	5,02	[7]
Форстерит ($2MgO \cdot SiO_2$)	2,22	100	3,68	[7]
		1200	1,63	[7]
Циркон ($ZrO_2 \cdot SiO_2$)	3,69	200	4,6	[7]
		1400	3,1	[7]

Таблица 15.17

Коэффициенты теплопроводности окислов [6, 7]

Окисел	ρ, $\frac{г}{см^3}$	t, °C	λ, $\frac{кал}{см \cdot сек \cdot град}$
Al_2O_3 (глинозем)	3,7—3,8	100	0,069
		1600	0,0138
BeO	2,7—2,86	100	0,500
		1600	0,0346
CaO (известь)	3,0—3,1	100	0,0333
		1000	0,0170
SiO_2 (кремнезем)	2,3—2,6	127	0,0167
		827	0,012
MgO (жженая магнезия)	3,3—3,5	100	0,0823
		1600	0,0157
NiO	5,0—5,1	600	0,010
TiO_2	4,0—5,1	600	0,0083
ZnO	3,72	600	0,011
ZrO_2	5,2—5,35	100	0,004
		1400	0,005

Таблица 15.18

Коэффициенты теплопроводности карбидов [6, 7]

Карбид	ρ, $\frac{г}{см^3}$	t, °C	λ, $\frac{кал}{см \cdot сек \cdot град}$
SiC	3,23	—73	0,086
	3,08	527	0,0455
	—	1527	0,0287
	—	2227	0,0335
Be_2C	2,3—2,4	27	0,0765
	—	627	0,043
ZrC	6,6	27	0,0478
TiC	4,92	—23	0,079
	4,75	427	0,0263
NbC	7,82	127	0,0335
		~1600	0,105
Nb_2C	7,85	127	0,0455
TaC	14,5	~20	0,0525
Ta_2C	15,5	~20	0,086
Mo_2C	9,18	~20	0,0167
VC	5,48	~20	0,0598
V_2C	5,75	~20	0,0717
WC	15,65	~20	0,0694
W_2C	17,30	~20	0,086
HfC	12,67	127	0,0155
Cr_3C_2	6,68	~20	0,031
B_4C	—	~200	0,07—0,2

Таблица 15.19

Коэффициенты теплопроводности силицидов при $t = 27°C$ [6]

Соединение	ρ, $\frac{г}{см^3}$	λ, $\frac{кал}{см \cdot сек \cdot град}$	Соединение	ρ, $\frac{г}{см^3}$	λ, $\frac{кал}{см \cdot сек \cdot град}$
$TiSi_2$	4,35	0,031	$CrSi_2$	4,4	0,0143
$ZrSi_2$	4,88	0,043	$MoSi_2$	6,3	0,0694
$NbSi_2$	5,45	0,062	WSi_2	9,33	0,0454
$TaSi_2$	8,83	0,0287			

Таблица 15.20

Коэффициенты теплопроводности боридов [6, 7]

Соединение	ρ, $г/см^3$	t, °C	λ, $\frac{кал}{см \cdot сек \cdot град}$
TiB_2	4,5	23	0,058
ZrB_2	6,1	23	0,058
NbB_2	6,0	23	0,040
TaB_2	11,7	23	0,026
CrB_2	5,6	—	0,0526
Mo_2B_5	8,0	—	0,0645
W_2B_5	11,0	—	0,0765
CaB_6	—	20	0,055
SrB_6	—	20	0,062
BaB_6	—	20	0,086

Таблица 15.21

Коэффициенты теплопроводности нитридов [6] при $t = 20°C$

Нитрид	ρ, $г/см^3$	λ, $\frac{кал}{см \cdot сек \cdot град}$	Нитрид	ρ, $г/см^3$	λ, $\frac{кал}{см \cdot сек \cdot град}$
TiN	5,21	0,0695	CrN	5,9	0,0765
ZrN	7,35	0,0335	Cr_2N	6,5	0,143
VN	6,04	0,074	MoN	8,6	0,0382
NbN	8,4	0,0239	Mo_3N	9,9	0,12
TaN	13,8	0,055			

Таблица 15.22

Коэффициенты теплопроводности кремнийорганических соединений [1]

Соединение	ρ, $г/см^3$	t, °C	10^{-4} $\frac{кал}{см \cdot сек \cdot град}$
Тетра-*о*-крезилоксисилан $(CH_3C_6H_4O)_4Si$	1,128	20	2,94
	0,987	200	2,53
	0,858	350	2,19
Диэтилполисилоксан (силикон)	0,956	20	3,16
	0,863	150	2,5
	0,744	300	1,75

Таблица 15.23

Коэффициенты теплопроводности высокотемпературных композиций ядерного горючего [6]

Соединение (состав, вес.%)	ρ, $\frac{г}{см^3}$	t, °C	λ, $\frac{кал}{см \cdot сек \cdot град}$
UO_2 (спеченная двуокись урана)	10,97	0	0,0278
		400	0,0177
		700	0,0108
		1500	0,006
50% PuO_2; 50% UO_2 (спеченная смесь) PuO_2	11,10	27	0,0103
	11,46	—73	0,0172
		427	0,0101
		1227	0,00527
ThO_2 (спеченная двуокись тория)	9,96	—73	0,0276
		327	0,0136
		1327	0,0055
UC	10,2	100	0,06
		400	0,053
		827	0,0634
UC_2	10,8	200	0,0306
		1600	0,0481
47% UO_2; 53% BeO (спеченная смесь)	3,2—3,6	27	0,0696
60% UO_2; 40% Al (спеченная смесь)	4,9	27	0,0167
19,9% UO_2; 80,1% C (спеченная смесь)	1,93	27	0,042
30,3% UC; 69,7% C (спеченная смесь)	2,22	27	0,136
50 об.% UO_2; 50 об.% W	—	100	0,125
		1000	0,101
60 об. % UO_2; 40 об. % Mo	—	100	0,0766
		1000	0,064
20% UO_2; 80% полиэтилен	—	20	$7,1 \cdot 10^{-4}$
20% UO_2; 20% сажа — 60% полиэтилен	—	20	$8,7 \cdot 10^{-4}$
U_3O_8	7,90	27	0,0163
UN	14,32	27	0,0406
U_3Si	15,6	27	0,0471
USi	10,4	27	0,0383
USi_3	8,15	27	0,043
USi_2	9,25	27	0,0406
U_3Si_2	12,2	27	0,0335
UAl_3	6,8	27	0,0621
UBe_{13}	4,37	27	0,0251
US	10,87	27	0,0264
$PuBe_{13}$	4,36	27	0,215
ThB_6	—	20	0,10

15.6. СТРОИТЕЛЬНЫЕ И ТЕПЛОИЗОЛЯЦИОННЫЕ МАТЕРИАЛЫ, ДРЕВЕСНЫЕ ПОРОДЫ И ПРОЧИЕ ВЕЩЕСТВА

Таблица 15.24

Коэффициенты теплопроводности некоторых строительных материалов и грунтов [3. 5]

Материал (состав, вес. %)	ρ, $\frac{г}{см^3}$	t, °С	λ, $\frac{10^{-6}\ кал}{см \cdot сек \cdot град}$
Асфальт	2,1	20	1670
Базальт [4]	—	—	5200
Бетоны (предварительно не просушенные) на легких заполнителях (пемзе) или топливных шлаках	0,6	20	390
	0,8	20	560
	1,0	20	720
	1,2	20	950
	1,4	20	1200
Бетоны (предварительно не просушенные) на доменных шлаках	0,6	20	360
	0,8	20	500
	1,0	20	640
	1,2	20	780
	1,4	20	940
Бетоны (легкие, предварительно не просушенные) на золах или кирпичном бое	0,6	20	470
	0,8	20	640
	1,0	20	860
	1,2	20	1080
	1,4	20	1360
	1,6	20	1750
Бетоны ячеистые (пенобетоны) на кварцевом песке (непросушенные)	0,6	20	720
	0,8	20	1050
	1,0	20	1440
	1,2	20	1920
	1,4	20	2360
Бетоны ячеистые (пенобетоны) на аморфном песке (предварительно не просушенные)	0,6	20	580
	0,8	20	830
	1,0	20	1050
	1,2	20	1360
	1,4	20	1700
Бетон с гравием	—	—	3580
Битум	1,05	20	2300
Боксит	3,2	—	~10 500
Вермикулит	—	—	155
Гипс (или известковый песчаник), высушенный на воздухе	0,6	—	420
	1,0	—	750
	1,6	—	1470
	2,0	—	2500
Глина огнеупорная горшечная	2,0	415	2500
	—	1028	3000
» огнеупорная высокого качества	2,05	345	2000
		969	2700
» глиноземистая огнеупорная	1,985	423	2800
	—	981	3000
Гранит [4]	2,6—2,7	—	6400—8000
Инфузорная земля	—	—	170
Кварциты	~2,63	—	~11 000
Кирпич глиноземистый 99% Al_2O_3	2,867	137	12 600
		1079	5900
90% Al_2O_3 (без пор)	2,980	129	10 200
		1089	6170
90% Al_2O_3	2,787	152	5670
		1101	4500
60% Al_2O_3	2,307	375	3300
		1044	3170

Продолжение табл. 15.24

Материал (состав, вес.%)	ρ, $\frac{г}{см^3}$	t, °С	λ, $\frac{10^{-6}\ кал}{см \cdot сек \cdot град}$
Кирпич огнеупорный:			
для доменных печей	2,419	367	3900
		1036	4400
для тяжелых условий эксплуатации (35—40% Al_2O_3)	2,195	135	3080
		1047	3360
для сверхтяжелых условий эксплуатации (~44% Al_2O_3)	2,355	1,67	3360
		1091	3750
Кирпич силикатный:			
для тяжелых условий эксплуатации (96,3% SiO_2; 0,2% Al_2O_3; 2,9% CaO)	1,874	153	3050
		1117	4300
обычный (95,8% SiO_2; 0,5% Al_2O_3; 2,9% CaO)	1,81	167	2620
		1086	4170
футеровочный (94,9% SiO_2; 1,0% Al_2O_3; 2,9% CaO)	1,714	167	2400
		1085	3900
изоляционный (пористый), (~92,5% SiO_2)	0,945	106	660
		1086	1900
Кирпич:			
магнезиальный (~93,6% MgO)	2,787	161	24 000
		906	10 200
магнезиально-хромовый (55,6% MgO; 15,4% Cr_2O_3; 14,6% Al_2O_3)	2,787	131	4280
		1080	4300
хромово-магнезиальный (34,2% MgO; 24,9% Cr_2O_3; 21,7% Al_2O_3)	3,012	160	4000
		1097	4280
хромовый (18,2% MgO; 29,7% Cr_2O_3; 34,1% Al_2O_3)	3,108	161	5170
		1127	4670
форстеритовый (50,3% MgO; 29,5% SiO_2; 10,9 Al_2O_3)	2,627	161	4300
		1084	3560
Кремень	2,5	—	4000
Мел (пикардийский)	1,9	—	~2800
Мрамор [4]	2,8	—	~6500
Пегматит	2,7	—	~6400
Порфир	2,65	—	~6400
Руда железная	~4,0	—	~7000

Таблица 15.25

Коэффициенты теплопроводности некоторых теплоизоляционных материалов растительного и искусственного происхождения [3—5]

Материал (состав, вес. %)	ρ, $\frac{г}{см^3}$	t, °С	λ, 10^{-6} $\frac{кал}{см \cdot сек \cdot град}$
Асбест волокнистый	0,47	20	375
	0,70	20	570
» прессованный	—1,9	20	890
» распушенный	0,5	20	355
	0,6	20	490
Асбестовая вата	—	—	130
Асбестовый картон	—	—	250
Асбестовая ткань	—	—	300
Ацетилцеллюлоза	1,32	20	455—700
Бумага	—	—	144—308
Вата хлопковая	—	—	62
» шлаковая	0,1—0,8	100	120—330
Войлок	—	—	86—94
Войлок стеклянный	0,1	100	120
» древесный	0,3—0,4	50	195
Воск пчелиный	—	—	89
Гуттаперча	—	—	480
Замша	—	—	150
Ипорка	~0,011	20	84
Камышит прессованный	0,215	—	122
Капок (растительный пух)	—	—	83
Картон	—	—	330
Каучук натуральный	0,086	50	100
Каучук (80% метилвинила; 20% ZnO)	—	—	1070
(80% метилвинила; 20% TiO_2)	—	—	930
(80% метилвинила; 20% $CaCO_3$)	—	—	780
(70% диметила; 18% TiO_2; 12% ZnO)	—	20	1520
Кожа	1,0	50	420—445
Лед	0,9	0	5300
Льноволокно прессованное	0,196	—	110
Льняное полотно	—	—	210
Мазонит	0,355	—	128
Опилки	—	—	120
Пеностекло	0,150	20	120
Песок (морской, $\varnothing_{средн} = 0{,}2$ *мм*)	1,63	50	720
Пробка измельченная	0,037	50	95
» прессованная	0,4	—	158
Пряжа хлопковая	—	—	43
Полистирол	1,06	20	195
Резина вулканизованная:			
38% каучука	—	20	700
50% каучука	—	20	530
Сажа	—	100	70
Слюда (перпендикулярно к слоям)	2,5	20	570
Снег уплотненный	—	—	510
Стиропор	0,025	20	92
Тальк (природный магниевый силикат)	2,6	20	~6500
Торф измельченный	0,1	50	133
Фарфор	—	—	2500
Фланель	—	—	230
Целлюлоза	—	—	1100
Целотекс	—	20	120
Шелк	0,1	0	95÷120
Шелковая шерсть	0,058	0	80
Шлак	—	—	2000
Эбонит	—	—	420

Таблица 15.26

Коэффициенты теплопроводности древесины [3, 4]

Приведены коэффициенты теплопроводности древесины в направлении, перпендикулярном к волокнам. Экспериментально установлено, что теплопроводность вдоль волокон в два-три раза выше теплопроводности перпендикулярно к волокнам. Значения λ приведены для содержания воды в древесине 12% веса сухой древесины, что соответствует среднему влагосодержанию древесины в воздухе с влажностью 60% при комнатной температуре. Коэффициент теплопроводности сухой древесины $\lambda \approx \approx 0{,}0232 + 0{,}174\ \rho$, $вт/(м \cdot град)$, где ρ — плотность древесины, $г/см^3$.

Порода дерева	ρ, $\frac{г}{см^3}$	λ, $\frac{вт}{м \cdot град}$
Бальзовое	~0,125	0,045
Береза	~0,72	0,15
Береза желтая	0,68	0,117
Дуб	~0,85	0,171
Дуб белый	0,74	0,139
» красный	0,72	0,138
Ель аляскинская	0,425	0,079
Ильм белый	0,52	0,105
Кедр красный	0,47	0,095
» красный западный	0,4	0,082
Кипарис красный	~0,385	0,099
Клен белый	0,63	0,12
» черный	0,71	0,134
Лиственница	~0,6	0,128
Лиственница западная	0,62	0,114
Пихта	—	0,037
» (вдоль слоев)	—	0,127
» дугласова	0,53	0,089
» колорадская	0,4	0,075
Пробковое	—	0,04
Секвойя	0,5	0,11
Сосна белая	0,44	0,095
» желтая длиннохвойная	0,61	0,11
» » короткохвойная	0,54	0,111
» норвежская	0,48	0,096
» пондозова	0,49	0,096
» сахарная	0,41	0,080
Тополь	~0,45	0,100
Фанера	—	0,125
Хемлок восточный	0,46	0,093
» калифорнийский	0,46	0,087
Ясень	~0,7	0,145
Ясень белый	0,64	0,12

Таблица 15.27

Коэффициенты теплопроводности стекол [3. 10]

Название	ρ, г/см³	t, °С	λ, $\frac{вт}{м \cdot град}$
Бетол	—	—78	0,129
Викор	—	20	1,32
Крон бариево-фосфатный	—	45	0,758
» боросилнкат	—	—150	0,494
		45	1,13
		100	1,36
» калийно-фосфатный	—	45	0,825
» обыкновенный	—	45	1,00
» фосфат	—	0	0,753
Кварц плавленый	—	100	1,46
Сера плавленая	—	0	0,197
Пирекс	2,23	20	1,14
Стекло:			
A	2,22	20	1,13
B	2,27	20	1,13
C	2,45	20	1,07
D	2,52	20	1,00
E	2,42	20	1,00
F	2,55	20	1,10
G	3,19	20	0,829
H	3,18	20	0,749
I	3,55	20	0,749
J	3,56	20	0,778
K	4,29	20	0,70
кремнеземное	—	0	1,390
L	6,10	20	0,536
Флинт обыкновенный	—	0	0,795
» тяжелый	—	0	0,783
Хрусталь	~2,72	20	0,896

Таблица 15.28

Коэффициенты теплопроводности масел и некоторых продуктов перегонки нефти

Вещество	t, °С	λ, $\frac{вт}{м \cdot град}$	Литература
Бензин Б-70	—50	0,131	[1]
	50	0,1105	[1]
Вазелин	25	0,184	[4]
Газолин	30	0,138	[3]
Глицерин	20	~0,276	[1, 3, 4]
Керосин Т-1	—50	0,127	[1]
	0	0,119	[1]
	150	0,0965	[1]
Масло касторовое	20	0,178	[4]
» оливковое	20	0,165	[4]
» парафиновое	30	0,123	[3]
» трансформаторное № 1	30	0,132	[3]
» » № 3	30	0,124	[3]
» Ministry of works	25	0,108	[3]
» Medium cylinder oil	30	0,153	[3]
» Mobiloil B	30	0,157	[3]
» Rabbeth Spindle oil	30	0,143	[3]
» Red oil	30	0,141	[3]
» Velocite B	30	0,143	[3]
Нефть	—	0,140	[4]
Парафин	30	0,123	[1, 3]
Парафин медицинский	30	0,118	[3]
Топливо дизельное	20	0,117	[1]

Таблица 15.29

Коэффициенты теплопроводности некоторых диэлектрических монокристаллов и кристаллических тел [3]

Кристалл	Химическая формула	Температура плавления $T_{пл}$, °К	λ, $\frac{кал}{см \cdot сек \cdot град}$ при $t = T_{пл}$	λ, $\frac{кал}{см \cdot сек \cdot град}$ при $t = 0$°С
Алмаз	C	3950	0,104	1,5
Бромистый аммоний	NH_4Br	815	0,00215	0,0064
Бромистый калий	KBr	1003	0,0027	0,0100
Бромистый натрий	NaBr	1029	0,00215	0,00809
Иодистый калий	KI	953	0,0021	0,0073
» рубидий	RbI	915	0,0037	0,0122
Кальцит	$CaCO_3$	1612	0,00172	0,0102
Корунд	Al_2O_3	2323	0,00775	0,0659
Кремнезем (кварц)	SiO_2	1900	0,00477	0,0332
Магнезия	MgO	2773	0,0139	0,1408
Нитрат бария	$Ba(NO_3)_2$	868	0,00131	0,00417
Окись бериллия	BeO	2843	0,035	0,364
Сернистый цинк	ZnS	1850	0,0115	0,0778
Фтористый барий	BaF_2	1573	0,00502	0,0289
Фтористый калий	KF	1129	0,00407	0,0168
Фтористый кальций	CaF_2	1634	0,00437	0,0262
Фтористый литий	LiF	1143	0,00675	0,0282
Хлорат натрия	$NaClO_3$	550	0,00152	0,00306
Хлористый аммоний	NH_4Cl	793	0,00207	0,00602
Хлористый калий	KCl	1050	0,0064	0,0245
Хлористый натрий	NaCl	1074	0,00605	0,0237
Хлористый рубидий	RbCl	987	0,0029	0,0105

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Варгафтик Н. Б.** Справочник по теплофизическим свойствам газов и жидкостей. Изд. 2-е. М., «Наука», 1972.
2. **Рид Р., Шервуд Т.** Свойства газов и жидкостей. Пер. с англ. М., Гостоптехиздат, 1964
3. **Миснар А.** Теплопроводность твердых тел, жидкостей, газов и их композиций. Пер. с франц., М., «Мир», 1968.
4. **Handbook** of Chemistry and Physics. Chemical rubber publishing Co., Cleveland, Ohio, s. a.
5. **Кэй Дж., Лэби Т.** Таблицы физических и химических постоянных. Пер. с англ. Под ред. К. П. Яковлева. М., Физматгиз, 1962.
6. **Чиркин В. С.** Теплофизические свойства материалов ядерной техники. М., Атомиздат, 1968.
7. **Техника** высоких температур. Под ред. И. Э. Кэмпбелла. Пер. с. англ. М., Изд-во иностр. лит., 1959.
8. **Landolt-Börnstein.** Physikalisch-Chemische Tabellen. Berlin, 1931.
9. **Gmelins** Handbuch der Anorganischen Chemie. Berlin, Weinheim, 1927—1959.
10. **Техническая** энциклопедия. Справочник. Т. 7. М., «Советская энциклопедия», 1931.

ГЛАВА 16

ВЯЗКОСТЬ

Сила сопротивления сдвигу τ, возникающая при относительном движении двух слоев жидкости или газа, пропорциональна градиенту скорости v в направлении нормали к потоку жидкости или газа:

$$\tau = \eta dv/dn.$$

Коэффициент пропорциональности η называют *динамической вязкостью*. В системе СГС динамическая вязкость измеряется в *г/(см·сек)*, в системе СИ — в *кг/(м·сек)*.

Величина φ, обратная динамической вязкости, называется *текучестью*. Единица текучести в системе СИ — $м^2/(н \cdot сек)$.

Кинематической вязкостью называется отношение динамической вязкости η к плотности жидкости ρ:

$$\nu = \eta/\rho.$$

В системе СГС кинематическая вязкость измеряется в $см^2/сек$, в системе СИ — в $м^2/сек$.

Для газов зависимость η от абсолютной температуры T определяется формулой

$$\eta_T = \eta_{T0} \sqrt{\frac{T}{T_0}} \frac{1 + C/T_0}{1 + C/T},$$

где C — постоянная Сезерленда.

16.1. ВЯЗКОСТЬ ГАЗОВ И ПАРОВ ПРИ ДАВЛЕНИИ ВЫШЕ АТМОСФЕРНОГО

Таблица 16.1

Вязкость водорода η, 10^{-8} *кг/(м·сек)* [1]

P, *атм*	Температура, °С						
	15	25	50	100	150	200	250
1	866	886	935	1030	1125	1210	1295
50	875	895	943	1040	1130	1215	1300
100	885	905	952	1050	1140	1220	1305
200	910	931	977	1070	1155	1235	1315
300	943	960	1005	1090	1175	1250	1330
400	975	994	1035	1115	1195	1265	1340
500	1010	1030	—	1140	1215	1283	1355
600	1050	—	—	1165	1235	1300	1370
800	1120	—	—	1220	1280	1335	1400

Таблица 16.2

Вязкость азота η, 10^{-8} *кг/(м·сек)* [1]

P, *атм*	Температура, °С							
	0	25	50	75	100	150	200	300
1	1665	1775	1880	1985	2090	2280	2460	2640
20	1695	1805	1905	2010	2115	2300	2480	2655
50	1760	1860	1955	2050	2155	2340	2510	2680
100	1905	1985	2060	2145	2230	2400	2565	2730
150	2090	2135	2180	2245	2325	2475	2630	2780
200	2300	2305	2325	2370	2430	2565	2700	2845
300	2750	2680	2645	2655	2675	2760	2860	2980
400	3200	3075	2995	2965	2940	2970	3025	3120
500	3675	3460	3335	3260	3220	3190	3210	3275
600	4125	3850	3670	3565	3490	3405	3390	3430
700	—	4225	3995	3865	3765	3630	3580	3590
800	—	4580	4325	4160	4030	3850	3770	3750

Таблица 16.3

Вязкость кислорода η, 10^{-8} *кг/(м·сек)* [1]

P, *атм*	Температура, °С			P, *атм*	Температура, °С	
	15	50	100		15,8	54,8
1	1993	2182	2437	1	1997,5	2207
22	2013	2211	2460	20	2024,0	—
42	2055	2249	2490	50	2093,5	2288
62	2114	2295	2525	100	2250,0	2434
82	2188	2345	2564	150	2451,5	2610
102	2269	2401	2608	200	2688,5	—
122	2351	2463	2655	300	3220	—
				400	3769	—
				500	4330	—
				600	4862,0	—
				700	5392,0	—

Таблица 16.4

Вязкость гелия η, 10^{-8} *кг/(м·сек)* [1]

P, *атм*	Температура, °С			
	—50,1	—24,8	0,0	25,0
69,05	1601	1724	1855	1990
137,1	1622	1734	1853	1983
205,15	1654	1758	1876	2007
273,2	1668	1781	1884	2015
409,25	1734	1839	1931	2042
545,4	1794	1880	1993	2103
681,5	1879	1971	2068	2154

Таблица 16.5

Вязкость аргона η, 10^{-8} *кг/(м·сек)* [1]

P, *атм*	Температура, °С					
	0	15	25	50	100	200
1	2095	2190	2250	2400	2695	3225
25	2180	2265	2320	2465	2745	3265
50	2290	2370	2425	2555	2815	3330
100	2585	2640	2680	2780	2995	3440
150	2910	2920	2935	3010	3195	3570
200	3265	3225	3225	3265	3390	3715
300	4030	3885	3830	3780	3800	4000
400	4865	4625	4510	4355	4220	4290
475	—	—	—	—	—	4520

Таблица 16.6

Вязкость воздуха η, 10^{-8} *кг/(м·сек)* [1]

P, атм	Температура, °С						
	0	14	16	25	50	90	100
1	1720	1786	1795	1837	1955	2135	2180
20	—	1816	1825	—	1980	2170	—
50	1815	1877	1885	1922	2032	2200	2240
100	1970	2018	2025	2060	2150	2298	2335
150	2165	2190	2195	2215	2280	2390	2420
200	2370	2382	2385	2395	2435	2510	2530
250	2605	2589	2590	2590	2600	2640	2650
300	2860	2820	2815	2800	2780	2800	2810

Таблица 16.7

Вязкость окиси углерода η, 10^{-8} *кг/(м·сек)* [1]

P, атм	Температура, °С						
	0	25	50	100	150	200	250
2	1660	1765	1870	2075	2270	2450	2625
20	1690	1795	1900	2105	2290	2470	2645
50	1750	1850	1945	2145	2320	2500	2670
100	1895	1990	2050	2225	2385	2560	2715
150	2080	2140	2175	2320	2465	2630	2770
200	2300	2305	2315	2430	2550	2710	2830
300	2740	2680	2640	2680	2765	2870	2970
400	3175	3065	2985	2950	2970	3035	—
500	3600	3450	3330	3225	3185	3200	—
600	—	3825	3660	3490	3405	3400	—
800	—	4550	4300	4010	3820	3760	—

Таблица 16.8

Вязкость углекислого газа η, 10^{-8} *кг/(м·сек)* [1]

P, атм	Температура, °С								
	20	30	40	60	90	100	150	200	250
1	1463	1510	1560	1 650	1790	1825	2045	2254	2456
20	1560	1590	1630	—	1820	1855	2075	2280	2485
50	1850	1830	1805	—	1900	1950	2140	2340	2540
70	2320	2500	2120	—	2030	2040	2190	2385	2590
80	2680	5310	2470	—	2110	2100	2220	2420	2610
90	8000	5980	3350	—	2200	2160	2250	2450	2640
100	8280	6500	4875	—	2300	2240	2290	2480	2665
120	8820	7300	6030	—	2590	2440	2390	2540	2730
150	9520	8080	6950	4650	3120	2850	2560	2660	2810
200	10400	9090	8000	6020	4190	3800	2980	2900	2980
250	11170	9930	8850	6980	5130	4700	3480	3200	3180
300	11820	10610	9590	7810	5960	5470	3980	3540	3380
400	12960	11780	10800	9130	7300	6780	4980	4260	3890
500	14000	12860	11850	10230	8400	7880	5920	4960	4440
600	15000	13850	12820	11200	9370	8800	6760	5640	5020
700	—	14840	13720	12110	10200	9620	7530	6280	5570
800	—	15600	14600	12950	11000	10400	8250	6900	6100

16.2. ВЯЗКОСТЬ ГАЗОВ ПРИ ДАВЛЕНИИ НИЖЕ АТМОСФЕРНОГО

Таблица 16.9

Вязкость η газов при давлении ниже атмосферного, 10^{-8} кг/(м·сек)

Водород				Гелий				Неон				Воздух		Углекислый газ	
55,05°K		20,4°K		90,27°K		14,62°K		90,08°K		20,42°K		15°C		15°C	
P, мм рт. ст.	η	P, мм рт. ст.	η	P, мм рт. ст.	η	P, мм рт. ст.	η	P, мм рт. ст.	η	P, мм рт. ст.	η	P, мм рт. ст.	η	P, мм рт. ст.	η
760	394,1	700	110,7	760	910	760	293,7	300	1344	300	359,3	750	1810	750	1490
7,31	391,0	7,19	111,8	15,4	907	3,32	293,7	9,51	1340,6	3,71	359,3	380	1828	380	1490
1,542	382,3	0,899	110,3	1,876	861,8	0,472	285,4	2,186	1303,4	0,696	344,1	20,5	1817	20	1480
0,569	356,4	0,120	101,6	0,885	816,2	0,1258	260,4	1,149	1267,7	0,217	333,9	0,978	1770	2	1470
0,260	319,2	0,0562	92,5	0,416	729,6	0,0528	221,0	0,600	1209,5	0,097	316,5	0,956	1730	0,6	1380
0,116	259,9	0,0237	74,3	0,228	620,9	0,0189	142,9	0,312	1105,4	0,0246	244,1	0,908	1643	—	—
0,0568	185,8	0,0113	52,3	0,049	275,9	0,00704	64,43	0,0772	696,5	0,0111	165,6	—	—	—	—
0,0112	56,2	0,00414	22,81	0,0105	66,9	—	—	0,0222	313,9	0,005	92,5	—	—	—	—
0,00514	23,75	0,00214	11,78	0,0057	36,67	—	—	0,0052	77,5	0,0218	39,8	—	—	—	—

16. 3. ВЯЗКОСТЬ ГАЗОВ И ПАРОВ ПРИ РАЗЛИЧНЫХ ТЕМПЕРАТУРАХ [1]

Таблица 16.10

Вязкость η газов и паров в интервале температур от —220 до 1000°C, 10^{-8} кг/(м·сек)

Температура, °C	Азот N_2	Окись азота NO	Закись азота N_2O	Аммиак NH_3	Аргон Ar	Водород H_2	Водяной пар H_2O	Воздух	Гелий He	Кислород O_2	Криптон Kr	Ксенон Xe	Метан CH_4	Неон Ne	Сернистый газ SO_2	Углекислый газ CO_2	Окись углерода CO	Этан C_2H_6	Этилен C_2H_4
—220	—	—	—	—	470	—	—	—	640	—	—	—	—	858	—	—	—	—	—
—210	—	—	—	—	550	—	—	—	716	—	—	—	—	1008	—	—	—	—	—
—200	—	—	—	—	630	332	—	520	790	—	—	—	—	1149	—	—	—	—	—
—190	—	—	—	—	710	367	—	—	862	635	—	—	336	1280	—	—	—	—	—
—180	650	—	—	—	790	399	—	663	930	710	—	—	375	1400	—	—	—	—	—
—170	718	—	—	—	870	430	—	730	995	785	—	—	414	1510	—	—	—	—	—
—160	783	—	—	—	950	460	—	800	1055	860	—	—	453	1615	—	—	—	—	—
—150	846	860	—	—	1025	488	—	860	1117	935	—	—	490	1720	—	—	—	—	—
—140	907	930	—	—	1105	516	—	922	1176	1010	—	—	528	1819	—	—	—	—	—
—130	967	1000	—	—	1180	542	—	990	1235	1085	—	—	566	1315	—	—	—	—	—
—120	1028	1064	—	—	1255	568	—	1050	1290	1150	—	—	603	2005	—	—	1030	—	—
—110	1082	1130	—	—	1325	593	—	1109	1345	1218	—	—	640	2095	—	—	1090	—	—
—100	1143	1198	—	—	1405	618	—	1170	1400	1286	—	—	677	2182	—	886	1130	552	—
—75	1285	1357	990	870	1585	677	—	1312	1526	1452	—	—	769	2388	855	1007	1275	915	623
—50	1419	1510	1115	760	1760	733	—	1445	1640	1612	—	—	860	2600	955	1126	1400	1022	703
—25	1542	1656	1240	850	1930	788	—	1582	1750	1753	—	—	946	2788	1053	1247	1528	1126	780
0	1665	1800	1360	935	2085	840	883	1708	1860	1910	2330	2110	1028	2975	1158	1367	1662	1223	855
20	1766	1899	1460	1000	2215	880	—	1812	1946	2026	2480	2255	1092	3113	1250	1463	1749	1290	915
25	1778	1920	1482	1025	2248	890	975	1840	1968	2052	2515	2290	1168	3142	1270	1486	1766	1319	929
50	1883	2035	1595	1110	2400	938	1065	1954	2065	2182	2695	2470	1185	3310	1390	1607	1872	1410	1020

Продолжение табл. 16.10

Температура, °C	Азот N_2	Окись азота NO	Закись азота N_2O	Аммиак NH_3	Аргон Ar	Водород H_2	Водяной пар H_2O	Воздух	Гелий He	Кислород O_2	Криптон Kr	Ксенон Xe	Метан CH_4	Неон Ne	Сернистый газ SO_2	Углекислый газ CO_2	Окись углерода CO	Этан C_2H_6	Этилен C_2H_4
75	1986	2156	1712	1205	2550	985	1157	2068	2175	2310	2880	2645	1260	3482	1500	1716	1980	1500	1070
100	2086	2272	1822	1285	2695	1033	1250	2180	2281	2437	3060	2820	1332	3646	1611	1827	2076	1590	1150
150	2278	2475	2040	1463	2965	1123	1435	2391	2475	2674	3400	3165	1472	3950	1830	2045	2271	1750	1280
200	2464	2682	2245	1648	3223	1213	1615	2558	2672	2867	3725	3484	1604	4248	2040	2254	2452	1910	1410
250	2639	2870	2450	1820	3462	1299	1800	2760	2875	3103	4040	3790	1725	4527	2255	2456	2622	2055	1525
300	2800	3055	2649	1990	3680	1382	1985	2942	3055	3310	4325	4080	1850	4785	2455	2646	2788	2200	1640
400	3118	3400	3030	2337	4110	1538	2350	3275	3415	3686	4850	4620	2080	5300	2820	2994	3090	2480	1900
500	3403	3700	3375	2650	4505	1686	2720	3567	3750	4030	5350	5120	2268	5796	3155	3309	3370	2700	2140
600	3665	4010	—	2925	4870	1828	3090	3842	4070	4350	5840	5600	2465	6255	3465	3605	3630	2940	2380
700	3916	4275	—	3210	5215	1965	3460	4110	4370	4652	—	—	2650	6689	3760	3876	3870	—	—
800	4160	4535	—	3480	5550	2103	3820	4365	4660	4940	—	—	2820	7100	4040	4140	4100	—	—
1000	4600	5075	—	3990	6160	2355	4560	4850	5240	5470	—	—	3135	7855	4540	4658	4530	—	—

Таблица 16.11

Вязкость η газов и паров в интервале температур от 0 до 700°C, 10^{-8} кг/(м·сек) [1]

Температура, °C	Ацетон $C_3H_6O_2$	Ацетилен C_2H_2	Бензол C_6H_6	Бром Br_2	Бромная ртуть $HgBr_2$	н-Бутан C_4H_{10}	Бутан C_4H_{10}	α-Бутилен (1-бутен) C_4H_8	β-Бутилен (2-бутен) C_4H_8	Водород бромистый HBr	Водород иодистый HI	Водород хлористый HCl	Водород фосфористый PH_3	н-Гексан C_6H_{14}	н-Гептан C_7H_{16}	Диметиловый эфир $(CH_3)_2O$	Диэтиловый эфир $(C_2H_5)_2O$	Дифенилметан $C_{13}H_{12}$	Дифениловый эфир $(C_6H_5)_2O$
0	685	955	693	1390	—	682	690	708	694	1710	1700	1320	1072	600	—	870	680	—	—
20	735	1017	746	1495	—	735	744	761	746	1843	1830	1425	1150	644	—	925	730	—	—
25	750	1033	758	1520	—	749	739	775	759	1877	1862	1450	1171	654	—	942	742	—	—
50	815	1110	822	1645	—	814	—	841	825	2040	2020	1580	1264	710	618	1020	808	605	610
75	880	1188	886	1770	—	881	—	906	889	2200	2172	1705	1358	765	667	1095	870	653	657
100	945	1265	950	1890	—	947	—	971	952	2365	2323	1830	1451	820	716	1168	930	700	703
150	1076	1417	1077	2135	—	1070	—	1098	1076	2690	2625	2070	1635	930	810	1315	1050	796	797
200	1210	—	1202	2380	2253	1185	—	1228	1192	3010	2923	2302	1818	1040	900	1465	1172	888	888
250	1340	—	1326	2625	2487	1300	—	1355	1301	—	3216	2530	—	1150	985	1610	1290	976	978
300	1466	—	1453	2865	2725	1420	—	1483	1410	—	3510	2755	—	1260	1072	1750	1405	1063	1064
400	1720	—	1690	3340	3190	—	—	—	—	—	—	—	—	1475	—	2040	1640	1228	1238
500	1975	—	1926	3815	3664	—	—	—	—	—	—	—	—	1685	—	—	—	1390	—
600	—	—	2170	4290	4120	—	—	—	—	—	—	—	—	1900	—	—	—	1550	—

Продолжение табл. 16.11

Температура, °С	Изоамилен (3-метил-1 бутен) C_6H_{10}	Изобутан C_4H_{10}	Изобутил-ацетат $C_6H_{12}O$	Изобутил-формиат $C_5H_{10}O_2$	Изопентан C_5H_{12}	Изопропило-вый спирт C_3H_7OH	Иод I_2	Иодистая ртуть HgI_2	Метилацетат $C_2H_6O_2$	Метилацети-лен C_3H_4	3-Метилен-1-бутен C_5H_{10}	Метилбромид CH_3Br	Мезитилен C_9H_{12}	Метилен хло-рид CH_2Cl_2	Метилизобу-тират $C_5H_{10}O_2$	Метиловый спирт CH_3OH	Метилтиофен $C_4H_5SH_3$	Мышьяковис-тый водород AsH_3
0	665	689	—	—	638	720	—	—	—	808	665	1232	—	916	—	870	690	1468
20	716	744	778	840	685	774	—	—	—	867	716	1327	—	989	824	935	742	1576
25	729	758	800	858	696	786	—	—	—	879	729	1350	—	1005	843	950	756	1602
50	800	821	906	951	752	855	—	—	870	951	792	1471	660	1095	934	1040	824	1734
75	857	886	1014	1047	805	915	—	—	944	1020	854	1589	704	1181	1028	1130	888	1865
100	915	947	1120	1142	860	980	1730	—	1016	1090	915	1707	745	1269	1120	1225	954	1996
150	1050	1074	1332	1330	969	1112	1953	—	1160	1230	1040	1945	831	1440	1304	1393	1085	2260
200	—	1202	—	—	1079	1242	2175	2045	1298	—	—	2190	907	1602	—	1563	1218	—
250	—	1326	—	—	1185	1370	2400	2262	1435	—	—	2430	988	1766	—	1725	1349	—
300	—	1450	—	—	1291	1505	2630	2478	1567	—	—	2670	1067	1928	—	1895	1478	—
400	—	—	—	—	—	1760	3065	2908	1830	—	—	3145	—	2220	—	2220	—	—
500	—	—	—	—	—	2020	3505	3335	2090	—	—	—	—	—	—	2550	—	—
600	—	—	—	—	—	—	3935	3752	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—

Продолжение табл. 16.11

Температура, °С	Метилхло-рид CH_3Cl	Нитрозил хло-рид $NOCl$	*н*-Нонан C_9H_{20}	*н*-Октан C_8H_{18}	Окись угле-рода CO	*н*-Пентан C_5H_{10}	β-амилен (2-пентен)	Пиридин C_5H_5N	Пропан C_3H_8	Пропилацетат $C_5H_{10}O_2$	Пропилен C_3H_6	*н*-Пропиловый спирт C_3H_7OH	Ртуть Hg	Сероводород H_2S	Сероуглерод CS_2	Силан SiH_4	Толуол C_7H_8
0	1084	989	—	—	1132	623	629	—	750	740	784	715	—	1179	920	1076	—
20	1170	1062	—	—	1220	668	676	—	800	797	840	770	—	1265	990	1148	686
25	1193	1080	—	—	1240	680	685	—	811	811	855	780	—	1290	1008	1167	698
50	1297	1173	554	586	1346	737	744	830	878	880	930	850	—	1398	1084	1258	763
75	1402	1264	592	630	1456	796	801	892	942	952	1002	910	—	1505	1184	1344	826
100	1503	1355	633	674	1557	850	858	955	1006	1022	1073	970	—	1608	1262	1435	891
150	1718	1537	702	757	1755	967	972	1084	1130	1162	1211	1111	—	—	1432	1610	1008
200	1910	1725	778	843	—	1079	—	1234	1248	—	1340	1245	4500	—	1600	—	1120
250	2115	1895	850	927	—	1191	—	1334	1362	—	1470	1380	5020	—	1766	—	1230
300	2315	2070	920	1007	—	1295	—	1462	1475	—	1592	1500	5530	—	1930	—	1335
400	2505	2420	—	—	—	1510	—	1720	1715	—	—	1755	6570	—	—	—	1545
500	—	—	—	—	—	1725	—	—	1940	—	—	2010	7620	—	—	—	1745
600	—	—	—	—	—	1920	—	—	2180	—	—	—	8770	—	—	—	1950
700	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—

Продолжение табл. 16.11

Температура, °С	Тиазол C_3H_3SN	Тиофен C_4H_4S	2, 2, 3-триметилбутан C_7H_{16}	Триметилгексан C_9H_{20}	Четыреххромистое олово $SnBr_4$	Четыреххлористое олово $SnCl_4$	Четыреххлористый углерод CCl_4	Циан C_2N_2	Циановый водород HCN	Циклогексан C_6H_{12}	Циклопропан C_3H_6	Цинк Zn	Уксусная кислота $C_2H_4O_2$	Хлор Cl_2	Хлороформ $CHCl_3$	Этиловый эфир $C_4H_{10}O_2$	Этиловый спирт C_2H_5OH	Этилформиат $C_3H_6O_2$	Этилхлорид C_2H_5Cl
0	910	755	—	639	—	—	906	933	672	653	808	—	—	1245	933	960	775	—	911
20	958	614	—	686	—	—	966	1002	737	701	870	—	—	1335	1000	743	835	890	978
25	972	628	—	698	—	—	982	1020	754	712	884	—	—	1360	1017	756	850	906	994
50	1034	901	691	754	—	—	1061	1108	834	770	960	—	825	1465	1100	820	930	990	1080
75	1098	973	741	820	—	—	1141	1194	914	817	1038	—	912	1570	1182	884	1010	1074	1164
100	1160	1045	768	886	1422	1330	1216	1279	994	878	1113	—	1000	1675	1265	949	1083	1158	1247
150	1285	1190	857	1102	1496	1485	1367	1452	1150	986	1265	—	1170	1882	1430	1078	1230	1325	1410
200	1410	1333	941	—	1770	1640	1517	—	1305	1090	1414	—	1340	2090	1590	1206	1375	—	1574
250	1535	1472	1027	—	1945	1795	1670	—	1460	1191	—	—	1510	2295	1750	1206	1512	—	1736
300	1658	1612	1110	—	2112	1950	1815	—	1613	1291	—	—	1670	2505	1906	1333	1650	—	1900
400	—	—	—	—	2468	2260	2100	—	1920	1482	—	—	1980	2920	2205	1462	1920	—	2225
500	—	—	—	—	2818	2570	—	—	—	1670	—	5250	—	3326	—	1710	2200	—	—
600	—	—	—	—	3160	2880	—	—	—	1860	—	6000	—	3730	—	1960	—	—	—
700	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	6750	—	—	—	—	—	—	—

Таблица 16.12

Вязкость сжиженных газов, 10^{-6} *кг/(м·сек)* [1]

Азот		Аммиак		Аргон		Водород		Гелий		Гелий		Воздух		Иодистый водород		Бромистый водород	
T°K	η	T°K	η	T°K	η	T°K	η	T°K	η	T°K	η	T°K	η	T°K	η	T°K	η
63,9	292	188,16	147,9	84,2	280	14,85	21,62	1,282	0,154	2,178	2,30	90,1	132	223,3	1418	186,8	874
64,4	290	193,16	141,1	86,25	262	15,89	19,32	1,304	0,124	2,29	1,87	107,2	94,5	225,6	1394	188,8	865
64,8	284	198,16	134,5	86,9	256	16,35	18,49	1,335	0,179	2,315	1,97	111,0	90	227,2	1378	190,8	854
69,1	231	223,16	317	87,3	252	17,77	15,93	1,586	0,233	2,642	2,35	125,1	82,5	229,6	1368	193,7	841
69,25	228	233,16	276			18,78	14,48	1,762	0,356	2,934	2,40	126,4	80,5	231,5	1345	197,3	822
71,4	209	237,16	255			20,43	19,00	1,906	0,675	3,738	2,75			233,9	1321	199,4	816
76,1	165	283,16	162,4					1,988	0,960	3,81	2,87			236,4	1298		
77,33	158	288,16	155,5					2,086	1,15	3,97	2,88						
		298,16	148					2,111	1,26	4,021	2,98						
								2,116	1,35								
								2,145	1,55								
								2,159	1,77								
								2,171	2,02								
								2,174	1,95								

Продолжение табл. 16.12

Кислород		Метан		Окись углерода		Пропан		Пропилен		Сероводород		Хлористый водород		Этан		Этилен	
T°K	η	T°K	η	T°K	η	T°K	η	T°K	η	T°K	η	T°K	η	T°K	η	T°K	η
54,4	873	111,2	98	73,2	224	83,5	1353	88,7	1446	191,0	525	160,8	566	172,8	175	183,8	135
54,5	863	125,9	90	75,2	203	85,1	1154	89,8	1273	193,3	506	166,7	546	186,0	137	204,6	115
54,6	821	134,2	82	77,8	186	86,6	988	90,1	1240	198,2	489	171,7	508	201,0	114	226,4	92
54,9	772	154,6	67	82,8	165	88,1	866	94,3	784	201,2	468	177,0	493	215,4	97	252,2	72
56,4	717	167,1	63,5	90,1	146	89,8	738	98,0	537	206,1	451	183,2	473	230,0	90	273,1	64
57,1	638	168,4	62,5	99,6	116	93,1	609	102,6	358	209,8	435	188,2	457	231,8	92		
57,4	638			111,6	100	96,8	459	106,9	273					243,4	82		
59,7	631			129,6	66	101,6	358	111,1	215					247,6	76		
61,7	521					106,7	257	119,0	155					270,0	67		
63,5	476					107,8	249							273,1	63		
68,9	377													288,9	55		
72,3	323																
77,4	273																
80,0	250																
90,1	190																

16.4. ВЯЗКОСТЬ ВОДЯНОГО ПАРА

Таблица 16.13

Вязкость η водяного пара в зависимости от температуры и давления, 10^{-7} *кг/(м·сек)* [1]

Температура t, °С	Давление, *атм*								
	Насыщения	1	20	40	60	80	100	150	200
100	124	124	—	—	—	—	—	—	—
120	133	132	—	—	—	—	—	—	—
140	142	140	—	—	—	—	—	—	—
160	152	148	—	—	—	—	—	—	—
180	163	155	—	—	—	—	—	—	—
200	175	163	—	—	—	—	—	—	—
220	188	171	184	—	—	—	—	—	—
240	201	179	190	—	—	—	—	—	—
260	217	186	196	211	—	—	—	—	—

Продолжение табл. 16.13

Температура t, °С	Давление, *атм*								
	Насыщения	1	20	40	60	80	100	150	200
280	235	194	203	217	232	—	—	—	—
300	257	202	210	223	236	250	—	—	—
320	282	209	217	230	242	255	268	—	—
340	318	217	225	236	248	261	272	318	—
360	365	225	232	243	254	266	278	308	—
380	—	232	240	250	261	272	283	311	361
400	—	240	247	257	268	279	289	316	354
420	—	247	254	264	275	284	295	322	354
440	—	254	262	271	282	291	302	329	358
460	—	262	269	279	288	298	308	335	363
480	—	269	277	285	294	304	315	342	370
500	—	277	284	292	301	311	322	349	380

16.5. КОНСТАНТЫ СЕЗЕРЛЕНДА

Таблица 16.14

Значения константы Сезерленда C [1—3]

Газ	C	Интервал температур, °С	Газ	C	Интервал температур, °С	Газ	C	Интервал температур, °С
Азот	103,9	25—280	*н*-Гексан	436,1	121—307	Пиридин	320	98—265
	104,7	20—825	Дициан	330	20—100	Пропан	278	20—250
Азота закись	260	25—280	Диэтилэфир	404	122—309		290	25—280
Азота окись	128	20—250	Дифенил-метан	387	166—360	Пропилен	321,6	20—120
Аммиак	503	20—300	Дифенилэфир	400	176—362	*н*-Пропиловый спирт	515,6	122—273
Аргон	142	20—827	Изоамнлен	368	20—120			
Ацетнлен	198,2	20—120	Изобутан	368	20—120	Ртуть	942	220—610
Ацетон	541,5	119—306	Изобутилен	339	20—120	Сернистый газ	306	300—825
Бензол	447,5	130—313	Изопропиловый спирт	459,9	119—308	Сероводород	331	0—100
Бром	533	190—600				Сероуглерод	499,5	114—310
Бромистый водород	375	0—100	Иод	568	106—523	Тиофен	467	20—245
Бромная ртуть	657	219—582	Иодистый водород	390	0—100	Толуол	370	60—250
н-Бутан	377,4	20—120	Иодная ртуть	717	282—512	Фосфористый водород	290	0—100
α-Бутилен	328,9	20—120	Кадмий	1053	506—627			
β-Бутилен	362,1	20—120	Кислород	126,6	20—280	Углерода двуокись	254	25—280
Воздух	106,8	20—280		125	15—630		213	300—824
	111	16—825	Криптон	188	0—100	Углерода окись	101,2	22—277
Водород	73	20—200	Ксенон	252	0—100	Углерод четыреххлористый	335	50—250
	86	100—200	Мезителен	136,3	100—200		365,4	128—315
	105	200—250	Метан	162	20—500	Хлор	351	20—250
	234	713—822	Метилацетат	501,8	143—307	Хлористый водород	360	0—250
Водяной пар	673	100—350	Метилбромид	379	20—120	Хлороформ	373	121—308
Гелий	83	100—200	Метиловый спирт	486,9	111—312	Циан	330	0—100
	95	200—250	Метилтиофен	400	50—250	Цианистый водород	901	20—330
	173	682—815	Метиленхлорид	425	22—309	Цинк	876	600—680
н-Гептан	445	100—252	Метилхлорид	441	20—308	Цинк четыреххлористый	432	107—592
			Метилэфир	345	20—120			
			Мышьяковистый водород	300—	0—100	Цинк четырехбромистый	525	105—578
			Неон	61	20—100	Циклопропан	372	20—120
				70	100—200	Циклогексан	350,9	122—306
				82	200—250	Этан	252	20—250
				128	686—827	Этилацетат	504	128—314
			н-Нонан	276	100—250	Этилен	225	20—250
			н-Октан	337	100—250			
			н-Пентан	382,8	122—306			

16.6. ВЯЗКОСТЬ ЭЛЕМЕНТОВ И НЕОРГАНИЧЕСКИХ СОЕДИНЕНИЙ

Таблица 16.15

Вязкость η простых веществ. 10^{-3} *кг/(м·сек)* [2]

t, °С	η	t, °С	η
Ag		Br_2	
1167	3,02	0	1,253
1200	2,98	5	1,178
Bi		10	1,107
304	1,662	15	1,045
451	1,271	20	0,992
600	1,000	25	0,941
601	0,996	30	0,855

Продолжение табл. 16.15

t, °С	η	t, °С	η
Br_2		Cu	
40	0,817	1085	3,36
45	0,780	1100	3,33
50	0,746	1150	3,22
55	0,715	1200	3,12
60	0,686	97,5% Fe;	
Cd		2,5% C	
349	1,44	1350	2,65
406	1,34	1400	2,25
466	1,27	97% Fe; 3% C	
506	1,18	1300	2,800
550	1,15	1350	2,375
603	1,10	1400	2,025

t, °C	η
96,5%Fe; 3,5% C	
1250	2,90
1300	2,40
1350	2,00
1400	1,75
96% Fe; 4% C	
1250	2,10
1300	1,75
1350	1,55
1400	1,45
Hg	
—20	1,855
—10	1,764
0	1,685
10	1,615
20	1,554
30	1,499
40	1,450
50	1,407
60	1,367
70	1,331
80	1,298
90	1,268
100	1,240
110	1,214
120	1,191
130	1,169
140	1,149
150	1,130
200	1,052
250	0,995
300	0,950
340	0,921
K	
100	0,466
150	0,382
200	0,324
Na	
100	0,814
132	0,742
183	0,635
P	
43,2	1,73
45,05	1,70
48,1	1,64
50,5	1,60
53,65	1,55
60,2	1,45
69,7	1,32
79,9	1,21
Pb	
300	2,649
400	1,315
450	2,057
500	1,850
550	1,681
600	1,540
Pb	
650	1,438
700	1,356
750	1,29
800	1,23
850	1,18
S*	
123	10,94
135,5	8,66
149,5	7,09
156,3	7,19
158,2	7,59
159,2	9,48
159,5	14,45
160,0	22,83
160,3	77,32
165	$0{,}5\cdot10^3$
171	$4{,}5\cdot10^3$
184	$16\cdot10^3$
190,5	$19{,}7\cdot10^3$
197,5	$21{,}3\cdot10^3$
200	$21{,}5\cdot10^3$
210	$20{,}5\cdot10^3$
217	$19{,}1\cdot10^3$
220	$18{,}6\cdot10^3$
Sb	
650	1,50
700	1,26
750	1,16
800	1,08
850	1,05
Sn	
240	1,91
260	1,82
280	1,74
300	1,67
350	1,51
400	1,38
450	1,27
500	1,18
550	1,11
600	1,05
650	0,99
700	0,94
750	0,91
800	0,87
Zn	
450	3,168
500	2,779
550	2,476
600	2,233
650	2,033
700	1,865

* Значения η до 160,3°C определены для очищенной, но не обезгаженной серы, остальное — для обезгаженной.

Таблица 16.16

Вязкость η неорганнческнх соединений, 10^{-3}кг/(м·сек) [2]

t,°C	η
AgBr	
609	1,863
649	1,661
688	1,487
770	1,217
803	1,192
AgCl	
603	1,606
632	1,466
669	1,372
734	1,186
AgI	
605	3,026
630	2,748
698	2,375
730	2,123
827	1,556
$BiCl_3$	
260	23,0
270	29,5
280	27,0
290	25,0
300	30,0
320	20,5
340	18,0
$CaCl_2$	
800	4,940
$HgBr_2$	
240	331
247	2,97
258	1,97
KBr	
745	1,48
775	1,34
805	1,19
KCl	
790	1,42
835	1,21
920	0,99
1035	0,71
$K_2Cr_2O_7$	
400	13,16
410	12,41
420	11,71
430	11,05
440	10,42
450	9,80
460	9,20
470	8,62
480	8,06
490	7,52
500	6,99
510	6,49
KNO_3	
350	2,728
360	2,578
380	2,312
400	2,094
420	1,905
440	1,738
460	1,596
480	1,476
500	1,380
520	1,301
540	1,239
550	1,211
KOH	
400	2,3
450	1,7
500	1,3
550	1,0
600	0,8
$LiNO_3$	
260	6,477
270	6,260
291	6,476
300	5,058
310	4,696
322	4,318
$LiNO_3$	
330	4,240
354	3,630
390	2,490
429	2,054
$MgCl_2$	
808	4,120
N_2H_4	
5	1,21
10	1,12
15	1,04
20	0,97
25	0,91
N_2O_4	
0,72	0,5220
5,09	0,4954
9,15	0,4720
15,36	0,4401
Na_3AlF_6	
1000	2,800
NaBr	
762	1,42
766	1,35
780	1,28
NaCl	
825	1,432
850	1,275
875	1,138
900	1,017
925	0,912
950	0,820
975	0,752
1000	0,704
315	2,916
320	2,826
340	2,527
360	2,283
380	2,077
400	1,895
420	1,741

Продолжение табл. 16.16

t, °C	η	t, °C	η
$NaNO_3$		452	5,38
440	1,616	472	4,70
460	1,518	492	4,07
NaOH		$PbCl_2$	
350	4,0	498	5,53
400	2,8	518	4,66
450	2,8	538	4,02
500	1,8	558	3,59
550	1,5	578	3,28
$NaPO_3$		598	3,06
650	1250	608	2,95
700	700	$SnCl_4$	
750	440	30	0,806
800	300	40	0,725
850	210	50	0,668
$PbBr_2$		UF_6	
372	10,2	70	0,91
392	8,06	80	0,86
412	6,97	90	0,76
432	6,13		

16.7. КИНЕМАТИЧЕСКАЯ ВЯЗКОСТЬ ВОДЫ

Таблица 16.17

Кинематическая вязкость ν воды, 10^{-4} $м^2/сек$, при $P = 1$ $атм$ [4]

t, °C	0	5	10	15	20	25	30	40	50	60
ν	1,7865	1,5138	1,3037	1,1369	1,0019	0,8909	0,7982	0,6540	0,5477	0,4674

16. 8. ВЯЗКОСТЬ ОРГАНИЧЕСКИХ СОЕДИНЕНИЙ

Таблица 16.18

Вязкость η метанола (метилового спирта CH_4O), 10^{-3} $кг/(м \cdot сек)$ [5]

t, °C	—100	—90	—80	—70	—60	—50	—40	—30	—20	—10	0	20	30	40	50	60	70
η	16	8,8	5,7	4,02	2,98	2,26	1,75	1,39	1,16	0,970	0,817	0,578	0,509	0,446	0,393	0,347	0,306
t, °C	80	90	100	110	120	130	140	150	160	170	180	190	200	210	220	230	240
η	0,271	0,240	0,214	0,190	0,170	0,152	0,136	0,121	0,109	0,098	0,0883	0,0794	0,0716	0,0646	0,0583	0,0528	0,0460

Таблица 16.19

Вязкость η этанола (этилового спирта C_2H_6O), 10^{-3} $кг/(м \cdot сек)$ [5]

t, °C	—98,1	—90	—80	—70	—60	—50	—40	—30	—20	—10	0	5	10
η	44,0	28,5	18,1	12,5	8,7	6,4	4,79	3,65	2,78	2,23	1,773	1,623	1,466
t, °C	15	20	25	30	35	40	45	50	55	60	65	70	75
η	1,332	1,200	1,096	1,003	0,914	0,834	0,764	0,702	0,644	0,592	0,551	0,504	0,0471

Таблица 16.20

Вязкость η пропанола—1 (*н*-пропилового спирта C_3H_8O), 10^{-3} *кг/(м·сек)* [5]

t, °C	—70	—60	—50	—40	—30	—20	—10	0	10	20	30	40	60	80
ν	54,6	31,6	20,2	13,5	9,50	6,90	5,10	3,85	2,89	2,20	1,72	1,38	0,92	0,635

t, °C	90	100	110	120	130	140	150	160	170	180	190	200	210
ν	0,535	0,457	0,392	0,337	0,289	0,247	0,211	0,183	0,160	0,143	0,128	0,114	0,102

Таблица 16.21

Вязкость η пропанола (изопропилового спирта C_3H_8O), 10^{-3} *кг/(м·сек)* [2]

t, °C	—60	—50	—40	—30	—20	—10	0	10	15	20	30	40	50	60	70	80
η	66,1	37,6	23,2	14,9	10,1	6,8	4,6	3,26	2,86	2,39	1,77	1,33	1,03	0,80	0,65	0,52

Таблица 16.22

Вязкость η *н*-бутанола (бутилового спирта $C_4H_{10}O$), 10^{-3} *кг/(м·сек)* [5]

t, °C	—50	—40	—30	—20	—10	0	10	20	30	40	50	60	70	80	90	100	110
η	34,7	22,4	14,6	10,3	7,4	5,19	3,87	2,95	2,28	1,78	1,41	1,14	0,93	0,76	0,63	0,54	0,46

Таблица 16.23

Вязкость η глицерина ($C_3H_8O_3$), 10^{-3} *кг/(м·сек)* [5]

t, °C	0	5	10	20	30	40	50	60	70	80	90	100	120	140	160	180	200
η	12100	7050	3950	1480	600	330	180	102	59	35	21	13	5,2	1,8	1,0	0,45	0,22

Таблица 16.24

Вязкость η диэтилового эфира ($C_4H_{10}O$), 10^{-3} кг/(м·сек) [5]

t, °C	—120	—110	—100	—90	—80	—70	—60	—50	—40	—30
η	4,25	2,54	1,71	1,24	0,97	0,79	0,65	0,55	0,470	0,410
t, °C	—20	—10	0	10	20	30	40	60	80	100
η	0,364	0,328	0,296	0,268	0,243	0,220	0,199	0,166	0,140	0,118

Таблица 16.25

Вязкость η анилина (C_6H_7), 10^{-3} кг/(м·сек) [5]

t, °C	0	10	20	30	40	50	60	70	80	90	100	110	120
η	10,2	6,5	4,40	3,12	2,30	1,80	1,50	1,28	1,10	0,94	0,80	0,69	0,59

Таблица 16.26

Вязкость η нитробензола ($C_6H_5NO_2$), 10^{-3} кг/(м·сек) [5]

t,°C	0	10	20	30	40	50	60	80	100
η	3,09	2,46	2,01	1,69	1,44	1,24	1,09	0,87	0,70

Таблица 16.27

Вязкость η этилацетата ($C_4H_8O_2$), 10^{-3} кг/(м·сек) [5]

t, °C	20	40	60	80	100	120	140	160	180	200	220	230	240	247
η	0,477	0,380	0,308	0,250	0,212	0,177	0,149	0,125	0,104	0,086	0,068	0,059	0,048	0,036

Таблица 16.28

Вязкость η уксусной кислоты ($C_2H_4O_2$), 10^{-3} кг/(м·сек) [5]

t, °C	30	40	50	60	80	100	120	130
η	0,79	0,69	0,62	0,55	0,453	0,377	0,320	0,297

16.9. ВЯЗКОСТЬ КРЕМНИЙОРГАНИЧЕСКИХ СОЕДИНЕНИЙ

Таблица 16.29

Вязкость η тетракрезилоксисилана [$(CH_3C_6H_4O)_4 \cdot Si$], 10^{-5}(кг·сек)/м² [5]

t°, С	10	20	30	40	50	60	70	80	90	100	110	120	130	140	150	160	170
η	19680	6080	2890	2290	1630	1030	766	617	505	415	356	300	255	225	200	180	168
t, °C	180	190	200	210	220	230	240	250	260	270	280	290	300	310	320	330	340	350
η	154	143	132	212	114	105	97	88	80	74	62	62	59	56	54	51	48	46

Таблица 16.30

Вязкость η силикона (диэтилполисилоксана), 10^{-4} (кг·сек)/м² [5]

t, °C	0	10	20	30	40	50	60	70	80	90	100	110	120	130	140	150
η	2010	1350	991	750	590	476	395	332	285	246	215	190	169	152	137	124
t, °C	160	170	180	190	200	210	220	230	240	250	260	270	280	290	300	
η	113	104	96	88	82	76	71	66	62	58	55	52	49	46	44	

Таблица 16.31

16.10. ВЯЗКОСТЬ УГЛЕВОДОРОДОВ

Вязкость η циклических углеводородов, 10^{-3} кг/(м·сек) [2,5]

Формула	Название	Температура, °С											
		—20	—10	0	10	20	30	40	50	60	80	100	110
C_5H_{10}	Циклопентан	0,72	0,631	0,555	0,491	0,439	0,393	0,354	0,323	—	—	—	—
C_6H_{12}	Метилциклопентан	0,86	0,745	0,648	0,569	0,505	0,450	0,404	0,365	0,330	—	—	—
C_6H_{12}	Циклогексан	—	—	—	1,180	0,979	0,826	0,704	0,608	0,531	0,411	—	—
C_7H_{14}	Этилциклопентан	0,96	0,829	0,725	0,637	0,565	0,506	0,456	0,412	0,376	0,32	0,27	—
C_7H_{14}	Метилциклогексан	1,41	1,175	0,991	0,847	0,731	0,639	0,562	0,500	0,446	0,36	0,30	—
C_8H_{16}	Пропилциклопентан	1,24	1,049	0,886	0,772	0,679	0,603	0,538	0,488	0,444	0,38	0,33	0,30
C_8H_{16}	Этилциклогексан	1,63	1,356	1,142	0,976	0,843	0,737	0,651	0,581	0,523	0,43	0,37	0,34
$C_{21}H_{42}$	Гексадецилциклогексан	—	—	—	—	9,63	7,28	5,56	4,43	3,55	2,45	1,84	1,58
$C_{21}H_{42}$	Пентадецилциклогексан	—	—	—	—	—	8,91	6,69	5,21	4,15	2,74	1,87	1,57

Таблица 16.32

Вязкость η ароматнческнх углеводородов, 10^{-3} кг/(м·сек) [2,5]

Формула	Название	Температура, °С											
		—20	—10	0	10	20	30	40	60	80	100	120	150
C_6H_6	Бензол	—	—	—	0,755	0,649	0,559	0,489	0,389	0,318	0,261*	0,220*	0,169*
C_7H_8	Толуол	0,989	0,863	0,770	0,667	0,584	0,517	0,469	0,381	0,318	0,269	—	—
C_8H_{10}	Этилбензол	1,170	1,021	0,873	0,757	0,671	0,596	0,530	0,436	0,363	0,368	0,265	—
C_8H_{10}	*о*-Ксилол	1,447	1,232	1,055	0,917	0,804	0,707	0,623	0,500	0,417	0,345	0,294	—
C_8H_{10}	*м*-Ксилол	—	—	0,805	0,699	0,615	0,548	0,490	0,405	0,340	0,290	0,250	—
C_8H_{10}	*п*-Ксилол	—	—	—	—	0,648	0,571	0,514	0,416	0,354	0,293	0,250	—
$C_{12}H_{18}$	Гексилбензол	5,17	3,66	2,60	1,98	1,63	1,362	1,162	0,909	0,712	0,574	0,47	0,36
$C_{16}H_{26}$	Децилбензол	16,0	9,81	6,72	4,94	3,80	3,02	2,46	1,730	1,275	0,977	0,77	0,56
$C_{20}H_{34}$	Тетрадецилбензол	—	—	—	10,63	7,65	5,66	4,43	2,90	2,06	1,507	1,14	0,79

* При давлении насыщенного пара выше точки кипения.

Таблица 16.33

Вязкость η предельных углеводородов, 10^{-3} кг/(м·сек) [1]

Формула	Название	Температура, °С													
		—90	—50	—20	0	10	20	40	60	80	100	150	200	250	300
C_4H_{10}	Бутан	0,63	0,355	0,252	0,207*	0,191*	0,174*	0,140*	—	—	—	—	—	—	—
C_4H_{10}	Изобутан	—	0,392	0,267	0,214*	0,195*	0,176*	0,146*	—	—	—	—	—	—	—
C_5H_{12}	Пентан	0,448	0,474	0,341	0,283	0,259	0,240	—	—	—	—	—	—	—	—
C_5H_{12}	Изопентан (2-метилбутан)	—	0,55	0,352	0,277	0,248	0,224	—	—	—	—	—	—	—	—
C_5H_{12}	Неопентан (2,2-диметилпропан)	—	—	—	0,327	0,280*	—	—	—	—	—	—	—	—	—
C_6H_{14}	Гексан	1,82	0,742	0,479	0,381	0,343	0,307	0,253	0,222	—	—	—	—	—	—
C_6H_{14}	Изогексан (2-метилпентан)	—	—	—	0,370	0,331	0,298	0,246	0,206	—	—	—	—	—	—
C_7H_{16}	Гептан	3,85	1,18	0,689	0,526	0,466	0,417	0,339	0,283	0,241	0,209*	—	—	—	—
C_7H_{16}	Изогептан (2-метилгексан)	—	—	—	0,476	0,424	0,379	0,309	0,257	0,216	—	—	—	—	—
C_8H_{18}	Октан	—	1,83	0,967	0,714	0,622	0,546	0,435	0,356	0,298	0,255	0,220	—	—	—
C_9H_{20}	Нонан	—	2,99	1,40	0,968	0,827	0,714	0,555	0,445	0,366	0,308	0,264	0,213	—	—
$C_{10}H_{22}$	Декан	—	—	1,93	1,27	1,07	0,907	0,701	0,552	0,448	0,372	0,314	0,249	—	—
$C_{11}H_{24}$	Ундекан	—	—	2,779	1,742	1,425	1,182	0,871	0,671	0,535	0,437	0,365	0,288	—	—
$C_{12}H_{26}$	Додекан	—	—	—	2,264	1,827	1,492	1,064	0,803	0,632	0,510	0,334	0,231	—	—
$C_{13}H_{28}$	Тридекан	—	—	—	2,962	2,339	1,878	1,312	0,969	0,751	0,598	0,380	0,262	—	—
$C_{14}H_{30}$	Тетрадекан	—	—	—	—	2,96	2,322	1,560	1,135	0,868	0,685	0,431	0,294	0,207	—
$C_{15}H_{32}$	Пентадекан	—	—	—	—	3,663	2,841	1,873	1,355	1,010	0,786	0,483	0,326	0,231	—
$C_{16}H_{34}$	Гексадекан	—	—	—	—	—	3,451	2,232	1,560	1,161	0,892	0,532	0,349	0,242	—
$C_{17}H_{36}$	Гептадекан	—	—	—	—	—	4,209	2,652	1,829	1,340	1,014	0,598	0,392	0,277	0,203
$C_{18}H_{38}$	Октадекан	—	—	—	—	—	—	3,060	2,060	1,484	0,952	—	—	—	—
$C_{19}H_{40}$	Нонадекан	—	—	—	—	—	—	3,588	2,379	1,693	1,719	0,719	0,468	0,327	0,24
$C_{20}H_{42}$	Эйкозан	—	—	—	—	—	—	4,072	2,665	1,880	1,403	1,094	0,505	0,353	0,26

* При давлении насыщенного пара выше нормальной точки кипения.

16.11. ВЯЗКОСТЬ НУКЛИДОВ И ИХ СОЕДИНЕНИЙ

Таблица 16.34

Вязкость η нуклидов и их соединений, 10^{-7} *кг/(м·сек)*

$^{10}BF_3$	t, °C	20	0	—20	—40	—60	—80	—100											
	η	165,40	155,35	144,80	134,15	123,15	112,00	101,45											
$^{11}BF_3$	t, °C	20	0	—20	—40	—60	—80	—100											
	η	166,60	156,50	145,85	135,10	124,00	112,70	102,05											
$^{14}NH_3$	t, °C	20	0	—20	—40	—60													
	η	98,50	91,85	84,60	77,60	70,72													
$^{15}NH_3$	t, °C	20	0	—20	—40	—60													
	η	100,75	93,95	86,50	79,35	72,30													
$^{14}N^{16}O$	t, °C	20	0	—20	—40	—60	—80	—100	—120	—140	—160								
	η	189,90	179,25	168,10	156,70	144,80	132,40	119,66	106,40	93,00	78,80								
$^{15}N^{16}O$	t, °C	20	0	—20	—40	—60	—80	—100	—120	—140	—160								
	η	192,85	182,25	170,70	159,10	147,10	134,45	121,50	108,09	94,45	80,00								
^{20}Ne	t, °C	21,6	18,9	—10,3	—50,5	—80,8	—90,2	—102,3	—110,3	—122,2	—130,2	—155,0	—156,6	—156,8	—161,5	—174,3	—179,0	—195,8	
	η	311,7	309,6	288,7	258,0	233,3	225,8	215,6	208,5	206,8	190,3	166,2	164,8	164,5	159,6	145,3	140,1	120,3	
^{22}Ne	t, °C	23,3	19,0	20,0	17,5	—20,3	—33,3	—38,2	—75,2	—100,6	—119,0	—146,7	—150,0	—154,2	—156,0	—160,0	—177,3	—181,5	—195,8
	η	327,8	324,4	325,2	323,5	294,2	283,6	280,1	249,4	227,6	210,3	182,4	178,7	174,8	173,0	168,2	148,4	143,6	125,0
$^{15}N_2$	t, °K	293,3	292,7	292,0	291,2	291,0	291,0	272,5	205,5	199,2	199,0	198,1	150,0	124,5	82,2	79,3	79,2	77,5	
	η	179,9	179,3	179,0	178,3	178,1	178,2	154,7	134,8	131,5	131,5	130,7	103,1	87,3	58,9	57,0	56,8	55,6	
$^{14}N_2$	t, °K	297,4	292,7	289,0	285,0	234,2	211,0	203,7	168,8	116,0	80,6	77,5							
	η	177,3	175,5	173,7	171,8	147,8	135,5	131,4	112,1	80,2	56,7	54,6							
^3He	t, °C	22,1	21,6	18,0	17,6	—20,0	—53,5	—58,0	—68,0	—93,4	—121,7	—123,7	—147,5	—159,4	—160,0	—174,6	—179,1	—195,8	
	η	171,6	171,2	170,0	169,8	154,4	140,5	138,8	134,2	123,3	110,6	109,7	98,0	91,8	91,7	83,6	81,2	71,7	
D_2	t, °C	25,9	24,1	20,0	—28,1	—44,1	—73,0	—107,1	—154,3	—183,0	—195,8								
	η	125,2	124,7	123,6	109,8	104,8	95,8	83,3	66,1	54,1	48,3								
H_2	t, °C	26,5	24,3	20,0	—35,6	—73,1	—96,9	—118,5	—139,6	—162,1	—183,0	—195,8							
	η	90,2	89,7	88,8	77,0	68,4	62,7	57,4	51,8	45,3	39,1	35,2							

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Голубев И. Ф.** Вязкость газов и газовых смесей. М., Физматгиз, 1959.
2. **Справочник химика.** М.—Л., «Химия», 1966.
3. **Кэй Д., Лэби Т.** Справочник физика-экспериментатора. Пер. с англ. М., Изд-во иностр. лит., 1949.
4. **Кэй Д., Лэби Т.** Таблицы физических и химических постоянных. Пер. с англ. Под ред. К. П. Яковлева. М., Физматгиз., 1962.
5. **Варгафтик Н. Б.** Справочник по теплофизическим свойствам газов и жидкостей. М., Физматгиз, 1963.
6. **Менабде Н. Е.** Коэффициенты вязкости изотопов водорода (H_2, D_2), неона (Ne^{20}, Ne^{22}) и гелия (He^3) в температурном интервале от —195 до +25°С.— «Атомная энергия», 1965, т. 19, № 5, с. 453.
7. **Менабде Н. Е.** Влияние изотопного замещения на вязкость газов.— «Атомная энергия», 1968, т. 25, № 1, с. 42.
8. **Менабде Н. Е.** Коэффициент вязкости N_2^{14}—N_2^{15} в интервале температур 78—300°С. — «Атомная энергия», 1964, т. 17, № 4, с. 307.

ГЛАВА 17

ДИФФУЗИЯ АТОМОВ И МОЛЕКУЛ

Диффузия — процесс выравнивания концентрации частиц атомов, молекул, ионов, электронов в среде. При наличии градиента концентрации n частиц в веществе возникает поток этих частиц $\mathbf{j}$, выравнивающий их концентрации. Поток связан с коэффициентом диффузии D посредством закона Фика:

$$\mathbf{j} = -D \operatorname{grad} n. \qquad (17.1)$$

Это соотношение справедливо, когда размеры 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.

17.1. ДИФФУЗИЯ В ГАЗАХ

Диффузия частиц в газах определяется парными соударениями пробной частицы с атомами или молекулами газа. 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 σ^*.

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

$$D = \langle v \rangle \lambda / 3, \qquad (17.2)$$

где $\langle v \rangle$ — средняя относительная скорость соударения частиц примеси и частиц газа, $\langle v \rangle \approx \sqrt{2T/\mu}$; T — температура газа; μ — приведенная масса сталкивающихся частиц; $\lambda = 1/n\sigma^*$ — длина пробега пробных частиц в газе; n — плотность числа частиц газа. Соотношение (17.2) является точным, если σ^* не зависит от скорости сталкивающихся частиц. В противном случае понятие длины пробега теряет определенность, и указанное соотношение справедливо для эффективных величин. Принято приводить значение коэффициента диффузии не при постоянной плотности частиц, а при постоянном давлении. В этом случае, учитывая уравнение газового состояния $P = nkT$, получаем зависимость $D = D_0(T/273)^{1,5}$, где D_0 — коэффициент диффузии при нормальных условиях. Это соотношение справедливо при тех же условиях, что и соотношение (17.2).

* Область давлений, где указанная зависимость выполняется с достаточно высокой точностью (погрешность 2—5%), зависит от температуры. Вблизи критического давления точность существенно падает.

Коэффициент самодиффузии газов

В табл. 17.1 представлены значения коэффициентов самодиффузии D_0 некоторых газов при нормальных условиях ($T = 273$°K, $P = 1$ *атм*). Дан интервал температур, для которого температурную зависимость коэффициента самодиффузии можно аппроксимировать степенной функцией

$$D(T) = D_0 (T/273)^a; \qquad (17.3)$$

приведены значения показателя a.

Таблица 17.1

Параметры зависимости (17.3) [1.2]

Газ	D_0, $см^2/сек$	a	Температурный интервал, °К	Газ	D_0, $см^2/сек$
He	1,62	1,71	14—296	H_2	1,28
Ne	0,452	—	—	CO	0,175
Ar	0,156	1,92	77—353	HCl	0,125
Kr	0,08	—	—	HBr	0,079
Xe	0,048	—	—		
N_2	0,17	1,9	77—353	CO_2	0,097
O_2	0,18	1,92	77—353	CH_4	0,206
UF_6	0,0165	1,6	144—296	H_2O (пары)	0,277

Таблица 17.2

Коэффициенты самодиффузии газов при высоких температурах, $см^2/сек$, при $P = 1$ $атм$ [1]. Данные получены теоретически, с использованием потенциала межатомного взаимодействия, восстановленного из экспериментов по рассеянию атомных пучков

Газ	Температура, 10^3 °K																				
	1	1,5	2	2,5	3	3,5	4	4,5	5	5,5	6	6,5	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	1890
Ne	3,93	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	368	414
Ar	1,51	300	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	0,853	1,72	2,83	4,14	5,67	7,38	9,32	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	0,502	1,01	1,65	2,43	3,32	4,32	5,42	6,64	7,97	9,43	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	7,48	10,4	13,8	17,6	21,9	26,6	31,8	37,3	43,2	49,6	61,5	78,9	95,5	113	113	153	174	197

Коэффициенты взаимной диффузии в газах

В двухкомпоиентной смеси при отсутствии внешних полей, химических реакций, а также градиентов температуры и давления потоки $\mathbf{j}_1$ и $\mathbf{j}_2$ частиц первого и второго сортов выражаются соотношениями:

$$\left.\begin{aligned} \mathbf{j}_1 &= -nD_{12}\operatorname{grad} x_1; \\ \mathbf{j}_2 &= -nD_{21}\operatorname{grad} x_2, \end{aligned}\right\} \qquad (17.4)$$

где n —полная плотность числа частиц; x_1 и x_2—мольные доли частиц первого и второго сортов. Эти уравнения справедливы в системе отсчета, в которой газ как целое покоится ($\mathbf{j}_1 + \mathbf{j}_2 = 0$). Поскольку, кроме этого, $x_1 + x_2 = 1$, то $D_{12} = D_{21}$.

Коэффициент диффузии D_{AB} частиц произвольного сорта в смеси двух газов A и B определяется соотноше-

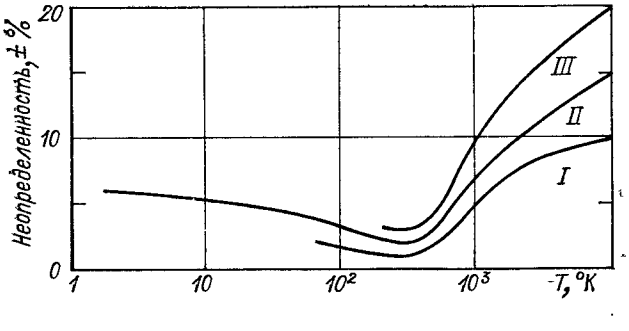


Рис. 17.1. Неопределенность данных, представленных в табл. 17.3, в зависимости от температуры.

Таблица 17.3

Неопределенность значения коэффициента диффузии, %, для систем трех групп

Группа	Система	Температура, °К					
		1,75	65	300	500	10^3	10^4
I	He—Ne, —Ar, —Kr, Xe; Ne—Ar, —Kr, Xe; Ar—Kr, Ar—Xe; Kr—Xe; H_2—N_2	—	2	1	2	5	10
II	^{3}He—^{4}He; He—H_2, —N_2, —CO, —O_2, —воздух, —CO_2; H_2—Ne, —Ar, —Kr, —D_2, CO, —воздух, —CO_2; N_2—Ar, —CO, —CO_2	6	4	2	3	7	15
III	Ar—CH_4, —CO, —CO_2, —воздух, SF_6; H_2—Xe, —CH_4; —O_2, —SF_6; CH_4—He, —N_2, —O_2, —воздух, SF_6; N_2—Ne, —Kr, —Xe, —CH_4, O_2, SF_6; CO—Kr, —O_2, —воздух, CO_2, SF_6; O_2—Ar, —CO_2, —SF_6; CO_2—воздух, —N_2O, —SF_6; SF_6—He, —воздух	—	—	3	4	10	20

Таблица 17.4

Неопределенность значений коэффициента взаимной диффузии для систем IV группы

Система	Интервал температур, °К	Неопределенность, %
H_2O—N_2	282—373	±4
H_2O—O_2	282—1070	±7
H_2O—воздух	282—1070	±5—10
H_2O—CO_2	296—1640	±7—10
CO_2—Ne	195—625	±3—5
CO_2—C_3H_8	298—550	±3—5
H—H_2	~300	±5
	>1000	±30
H—N_2; O—N_2; O—O_2	~300	±10
	>1000	±25
H—He; H—Ar; O—He; O—Ar	~300	±15
	>1000	±30

нием (закон Бланка), справедливым с погрешностью до нескольких процентов:

$$1 / D_{AB} = x_A / D_{1A} + x_B / D_{1B},$$

где D_{1A} и D_{1B} — коэффициенты взаимной диффузии пробной частицы в газах A и B при давлениях, равных суммарному давлению в рассматриваемой смеси.

Точность, с которой известны коэффициенты взаимной диффузии газов, существенно зависит от интервала температур, где измеряются эти коэффициенты, а также от сорта исследуемого газа. Представленные результаты измерений коэффициента взаимной диффузии различных пар газов разделены на четыре группы (табл. 17.3 и 17.4). Погрешность, с которой известны коэффициенты взаимной диффузии газов первых трех групп, видна из рис. 17.1, а для четвертой группы соответствующие сведения приведены в табл. 17.4.

В табл. 17.5 и 17.6 представлены параметры, входящие в эмпирические выражения для температурной зависимости коэффициентов взаимной диффузии [2]. Для систем, представленных в табл. 17.5, эта зависимость имеет вид

$$D = D_0 (T/273)^a \exp\left(-\frac{S}{T} - \frac{S'}{T^2}\right), \qquad (17.5)$$

где S, S' — эмпирические параметры, а экспоненциальный множитель может быть опущен без потери точности для температур выше 200°К.

Для систем, представленных в табл. 17.6, эмпирическая зависимость имеет вид

$$D = D_0 (T/273)^a \exp(-S/T), \qquad (17.6)$$

причем при $T > 20S$ экспоненциальный множитель можно заменить единицей.

Таблица 17.5

Параметры выражения (17.5), действительные в температурном интервале T_1 — 10^4 °К

Система	D_0, $см^2/сек$	a	S, °К	S', °К	T_1, °К	Группа
^{3}He—^{4}He	1,55	1,501	—0,9630	1,894	1,74	II
He—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—H_2	1,32	1,510	—	—	90	II
He—N_2	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—N_2	0,79	1,519	39,8	—	242	II
Kr—Xe	0,0812	1,608	52,7	—	169	I
Kr—H_2	0,664	1,564	26,4	—	77	II
H_2—D_2	0,99	1,500	6,072	38,10	14	II
H_2—N_2	0,66	1,548	—2,80	1067	65	I
H_2—CO	0,66	1,548	—2,80	1077	65	II
N_2—CO	0,175	1,576	36,2	3825	78	II

Таблица 17.6

Параметры эмпирической зависимости (17.6)

Система	D_0, $см^2/сек$	a	S, °К	Температурный интервал °К	Группа
He—CH_4	0,57	1,750	—	298—10^4	III
He—O_2	0,45	1,710	—	244—10^4	II
He—воздух	0,62	1,729	—	244—10^4	II
He—CO_2	0,52	1,720	—	200—530	II
He—SF_6	0,35	1,627	—	290—10^4	III
Ne—H_2	0,99	1,731	—	90—10^4	II
Ne—N_2	0,28	1,743	—	293—10^4	III
Ne—CO	0,22	1,776	—	195—625	—
Ar—CH_4	0,172	1,785	—	307—10^4	III
Ar—N_2	0,17	1,752	—	244—10^4	II
Ar—CO	0,17	1,752	—	244—10^4	III
Ar—O_2	0,167	1,736	—	243—10^4	III
Ar—воздух	0,165	1,749	—	244—10^4	III
Ar—CO_2	0,177	1,646	89,1	276—1800	III
Ar—SF_6	0,114	1,596	145,4	328—10^4	III
Kr—N_2	0,13	1,766	—	248—10^4	III
Kr—CO	0,13	1,766	—	248—10^4	III
Xe—H_2	0,54	1,712	16,9	242—10^4	III
Xe—N_2	0,106	1,789	—	242—10^4	III
H_2—CH_4	0,62	1,765	—	293—10^4	III
H_2—O_2	0,69	1,732	—	252—10^4	III
H_2—воздух	0,66	1,750	—	252—10^4	II
H_2—CO_2	0,56	1,750	11,7	200—550	II
H_2—SF_6	0,52	1,570	102,5	298—10^4	III
CH_4—N_2	0,2	1,750	—	298—10^4	III
CH_4—O_2	0,22	1,695	44,2	294—10^4	III
CH_4—воздух	0,186	1,747	—	298—10^4	III
CH_4—SF_6	0,119	1,657	69,2	298—10^4	III
N_2—O_2	0,182	1,724	—	285—10^4	III
N_2—H_2O	0,204	2,072	—	282—373	IV
N_2—CO_2	0,208	1,570	113,6	288—1800	II
N_2—SF_6	0,122	1,590	119,4	328—10^4	III
CO—O_2	0,175	1,724	—	285—10^4	III
CO—воздух	0,182	1,730	—	285—10^4	III
CO—CO_2	0,142	1,803	—	282—473	III
CO—SF_6	0,129	1,584	139,4	297—10^4	III
O_2—H_2O	0,207	2,072	—	282—450	IV
	0,264	1,632	—	450—1070	IV
O_2—CO_2	0,174	1,661	61,3	287—1083	III
O_2—SF_6	0,138	1,522	129,0	297—10^4	III

Продолжение табл. 17.6

Система	D_0, $см^2/сек$	a	S, °К	Температурный интервал, °К	Группа
Воздух—H_2O	0,205	2,072	—	282—450	IV
Воздух—H_2O	0,26	1,632	—	450—1070	IV
Воздух—CO_2	0,207	1,590	102,1	280—1800	IV
Воздух SF_6	0,126	1,576	121,1	328—10^4	IV
H_2O—CO_2	0,41	1,500	307,9	296—1640	IV
CO_2—N_2O	0,095	1,866	—	195—550	III
CO_2—C_3H_4	0,074	1,896	—	298—550	IV
CO_2—SF_6	0,069	1,886	—	328—472	III
H—He	2,35	1,732	—	275—10^4	IV
H—Ar	0,112	1,597	—	275—10^4	IV
H—H_2	0,184	1,728	—	190—10^4	IV
N—N_2	0,29	1,774	—	280—10^4	IV
O—He	0,84	1,749	—	280—10^4	IV
O—Ar	0,23	1,841	—	280—10^4	IV
O—N_2	0,28	1,774	—	280—10^4	IV
O—O_2	0,28	1,774	—	280—10^4	IV

Таблица 17.7

Коэффициент диффузии метастабильных атомов инертных газов в собственном газе при давлении 1 *мм рт. ст.*, $см^2/сек$ [3]*

Атом	Температура, °К					
	20	40	77	150	300	500
He (2^3S)	60	100	160	260	460	710
He (2^1S)	45	75	120	210	370	570
Ne ($^3P_2$)	19	33	56	—	—	—
Ar ($^3P_2$)	8	13	20	34	64	—
Kr ($^3P_2$)	—	12	12	20	38	51
Xe ($^3P_2$)	3	5	8	13	22	33

* Погрешность данных не превышает ± 5—10%.

Диффузия заряженных частиц в газе. Амбиполярная диффузия

В слабоионизованной плазме, где степень ионизации $n_e/n_a \ll (T_e/\mathrm{Ry})$ (n_e, n_a — плотность электронов и нейтральных частиц соответственно; T_e — 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 в случае максвелловского распределения заряженных частиц по скоростям коэффициент диффузии электронов (ионов) связан с их подвижностью K, а соответственно и с электропроводностью плазмы σ, соотношением Эйнштейна*:

$$D = \frac{KkT}{e} = \frac{kT\sigma}{e^2 n_e} \qquad (17.7)$$

* Когда распределение заряженных частиц по энергиям отличается от максвелловского, соотношение (17.7) выполняется приближенно с погрешностью 10—15%.

(k — постоянная Больцмана; T — температура плазмы; e — заряд электрона), которое позволяет определить коэффициент диффузии электронов на основании данных по электропроводности слабоионизованной плазмы.

Если характерный размер, на котором заметно изменяется плотность заряженных частиц в плазме, много больше радиуса Дебая

$$r_D = \sqrt{\frac{kT_e}{8\pi n_e e^2}},$$

плазма является квазинейтральной, т. е. плотности положительных и отрицательных зарядов равны. При этом имеет место амбиполярная диффузия с коэффициентом диффузии D_a, единым для электронов и ионов и выражающимся через коэффициент диффузии ионов в том же газе D_i:

$$D_a = D_i\,(1 + T_e/T_i). \qquad (17.8)$$

Таблица 17.8

Коэффициент диффузии ионов, $см^2/сек$, в чужом газе при нормальных условиях ($P = 1$ $атм$, $T = 273°К$)

Ион	Основной газ									
	He	Ne	Ar	Kr	Xe	H_2	N_2	O_2	CO	CO_2
Li^+	0,45	0,22	0,103	0,081	0,062	0,29	0,103	0,108	0,098	0,082
Na^+	0,38	0,15	0,066	0,049	0,036	0,26	0,069	0,071	0,066	0,052
K^+	0,37	0,14	0,056	0,040	0,030	0,26	0,061	0,062	0,058	0,074
Rb^+	0,37	0,12	0,048	0,031	0,022	0,26	0,053	0,054	0,05	0,037
Cs^+	0,36	0,12	0,045	0,029	0,020	0,25	0,051	0,052	0,053	0,035
NO^+	0,38	0,15	0,061	0,046	0,033	0,26	0,065	0,067	0,062	0,048
O_2^+	0,38	0,15	0,060	0,045	0,032	0,26	0,063	—	0,060	0,048
N_2^+	0,38	0,15	0,059	0,047	0,034	0,26	—	0,067	0,063	0,049
Ne^+	0,39	—	0,069	0,052	0,039	0,27	0,073	0,074	0,070	0,054
Ar^+	0,37	0,14	—	0,040	0,030	0,26	0,061	0,062	0,058	0,044
Kr^+	0,37	0,12	0,048	—	0,022	0,26	0,053	0,054	0,05	0,037
Xe^+	0,36	0,12	0,045	0,029	—	0,25	0,051	0,052	0,023	0,035
He_2^+	0,44	0,21	0,098	0,076	0,059	0,28	0,098	0,103	0,094	0,078
Ne_2^+	0,37	0,14	0,056	0,040	0,030	0,26	0,061	0,062	0,058	0,044
Ar_2^+	0,37	0,12	0,049	0,031	0,023	0,26	0,054	0,054	0,051	0,038
Xe_2^+	0,36	0,12	0,043	0,026	0,017	0,25	0,049	0,048	0,046	0,033
F_2^+	0,37	0,14	0,056	0,040	0,031	0,26	0,062	0,062	0,058	0,045

Здесь T_i и T_e — температура ионов и электронов соответственно. Соотношение (17.8) справедливо с той же точностью, с какой выполняется соотношение Эйнштейна (17.7).

Коэффициент диффузии ионов в чужом газе с хорошей точностью (погрешность 10—15%) может быть выражен через поляризуемость β основного газа и приведенную массу иона и молекулы основного газа [4]: $\mu = \frac{M_i M_г}{M_i + M_г}$ (M_i —масса иона; $M_г$ — масса молекулы основного газа):

$$D_i = \frac{0{,}0031}{\sqrt{\mu\beta}} T_i, \qquad (17.9)$$

где T_i — температура ионов, °К; β — поляризуемость в атомных единицах (атомная единица поляризуемости эквивалентна $1{,}5 \cdot 10^{-25}$ $см^3$), а μ — $а.е.м.$

В табл. 17.8 представлены значения коэффициента диффузии различных ионов в некоторых газах при $T_i = 273°К$ и $P = 1$ $атм$ [4]. Коэффициент диффузии ионов в собственном газе выражается с неопределенностью 5—10% через сечение резонансной перезарядки иона на атоме, когда температуры ионов и атомов близки [4]:

$$D = \frac{0{,}341\sqrt{T/M}}{n\sigma^*_{рез}(2{,}24\sqrt{2T/M})}, \qquad (17.10)$$

где T — температура газа, °К; M — масса атомов (ионов), $г$; $\sigma^*_{рез}(2{,}24\sqrt{2T/M})$ — сечение резонансной перезарядки иона на атоме при скорости соударения $2{,}24\sqrt{2T/M}$, $см^2$; n — плотность числа частиц газа, $см^{-3}$.

В табл. 17.9 представлены значения коэффициента диффузии некоторых ионов в собственном газе, вычисленные на основании выражения (17.10).

Таблица 17.9

Коэффициент диффузии ионов в собственном газе, $см^2/сек$ ($n = 2{,}7 \cdot 10^{19}$ $см^{-3}$) [4]

T, °К	He^+	Ne^+	Ar^+	Kr^+	Xe^+	Hg^+	Rb^+	Cs^+
77	0,086	0,041	0,013	—	—	—	—	—
195	0,194	0,077	0,0303	—	—	—	—	—
300	0,26	0,109	0,041	0,022	0,016	—	—	—
350	—	—	—	—	—	0,0078	—	—
630	—	—	—	—	—	—	0,0069	0,005
1400	—	—	—	—	—	—	—	0,0077

17.2. ДИФФУЗИЯ В ЖИДКОСТЯХ

Диффузия в жидкостях обусловлена процессами многочастичного взаимодействия пробной частицы с частицами жидкости. Поэтому теоретическое определение коэффициентов диффузии в жидкостях весьма затруднено, и единственным источником надежной информации является эксперимент. Исключение составляет диффузия больших молекул в растворителе с низкой молекулярной массой, которая описывается формулой Эйнштейна—Стокса:

$$D_{12} = kT/(6\pi\nu r), \qquad (17.11)$$

где r — радиус большой молекулы, форма которой аппроксимируется сферой; ν — динамическая вязкость жидкости. В уравнении (17.11), справедливом для многих систем, величина r остается неопределенным параметром, который известен с точностью до множителя 2.

Коэффициенты диффузии для многих веществ в различных растворителях хорошо аппроксимируются эмпирической формулой [5]*

$$D_{12} = K_1 K_2, \qquad (17.12)$$

где K_1 — коэффициент, не зависящий от свойств растворителя, а K_2 — коэффициент, не зависящий от свойств растворенного вещества. Коэффициенты K_1 и K_2 зависят от температуры, однако если известно значение D_{12} при температуре T_1, можно определить $D_{12}(T_2)$ из соотношения

$$D_{12}(T_2) = D_{12}(T_1)\frac{T_2}{T_1}\cdot\frac{\nu_2(T_1)}{\nu_2(T_2)}, \qquad (17.13)$$

где $\nu_2(T_2)$, $\nu_2(T_1)$ — динамическая вязкость растворителя при температурах T_2 и T_1. В табл. 17.10 представлены значения K_1 для некоторых растворенных веществ, а в табл. 17.11 — K_2 для некоторых растворителей.

Таблица 17.10

Значения K_1 для различных растворенных веществ [5]

Растворенное вещество	t, °C	K_1, 10^{-3} $(см/сек)^{1/2}$	Растворенное вещество	t, °C	K_1, 10^{-3} $(см/сек)^{1/2}$
Аллиловый спирт	15	2,328	Пиридин	20	2,723
Анилин	15	2,178	Пропиловый спирт	15	2,243
Ацетон	15	3,546			
Бензальдегид	15	2,364	Пропионовая кислота	15	3,008
Бензол	25	3,460			
Бромбензол	15	2,403	Тетрахлорметан	25	3,578
Бромэтан	15	4,025			
Бутиловый спирт	15	2,049	Трихлорметан	15	3,328
Вода	25	2,591	Толуол	25	3,037
1,2-Дибромэтан	15	2,913	Уксусная кислота	25	2,312
Диэтиловый эфир	15	3,833	Фенол	5	1,889
			Фурфурол	15	2,178
Изоамиловый спирт	15	2,282	Хлоральгидрат	15	2,033
Иодметан	7,5	3,912	Хлорбензол	15	2,591
Метиловый спирт	15	2,861	Этиловый спирт	15	2,456
Муравьиная кислота	6	4,159			
Нитробензол	15	2,322			

Таблица 17.11

Значение K_2 для различных растворителей [5]

Растворитель	t, °C	K, 10^{-3} $см/сек^{-1/2}$	Растворитель	t, °C	K, 10^{-3} $см/сек^{-1/2}$
Бензол	15	5,925	Тетрахлорметан	25	4,239
Бромбензол	25	5,094			
Вода	25	4,151	Толуол	25	6,109
Метиловый спирт	15	6,745	Хлорбензол	25	5,676
			Этиловый спирт	25	3,831

Для сильно разбавленных растворов электролитов коэффициент диффузии

$$D_{12} = \frac{2RT}{[1/\lambda_+ + 1/\lambda_-]\,Fa^2}, \qquad (17.14)$$

где $R = 8{,}316$ *дж/(град·моль)* — газовая постоянная; T — температура, °K; λ_-, λ_+ — проводимость отрицательных и положительных ионов в пределе нулевых концентраций, *а·г-экв/(см⁴·в)*; $Fa = 9650$ *к/г-экв* — число Фарадея. Предельные значения проводимостей λ_+^0 и λ_-^0 в воде при $t = 25$°C представлены в табл. 17.12. В этом случае выражение (17.14) имеет вид

$$D_{12} = \frac{0{,}536\cdot 10^{-6}}{1/\lambda_+ + 1/\lambda_-}\ см^2/сек.$$

Значения коэффициентов диффузии некоторых веществ, растворенных в воде, приведены в табл. 17.13 и 17.14.

Таблица 17.12

Предельные значения ионной проводимости в воде при 25°C, *а·г-экв/(см⁴·в)* [5]

Катион	λ_+^0	Анион	λ_-^0
H^+	349,8	OH^-	197,6
Li^+	38,7	Cl^-	76,3
Na^+	50,1	Br^-	78,3
K^+	73,5	I^-	76,8
NH_4^+	73,4	NO_3^-	71,4
Ag^+	61,9	ClO_4^-	68,0
Tl^+	74,7	HCO_3^-	44,5
$^1/_2\ Mg^{2+}$	53,1	HCO_2^-	54,6
$^1/_2\ Ca^{2+}$	59,5	$CH_3CO_2^-$	40,9
$^1/_2\ Sr^{2+}$	50,5	$ClCH_2CO_2^-$	39,8
$^1/_2\ Ba^{2+}$	63,6	$CNCH_2CO_2^-$	41,8
$^1/_2\ Cu^{2+}$	54	$CH_3CH_2CO_2^-$	35,8
$^1/_2\ Zn^{2+}$	53	$CH_3(CH_2)_2CO_2^-$	32,6
$^1/_3\ La^{3+}$	69,5	$C_6H_5CO_2^-$	32,3
$^1/_3\ CO(NH_3)_6^{3+}$	102	$HC_6O_4^-$	40,2
		$^1/_2\ C_6O_4^{2-}$	74,2
		$^1/_2\ SO_4^{2-}$	80
		$^1/_2\ Fe(CN)_6^{3-}$	101
		$^1/_4\ Fe(CN)_6^{4-}$	111

* Везде ниже, если это не оговорено особо, речь идет о диффузии вещества, концентрация которого в растворе мала.

Таблица 17.13

Коэффициенты диффузии неорганических веществ, растворенных в воде [1]

Растворенное вещество	Концентрация, *моль/л*	*t*, °C	D, 10^{-5} *см²/сек*
Br_2	0,00105	25	1,25
	0,00173	25	1,24
	0,00183	25	1,235
	0,00193	25	1,23
	0,00230	25	1,22
	0,00309	25	1,202
	0,00429	25	1,193
	0,00501	25	1,18
CO_2	0	18	1,46
$CaCl_2$	0,29	9	0,79
	0,37	9	1,09
	1,5	9	0,84
$CdSO_4$	0	16,8	0,35
	0,5	16,8	0,34
	1,0	16,8	0,33
	1,5	16,8	0,44
	2,0	16,8	0,43
	3,0	16,8	0,44
	3,5	16,8	0,34
	4,5	16,8	0,36
	5,5	16,8	0,4
	6,5	16,8	0,45
	7,0	16,8	0,48
Cl_2	0,1	12	1,4
	0,1	16,3	1,3
$CoCl_2$	0,0062	18	0,7
	0,0127	11	0,73
$CuCl_2$	1,5	10	0,5
$CuSO_4$	0,1	17	0,45
	0,5	17	0,34
	0,95	17	0,27
D_2O	0	25	2,5
H_2	0	18	3,6
HCl	0	10	2,2
	0	25	3,1
	0,02	10	2,1
	0,02	25	3,0
	0,05	10	2,0
	0,05	25	2,9
	0,2	10	2,1
	0,2	25	3,0
	0,35	10	2,1
	0,35	25	3,1
	0,43	0	1,6
	1,0	25	3,6
	2,0	0	1,8
	2,0	11	2,5

Продолжение табл. 17.13

Растворенное вещество	Концентрация, *моль/л*	*t*, °C	D, 10^{-5} *см²/сек*
HCl	5,0	0	2,2
	6,5	11	3,1
	8,0	0	2,7
	9,0	11,5	3,4
HNO_3	0,84	5,5	1,7
	3,0	6,0	1,8
	3,0	7	2,4
	20	9	1,3
H_2O	0,011	20	0,89
	0,99	20	1,05
	0,103	20	1,00
KBr	1,0	10	1,2
K_2CO_3	3,0	10	0,70
KCl	0,00125	25	1,96
	0,00194	25	1,95
	0,00325	25	1,95
	0,00585	25	1,94
	0,00704	25	1,93
	0,00980	25	1,92
	0,02	25	1,94
	0,1	25	1,89
	0,5	25	1,82
	0,	18,5	1,7
	0,05	18,5	1,56
	0,10	18,5	1,54
	0,20	18,5	1,53
	0,50	18,5	1,55
	1,00	18,5	1,61
	1,5	18,5	1,67
	2,00	18,5	1,73
KI	0,01	10	1,3
	0,01	18	1,7
	0,10	10	1,24
	0,10	18	1,61
	1,0	10	1,21
	1,0	18	1,59
	5,5	10	1,37
	5,5	18	1,8
KNO_3	0,05	18	1,45
	0,20	18	1,39
	0,40	18	1,35
	0,80	18	1,28
	1,0	18	1,24
	2,0	18	1,15
	2,5	18	1,17
KOH	0,1	13,5	2,0
	0,9	13,5	2,16
	3,9	13,5	2,82
K_2SO_4	0,02	19,6	1,27
	0,05	19,6	1,12
	0,28	19,6	1,0
	0,95	19,6	0,92

Продолжение табл. 17.13

Растворенное вещество	Концентрация, моль/л	t, °C	D, 10^{-5} см²/сек
LiBr	2,3	10	0,93
	4,4	10	1,04
LiCl	0,01	9	0,88
	0,01	18	1,16
	1,0	9	0,81
	1,0	18	1,06
	4,2	9	0,84
	4,2	18	0,11
LiI	1,3	10	0,93
$MgSO_4$	0,5	15,5	0,54
	1,0	15,5	0,53
	3,0	15,5	0,59
	4,5	15,5	0,73
N_2	0	18	1,63
NH_3	0,683	4	1,23
	3,55	4,5	1,23
NaBr	2,9	10	1,0
Na_2CO_3	2,4	10	0,45
NaCl	0,05	18,5	1,26
	0,40	18,5	1,2
	1,00	18,5	1,24
	2,0	18,5	1,29
	3,0	18,5	1,36
	4,0	18,5	1,43
	5,0	18,5	1,49
NaI	1,0	10	0,93
	2,0	10	1,04
$NaNO_3$	0,6	13	1,04
	3,0	10,5	0,88
	5,0	10,5	0,96
	6,0	13	0,90
NO	0	16	1,54
I_2	0,05	25	1,25
O_2	0	25	2,60
NaOH	0,02	12	1,3
	0,10	12	1,29
	0,90	12	1,21
	3,9	12	1,14
N_2SO_4	1,4	10	0,76
$NaCH_3COO$	0,2	12	0,71
$Ni(NO_3)_2$	0,0088	18	0,667
	0,0226	18	0,822
	0,068	18	0,93

Продолжение табл. 17.13

Растворенное вещество	Концентрация, моль/л	t, °C	D, 10^{-5} см²/сек
$Pb(NO_3)_2$	0,22	12	0,82
	0,82	12	0,76
$ZnSO_4$	0,025	19,5	0,58
	0,050	19,5	0,54
	0,55	19,5	0,12
	2,95	19,5	0,38
$Zn(CH_3COO)_2$	2,0	0	0,139
	2,0	18	0,243

Таблица 17.14

Коэффициент диффузии органических соединений в водных растворах [6]

Растворенное вещество	t, °C	Концентрация, моль/л	D, 10^{-5} см²/сек
Аллаксан	20	0	0,67
Арабиноза	20	0	0,70
Ацетамид	20	0	1,05
Ацетонитрил	15	0	1,26
Гидроксиион	20	0	0,78
Глицерин	10	0,125	0,63
Глюкоза	15	0	0,52
Кислота винная	15	0,01	0,61
» уксусная	12,5	0	0,91
Кофеин	10	0	0,42
Лактоза	20	0	0,46
Мальтоза	20	0	0,426
»	10	0	0,328
Маннит	20	0	0,605
Мочевина	12	0	0,99
Никотин	20	0	0,53
Пентаэритрит	20	0	0,69
Пирогаллол	15	0	0,56
Рафиноза	20	0,05	0,36
Резорцин	20	0	0,77
Сахароза	12	0	0,36
Сероводород	15	0	1,43
Спирт аллиловый	15	0	0,90
» бутиловый	15	0	0,77
» изоамиловый	15	0	0,69
» метиловый	15	0	1,28
» пропиловый	15	0	0,87
» этиловый	15	0	1,00
Уретан	15	0	0,87

Таблица 17.15

Коэффициент диффузии различных веществ в метиловом спирте (концентрация раствора 1%, $t = 15°$ С) [6]

Растворенное вещество	D, 10^{-5} см²/сек	Растворенное вещество	D, 10^{-5} см²/сек
Аллиловый спирт	1,80	трихлоруксусная	1,45
Анилин	1,49	фталевая	1,30
Ацетанилид	1,50	хлорбензойная	1,29
Ацетилдифениламин	0,98	хлоруксусная	1,52
Ацетонитрил	2,64	*м*-Нитробензальдегид	1,24
Бензальдегид	1,66	Нитрофенол	1,38
Броманилии	1,41	Пиридии	1,58
Бромбензол	1,75	Салол	1,29
Бромнитрофеиол	1,43	*2, 4, 6*-Трибромфеиол	1,12
3-Бромпропилен	2,22	*2,4,6*-Тринитрофенол	1,32
Бромфенол	1,34	*2, 4, 6*-Трихлорфенол	1,21
Ванилин	1,00	Уретан	1,41
Гидрохинон	1,25	Фенетол	1,40
Дибензиламин	0,86	Фенилацетат	1,62
п-Дибромбензол	1,55	Фенол	1,40
Дибромнафталин	1,33	Фенолфталеин	0,78
Динодметан	1,68	Фурфурол	1,70
м-Динитробеизол	1,56	Хлоралгидрат	1,16
Динитронафталин	1,32	Хлоранилин	1,34
2, 4-Дииитрофенол	1,40	Хлорбромметан	2,50
1, 1-Динитрогидрин	1,36	*1*-Хлоргидрин	1,30
Дихлорнафталин	1,52	Хлорнитробензол	1,68
Изоамиловый спирт	1,34	Хлороформ	2,07
Иодбензол	1,65	Хлорфенол	1,32
Иодоформ	1,83	Четыреххлористый углерод	1,70
3-Иодпропилен	1,72	Этил бромистый	2,40
Кислота:		» иодистый	2,16
промпропионовая	1,35	Этилен бромистый	1,95
дихлоруксусная	1,36	» иодистый	1,56
иодпропионовая	1,36	Этилиитрат	2,20
молочная	1,36		
пропионовая	1,62		
трибромуксусная	1,23		

Таблица 17.16

Коэффициеит диффузии веществ в бензоле (коицеитрация раствора 1%, $t = 15°$С) [6]

Растворенное вещество	D, 10^{-5} см²/сек	Растворенное вещество	D, 10^{-5} см²/сек
Альдегид салициловый	1,78	*п*-Дибромбензол	1,37
Ацетилдифениламин	0,90	Дибромиафталин	1,25
Бензальдегид	1,73	*м*-Динитробеизол	1,54
Бром (0,1 *М*, 12°С)	2,00	Динитронафталнн	1,23
Броманилин	1,41	*п*-Дихлорбеизол	1,90
Бромбензол	1,86	Дяхлорнафталии	1,40
α-Бромнафталин	1,30	Иод (0,05*М*, 20°С)	1,95
Бромиитробензол	1,33	Иодбензол (<1%, 8°С)	1,35
Бромоформ (18°С)	1,62	Иодоформ	1,38
Бромфенол	1,34	Кислота бензойная	1,36
Гексахлорбензол (<1%, 8°С)	1,02	» фталевая	1,37
		» хлоруксусная	1,48
		Метилсалицилат	1,56

Продолжение табл. 17.16

Растворенное вещество	D, 10^{-5} см²/сек	Растворенное вещество	D, 10^{-5} см²/сек
Нафталин (<1%, 8°С)	1,19	*1, 2, 3*-Трихлорпропан	1,72
Нитробеизол	1,84	Фенантреи (<1%, 8°С)	0,95
α-Нитронафталин	1,39	Феиол (5°С)	1,27
Спирт изоамиловый	1,48	Хинон	1,68
» пропиловый	1,60	Хлораиилин	1,56
1, 2, 4, 5-Тетрахлорбензол (<1%, 8°С)	1,24	Хлорбензол	1,42
		α-Хлорнафталин	1,20
Тринитротолуол	1,39	Хлориитробензол	1,70
2, 4, 6-Тринитрофенол	1,39	Хлороформ	2,11
		Хлорфеиол	1,42
1, 2, 4-Трихлорбензол (< 1%, 8°С)	1,34	Этилеи бромистый	1,97
		» иодистый	1,40
		Эфир этиловый	2,21

Таблица 17.17

Коэффициеит диффузии веществ в различных растворителях [6]

Растворитель	Растворенное вещество	Концентрация, моль/л	t, °С	D, 10^{-5} см²/сек
Анизол	Иод	0,1	20	1,13
Ацетон	Бромоформ	0	20	2,73
Бромоформ	Ацетон	0,25	20	0,272
»	Бензол	1	20	1,69
»	Метанол	0,5	20	1,93
»	Спирт этиловый	0,5	20	0,976
»	» пропиловый	1	20	0,77
»	» амиловый	1	20	0,516
»	Эфир этиловый	0,25	20	0,342
Гексан	Бромбензол	0	7	2,60
Гептан	Иод	0,1	20	2,67
Декалин	Бромбензол	0	7	0,47
»	α-Бромнафталин	0	7	0,34
Кислота уксусная	Иод	0	7	1,51
То же	Бромбензол	0,1	20	1,68
» »	Иод	0,1	16	3,60
Сероуглерод	Бром	0	19	3,40
»	Фенол	0	19	0,20
Спирт изоамиловый	»	0	19	0,20
Спирт этиловый	Азобензол	0,2	20	0,74
» »	Аконитин	0,04	20	0,27
» »	Спирт аллиловый	1	20	0,95
» »	Спирт амиловый	1	20	0,76
» »	Ацеталь	1	20	1,13
» »	Ацетамнд	0	20	0,67
» »	Ацетоин	0	20	0,556
» »	Бромнафталин	0,5	20	0,740
» »	Бромоформ	0,5	20	0,976
» »	Бруцин	0,062	20	0,28
» »	Гидрохиион	0	20	0,488
» »	Глицерин	0	20	0,532
» »	Иод	0,1	8	0,90
» »	Иодбензол	0,25	20	0,97
» »	Камфара	0,5	20	0,694
» »	Пиридин	0,5	20	1,11
» »	Резорции	0	20	0,451
» »	Салигенин	0	20	0,608

Продолжение табл. 17.17

Растворитель	Растворенное вещество	Концентрация, моль/л	t, °C	D, 10^{-5} см²/сек
Спирт этиловый	Кислота стеариновая	0,2	20	0,59
» »	Фенол	0,1	20	0,80
» »	Хлорал	1	20	0,614
» »	Хлороформ	1	20	1,25
Эфир этиловый	Бромбензол	0	7	3,25
» »	Бромоформ	0	17	3,30
» »	Нитробензол	0	8	3,24
» »	Фенол	0	19	3,60
Тетралин	Бромбензол	0	7	0,48
»	α-Бромнафталин	0	7	0,36
Тетрахлорэтан	Тетрабромэтан	0,06	50	0,94
Толуол	Бромбензол	0	7	1,59
»	Иод	0,1	20	1,95
Углерод четыреххлористый	»	0,1	20	1,36
Хлороформ	»	0,05	10	1,93
»	Фенол	0	10	1,60
Циклогексан	Бромбензол	0	7	1,14
Этилацетат	Иод	0,1	20	2,15
Этилбензол	Бромбензол	0	7	1,44
Эфир дибензиловый	α-Бромнафталин	0	7	0,149

Таблица 17.18

Коэффициент диффузии веществ в расплавленных солях [6]

Диффундирующее вещество	Среда	t, °C	D, 10^{-5} см²/сек
$AgNO_3$	KNO_3	360	4,56
$AgNO_3$	KNO_3	390	4,86
$AgNO_3$	$NaNO_3$	330	4,57
$AgNO_3$	$NaNO_3$	360	5,06
AgBr	KBr	780	4,92
AgCl	KCl	720	4,63
AgCl	KCl	780	5,10
AgCl	KCl; LiCl	480	5,61
AgCl	KCl, LiCl	740	6,61
$Ba(NO_3)_2$	KNO_3	370	2,06
$Ba(NO_3)_2$	$NaNO_3$	360	3,71
KB	KNO_3	360	3,01
KCl	KNO_3	360	2,96
$PbCl_2$	KCl, LiCl	530	2,06
$PbCl_2$	KCl, LiCl	720	4,40
$NaNO_3$	KNO_3	360	5,22
$Sr(NO_3)_2$	KNO_3	360	2,81
$Sr(SO_3)_2$	$NaNO_3$	345	4,17
TlBr	KBr	770	4,28
TlCl	KCl, LiCl	520	3,10
TlCl	KCl	720	3,14
$TlNO_3$	KNO_3	345	3,17
$TlNO_3$	Na_2NO_3	360	4,31

Таблица 17.19

Коэффициеит диффузии в амальгамах [4]

Металл	t, °C	D, 10^{-5} см²/сек	Металл	t, °C	D, 10^{-5} см²/сек
Li	25	0,93	Zn	25	2,4
Na	25	0,86	Cd	25	2,0
K	25	0,71	Sn	25	2,1
Rb	7,3	0,53	Bi	25	1,5
Cs	25	0,64	Pb	25	2,1
Ag	16	1,11	Ba	7,8	0,60
Au	25	0,73	Sr	9,4	0,54
Tl	25	1,18	Ca	10,2	0,62

Таблица 17.20

Коэффициент диффузии в расплавлениых металлах [4]

Диффундирующий металл	Среда диффузии	t, °C	D, 10^{-5} см²/сек	Диффундирующий металл	Среда диффузии	t, °C	D, 10^{-5} см²/сек
Mg	Al	700	7,54	Rh	Pb	500	3,52
Au	Bi	500	5,22	Pt	Pb	490	1,95
Si	Fe	1480	2,4	Ag	Sn	500	4,8
Si	Fe	1560	10,8	Au	Sn	500	5,37
Au	Pl	50	3,7	Pb	Sn	500	3,68

17.3. ДИФФУЗИЯ В ТВЕРДЫХ ТЕЛАХ

Основным источником информации о коэффициентах диффузии в твердом теле, так же как и в жидкости, является эксперимент. При этом, вследствие крайней чувствительности результатов измерений к чистоте исследуемого вещества и к температурным колебаниям, результаты различных измерений характеризуются разбросом в пределах порядка величины. Данные, представленные в таблицах, усреднены по нескольким измерениям, при этом, в силу произвольного способа усреднения, указанные данные справедливы по порядку величины.

Температурная зависимость коэффициента диффузии в твердом теле описывается простой полуэмпирической формулой

$$D = D_0 \exp(-Q/kT), \qquad (17.15)$$

где Q — энергия активизации; D_0 — фактор диффузии. Соотношение (17.15) выполняется в широком диапазоне температур в пределах точности измерений коэффициента диффузии. Для веществ, имеющих кристаллическую структуру, коэффициент диффузии является тензором. Приведенные ниже данные являются обычно результатом усреднения этого тензора по направлениям. В отдельных случаях приводятся значения коэффициента диффузии в направлениях, параллельном ($D_\parallel$) и перпендикулярном ($D_\perp$) к главной оси кристалла. В табл. 17.21—17.31 представлены значения параметров, входящих в соотношение (17.15), а также интервал температуры, где производились измерения.

Таблица 17.21

Параметры выражения (17.15) в различных диапазонах температур [7]

Металл	Температурный интервал, °С	D_0, $см^2/сек$	Q, $ккал/моль$
Ag	450—900	0,81	45,6
Al	330—460	0,10	30,5
	450—650	1,71	34
Au	600—950	0,031	39,36
	850—1050	0,107	42,26
Co	770—1050	0,50	65,4
	1000—1300	0,2	62
Cu	500—1000	70,0	56,0
	700—900	120	66,3
α-Fe	900—1200	3,6	71
γ-Fe	1070—1350	1,05	67,8
	1407—1515	6,8	61,7
δ-Fe	700—1100	0,48	65,8
Ni	1042—1404	1,9	68
Pb	174—322	0,281	24,2
Pd	1050—1500	0,205	63,6
Pt	1250—1725	0,22	66,5
δ-Pu	35—440	0,0045	23,8
α-Th	1100—1400	700	83,5
β-Th	1450—1550	10^5	99,7
Be, ⊥	550—1050	0,52	37,6
Be, ∥	550—1050	0,62	39,4
Ta	1250—2200	0,12	98,7
	1827—2527	2	110
α-U	580—650	0,002	40
β-U	700—755	0,0135	42
γ-U	800—1050	0,002	27
V	880—1356	0,36	73,65
	1356—1833	214	94,14

Продолжение табл. 17.21

Металл	Температурный интервал, °С	D_0, $см^2/сек$	Q, $ккал/моль$
Sb, ⊥	500—630	0,10	35,8
Sb, ∥	500—630	56	48
Cd, ⊥	110—315	0,10	19,1
Cd, ∥	110—315	0,05	18,2
Mg, ⊥	468—635	1,5	32,5
Mg, ∥	468—635	1,0	32,2
α-Ti	690—850	$6{,}4\cdot10^{-8}$	29,3
β-Ti	895—1580	0,0016	35
α-Tl, ⊥	150—275	0,4	22,6
	200—415	0,39	24,9
α-Tl, ∥	200—410	0,08	22,0
α-Zr	300—700	$5\cdot10^{-8}$	22
	650—827	$5\cdot10^{-2}$	52
β-Zr	900—1500	0,0024	38
	900—1750		27,7
Cr	950—1250	10^{-4}	52,7
	1200—1600	0,28	73,8
Hf	1795—1995	0,0012	38,7
Li	—65÷250	0,24	13,2
Mo	1700—1920	2,77	111
	1850—2350	0,3	95
Na	—65÷250	0,20	10
Nb	878—2400	1,1	96
ε-Pu	500—610	0,022	18,5
Rb	—65÷250	0,23	9,4
W	1287—1453	$6{,}3\cdot10^{7}$	135,8
	2000—2700	0,54	120,5
	2660—3230	42,8	153,1
In, ⊥	44—144	3,7	18,7
In, ∥	44—144	2,7	18,7
β-Sn, ⊥	160—228	10,7	25,2
β-Sn, ∥	160—228	7,7	25,6
Cs	830—1030	47	61,4
	750—950	11	57,2

Таблица 17.22

Параметры выражения (17.15) для коэффициента самодиффузии в твердых диэлектриках [7]

Параметр	Ar	C (графит)	Ge	α-P белый	Xe
t, °C	—195	1995—2347	730—915	0—30	—152÷—115
D_0, $см^2/сек$	350	10	10,8	$1{,}07\cdot10^{-3}$	7,3
Q, $ккал/моль$	4,15	163	69,4	9,4	7,4

Таблица 17.23

Параметры выражения (17.15) для диффузии малой примеси в серебре

Примесь	T, °К	D_0, $см^2/сек$	Q, $ккал/моль$
Fe	718—927	2,42	49,04
Co	—	104	59,9
Ni	750—950	21,9	54,8
Cu	700—950	1,23	46,1
Zn	640—925	0,54	41,7
Ge	—	0,084	36,5
Ru	794—945	180	65,8
Pd	735—939	9,57	56,75
Ag	450—900	0,81	45,6
Cd	592—937	0,44	41,7
In	592—937	0,41	40,6
Sn	592—937	0,25	39,3
Sb	468—942	0,17	38,3
Au	650—950	0,26	45,5
Hg	650—950	0,08	38,1
Tl	650—800	0,15	37,9
Pb	700—825	0,22	38,1

Таблица 17.24

Параметры выражения (17.15) для диффузии малой примеси в меди

Примесь	T, °К	D_0, $см^2/сек$	Q, $ккал/моль$
Fe	719—1074	1,4	51,8
Co	701—1077	1,93	54,1
Ni	743—1076	2,7	56,5
Cu	500—1000	70	56
Zn	—	0,34	45,6
Ga	—	0,55	45,9
As	—	0,12	42,0
Pd	807—1056	1,71	54,37
Ag	—	0,63	46,5
Cd	—	0,93	45,07
Sb	600—1000	0,34	42,0
Au	700—1000	0,15	45,7
Hg	—	0,35	44
Tl	785—996	0,71	43,3

Таблица 17.25

Параметры выражения (17.15) для диффузии малой примеси в золоте

Примесь	T, °К	D_0, $см^2/сек$	Q, $ккал/моль$
Fe	701— 948	0,082	41,6
Co	702— 948	0,068	41,6
Ni	702— 948	0,034	42,0
Ag	700—1007	0,072	40,2
Au	704—1048	0,091	41,7
Pt	799—1055	7,6	60,9
Hg	499—1027	0,116	37,4

Таблица 17.26

Параметры выражения (17.15) для диффузии малой примеси в никеле [7]

Примесь	t, °С	D_0, $см^2/сек$	D, $ккал/моль$
Mg	800—970	$2{,}3 \cdot 10^{-5}$	31,3
	1100—1300	0,44	56
Al	800—970	1,1	59,5
	1100—1300	1,87	64
Si	800—970	10,6	64,7
	1100—1300	1,5	61,7
Ti	1100—1300	0,86	61,4
Cr	690—900	0,03	40,8
	1100—1268	1,1	65,1
Mn	1100—1300	7,5	67,1
Fe	900—1500	0,8	61
Co	748—1192	0,75	64,7
	1155—1373	1,11	64,9
Cu	1054—1359	0,57	61,7
Mo	1100—1300	3	68,9
W	1100—1300	11,1	76,8
Au	900—1100	2	65

Таблица 17.27

Параметры температурной зависимости коэффициента диффузии малой примеси в β-Ti, аппроксимируемой выражением

$$D = D_{01} \exp(-Q_1/kT) + D_{02} \exp(-Q_2/kT)^*$$

Примесь	t, °С	D_{01}, 10^{-4} $см^2/сек$	Q_1, $ккал/моль$	D_{02}, 10^{-4} $см^2/сек$	Q_2, $ккал/моль$
Ti	900—1540	2	29,8	1,0	59,8
P	945—1600	36,2	24,1	5	56,5
Sc	919—1250	21	32,7	34	—
V	900—1550	10	34,7	3,4	61,5
Cr	950—1640	74	36,6	14	65,5
Mn	940—1640	76	34,3	12	64,5
Fe	910—1640	80	30	15	60,7
Co	920—1640	130	30,9	16	61,3
Ni	940—1640	170	31,6	20	60
Nb	1000—1640	13	34,9	9,5	69,5
Mo	900—1640	7	36,9	3,6	65
Sn	953—1595	38	31,6	9,5	69,5
Ta	1000—1600	7,2	36	50	80

* При низких температурах преобладает первый член выражения, при высоких — второй.

Параметры выражения (17.15) для взаимной диффузии металлов и сплавов [1]

Диффундирующий элемент	Диффузионная среда	Концентрация диффундирующего элемента, ат. %	t, °C	D_0, $см^2/сек$	Q, $ккал/моль$
Ag	Al	1,26	466—573	1,1	32,6
	Au	9	850—1000	$2{,}9\cdot10^{-2}$	38,0
	Cu	3	720—800	$2{,}9\cdot10^{-2}$	37,2
	Pb	$<0{,}12$	220—285	$7{,}4\cdot10^{-2}$	15,2
Al	Cu	15—21	500—850	$7{,}1\cdot10^{-2}$	39,2
Au	Ag	100	218—601	$5{,}3\cdot10^{-4}$	29,8
		18,4	767—916	$1{,}1\cdot10^{-4}$	26,6
	Cu	2,4—3,5	400—970	$6{,}8\cdot10^{-6}$	22,5
	Pb	100 или 0,03—0,09	100—300	0,35	14,0
B	α-Fe	—	—	10^5	62,0
Bi	Pb	2,0	220—285	$1{,}83\cdot10^{-2}$	18,4
C	Fe	Карбонизация	800—1100	$1{,}67\cdot10^{-2}$	28,7
		1,1 вес. %	900—1250	0,486	36,6
		0,1—1 вес. %	750—1250	$0{,}12\pm0{,}07$	32,6
	α-Fe	—	—	$7{,}9\cdot10^{-3}$	18,1
		—	—	$2\cdot10^{-2}$	20,1
Cd	Ag	2,0	650—895	$4{,}9\cdot10^{-5}$	22,35
		—	—	0,44	41,7
	Cu	3	720—860	$3{,}04\cdot10^{-4}$	23,7
	Pb	1,6	167—252	$1{,}83\cdot10^{-3}$	15,4
Co	α-Fe	—	—	0,4	54
	γ-Fe	—	—	$1{,}2\cdot10^5$	104
	Сталь	—	—	90	80
Cr	α-Fe	—	—	$3\cdot10^4$	82
	γ-Fe	—	—	$1{,}8\cdot10^4$	97
	Сталь	—	—	10	75
Cs	W	1-й адсорбционный слой	27—427	0,2	14,0
		2-й адсорбционный слой	27—427	$1{,}64\cdot10^{-3}$	23,0
Cu	Ag	2,0	650—895	$5{,}9\cdot10^{-5}$	24,8
	Al	Эвтектика	440—540	2,3	34,9
		0,85 или 0,17	457—565	$8{,}4\cdot10^{-2}$	32,6
	Au	100	301—616	$1{,}06\cdot10^{-3}$	27,4
		25,6	443—740	$5{,}8\cdot10^{-4}$	27,4
	Ge	—	—	$1{,}9\cdot10^{-4}$	4,1
	Pt	13,9	1041—1461	$4{,}8\cdot10^{-2}$	55,7
	β-Латунь (45% Zn)	—	—	$3{,}8\cdot10^{-2}$	24,9
Fe	Au	18,3	753—1003	$1{,}16\cdot10^{-4}$	24,4
	20%Fe, Ni — C	—	—	$18\cdot10^{-0{,}92\,[C]}$*	(75÷6) [C]*
		—	—	$71\cdot10^{-0{,}65\,[C]}$	(75÷5) [C]
	Ni	—	—	$8{,}4\cdot10^{-2}$	51,0
	W	0,04	1927—2527	11,5	140,0
Ge	Ce	Самодиффузия	—	87	73,5
Hg	Cd	4	156—202	2,6	19,6
In	Ag	20	650—895	$7{,}3\cdot10^{-5}$	24,4
		—	—	0,41	4063
Li	Ge	—	—	$2{,}5\cdot10^{-3}$	11,8
	Si	—	—	$2{,}3\cdot10^{-3}$	15,2
Mg	Al	Эвтектика	365—440	$1{,}5\cdot10^{-2}$	38,5
		5,5—11,0	395—577	0,12	28,6
Mn	Cu	8—11,4	400—850	$7{,}2\cdot10^{-6}$	23,2
Mo	W	Моноикристалл	1533—2260	$6{,}3\cdot10^{-4}$	80,5
		Поликристалл	1533—2260	$5\cdot10^{-3}$	80,5
N	Fe	—	—	$3{,}1\cdot10^{-3}$	18,0
		—	—	$3\cdot10^{-3}$	18,2
		—	—	$6{,}6\cdot10^{-3}$	18,6
	Th	—	—	$2{,}1\cdot10^{-3}$	22,5
	α-Ti	—	—	$1{,}2\cdot10^{-2}$	45,3
	β-Ti	—	—	0,35	33,8

* [C] — концентрация углерода, ат. %.

Диффундирующий элемент	Диффузионная среда	Концентрация диффундирующего элемента, ат. %	t, °C	D_0, $см^2/сек$	Q, ккал/моль
Ni	Au	15,0	800—1003	$1,74 \cdot 10^{-3}$	31,2
	Cu	7,5—11,8	550—950	$6,5 \cdot 10^{-5}$	29,8
	Pt	14,9	1043—1401	$7,8 \cdot 10^{-4}$	43,1
O	β-Ti	—	—	1,6	48,2
Pd	Ag	20,2	444—917	$6,4 \cdot 10^{-6}$	20,2
	Au	17,1	727—970	$1,13 \cdot 10^{-3}$	21,9
	Cu	4,3—6,2	490—960	$1,6 \cdot 10^{-6}$	39,0
Pt	Au	20,1	740—986	$1,24 \cdot 10^{-3}$	39,0
	Cu	2,4—3,5	490—960	$1,0 \cdot 10^{-6}$	21,9
Sb	Ag	2,0	650—895	$5,3 \cdot 10^{-5}$	21,7
Si	Al	0,5	465—600	0,9	30,55
Sn	Ag	20	650—895	$7,8 \cdot 10^{-5}$	21,4
	Cu	3,9—5,6	400—850	$4,1 \cdot 10^{-3}$	31,2
β-Sn	Pb	2,0	245—285	4,0	26,2
Th	W	Диффузия иа граиице между зернами	1780—2227	1,13	94,0
		Объемная диффузия	2127	1,0	120
		Поверхностиая диффузия	1380	0,47	66,4
Tl	Pb	2,0	220—285	$2,5 \cdot 10^{-2}$	19,4
U	W	—	1727	1,14	100,0
W	α-Fe	—	—	380	70
	γ-Fe	—	—	10^3	90
	Сталь	—	—	13	75
Y	W	—	1727	0,11	62
Zn	Zn	Самодиффузия в Zn чистотой 99,999%	—	0,22	14,3
		99,99%	—	0,38	14,6
	Al	0,84	415—555	12	27,8
	Cu	6,8—9,7	360—880	$3 \cdot 10^{-6}$	19,7
		3	720—860	$3,7 \cdot 10^{-6}$	22,0
		0—28,6	641—884	$3,2 \cdot 10^{-3}$	42,0
	β-Латуиь	—	—	0,024	22,8
Zr	W	—	1727	1,1	78,0

Таблица 17.29

Параметры соотиошения (17.15) для диффузии металлов в солях [1]

Диффундирующий металл	Диффузионная среда	D_0, $см^2/сек$	Q ккал/моль
Au	NaCl	0,2	24,6
	KCl	11,0	30,0
Cu	NaCl	0,5	25,4
	KCl	55,0	30,4
Ni	NaCl	0,2	25,4

Таблица 17.30

Параметры соотиошеиия (17.15) для диффузии иона Ag^+ в кристаллах [1]

Диффузионная среда	T, °K	D_0, $см^2/сек$	Q, ккал/моль
α-AgI	454—774	—	2,26
α-CuI	685—753	$4,5 \cdot 10^{-3}$	6,76
α-CuS	586—1192	$3,27 \cdot 10^{-4}$	4,57
α-Cu_2Te	603—794	2,4	20,86
α-AgI	451—701	$1,63 \cdot 10^{-4}$	2,26
α-Ag_2S	443—694	$4,6 \cdot 10^{-4}$	3,18
α-Ag_2Se	421—673	$1,55 \cdot 10^{-4}$	2,94
α-Ag_2Te	428—678	$3,85 \cdot 10^{-5}$	2,66
α-Ag_2I	473—653	$5,83 \cdot 10^{-3}$	4,57
NaCl	<550	1,6	17,70
	>550	3,13	41,40
$PbCl_2$	439—743	7,7	36,8
PbI_2	387—438	4,9—10,6	30,0
	528—588	10,6	30,4
PbS	733—1043	1,3	42,0
NaBr	—	50	47,5
α-Ag_2Se	—	$6,7 \cdot 10^{-4}$	20,04

Таблица 17.31

Коэффициенты диффузии ионов в кристаллах при различных температурах [1]

Диффундирующий ион	Диффузионная среда	T, °K	D, 10^{-6} см²/сек
Ag^+	α-AgI	454	17,7
		500	21,2
		551	28,7
		594	33,3
		651	40,1
		701	46,1
		744	48,5
	CuBr	518	51
	α-CuI	685	15,6
		722	22,5
		753	23,8
Cu^+	α-Cu_2S	503	1,85
		603	4,6
		693	9,4
	α-Cu_2Te	603	0,359
		749	1,98
		794	4,66
	Cu_3Sb	723	0,139
Li^+	AgCl	511	0,24
	α-AgI	753	37—41
	α-Ag_2S	443	0,4
	α-Ag_2S	503	4,1
		603	6,3
		693	16,5
Na^+	AgCl	723	0,116
Pb^{++}	AgBr	573	0,023
	$PbCl_2$	473	4,5
		523	11
		578	15
		653	23
		573	$2{,}1\cdot10^{-4}$
		573	$2{,}3\cdot10^{-3}$
Pb^{++}	$PbCl_2$	439	$1{,}7\cdot10^{-11}$
		498	$1{,}97\cdot10^{-9}$
		743	0,336
	PbI_2	387	$7{,}3\cdot10^{-11}$
		420	$1{,}35\cdot10^{-9}$
		438	$7{,}35\cdot10^{-9}$
Cl^-	AgI	453	$1{,}1\cdot10^{-4}$
Se^{2-}	Cu_2S	844	$1{,}1\cdot10^{-3}$
		967	$4{,}9\cdot10^{-3}$

Таблица 17.32

Коэффициенты взаимной диффузии твердых солей [1]

Диффундирующее вещество	Диффузионная среда	t, °C	D, 10^{-11} см²/сек
Ag (из $AgNO_3$)	Na-стекло	354	25,2
	Na-пермутит	354	14,8
Ag_4Sn	Cu_4Sn	450	231
$BaMoO_4$	$BaWO_4$	950	9,61
$BaWO_4$	$BaMoO_4$	950	3,47
$MgMoO_4$	$MgWO_4$	800	2,31
$MgWO_4$	$MgMoO_4$	800	1,39
$SrMoO_4$	$SrWO_4$	950	9,14
$SrWO_4$	$SrMoO_4$	950	3,01
$ZnMoO_4$	$ZnWO_4$	800	3,94
		850	6,36
$ZnWO_4$	$ZnMoO_4$	800	1,50
		850	2,89

Таблица 17.33

Параметры соотношения (17.15) для диффузии газов в твердых телах [1]

Диффундирующий газ	Диффузионная среда	t, °C	D_0, 10^{-6} см²/сек	Q, ккал/моль
H_2	SiO_2	200	3,5—13,7	10,1
		500	8,3—14,5	
He	SiO_2	20	3,5—7,9	5,5
		500	0,64—5,2	
	Пирекс	20	1,3	8,7
NH_3	Анальцим*	500	5,5	
		—	0,0025	11,48

* Природный алюмосиликат.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Справочник** химика. Т. 3. М., «Химия», 1964.
2. **Maggeo T. R., Mason E. A.** J. Phys. Chem. Ref. 1972, v. 1, p. 3.
3. **Палкина Л. А., Смирнов Б. М., Чибисов М. И.** Диффузия метастабильных атомов инертных газов в собственном газе.— «Ж. эксперим. и теор. физ.», 1969, т. 56, с. 340.
4. **Смирнов Б. М.** Атомные столкновения и элементарные процессы в плазме. М., Атомиздат, 1968.
5. **Рид Р., Шервуд Т.** Свойства газов и жидкостей. Пер. с англ. Л., «Химия», 1971.
6. **Bretsznajder S.** Prediction of Transport and Other Physical Properties of Fluids. Warszawa, 1971.
7. **Adda Y., Philibert J.** La diffusion dans les solids. V. 2. Paris, Press Universitaires de France, 1966.

ГЛАВА 18

ЭФФЕКТИВНЫЕ РАЗМЕРЫ АТОМОВ И ИОНОВ

Понятия атомного и ионного радиусов в значительной мере условны. Межатомные расстояния и молекулярные диаметры всецело зависят от характера действующих сил в конкретном физическом процессе, из которого определяются «размеры» атомов. Эффективные размеры атомов и молекул могут быть вычислены по коэффициентам диффузии и вязкости, определены из расстояний, на которые сближаются атомы в молекулах и кристаллах, из индикатрис рассеяния молекулярных пучков и т. д. В табл. 18.1 значения, заимствованные из работы [1], представляют собой деленные пополам межатомные расстояния в кристаллических структурах с координационным числом 12; из работы [2] — расстояния максимальной плотности заряда в нейтральном атоме, а для ионов соответствующее расстояние измерено до точки, где радиальная плотность заряда падает до 10% своего максимального значения. Зарядность ионов указана в круглых скобках перед значением ионного радиуса.

Таблица 18.1

Атомные и ионные радиусы, Å

Атомный номер	Химический символ	Атомный радиус	(Заряд иона) Ионный радиус
1	H	0,46[1]; 0,53[2]	(+1) 0,00; (—1) 1,36[1]; (—1) 2,02[2]
2	He	1,22[1]; 1,07[3]	
3	Li	1,55[1]; 1,61[2]	(+1)0,60[4]; (+1) 0,76[5]
4	Be	1,13[1]; 1,09[2]	(+2) 0,34[1]; (+2) 0,42[2]
5	B	0,91[1]; 0,84[2]	(+3) 0,20[1]; (+3) 0,32[2]
6	C	0,77[1]; 0,69[2]	(+4) 0,2[1]; (—4) 2,6[1]; (+4) 0,27[2];
7	N	0,71[1]; 0,63[2]	(—3)1,48[1]; (—3) 2,07[2]; (+5) 0,15[1]
8	O	0,56[2]	(—2) 1,36[1]; (—2) 1,46[2] (+6) 0,09[4]
9	F	0,53[2]	(—1) 1,29[2]; (+7) 0,19[4]
10	Ne	1,60[1]; 1,1[2]	
11	Na	1,89[1]; 2,05[2]	(+1) 0,98[1]
12	Mg	1,60[1]	(+2) 0,74[1]
13	Al	1,43[1]; 1,39[2]	(+3) 0,57[1];(+3) 0,62[2]
14	Si	1,34[1]; 1,18[2]	(+4)0,39[1]; (+4)0,51[2]; (—4)2,71[5]
15	P	1,3[1]; 1,02[2]	(—3)1,86[1]; (—3)2,48[2]; (+5)0,35[1]
16	S	0,95[2]	(—2) 1,82[1]; (+6) 0,29[1]
17	Cl	0,89[2]	(—1) 1,81[1]; (+7) 0,26[1]
18	Ar	1,92[1]; 1,56[2]	
19	K	2,36[1]; 2,8[2]	(+1)1,33[1]
20	Ca	1,97[1]; 2,3[2]	(+2) 1,04[1]
21	Sc	1,64[1]; 2,0[2]	(+3) 0,83[1]
22	Ti	1,46[1]; 1,9[2]	(+2)0,78[1]; (+3)0,69[1]; (+4)0,64[1]
23	V	1,34[1]; 1,8[2]	(+2)0,72[1];(+3)0,67 [1]; (+4) 0,61[1];(+5)0,4[1]
24	Cr	1,27[1]; 1,7[2]	(+2)0,83[1]; (+3)0,64[1]; (+6)0,35[1]
25	Mn	1,30[1]; 1,7[2]	(+2)0,91[1]; (+3)0,70[1]; (+4) 0,52[1]; (+7) 0,46[1]
26	Fe	1,26[1]; 1,6[2]	(+2)0,80 [1]; (+3) 0,67[1]
27	Co	1,25[1]; 1,5[2]	(+2) 0,78[1]; (+3) 0,64[1]
28	Ni	1,24[1]; 1,4[2]	(+2)0,74[1]; (+3) 0,35[4]
29	Cu	1,28[1]; 1,4[2]	(+1)0,98[1]; (+2)0,80[1]
30	Zn	1,39[1]; 1,5[2]	(+2)0,83 [1]
31	Ga	1,39[1];	(+3) 0,62 [1]
32	Ge	1,39[1]	(+2)0,65[1]; (+4)0,44[1]; (—4) 2,72[6]
33	As	1,48[1]	(+3)0,69[1]; (+5)0,47[1]; (—3) 1,91[1]
34	Se	1,6[1]	(—2)1,93[1]; (+4)0,69[1]; (+6)0,35[1]
35	Br	1,05[2]	(—1) 1,96[1]; (+7) 0,39[1]
36	Kr	1,98[1]; 1,77[2]	
37	Rb	2,48[1]; 3,1[2]	(+1)1,49[1]
38	Sr	2,15[1]; 2,5[2]	(+2) 1,20[1]
39	Y	1,81[1]	(+3) 0,97[1]
40	Zr	1,60[1]	(+4) 0,82[1]
41	Nb	1,45[1]	(+4) 0,67[1]; (+5) 0,66[1]
42	Mo	1,39[1]	(+4) 0,68[1]; (+6) 0,65[1]
43	Tc	1,36[1]	
44	Ru	1,34[1]	(+4) 0,62[1]
45	Rh	1,34[1]	(+3) 0,75[1]; (+4) 0,65[1]
46	Pd	1,37[1]	(+4) 0,64[1]
47	Ag	1,44[1]	(+1) 1,13[1]; (+1) 1,22[2]
48	Cd	1,56[1]; 1,7[2]	(+2) 0,99[1]
49	In	1,66[1]	(+1) 1,30[1]; (+3) 0,92[1]

Продолжение табл. 18.1

Атомный номер	Химический символ	Атомный радиус	(Заряд иона) Ионный радиус
50	Sn	1,58[1]; 1,46[2]	(+2)1,02[1]; (+4)0,67[1]; (+4) 0,80[2]
51	Sb	1,61[1]	(+3)0,90[1]; (+5)0,62[1]; (—3) 2,08[1]
52	Te	1,7[1]	(—2)2,11[1]; (+4)0,89[1]; (+6)0,56[1]
53	I	1,24[2]	(—1) 2,20[1]; (+7) 0,50[1]
54	Xe	2,18[1]; 1,99[2]	
55	Cs	2,68[1]; 3,4[2]	(+1) 1,65[1]
56	Ba	2,21[1]; 2,8[2]	(+2) 1,38[1]; (+2) 1,47[2]
57	La	1,87[1]	(+3) 1,04[1]; (+4) 0,90[1]
58	Ce	1,83[1]	(+3) 1,02[1]; (+4) 0,88[1]
59	Pr	1,82[1]	(+3) 1,00[1]; (+4)0,90[6]
60	Nd	1,82[1]	(+3) 0,99[1]
61	Pm	—	(+3] 0,98[1]
62	Sm	1,81[1]	(+3) 0,97[1]
63	Eu	2,02[1]	(+3) 0,97[1]
64	Gd	1,79[1]	(+3) 0,94[1]
65	Tb	1,77[1]	(+3) 0,89[1]; (+4) 0,84[6]
66	Dy	1,77[1]	(+3) 0,88[1]
67	Ho	1,76[1]	(+3) 0,86[1]
68	Er	1,75[1]	(+3) 0,85[1]
69	Tm	1,74[1]	(+3) 0,85[1]
70	Yb	1,93[1]	(+3) 0,81[1]
71	Lu	1,74[1]	(+3) 0,80[1]
72	Hf	1,59[1]	(+4) 0,82[1]
73	Ta	1,46[1]	(+5) 0,66[1]
74	W	1,40[1]	(+4) 0,68[1]; (+6)0,65[1]
75	Re	1,37[1]	(+6) 0,52[1]
76	Os	1,35[1]	(+4) 0,65[1]
77	Ir	1,35[1]	(+4) 0,65[1]
78	Pt	1,38[1]; 1,8[2]	(+4) 0,64[1]
79	Au	1,44[1]; 1,8[2]	(+1) 1,37[1]
80	Hg	1,60[1]; 1,8[2]	(+2) 1,12[1]
81	Tl	1,71[1]	(+1) 1,36[1]; (+3)1,05[1]
82	Pb	1,75[1]	(+2) 1,26[1]; (+4)0,76[1]
83	Bi	1,82[1]	(+3)1,20[1]; (+5)0,74[1]; (—3) 2,13[1]
87	Fr	2,80[1]	
88	Ra	2,35[1]	(+2) 1,44[1]
89	Ac	2,03[1]	(+3) 1,11[1]
90	Th	1,80[1]	(+3) 1,08[1]; (+4)0,95[1]
91	Pa	1,62[1]	(+3) 1,06[1]; (+4)0,91[1]
92	U	1,53[1]	(+3) 1,04[1]; (+4)0,89[1]
93	Np	1,50[1]	(+3) 1,02[1]; (+4)0,88[1]
94	Pu	1,62[1]	(+3) 1,01[1]; (+4)0,86[1]
95	Am	—	(+3) 1,00[1]; (+4)0,85[1]

Таблица 18.2

Диаметры молекул [2, 3]

Молекула	Диаметр молекулы, Å	Молекула	Диаметр молекулы, Å
H_2	2,5—2,77	NO	3,4
H_2O	3,50	N_2O	4,0
N_2	3,5	NH_3	3,0
O_2	2,94—3,56	CH_4	3,24—4,30
CO	3,17—3,79	Cl_2	3,55—5,86
CO_2	3,24—4,54		

Таблица 18.3

Радиусы многоатомных ионов в растворах [4]

Ион	Радиус, Å	Ион	Радиус, Å
H_3O^+	1,35	NO_3^-	1,89
CN^-	1,92	OH^-	1,53
ClO_4^-	2,36	SCN^-	1,95
$HCOO^-$	1,58	SH^-	2,00
MnO_4^-	2,40	SO_4^{2-}	2,30
NH_4^+	1,43		

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Справочник** химика. Под ред. Б. П. Никольского. Т. 1. Изд. 3-е. Л., «Химия», 1971.
2. **Аллен К. У.** Астрофизические величины. Пер. с англ. М., Изд-во иностр. лит., 1960.
3. **Кэй Дж., Лэби Т.** Таблицы физических и химических величин. Пер. с англ. Под ред. К. П. Яковлева. М., Физматгиз, 1962.
4. **Краткий** справочник по химии. Под ред. О. Д. Куриленко. Киев, «Наукова думка», 1965.
5. **Мелвин-Хьюз Э. А.** Физическая химия. Т. 1. Пер. с англ. М., Изд-во иностр. лит., 1962.
6. **Дей М. К., Селбин Д.** Теоретическая неорганическая химия. Пер. с англ. М., «Химия», 1969.

IV. ЭЛЕКТРИЧЕСТВО И МАГНЕТИЗМ

ГЛАВА 19

. ЭЛЕКТРИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА МЕТАЛЛОВ И СПЛАВОВ

19.1. ВВЕДЕНИЕ

Высокая проводимость металлов связана с особенностью их электронного спектра, в котором непосредственно над заполненными уровнями находятся уровни свободные. На рис. 19.1 показаны различные схемы

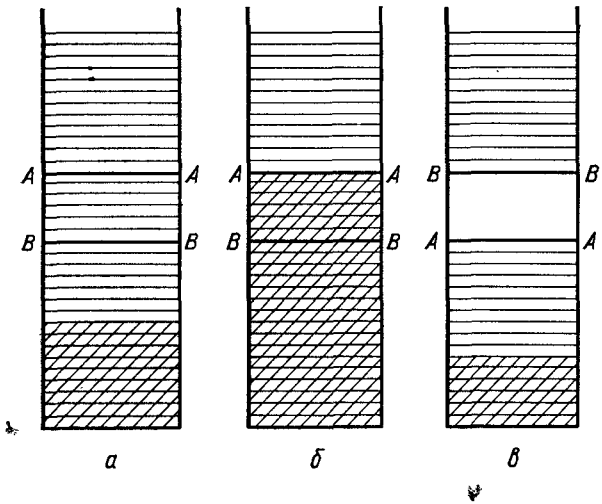


Рис. 19.1. Схема зон для металлов:

а, *в* — проводимость обусловлена неполным заполнением первой зоны; *б* — проводимость обусловлена перекрытием полностью заполненных первой и второй зон [1]; *AA* — верхняя граница первой зоны; *BB* — дно второй зоны; горизонтальные линии — допустимые электронные уровни; штриховые — область заполненных уровней.

энергетических зон, приводящие к проводимости металла за счет неполного заполнения нижней зоны или перекрытия зон.

Основные механизмы, приводящие к появлению конечного сопротивления металлов, таковы: 1) взаимодействие электронов с фононами; 2) столкновения электронов друг с другом; 3) взаимодействие электронов с примесными атомами и другими статическими дефектами кристаллической решетки. В магнитных металлах возможно также дополнительное взаимодействие электронов (например, со спиновыми волнами). Первые два из перечисленных механизмов имеют место в идеальном кристалле и обусловливают так называемое идеальное сопротивление, которое обращается в нуль при $T = 0$. Третий механизм является причиной остаточного сопротивления, которое может быть существенно различно для различных образцов одиого и того же металла.

При достаточно высоких (по сравнению с температурой Дебая) температурах сопротивление определяется, как правило, фононным механизмом и увеличивается линейно с повышением температуры. В то же время целый ряд сплавов имеют весьма низкий или даже отрицательный температурный коэффициент сопротивления.

Сопротивление металла при плавлении возрастает, если его плотность уменьшается, и (в редких случаях) падает, если плотность металла при плавлении увеличивается.

При низких температурах поведение сопротивления металлов весьма сложно. У некоторых металлов и сплавов обнаруживается явление сверхпроводимости.

В этом разделе значительное место занимают металлы и сплавы, находящие широкое применение. В некоторых случаях для этих материалов приводятся также и неэлектрические свойства, связанные с их электротехническим применением. По той же причине включен в эту главу графит.

19.2. ЧИСТЫЕ МЕТАЛЛЫ

В табл. 19.1 представлены значения удельного сопротивления и температурного коэффициента сопротивления чистых металлов, а также, в некоторых случаях, отношение удельного сопротивления при температуре жидкого гелия к удельному сопротивлению при нормальных условиях, $\rho_{4,2°K}/\rho_{273°K}$, характеризующее достигнутую степень чистоты материала. В тех случаях, когда для данного металла приводятся более подробные данные, соответствующее указание дается в первом столбце таблицы. Металлы в таблице расположены в порядке возрастания массового числа.

В тех многочисленных случаях, когда данные различных авторов несколько отличались друг от друга, в таблицу включались только результаты, кажущиеся наиболее достоверными.

Таблица 19.1

Удельное сопротивление чистых металлов

Металл	T, °C	ρ, 10^{-6} ом·см	$\frac{1}{\rho}\frac{d\rho}{dT}$, 10^{-3} град$^{-1}$	$\frac{\rho_{4,2°K}}{\rho_{273°K}}$	Литература
Литий	—187	1,34	—	—	[2]
	0	8,5	4,37	—	[4]
	99,3	12,7	—	—	[2]
	230 (ж.)	45,2	2,7	—	[2]
Бериллий (см. рис. 19.7 и табл. 19.2)	0	2,78	7,5	—	[4]
Графит (см. рис. 19.8, 19.9)	0	800	—	—	[2]
	500	830	—	—	[2]
	1000	870	—	—	[2]
	2000	1000	—	—	[2]
	2500	1100	—	—	[2]
Натрий (см. рис. 19.2 и табл. 19.3)	0	4,27	5,5	—	[4]
	20	4,2	5,0	—	[3]
	97,83(тв.)	6,75	—	—	[8]
	97,83(ж.)	9,60	—	—	[8]
Магний (см. табл. 19.2)	0	3,94	4,2	—	[4]
	20	4,4	4,2	—	[3]
Алюминий (см. рис. 19.10, 19.11)	—189	0,64	—	0,0065	[2, 4]
	—100	1,53	—	—	[2]
	0	2,50	4,67	—	[4]
	20	2,69	4,2	—	[3]
	100	3,86	—	—	[2]
	400	8,0	—	—	[2]
Калий (см. рис. 19.2 и табл. 19.3)	0	6,15	5,8	—	[3]
	64 (ж.)	13,46	—	—	[8]
	350 (ж.)	31,4	—	—	[8]
Кальций	0	3,6	4	—	[4]
	20	4,1	4,6	—	[3]
Титан	0	42	5,5	0,215	[4]
	20	55	3,5	—	[3]
Ванадий	0	18,2	—	—	[4]
	20	26	2,8	—	[3]
Хром	0	1,5	—	—	[4]
	20	18,9	5,88	—	[3]
Марганец	0(α)	710	0,17	—	[4]
	0(β)	91	1,4	—	[4]
Железо (см. рис. 19.12, 19.24)	—252,7	0,011	—	0,00126	[2]
	—205,3	0,652	—	—	[2]
	—192,5	0,844	—	—	[2]
	—100	5,92	—	—	[2]
	0(α)	8,71	6,57	—	[4]
	20	9,71	6,51	—	[3]
	100	16,61	6,8	—	[2]
	200	24,50	—	—	[2]
	400	43,29	—	—	[2]
Кобальт	0(α)	5,2	6,58	—	[4]
	20	6,24	6,04	—	[3]
	0—100	—	6,58	—	[2]

Продолжение табл. 19.1

Металл	T, °C	ρ, 10^{-6} ом·см	$\frac{1}{\rho}\frac{d\rho}{dT}$, 10^{-3} град$^{-1}$	$\frac{\rho_{4,2°K}}{\rho_{273°K}}$	Литература
Никель (см. рис. 19.13—19.15, 19.23)	—182,5	1,44	—	—	[2]*
	—78,2	4,31	—	—	[2]*
	0	6,141	6,00	—	[2]
	20	6,844	6,00	—	[2]
	100	10,327	4,3	—	[2]
	400	60,2	—	—	[2]*
Медь (см. рис. 19.16—19.18, 19.23)	—258,6	0,014	—	0,09	[2]
	—206,6	0,163	—	—	[2]
	—150	0,567	—	—	[2]
	100	0,904	—	—	[2]
	0	1,55	4,33	—	[4]
	20	1,673	4,30	—	[3]
	100	2,28	—	—	[2]
	200	2,96	—	—	[2]
	500	5,08	—	—	[2]
	1000	9,42	—	—	[2]
	1500(ж.)	24,62	—	—	[2]
Цинк (см. табл. 19.2)	—183	1,62	—	0,2351	[2,2,4]
	—78	3,34	—	—	[2]
	0	5,45	4,2	—	[4]
	20	5,92	4,2	—	[3]
	92,5	8,0	—	—	[2]
	191,5	10,37	—	—	[2]
	300	13,25	—	—	[2]
	427(ж.)	37,3	—	—	[2]
	500	36,6	—	—	[2]
	600	35,9	—	—	[2]
	700	35,6	—	—	[2]
	800	35,6	—	—	[2]
	850	35,74	—	—	[2]
Галлий (см. табл. 19.2)	0	13,7	—	0,0025	[4]
	20(‖оси c)	54,3	—	—	[3]
	20(‖оси a)	17,4	—	—	[3]
	20(‖оси b)	8,1	—	—	[3]
Мышьяк	0	26	—	—	[4]
	20	35	—	—	[3]
Рубидий	—190	2,5	—	—	[2]
	0	11,6	5,3	—	[4]
	35	13,4	—	—	[2]
	40(ж.)	19,6	—	—	[2]
Строиций	0(α)	20	5,0	—	[4]
Иттрий	20	22,76	—	—	[3]
	25	64,9	—	—	[19]
Цирконий	0	40,5	4,0	0,0421	[4]
Ниобий	0	23,3	2,28	—	[4]
	18	13,1	3,95	—	[3]
Молибден (см. табл. 19.11)	0	5,03	4,7	—	[4]
	127	10,36	—	—	[7]
	1127	44,6	—	—	[7]
	1727	69,6	—	—	[7]
	2327	91,8	—	—	[7]
Рутений	0	6,83	3,59	—	[9]
	25	7,427	—	—	[9]
	100	9,26	—	—	[9]

Продолжение табл. 19.1

Металл	T, °C	ρ, 10^{-6} ом·см	$\frac{1}{\rho}\frac{d\rho}{dT}$, 10^{-3} град$^{-1}$	$\frac{\rho_{4,2°K}}{\rho_{273°K}}$	Литература
Родий	—160	0,70	—	—	[9]
	—78	3,1	—	—	[9]
	0	4,3	4,57	—	[9]
	25	4,9	—	—	[9]
	100	6,26	—	—	[9]
	200	8,2	—	—	[9]
	300	10,3	—	—	[9]
	400	12,5	—	—	[9]
	500	14,7	—	—	[9]
Палладий (см. табл. 19.7)	—258	0,09503	—	0,0105	[9]
	—78	7,048	—	—	[9]
	0	9,1	3,79	—	[9]
	100	14,0	—	—	[9]
	200	17,4	—	—	[9]
	400	24,3	—	—	[9]
	1400	49,5	—	—	[9]
Серебро (см. рис. 19.19 и табл. 19.10)	—258	0,00793	—	0,0054	[9]
	—78	1,04	—	—	[9]
	0	1,468	4,033	—	[9]
	100	2,0696	—	—	[9]
	200	2,6854	—	—	[9]
	400	3,979	—	—	[9]
Кадмий (см. табл. 19.2)	—252,9	0,17	—	$1,9\cdot10^{-4}$	[2, 4]
	—200	1,66	—	—	[2]
	—100	4,8	—	—	[2]
	0	6,73	4,26	—	[4]
	20	7,4	4,3	—	[3]
	100	9,82	—	—	[2]*
	300	16,50	—	—	[2]
	400(ж.)	33,70	—	—	[2]
	500	35,12	—	—	[2]
	700	35,78	—	—	[2]
Индий	0	8,2	5,1	0,0039	[4]
Олово (см. табл. 19.2)	—184	3,4	—	0,00079	[2, 4]
	—78	8,8	—	—	[2]
	0	10,1	4,63	—	[4]
	20	12,8	4,2	—	[3]
	91,45	18,2	—	—	[2]
	200	20,3	—	—	[2]
	225	22,0	—	—	[2]
	235(ж.)	47,6	—	—	[2]
	750	61,22	—	—	[2]
Сурьма (см. табл. 19.2)	—190	10,5	—	—	[2]
	0	32,1	5,1	—	[4]
	20	41,7	—	—	[2]
	860(ж.)	120	—	—	[2]
Теллур	19,6	$2\cdot10^5$	—	—	[2]
Цезий	—187	5,25	—	—	[2]
	0	19	5,0	—	[2, 4]
	20	21	4,8	—	[2]*
	27	22,2	—	—	[2]
	30(ж.)	36,6	—	—	[2]
Барий	0	36	6,1	—	[4]
	20	50	—	—	[3]

Продолжение табл. 19.

Металл	T, °C	ρ, 10^{-6} ом·см	$\frac{1}{\rho}\frac{d\rho}{dT}$, 10^{-3} град$^{-1}$	$\frac{\rho_{4,2°K}}{\rho_{273°K}}$	Литература
Лантан	25(α)	56,8	—	—	[19]
	560(β)	98	—	—	[19]
	890(γ)	126	—	—	[19]
Церий	—249(α)	34	—	—	[19]
	25(γ)	75,3	—	—	[19]
	770(δ)	123	—	—	[19]
Празеодим	25(α)	68	—	—	[19]
	820(β)	137	—	—	[19]
Неодим	25(α)	64,3	—	—	[19]
	890(β)	137	—	—	[19]
Самарий	25(α)	88	—	—	[19]
Европий	25	81,3	—	—	[19]
Гадолиний	25(α)	140,5	—	—	[19]
Диспрозий	25	56	—	—	[19]
Гольмий	25	87	—	—	[19]
Эрбий	25	107	—	—	[19]
Тулий	25	79	—	—	[19]
Иттербий	25(α)	27	—	—	[19]
Лютеций	25	79	—	—	[19]
Гафний (см. табл. 19.2)	0	26,5	4,4	0,0947	[4]
Тантал	0	12,4	3,6	—	[4]
Вольфрам (см. табл. 19.2, 19.13, 19.15, 19.16)	—183 (ось [100])	0,892	—	—	[6]
	—183 (ось [111])	0,848	—	—	[6]
	—78,5 (ось [100])	3,22	—	—	[6]
	—78,5 (ось [111])	3,17	—	—	[6]
	0	4,89	4,83	—	[4]
	20	5,5	4,6	—	[3]
	600	16,85	—	—	[6]
	1000	31,74	—	—	[6]
	1500	51,4	—	—	[6]
	2000	72,19	—	—	[6]
	2500	94,13	—	—	[6]
	3000	117,2	—	—	[6]
	3500	131,4	—	—	[6]
Рений (см. табл. 19.14—19.16)	0	18,9	3,1	—	[4]
Осмий	0	8,75	4,2	—	[9]
	20	9,5	4,2	—	[3]
	25	9,66	—	—	[9]
	100	12,43	—	—	[9]

Продолжение табл. 19.1

Металл	T, °C	ρ, 10^{-6} ом·см	$\frac{1}{\rho}\frac{d\rho}{dT}$, 10^{-3} град$^{-1}$	$\frac{\rho_{4,2°K}}{\rho_{273°K}}$	Литература
Иридий	—192	1,375	—	—	[9]
	—78	4,232	—	—	[9]
	0	4,85	—	—	[9]
	20	5,3	4,9	—	[3]
	100	6,75	—	—	[9]
	200	8,71	—	—	[9]
	300	10,72	—	—	[9]
	400	12,76	—	—	[9]
	500	14,89	—	—	[9]
Платина (см. табл. 19.18)	—258	0,0618	—	0,0063	[9]
	—78	6,7297	—	—	[9]
	0	9,81	3,927	—	[9, 4]
	100	13,65	—	—	[9]
	200	17,38	—	—	[9]
	400	24,50	—	—	[9]
	800	37,34	—	—	[9]
	1200	48,34	—	—	[9]
	1500	55,38	—	—	[9]
Золото	—258	0.014	—	0,0068	[9]
	—192	0.4904	—	—	[9]
	—78	1,4392	—	—	[9]
	0	2,065	4,5	—	[9]
	100	2,8873	—	—	[9]
	200	3,735	—	—	[9]
	300	4.615	—	—	[9]
	400	5.534	—	—	[9]
	500	6,62	—	—	[9]
	1000	12,54	—	—	[9]
	1500(ж.)	37.0	—	—	[9]
Ртуть (см. табл. 19.2, 19.3)	—258	0,0188	0,002	—	[4]
	—183,5	6,97	—	—	[2]
	—50,3	12,3	—	—	[2]
	—45,5	21,2	—	—	[4]
	—39,2	25,5	—	—	[2]
	—36,1(ж.)	80,6	—	—	[2]
	0	94,7	—	—	[2]
	20	95,8	0,89	—	[2, 3]
	50	98,5	—	—	[2]
	100	103,25	—	—	[2]
	200	114,27	—	—	[2]
	300	127,0	—	—	[2]
	350	135,5	—	—	[2]

Продолжение табл. 19.1

Металл	T, °C	ρ, 10^{-6} ом·см	$\frac{1}{\rho}\frac{d\rho}{dT}$, 10^{-3} град$^{-1}$	$\frac{\rho_{4,2°K}}{\rho_{273°K}}$	Литература
Таллий	—183	4,08	—	—	[2]*
	—78	11,8	—	—	[2]
	0	17,6	—	—	[2]
	0	15	5,2	—	[4, 3]
Свинец	—252,9	0,59	—	—	[2]
	—203	4,42	—	—	[2]
	—192,8	5,22	—	—	[2]
	—103	11,8	—	—	[2]
	0	19,3	4,22	—	[4]
	20	20,6	3,36	—	[3]
	100	27,8	—	—	[2]
	200	38,0	—	—	[2]
	319	50	—	—	[2]
	333(ж.)	95,0	—	—	[2]
	400	98,3	—	—	[2]
	600	107,2	—	—	[2]
	800	116,2	—	—	[2]
Висмут (см. табл. 19.2)	—200	34,8	—	—	[2]
	—100	75,6	—	—	[2]
	0	107	4,45	—	[4]
	20	116	4,2	—	[3]
	100	156,5	—	—	[2]
	200	214	—	—	[2]
	300(ж.)	128,9	—	—	[2]
	500	139,9	—	—	[2]
	700	150,8	—	—	[2]
Торий	0	19,1	3,3	0,017	[4]
	20	18,62	2,3	—	[3]
	20—1800	—	2,1	—	[2]
Уран (см рис. 19.20 и табл. 19.19)	20	29	3,4	0,5445	[3]
Плутоний (см. рис. 19.21)	0	160	—2,97	—	[4]

* Работа [2]*, изд. 1946 г.

Таблица 19.2

Удельное сопротивление для анизотропных металлических кристаллов [4,6]

Металл	T, °С	Кристаллическая структура	$\rho_{\parallel}$, 10^{-6} *ом·см*	$\rho_{\perp}$, 10^{-6} *ом·см*	$\frac{\rho_{\perp}}{\rho_{\parallel}}$
Бериллий	0	Гексагональная	3,58	3,12	0,88
Магний	0	»	3,5	4,22	1,21
Цинк	0	»	5,59	5,39	0,96
Галлий	20	Ромбическая	55,5	17,3	0,31
Мышьяк	0	Гексагональная	26	23,8	0,92
Кадмий	0	»	7,73	6,35	0,87
Олово	0	Тетрагональная	9,09	13,08	1,46
Сурьма	0	Ромбическая	26,3	36,0	1,37
Гафний	0	Гексагональная	32,7	32,0	0,98
Вольфрам	—183	Кубическая	0,892 (ось [100])	0,843 (ось [111])	0,945
	—78,5	»	3,22 (ось [100])	3,17 (ось [111])	0,985
Ртуть	—45,5	Ромбическая	17,8	23,5	1,32
Висмут	0	»	127	99	0,78

Изменение сопротивления при плавлении

При плавлении проводимость большинства металлов падает; у тех металлов, объем которых уменьшается при плавлении (висмут, сурьма, галлий), проводимость возрастает [1] (см. рис. 19.2, табл. 19.3.).

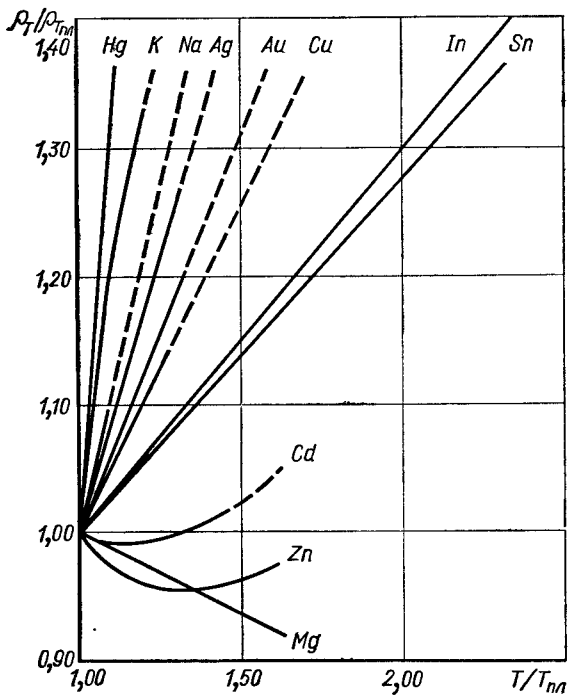


Рис. 19.2. Зависимость относительного удельного сопротивления различных жидких металлов $\rho_T/\rho_{T_{пл}}$ от $T/T_{пл}$ [4] (пунктир—экстраполяция).

Таблица 19.3

Изменение относительного сопротивления некоторых металлов при плавлении [4]

Металл	$T_{пл}$, °К	$\rho_{ж}/\rho_{тв}$
Литий	453	1,68
Натрий	370	1,46
Магний	924	1,63
Алюминий	934	1,82(1,64) [7]
Калий	337	1,55
Железо	1808	1,09
Медь	1357	2,07
Цинк	693	2,11
Галлий	303	0,47 [1]
Рубидий	312	1,61
Серебро	1234	1,9
Кадмий	594	1,89
Индий	388	2,12
Олово	505	2,11
Сурьма	904	0,71
Теллур	722	2,00
Цезий	303	1,66
Золото	1336	2,28
Ртуть	234	3,36
Свинец	601	1,98
Висмут	544	0,47

Проводимость жидких металлов

Натрий [8]

Удельное сопротивление твердого натрия в интервале температур от 20 до 97,83°С дается формулой

$$\rho = (4{,}477 + 0{,}1932T - 0{,}00004T^2)\cdot 10^{-6}\ \text{ом·см};$$

удельное сопротивление жидкого натрия

$$\rho = (6{,}225 + 0{,}0345T)\cdot 10^{-6}\ \text{ом·см}.$$

Здесь T — температура, °С.

Таблица 19.4

Удельное сопротивление натрия

T, °C	ρ, 10^{-6} *ом·см*	T, °C	ρ, 10^{-6} *ом·см*
—180	1,0	120	10,365
—75	2,8	140	11,055
0	4,477	180	12,435
20	4,879	200	13,125
40	5,314	260	15,195
60	5,780	300	16,575
80	6,279	360	18,645
97,83 (тв.)	6,750	400	20,025
97,83 (ж.)	9,600		

Калий, сплав натрий — калий

Таблица 19.5

Зависимость удельного сопротивления жидкого калия от температуры

T, °C	64	100	150	200	250	300	350
ρ, 10^{-6} *ом·см*	13,46	15,49	18,7	21,8	25,0	28,2	31,4

Таблица 19.6

Зависимость удельного сопротивления сплавов натрия и калия, 10^{-6} *ом·см*, от температуры

T, °C	Массовое содержание калия, %		
	56,5	78	80
100	41,61	45,63	—
200	47,23	51,33	41,4
300	54,33	58,58	51,4
400	62,21	65,65	58,8
500	69,37	73,48	67,3
600	78,29	82,61	77,3
700	88,23	91,76	89,3
800	99,68	104,51	—

19.3. ВЛИЯНИЕ ДАВЛЕНИЯ НА ПРОВОДИМОСТЬ МЕТАЛЛОВ

Проводимость металлов, как правило, увеличивается при приложении к ним внешнего гидростатического давления. Коэффициент $\frac{1}{\rho}\frac{d\rho}{dp}$ максимален у щелочных металлов, имеющих также и максимальную сжимаемость. Вместе с тем этот коэффициент очень сильно изменяется от элемента к элементу, а зависимость $\rho = f(p)$ в изученном интервале давлений (до 100—120 *кбар*) далеко не всегда монотонна. У ряда элементов на кривой $\rho = f(p)$ обнаруживаются скачки, используемые в физике высоких давлений в качестве реперных точек давления (табл. 19.7, рис. 19.3).

Таблица 19.7

Значения коэффициента $\frac{1}{\rho}\frac{d\rho}{dp}$, 10^{-6} *см²/кГ*, для различных металлов при их гидростатическом сжатии

Металл	T, °K	Давление, *кбар*		
		0	10	30
Литий	303	—7,00	—7,52	—9,00
Бериллий	298	1,77	1,63	1,46
Натрий	303	58,8	23,6	4,04
Магний	298	5,40	4,67	3,81
Алюминий	301	4,29	4,06	3,6
Калий	303	134,4	30,0	0,88
Кальций	303	—9,48	—12,2	—20,7
Титан	296	1,19	1,12	1,02
Хром	298	22,2	17,3	8,96
Железо	303	2,42	2,26	1,90
Кобальт	297	0,96	0,90	0,80
Никель	298	1,77	1,82	1,73
Медь	303	1,92	1,80	2,42
Цинк ∥*	303	9,68	8,76	6,72
Цинк ⊥*	303	5,28	4,40	2,84
Рубидий[2*]	303	154,0	14,4	—28,8
Стронций	303	—45,6	—59,0	—118,8
Цирконий	299	0,32	0,33	0,22
Ниобий	297	1,40	1,37	1,30
Молибден	300	1,31	1,29	1,24
Родий	299	1,65	1,62	1,56
Палладий	299	2,10	2,04	1,93
Серебро	303	3,48	3,28	2,60
Индий	296	1,25	1,09	0,85
Олово ∥[3*]	303	10,0	9,0	6,1
Олово ⊥[3*]	303	9,24	8,26	5,61
Сурьма[4*]	303	—9,84	—14,8	—2,80
Барий[5*]	303	7,2	1,2	—13,6
Церий [6*]	297	—4,1	—	1,6
Празеодим	297	1,36	1,20	1,02
Неодим	297	1,57	1,32	1,03
Тантал	302	1,62	1,62	1,55
Вольфрам	302	1,33	1,31	1,25
Иридий	296	1,39	1,37	1,33
Платина	296	1,92	1,88	1,78
Золото	303	3,02	2,84	2,44
Ртуть (ж.)[7*]	303	23,1	17,0	—
Ртуть (тв.)	303	—	—	12,0
Свинец	303	13,7	11,6	6,96
Висмут[8*]	303	—14,8	—18,5	—
Уран	293	4,88	4,56	4,10

* Монокристалл. Угол между главной осью и продольной осью образца 17° для ∥ и 87° для ⊥.

2* Минимум $\frac{1}{\rho}\frac{d\rho}{dT}$ при $p = 1{,}5\cdot10^4$ *кГ/см²*.

3* Как для Zn, но углы 17 и 82° соответственно.

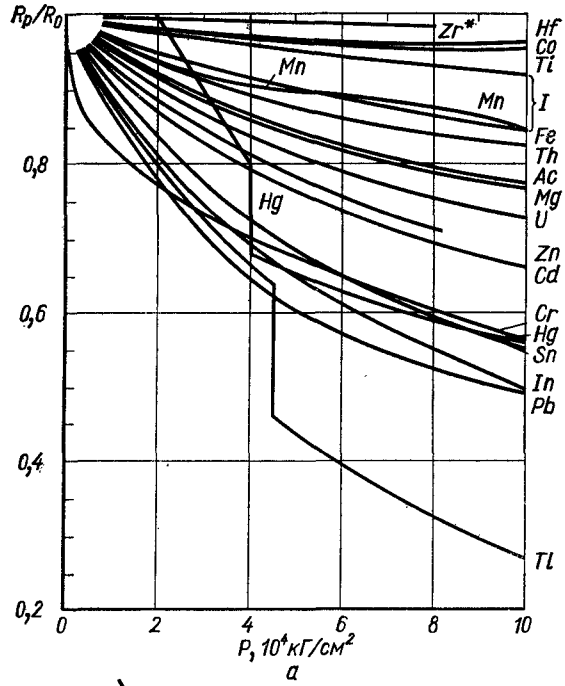
4* Монокристалл. Угол между главной и продольной осями образца 41°. Максимум $\frac{1}{\rho}\frac{d\rho}{dp}$ при $p = 31$ *кбар*.

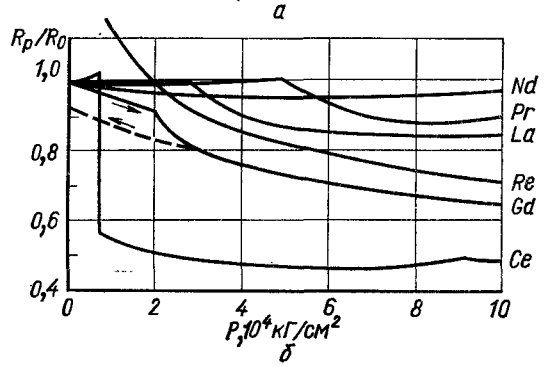
5* Скачок $\frac{1}{\rho}\frac{d\rho}{dp}$ при $p = 1{,}7\cdot10^4$ *кГ/см²*.

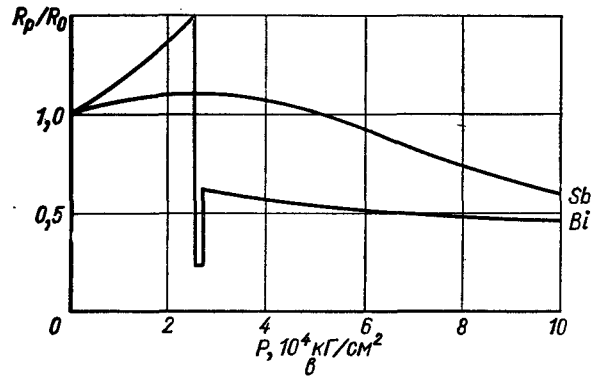
6* Переход при (5÷10) *кбар*, сопровождающийся скачком $\rho(p)/\rho(0)$ от 1,027 до 0,582.

7* Затвердевает при $p = 13{,}5$ *кбар*.

8* Монокристалл. Угол между главной и продольной осями образца 78°. $\rho(p)/\rho(0)$ уменьшается от 1,5 до 0,24 при p=24,7 *кбар*, затем увеличивается до 0,62 при $p = 26{,}2$ *кбар*.







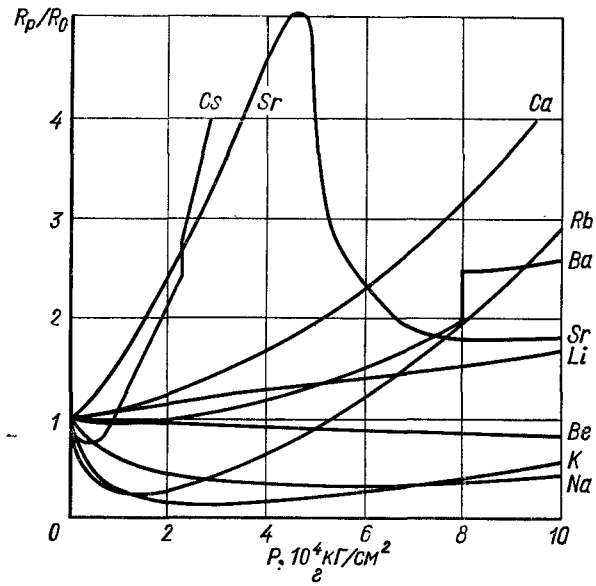


Рис. 19.3. Влияние давления на относительное сопротивленне металлов [4].

19.4. СВЕРХПРОВОДНИКИ

Большинство веществ, обладающих свойством сверхпроводимости, является так называемыми сверхпроводниками первого рода или мягкими сверхпроводниками [10]. Слабое магнитное поле в них не проникает за исключением тонкого поверхностного слоя ~1000Å. Когда магнитное поле превышает критическое значение (несколько сот гаусс), оно скачком проникает внутрь образца, который теряет сверхпроводимость. Ток в сверхпроводниках первого рода течет лишь по тонкому поверхностному слою.

Для сверхпроводников второго рода характерно то, что магнитный поток проникает в них, образуя множество нитей, пронизывающих диамагнитную сверхпроводящую массу [11].

Для сверхпроводнпков первого рода в табл. 19.8 (для чистых металлов) и 19.9 (для сплавов и соединенй) дается температура перехода в сверхпроводящее состояние. Сверхпроводники второго рода характернзуются прежде всего зависимостью максимальной плотности тока от магнитного поля (при $T = 4{,}2°$ К). Эта зависимость кроме состава соединения определяется также и технологией его обработки. На рис. 19.4—19.6 представлен ряд таких зависимостей.

Критическая температура для хорошо изученных сверхпроводников второго рода составляет: Nb_3Sn 18,05° К; сплав Nb + 25% Zr 11° К; сплав Zr + Ti ~ 8° К.

Таблица 19.8

Относительное удельное сопротивление при низких температурах и температура перехода в сверхпроводящее состояние T_s для металлов-сверхпроводников [4]

Металл	T, °K	$\rho/\rho_{273°K}$	T_s, °K
Алюминий	77,7	0,1008	1,14
	20,4	0,0075	—
	4,2	0,0065	—
Титан	77,6	0,318	1,81
	20,5	0,218	—
	4,2	0,215	—
Ванадий	77,6	0,9674	4,3
	20,4	0,9540	—
Цинк	83,7	0,2351	0,79
	20,4	0,0087	—
	4,2	0,0018	—
Галлий	4,2	0,0025	1,07
Цирконий	77,7	0,1971	0,7
	20,5	0,0444	—
	4,2	0,0421	—
Ниобий	77,7	0,499	9,22
	20,3	0,338	—
Технеций *	—	—	8,22
Кадмий	82,5	0,2617	0,54
	20,4	0,0220	—
	4,2	$1,9\cdot10^{-4}$	—
Индий	77,8	0,2177	3,37
	20,5	0,1256	—
	4,2	0,0039	—
Олово	80	0,2126	3,69
	20,4	0,0120	—
	4,2	0,00079	—
Лантан	—	—	4,71
Гафний	78,19	0,2626	0,35
	20,3	0,1000	—
	4,2	0,0947	—
Тантал	77,6	0,2037	4,38
	20,4	0,0140	—
	77,6	0,2037	4,38
	20,4	0,0140	—
	4,5	0,0099	—
Рений 2*	—	—	0,9
Ртуть	77,8	0,2820	4,12
	20,4	0,0642	—
	4,2	0,0020	—
Свинец	73,1	0,2321	7,26
	20,5	0,0301	—

Продолжение табл. 19.8

Металл	T, °K	$\rho/\rho_{273°K}$	T_s, °K
Висмут 3*	—	—	4,2
Торий	77,9	0,245	1,32
	20,4	0,031	—
	4,2	0,017	—
Уран	77,8	0,6844	1,2
	20,4	0,5867	—
	4,2	0,5445	—

* По данным [20].
2* По данным [7].
3* При $p = 24{,}7$ *кбар* [21].

Таблица 19.9

Температура перехода в сверхпроводящее состояние T_s для некоторых соединений — сверхпроводников первого рода [4]. Соединения расположены в порядке убывания T_s

Соединение	T_s, °K	Соединение	T_s, °K
NbN	15	Tl_2Hg_5	3,8
NbH	13	$PbTl_2$	3,8
NbC	10,5	W_2C	2,0—3,5
TaC	9,5	MoC	2,0—3,2
ZrN	9,5	VN	1,5—3,2
MoC	7,6—8,3	ZrB	3
Pb_5Na_2	7,2	Sn_2Au	2,5—2,75
Pb_2Au	7,0	Sn_4Au	2,5—2,75
Tl_3Bi_5	6,4	ZrC	2,3
Tl_7Sb_2	5,2	Au_2Bi	1,7
TaSi	4,4	CuS	1,6
WC	2,5—4,2	TiN	1,2
Sn_2Sb_2	4,0	TiC	1
SnSb	3,9		

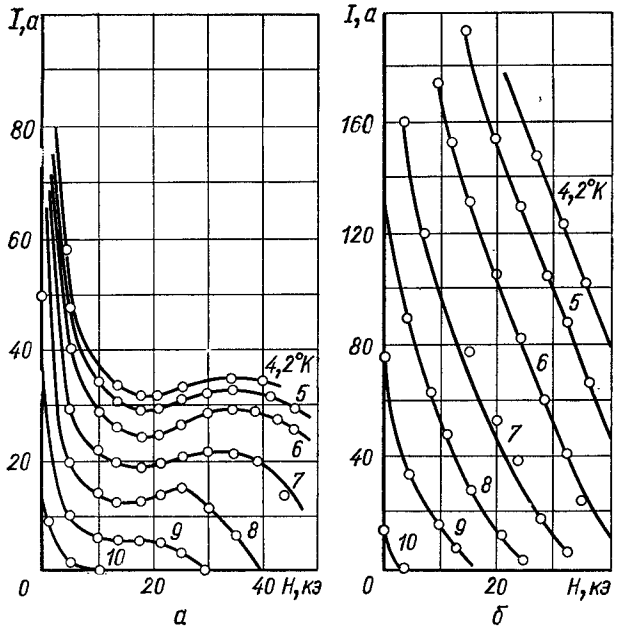


Рис. 19.4. Зависимость критических токов для холоднодеформированного (*а*) и термообработанного (*б*) образцов проволоки из сплава Nb + 25% Zr от напряженности магнитного поля и температуры [12].

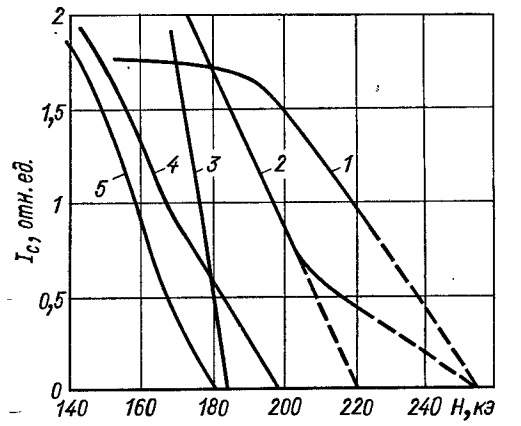


Рис. 19.6. Критические токи некоторых образцов соединений Nb_3Sn и V_3Ga [12]:

1 — Nb_3Sn «многопроволочные» образцы; отжиг при 950°С в течение 20 *ч*; *2* — то же, при 800°С в течение 20 *ч*; *3* — V_3Ga, поверхностный слой, отжиг при 1200°С в течение 10 *ч*; *4* — V_3Ga, «проволока» Кюнцлера, отжиг при 1485°С в течение 2 *ч*; *5* — то же при 1440°С в течение 2 *ч*.

19.5. ЭЛЕКТРИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА НЕКОТОРЫХ МЕТАЛЛОВ И СПЛАВОВ (РИС. 19.7—19.21)

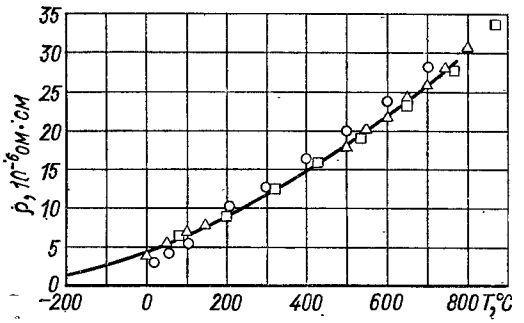


Рис. 19.7. Зависимость удельного сопротивления бериллия от температуры [16].

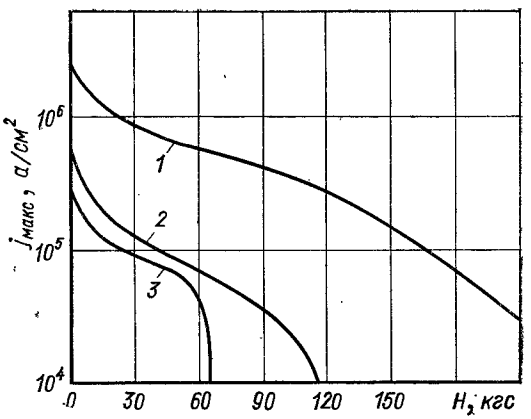


Рис. 19.5. Максимальная плотность тока $j_{макс}$ сверхпроводящих материалов как функция внешнего магнитного поля ($T = 4{,}2°$ К) [11]:

1 — соединение ниобий — олово; *2* — сплав ниобий — титан; *3* — сплав ниобий — цирконий.

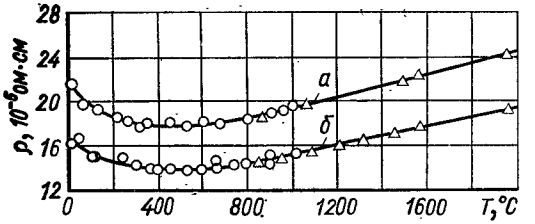


Рис. 19.8. Зависимость удельного сопротивления электродного графита от температуры [18] поперек (*а*) и вдоль (*б*) направления прессования.

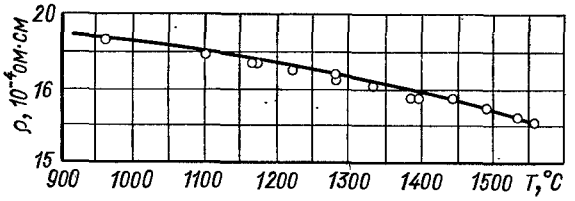


Рис. 19.9. Зависимость удельного сопротивления угольного материала из нефтяного кокса выше температуры отжига от температуры [18].

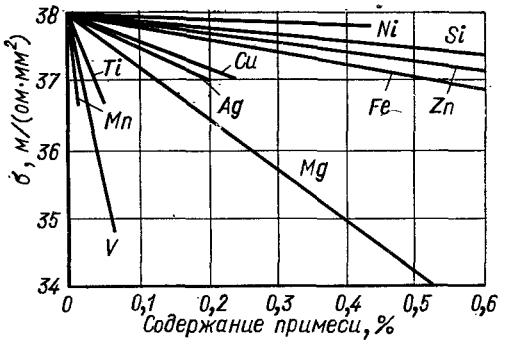


Рис. 19.10. Зависимость проводимости отожженного алюминия от содержания различных примесей [7].

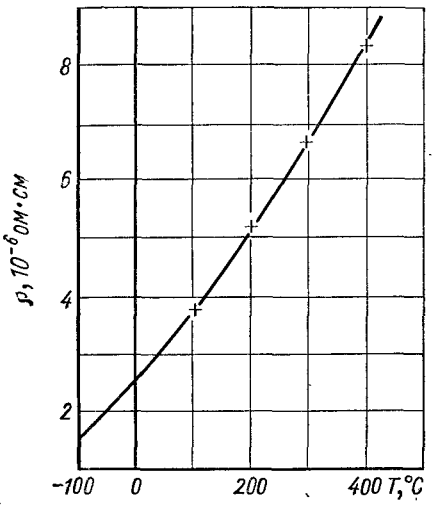


Рис. 19.11. Зависимость удельного сопротивления алюминия от температуры [7].

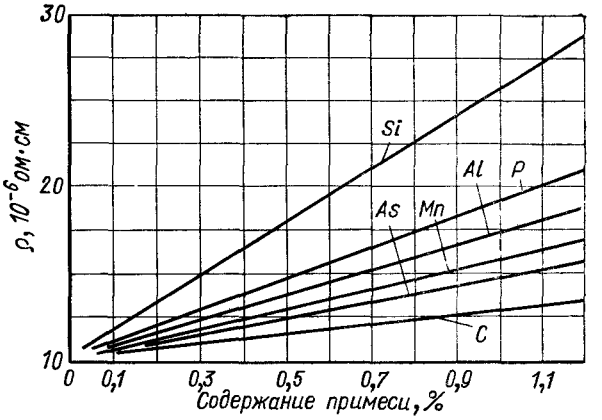


Рис. 19.12. Зависимость удельного сопротивления стали от содержания примесей [7].

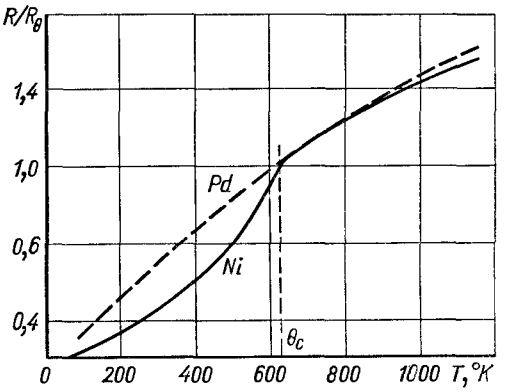


Рис. 19.13. Зависимость относительного сопротивления никеля и палладня от температуры. Сопротивление нормировано на точку Кюри для никеля (631 °К) [4].

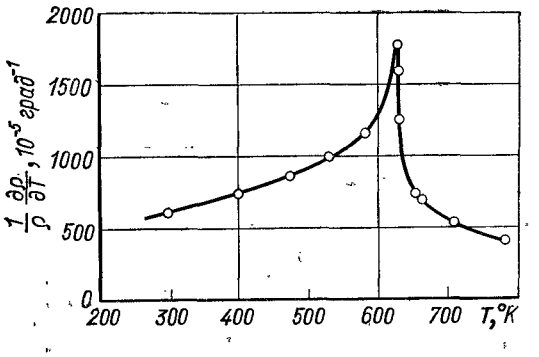


Рис. 19.14. Зависимость температурного коэффициента сопротивления никеля от температуры [4].

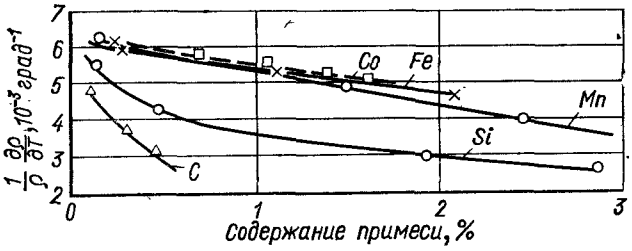


Рис. 19.15. Зависимость температурного коэффициента сопротивления электролитического никеля (содержащего 0,1% Mg) от содержаиия примесей [7].

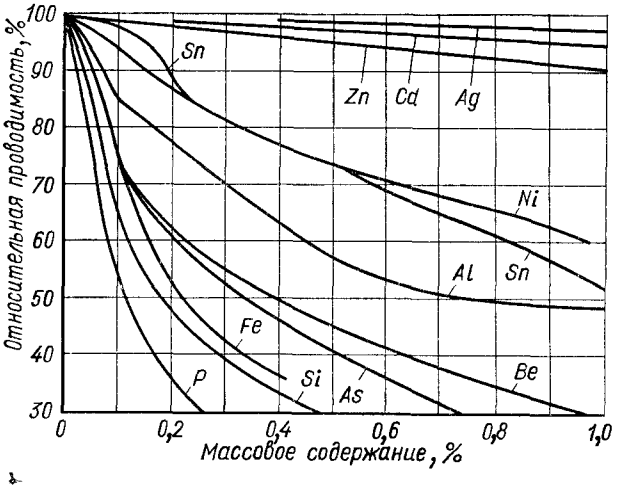


Рис. 19.16. Относительная проводимость бинарных медных сплавов как функция массового содержания второго компонента [7].

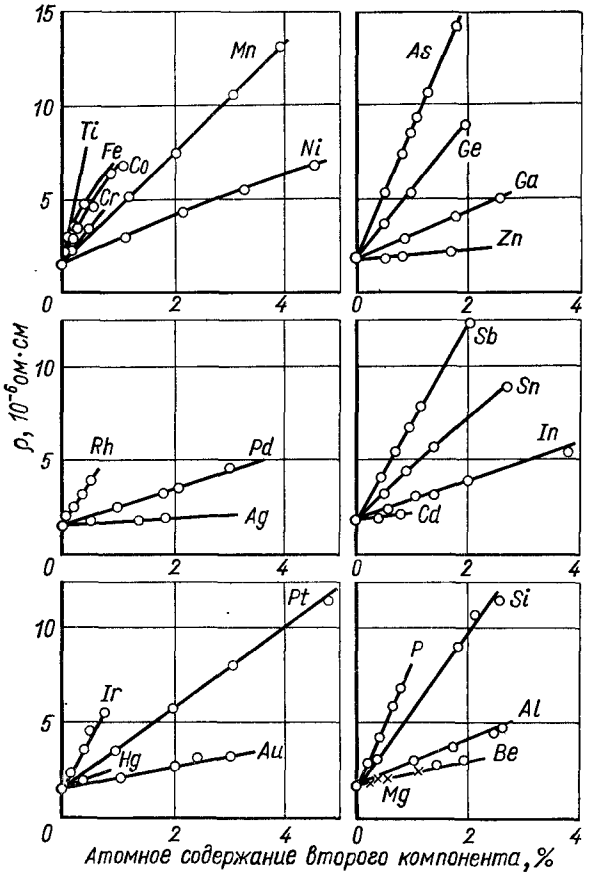


Рис. 19.17. Удельное сопротивление бинарных медных сплавов при 273° К как функция атомного содержания второго компонента [4].

Таблица 19.10

Зависимость удельного сопротивления серебра от температуры [9]

T, °C	ρ, 10^{-6} ом·см	T, °C	ρ, 10^{-6} ом·см
—258	0,00793	400	3,979
—192	0,304	500	4,651
—160	0,56	1000(ж.)	19,22
—78	1,04	1100	20,48
0	1,468	1200	21,67
1 0	2,0696	1300	22,79
200	2,6854	1400	23,80
300	3,321		

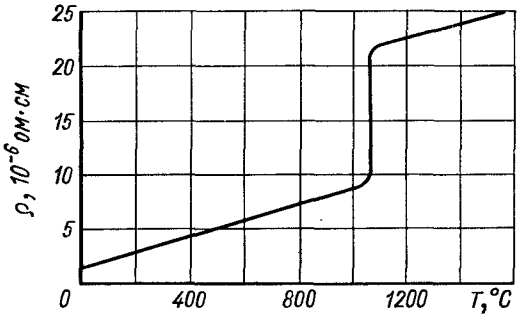


Рис. 19.18. Зависимость удельного сопротивления меди от температуры [7].

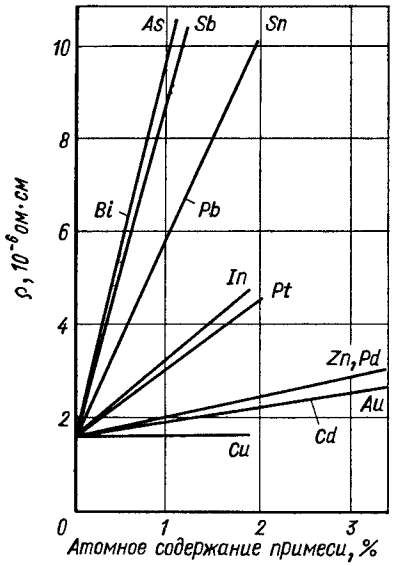


Рис. 19.19. Влияние примесей на удельное сопротивление серебра [7].

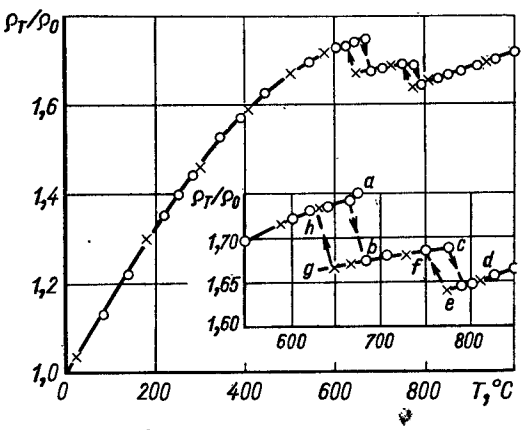


Рис. 19.20. Зависимость относительного удельного сопротивления урана от температуры [15].

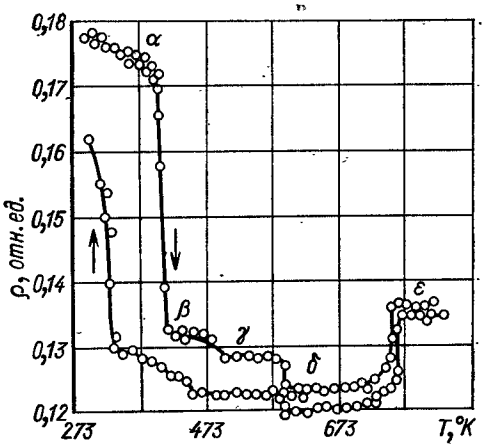


Рис. 19.21. Зависимость сопротивления плутония от температуры [4].

Таблица 19.11

Электрические свойства отрезка (длиной 1 *см* и диаметром 1 *см*) бесковечной молибденовой нити [7]*

Обозначения: R — сопротивление; W — мощность накала; U — напряжение; I — ток.

T, °K	R, 10^{-6} *ом*	W, *вт*	U, 10^{-3} *в*	I, *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	69,6	60,3	64,8	816,0
2200	75,4	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 d^2, W умножается на d, U делится на $\sqrt{d}$, I умножается на $\sqrt{d^3}$.

Таблица 19.12

Электрические свойства отрезка (длиной 1 *см* и диаметром 1 *см*) бесконечной танталовой нити [7]*

Обозначения: T — истинная температура; R — сопротивление; W — мощность накала; I — ток; $I_э$ — ток эмиссии.

T, °K	R, 10^{-6} *ом*	W, *вт*	U, *в*	I, *а*	$I_э$, *а/см*
300	17,65	—	—	—	—
1000	56,2	2,495	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	83,7	23,3	0,0438	528	$4{,}4 \cdot 10^{-5}$
1700	88,1	31,7	0,0527	602	$3{,}14 \cdot 10^{-4}$
1800	92,2	41,7	0,0617	676	$1{,}57 \cdot 10^{-3}$
1900	96,4	53,8	0,0716	751	$6{,}28 \cdot 10^{-3}$
2000	100,3	68,0	0,0821	828	$2{,}8 \cdot 10^{-2}$
2100	104,3	85,2	0,0936	910	$8{,}8 \cdot 10^{-2}$
2200	108,3	107,5	0,1072	1002	$2{,}7 \cdot 10^{-1}$
2300	112,4	132,9	0,1212	1095	$7{,}85 \cdot 10^{-1}$
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 в табл. 19.11.

Таблица 19.13

Свойства отрезка (длиной 1 *см* и диаметром 1 *см*) бесконечной вольфрамовой нити [6,7]*

Обозначение: $T_я$ — яркостная температура (остальные обозначения см. в табл. 19.12)

T, °К	$T_я$, °К	R, 10^{-6} *ом*	W, *вт*	U, 10^{-3} *в*	I, *а*	$I_э$, *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	$3{,}36\cdot10^{-15}$
1100	1058	35,58	3,223	10,71	301,0	$4{,}77\cdot10^{-13}$
1200	1149	39,46	5,210	14,34	363,4	$3{,}06\cdot10^{-11}$
1300	1240	43,40	8,060	18,70	430,9	$1{,}01\cdot10^{-9}$
1400	1330	47,37	12,01	23,85	503,5	$2{,}08\cdot10^{-8}$
1500	1420	51,40	17,33	29,85	580,6	$2{,}87\cdot10^{-7}$
1600	1509	55,46	24,32	36,73	662,2	$2{,}91\cdot10^{-6}$
1700	1597	59,58	33,28	44,52	747,3	$2{,}22\cdot10^{-5}$
1800	1684	63,74	44,54	53,28	836,0	$1{,}4\cdot10^{-4}$
1900	1771	67,94	58,45	63,02	927,4	$7{,}15\cdot10^{-4}$
2000	1857	72,19	75,37	73,75	1022	$3{,}15\cdot10^{-3}$
2100	1943	76,49	95,69	85,57	1119	$7{,}23\cdot10^{-2}$
2200	2026	80,83	119,8	98,40	1217	$4{,}17\cdot10^{-2}$
2300	2109	85,22	148,2	112,4	1310	$1{,}28\cdot10^{-1}$
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

Продолжение табл. 19.13

T, °К	$T_я$, °К	R, 10^{-6} *ом*	W, *вт*	U, 10^{-3} *в*	I, *а*	$I_э$, *а/см***
3000	2673	117,21	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	1130	406,7	2777	1173
3655	3165	149,15	1202	423,4	2838	1505

* См. сноску в табл. 19.11.

** $I_э$ нормировано в таблице на единицу длины нити диаметром $l_{см}$, а не площади.

Таблица 19.14

Удельное сопротивление и температурный коэффициент сопротивления $\rho^{-1}\,d\rho/dT$ рения [17]

T, °С	ρ, 10^{-6} *ом·см*	$\rho^{-1}\,d\rho/dT$ 10^{-3} *град*$^{-1}$	T, °С	ρ, 10^{-6} *ом·см*	$\rho^{-1}\,d\rho/dT$ 10^{-3} *град*$^{-1}$
—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 19.15

Зависимость удельного сопротивления ρ сплавов вольфрама и рения от температуры [17]

Содержание Re в сплаве, %											
4,75	T, °К	300	630	850	1020	1160	1270	1370	1465	1540	—
	ρ, 10^{-6} *ом·см*	10,4	20,4	27,3	32,4	36,7	40,0	43,2	45,9	48,5	—
21	T, °К	300	550	810	980	1120	1250	1360	1460	1540	1610
	ρ, 10^{-6} *ом·см*	24,2	34,0	42,0	47,0	51,6	54,6	57,4	59,8	62,6	64,4
27	T, °К	1400	1600	1800	2000	2400	2600	2800	3000	—	—
	ρ, 10^{-6} *ом·см*	67,3	73,9	79,9	85,7	91,1	96,8	102,8	109,2	—	—

Таблица 19.16

Зависимость удельного сопротивления ρ сплавов вольфрама и рения при 20°С от содержания Re [17]

Содержание Re в сплаве, %	0	1	3	5	7	10	20
ρ, 10^{-6} *ом·см*	6,7	7,7	9,7	12,7	14,0	18,8	25,0

Таблица 19.17

Зависимость удельного сопротивления ρ палладия от температуры [9]

T, °С	ρ, 10^{-6} *ом·см*	*T*, °С	ρ, 10^{-6} *ом·см*
—258	0,09503	500	27,4
—192	2,0131	600	30,4
—78	7,048	700	33,2
0	9,1	800	35,6
100	14,0	900	37,9
200	17,4	1000	40,0
300	21,0	1200	44,8
400	24,3	1400	49,5

Таблица 19.18

Зависимость удельного сопротивления платины от температуры [5, 9]

T, °С	ρ, 10^{-6} *ом·см*	*T*, °С	ρ, 10^{-6} *ом·см*
—258	0,0618	700	34,30
—192	2,0902	800	37,34
—78	6,7297	900	40,27
0	9,81	1000	43,07
100	13,65	1100	45,76
200	17,38	1200	48,34
300	21,00	1300	50,80
400	24,50	1400	53,15
500	27,88	1500	55,38
600	31,15		

Таблица 19.19

Зависимость относительного удельного сопротивлении ρ/ρ_0 урана от температуры [15]*

T, °С	ρ/ρ_0	*T*, °С	ρ/ρ_0
0	1,00	684,1	1,6733
90	1,1307	714,6	1,6790
254,7	1,3966	750,2	1,6821
375	1,5212	776,5	1,6865
447,8	1,6218	800,8	1,6471
602,8	1,7195	852,2	1,6644
667,5	1,7413	958,9	1,6993
		1001,1	1,7189

* Удельное сопротивление отожженного электролитического урана при 0°С $\rho = 26{,}4 \cdot 10^{-6}$ *ом·см* [15].

19.6. ЭЛЕКТРИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА СПЕЦИАЛЬНЫХ ЭЛЕКТРОТЕХНИЧЕСКИХ СПЛАВОВ

Электротехнические сплавы применяются для изготовления образцовых сопротивлений, электротехнических приборов, реостатов, электронагревательных приборов и термопар.

Таблица 19.20

Химический состав и назначение электротехнических сплавов [7,22]

Название сплава	Марка	Химический состав, %	Назначение
Алюмель	НМцАК2-2-1	Mn 1,8—2,2; Al 1,8—2,5 Si 0,85—2; Ni+Co — остальное	Для термопар
Хромель Т	НХ 9,5	Cr 9—10; Ni+Co — остальное	» »
Хромель К	НХ 9	Cr 8,5—9,5; Ni+Co — остальное	Для компенсационных проводов
Копель	МнМц 43-0,5	Ni + Co 42,5 — 44; Mn 0,1—1; Cu — остальное	Для термопар и компенсационных проводов
Константан	МнМц 40—1,5	Ni + Co 39—41; Mn 1 — 2; Cu — остальное	Для электротехнических целей

Название сплава	Марка	Химический состав, %	Назначение
Манганин	МиМц 3-12 МнМц АЖЗ-12-0,3-0,3	Mn 11,5 — 13,5; Ni + Co 2,5 — 3,5 Ni 2,5—3,5; Mn 11,5—13,5; Al 0,2—0,4; Fr 0,2—0,5; Cu — остальное	Для измерительных приборов
Нихром	Х15 Н60	Ni 55—61; Cr 15 — 18; Fe — остальное	Проволока и лента для нагревательных приборов до 1000 °С
	Х20 Н80	Ni 75—78; Cr 20—23	То же до 1100 °С
	Х20Н80Т	Ni ⩾ 75; Cr 19—23; Ti до 0,4	До 1100 °С
	Х20Н80ТЗ	Cr 19—23; Ti 2,0—2,9; Al 0,4—1,1; Ni—остальное	До 1150 °С
Хромоалюминиевый	Х13Ю4	Cr 12—15; Al 3,5—5,5; Fe — остальное	Для бытовых приборов и реостатов до 850°С
	ОХ25Ю5	Cr 23—27; Al 4,5—6,5; Fe — остальное	Для нагревательных элементов больших электропечей до 1200 С

Маигаиии — основной сплав для изготовления образцовых сопротивлеиий. Отличается малым (переходящим вблизи 20°С через 0) температуриым коэффициеитом сопротивлеиия и малой термо-э. д. с. по отношению к меди. В зависимости от технологии термообработки изготовляется мангаиии марок ММ и МТ (рис. 19.22) (мягкий и твердый).

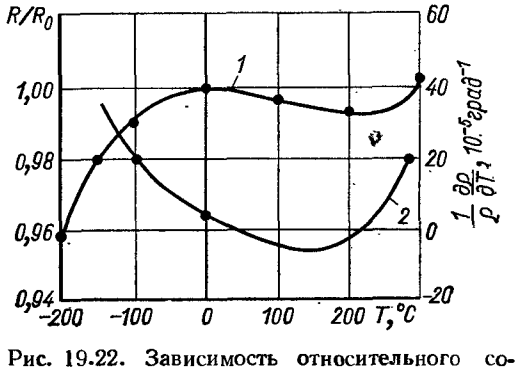


Рис. 19.22. Зависимость относительного сопротивления (*1*) и температуриого коэффициеита сопротивлеиия (*2*) маигаииива от температуры [7].

Электрические свойства манганина при 20°С [7]

Плотиость, *г/см*³	8,4
Удельное сопротивлеиие, 10^{-6} *ом·см*	47—48
Температурный коэффицнеит удельиого сопротивления	$\pm (3-6)\cdot 10^{-5}$
Термо-э.д.с. отиосительио меди, *мкв/град*	1

Коистаитан — медио-иикелевый сплав, обладает способиостью образовывать прочную оксидную пленку, что позволяет использовать его без специальиой изоляции между витками вплоть до 500°С. По состоянию металл бывает мягкий (м.) и твердый (тв.). Плотность константана — 8,9 *г/см*³, удельиое сопротивление 45—52·10^{-6} *ом·см* (рис. 19.23).

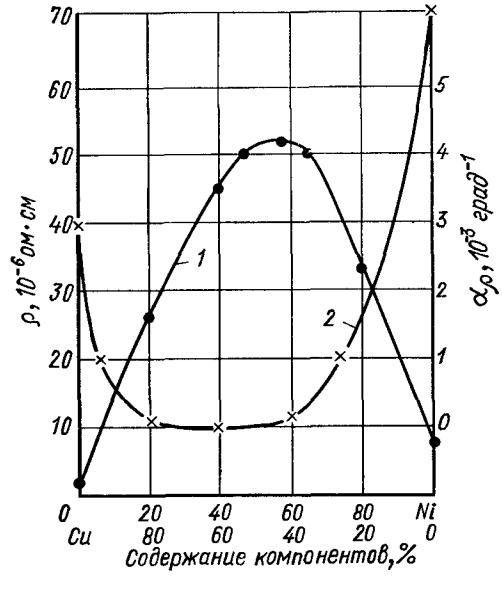


Рис. 19.23. Зависимости удельного сопротивления (*1*) и температурного коэффициента сопротивления (*2*) медно-иикелевых сплавов от содержаиия компоиеитов [7].

Удельное сопротивление проволок из термопарных сплавов при температуре 20 °С, 10^{-6} ом·см

Хромель	66 ± 5
Алюмель	305 ± 45
Копель	465 ± 25

Таблица 19.21

Электрические и тепловые свойства жаростойких сплавов [7]

Сплав	ρ, 10^{-6} ом·см	$\frac{1}{\rho}\frac{d\rho}{dT}$, $\frac{1}{град}$	$\frac{\rho_{1000°C}}{\rho_{0°C}}$	Работоспособность, ч (∅=0,4 мм)			
				1000°С	1100°С	1200°С	1300°С
Х15Н60	110	—	1,10	1000	200	30	—
Х20Н80	111	—	1,03	—	400	100	10
Х20Н80Т	111	—	1,026	—	—	—	—
Х20Н80Т3	127	—	1,02	—	—	—	—
Х13Ю4	126	$15 \cdot 10^{5}$	—	—	—	—	—
ОХ25Ю5	140	$5 \cdot 10^{-5}$	—	—	—	—	—

19.7. ЭЛЕКТРИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА СПЛАВОВ ЖЕЛЕЗА И МЕДИ

Таблица 19.22

Удельное сопротивление чугуна и составляющих его компонентов [14]

Сорт (компонент) чугуна	Чугуны			Компоненты чугуна			
	Серый	Ковкий	Белый	Феррит	Перлит	Цементит	Графит
ρ, 10^{-6} ом·см	80±40	50±20	70±20	10,4	20	140	150—300

Таблица 19.23

Удельное сопротивление нержавеющих сталей [13]

Марка стали	3Х13	Х17	1Х18Н9 2Х18Н9 1Х18Н9Т	Х25С3Н	Х18Н25С2	Х20Н14С2	Х10С2М
ρ, 10^{-6} ом·см	5,7	6,5	7,5	8,0	10,2	9,5	7,5

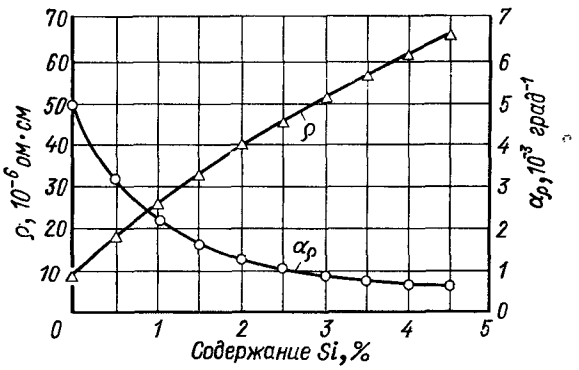


Рис. 19.24. Зависимость удельного сопротивления и температурного коэффициента сопротивления от содержания кремния в электротехнической стали [7].

Таблица 19.24

Проводимость проводниковых бронз [7,22]

Сплав	Состояние	Проводимость, %, по отношению к меди
Кадмиевая бронза (0,9% Cd*)	Отожженная	95
	Твердотянутая	83—90
Бронза оловянистая (0,8% Cd, 0,6% Sn)	Отожженная	55—60
	Твердотянутая	50—55
Бронза алюминиевая (2,5% Al, 2% Sn)	Отожженная	15—18
	Твердотянутая	15—18
Бериллиевая бронза (2,25% Be)	Отожженная	17
	Состаренная при 350°С	30
Бронза фосфористая (7% Sn, 0,1% P)	Отожженная	10—15
	Твердотянутая	10—15
Медь хромистая (0,5% Cr)	Состаренная	80—85

* Остальное у всех бронз — медь.

Таблица 19.25

Электрические свойства латуней различных марок [7]

Сплав	Марка, химический состав, % (медь — остальное)	ρ, 10^{-6} ом·см	$\frac{1}{\rho}\frac{\partial\rho}{\partial T}$, 10^{-6} град$^{-1}$
Томпак	Л-96, Zn 4	4,3	2,7
Латунь	Л-62, Zn 38	7,1	1,7
Латунь железисто-марганцовистая	ЛЖМц 59-1,1 Fe1, Mn 0,8 Zn 39	8,9	1,8
Латунь марганцовистая	ЛМц 58-2 Mn 2; Zn 40	21,2	1,3
Латунь свинцовистая	ЛС 59-1 Pb 1; Zn 40	6,5	1,7

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Жданов Г. С.** Физика твердого тела. М., Изд-во МГУ, 1962.
2. **Handbook** of Chemistry and Physics. Thirty Sixth ed. 1955.
3. **"Metals** Reference book". E. J. Smithells. 2nd Ed. V. 2. London, 1955. London, Butterworth, 1955.
4. **Handbuch** der Physik. Bd XIX. Berlin — Göttingen—Heidelberg, 1956.
5. **Головии В. А., Ульяиов Э. Х.** Свойства благородных металлов и сплавов. М., «Металлургия», 1964.
6. **Смителлс К. Дж.** Вольфрам. Пер. с англ. М., Металлургиздат, 1958.
7. **Справочиик** по электротехническим материалам. М.—Л., Госэнергоиздат, 1960.
8. **Алабышев А. Ф.** и др. Натрий и калий. (Получение, свойства и применение.) Под ред. А. Ф. Алабышева. Л., Госхимиздат, 1959.
9. **Кюнцлер Дж.** и др. Сверхпроводящие магниты.— «Успехи физ. наук», 1965, т. 86, вып. 1.
10. **Сэмпсои У., Крейг П., Строигин М.** Успехи в создании сверхпроводящих магнитов.— «Успехи физ. наук», 1967, т. 13, вып. 4.
11. **Кремлев М. Г.** Сверхпроводящие магниты.— «Успехи физ. наук», 1965, т. 86, вып. 1.
12. **Дубров Н. Ф., Лапкии Н. И.** Электротехнические стали. Госиздат по черной и цветной металлургии. М., 1963.
13. **Краткий** справочник металлиста. Под ред. проф. А. М. Малова. М., «Машиностроение», 1965.
14. **Металловедеиие** и термическая обработка. Под ред. акад. Н. Г. Гудцова. М., «Металлургия», 1966.
15. **Стерлии Я. М.** Металлургия урана. М., Госатомиздат, 1962.
16. **Дарвии Дж., Баддери Дж.** Бериллий. Пер. с англ. М., Изд-во иностр. лит., 1962.
17. **Савицкий Е. М., Тылкииа М. Л., Поварова К. Б.** Сплавы рения. М., «Наука», 1965.
18. **Техиика** высоких температур. Пер. с англ. М., Изд-во иностр. лит., 1959.
19. **Свойства** и применение редкоземельных металлов. Пер. с англ. М., Изд-во иностр. лит., 1960.
20. **«Phys.** Rev.», 1961, v. 23, p. 1567.
21. **«Philos** Mag.», 1953, v. 44, p. 1281.
22. **Готмаи П. Е., Березии В. Б., Хайкин А. М.** Электротехиические материалы. М., «Энергия», 1969.

ГЛАВА 20

ЭЛЕКТРИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА ДИЭЛЕКТРИКОВ

20.1. ВВЕДЕНИЕ

Диэлектриками являются неионизованные газы, а также жидкости и твердые тела, характеризующиеся полностью заполненной электронами валентиой зоной и полностью свободной зоной проводимости. Если термического возбуждения электронов на уровни зоны проводимости не происходит, то такие вещества ведут себя как изоляторы. При малой энергетической щели ΔE или при большей температуре эти вещества ведут себя как полупроводииики. Диэлектрики и полупроводники, в отличие от металлических проводников, экспоненциально уменьшают объемное сопротивление при повышении температуры.

Носителями тока в диэлектриках, находящихся в обычных условиях, чаще всего являются ионы, реже — электроны (*n*- и *p*-проводимость). В жидких диэлектриках вклад в проводимость вносят ионы обоих знаков, а в твердых чаще всего преобладает миграция ионов одиого знака (катионная или анионная униполярная проводимость). Проводимость газов при обычной температуре зависит от степени их ионизации заряженными частицами или ультрафиолетовыми лучами, не является характеристикой самого вещества и составляет 10^{-19}—10^{-20} *ом*$^{-1}\cdot$*см*$^{-1}$.

Пробой диэлектриков иосит либо тепловой, либо электрический — лавинный характер. Механизм теплового пробоя — постепенный разогрев участка диэлектрика, падение его сопротивления и термическое разрушение. Развитие теплового пробоя в зависимости от перенапряжения изменяется от нескольких секунд до сотых долей секунды. Электрический пробой является электроннолавинным процессом и происходит за 10^{-6}—10^{-7} *сек*. Проводимость и пробивное напряжение диэлектриков сильно зависят от чистоты и структуры вещества. Если у металлов технической чистоты проводимость составляет 80—99% проводимости идеального монокристалла, то у диэлектриков пробивное напряжение и изоляционные свойства составляют обычно не более 10% установленных на совершенных образцах.

Наиболее стабильны по отиошению к качеству образца значения диэлектрической проницаемости ε. Диэлектрическая проницаемость связана с тремя эффектами. *Электронная поляризация* — смещение электронных орбит происходит за время $\tau \sim 10^{-15}$ *сек* и дает основной вклад в ε в случае симметричных неполярных молекул. *Ионная поляризация* (у ионных кристаллов) — смещение ионов, составляющих остов кристалла или молекулы; $\tau \approx 10^{-13}$ *сек*. *Дипольная или ориентационная поляризация* связана с поворотом в электрическом поле молекул, имеющих дипольный момент. Эта поляризация приводит к гораздо бо́льшим значениям ε, однако время, необходимое для ориентации молекул, составляет 10^{-10}—10^{-3} *сек* и сильно зависит от свойств, температуры и агрегатного состояния вещества. У веществ, молекулы которых обладают дипольным моментом, ε может сильно зависеть от частоты.

В диэлектрике, помещенном в переменное электрическое поле, часть энергии поля переходит в тепловую. Тепловые потери пропорциональны тангенсу угла диэлектрических потерь [4]: $P_{(\text{вт})} = U\omega C \operatorname{tg}\delta$, где U — действующее значение синусоидального напряжения; ω — круговая частота; C — емкость участка изоляции; $\operatorname{tg}\delta = I_{\text{акт}} / I_{\text{реакт}}$ — отношение активного и реактивного токов на участке изоляции.

Диэлектрические потери у веществ, обладающих дипольным моментом, часто оказываются гораздо выше, чем у неполярных диэлектриков. Однако целый ряд полярных диэлектриков сочетает высокие значения ε и относительно небольшое значение $\operatorname{tg}\delta$.

20.2. ПРОВОДИМОСТЬ, ПРОБИВНОЕ НАПРЯЖЕНИЕ, ДИЭЛЕКТРИЧЕСКАЯ ПРОНИЦАЕМОСТЬ И ТАНГЕНС УГЛА ДИЭЛЕКТРИЧЕСКИХ ПОТЕРЬ

В табл. 20.1 содержатся сведения об электрических свойствах различных диэлектриков. Сведения об удельном сопротивлении и пробивном иапряжении почти всецело относятся к применяемым на практике образцам материалов. В особо чистых условиях эксперимента удается получить гораздо более высокие значения пробивных напряжений, однако они получены лишь для небольшого числа материалов [2, 20].

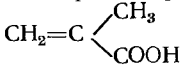
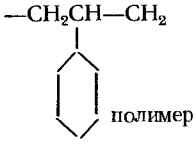
Таблица 20.1

Удельное сопротивление ρ, пробивное напряжение $E_{пр}$, диэлектрическая проницаемость ε и тангенс угла диэлектрических потерь (tg δ) [1,2,4,6—9,21]

Вещество	Химический состав	T, °С	ρ, *ом·см*	$E^{*}_{пр}$, *кв/мм*	ε^{2*}	tg δ
		а) Твердые неорганические вещества				
Алюминия окись	Al_2O_3	20	10^{16}	—	10	$5\cdot10^{-4}$ (10^6 *гц*)
		300	$3\cdot10^{13}$	—	—	$15\cdot10^{-4}$ (10^{10} *гц*)
		800	$3{,}5\cdot10^{8}$	—	—	—
		1100	$1\cdot10^{6}$	—	—	—
Асбест (хризотиловый)	$3MgO\cdot2SiO_2\cdot2H_2O$	20	10^{10}—10^{12}	—	—	—
Асбестоцемент	46%; цемент 46%; асбест 8%; тальк	20	10^{10}—10^{12}	2—3 (20—150°С)	—	—
Бериллия окись	BeO	600	$4\cdot10^{8}$	—	7,5	$3\cdot10^{4}$ ($2\cdot10^{9}$ *гц*)
		1100	$5\cdot10^{6}$			
		2100	10^{3}			
Бора нитрид	BN	2000	$1{,}9\cdot10^{3}$	—	—	—
Калий бромистый	KBr	25	—	$0{,}85\cdot10^{5}$	4,9	—
		300	$0{,}5\cdot10^{9}$			
		500	$3\cdot10^{6}$			
		700	10^{4}			
Калий хлористый	KCl	25	—	$1{,}2\cdot10^{5}$	4,68	—
		300	$0{,}5\cdot10^{9}$			
		500	$3\cdot10^{6}$			
		700	10^{4}			
Кварц плавленый	SiO_2	20	10^{15}	$6{,}5\cdot10^{5}$	3,75	Меньше 0,003
		400	10^{10}	—	3,75	90 500°С
		600	10^{8}	—	3,75	
		1000	10^{6}	—	—	
Керамика конденсаторная	Кристаллическая основа					
ТК-20	$ZrTiO_4$	20	10^{14}—10^{15}	32	28—30	$2{,}5$—$5{,}5\cdot10^{-4}$
ТК-20-80	$ZrTiO_4$	20	10^{14}—10^{15}	—	30—32	$3{,}5$—$6\cdot10^{-4}$
Т-80	TiO_2	20	10^{13}—10^{14}	27	78—88	4—$5{,}5\cdot10^{-4}$
Т-150	$CaTiO_3$	20	10^{14}—10^{15}	22	150—165	2—$4\cdot10^{-4}$
Т-900	(SrBi) TiO_3	20	10^{12}—10^{14}	28	900—1000	5—$10\cdot10^{-4}$
СМ-I	$(BaTiO_3)_{0,9}\cdot(BaZrO_3)_{0,075}$	20	10^{11}—10^{13}	13	2700—3000	1—$2\cdot10^{-2}$

Вещество	Химический состав	T, °С	ρ, *ом·см*	$F^{*}_{пр}$, *кв/мм*	ε^{2*}	tg δ
Магния окись	MgO	850 2100	$2\cdot10^{8}$ $4{,}5\cdot10^{2}$	— —	— —	— —
Мрамор	$CaCO_3$ или $CaCO_3\cdot MgCO_3$	20	10^{7}—10^{11}	2,5	8—10	0,005—0,001
Натрий бромистый	$NaBr$	25 300 500 700	— $3\cdot10^{7}$ $2\cdot10^{5}$ $2\cdot10^{3}$	$0{,}98\cdot10^{5}$ — — —	6,1 — — —	— — — —
Натрий хлористый	$NaCl$	25 300 500 700	— 10^{9} $3\cdot10^{6}$ 10^{4}	$1{,}56\cdot10^{5}$ — — —	5,9 — — —	— — — —
Слюда мусковит	$6SiO_2\cdot3Al_2O_3\cdot K_2O\cdot2H_2O$	20	10^{15}	10^{5}—10^{6} (эксперимент)	6,8—7,5	0,0002—0,0006
Слюда флогопит	$6SiO_2\cdot Al_2O_3\cdot6MgO\cdot K_2O\cdot2H_2O$	20	10^{13}—10^{14}	200 (технич.)	5,5	0,0025—0,01
Стеатит (высоковольтный)	тальк—основа; 10% $BaCO_3$; ~ 7% глиина	20 100	10^{15} $5\cdot10^{13}$	20—25 —	6—6,5 —	0,002 —
Стекло ЗС-5	68% SiO_2; 20% B_2O_3; 4% Na_2O; 5% K_2O; 3% Al_2O_3	200	$4\cdot10^{9}$	—	—	—
Стекло боросиликатное № 24	31,8% SiO_2 12,9 B_2O_3; 48% BaO; 2,8 ZnO; 3% Al_2O_3; 1,5% — другие окислы	20 200	— $3\cdot10^{13}$	— —	8,4 —	0,0009 0,0009
Стекло пирекс натриевый	80% SiO_2; 12% B_2O_3; 4,5% Na_2O; 0,5% MgO; 2,0% Al_2O_3; 1% — другие окислы	20 200	— $2\cdot10^{8}$	— —	5,3 —	0,0035 0,01
Стекло пирекс калиевый	80% SiO_2; 13% B_2O_3; 5,5% K_2O; 0,5% MgO; 1% — другие окислы	20 200	— $8\cdot10^{11}$	— —	5,7 —	0,0018 —

Веществ	Химический состав	T, °C	ρ, *ом·см*	$E^*_{пр}$, *кв/мм*	ε^{2*}	tg δ
Стекло титановое	14,5% SiO_2; 12,5% B_2O_3; 2% NaO; 44% BaO; 3% Al_2O_3; 24% TiO_2	20 200	— $1\cdot10^{13}$	— —	11,0 —	0,0012 0,0012
Тальк	$3MgO\cdot4SiO_2\cdot H_2O$	20	10^8—10^9	1	4—5	—
Тория двуокись	ThO_2	20 550 1200	$4\cdot10^{13}$ $2{,}6\cdot10^4$ $1{,}5\cdot10^4$	— — —	17 — —	$1{,}5\cdot10^{-3}$ — —
Циркония двуокись	ZrO_2	385 700 1200 2000	$1\cdot10^7$ $2{,}2\cdot10^3$ $3{,}6\cdot10^2$ 10	— — — —	— — — —	— — — —
б) Твердые органические вещества						
Антрацен		17	—	—	3,46	—
Винипласт	Полнхлорвинил без пластификатора	20	10^{14}—10^{15}	45	3,1—3,5	0,025—0,04
Воск(пчелиный)	см. [4]	20	5—$12\cdot10^{13}$	25—30	2,8—2,9	0,02—0,03
Гетинакс	Бакелизированиая бумага	20	10^{10}—10^{11}	16—25	7—8	0,045—0,1
Дифенил	$C_{12}H_{10}$	17	—	—	2,57	—
Древесиина, дуб	Воздушно-сухое состояние $\gamma = 0{,}87$ *г/см*^{3}	20	$8\cdot10^{10}$	3—5,5	—	—
Сосна	$\gamma = 0{,}56$ *г/см*^{3}	20	$8\cdot10^{10}$	2,4—4,5	—	—

Вещество	Химический состав	T, °С	ρ, *ом·см*	$E^*_{пр}$, *кв/мм*	ε^{2*}	tg δ
Канифоль	Основа — абиетиновая кислота $C_{20}H_{30}O_2$ и ее изомеры	20	10^{15}—10^{16}	10—15	3	<0,05
Каучук (натуральный)	Полимер изопрена $(C_5H_8)_n$	20	$5\cdot10^{15}$—10^{16}	—	2,3—2,4	0,001—0,003
Нафталин		25	—	—	2,85	—
Парафин	Смесь твердых предельных углеводородов C_nH_{2n+2}	20	10^{15}—10^{17}	20—30	1,9—2,2	$3{,}7\cdot10^{-4}$
Поливинилхлорид (поликлорвинил)	см. [4]	20	10^{14}—10^{16}	14—20	3—5	0,03—0,05
Полиметилметакрилат (орг. стекло)	Полимер метакриловой кислоты 	20	10^{14}—10^{16}	18—35	3,5—4,5 (50 *гц*) 2,7—3,2 (10^6 *гц*)	0,04—0,06 (50 *гц*) 0,02—0,03 (10^6 *гц*)
Полистирол		20	10^{17}—10^{18}	20—35	2,45—2,65	0,0001—0,0008
Политетрафторэтилен (тефлон)	—CF_2—CF_2— полимер	20	10^{15}—10^{16}	20—30	2	0,0002
Полиэтилен	—CH_2—CH_2— полимер	20	10^{15}—10^{17}	18—20	2,3	0,0002
Резина электроизоляционная		20	10^{14}—10^{15}	20—40 (кратковременно)	2,5—5	0,01—0,03

Вещество	Химический состав	T, °С	ρ, *ом·см*	$E^*_{пр}$, *кв/мм*	ε^{2*}	tg δ
Резина кремнийорганическая	—	20	10^{14}	20	4	0,008—0,01
Смола эпоксидная	Сополимер двухатомных фенолов и эпихлоргидрина	20	10^{13}—10^{14}	16	3,7	0,019
Текстолит	Ткань, пропитанная фенолформальдегидной смолой	20	10^{9}—10^{10}	3,5—6	8	0,07 и более
Стеклотекстолит	Стеклоткань, пропитанная фенолформальдегидной смолой	20	10^{12}	10—12	—	0,05—0,06
Фенопласт (пресс-порошок К-211-3)	Резольная смола + молотая слюда и кварц	20	10^{14}	12	7	0,01
К-211-4	Резольная смола + молотая слюда, кварц и древесная мука	20	10^{13}	12	6	0,02
К-211-34	Близок к К-211-4	20	10^{14}	12	—	0,01
Церезин	Смесь твердых алифатических углеводородов от $C_{39}H_{80}$ до $C_{53}H_{108}$	20	10^{16}	15	2,1—2,3	$0{,}2\cdot10^{-4}$
Шеллак	Основа — эфиры алейритовой ($C_{16}H_{32}O_5$) и шеллоновой ($C_{15}H_{20}O_2$) кислот	20	10^{15}—10^{16}	20—30	3,6	0,01
Эбонит	Каучук + до 40% связанной серы	20	10^{15}—10^{16}	—	2,7—3,0	0,01—0,015
Янтарь	Ископаемая смола	20	до 10^{19}	—	2,8	0,01

Вещество	Химический состав	T, °C	ρ, *ом·см*	$E^{*}_{пр}$, *кв/мм*	ε^{2*}	tg δ
		в) Жидкости [6,4]				
Азот (ж.)	N_2	−198.4	—	—	1,445	—
Аммиак (ж.)	NH_3	−77,7	$1{,}3\cdot10^{7}$	—	25,0	—
Аргон (ж.)	Ar	−184,4	—	—	1,516	—
Ацетон	$(CH_3)_2CO$	−15 25	$1{,}1\cdot10^{9}$ —	— —	— 20,74	— —
Бензол	C_6H_6	20 25	$1\cdot10^{18}$ —	— —	— 2,2747	— —
Бром	Br_2	−17,2	$1{,}3\cdot10^{13}$	—	3,22	—
Вода (перегнанная в вакууме)	H_2O	0 10 18 34 50	$1{,}58\cdot10^{8}$ $2{,}85\cdot10^{8}$ $4{,}44\cdot10^{8}$ $9{,}62\cdot10^{8}$ $18{,}9\cdot10^{8}$	— — — — —	— — 78,3(25°) 34.6(208°) 10,1(364°)*	— — — — —
Вода (дистиллированная)	H_2O	20—25	$1—4\cdot10^{6}$	—	—	—
Водород (ж.)	H_2	−252,85	—	—	1,225	—
Водород хлористый (ж.)	HCl	−96 −113,2	$1\cdot10^{8}$ —	— —	— 11,8	— —

* Значения ε при 208 и 364° С на линии насыщения.

Вещество	Химический состав	T, °С	ρ, *ом·см*	$E^*_{пр}$, *кв/мм*	ε^{2*}	tg δ
Гексан	$CH_3(CH_2)_4CH_3$	18	$1 \cdot 10^{18}$	—	—	—
Гелий (ж.)	He	—269,0	—	—	1,048	—
Глицерин	$CHOH(CH_2OH)_2$	25	$6{,}4 \cdot 10^{8}$	—	42,4	—
Кислород (ж.)	O_2	—182,9	—	—	1,463	—
Кислота муравьиная	HCOOH	18	$5{,}6 \cdot 10^{5}$	—	57,9	—
Кислота олеиновая	$C_{17}H_{33}COOH$	15 21,9	$2 \cdot 10^{10}$ —	— —	— 2,43	— —
Кислота серная	H_2SO_4	25	$1 \cdot 10^{2}$	—	—	—
Кислота уксусная	CH_3COOH	25	$1{,}1 \cdot 10^{6}$	—	6,19	—
Масло касторовое (рициновое)	см. [4]	20 100	$5 \cdot 10^{10}$—$5 \cdot 10^{12}$ —	14—16 —	4—4,5 3,5—4,0	0,01—0,03 0,2—0,8
Масло кремнийорганическое	Метилполисилоксаны	20	10^{17}—10^{15}	20—43,5	2,5—3,5	0,0002—0,0005
Масло конденсаторное	Очищенное трансформаторное	20	10^{14}	20	2,1—2,3	0,002—0,005
Масло трансформаторное	Смесь углеводородов	20 60	10^{14}—10^{16} 10^{13}—10^{15}	20—25	2,1—2,2	0,01—0,0002
Сероводород (ж.)	H_2S	—61,8	$1 \cdot 10^{11}$	—	8,04	—
Сероуглерод	CS_2	25	—	—	2,625	—
Спирт метиловый	CH_3OH	20	$5{,}8 \cdot 10^{6}$	—	37,92(0°)	—
Спирт этиловый	CH_3CH_2OH	0	$1{,}5 \cdot 10^{7}$	—	—	—
		18	$6{,}4 \cdot 10^{8}$	—	26,4(10°)	—
		25	$1{,}3 \cdot 10^{9}$	—	—	—

Вещество	Химический состав	T, °C	ρ, *ом·см*	$E^*_{пр}$,	ε^{2*}	tg δ
Толуол	$C_6H_5CH_3$	19,5	$<1\cdot10^{14}$	—	2,435(0°)	—
Фтор (ж.)	F_2	—189,97	—	—	1,517	—
Хлор (ж.)	Cl_2	—70	$1\cdot10^{16}$	—	2,048	—
Этиленгликоль	$C_2H_6O_2$	—	—	—	38,7	—
Эфир диэтиловый	$(C_2H_5)_2O$	25	$4\cdot10^{13}$	—	4,22	—
		г) газы				
Азот	N_2	0	—	1,0	1,00058	—
Аргон	Ar	0	—	0,25	1,000554	—
Вода (пар)	H_2O	110	—	—	1,0126	—
Водород	H_2	0	—	0,6	1,00027	—
Воздух	Смесь	0	—	1,0	1,00057	—
Гелий	He	0	—	0,2	1,000068	—
Дихлордифторметан (фреон-12)	CF_2Cl_2	—	—	2,4—2,6	1,00355	—
Кислород	O_2	0	—	0,9	1,000532	—
Ксенон	Xe	25	—	—	1,000768	—
Неон	Ne	0	—	0,15	1,000127	—
Ртуть	Hg	400	—	—	1,00074	—
Серы гексафторид (элегаз)	SF_6	25	—	2,3—2,5	1,002049	—
Углерода двуокись (углекислый газ)	CO_2	0	—	0,9	1,00099	—

* Пробивное напряжение для газов дается по отношению к воздуху, для которого $E_{пр} = 32$ *кв/см* при $d=1$ *см* и $p=760$ *мм рт. ст.*

2* Значения ε для газов соответствуют $p = 760$ *мм рт. ст.*

20.3. ЭЛЕКТРИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА НАИБОЛЕЕ РАСПРОСТРАНЕННЫХ ДИЭЛЕКТРИКОВ

Слюда [4,9]

Промышленное значение имеют природные разновидности: мусковит ($K_2O\cdot3Al_2O_3\cdot6SiO_2\cdot2H_2O$) и флогопит ($K_2O\cdot6MgO\cdot Al_2O_3\cdot6SiO_2\cdot2H_2O$), а также фторфлогопит (с заменой групп OH ионами фтора), полученный искусственным путем. Электрические свойства фторфлогопита: $\rho = 10^{17} \div 10^{18}$ *ом·см*, tg $\delta < 0{,}0001$ при 10^6 *гц*. Электрические характеристики природной слюды сильно зависят от ее чистоты.

Пробивное напряжение тонких (10 *мкм*) листочков мусковита при температуре —200 — + 200°С достигает 10^6 *в/мм* (рис. 20.1), у флогопита — $7\cdot10^5$ *в/мм*. Пробивное напряжение конденсаторной слюды не ниже:

20—25 *мкм* — 1500 *в*; 36—45 *мкм* — 2500 *в*;
26—35 *мкм* — 2000 *в*; 46 *мкм* — 3000 *в*.

Удельное сопротивление конденсаторной слюды $\rho \geqslant 10^{15}$ *ом·см*, $\varepsilon = 6 \div 7{,}5$; tg $\delta \leqslant 0{,}0006$ при 10^6 *гц*.

Слюда начинает вспучиваться при температуре 500—600° С.

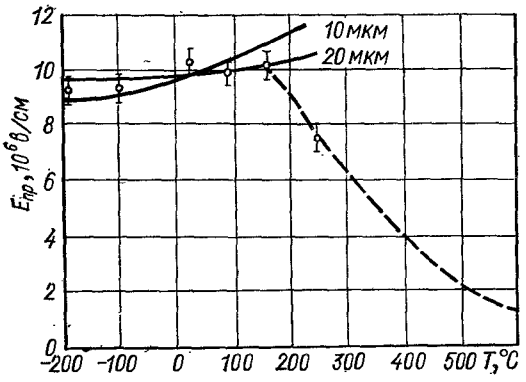


Рис. 20.1. Зависимость пробивного напряжения мусковита от температуры [2]:
сплошная линия — теория для разных толщин образца; пунктир — теория по Фрелиху; точки—эксперимент.

Стекло, кварц [3, 4]

В состав стекол входят стеклообразующие окислы (SiO_2, B_2O_3, P_2O_5, As_2O_5), окислы-плавни (Na_2O, K_2O, Li_2O, CaO, MgO), а также окислы промежуточного типа (Al_2O_3, ZnO, PbO, TiO_2). Механизм проводимости стекла обусловлен перемещением слабо связанных ионов, особенно ионов натрия. Неотожженное стекло обладает худшими электрическими характеристиками, чем отожженное (рис. 20.2, 20.3).

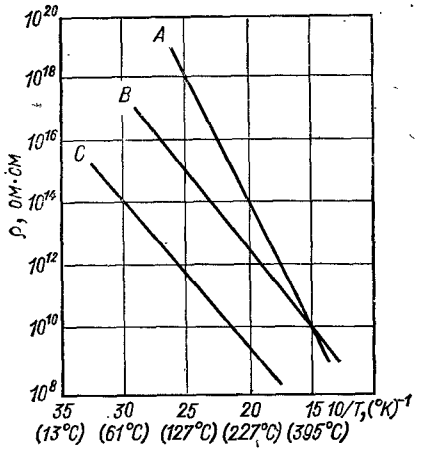


Рис. 20.2. Зависимость удельного сопротивления кварца от температуры [22]:

A — плавленый кварц; *B* — кристалл, ⊥ главной оси; *C* — кристалл, ∥ главной оси.

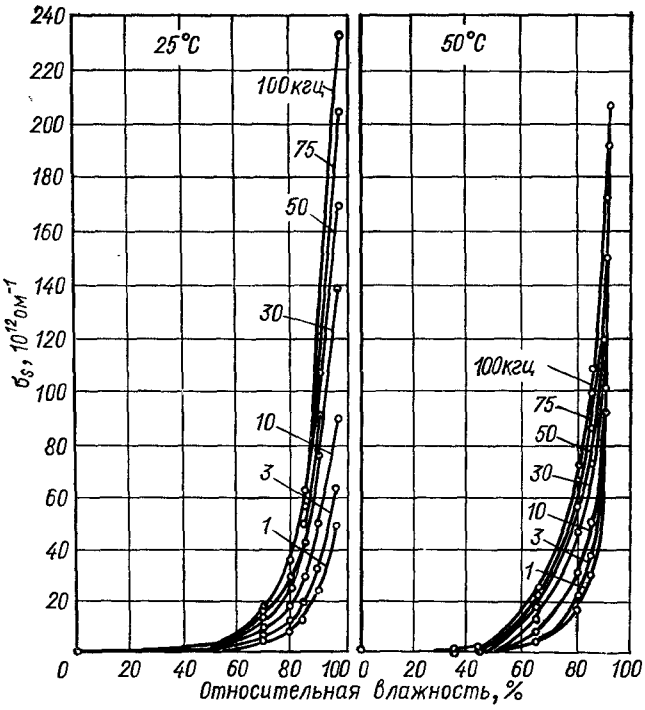
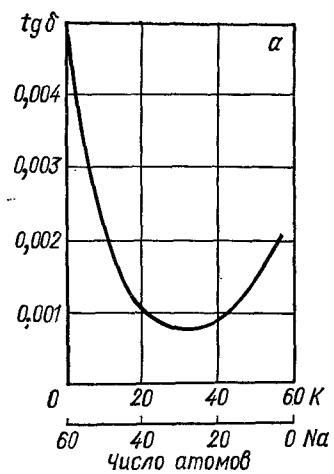


Рис. 20.3. Зависимость поверхностной проводимости σ_s боросиликатного стекла от относительной влажности окружающего воздуха и частоты [3].



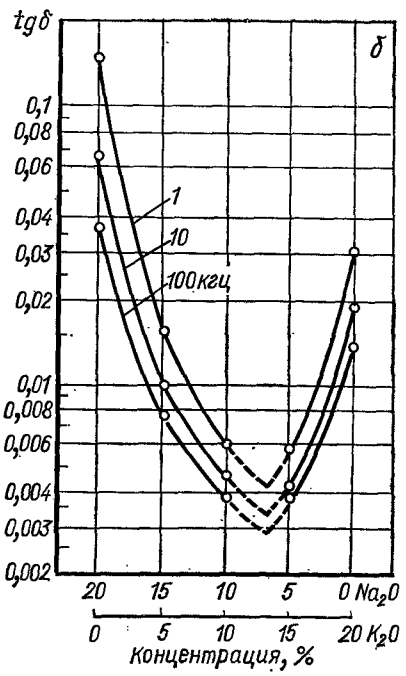


Рис. 20.4. Зависимость tg δ от состава:

а — для боратного стекла (40% B_2O_3, остальное Na_2O и K_2O); *б* — для натрий-калий-силикатного стекла (80 % SiO_2, остальное Na_2O и K_2O) [4,3].

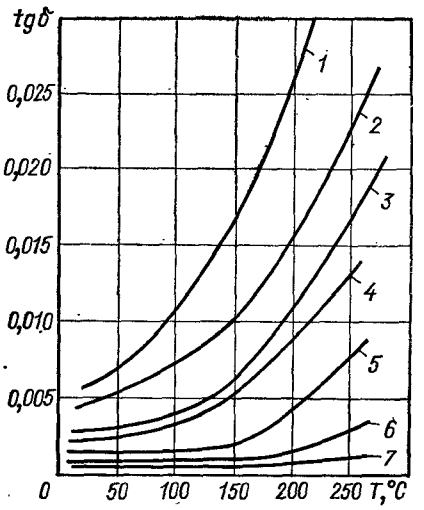


Рис. 20.5. Зависимость tg δ различных стекол от температуры:

1 — стекло № 46; *2* — стекло № 23; *3* — натриевый пирекс; *4* — нонекс; *5* — натриево-калиевый пирекс; *6* — калиевый пирекс; *7* — минос [4].

Диэлектрическая проницаемость стекол сильно зависит от их состава, увеличиваясь с увеличением содержания тяжелых окислов от $\varepsilon = 3{,}75$ для кварцевого стекла до $\varepsilon = 16{,}2$ для стекла, содержащего 80% PbO; $\operatorname{tg}\delta$ всех стекол возрастает с температурой; температурный коэффициент ε (ТКЕ) технических стекол изменяется от 30 до $500 \cdot 10^{-6}$ *град*$^{-1}$. Минимальное и наименее зависящее от частоты значение $\operatorname{tg}\delta$ имеет кварц [$(1—2) \times 10^{-4}$ от 1 до 300 *Мгц*] (рис. 20.4, 20.5).

Таблица 20.2

Свойства электровакуумных стекол [6, 21]

Обозначения: $T_р$ — температура размягчения; α — коэффициент расширения; ρ — удельное сопротивление; ε — диэлектрическая проницаемость; $\operatorname{tg}\delta$ — тангенс угла диэлектрических потерь.

Стекло	Химический состав, %	$T_р$, °С	$\alpha \cdot 10^{-7}$	T, °С	ρ_T, *ом·см*	ε	$\operatorname{tg}\delta \cdot 10^{-4}$
С5-1 (кварцевое)	$SiO_2 > 99{,}5$	>1300	5—6	150 300 500 800	10^{17} 10^{13} 10^{10} 10^{7}	3,75	1—2
П15* (7740 корнинг) (пирекс)	SiO_2 78,5 B_2O_3 15 Al_2O_3 2 N_2O 3 K_2O 1,5	600	33,4	25 100 200	10^{15} $5 \cdot 10^{11}$ $5 \cdot 10^{8}$	4,1—4,6	130—45
С 37—2* (7070 корнинг) (вольфрамовое)	SiO_2 70 B_2O_8 27 Na_2O 1,4 K_2O 1 Li_2O 0,6	600	37	25 250 350	10^{17} $2 \cdot 10^{11}$ $2 \cdot 10^{7}$	4,0	6
С 39-1* (С 9, англ.) (вольфрамовое)	SiO_2 73 B_2O_3 16,5 PbO 6 Na_2O 3 K_2O 1,5	630	39,5	150 300	10^{11} $10^{7,8}$	4,2	13
С 49-1 (3С5 Na) (7050 корнинг) (молибденовое)	SiO_2 67,5 B_2O_3 20,3 Al_2O_3 2,5 Na_2O 8,7	580	49,0	25 250 350	10^{16} $10^{8,8}$ $10^{7,2}$	4,9	33
С89-1 (0080 корнинг) (платиновое)	SiO_2 71,9 CaO 5,5 MgO 3,5 BaO 2 Na_2O 16,1 K_2O 1	560	89	25 250 350	$10^{12,4}$ $10^{6,4}$ $10^{5,1}$	7,2	90

* Значения ρ, ε и $\operatorname{tg}\delta$ даны по зарубежным аналогам, указанным в первом столбце таблицы в скобках.

Таблица 20.3

Газопроницаемость $\varkappa$ электровакуумных стекол [21]*

Газопроницаемость дается в *см*^{3} газа, приведенного к 0°С и 760 *мм рт. ст.*, прошедшего через стеклянную перегородку площадью 1 *см*^{2} и толщиной 1 *мм* за 1 *сек* при разности давлений 1 *мм рт. ст.*

Кварцевое стекло С5*

Гелий		Водород		Неон		Азот		Аргон	
T, °С	$\varkappa$	T, °С	$\varkappa$	T, °С	$\varkappa$	T, °С	$\varkappa$	T, °С	$\varkappa$
—78	$2 \cdot 10^{-13}$	200	$2 \cdot 10^{-12}$	500	$1{,}4 \cdot 10^{-11}$	600	$6{,}5 \cdot 10^{-12}$	800	$1{,}6 \cdot 10^{-12}$
0	$6 \cdot 10^{-12}$	300	10^{-11}	600	$2{,}8 \cdot 10^{-11}$	700	$1{,}32 \cdot 10^{-11}$	900	$5{,}8 \cdot 10^{-11}$
100	$6 \cdot 10^{-11}$	400	$3{,}7 \cdot 10^{-11}$	700	$4{,}2 \cdot 10^{-11}$	800	$4{,}3 \cdot 10^{-11}$		
200	$2 \cdot 10^{-10}$	500	$1{,}25 \cdot 10^{-10}$	900	$1{,}18 \cdot 10^{-10}$	900	$1{,}19 \cdot 10^{-10}$		
400	10^{-9}	700	$2{,}52 \cdot 10^{-10}$						
800	$5 \cdot 10^{-9}$	900	$6{,}4 \cdot 10^{-10}$						

Газопроницаемость для гелия

Пирекс*		С 39 — 2* (1720 корнинг)		С 89 — 1* (0080 корнинг)	
T, °С	$\varkappa$	T, °С	$\varkappa$	T, °С	$\varkappa$
—78	10^{-14}	100	-10^{-15}	25	$6\cdot10^{-16}$
0	$6\cdot10^{-13}$	200	$5\cdot10^{-14}$	100	$2\cdot10^{-14}$
100	10^{-11}	400	$3\cdot10^{-12}$	200	$5\cdot10^{-13}$
200	10^{-10}			400	$1{,}5\cdot10^{-11}$

* Данные приводятся по зарубежным аналогам.

Керамика [4, 5, 7, 9]

Керамика — поликристаллическое соединение окислов, иногда с примесью аморфной фазы (фарфор).

Наиболее высокими механическими, термическими и электроизоляционными свойствами обладают изделия из чистых окислов: Al_2O_3, BeO, MgO. Примесь SiO_2 уменьшает термостойкость и увеличивает проводимость керамических изделий при высоких температурах.

Электротехническая керамика подразделяется на низковольтную, высоковольтную, дугостойкую и высокочастотную.

Низковольтный фарфор содержит значительное количество окислов щелочных металлов Na_2O_3 и K_2O, увеличивающих его проводимость и tgδ и уменьшающих прочность на растяжение.

Высоковольтный стеатит обладает повышенными механическими и электрическими характеристиками.

Конденсаторная керамика (см. табл. 20.1) отличается повышенной диэлектрической проницаемостью и определенной ее зависимостью от температуры (TKE). Широко применяется керамика на основе $ZrTiO_4$, TiO_2, $CaZrO_3$ и $CaTiO_3$; используется также сегнетоэлектрическая керамика на основе титанатов бария и стронция с ε до 3000. Электрические свойства конденсаторных керамик приведены на рис. 20.6—20.9.

Таблица 20.4

Состав и свойства электротехнической керамики [4]

Керамика	Состав, %	T, °С	ρ_T, *ом·см*	tg δ	$E_{пр}$, *кв/мм*	ε
Электротехнический фарфор	SiO_2 68—72 Al_2O_3 22—24 $Na_2O + K_2O$ 3,5—6	20 100 200 300	10^{14}—10^{15} 10^{10}—10^{11} 10^{7}—10^{9} 10^{6}—10^{7}	0,035 (50 *гц*, 20°С)	20—28	6—7
Высоковольтный стеатит	SiO_2 59 Al_2O_3 3 MgO 27 BaO 10 $Na_2O + K_2O$ 0,2	100 300	$5\cdot10^{13}$ $5\cdot10^{9}$	0,002(20°С) 0,003(100°С)	20—25	6—6,5

Таблица 20.5

Значения TKE ($d\varepsilon/dT$) для различных температурных интервалов и материалов диэлектрика [7]

Группа TKE	Материал диэлектрика	TKE, 10^{-6} *град*$^{-1}$, для интервалов температур, °С		
		От —60 до +30	От +30 до +70	От +30 до +150
М-47	ТК-20	—75	—63	—32
М-75	ТК-20-80	—116	80	66
М-700	Т-80	—720	630	580
М-700	Ц-70	—713	640	565
М-1300	Т-150	—1600	1320	1050
Н-40	Т-900	см. рис. 20. 6		
Н-70	СМ-1	см. рис. 20. 6		

Таблица 20.6

Маркировка конденсаторов по TKE [7]

$d\varepsilon/dT$ (TKE), *град*$^{-1}$	Обозначение на корпусе	Цвет корпуса	Цвет маркировочной точки
$+120\cdot10^{-6}$	П-120	Синий	—
$+33\cdot10^{-6}$	П-33	Серый	—
$-33\cdot10^{-6}$	М-33	Голубой	Коричневый
$-47\cdot10^{-6}$	М-47	»	—
$-75\cdot10^{-6}$	М-75	»	Красный
$-150\cdot10^{-6}$	М-150	Красный	Оранжевый
$-220\cdot10^{-6}$	М-220	»	Желтый
$-330\cdot10^{-6}$	М-330	»	Зеленый
$-470\cdot10^{-6}$	М-470	»	Синий
$-750\cdot10^{-6}$	М-750	»	—
$-1500\cdot10^{-6}$	М-1500	Зеленый	—
±30%* (от—60 до +85°С)	Н-30	Оранжевый	Зеленый
—50%*	Н-50	»	Синий
—70%*	Н-70	»	—
—90%*	Н-90	»	Белый

* Допустимое отклонение номинальной емкости.

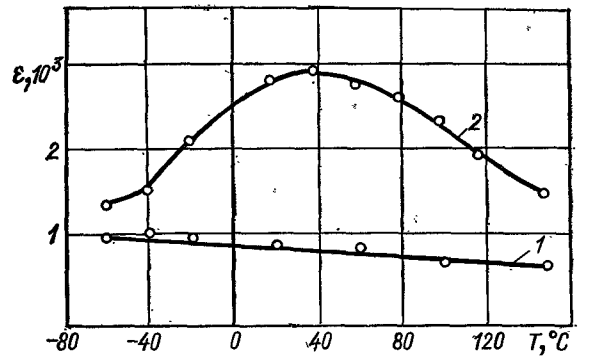


Рис. 20.6. Зависимость ε для сегнетокерамических материалов от температуры, $f = 1000$ *гц* [7]:
1 — Т-900 (Н40); *2* — СМ-1 (Н70).

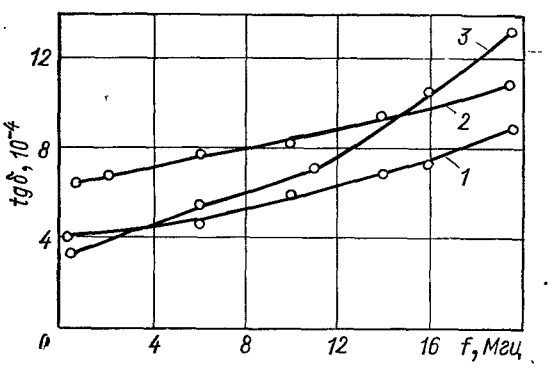


Рис. 20.8. Зависимость tg δ от частоты ($T = 20$ С):
1 — ТК-20; *2* — Т-80; *3* — Т-150; [7].

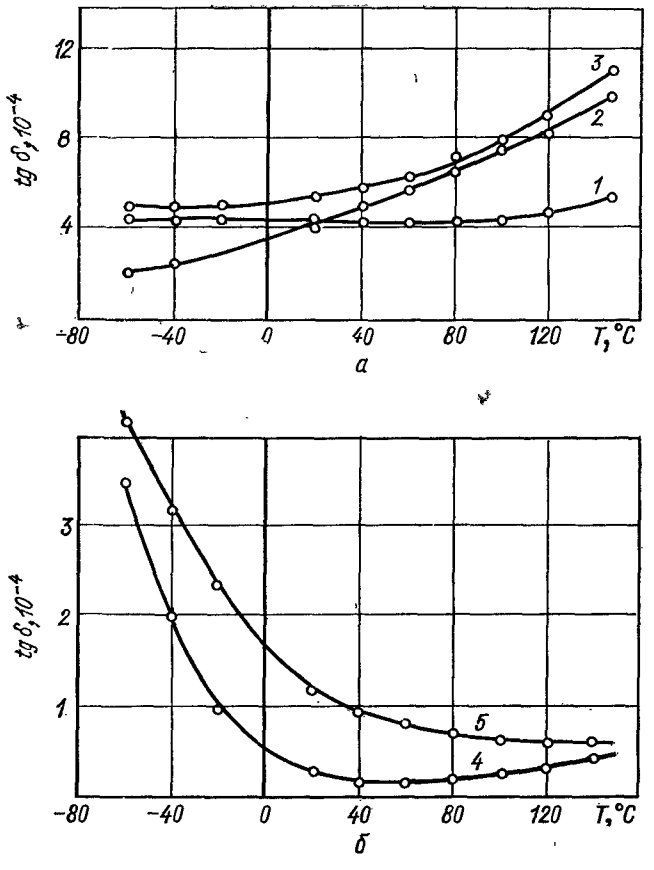


Рис. 20.7. Зависимость tg δ для конденсаторной керамики от температуры [7]:
а — $f = 1 \div 3$ *Мгц*; *б* — $f = 1000$ *гц*; *1* — Т-150; *2* — ТК-20; *3* — Т-80; *4* — Т-900; *5* — СМ-1.

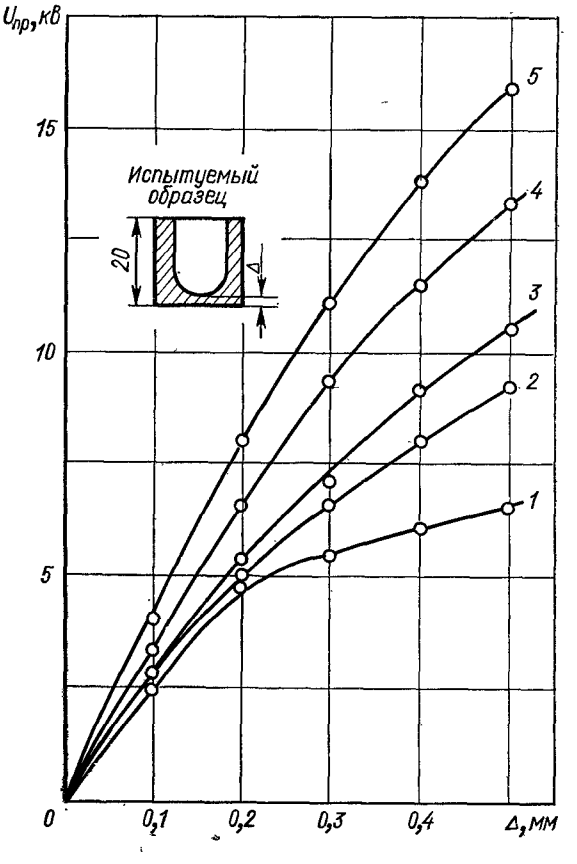


Рис. 20.9. Зависимость пробивного напряжения от толщины диэлектрика для конденсаторной керамики [7]:
1 — СМ-1; *2* — Т-900; *3* — Т-150; *4* — Т-80; *5* — ТК-20.

Электрические свойства Таблица 20.7

Свойство	Полиэтилен	Политетрафторэтилен (тефлон) (фторопласт-4)	Поливинилхлорид	Полистирол	Полиметилметакрилат (орг. стекло)	Эпоксидная смола
Термостойкость, °С	100	260	60—70	65—96	68—88	140
ρ, *ом·см*	10^{15}—10^{17}	10^{15}—10^{16}	10^{14}—10^{16}	10^{17}—10^{18}	10^{14}—10^{16}	10^{13}—10^{14}
$\varepsilon(f = 10^6$ *гц*)	2,3	2	3—5	2,45—2,65	3,5—4,5	3,7
$\operatorname{tg}\delta(f = 10^6$ *гц*)	$2 \cdot 10^{-4}$	$2 \cdot 10^{-4}$	0,03—0,08	$(1—3) \cdot 10^{-4}$	0,04—0,06	0,019
$E_{пр}$, *кв/мм*	18—20	20—30	14—20	20—35	18—35	18

Электроизоляционные масла

В качестве электрических изоляторов применяются природные нефтяные масла (трансформаторное, конденсаторное, кабельное) и растительное касторовое (рициновое) масло.

Таблица 20.8

Свойства электроизоляционных масел [4]

Свойство	Трансформаторное масло	Касторовое масло (рициновое)
ε	2,1—2,3	4,0—4,4
$\operatorname{tg}\delta$	0,002—0,005	0,01—0,03
ρ, *ом · см*	10^{14}—10^{17}	$5 \cdot 10^{10}$—$5 \cdot 10^{12}$
$E_{пр}$, *кв/мм*	20	14—16

На рис. 20.10 представлена зависимость пробивного напряжения трансформаторного масла от содержания в нем воды.

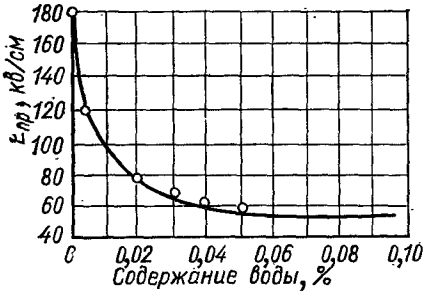


Рис. 20.10. Зависимость пробивного напряжения трансформаторного масла от содержания воды [19].

20.4. СЕГНЕТОЭЛЕКТРИКИ

Сегнетоэлектрики обладают спонтанной электрической поляризованностью при отсутствии внешнего поля. Они характеризуются очень высоким значением ε, сильно зависящим от температуры и приложенного напряжения, и наличием диэлектрического гистерезиса.

Таблица 20.9

Состав и свойства протонных сегнетоэлектриков [10, 11]

Свойство	Сегнетова соль*	Дигидрофосфат калия	Дигидрофосфат аммония	Дигидроарсенат калия	Дигидроарсенат аммония	Гуанидин[2*] (ГАС)	Триглицинсульфат[3*]
Состав	$NaKC_4H_4O_6 \cdot 4H_2O$	KH_2PO_4	$NH_4H_2PO_4$	KH_2AsO_4	$NH_4H_2AsO_4$	$(CN_3H_6)Al(SO_4)_2 \cdot 12H_2O$	$(CH_2NH_2COOH)_3H_2SO_4$
Точка Кюри, T_C, °К	$T_{C1} = 258$ $T_{C2} = 295,5$	123	147,9	95,6	216,1	473	320—323
Точка плавления, °С	58	252,6	190	288	300	—	—
Плотность, *г/см*^{3}	1,775	2,34	2,311	2,85	1,803	—	—
Спонтанная поляризованность, *мкк/см*^{2}	0 25 (макс.)	4,7	4,8	—	—	0,35	—
Кристаллическая структура	При $T_{C1} < T < T_{C2}$ моноклинная При $T_{C2} < T < T_{C1}$ ромбическая	Тетрагональная	—	Тетрагональная	—	Тригональная	Моноклинная

* Максимальное значение ε вдоль оси *a*: 6000 ($T = T_{C_1}$); 4000 ($T = T_{C_2}$); $\operatorname{tg}\delta = 0,35 (T_{C_1} < T < T_{C_2})$; $\operatorname{tg}\delta = 0,001 (T_{C_2} < T < T_{C_2})$, Частота релаксации $\varepsilon = 5 \cdot 10^8$ *гц*.

2* Коэрцитивная сила $E_c = 1,5$ *кв/см*.

3* $\varepsilon = 9500$ при $T = T_C$.

Таблица 20.10

Состав и свойства беспротонных сегнетоэлектриков кислородно-октаэдрического типа [10]

Название	Химический состав	Кристаллическая структура	Постоянные решетки, Å	Температура фазового перехода, °С	ε
Бария титанат	$BaTiO_3$	Перовскит (тетрагональная)	$a = b = 3{,}98$ $c = 4{,}025$	+120	При 20°С $\varepsilon = 1700 \div 2000$ в точке Кюри (120°С) $\varepsilon = (8 \div 10) \cdot 10^3$
Лития танталат	$LiTaO_3$	Ильменит	$a = 5{,}49$ $\alpha = 56°30'$	> 450	
Натрия ниобат	$NaNbO_3$	Перовскит (тетрагональная)	$a = 2\times 3{,}921$ $b = 4\times 3{,}885$ $c = 2\times 3{,}921$ $\beta = 90°40'$	+640, 518, 480, 360	Антисегнетоэлектрик; при 20°С $\varepsilon = 250$, при 360°С $\varepsilon = 1000$
Свинца гафнат	$PbHfO_3$	Перовскит	$a = 4{,}136$ $c/a = 0{,}991$	+215, 163	Антисегнетоэлектрик: при 20°С $\varepsilon = 100$, при 215°С $\varepsilon = 570$
Свинца ниобат	$PbNb_2O_6$	Кубическая типа пирохлора		570	при 20°С $\varepsilon = 280$, при 570°С $\varepsilon = 750$
Свинца танталат	$PbTaO_6$	То же		260	при 20°С $\varepsilon = 300 \div 400$ при 260°С $\varepsilon = 1100$
Свинца титанат	$PbTiO_3$	Перовскит (тетрагональная)	$a = 3{,}896$ $c = 4{,}144$	+500	при 20°С $\varepsilon \cong 200$, при 500°С $\varepsilon = 3500$
Свинца цирконат	$PbZrO_3$	То же	$a = 4{,}150$ $c = 4{,}100$	+235	Антисегнетоэлектрик; при 20°С $\varepsilon = 250$, при 235°С $\varepsilon = 3750$
Стронция титанат	$SrTiO_3$	Перовскит (кубическая)	$a = b = c = 3{,}898$	—250	

Сегнетоэлектрики подразделяются на протонные (сегнетова соль, дигидрофосфат калия, дигидроарсенаты калия и аммония и др.) и беспротонные (титанат бария, титанат свинца, цирконат свинца и др.).

На рис. 20.11 и 20.12 показана зависимость ε от температуры для сегнетовой соли и дигидрофосфата калия.

Большое практическое значение имеют смешанные сегнетоэлектрические кристаллы, отличающиеся малым $\operatorname{tg}\delta$ и высоким удельным сопротивлением. Смешение двух сходных сегнетоэлектриков дает обычно сегнетоэлектрик с точкой Кюри, расположенной между точками Кюри компонентов, а смешение сегнетоэлектрика

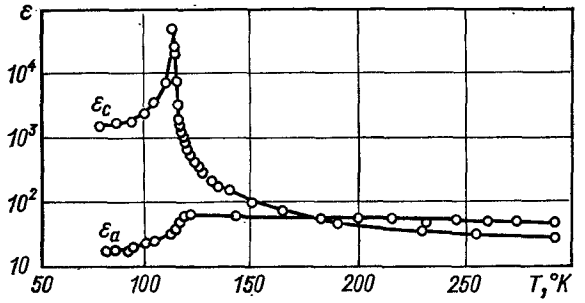


Рис. 20.12. Зависимость диэлектрической проницаемости дигидрофосфата калия от температуры (ε_a — измерения вдоль оси a, ε_c — измерения вдоль оси c) [11].

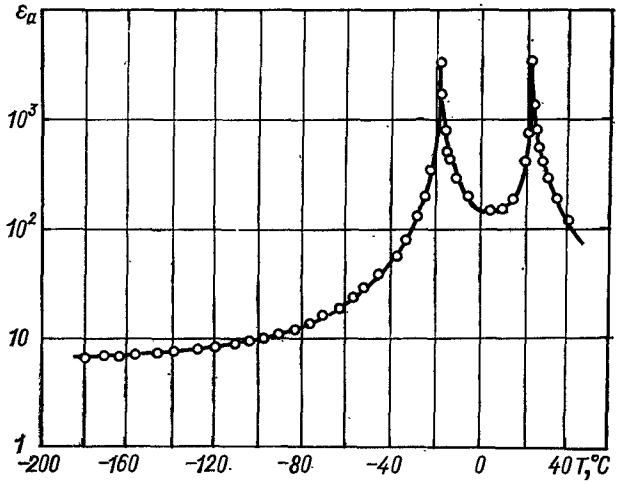


Рис. 20.11. Зависимость диэлектрической проницаемости ε_a в слабых полях для кристаллов сегнетовой соли ($f = 10^3$ гц) от температуры (измерения вдоль оси a) [11].

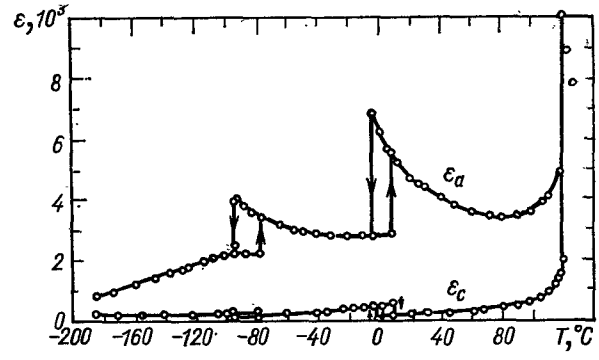


Рис. 20.13. Зависимость диэлектрической проницаемости монокристалла титаната бария от температуры (ε_a — измерения вдоль оси a, ε_c — измерения вдоль оси c) [4].

с несегнетоэлектриком приводит к выравниванию температурной кривой ε. Наиболее подробно изучены системы: $BaTiO_3$ — $SrTiO_3$; $BaTiO_3$ — $CaTiO_3$ и $BaTiO_3$—$SrTiO_3$—$CaTiO_3$ (см. рис. 20.13—20.16).

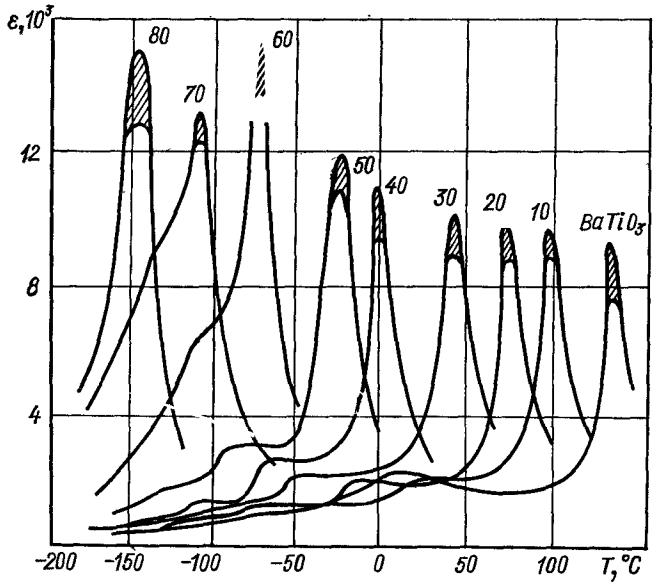


Рис. 20.14. Зависимость диэлектрической проницаемости растворов $BaTiO_3$ — $SrTiO_3$ от температуры [4]. (Числа — содержание $SrTiO_3$, %.)

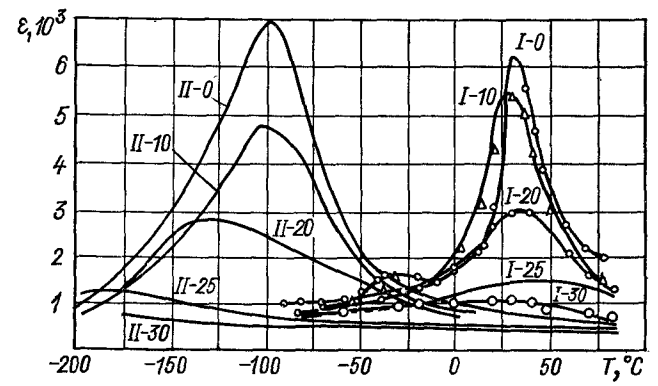


Рис. 20.16. Зависимость диэлектрической проницаемости тройных растворов $BaTiO_3$ — $SrTiO_3$ — $CaTiO_3$ от температуры [4]:

I — отношение $BaTiO_3$: $SrTiO_3$ 3 : 1; *II* — отношение $BaTiO_3$: $SrTiO_3$ 1 : 1. Числа у кривых — массовое содержание $CaTiO_3$, % [10].

20.5. ПЬЕЗОЭЛЕКТРИКИ

Существуют *прямой и обратный* пьезоэлектрические эффекты.

Прямым пьезоэлектрическим эффектом называют эффект образования электростатических зарядов на поверхности диэлектрика и электрическую поляризацию внутри него, которые происходят в результате механического напряжения. В линейном приближении зависимость поляризованности P_i от однородного механического напряжения $T(K)$ может быть представлена в виде

$$P_i = d_{ik} T(k),$$

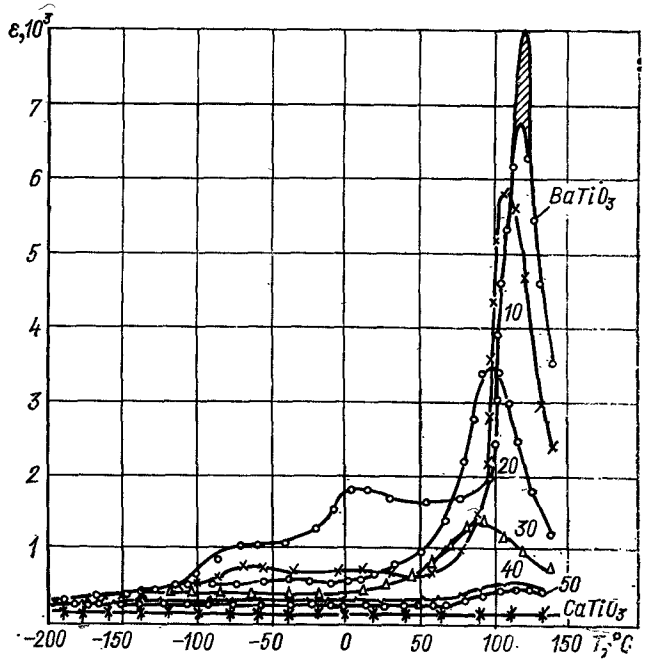


Рис. 20.15. Зависимость диэлектрической проницаемости растворов $BaTiO_3$ — $CaTiO_3$ от температуры [4]. Числа — содержание $CaTiO_3$, %.

где d_{ik} — коэффициенты пропорциональности, называемые *пьезоэлектрическими модулями*.

Обратный пьезоэлектрический эффект заключается в возникновении механического напряжения в кристалле под действием приложенного к нему электрического поля.

Ниже описаны свойства пьезоэлектрических моно- и поликристаллов, широко применяемых в технике.

Моноокристаллы. Кристаллический кварц является широко распространенным в природе минералом; при температуре ниже 573° С (температура $\alpha \rightleftarrows \beta$-превращения и фазового перехода второго рода) он кристаллизуется в тригональнотрапецеэдрическом классе гексагональной системы и встречается в природе в двух модификациях: *правой* и *левой* (рис. 20.17)

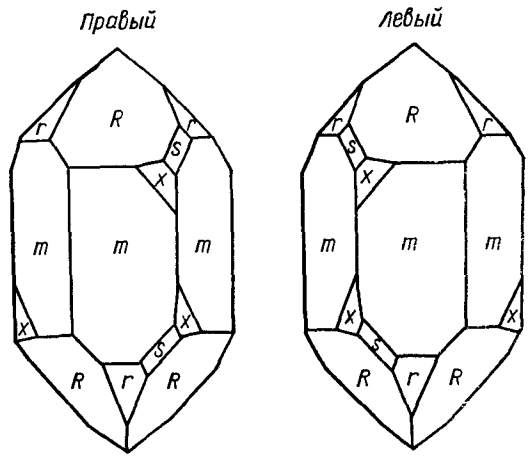


Рис. 20.17. Идеальные формы кристаллов кварца [12].

В настоящее время наряду с природными используются искусственные кристаллы кварца.

Пьезоэлектрические постоянные кварца. По условиям симметрии кристалл α-кварца имеет три независимых пьезоэлектрических модуля: $d_{11} = 6{,}94 \cdot 10^{-8}$; $d_{12} = -6{,}94 \cdot 10^{-8}$ и $d_{14} = -2{,}18 \cdot 10^{-8}$ ед. СГСЭ [14].

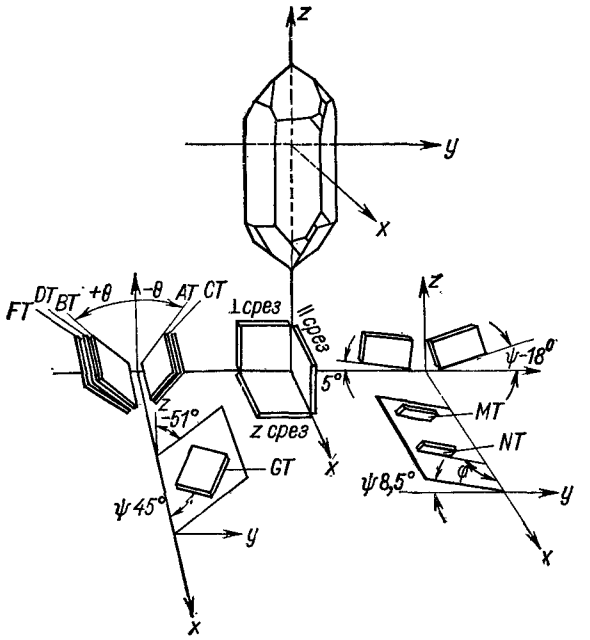


Рис. 20.18. Орнентация типовых срезов относнтельно осей кристалла кварца [12].

Первые два модуля соответствуют деформацин растяжения — сжатия вдоль осей X и Y (рис. 20.18); третий (d_{14}) характеризует пьезоэлектрический эффект при деформации сдвига в плоскостях Z_y и Z_x, а также при скручивающих усилиях. Зависимость пьезоэлектрических модулей d_{11} и d_{14} от температуры см. на рис. 20.19.

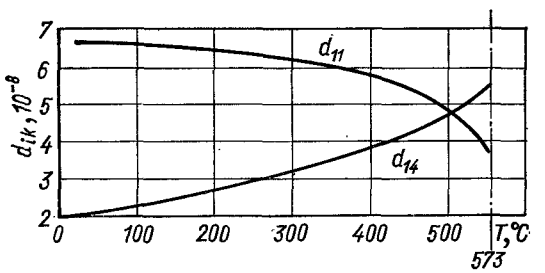


Рис. 20.19. Зависимость пьезоэлектрических модулей d_{11} и d_{14} для α-кварца от температуры (адиабатические значения) [12].

Упругие постоянные кварца. Для малых деформаций и напряжений с достаточной точностью выполняется обобщенный закон Гука, устанавливающий линейную зависимость между деформациями и напряжениями:

$$r_{ij} = s_{ijkl}\, t_{kl}; \quad i, j, k = 1, 2, 3,$$

где r_{ij} — компоненты тензора деформации; t_{kl} — компоненты тензора напряжения; s_{ijkl} — компоненты тензора гибкости.

В свою очередь, напряжения могут быть выражены через деформации:

$$t_{ij} = c_{ijkl}\, r_{kl}; \quad i, j, k, l = 1, 2, 3.$$

где c_{ijkl} — тензор упругости.

Упругие свойства α-кварца описываются семью независимыми компонентами тензора гибкости и семью компонентами (модулями) тензора упругости.

Пьезоэлектрические свойства кварца широко используются в технике для стабилизации и фильтрации радиочастот, генерирования ультразвуковых колебаний и для измерения механических величин.

Пьезоэлектрические резонаторы вырезают из кристалла кварца параллельно или перпендикулярно кристаллографическим осям, а также под определенными углами к ним (см. рис. 20.18). Для получения необходимых электрических характеристик и малого температурного коэффициента резонансной частоты требуется высокая точность ориентации относительно кристаллографических осей.

Таблица 20.11

Динамическнй (адиабатический) модуль упругости c_{ij} (20°С) и константа гибкости s_{ij} α-кварца [13]

c_{ij}, 10^{11} *дин/см²*	s_{ij}, 10^{-12} *см²/дин*	c_{ij}, 10^{11} *дин/см²*	s_{ij}, 10^{-12} *см²/дин*
$c_{11} = 8{,}674$	$s_{11} = 1{,}277$	$c_{13} = 1{,}191$	$s_{13} = -0{,}122$
$c_{33} = 10{,}72$	$s_{33} = 0{,}966$	$c_{14} = -1{,}791$	$s_{14} = 0{,}450$
$c_{44} = 5{,}794$	$s_{44} = 2{,}004$	$c_{66} = 3{,}988$	$s_{66} = 2{,}912$
$c_{12} = 0{,}699$	$s_{12} = -0{,}179$		

Диэлектрические постоянные кварца. Диэлектрические постоянные кварца описываются двумя главными значениями ε — вдоль оптической оси (ε_3) и перпендикулярно к ней (ε_1): $\varepsilon_3 = 4{,}65$; $\varepsilon_1 = 4{,}55$ [14] (рис. 20.20).

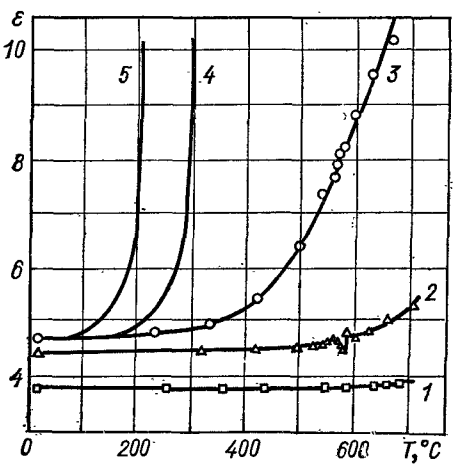


Рис. 20.20. Зависимость диэлектрической проницаемости кристаллического и плавленого кварца от температуры:

1 — для плавленого кварца; *2*, *3* — ε_{11} и ε_{33} монокристаллов соответственно; *4*, *5* — кривые, полученные Стюартом [15] для ε_{33} на частотах 90 и 1 *кгц* соответственно [16].

Типовые срезы кварцевых резонаторов [12]

Срез	Углы ориентации, *град*			Частотный коэффициент, *кгц·мм*	Диапазон частот (*Мгц*) и область применения
	φ	θ	ψ		
X	90	0	0	2870	Генераторы ультразвуковых частот
Y	0	0	0	1954	
BT	0	49°*	0	2580	3—12
AT	0	−35°15′2*	0	1700	0,25—3[3]*
CT	0	−38°36′	0	3080	0,1—0,4
T	0	+52	0	2060	0,07—0,5
T	0	51°07′	±45	3292	0,1—0,5
MT	90	±34	+8°30′	2700	0,05—0,2
T	90	±38	+8°30′	283[4]*	0,004—0,05 } Фильтры и генераторы
0°	90	0	0	2720	0,05—0,15
+5°	90	0	+5	2815	
−18°30′	90	0	−18°30′	2554	0,05—0,5 — фильтры

* В зависимости от технических требований угол θ берется от +48 до +50°.
2* В указанном диапазоне частот угол θ варьирует от 34°30′ до 35°30′.
3* При использовании гармоник срез — 35° употребляется до 40 *Мгц* и более.
4* Частотный коэффициент зависит от отношения ширины пластины к ее длине.

Сегнетова соль. Сегнетова соль является двойной натриево-калиевой солью виннокаменной кислоты с четырьмя молекулами кристаллизационной воды: $NaKC_4H_4O_6 \cdot 4H_2O$.

Сегнетова соль кристаллизуется в ромботетраэдрическом классе ромбической системы. Теоретически возможно существование правых и левых кристаллов сегнетовой соли; однако получаемые из отходов виноделия кристаллы сегнетовой соли бывают только правыми (рис.20.21).

Сегнетова соль имеет следующие физические свойства [12]: молекулярная масса 282 *г*; плотность 1,77 *г/см*^{3}; верхняя точка Кюри +22,5° С; нижняя точка Кюри — −15° С.

По условиям симметрии сегнетова соль имеет три независимых пьезоэлектрических модуля: $d_{14} = 2{,}4 \times \times 10^{-5}$ ед. СГСЭ; $d_{25} = 1{,}6 \cdot 10^{-6}$ ед. СГСЭ; $d_{36} = 3{,}5 \times \times 10^{-7}$ ед. СГСЭ.

Зависимость пьезоэлектрических модулей d_{14}, d_{25} и d_{36} сегнетовой соли от температуры представлена на рис. 20.22.

Наибольшее распространение имеют резонаторы 45°-го *X*-среза (рис. 20.21); они используются для получения продольных колебаний.

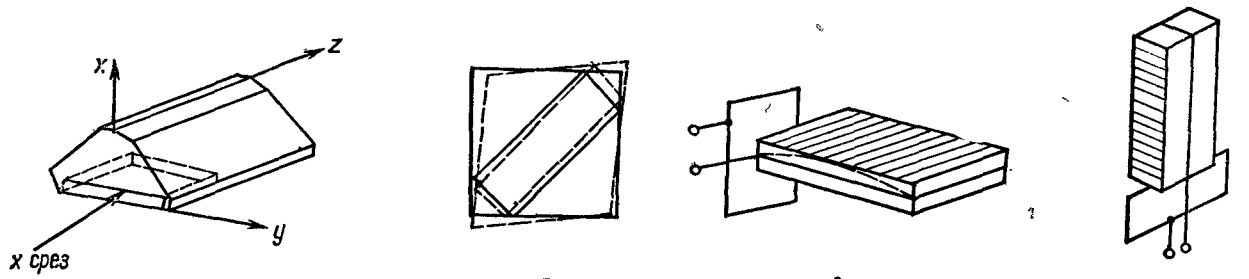


Рис. 20.21. Кристалл сегнетовой соли и различные виды пьезоэлементов [12].

Для использования в звуковоспроизводящей аппаратуре пластинки 45°-го X-среза склеивают вместе для образования биморфного элемента (рис. 20.21,*в*). В звукоснимателях используются также биморфные элементы из двух тонких пластинок X-среза, работающие в режиме крутильных колебаний (рис. 20.21,*г*).

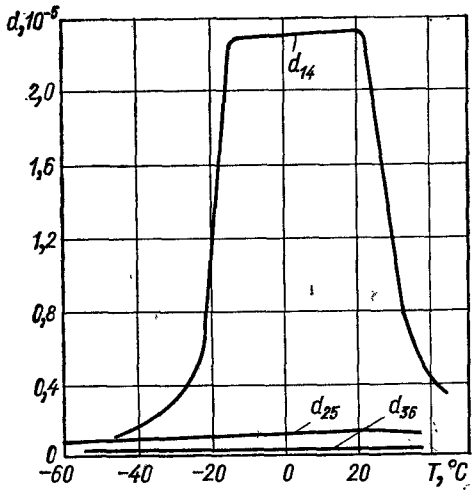


Рис. 20.22. Зависимость пьезоэлектрических модулей d_{14}, d_{25} и d_{36} сегнетовой соли от температуры [12].

Дигидрофосфат аммония. Дигидрофосфат аммония $NH_4H_2PO_4$ кристаллизуется в тетрагональной системе. Кристаллы его представляют собой комбинацию тетрагональной дипирамиды и призмы (см. рис. 20.23).

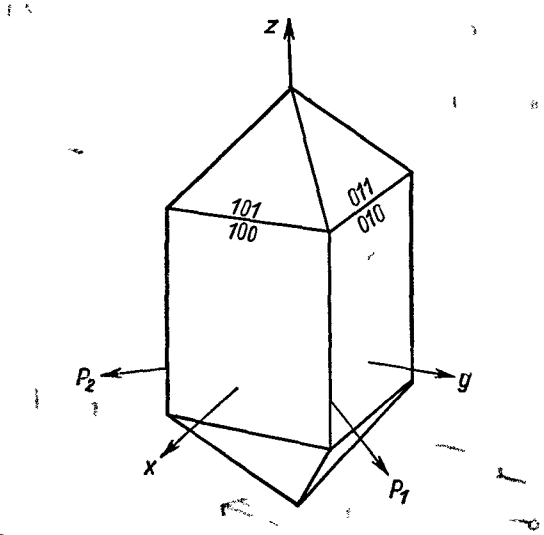


Рис. 20.23. Кристалл дигидрофосфата аммония [12]

Дигидрофосфат аммоиия характеризуется следующими свойствами [12]: точка плавления 190° С; плотность 2,311 *г/см*; точка Кюри — 135,3° С; пьезоэлектрический модуль $d_{36} = 1{,}48 \cdot 10^{-6}$ ед. СГСЭ; пьезоэлектрический модуль $d_{14} = 5 \cdot 10^{-8}$ ед. СГСЭ.

Температурная зависимость пьезоэлектрического модуля d_{36} дигидрофосфата аммония приведена на рис. 20.24.

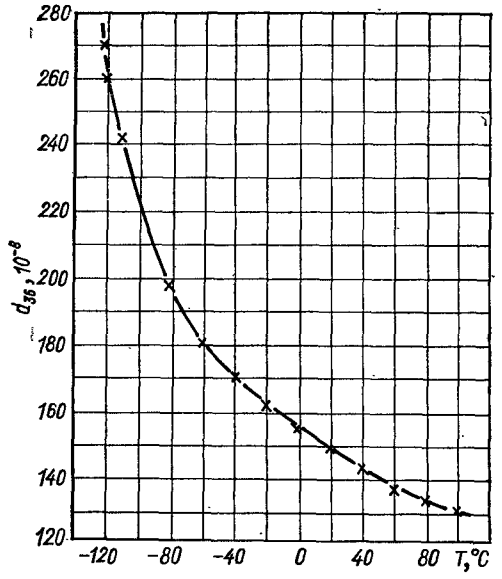


Рис. 20.24. Зависимость пьезоэлектрического модуля d_{36} дигидрофосфата аммония от температуры [12].

Кристаллы дигидрофосфата аммония получаются и обрабатываются так же, как и кристаллы сегнетовой соли. Наиболее широко применяются срезы, перпендикулярные к оси Z.

Виннокислый калий. Виннокислый калий (условное обозначение ВК) кристаллизуется в моноклинной системе (рис. 20.25). Единственным элементом симметрии

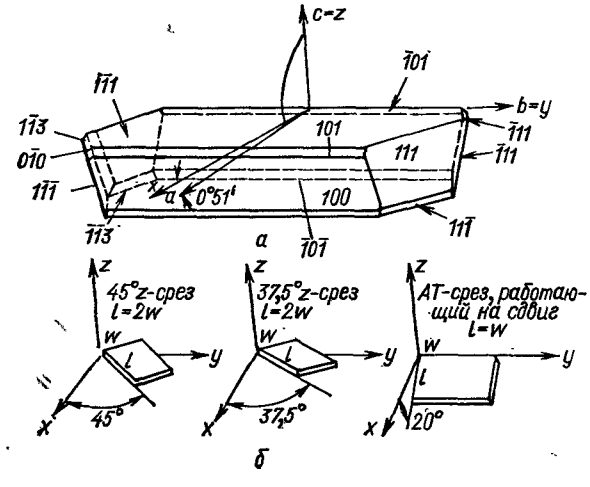


Рис. 20.25. Кристалл виннокислого калия:
а — форма; *б* — срезы с нулевым температурным коэффициентом частоты [12].

Таблица 20.13

Физические свойства виннокислого калия [12]

Пьезоэлектрические модули, 10^{-8} ед. СГСЭ	Модуль упругости 10^{-12} $см^2/дин$	Диэлектрические постоянные	Коэффициенты линейного расширения, 10^{-6} $град^{-1}$
$d_{14} = -25,0$	$s_{11} = +2,24$	$\varepsilon_{11} = 6,44$	$\alpha_{11} = +12,0$
$d_{16} = +6,5$	$s_{12} = -0,08$	$\varepsilon_{22} = 5,80$	$\alpha_{22} = +44,8$
$d_{21} = -2,2$	$s_{13} = -1,64$	$\varepsilon_{33} = 6,49$	$\alpha_{33} = +32,0$
$d_{22} = +8,5$	$s_{15} = -0,64$	—	$\alpha_{13} = -12,0$
$d_{23} = -10,4$	$s_{22} = +3,37$	—	—
$d_{25} = -22,5$	$s_{23} = -1.05$	—	—
$d_{34} = +29,4$	$s_{25} = -0,57$	—	—
$d_{36} = -66,0$	$s_{33} = +3,86$	—	—
—	$s_{35} = +0,90$	—	—
—	$s_{44} = +11,9$	—	—
—	$s_{46} = +0.57$	—	—
—	$s_{55} = +8,15$	—	—
—	$s_{66} = +10,41$	—	—

кристалла виннокислого калия является ось двойной симметрии b. Как следствие этого, кристалл его имеет четыре значения диэлектрической проницаемости, восемь пьезоэлектрических модулей и 13 модулей упругостн.

Низкая симметрии кристаллов виннокислого калня создает широкую возможность (из-за большого числа упругих постоянных) получения срезов с низким температурным коэффициентом частоты (см. рис. 20.25).

Этилен-диамин-тартрат. Кристаллы этилен-диаминовой соли винной кислоты (условиое обозначение ЭДВ) кристаллизуются в моноклинной системе (рис. 20.26,*а*). Химический состав этилен-диамин-тартрата $C_6H_{14}N_2O_6$. Кристалл этилен-диамин-тартрата имеет восемь независимых пьезоэлектрических модулей. Значения двух из них равны соответственно $d_{21} = 3,4 \times \times 10^{-7}$ ед. СГСЭ $d_{23} = -3,1 \cdot 10^{-7}$ ед. СГСЭ [12].

Наиболее употребительные срезы резонаторов с малым температурным коэффициентом резонансной частоты показаны на рис. 20.26.б.

Пьезоэлектрическая керамика. Пьезоэлектрические и другие свойства пьезокерамики титаната бария и его пронзводных приведены в табл. 20.14. Зависимость пьезоэлектрического модуля d_{31} и диэлектрической проницаемости ε от температуры керамики $(Ba_{0,8}Ca_{0,08}Pb_{0,12})\ TiO_3$ показана на рис. 20.27.

Обозначения основных величии, приятые ниже, следующне: ρ — плотность (объемная масса) Eю — модуль упругости (модуль Юнга); ε — диэлектрическая проницаемость; tg δ — тангенс угла диэлектрических потерь; Q — добротность; f — частота; $\Delta f/f_0$ — уход резонансной частоты в указанном интервале температур; $c_{зв}$ — скорость звука; d — пьезоэлектрический модуль; d_{33} — пьезоэлектрический модуль продольных колебаний; d_{31} — пьезоэлектрический модуль радиальных колебаний; d/ε, $d/\sqrt{\varepsilon}$ — характеристика эффективности в режиме приема; dEютgδ, dEю/εtgδ — характеристики эффективности в режиме излучения; $\sigma_и$ — предел прочности на изгиб; $\sigma_с$ — предел прочиости на сжатие; $\sigma_р$ — предел прочности на растяжение; K — коэффициент электромеханической связи; θ — точка Кюри; ТКЧ — температурный коэффициент резонансиой частоты.

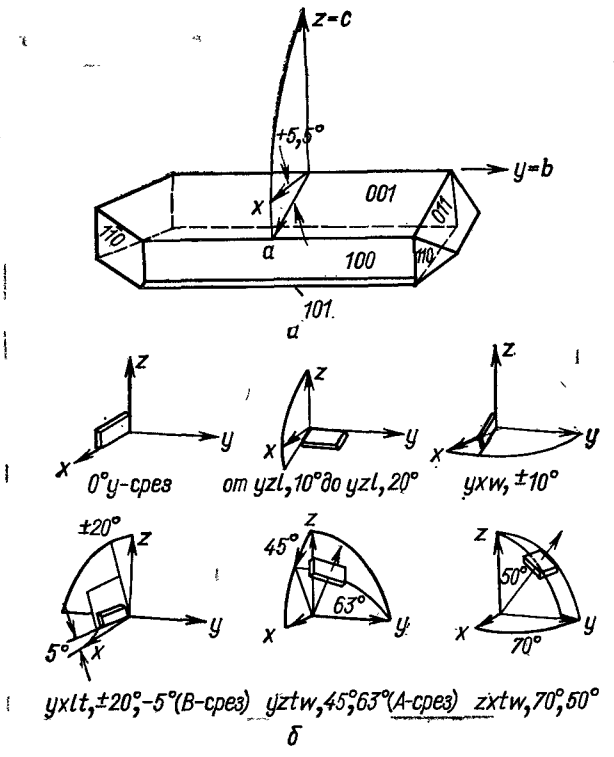


Рис. 20.26. Кристалл этилен-диамин-тартрата:
а — идеальная форма; *б* — срезы с нулевым температурным коэффициентом резонансной частоты [12].

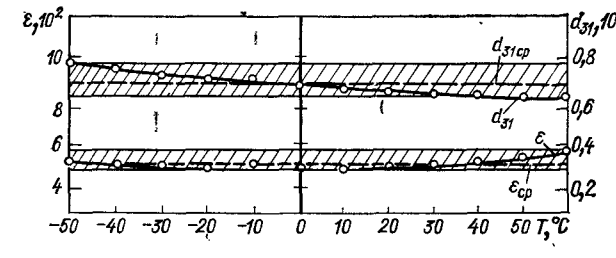


Рис. 20.27. Зависимость пьезоэлектрического модуля d_{31} и днэлектрической проиицаемости ε от температуры керамики $(Ba_{0,8}Ca_{0,08}Pb_{0,12})\ TiO_3$ [17].

Цирконат-титанат свиица (ЦТС) и его производные. К числу наиболее эффективных керамических сегнетоэлектриков относятся пьезокерамические материалы системы ЦТС, представляющие собой твердые растворы цирконата свиица $PbZrO_3$ и титаната свинца $PbTiO_3$ с малыми добавками некоторых трех- и пятивалентных элементов и частичным замещением свинца стронцием.

Пьезоэлектрические и другие свойства материалов ЦТС приведены в табл. 20.15.

Таблица 20.14

Свойства пьезокерамики титаната бария и его производных [17, 18]

Величина	$BaTiO_3$	$(BaCa)TiO_3$ (содержание $CaTiO_3$ 5—7%)	$(Ba_{0,8}Ca_{0,08}Pb_{0,12})\times$ $\times TiO_3$	$(BaCa)TiO_3$ + Co
ρ, *г/см³*	5,3—5,8	5,1—5,75	4,8—5,4	5,4
$E_{Ю}$, 10^{12} *дин/см²*	1,0—1,1	1,08—1,16	1,0—1,22	1,07—1,2
ε	1100—1800	670—1200	300—600	1000—1200
tg δ	$3\cdot10^{-3}$—$3\cdot10^{-2}$	$(1,0—1,5)\cdot10^{-2}$	$3\cdot10^{-3}$—$1\cdot10^{-2}$	$(1,0—1,5)\cdot10^{-2}$
Q	400	500	1200	—
$\Delta f/f_0$ (от 0 до 40°C), %	7	3,6	0,2	1,7
$\Delta f/f_0$ (от 0 до 40°C), %	8,5	12	1,2	5,8
$c_{зв}$, 10^5 *см/сек*	4,15—4,3	4,45	4,8—5,3	4,46—4,5
d_{33}, 10^{-6} *см/в*	2,5—6,0	1,6—2,1	1,4—2,5	3,5
d_{13}, 10^{-6} *см/в*	1,3—2,5	0,95—1,74	0,4—1,5	1,1—1,35
d_{33}/ε, 10^{-9} *см/в*	2,27—3,33	1,75—2,4	4,2—4,7	2,9—3,5
d_{31}/ε, 10^{-9} *см/в*	1,18—1,39	1,41—1,45	1,33—2,5	1,1
$d_{33}/\sqrt{\varepsilon}$, 10^{-7} *см/в*	0,75—1,41	0,61	0,81—1,02	1,1
$d_{31}/\sqrt{\varepsilon}$, 10^{-7} *см/в*	0,39—0,59	0,36—0,5	0,23—0,61	0,35—0,39
$(d_{33}E_{Ю})^2$, 10^{12} *дин/см²*	6,25—43,4	1,02—4,1	1,96—9,3	14—17,6
$(d_{31}E_{Ю})^2$, 10^{12} *дин/см²*	1,69—7,5	2,95—5,8	0,16—2,5	1,4—2,5
$d_{33}^2E_{Ю}/\varepsilon$tg δ	0,79—1,9	0,28—0,43	1,27—2,2	0,8—1,3
$d_{31}E_{Ю}/\varepsilon$tg δ	0,13—0,51	0,14—0,19	0,18—0,46	0,12—0,13
σ_u, 10^3 *г/см²*	600—800	550	—	750
σ_c, 10^3 *г/см²*	3000—4500	3500	3000—5500	3300
σ_p, 10^3 *г/см²*	250	300	—	325
K	0,18—0,37	0,325	0,17—0,25	—
ТКЧ, 10^{-6} *град*$^{-1}$	—	—	37—86	—

Таблица 20.15

Свойства материалов ЦТС [17, 18]

A — $Pb_{0,95}Sr_{0,05}(Zr_{0,53}, Ti_{0,47})O_3+1\%Ta_2O_5$;

B — $Pb_{0,95}Sr_{0,05}(Zr_{0,53}Ti_{0,47})O_3 + 1\%Nb_2O_5$

Величина	A	B
ρ, *г/см³*	7,3	7,3
$E_{Ю}$, 10^{12} *дин/см²*	0,62	0.72
ε	1100	1760
tg δ	$2\cdot10^{-2}$	$2,2\cdot10^{-2}$
Q	70	70
$\Delta f/f_0$ (от 0 до + 40°C), %	0,24	0,44
$\Delta f/f_0$ (от 0 до — 40°C), %	0,24	0,44
$c_{зв}$, 10^5 *см/сек*	3,5—4,0	3,5—4,0
d_{33}, 10^{-6} *см/в*	8,5	10,9
d_{31}, 10^{-6} *см/в*	3,7	4,7
d_{33}/ε, 10^{-9} *см/в*	7,7	6,2
d_{31}/ε, 10^{-9} *см/в*	1,23	2,67
$d_{33}/\sqrt{\varepsilon}$, 10^{-7} *см/в*	2,56	2,6
$d_{31}/\sqrt{\varepsilon}$, 10^{-7} *см/в*	1,12	1,12
$(d_{33}E_{Ю})^2$, 10^{12} *дин/см²*	27,5	61,5
$(d_{31}E_{Ю})^2$, 10^{12} *дин/см²*	5,2	11,5
$d_{33}^2E_{Ю}/\varepsilon$ tg δ	2,04	2,2
$d_{31}^2E_{Ю}/\varepsilon$ tg δ	0,38	0,41
K	0,45	0,42
ТКЧ, 10^{-6}	60	101
θ, °C	330	305

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Жданов Г. С.** Физика твердого тела. М., Изд-во МГУ, 1962.
2. **Франц В.** Пробой диэлектриков. Пер. с англ. М. Изд-во иностр. лит., 1961.
3. **Беркс Дж. Б., Шулман Дж. Г.** Прогресс в области диэлектриков. Т. 1, 2. Пер. с англ. М., Госэнергоиздат, 1963.
4. **Справочник** по электротехническим материалам. Электроизоляционные материалы. Ч. 1. М.—Л., Госэнергоиздат, 1958.
5. **Кииджери В. Д.** Измерения при высоких температурах. Пер. с англ. М., Металлургиздат, 1963.
6. **Любимов М. Л.** Спаи металла со стеклом. М., «Энергии», 1968.
7. **Грибовский П. О., Терентьева Г. И.** Миниатюрные керамические конденсаторы. М.—Л., «Энергия», 1966.
8. **Техника** высоких температур. Пер. с англ. М., Изд-во иностр. лит., 1959.
9. **Корицкий Ю. В.** Электротехнические материалы. М., «Энергия», 1968.
10. **Справочник** по электротехническим материалам. Т. 2. М.—Л., Госэнергоиздат, 1960.
11. **Иона Ф., Ширане Д.** Сегнетоэлектрические кристаллы. Пер. с англ. М., «Мир», 1965.
12. **Справочник** по электротехническим материалам. Под общ. ред. К. А. Аидрианова, Н. П. Богородицкого, Ю. В. Корицкого, В. В. Пасынкова и Б. М. Тареева. Т. II. М.—Л., Госэнергоиздат, 1960.
13. **Bechman R.** "Phys. Rev.", 1958, v. 110, p. 1060.
14. **Смагин А. Г., Ярославский М. И.** Пьезоэлектричество кварца и кварцевые резонаторы. М., «Энергия», 1970.
15. **Stuart M. R.** "J. Appl. Phys.", 1955, v. 26, N 12, p. 1399.
16. **Зубов В. Г., Фирсова М. М., Молокова Т. М.** «Кристаллографии», 1973, т. 8, с. 112.
17. **Глозман И. А.** Пьезокерамика. М., «Энергия», 1967.
18. **Глозман И. А.** Пьезокерамические материалы в электроиной технике. М.—Л., «Энергия», 1965.

19. **Богородицкий Н. П., Пасынков В. В., Тареев Б. М.** Электротехнические материалы. М., Госэнергоиздат, 1961.
20. **Справочник** по электротехническим материалам. Под ред. Ю. В. Корицкого, В. В. Пасынкова, Б. М. Тареева. Т. 1. М., «Энергия», 1974.
21. **Эспе В.** Технология электровакуумных материалов. Пер. с нем. Т. 2. М., «Энергия», 1968.

ГЛАВА 21

ЭЛЕКТРИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА ПОЛУПРОВОДНИКОВ

21.1. ВВЕДЕНИЕ

Вещества, в которых при $T = 0°K$ верхняя из заполненных 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 $T > 0°K$.

Обычно к полупроводникам относят вещества с удельным сопротивлением $\rho \leqslant 10^{10}$ *ом·см* (при $T = 290°K$). Поскольку в металлах $\rho = 10^{-6} \div 10^{-4}$ *ом×см* то удельное сопротивление полупроводников находится в интервале $10^{-3} \leqslant \rho \leqslant 10^{10}$ *ом·см*.

Для веществ этого класса характерны рост проводимости 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 E_g представляет собой энергетический зазор между абсолютным максимумом валентной зоны и абсолютным минимумом зоны проводимости*.

Определяется она по изменению сопротивления с ростом температуры или оптическими методами (край полосы поглощения, длинноволновая граница фотопроводимости). Значение E_g зависит от температуры и давления; эта зависимость определяется коэффициентами $\alpha_T = dE_g/dT$ и $\alpha_P = dE_g/dP$ (коэффициенты изменения ширины запрещенной зоны с изменением температуры и давления соответственно).

Эффект Холла. В полупроводнике, помещенном в магнитное поле, перпендикулярное протекающему по нему току, возникает электрическое поле, направленное перпендикулярно току и магнитному полю. Это так называемый *эффект Холла*, описываемый соотношением

$$E_H = Rj H,$$

где E_H — напряженность холловского электрического поля; j — плотность тока; H — напряженность магнитного поля; R — постоянная Холла. В случае носителей одного сорта (с концентрацией n)для изотропной зоны

$$R = \pm r/ne, \quad 1 \leqslant r < 2.$$

Здесь R измеряется в $см^3/к$, n — в $см^{-3}$, $e = 1{,}6 \cdot 10^{-19}$ $к$; r — числовой множитель (так называемый холл-фактор), значение которого определяется механизмом релаксации импульса носителей. Знак R связан со знаком заряда носителей ($R < 0$ в образцах n-типа, $R > 0$ в образцах p-типа).

При наличии двух сортов носителей (например, электронов и дырок) R зависит от напряженности магнитного поля:

$$R = \frac{R_n \sigma_n^2 \left(1 + \sigma_p^2 H^2 R_p^2\right) + R_p \sigma_p^2 \left(1 + \sigma_n^2 H^2 R_n^2\right)}{(\sigma_n + \sigma_p)^2 + \sigma_n \sigma_p (R_n + R_p) H^2}.$$

Здесь $\sigma_n = ne\mu_n$, $\sigma_p = pe\mu_p$, $R_n = -1/ne$, $R_p = 1/pe$. При $H \to \infty$ $R \to 1/e(p - n)$, если $p \neq n$, и $R = (1/ne)[(\mu_p - \mu_n)/(\mu_p + \mu_n)]$, если $p = n = n_i$.

Подвижность носителей и проводимость. Дрейфовая подвижность $\mu = v_{др}/E$, где $v_{др}$ — дрейфовая скорость носителя, E — электрическое поле. Дрейфовая подвижность носителей определяется прямыми опытами по измерению времени распространения инжектируемого импульса неосновных носителей в образце.

Удельная проводимость σ связана с дрейфовыми подвижностями μ_n и μ_p и концентрациями электронов n и дырок p соотношением

$$\sigma = e(n\mu_n + p\mu_p).$$

Измерение эффекта Холла позволяет определить холловскую подвижность $\mu_H = |R\sigma|$, связанную с дрейфовой подвижностью соотношением $\mu_H = \mu \cdot r$.

Время жизни носителей. Время жизни τ — время, характеризующее экспоненциальный спад неравновесной концентрации носителей в результате их рекомбинации. Существуют следующие механизмы рекомбинации: излучательный (энергия рекомбинирующей пары электрон — дырка излучается в виде фотона), фононный (энергия пары 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 τ_R дает верхний предел τ.

Поверхностная рекомбинация. Помимо рекомбинации в объеме носители могут рекомбинировать на поверхности полупроводника. Скорость поверхностной рекомбинации s определяется как скорость потока частиц из объема к поверхности, необходимого для поддержания на ней избыточного числа неравновесных носителей. Значение s сильно зависит от способа обработки поверхности. Так, для Ge при травлении поверхности в кипящей H_2O_2 $s \sim 10$ *см/сек*, а при шлифовке $s \sim 10^6$ *см/сек* и более. Обычно $s \sim 10^2 \div 10^3$ *см/сек*.

Длина диффузии. Длина диффузии L_D — расстояние, характеризующее пространственный спад неравновесной концентрации носителей до равновесного значения. Значение L_D определяется соотношением $L_D = \sqrt{D\tau}$, где D — коэффициент диффузии, τ — время жизни. Коэффициент диффузии и подвижность связаны соотношением Эйнштейна $D = \frac{kT}{e}\mu$ (в невырожденном полупроводнике). Максимальная длина диффузии

*Это определение не относится к материалам с инвертированной зонной структурой типа HgTe (см., например, работу [84]).

Таблица 21.1

Время рекомбинации τ и время излучательной рекомбинации τ_R для некоторых полупроводников [162]. Концентрация носителей близка к собственной, T=300 °K.

Элемент	Si	Ge	InSb	InAs	PbS	PbSe	PbTe
τ_R, *сек*	3	0.3	$3\cdot10^{-7}$	10^{-5}	10^{-5}	$3\cdot10^{-6}$	$2\cdot10^{-6}$
τ, *сек*	$2\cdot10^{-3}$	$3\cdot10^{-3}$	$3\cdot10^{-7}$	10^{-7}	10^{-5}	—	—

характеризует степень совершенства и чистоты кристалла. При $T \approx 300$°K $L_D \sim 0{,}5$ *см* в Ge, $L_D \sim 0{,}3$ *см* в Si и $L_D = 10^{-2} \div 10^{-3}$ *см* в InSb [162].

Структура зон и эффективные массы. Эффективная масса носителя m^* характеризует его движение в кристаллической решетке. Обратная эффективная масса $(m^*)^{-1}$ — тензорная величина, определяемая зависимостью энергии носителя E от его волнового вектора k:

$$\left(m^*_{ij}\right)^{-1} = \frac{1}{\hbar^2}\left[\frac{\partial^2 E(k)}{\partial k_i\, \partial k_j}\right].$$

Обычно достаточно знать вид E(k) лишь вблизи экстремальных точек — минимумов или максимумов энергии. Изоэнергетические поверхности вблизи экстремумов представляют часто в виде сфер (с эффективными массами, например, для нескольких подзон валентной зоны m_{p1}, m_{p2} и т. д.) или эллипсоидов (с эффективными массами для зоны проводимости $m_{n\parallel}$, $m_{n\perp 1}$, $m_{n\perp 2}$*).

Для анализа различных экспериментальных данных часто пользуются скалярной величиной эффективной массы плотности состояний (m_{dn} и m_{dp} для электронов и дырок соответственно), которая в случае эллипсоидальных изоэнергетических поверхностей находится из соотношения

$$m_d = N^{2/3}\left(m_\parallel\, m_{\perp 1}\, m_{\perp 2}\right)^{1/3},$$

где N — число экстремумов зоны.

В случае энергетических зон, имеющих вырожденные сферические поверхности постоянной энергии с эффективными массами m_{p1}, m_{p2} и т. д., эффективная масса плотности состояний определяется следующим образом:

$$m_{dp} = \left(m_{p1}^{3/2} + m_{p2}^{3/2} + \ldots\right)^{2/3}.$$

Вводится также понятие омической эффективной массы m_σ и циклотронной эффективной массы m_c, определяемых соотношениями:

$$\frac{1}{m_\sigma} = \frac{1}{3}\left(\frac{1}{m_\parallel} + \frac{1}{m_{\perp 1}} + \frac{1}{m_{\perp 2}}\right)$$

(эллипсоидальные изоэнергетические поверхности),

$$m_c = \frac{\hbar}{2\pi}\,\frac{\partial S}{\partial E}$$

(S — площадь сечения изоэнергетической поверхности плоскостью, нормальной к магнитному полю).

Общие выражения для масс m_d, m_σ, m_c см., например, в работе [84]

Прямым методом определения E(k) и эффективных масс является циклотронный резонанс. Ценные сведения о зонной структуре и эффективных массах дают измерения анизотропии магнетосопротивления, эффектов типа Шубникова — де Гааза и магнетооптических эффектов.

Собственная концентрация носителей. Собственная концентрация носителей n_i соответствует идеально чистому материалу и вычисляется, если известна структура зон и эффективные массы, по формуле

$$n_i = 4{,}82\cdot 10^{15}\, T^{3/2}\left(\frac{m_{dn}\, m_{dp}}{m_0^2}\right)^{3/4} \exp\left(\frac{E_g - \alpha_T\, T}{kT}\right).$$

Здесь m_{dn}, m_{dp} — эффективные массы плотности состояний электронов и дырок соответственно; m_0 — масса свободного электрона; k — постоянная Больцмана; α_T — коэффициент температурной зависимости ширины запрещенной зоны.

Обычно n_i определяют экспериментально по данным измерений эффекта Холла и проводимости в соответствующем интервале температур.

Температура Дебая. Температура Дебая T_D определяется через граничную частоту ω_m колебаний решетки с помощью соотношения

$$kT_D = \hbar\,\omega_m.$$

Различным ветвям колебаний соответствуют различные температуры Дебая. Значения T_D, определяемые из тепловых измерений, являются усредненными по различным (существенным при температуре измерений) ветвям колебаний. Более детальную информацию дают, например, измерения упругих констант.

Предельные частоты оптических фононов. Предельные частоты ω_l, ω_t оптических фононов — частоты соответствующих (продольных и поперечных) оптических колебаний решетки с длинами волн, значительно превышающими межатомное расстояние. Определяются из спектров поглощения и отражения инфракрасного излучения, а также с помощью нейтронной спектроскопии. В элементах (Si, Ge и др.) $\omega_l = \omega_t = \omega_0$.

Фактор спектроскопического расщепления. Фактор спектроскопического расщепления g определяется расщеплением энергетических уровней носителей в магнитном поле за счет их магнитного момента

$$E = \left(N + \frac{1}{2}\right)\hbar\omega_H \pm \frac{1}{2}\, g\hbar\omega_H, \quad N = 1, 2 \ldots,$$

где ω_H — циклотронная частота носителя в кристалле. Определяется из измерений осцилляционных эффектов в магнитном поле методом пара- и ядерного магнитного резонанса.

Диэлектрическая проницаемость. Значения диэлектрической проницаемости ε_0 и ε_∞ получают из статических и высокочастотных (или оптических) измерений соответственно.

Коэффициент термо-э. д. с. Коэффициент термо-э. д. с. — α-э. д. с., возникающая на концах образца при разности температур между горячим и холодным концами в 1°.

В таблицах приводятся значения определенных выше величин и, кроме того, значения плотности ρ, температуры плавления $T_{пл}$ и удельной теплопроводности $\varkappa$, а также энергии ионизации доноров E_D и акцепторов E_A.

Везде, где не отмечено специально, приводятся значения E_g при 0° К, а μ и $\varkappa$ — при 300° К.

В таблицы в основном включены данные о полупроводниках с $E_g < 3$ *эв*. Свойства тройных и более сложных полупроводниковых соединений не приведены*. Не приводятся также сведения о параметрах различных полупроводниковых приборов2*.

* Часто $m_{\perp 1} = m_{\perp 2}$, тогда употребляется обозначение $m_\perp$ (= $m_{\perp 1}$ = $m_{\perp 2}$).

* О свойствах некоторых классов тройных соединений см. работы [16, 121, 123, 145]

2* См. работу [43].

Таблица 21.2

Электрофизические свойства элемеитариых полупроводииков

Элемент	Кристаллическая структура: Тип	Кристаллическая структура: a b, c, Å	Литература	ρ, $\frac{г}{см^3}$	Литература	$T_{пл}$, °К	Литература	T_D, °К	Литература	$\varkappa$, $\frac{вт}{см \cdot град}$	Литература	ε_0	Литература	ε_∞	Литература
B	Тетрагональная C_{4V}^4	$a = 8{,}73$ $c = 5{,}03$	[1] [1]	2,33	[189]	2300	[9]	—	—	—	—	12	[28]	10,1*	[28]
C (алмаз)	Кубическая O_h^5	$a = 3{,}566$	[1]	3,51	[123]	4300	[123]	2240[2]*	[123]	5,5	[147]	—	—	5,7	[121]
P (черный)	Орторомбическая D_{2h}^{18}	$a = 3{,}31$ $b = 4{,}38$ $c = 10.5$	[1] [1] [1]	2,69	[9]	317	[242]	—	—	—	—	—	—	—	—
As (серый)	Тригональная D_{3d}^5	$a=3{,}75$ $c=10.52$	[1] [1]	5,73	[189]	1090[3]* 500	[109] [242]	224	[9]	—	—	—	—	—	—
Se	Тригональная D_3^4, D_3^6	$a=4{,}36$ $c=4{,}96$	[117] [117]	4,80	[117]	490	[117]	$\perp$ 200 $\parallel$ 500	[120]	0,029	[117]	—	—	$\perp$ 8[4]* $\parallel$ 13.5[4]*	[117]
α-Sn	Кубическая O_h^7	$a=6{,}46$	[1]	5,77	[121]	[505][5]* (β-Sn)	[121]	230	[121]	0,67	[121]	—	—	—	—
Sb	Тригональная D_{3d}^5	$a=4{,}49$ $c=11{,}25$	[1] [1]	6,70	[141]	903,5	[9]	204	[141]	0,4 (100°K)	[147]	—	—	—	—
Te	Тригональная D_3^4, D_3^6	$a=4{,}46$ $c=5{,}93$	[123] [123]	6,23	[123]	723	[123]	$\perp$ 140 $\parallel$ 290	[120] [120]	0,03	[147]	—	—	$\perp$ 23[4]* $\parallel$ 39[4]*	[28] [28]
I	Орторомбическая D_{2h}^{18}	$a=4{,}77$ $b=7{,}25$ $c=9{,}77$	[1] [1] [1]	4,94	[189]	387	[109]	—	—	—	—	10,3	[9]	—	—

* $\lambda = 1$ *мкм*.

[2]* $\hbar\omega_t = \hbar\omega_e = 0{,}165$ *эв* [123].

[3]* $p = 35{,}8$ *атм*.

[4]* $\lambda = 10$ *мкм*; $\perp$, $\parallel$ — перпендикулярно и параллельно оси c соответственно.

[5]* Переходит в β-Sn при $t = 285.2$ °C.

Элемент	E_g, эв	Литература	$\frac{dE_g}{dT} \cdot 10^{-4}$, $\frac{эв}{град}$	Литература	$\frac{dE_g}{dP} \cdot 10^{-6}$, $\frac{эв}{атм}$	Литература	m_n/m_0	Литература	m_p/m_0	Литература	μ_n, $\frac{см^2}{в \cdot сек}$	Литература	μ_p, $\frac{см^2}{в \cdot сек}$	Литература
B	1,16 ($T >$ 1000°K) 1,7	[113] [123]	—3,5	[11]	—	—	—	—	0,7	[242]	1	[11]	50	[16]
C(алмаз)	5,4	[28]	—1,2	[28]	$<10^{-6}$	[242]	—	—	2,35 2,1	[15] [123]	1800 ($\sim T^{-3/2}$)	[11]	1400 ($\sim T^{-3/2}$)	[123] [11]
P (черный)	0,33	[36]	2,3	[36]	—	—	—	—	—	—	220 ($\sim T^{-3/2}$)	[123] [36]	350 ($\sim T^{-3/2}$)	[123] [36]
As (серый)	1,2	[123]	—5	[36]	—	—	m_1=0,121 m_2=0,138 m_3=1,18	[254] [254] [254]	m_1=0,122 m_2= =0,0805 m_3=1,04	[254] [254] [254]	65	[123]	65	[123]
Se	2,85 2	[101] [84]	—9 —23,8	[123] [101]	—13	[123]	—	—	0,96	[123]	—	—	20 40—240	[11] [119]
α-Sn	0*	[171]	—0,5 0	[122] [123]	0	[123]	0,024[2]*	[122]	m_d=0,26	[122]	2500 ($\sim T^{-1,65}$) 10^5(78°K) 10^5 (4,2°K)	[11] [238]	2400 ($\sim T^{-2}$)	[11]
Sb	0,13	[123]	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
Te	0,32	[11]	—1,9[3]*	[11]	—13 —16 —20	[191] [123] [120]	$m_\perp$ = =0,037[4]* $m_\parallel$ = =0,059	[120] [120]	$m_\perp$ = =0,11[5]* $m_\parallel$ = =0,264 m_d=0,4	[120] [120] [37]	1700 ($\sim T^{-3/2}$)	[16]	1200 ($\sim T^{-3/2}$)	[16]
I	1,3	[28]	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—

* См. рис. 21.1.

[2]* В минимуме (111).

[3]* $\frac{dE_g}{dT}$, 10^{-4} эв/град: —1,8 (T=4°K); —0,4(100°K < T < 300°K); —0,9(300°K < T < 500°K) [120].

[4]* $g_\perp = 11{,}2$; $g_\parallel = 7{,}0$; $\perp$ и $\parallel$ — перпендикулярно и параллельно оси c соответственно [120].

[5]* Данные для верхней валентной зоны. В нижней валентной зоне $m_\parallel = 0{,}048 \cdot m_0$; $m_\perp = 0{,}25 m_0$; $\parallel$ и $\perp$ — параллельно и перпендикулярно оси c соответственно.

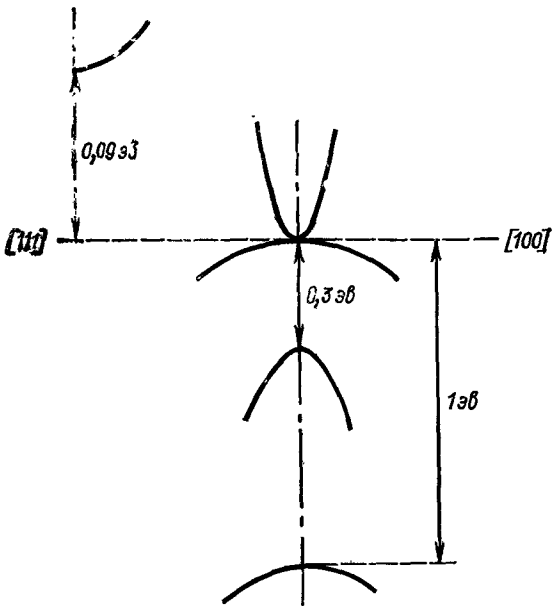


Рис. 21.1. Зонная структура α-Sn [171].

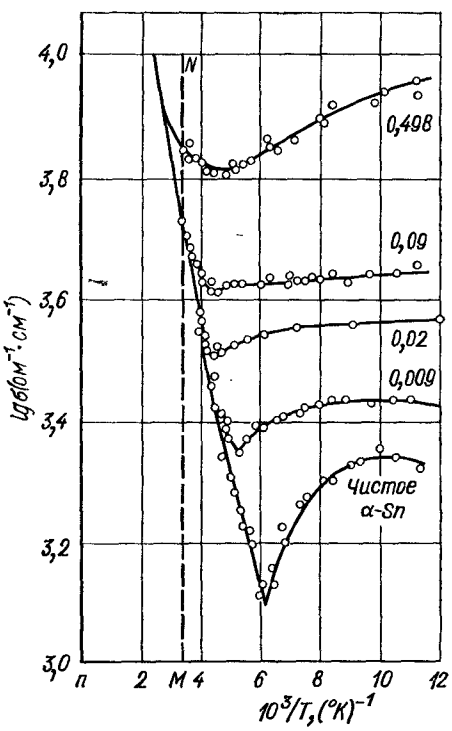


Рис. 21.2. Зависимость удельной проводимости σ для α-Sn, легированного алюминием, от температуры:

Числа у кривых — массовое содержание Al, %; *MN* — температура превращения α-Sn → β-Sn [16].

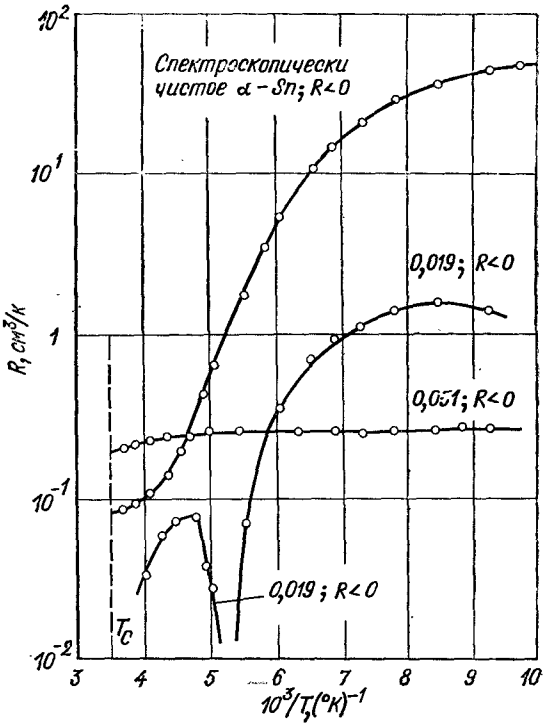


Рис. 21.3. Зависимость постоянной Холла *R* для α-Sn от температуры (числа у кривых — массовое содержание Al, %) [224].

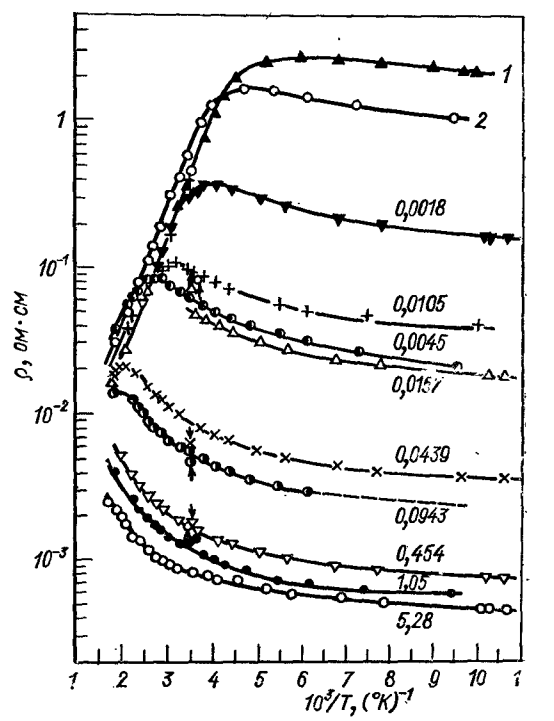


Рис. 21.4. Зависимость удельного сопротивления ρ в *p*-Te с примесью Sb от температуры [224]:

1 — тройная дистилляция; *2* — двойная дистилляция; числа у кривых — атомное содержание Sb, %.

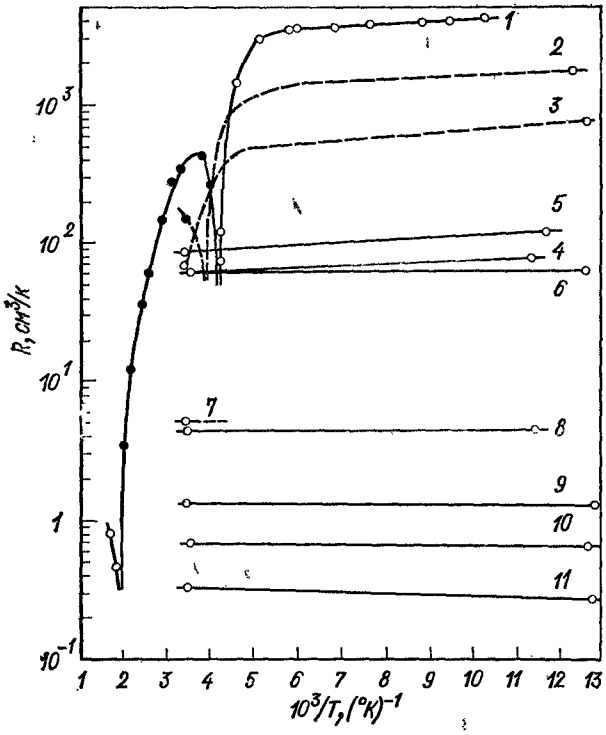


Рис. 21.5. Зависимость постоянной Холла R в Te [224] от температуры. Образцы те же, что и на рис. 21.4.

○ — положительный сигнал; ● — отрицательный
1 — тройная дистилляция; *2* — двойная осцилляция. Атомное содержание Sb, %: *3* — 0,0018; *4* — 0,0045; *5* — 0,0105; *6* — 0,0157; *7* — 0,0439; *8* — 0,0943; *9* — 0,454; *10* — 1,05; *11* — 5,28.

21.3. КРЕМНИЙ И ГЕРМАНИЙ

Кремний и германий — широко используемые и наиболее исследованные полупроводники. Кристаллизуются в решетке алмаза. Имеют сложную зонную структуру.

В Si шесть 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 восемь 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 спин-орбитальным взаимодействием.

Схемы энергетических зон Si и Ge (с использованными в таблицах обозначениями) представлены на рис. 21.6, 21.7.

Электрофизические свойства Si и Ge иллюстрируются рис. 21.8—21.32.

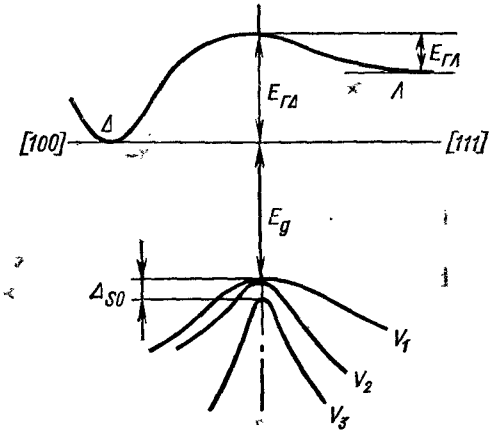


Рис. 21.6. Зонная структура Si [117].

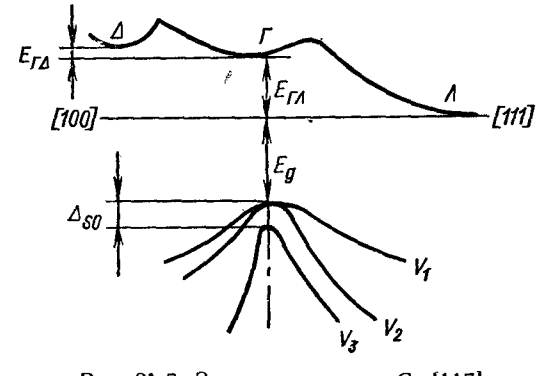


Рис. 21.7. Зонная структура Ge [117].

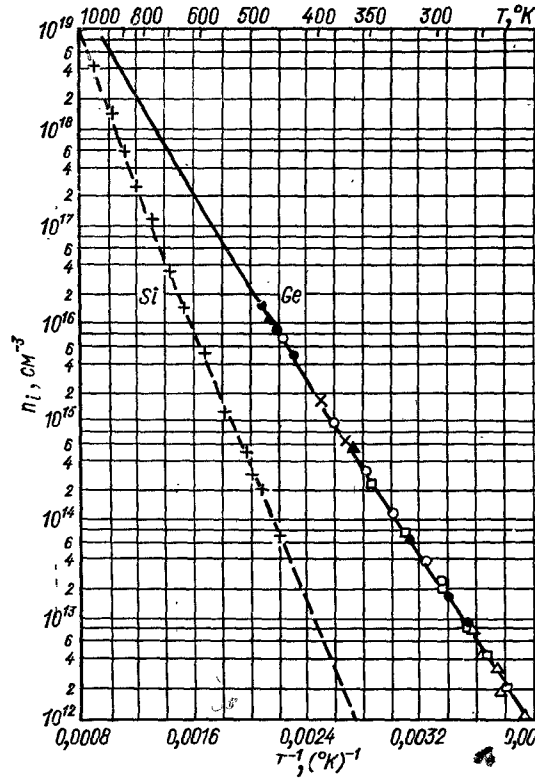


Рис. 21.8. Зависимость собственной концентрации n_i в Ge и Si от температуры [221].

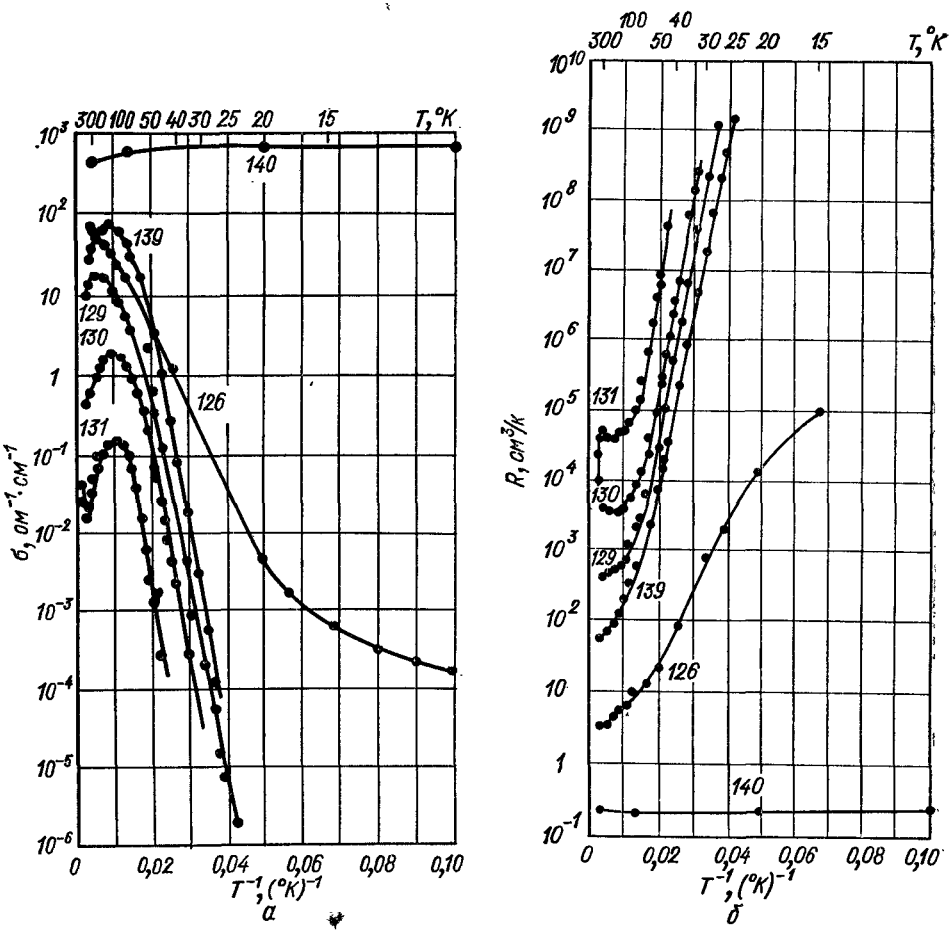
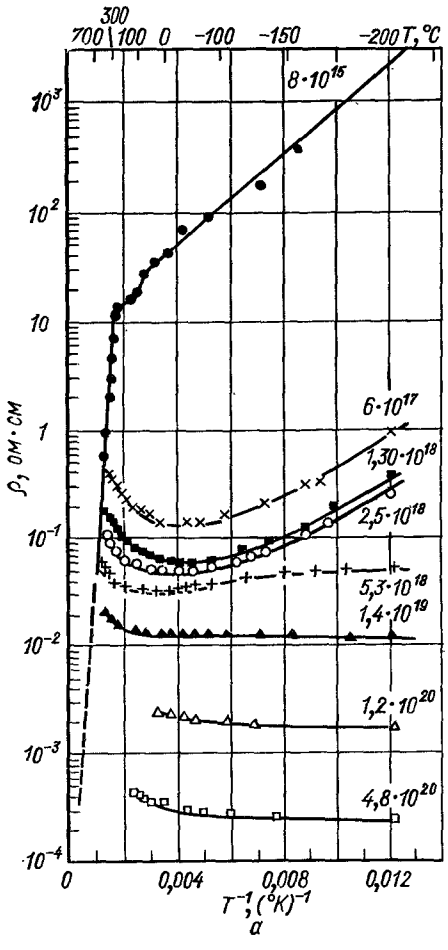


Рис. 21.9. Зависимость удельной проводимости σ n- Si с примесью As [117] (*а*) и постоянной Холла R в n-Si (*б*) от температуры:

№ образца	Концентрация As, $см^{-3}$	Концентрация акцепторов, $см^{-3}$	№ образца	Концентрация As, $см^{-3}$	Концентрация акцепторов, $см^{-3}$
126	$2{,}2 \cdot 10^{18}$	—	131	$2{,}75 \cdot 10^{14}$	$1 \cdot 10^{14}$
129	$2{,}2 \cdot 10^{16}$	$1{,}5 \cdot 10^{15}$	139	$1{,}3 \cdot 10^{17}$	$2{,}2 \cdot 10^{15}$
130	$2{,}6 \cdot 10^{15}$	$5 \cdot 10^{14}$	140	$2{,}7 \cdot 10^{19}$	—



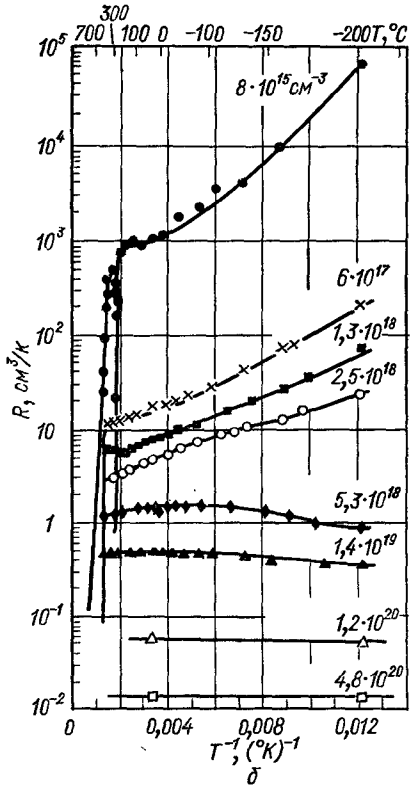


Рис. 21.10. Зависимость удельного сопротивления ρ в *p*-Si [222, 223] (*а*) и постоянной Холла *R* в *p*-Si (*б*) [223] от температуры при различной концентрации дырок в области насыщения.

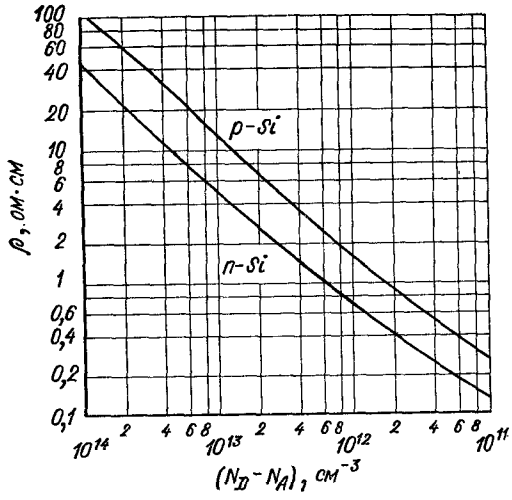


Рис. 21.11. Зависимость удельного сопротивления ρ в *p*- и *n*-Si от концентрации носителей [226].

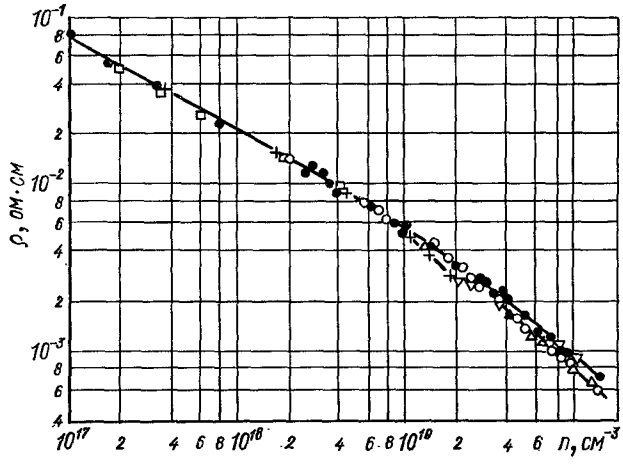


Рис. 21.12. Зависимость удельного сопротивления ρ в сильно легированном *n*-Si от концентрации носителей [225].

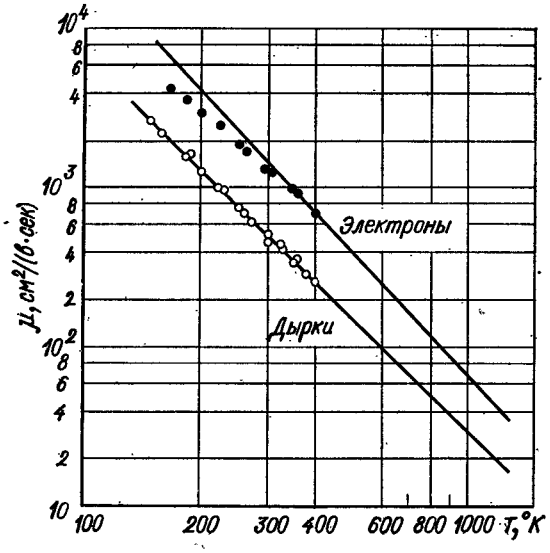


Рис. 21.13. Зависимость подвижности μ электронов и дырок в чистом Si от температуры [222].

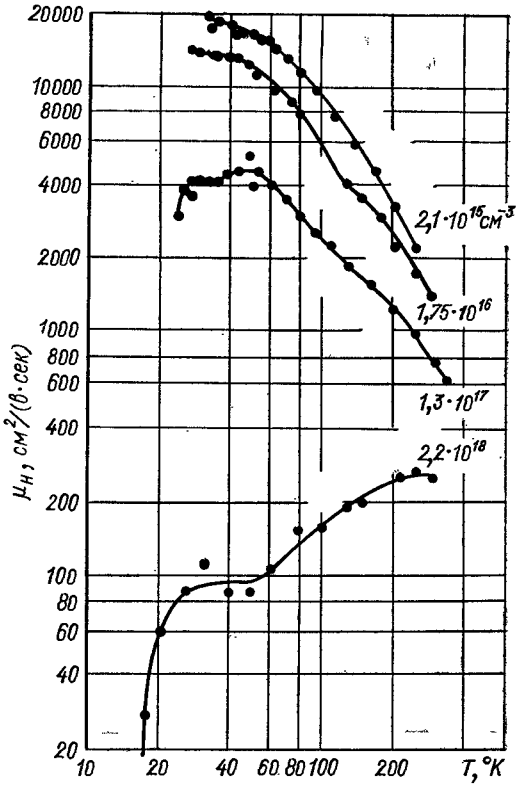


Рис. 21.14. Зависимость холловской подвижности μ_H электронов в n-Si от температуры [222] при различной концентрации примеси As.

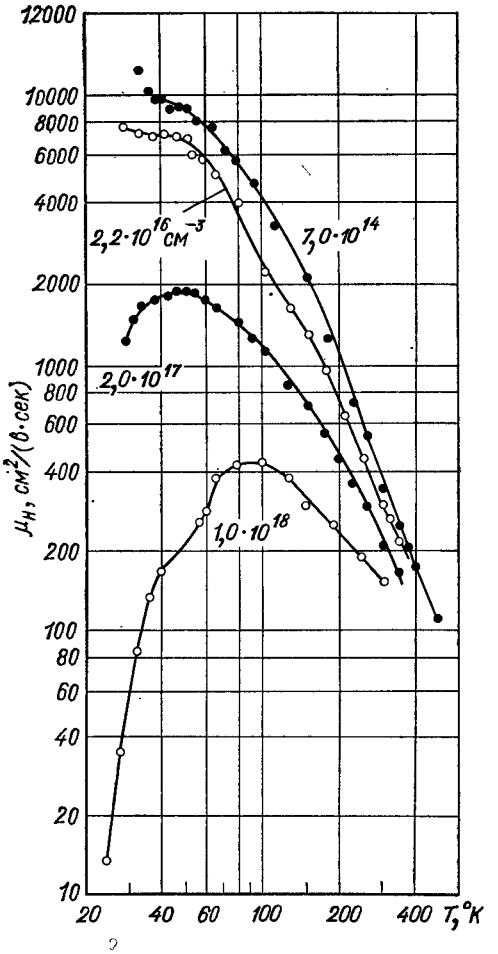


Рис. 21.15. Зависимость холловской подвижности μ_H дырок в p-Si от температуры при различной концентрации примеси B [222].

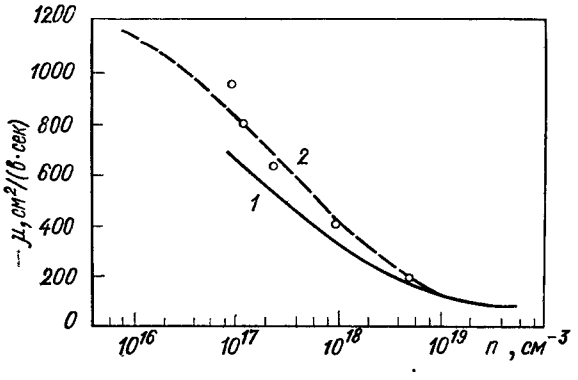


Рис. 21.16. Зависимость дрейфовой (*1*) и холловской (*2*) подвижностей электронов μ в n-Si от концентрации электронов n [10].

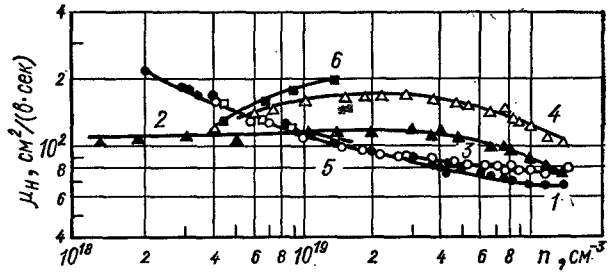


Рис. 21.17. Зависимость холловской подвижности электронов в сильно легированном n-Si от концентрации электронов [225]. Цифры у кривых соответствуют разным температурам и примесям:

T, °K	As	P	Sb
300	1	3	5
78	2	4	6

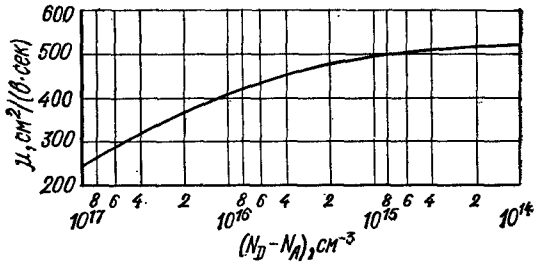


Рис. 21.18. Зависимость дрейфовой подвижности дырок μ в Si при температуре 300° К от концентрации [226].

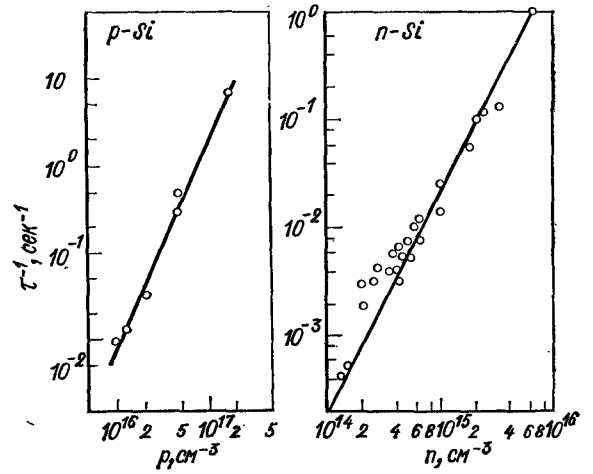


Рис. 21.19. Зависимость времени жизни τ неосновных носителей в Si от концентрации основных носителей при наличии ловушек (T = 300° К) [10].

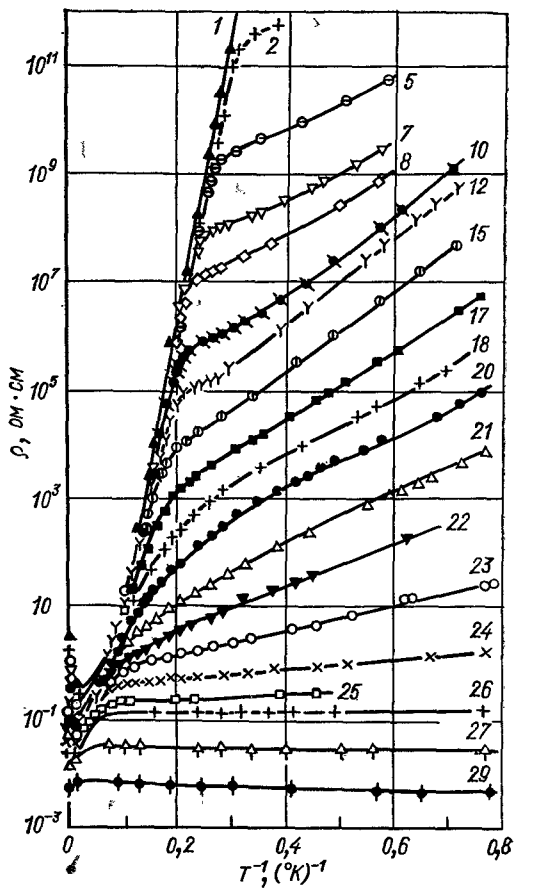


Рис. 21.20. Зависимость удельного сопротивления n-Ge с примесью Sb при низкой температуре от температуры [117]:

Номер образца	Концентрация Sb, $см^{-3}$	Номер образца	Концентрация Sb, $см^{-3}$
1	$5{,}3\cdot10^{14}$	18	$3{,}5\cdot10^{16}$
2	$9{,}3\cdot10^{14}$	20	$5{,}5\cdot10^{16}$
5	$1{,}6\cdot10^{15}$	21	$5{,}5\cdot10^{16}$
7	$2{,}3\cdot10^{15}$	22	$6{,}4\cdot10^{16}$
8	$3{,}0\cdot10^{15}$	23	$7{,}4\cdot10^{16}$
10	$5{,}2\cdot10^{15}$	24	$8{,}4\cdot10^{16}$
12	$8{,}5\cdot10^{15}$	25	$1{,}2\cdot10^{17}$
15	$1{,}3\cdot10^{16}$	26	$1{,}3\cdot10^{17}$
17	$2{,}4\cdot10^{16}$	27	$2{,}7\cdot10^{17}$
		29	$9{,}5\cdot10^{17}$

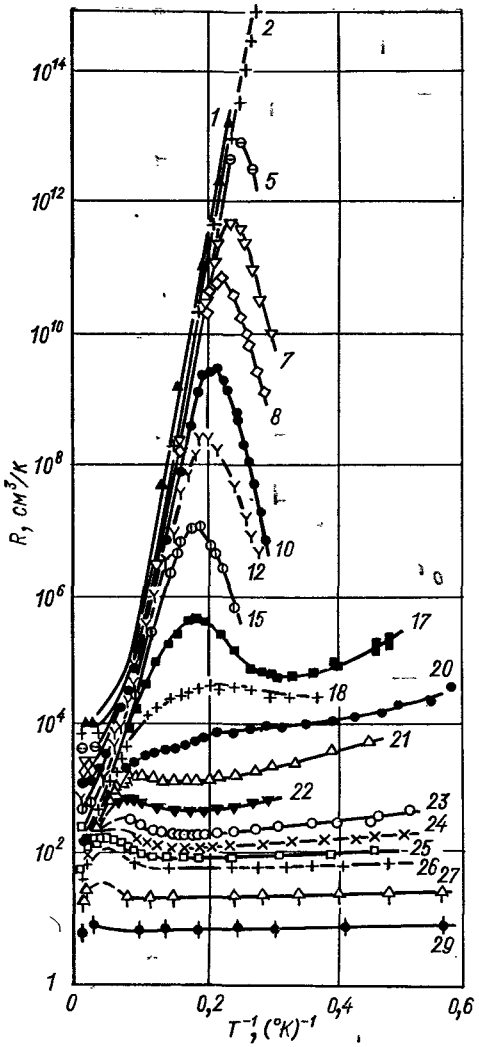


Рис. 21.21. Зависимость постоянной Холла R в n-Ge, с примесью Sb при низкой температуре от температуры [117] (обозначения см. в подписи к рис 21.20).

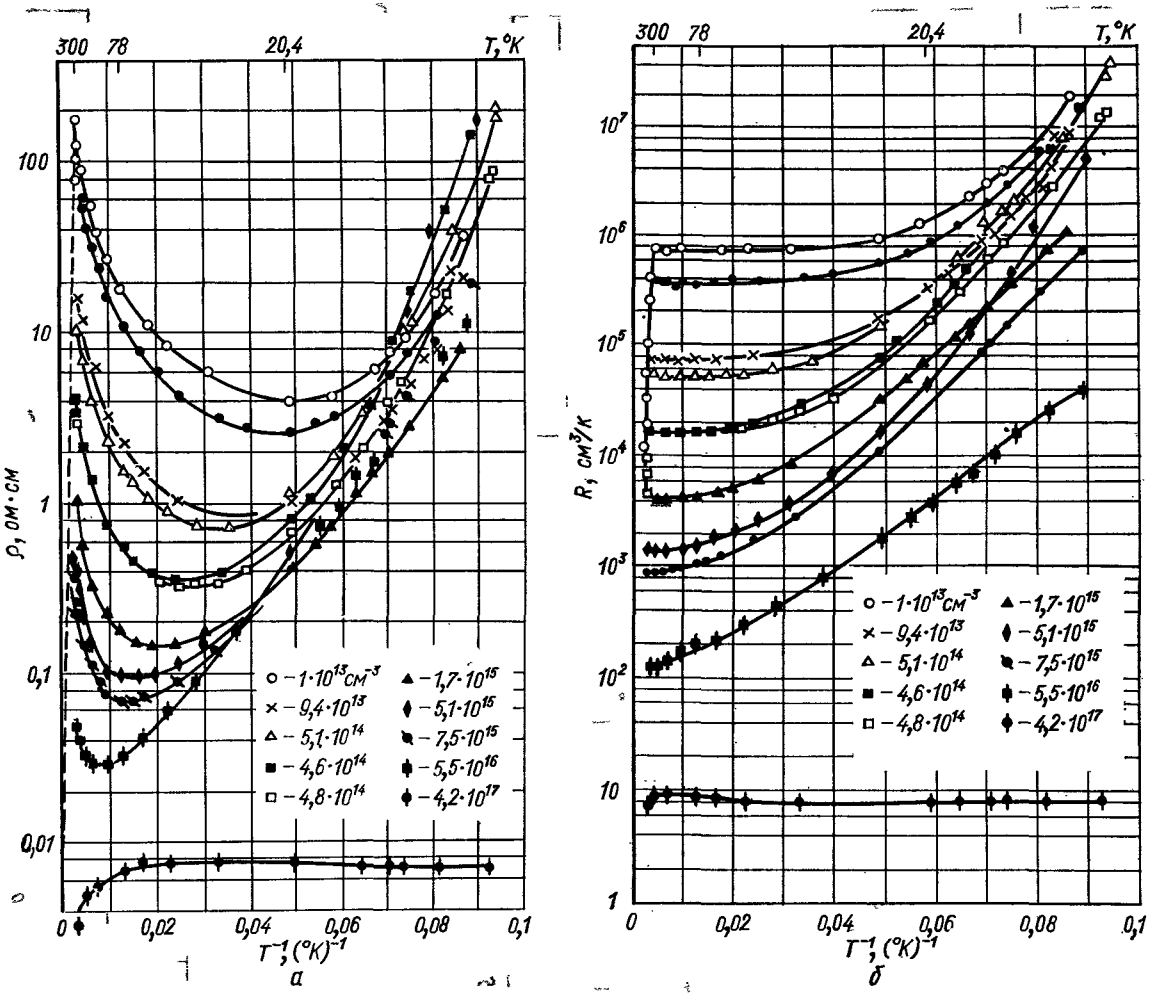


Рис. 21.22. Зависимость удельного сопротивления ρ ($а$) и постоянной Холла R($б$) в n-Ge от температуры при различной эффективной концентрации доноров $N_D - N_A$, $см^{-3}$ [224].

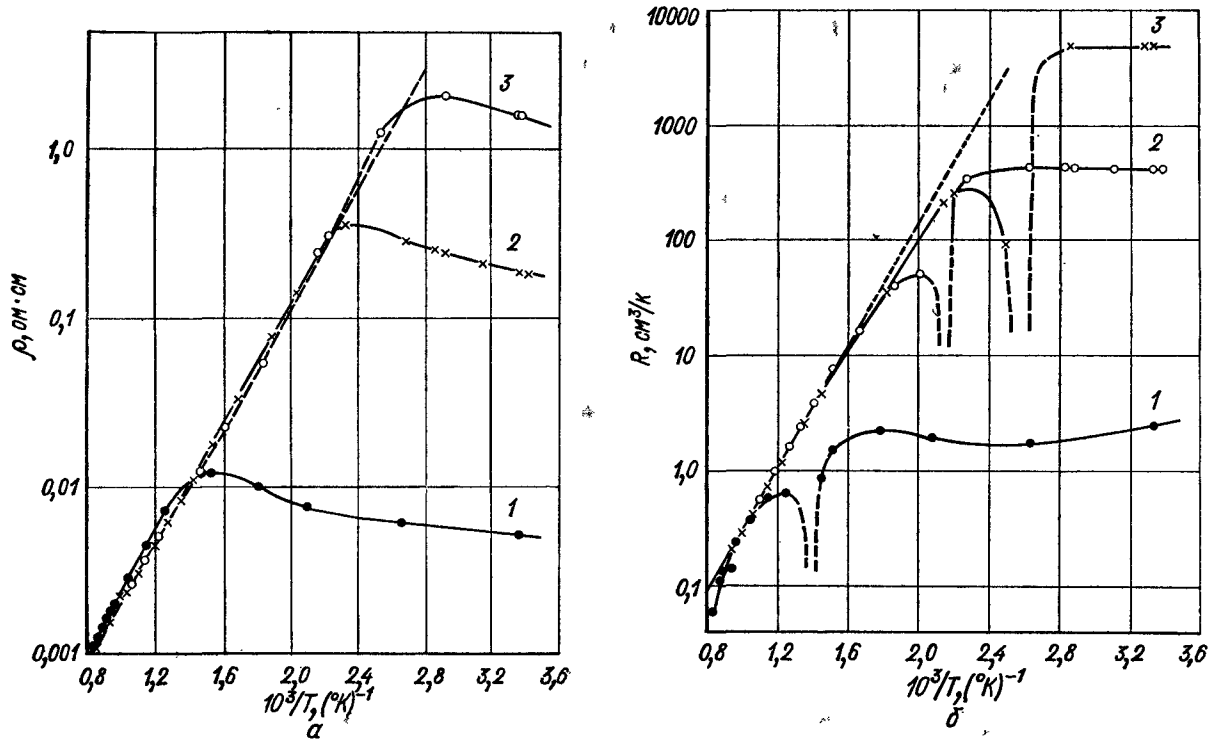


Рис. 21.23. Зависимость удельного сопротивления ρ (*а*) и постоянной Холла *R* (*б*) в *p*-Ge от температуры [224]. (Измерения проведены на одних и тех же образцах.)

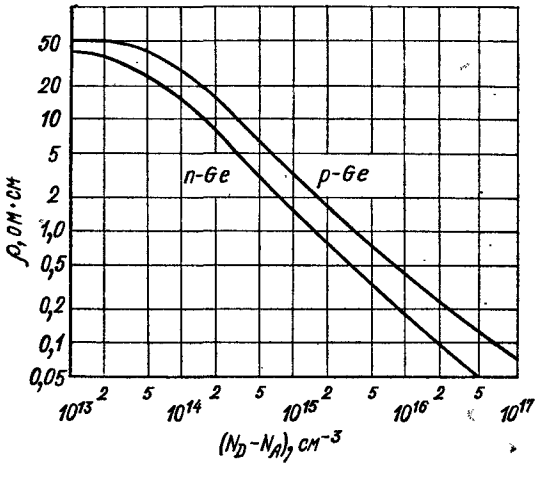


Рис. 21.24. Зависимость удельного сопротивления ρ в *p*- и *n* - Ge от концентрации носителей [234].

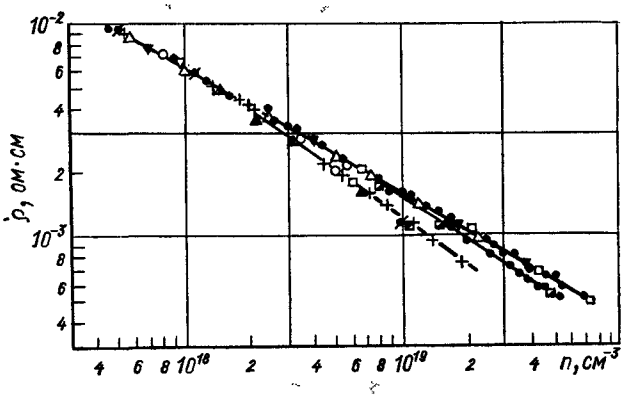


Рис. 21.25. Зависимость удельного сопротивления ρ в сильиолегированном *n* - Ge от концентрации электронов [225].

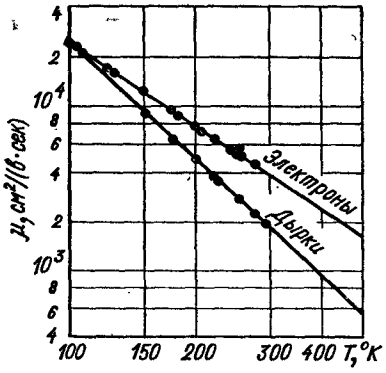
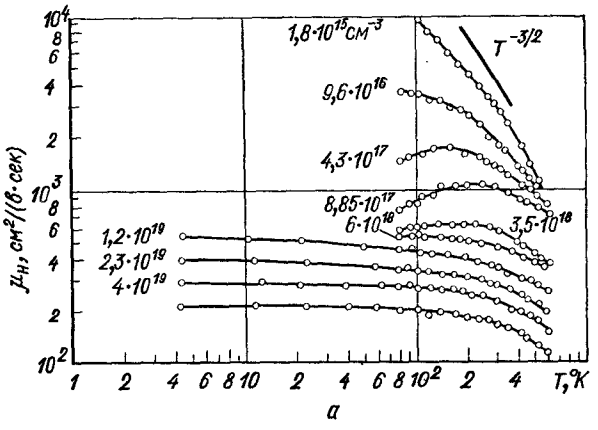
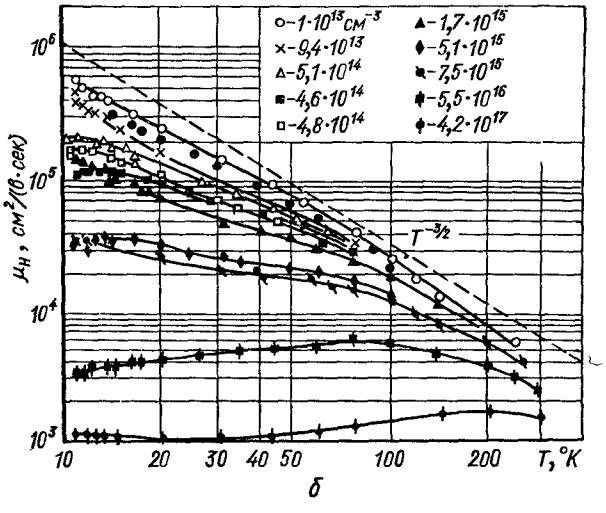


Рис. 21.26. Зависимость подвижностей электронов и дырок в чистом Ge от температуры [222].



а



б

Рис. 21.27. Зависимость холловской подвижности μ_H электронов n-Ge от температуры [225, 224] при различной концентрации доноров: *а* — указана концентрация As, *б* — образцы те же, что и на рис. 21.22.

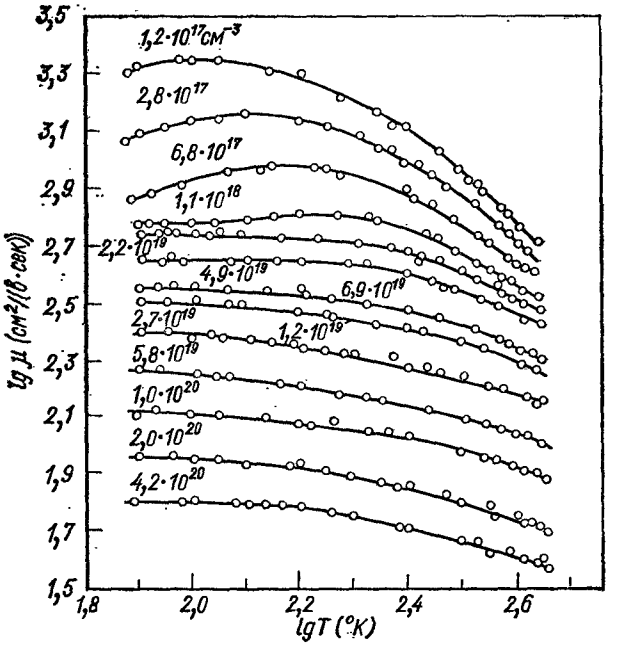


Рис. 21.28. Зависимость подвижности дырок p-G от температуры [225] при различной концентрации акцепторов (Ga).

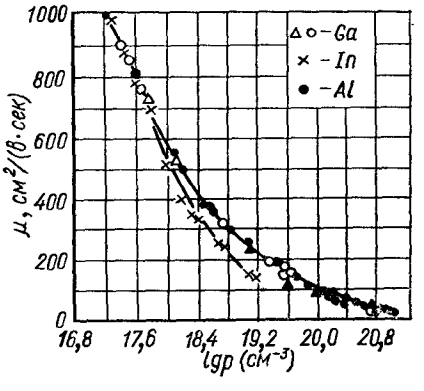


Рис. 21.29. Зависимость подвижности дырок в p-Ge при T = = 300° K от концентрации дырок с различиой легирующей примесью [225].

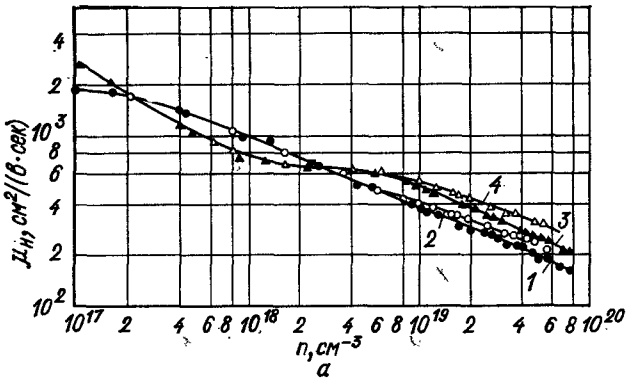


Рис. 21.30. Зависимость холловской подвижности μ_H электроиов в n-Ge от концентрации электронов в сильнолегнрованных образцах (*а*) [225] и при T=300 °К (*б*).

Электрофизические свойства

Элемент	Кристаллическая структура: Тип	Кристаллическая структура: a, Å	Литература	ρ, $\frac{г}{см^3}$	Литература	$T_{пл}$, °К	Литература	T_D °К
Si	Кубическая O_h^7	$a = 5{,}431$	[123]	2,33	[123]	1690	[123]	539 (80°К); 689 (300°К)
Ge	Кубическая O_h^7	$a = 5{,}657$	[123]	5,32	[123]	1210	[123]	353 (80°К); 406 (300°К)

Элемент	E_g, эв	Литература	$E_{\Gamma\Delta}$, эв	Литература	$E_{\Gamma\Lambda}$, эв	Литература	Δ_{SO}, эв	Литература
Si	1,15	[84; 123]	2,3	[84]	1,5	[84]	0,035 0,044	[117] [123]
Ge	0,744	[84. 123]	0,05 0,15	[123] [84]	0,02	[123]	0,28 0,30	[117] [123]

Элемент	m_n/m_0	Литература	$\frac{m_{dn}}{m_0}$	Литература	$\frac{m_{n0}}{m_0}$	Литература	$\frac{m_{p1}}{m_0}$	Литература	$\frac{m_{p2}}{m_0}$	Литература
Si	$m_{\parallel} = 0{,}9163$ $m_{\perp} = 0{,}1905$	[84] [84]	0,33	[117]	0,26	[117]	0,52[6]*	[123]	0,16	[123]
Ge	$m_{\parallel} = 1{,}588$ $m_{\perp} = 0{,}0815$	[84] [84]	0,22	[117]	0,12	[117]	0,34[6]*	[123]	0,043	[123]

* $\varkappa$, *вт*/(*см*·*град*): 2,5 (T = 200°К); 13 (T = 50°К); 17 (T = 20°К); 12 (T = 10°К) [132].
2* λ = 1,05 *мкм*.
3* λ = 8 *мм*.

[227]: Номера кривых соответствуют разным температурам и примесям.

T, °K	As	P
78	3	4
300	1	2

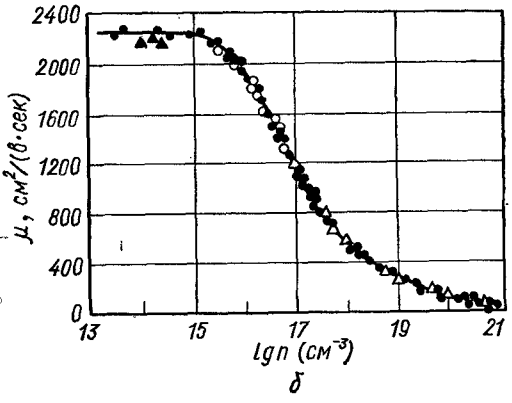


Таблица 21.3

кремния и германия

Литература	$\varkappa$, $\frac{вт}{см \cdot град}$	Литература	$\hbar\omega_0$, эв	Литература	ε_0	Литература	ε_∞	Литература
[117] [117]	1,3*	[117]	0,063	[123]	11,7	[28]	12,7[2]* 13,7[3]*	[28] [117]
[117] [117]	0,63[4]*	[147]	0,037	[123]	16	[28]	16,5[5]*	[28]

$\frac{dE_0}{dT}$, $10^{-4}\ \frac{эв}{град}$	Литература	$\frac{dE_{ГА}}{dt}$, $10^{-4}\ \frac{эв}{град}$	Литература	$\frac{dE_g}{dP}$, $10^{-6}\ \frac{эв}{бар}$	Литература	$\frac{dE_{ГА}}{dP}$ $10^{-6}\ \frac{эв}{бар}$	Литература	$\frac{dE_{ГА}}{dP}$, $10^{-6}\ \frac{эв}{бар}$	Литература
—4	[123]	—	[123]	—1,5	[123]	—	—	—	—
—4	[123]	—4	[123]	+5	[123]	7	[123]	—(12—14)	[123]

$m_{оз}/m_0$	Литература	μ_n, $\frac{см^2}{в \cdot сек}$	Литература	μ_p, $\frac{см^2}{в \cdot сек}$	Литература	n_i, $\frac{1}{см^3}$	Литература	ρ_i, ом·см	Литература
0,25	[123]	1300(300°K) ($\sim T^{-2,6}$)	[123] [117]	500(300°K) ($\sim T^{-2,3}$)	[123] [117]	$1,4 \cdot 10^{10}$	[11]	$2,3 \cdot 10^5$	[11]
0,08	[123]	3800(300°K) ($\sim T^{-2,3}$)	[123] [28]	1820(300°K) ($\sim T^{-1,67}$)	[123] [28]	$2,4 \cdot 10^{13}$	[11]	47	[11]

[4]* $\varkappa$, $вт/(см \cdot град)$: 1 ($T = 200$°K); 5,5 ($T = 50$°K); 11 ($T = 20$°K); 10 ($T = 10$°K); 0,5 ($T = 2$°K) [132].
[5]* $\lambda = 2,5$ мкм.
[6]* В Si $m_{dp} = 0,55 m_0$, в Ge $m_{dp} = 0,39\, m_0$ [11].

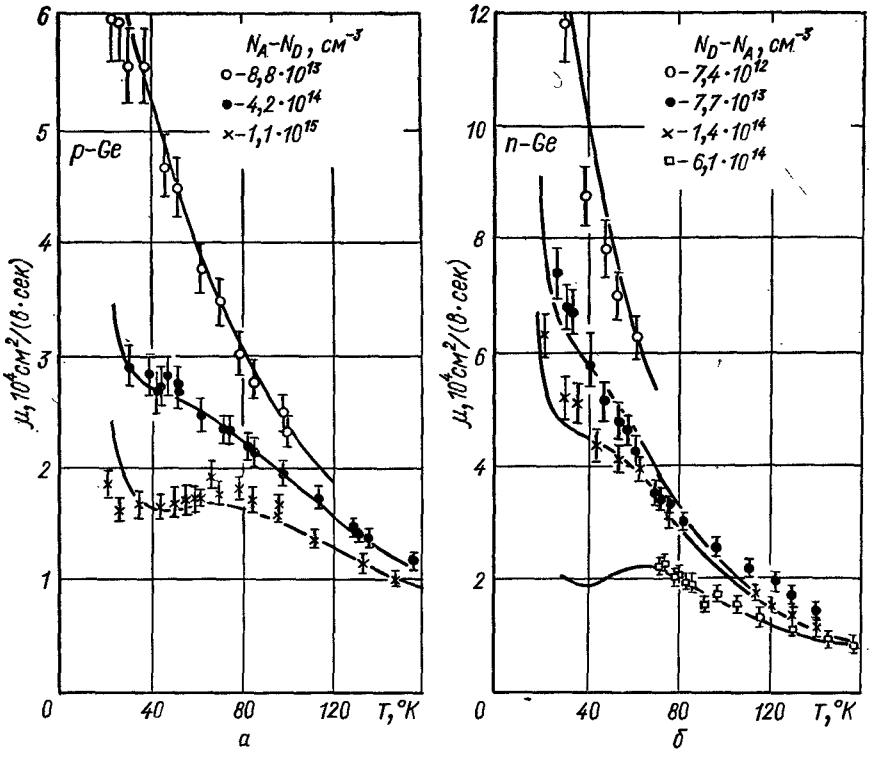


Рис. 21.31. Зависимость дрейфовой подвижности μ неосновных носителей в Ge от температуры [222].

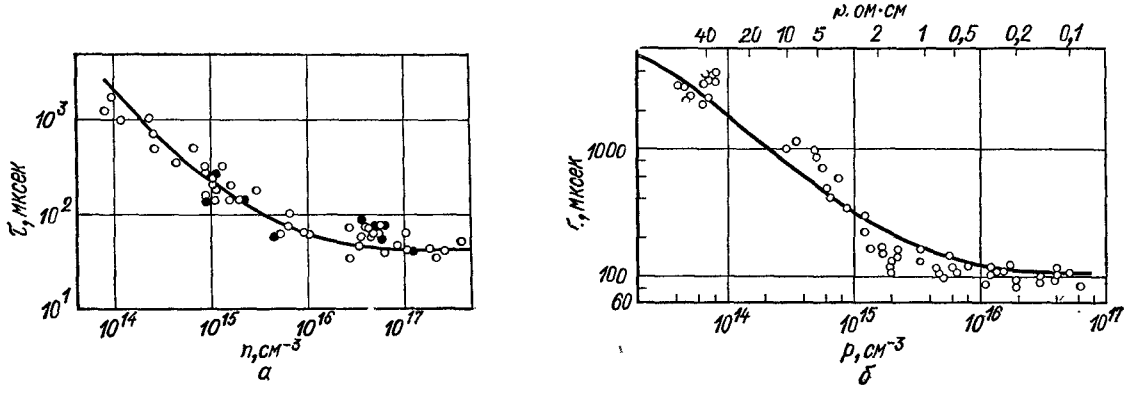


Рис. 21.32. Зависимость времени жизни τ дырок в n-Ge от концентрации электронов ($а$) и времени жизни электронов в p-Ge от концентрации дырок p ($б$) [237].

Таблица 21.4

Свойства примесей в кремнии [117]

Примесь	Al	As	Au	B	Bi	Cu
Тип*	*A*	*D*	*A*	*A*	*D*	*A*
E_i^{2*}, эв	0,057	0,049	0,35; 0,67	0,046	0,069	0,24; 0,72

Примесь	Fe	Ga	In	Li	O	P
Тип*	*A*	*A*	*A*	*D*	*D*	*D*
E_i^{2*}, эв	0,4; 0,66	0,065	0,16	0,033	0,03—0,06	0,044

Примесь	S	Sb	Tl	Zn
Тип*	*D*	*D*	*A*	*A*
E_i^{2*}, эв	0,18, 0.37	0,039	0,26	0,31; 0,66

1* *D* — донор, *A* — акцептор.
2* Для доноров энергия ионизации E_i отсчитывается от дна зоны проводимости, для акцепторов — от края валентной зоны.

Таблица 21.5

Свойства примесей в германии [117, 123]

Примесь	Al	Ag	As	Au	B	Be
Тип*	*A*	*A*	*D*	*A*3*	*A*	*A*
E_i^{2*}, эв	0,0102	0,13; 0,5; 0,7	0,0127	0,16 0,59; 0,75	0,0104	0,07

Примесь	Bi	Cd	Co	Cr	Cu	Fe
Тип*	*D*	*A*	*A*3*	*A*	*A*	*A*
E_i^{2*}, эв	0.012	0,05; 0,15	0,09; 0,25; 0.48	0,07; 0,12	0,4; 0,33; 0.53	0,35; 0,52

Продолжение табл. 21.5

Примесь	Ga	In	Li	Mn	Ni	O
Тип*	*A*	*A*	*D*	*A*	*D*	*D*
E_i^{2*}, эв	0,0108	0,0112	0,0093	0,16; 0,42	0,22; 0,49	0,01

Примесь	P	Pt	S	Sb	Se	Te
Тип*	*D*	*A*	*D*	*D*	*D*	*D*
E_i^{2*}, эв	0,012	0,04; 0,20; 0,67	0,18	0,0096	0,014; 0,28	0,11 0,30

Примесь	Tl	Zn
Тип*	*A*	*A*
E_i^{2*}, эв	0,01	0,03; 0,09

* *D* — донор, *A* — акцептор.
2* Энергия ионизации E_i для доноров отсчитывается от дна зоны проводимости, для акцепторов — от края валентной зоны.
3* Известны донорный уровень 0,74 эв для Au, 0.7 эв для Co.

21.4. ПОЛУПРОВОДНИКОВЫЕ СОЕДИНЕНИЯ

Соединения типа $A^I B^I$ — $A^I B^{VII}$

Полупроводниковые соединении $A^I B^I$. Известны два полупроводниковых соединения этого типа: NaAu и CsAu, для которых E_g равно соответственно 0,15 и 0,5—2,0 эв [242].

Полупроводниковые соединения $A^I B^V$. При взаимодействии щелочных металлов с элементами V группы образуются соединения двух типов $A^I B^V$ и $A_3^I B^V$

Тип проводимости определяется нарушением стехиометрии. Избыток щелочного металла создает донорные, а элементы V группы — акцепторные уровни. Растворимость примесей в этих соединениях мала. Соединения рассматриваемого типа или их сплавы используются в качестве фотокатодов [61].

Электрофизические свойства полупроводниковых соединений типа $A^{I}B^{V}$

Соединение	Кристаллическая структура: Тип	Кристаллическая структура: a, b, c, Å	Литература	ρ, $\frac{г}{см^3}$	Литература	$T_{пл}$, °К	Литература	E_g, эв	Литература	μ_n, $\frac{см^2}{в \cdot сек}$	Литература	μ_p, $\frac{см^2}{в \cdot сек}$	Литература	Тип проводимости	Литература
Li_3Sb*	Кубическая O_h^5	a=6,56	[1]	—	—	1423—1573	[16]	1,25	[16]	—	—	—	—	p	[16]
NaSb	Моноклинная C_{2h}^5	a=6,80 b=6,34 c=12,48	[16, 242]	—	—	738	[16]	0,82	[16]	—	—	—	—	p	[16]
Na_3Sb	Гексагональная D_{6h}^4	a=5,36 b=9,5	[1] [1]	2,67	[123]	1130	[123]	1,1	[81, 123]	—		—	—	p	[16]
KSb	Моноклинная C_{2h}^5	a=7,18 b=6,97 c=13,40	[242] [242] [242]	—	—	878	[16]	0,9	[16]	—	—	—	—	—	—
K_3Sb	Гексагональная D_{6h}^4	a=6,03 b=10,69	[1] [1]	2,35	[123]	1085	[123]	1,1	[10, 123]	—		—	—	n	[16]
Rb_3Sb	Кубическая	—	[61]	—	—	—	—	1,0	[10]	—		—	—	p	[61]
CsSb	—	—	—	—	—	—	—	0,8	[10]	500 $(\sim T^{-3/2})$	[16]	100	[16]	—	—
Cs_3Sb	Кубическая O_h^7	a=9,147	[1]	—	—	—	—	1,6	[8, 123]	500 $(\sim T^{-3/2})$	[10]	10	[10]	p	[16]
$CsBi_2$	—	—	—	—	—	—	—	1,65	[97]	—		—	—	—	—
Cs_3Bi	Кубическая O_h^7	a=9,305	[242]	—	—	—	—	0,55	[16]	—		350	[249]	n	[16]

* Данные относятся к β-Li_3Sb [242]; имеется другая модификация α-Li_3Sb с гексагональным типом решетки D_{6h}^4, a=4,710Å; b = =8,3236 Å, $E_g \sim 0{,}5 \div 0{,}8$ эв (300°К) [242].

Таблица 21.7

Электрофизические свойства полупроводниковых соединений типа $A_2^I B^{VI}$

Соединение	Кристаллическая структура: Тип	Кристаллическая структура: a, b, c, Å	Литература	ρ, $\frac{г}{см^3}$	Литература	$T_{пл}$, °К	Литература	E_g, эв	Литература	μ_n, $\frac{см^2}{в \cdot сек}$	Литература	μ_p, $\frac{см^2}{в \cdot сек}$	Литература	Примечания	Литература
CuO	Моноклинная C_{2h}^6	$a = 4,662$ $b = 3,417$ $c = 5,118$	[242] [242] [242]	—	—	—	—	—	—	0,26	[242]	—	—	—	—
Cu_2O	Кубическая O_h^4	$a = 4,26$	[1]	6,1	[123]	1508	[16]	~1,5 2,0 2,17	[249] [123] [19]	—	—	100 $80 (T^{-5/2})$	[123] [16]	$\frac{dE_g}{dT} = -2 \times 10^{-4} \frac{эв}{град}$ $\varepsilon = 8,75$ $\alpha = 700 \frac{мкв}{град}$ p-тип $\varepsilon_0 = 7,5$	[10] [179] [16] [16] [23]
Cu_2S	Ромбическая C_{2v}^{15}	$a = 11,8$ $b = 27,28$ $c = ?$	[1] [1] [1]	5,6	[216]	1373	[216]	1,85	[94]	30	[242]	—	—	p-тип	[16]
Cu_2Se	Кубическая T_d^2	$a = 5,84$	[1]	6,8	[216]	1390	[216]	1,25	[94]	—	—	750	[16]	p-тип	[16]
Cu_2Te	Гексагональная D_{6h}^1	$a = 4,2$ $c = 7,2$	[1] [1]	7,34	[216]	~1173	[216]	1,0	[88]	200	[40]	900 $(T^{-3/2})$	[88]	—	—
α-Ag_2S	Кубическая O_h^5	—	[74]	—	—	—	—	0,6 (300°K)	[74]	—	—	—	—	При $T < 453$°K переходит в β-Ag_2S: $m_n = 0,24\ m_0$, $\sigma \sim 10^2$ ом·см ($T = 200$°K)	[74]
β-Ag_2S	Ромбическая C_{2h}^5	$a = 9,47$ $b = 6,92$ $c = 8,28$	[1] [1] [1]	7,33	[216]	1111	[16]	1,3 (0°K) 1,0 (300°K) 1,2 (0°K)	[16] [123]	50 63 (100°K)	[16] [123]	19 (100°K)	[123]	$m_{dn} = 4,55\ m_0$ $m_{dp} = 7,8\ m_0$ n-тип	[15] [15] [16]

Продолжение табл. 21.7

Соединение	Кристаллическая структура: Тип	Кристаллическая структура: a, b, c, Å	Литература	ρ, $\frac{г}{см^3}$	Литература	$T_{пл}$, °K	Литература	E_g, эв	Литература	μ_n, $\frac{см^2}{в \cdot сек}$	Литература	μ_p, $\frac{см^2}{в \cdot сек}$	Литература	Примечания	Литература
α-Ag_2Te	Кубическая O_h^5	$a = 6,57$	[1]	8,5	[216]	1228	[216]	0,17	[16]	4000	[16]	—	—	При $T < 423$°K переходит в β-Ag_2Te	[16]
β-Ag_2Te	Моноклинная C_{2h}^1	$a = 6,57$ $b = 6,14$ $c = 6,10$	[1] [1] [1]	—	—	При $T \geqslant 423$°K переходит в α-Ag_2Te	[16]	0,064	[102]	8400 См. рис. 21.33	[102]	1400	[102]	$m_{dn} = 0,4\ m_0$ $dE_g/dT = -0,86 \times 10^{-4}$ эв/град $\hbar\omega_e = 0,015$ эв	[15] [102] [98]
β-Ag_2Se*	Ромбическая Тетрагональная	— $a = 7,06$ $c = 4,98$	[16, 123] [242] [242]	—	—	1170 ($T_{пл}$ α-Ag_2Se)	[16]	0,075	[15]	2000	[16, 123]	505	[123]	При $T \geqslant 406$°K переходит в α-Ag_2Se $m_p = 0,54\ m_0$ $m_n = 0,2\ m_0$ n-тип	[16] [123] [256] [16]
Na_2Se	Кубическая O_h^5	$a = 6,813$	[242]	—	—	—	—	2,0—2,4	[242]	—	—	—	—	—	—
Na_2Te	—	—	—	—	—	1226	[216]	2,3	[72]	—	—	—	—	—	—
K_2Se	Кубическая O_h^5	$a = 7,692$	[242]	—	—	—	—	1,8—2,0	[242]	—	—	—	—	—	—

* $\varkappa = 10 \cdot 10^{-3}$ вт/(см·град) при $T = 300$°K ($n \sim 10^{19}$ см$^{-3}$); $\sigma \sim 6000$ ом$^{-1}$·см$^{-1}$ ($T = 300$°K) [104].

Таблица 21.8

Электрофизические свойства полупроводниковых соединений типа $A^{I}B^{VII}$

Соединения	Кристаллическая структура: Тип	Кристаллическая структура: a, Å	Литература	ρ, $г/см^3$	Литература	$T_{пл}$, °K	Литература	E_g, эв	Литература	μ_n, $см^2/в \cdot сек$	Литература	μ_p, $см^2/в \cdot сек$	Литература	Примечание	Литература
CuBr	Кубическая T_d^2	5,68	[1]	4,72	[121]	777	[121]	2,9	[16]	30	[16, 190]	—	—	$\varkappa = 0{,}013 \frac{вт}{см \cdot град}$	[121]
CuI	Кубическая O_h^5	6,053; 6,15	[242] [242]	5,63	[242]	878	[242]	2,8	[242]	—	—	—	—	$m_{p\perp} = 0{,}52\ m_0$; $m_{p\parallel} = 1{,}25\ m_0$	[82]
AgCl	Кубическая O_h^5	5,54	[1]	5,56	[216]	728	[216]	4,1 3,0	[11] [242]	См. рис. 21.34 70 (200°K) 45 000 (12°K)	[11] [110]	40 (200°K)	[11]	$T_D = 280$°K $m_n = 0{,}36\ m_0$ $\frac{dE_g}{dT} = -10{,}2 \times 10^{-4} \frac{эв}{град}$	[187] [110] [10]
AgBr	Кубическая O_h^5	5,77	[1]	6,47	[216]	703	[216]	2,0	[78]	240 4000 $6 \cdot 10^5$ (1,7° K)	[10] [123] [82]	$1{,}5 \cdot 10^6$ (1,7°K)	[82]	$T_D = 210$°K $m_n^* = 0{,}23\ m_0$	[187] [123]
AgI	Кубическая T_d^2	6,47	[1]	5,67	[121]	825	[121]	2,8	[10]	50	[16]	—	—	$T_D = 119$°K	[121]

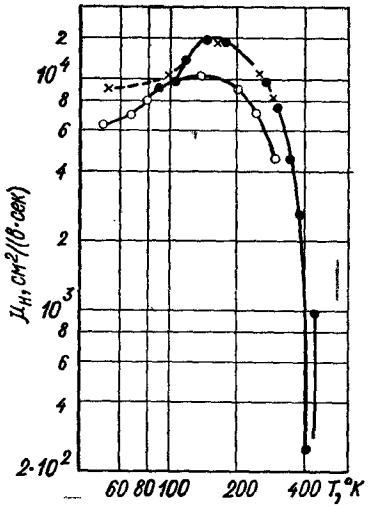


Рис. 21.33. Зависимость холловской подвижности μ_H электронов в Ag_2Te от температуры [123]:
○, × — массивные кристаллы; ● — тонкие слои толщиной 1350 Å со сферолитнческой структурой, напыляемые на подложку при температуре 120°С.

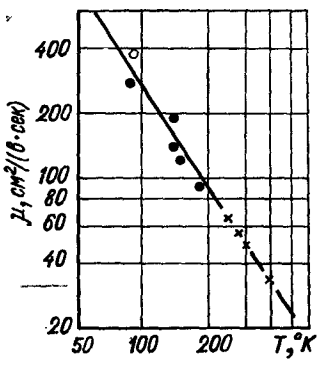


Рис. 21.34. Зависимость подвижности электронов в AgCl от температуры [10]:
○ — данные измерений холловской подвижности; ● — данные измерений дрейфовой подвижности; × — данные, полученные по эффекту «отпечатывания».

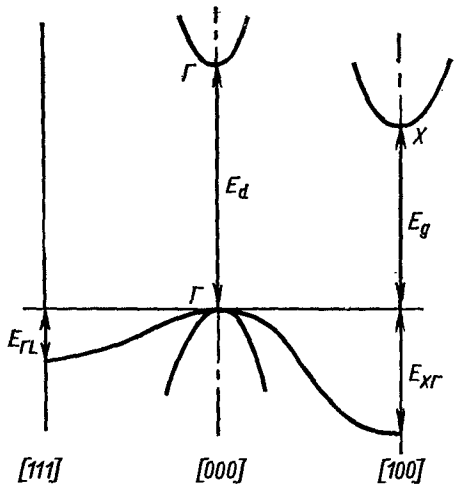


Рис. 21.35. Зонная структура Mg_2Si, Mg_2Ge, Mg_2Sn [123, 129, 130, 246] ($E_{\Gamma L}$ = 0,5 *эв*, $E_{X\Gamma}$ = 2,3 *эв*):

E, *эв*	Mg_2Si	Mg_2Ge	Mg_2Sn
E_g	0,77	0,69; 0,57	0,35
E_d	3,06	4,49	4,06

Соединения типа $A^{II}B^{IV} - A^{II}B^{VII}$

Полупроводниковые соединения типа $A_2^{II}B^{IV}$

Среди полупроводников этой группы наиболее изучены соединения типа Mg_2X. Зонная структура этих соединений имеет вид, показанный на рис. 21.35: $E_{\Gamma L}$=0,5÷0,8 *эв*, $E_{X\Gamma}$=2,3 *эв* для всех полупроводников этого типа [129, 130]

Таблица 21.9

Электрофизические свойства полупроводниковых соединений типа $A_2^{II}B^{IV}$

Соединение	Кристаллическая структура: Тип	Кристаллическая структура: a, b, c, Å	Литература	$T_{пл}$, °K	Литература	ρ, $\frac{г}{см^3}$	Литература	E_g, *эв*	Литература	$\frac{dE_g}{dT}$, $10^{-4}\frac{эв}{град}$	Литература	μ_n, $\frac{см^2}{в\cdot сек}$	Литература
Mg_2Si	Кубическая O_h^5	a=6,34	[123]	1375	[123]	1,95	[123]	0,77	[123]	—6,4	[131]	400 ($\sim T^{-2,5}$) при $T>160$°K	[123]
Mg_2Ge	Кубическая O_h^5	a=6,38	[123]	1388	[123]	3,086	[123]	0,57 0,69	[67] [246]	—1,8 —6,5	[67] [247]	500 ($\sim T^{-2}$)	[123, 242]
Mg_2Sn	Кубическая O_h^5	a=6,76	[123]	1051	[123]	3,592	[123]	0,28— —0,34 0,35	[244] [123, 245]	—3,2 —4,2 —3,5 (85°K < T < 300°K)	[245] [123] [244]	320 ($T^{-2,2}$)	[123]

Соединение	Кристаллическая структура: Тип	Кристаллическая структура: $a, b, c, Å$	Литература	$T_{пл}$, °К	Литература	ρ, $\frac{г}{см^3}$	Литература	E_g, эв	Литература	$\frac{dE_g}{dt}$ $10^{-4}\frac{эв}{град}$	Литература	μ_n, $\frac{см^2}{в \cdot сек}$	Литература
Mg_2Pb	Кубическая O_h^5	$a=6,80$	[123]	923	[123]	—	—	0,1	[123]	—	—	—	—
Ca_2Si	Ромбическая D_{2h}^{16}	$a=7,667$ $b=4,799$ $c=9,002$	[242] [242] [242]	1182	[6]	—	—	1,9	[16, 249]	—	—	—	—
Ca_2Ge	Ромбическая D_{2h}^{16}	$a=7,734$ $b=4,834$ $c=9,069$	[242] [242] [242]	—	—	—	—	1,0	[242]	—	—	—	—
Ca_2Sn	Ромбическая D_{2h}^{16}	—	[242]	1395	[6]	—	—	0,9	[16, 249]	—	—	—	—
Ca_2Pb	Ромбическая D_{2h}^{16}	$a=8,072$ $b=5,100$ $c=9,647$	[242] [242] [242]	1382	[71]	—	—	0,46	[16, 249]	—	—	—	—

Продолжение табл. 21.9

Соединение	μ_p, $\frac{см^2}{в \cdot сек}$	Литература	m_p/m_0	Литература	m_n/m_0	Литература	T_D, °К	Литература	Примечания	Литература
Mg_2Si	70	[123]	0,87	[10]	$m_d/m_0=0,46$	[75]	417 (300°К) 542 (20°К)	[24] [24]	$\varkappa=0,08\frac{вт}{см \cdot град}$ $\alpha=600 \div 2000\frac{мкв}{град}$	[243] [16]
Mg_2Ge	100	[123]	0,31	[10]	$m_d/m_0=0,18$	[55]	363 (300° К) 466 (5°К)	[261] [261]	$\varkappa=0,1\frac{вт}{см \cdot град}$	[132]
Mg_2Sn	$200\left(T^{-2,2}\right)$	[11, 123]	$m_d=1,3m_0$ $m_\sigma=0,1\ m_0$	[245]	$m_d/m_0=1,2$ $m_\sigma/m_0=0,15$	[245]	240 (300° К)	[262]	$\varepsilon_0=23,75$ $\varepsilon_\infty=15,5$	[219] [219]
			1,28	[10]	$m_\parallel/m_0=0,8$ $m_\perp/m_0=0,3$	[133]	336 (5° К)	[262]	$\frac{dE_g}{dp}=4,4 \cdot 10^{-6}\frac{эв}{бар}$ $n_i=2,7 \cdot 10^{17}\frac{1}{см^3}$ $\varkappa=0,1\frac{вт}{см \cdot град}$	[123] [11] [132]

Полупроводниковые соединения типа $A^{II}B^{V}$

Из соединений этого типа наиболее изучены ZnSb и CdSb, а также их твердые растворы, представляющие интерес при создании термоэлектрических устройств. ZnSb и CdSb кристаллизуются в орторомбической структуре (D_{2h}^{15}), приводящей к сильной анизотропии их механических и электрических свойств. Зонная структура — непрямая [18, 117]. Минимум зоны проводимости расположен в центре зоны Бриллюэна (при $k = 0$). Вблизи него поверхность постоянной энергии близка к эллипсоиду вращения с большой осью, направленной вдоль оси a. Экстремум валентной зоны расположен в точке $k \neq 0$. Обзор свойств соединений $A^{II}B^{V}$ см. в работе [241].

Рис. 21.36—21.39 иллюстрируют электрофизические свойства некоторых соединений рассматриваемого типа.

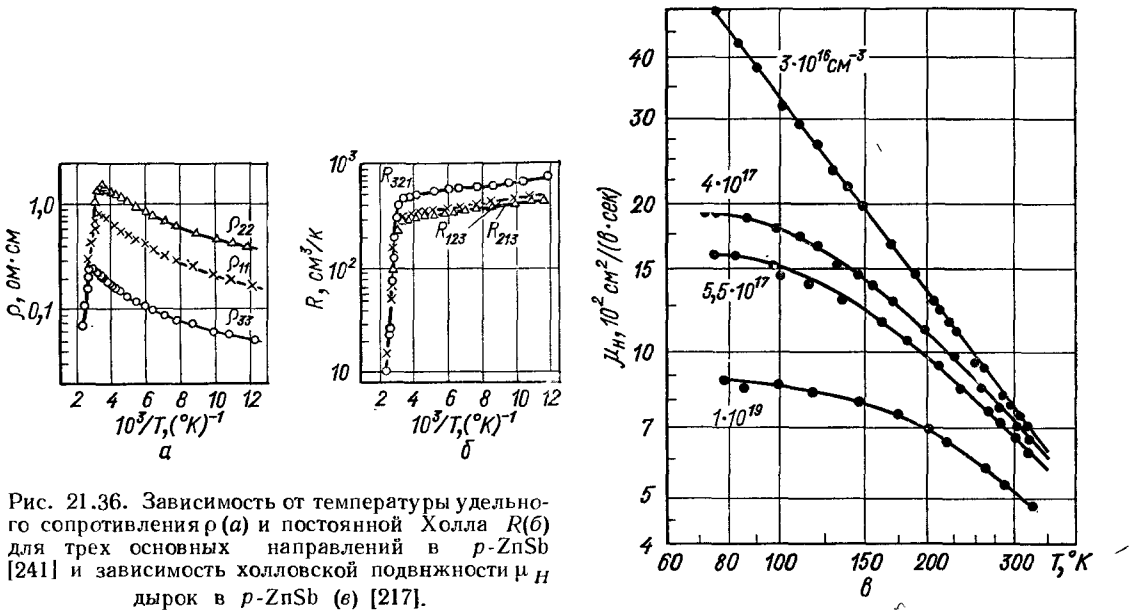


Рис. 21.36. Зависимость от температуры удельного сопротивления ρ (*а*) и постоянной Холла R(*б*) для трех основных направлений в p-ZnSb [241] и зависимость холловской подвижности μ_H дырок в p-ZnSb (*в*) [217].

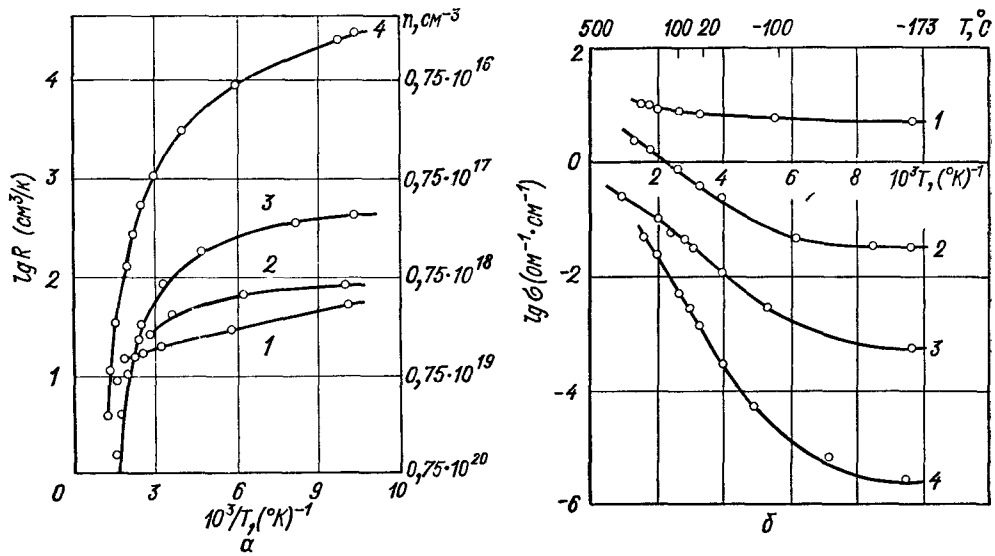


Рис. 21.37. Зависимость от температуры постоянной Холла R(*а*) и удельной проводимости σ(*б*) в Mg_3Sb_2. Образцы с различной степенью отклонения от стехиометрии (*1*—*4*) [16].

Электрофизические свойства полупроводниковых соединений типа $A^{II}B^{V}$

Таблица 21.10

Соединение	Кристаллическая структура: Тип	Кристаллическая структура: a, b, c, Å	Литература	ρ, $\frac{г}{см^3}$	Литература	$T_{пл}$, °K	Литература	Тип проводимости	Литература	E_g, эв	Литература	$\frac{dE_g}{dT}$, 10^{-4} $\frac{эв}{град}$	Литература	$\varkappa$, $\frac{вт}{см \cdot град}$	Литература
Be_3Sb_2	—	—	—	—	—	—	—	—	—	0,67	[242]	—	—	—	—
Mg_3Sb_2	Тригональная D^3_{3d}	$a = 4,54$ $c = 7,23$	[1] [1]	4,09	[123]	1500	[123]	—	—	0,82	[151]	—	—	—	—
Ca_3Sb_2	—	—	—	—	—	—	—	—	—	1,4	[16]	—	—	—	—
ZnP_2	Тетрагональная D^{8*}_4	$a = 5,07$ $c = 18,65$	[241] [241]	3,47— —3,55	[248]	—	—	p	[248]	2,05	[248]	—	—	—	—
Zn_3P_2	Тетрагональная D^{15}_{4h}	$a = 8,1$ $c = 11,45$	[2] [2]	4,54	[16]	1450	[248]	n, p	[16]	1,15	[10]	—	—	—	—
$ZnAs_2$	Моноклинная[2*] C^5_{2h}	$a = 7,72$ $b = 7,99$ $c = 36,28$	[1] [1] [146]	5	[248]	1041	[133]	p	[133]	0,92	[16]	—	—	—	—
Zn_3As_2	Тетрагональная D^{15}_{4h}[3*]	$a = 8,32$ $c = 11,76$	[1] [1]	5,58	[123]	1288	[133]	p	[133]	1,0	[10]	—	—	0,09	[248]
ZnSb	Орторомбическая D^{15}_{2h}	$a = 6,22$ $b = 7,74$ $c = 8,12$	[117] [117] [117]	6,38	[117]	819	[117]	p	[133]	0,5 (300°K) 0,59 (77°K) 0,61 (4,2°K)	[103] [103] [103]	—	—	0,01	[117]
Zn_3Sb_2	—	—	—	—	—	839	[16]	p	[16]	0,2	[16]	—	—	$4,3 \cdot 10^{-2}$	[242]
Zn_4Sb_3	Моноклинная	$a = 10,74$ $b = 12,20$ $c = 8,20$	[16] — [241]	—	—	836	[242]	p	[16]	1,2	[16]	—	—	—	—

Продолжение табл. 21.10

Соединение	Кристаллическая структура: Тип	Кристаллическая структура: a, b, c, Å	Литература	ρ, г/см³	Литература	$T_{пл}$, °K	Литература	Тип проводимости	Литература	E_g, эв	Литература	$\frac{\partial E_g}{dT}$, 10^{-4} эв/град	Литература	×, вт/см·град	Литература
CdP_2	Тетрагональная D_4^8	$a = 5,28$ $c = 19,70$	[241] [241]	4,18	[248]	—	—	—	—	1,93 2,02	[242] [248]	—	—	—	—
CdP_4	Моноклинная C_{2h}^5	$a = 5,27$ $b = 5,19$ $c = 7,66$	[111] [111] [111]	3,90	[248]	—	—	p	[248]	1,0	[111]	—	—	—	—
Cd_3P_2	Тетрагональная D_{4h}^{15}	$a = 8,75$ $c = 12,22$	[1] [1]	5,60	[123]	970	[123]	n	[248]	0,55	[54]	—	—	—	—
$CdAs_2$	Тетрагональная D_4^{10}	$a = 7,953$ $c = 4,675$	[16] [241]	—	—	894	[133]	n	[133]	1,13 1,0	[16] [15]	—	—	0,41	[248]
Cd_3As_2	Тетрагональная D_{4h}^{15} 4*	$a = 8,95$ $c = 12,28$	[1] [1]	6,25	[123]	994	[133]	n	[133]	0,14 0,13	[76] [123]	—5,8	[76]	0,03 (100°K)	[134]
CdSb	Орторомбическая D_{2h}^{15}	$a = 6,47$ $b = 8,24$ $c = 8,53$	[117] [117] [117]	6,92	[117]	729	[133]	p 5*	[117]	0,5 0,56	[117] [117]	—5,4	[117]	0,011	[117]
Cd_3Sb_2	Моноклинная 6*	$a = 7,20$ $b = 3,51$ $c = 6,16$	[1] [1] [1]	—	—	723	[242]	p	[16]	0,3 0,7	[242] [16]	—	—	—	—
Cd_4Sb_3	Тригональная D_{3d}	$a = 22,45$ $c = 13,04$	[241] [241]	—	—	733	[242]	p 5*	[16]	1,25	[16]	—	—	(0,94—1,9)× ×10^{-2}	[242]

* Существует также модификация C_{2h}^5 ($a = 8,85$ Å, $b = 7,29$ Å, $c = 7,56$ Å) [241].

2* Существует также модификация C_{2h}^5 ($a = 9,28$ Å, $b = 7,68$ Å, $c = 8,03$ Å) [241].

3* Существует также модификация D_{4h}^{20} ($a = 11,78$ Å, $c = 23,65$ Å) [241].

4* Существуют также модификации D_{4h}^{20} и C_{4v}^{12} ($a = 12,66$ Å, $c = 25,47$ Å) [241].

5* Введение ряда примесей приводит к проводимости n-типа [16, 117].

6* Существует также модификация C_{3m} ($a = 11,44$ Å, $c = 11,35$ Å) [241].

Соединение	T_D, °K	Литература	m_n/m_0	Литература	m_p/m_0	Литература	μ_n, $\frac{см^2}{в \cdot сек}$	Литература	μ_p, $\frac{см^2}{в \cdot сек}$	Литература	Примечания	Литература
Be_3Sb_2	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
Mg_3Sb	—	—	$m_d = 3{,}1\ m_0$	[15]	—	—	20	[16]	100 ($\sim T^{-3/2}$) 82	[10] [123]	$\alpha = 600$ *мкв/град*	[16]
Ca_3Sb_2	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
ZnP_2	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
Zn_3P_2	—	—	—	—	—	—	—	—	10	[248]	—	—
$ZnAs_2$	—	—	0,345	[248]	2,45	[248]	$\mu_n/\mu_p = 1{,}6$ $\mu_n/\mu_p = 4$	[242] [248]	50	[16] [133]	—	—
Zn_3As_2	—	—	1,7	[16]	0,65	[16]	10 $(T/300)^{-1,1}$	[135]	10 17 ($\sim T^{-1,64}$)	[136] [16]	—	—
ZnSb	225	[117]	$m_\parallel = 0{,}175\ m_0$ $m_\perp = 0{,}146\ m_0$	[117] [133] [117]	0,53 $m_d = 0{,}42\ m_0$	[18] [217]	10 60 ($\sim T^{-2,3}$)	[123] [18]	700 ($\sim T^{-3/2}$)	[50]	$\alpha = 800$ *мкв/град* $n_i = 10^{15}$ *см*$^{-3}$ μ анизотропна	[117] [18]
Zn_3Sb_2	—	—	—	—	—	—	—	—	200	[16]	Имеется несколько модификаций	[16]
Zn_4Sb_3	—	—	—	—	~0,1	[242]	—	—	980	[16]	$\alpha = 157$ *мкв/град*	[16]

Продолжение табл. 21.10

Соединение	T_D, °K	Литература	m_n/m_0	Литература	m_p/m_0	Литература	μ_n, $\frac{см^2}{в \cdot сек}$	Литература	μ_p, $\frac{см^2}{в \cdot сек}$	Литература	Примечания	Литература
CdP_2	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
CdP_4	—	—	—	—	—	—	150	[111]	—	—	—	—
Cd_3P_2	—	—	0,09 0,05 0,057	[77] [188] [208]	—	—	3000 ($\sim T^{-1,1}$) 14 000	[54] [208]	—	—	α (300°K) ~ ~150 *мкв/град* α (50°K) ~ ~ 50 *мкв/град* ρ (300°K) $\approx 3\times \times 10^{-7}$ *ом·см*	[208]
$CdAs_2$	—	—	$m_\parallel = 0{,}15\ m_0$ $m_\perp = 0{,}58\ m_0$ $m_d = 0{,}37\ m_0$	[133]	$m_\parallel = 0{,}094\ m_0$ $m_\perp = 0{,}346\ m_0$ $m_d = 0{,}22\ m_0$	[133] [120] [120]	$\parallel$ оси a 100 $\parallel$ оси c 400 300	[133] [133] [123]	400	[123]	—	—
Cd_3As_2	—	—	$m_d = 0{,}046\ m$ $m_1 = 0{,}012\ m_0$ $m_2 = 0{,}2\ m_0$	[52] [137] [137]	0,12	[242]	18 000 30 000 (100°K) 60 000 (1,5°K) $\mu_1 = 13\,500$ * $\mu_2 = 2\,500$ *	[16] [134] [134] [137] [137]	430	[16]	Зона проводимости состоит из двух подзон с энергетическим зазором $\Delta E = 0{,}4$ *эв* $\Delta E = 0{,}15$—$4{,}5\times \times 10^{-4}\ T$ *эв*	 [137] [136]
CdSb	180	[117]	$m_\parallel = 0{,}14\ m_0$ $m_\perp = 0{,}159\ m_0$	[133] [117]	$m_p = (0{,}1 \div \div 0{,}2)\ m_0$ $m_p = (0{,}3 \div \div 0{,}35)\ m_0$	[135] [242]	$\mu_a = 2{,}1\times \times 10^6\ T^{-1,5}$ $\mu_b = 1{,}7\times \times 10^6 \cdot T^{-1,5}$ $\mu_c = 2{,}2\times \times 10^6 \cdot T^{-1,5}$ a, b, c —кристаллографнческие направления 300 350 660 (297)°K	[91] [91] [91] [135] [123] [242]	$\mu_a = 7{,}15 \cdot 10^5\times \times T^{-1,4}$ $\mu_b = 1{,}13 \cdot 10^5\times \times T^{-1,1}$ $\mu_c = 8{,}57 \cdot 10^5\times \times T^{-1,3}$ 900—2000 ($\sim T^{-3/2}$)	[91] [91] [91] [117]	Чистые образцы p-типа При легировании удается получить n-тип $\alpha = 800$ *мкв/град*	 [117]
Cd_3Sb_2	—	—	—	—	—	—	—	—	120	[242]	—	—
Cd_4Sb_3	—	—	—	—	—	—	—	—	900	[242]	—	—

* Подвижности легких и тяжелых электронов.

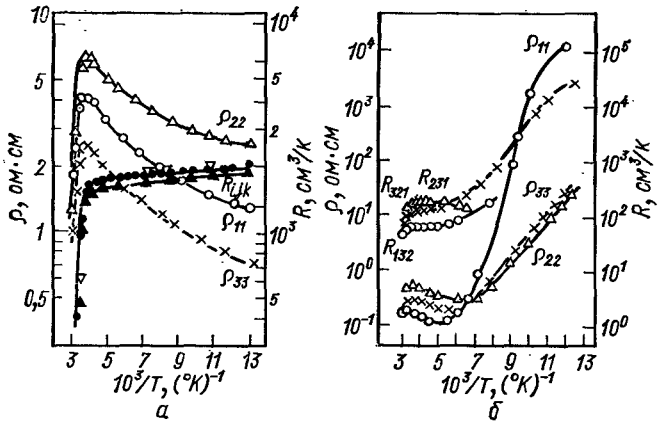


Рис. 21.38. Зависимость от температуры постоянной Холла R и удельного сопротивления ρ для трех основных направлений в p-GdSb и n-GdSb (легирующая примесь Ga) (б) [241].

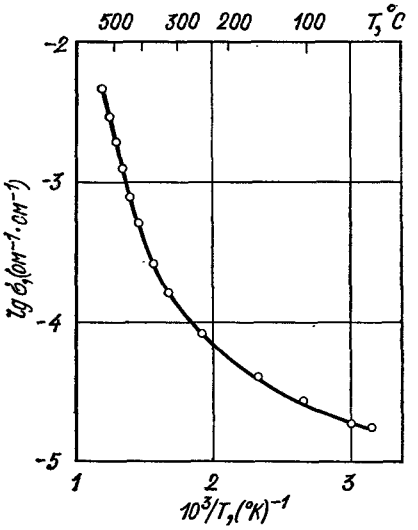


Рис. 21.39. Зависимость удельной проводимости σ в Ca_3Sb_2 от температуры [16].

Полупроводниковые соединения типа $A^{II}B^{VI}$

Все соединения этого типа являются фазами переменного состава. Полиморфизм и политипизм, свойственные многим из них, приводят к сильной зависимости структурно чувствительных свойств от условий выращивания кристалла и термической обработки.

Наиболее изученные полупроводники кристаллизуются в решетках типа сфалерита (T_d^2) или вюрцита (C_{6v}^4) и имеют прямую зонную структуру (экстремумы зоны проводимости и валентной зоны расположены в точке $k = 0$). Кристаллы кубической структуры (сфалерит) изотропны; одна из подзон их валентной зоны отщеплена за счет спин-орбитального взаимодействия Δso (рис. 21.40). Кристаллы гексагональной структуры (вюрцит) слабо анизотропны (этой анизотропией часто пренебрегают); наличие дополнительного взаимодействия Δ_{cr} (кристаллическое поле некубического кристалла) при-

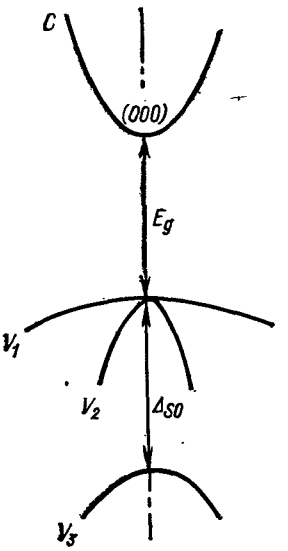


Рис. 21.40. Зонная структура полупроводников типа $A^{II}B^{VI}$ (сфалерит) [138].

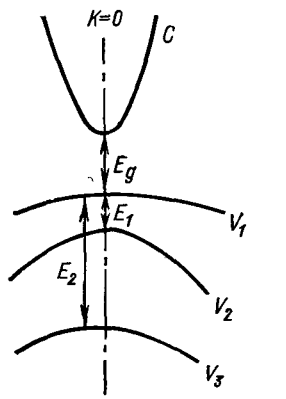


Рис. 21.41. Зонная структура полупроводников типа $A^{II}B^{VI}$ (вюрцит) [138].

водит к расщеплению валентной зоны на три подзоны (рис. 21.41). Экспериментально определяемые оптическими методами значения расщепления E_1 и E_2 связаны с Δ_{so} и Δ_{cr} соотношениями [138]

$$E_{1,2} = \frac{1}{2}(\Delta_{so} + \Delta_{cr}) \mp \left[\frac{1}{4}(\Delta_{so} + \Delta_{cr})^2 - \frac{2}{3}\Delta_{so}\,\Delta_{cr}\right]^{1/2}.$$

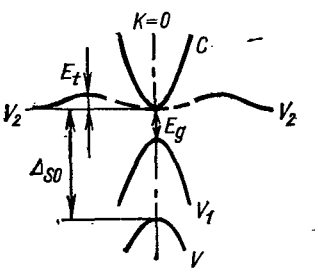


Рис.21.42. Зонная структура HgSe и HgTe [138, 199, 200].

HgSe и HgTe имеют сложную зонную структуру с перекрывающимися зонами (рис. 21.42). Энергия перекрытия $E_t \sim 0{,}001$ эв [199, 200] (по другим данным $E_t = 0{,}02$ эв (HgTe); $E_t = 0{,}07$ эв (HgSe) [138], $E_t = 0{,}018$ эв (HgSe) [112]).

Таблица 21.11

Параметры валентной зоны соединений типа $A^{II}B^{VI}$ [138]

Тип структуры и соединение	Δ_{so}, эв	Δ_{cr}, эв	E_1, эв	E_2, эв
Сфалерит				
CdTe	0,8; 0,9	—	—	—
HgSe	0,45*	—	—	—
HgTe	1,1	—	—	—
ZnS	0,072	—	—	—
ZnSe	0,43	—	—	—
ZnTe	0,9	—	—	—
Вюрцит				
CdS	0,065	0,027	0,015	0,025
CdSe	0,42	0,041	0,078	0,433
ZnO	—	—	0,007**	0,052**
ZnS	0,092	0,055	0,029	0,117

* По данным [108] $\Delta_{so} = 0{,}38$ эв.
** По данным [159].

Электрофизические свойства ряда соединений рассматриваемого типа представлены на рис. 21.43—21.56.

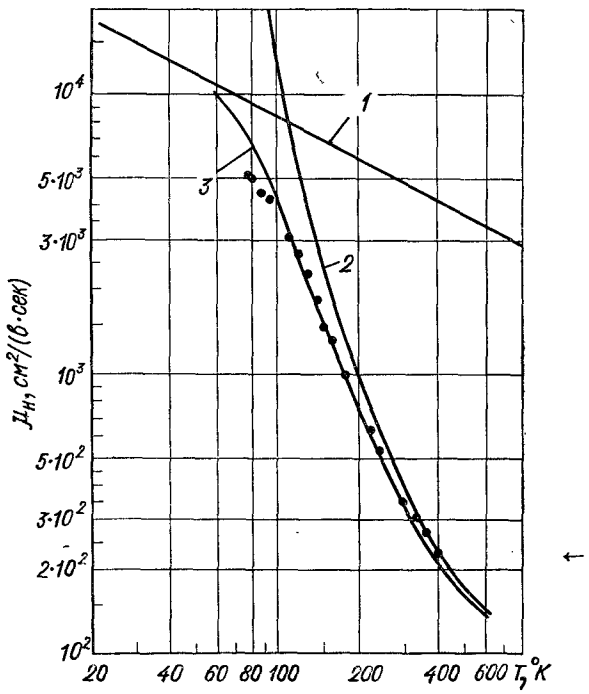


Рис. 21.43. Зависимость холловской подвижности μ_H электронов в нелегированном n-CdS от температуры [138]:

● — эксперимент; сплошные линии — теоретические зависимости холловской подвижности μ_H в собственном образце для случаев пьезоэлектрического рассеяния (*1*), рассеяния на оптических фононах (*2*) и совместного действия обоих механизмов рассеяния (*3*).

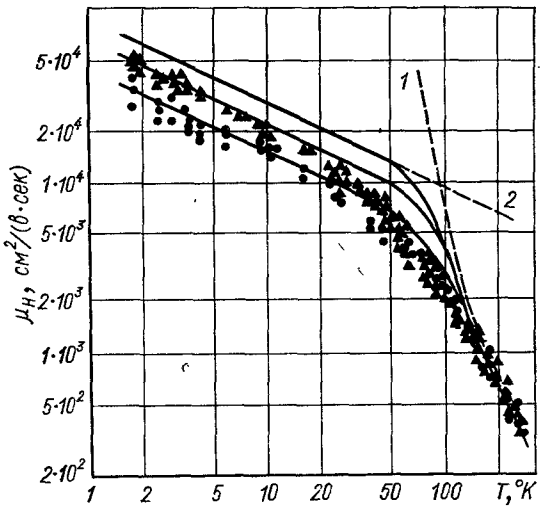


Рис. 21.44. Зависимость холловской подвижности μ_H фотовозбужденных электронов в CdS от температуры [138]:

▲ — ток ⊥ к оси c; ● — ток ∥ оси c; сплошные линии — теоретические кривые, рассчитанные для случая совместного действия рассеяния на оптических фононах (*1*) и пьезоэлектрического рассеяния (*2*).

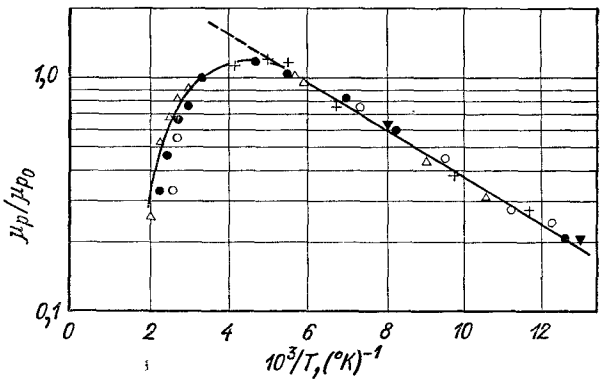


Рис. 21.45. Зависимость дрейфовой подвижности μ_p дырок в CdS, отнесенной к подвижности дырок μ_{p0} при температуре 20° С, от температуры [138]. Точки — данные различных авторов.

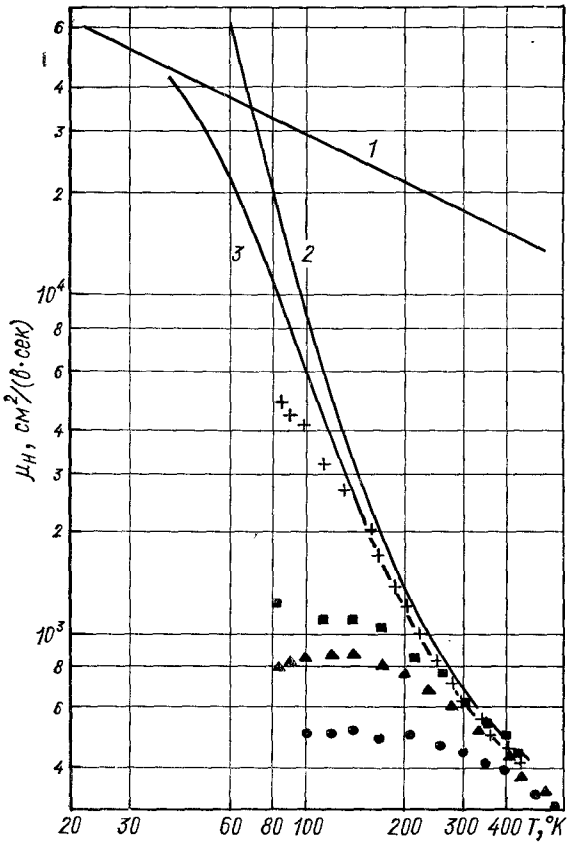


Рис. 21.46. Зависимость холловской подвижности μ_H электронов в n-CdSe от температуры [138]:

эффективная концентрация доноров (Ga), $см^{-3}$: +—$1 \cdot 10^{16}$ (нелегированный образец); ■ — $1{,}4 \cdot 10^{17}$; ▲ — $2{,}4 \cdot 10^{17}$; ● — $2{,}9 \times 10^{18}$; сплошные кривые — теоретические зависимости для случаев пьезоэлектрического рассеяния (1), рассеяния на оптических фононах (2) и совместного действия обоих механизмов рассеяния (3).

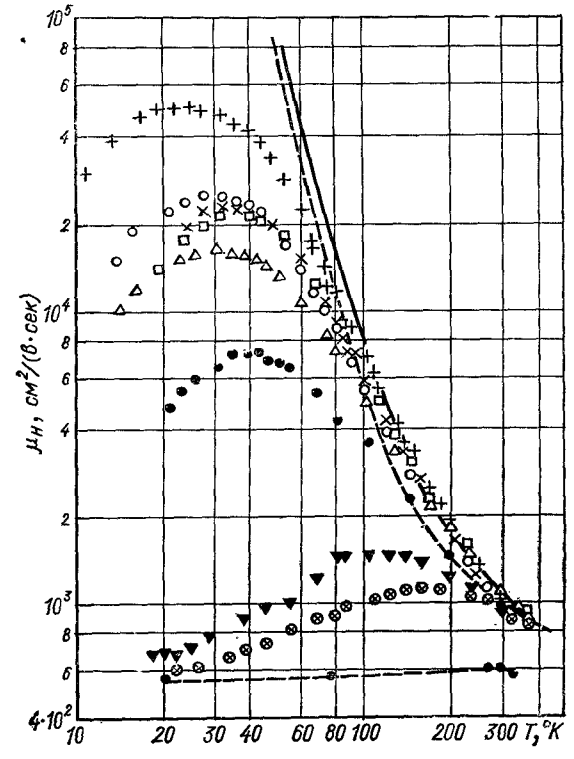


Рис. 21.47. Зависимость холловской подвижности μ_H электронов в n-CdTe от температуры [138]:

+, ○, ×, □, △ — нелегированные образцы, прошедшие зонную очистку; ○ — образец, отожженный в избытке кадмия после зонной очистки; ▼, ⊕, ● — образцы, легированные Nd, In и I соответственно; сплошная кривая — теоретическая зависимость для случая рассеяния на оптических колебаниях с учетом температурной зависимости статической диэлектрической проницаемости; пунктир — без учета этой зависимости.

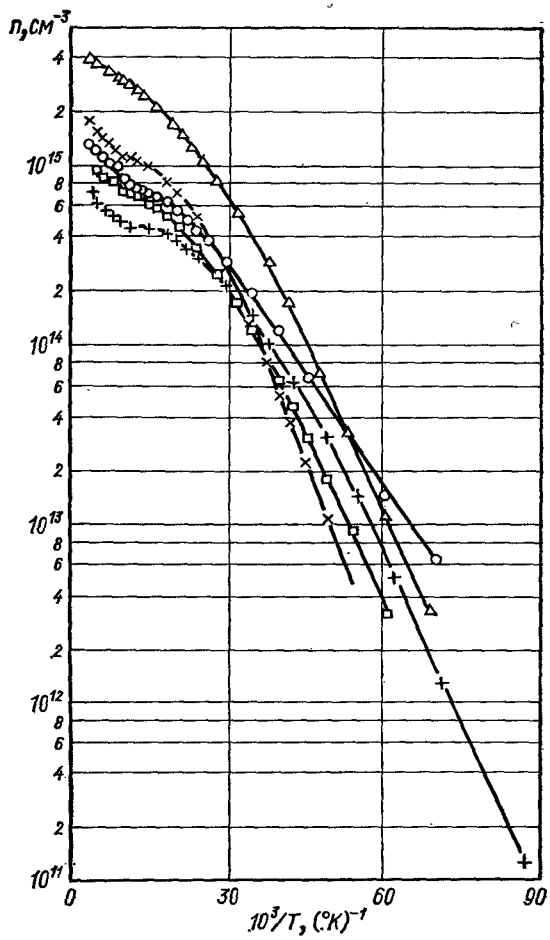


Рис. 21.48. Зависимость концентрации электронов в *n*-CdTe от температуры [138]. Обозначения см. рис. 21.47.

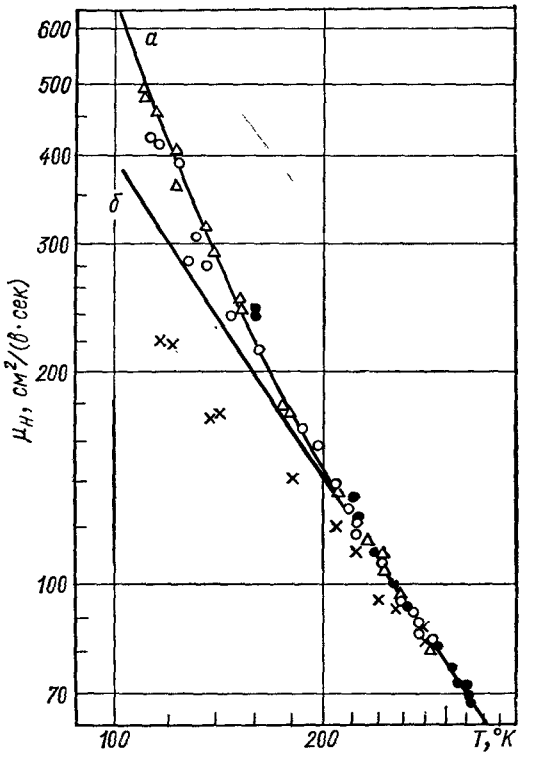


Рис. 21.49. Зависимость холловской подвижности дырок в *p*-CdTe от температуры [138].

Кривые *а* и *б* рассчитаны соответственно по формулам $\mu_H = 57\ [\exp\ (252/T)-1]$, $\mu_H = 4 \cdot 10^5 \cdot T^{-3/2}$; удельное сопротивление образцов при $T = 293$ °K, *ом·см*: ● — $2{,}2 \cdot 10^2$; ○ — $1{,}5 \cdot 10^3$; × — $1{,}9 \cdot 10^2$; △ — $2{,}1 \cdot 10^2$.

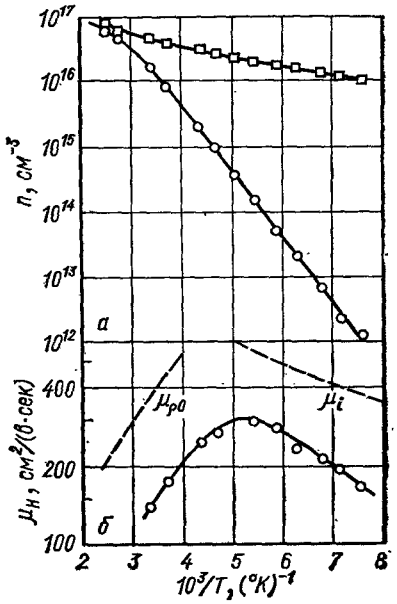


Рис. 21.50. Зависимость концентрации электронов (*а*) и холловской подвижности μ_H электронов (*б*) в ZnS от температуры [138]:

○ — гексагональный ZnS, легированный Al и отожженный при 1050°K; □ — кубический ZnS, легированный I и отожженный при 950° K. Штриховая линия (μ_{ρ_0}) — теоретическая зависимость для случая рассеяния на поляризованных оптических колебаниях, пунктир (μ_i) — теоретическая зависимость для случая рассеяния на заряженных примесях.

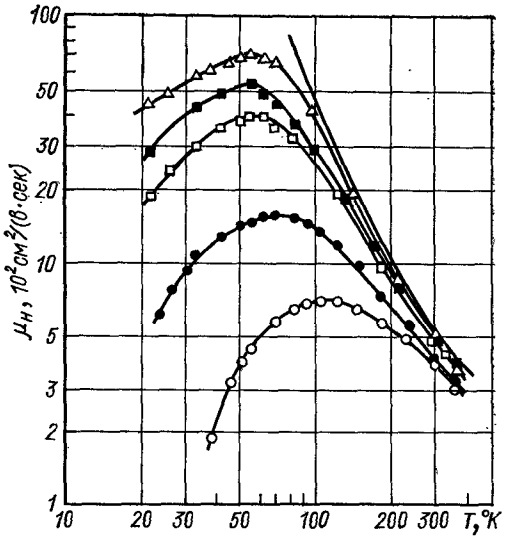


Рис. 21.51. Зависимость холловской подвижности для n-ZnSe от температуры [138] при различной концентрации доноров N_D и акцепторов N_A, 10^{16} $см^{-3}$:

△ — $N_D = 0{,}34$, $N_A = 0{,}13$; ■ — $N_D = 1{,}8$, $N_A = 0{,}5$; □ — $N_D = 1{,}05$; $N_A = 0{,}75$; ● — $N_D = 3{,}7$, $N_A = 0{,}5$; ○ — $N_D = 7{,}4$, $N_A = 3{,}4$.

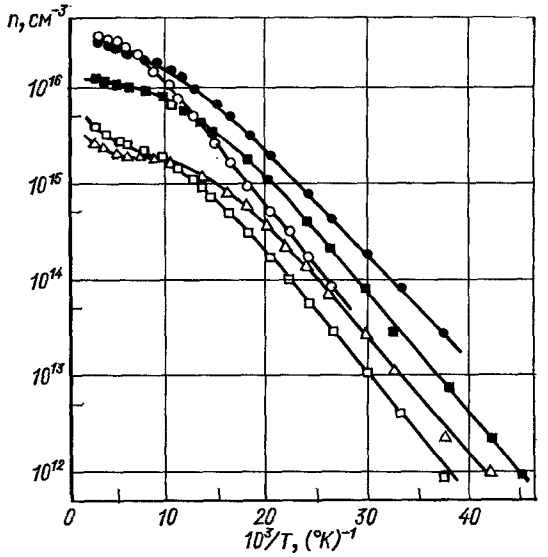
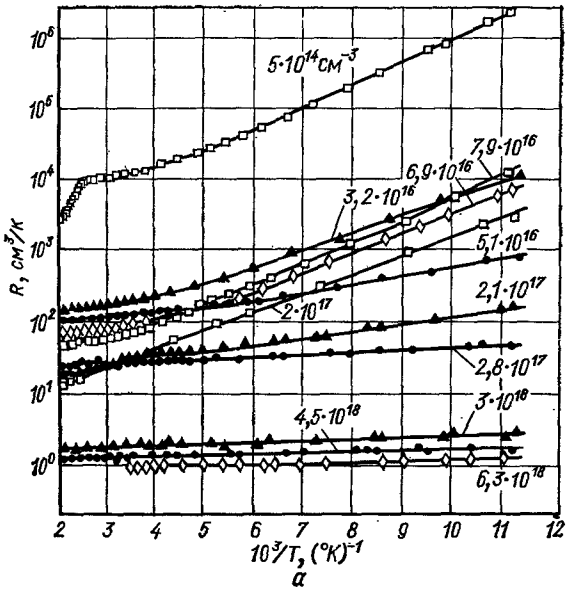


Рис. 21.52. Зависимость концентрации n электронов в n-ZnSe от температуры [138]. Обозначения см. рис. 21.51.



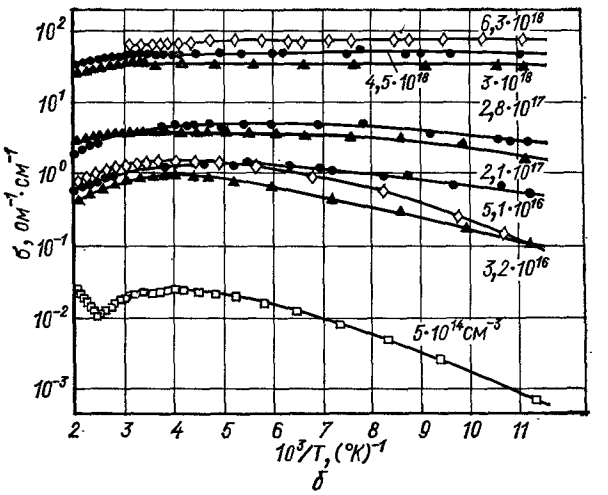
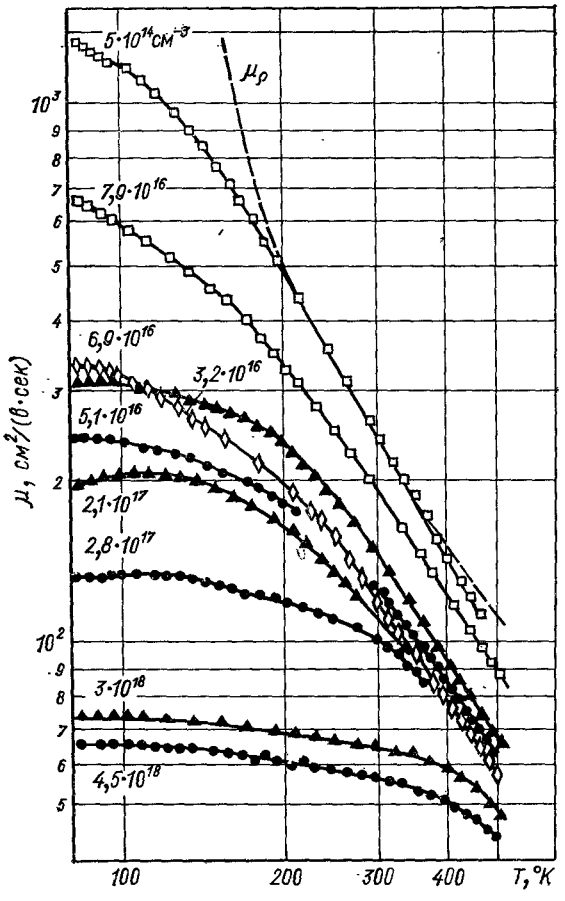


Рис. 21.53. Зависимость постоянной Холла (*а*) и удельной проводимости (*б*) для p-ZnTe от температуры [235]. Легирующая примесь: ◇ — Cs; □ — Te; ▲ — P; ● — Li; числа у кривых — концентрация носителей при $T = 300$ °K, $см^{-3}$.



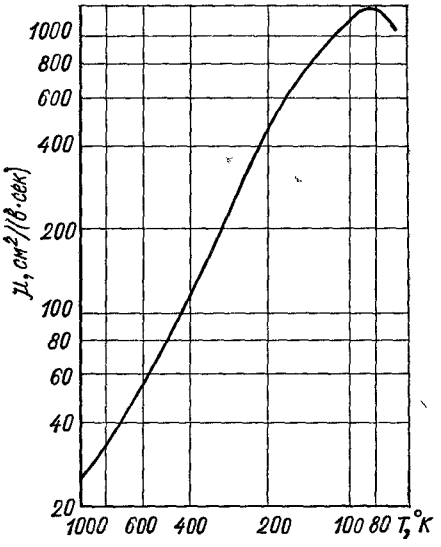


Рис. 21.55. Зависимость подвижности μ для ZnO от температуры [10].

Рис. 21.54. Зависимость подвижности μ в *p*-ZnTe от температуры [235].

Обозначения см. в подписи к рис. 21.53; пунктирная кривая—теоретическая зависимость.

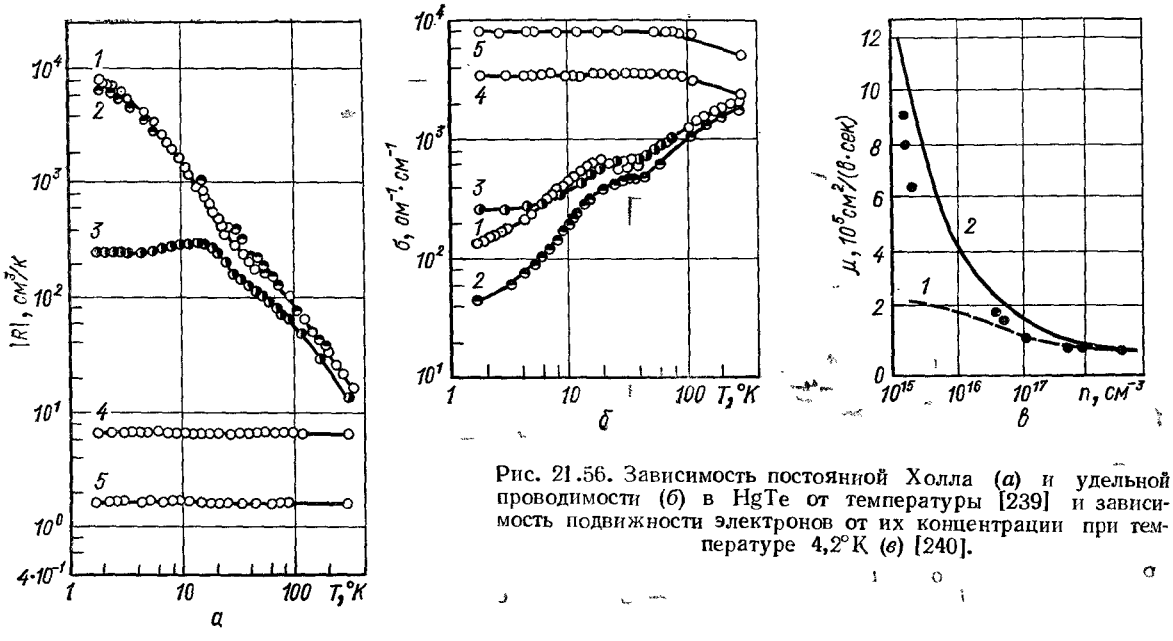


Рис. 21.56. Зависимость постоянной Холла (*а*) и удельной проводимости (*б*) в HgTe от температуры [239] и зависимость подвижности электронов от их концентрации при температуре 4,2°К (*в*) [240].

Электрофизические свойства полупроводниковых соединений типа $A^{II}B^{VI}$

Соединение	Кристаллическая структура: тип	Кристаллическая структура: a, b, c, Å	Литература	ρ, $\frac{г}{см^3}$	Литература	$T_{пл}$, °К	Литература	E_g, эв	Литература	$\frac{dE_g}{dT}$, $10^{-4}\ \frac{эв}{град}$	Литература	$\frac{dE_g}{dP}$, $10^{-6}\ \frac{эв}{бар}$	Литература	Тип проводимости	Литература
ZnO	Гексагональная C_{6v}^4	Тип вюрцита $a=3,21$ $c=5,19$	[1] [1]	5,664 5,60	[123] [121]	2248	[123]	3,43 3,35	[66] [144]	—8	[144]	0,6—1,9	[10]	n	[16]
ZnS	Кубическая T_d^2	Тип сфалерита* $a=5,41$	[138]	4,10	[140]	1923	[123]	3,54[2]* 3,6 3,67(w) 3,91(w)	[123] [114] [138] [123] [138]	—5,3 —3,8(w)[2]*	[114] [114]	5,7 9(w)[2]*	[114] [114]	n	[16]
ZnSe	Кубическая T_d^2	Тип сфалерита $a=5,668$	[138]	5,42 5,26	[121] [130]	1788	[123]	2,78 2,7 2,82	[138, 142] [114] [138]	—7,2 ($30<T<400$°К)	[138]	6	[114]	n, p	[138]
ZnTe	Кубическая T_d^2	Тип сфалерита $a=6,104$	[138]	5,68	[141]	1512	[123]	2,34 2,26 2,2 2,1	[142] [138] [114] [47]	—	—	6	[114]	p	[138]
CdO	Кубическая O_h^5	$a=4,70$	[1]	8,15	[216]	1700	[123]	2,3 2,68 2,4	[123] [59] [143]	—6	[59]	—	—	n	[60]
CdS	Гексагональная C_{6v}^3	Тип вюрцита 3* $a=4,136$ $c=6,713$	[138] [138]	4,82	[139]	2023	[123]	2,52(w)[2]* 2,4 (s) 2,58(w)	[142] [214] [138]	—4,4 ($77<T<300$°К)	[138]	3,3 0,4	[114] [123]	n	[138]
CdSe	Гексагональная C_{6V}^4	Тип вюрцита 3* $a=4,30$ $c=7,01$	[138] [138]	5,81	[139]	1531	[123]	1,77 1,67 1,8	[142] [138] [114]	—4,6 ($90<T<400$°К)	[144]	—	—	n	[138]
CdTe	Кубическая T_d^2	Тип сфалерита $a=6,48$	[138]	6,20 5,86	[121] [139]	1371	[123]	1,529 1,5 (300°К) 1,6(77°К) 1,605 (4,2°К)	[68] [236] [236] [236]	—3,0 —5,6	[68] [236]	3,0 8,0	[218] [289]	n, p	[138]

Продолжение табл. 21.12

Соединение	Кристаллическая структура: тип	Кристаллическая структура: a, b, c, Å	Литература	ρ, $\frac{г}{см^3}$	Литература	$T_{пл}$, °К	Литература	E_g, эв	Литература	$\frac{dE_g}{dT}$, 10^{-4} $\frac{эв}{град}$	Литература	$\frac{dE_g}{dP}$, 10^{-6} $\frac{эв}{бар}$	Литература	Тип проводимости	Литература
HgS	Кубическая T_d^2	a=5,851[4*]	[138]	7,73	[121]	1750	[242]	2,0	[20, 114]	—	—	—	—	n	[114]
HgSe	Кубическая T_d^2	a = 6,084	[138]	7,1—8,2 8,26	[121] [139]	1071	[123]	0,2 0,22	[148] [156]	—	—	—	—	n	[138]
HgTe	Кубическая T_d^2	a = 6,460	[138]	8,17 8,42 8,12	[121] [139] [138]	943	[123]	0,115 (300 °K) 0,250 (77 °K) 0,302 (4,2 °K) 0,3	[33] [33] [38] [199]	+5	[253]	10	[84]	n, p	[114]

* Может кристаллизоваться в структуре типа вюрцита.
2* Знаком S отмечены данные, относящиеся к модификации типа сфалерита, w — типа вюрцита; непомеченные данные относятся к основной модификации.
3* Также может кристаллизоваться в структуре типа сфалерита.
4* Может кристаллизоваться в структуре типа сернистой ртути α-HgS; здесь описывается β-HgS.

Продолжение табл. 21.12

Соединение	m_n/m_0	Литература	m_p/m_0	Литература	μ_n, $\frac{см^2}{в \cdot сек}$	Литература	μ_p, $\frac{см^2}{в \cdot сек}$	Литература	g_n	Литература	g_p	Литература
ZnO	0,27	[123]	—	—	180	[123]	—	—	—1,94	[155]	—1,24—1,74	[155]
ZnS	0,23 0,25 0,27— —0,28(w)* m_d=0,1 m_0	[142] [114] [138] [15]	$m_{\parallel c} > m_0(w)$* $m_{\perp c}$=0,58$m_0(w)$ $m_d = 0,6\ m_0$ 0,5—1	[138] [138] [15] [114]	140 200	[138] [16]	5(700°K)	[138]	1,82 2,0$_{\parallel c}(w)$ 2,3$_{\perp c}(w)$*	[138] [138] [138]	1,04	[148]
ZnSe	0,18 0,17 0,15—0,17	[142] [138] [114]	0,6	[138]	530 260(300—550°K) 6000(55°K)	[138] [114] [153]	23 15(200—400°K)	[154] [114]	1,46	[148]	5,25	[148]
ZnTe	0,2 0,151	[114] [142]	0,154[2*] $m_d = 0,6m_0$ $m_d = 0,65m_0$	[229] [138] [181]	340 350($\sim T^{-3/2}$)	[138] [114]	110 100($\sim T^{-3/2}$)	[138] [16]	0,4	[148]	10,7	[148]

Соединение	m_n/m_0	Литература	m_p/m_0	Литература	μ_n, $\frac{см^2}{в \cdot сек}$	Литература	μ_p, $\frac{см^2}{в \cdot сек}$	Литература	g_n	Литература	g_p	Литература
CdO	0,1; 0,3 0,2	[143] [17]	—	—	120	[86]	—	—	1,81	[201]	—	—
CdS	0,205 0,1—03(s)* $m_d=0,165m_0$	[138] [114] [57]	$m_{\parallel c}=5,0\ m_0$ $m_{\perp c}=0,7\ m_0$ $m_d=1,34\ m_0$ $m_d=(0,4-0,5)\ m_0$	[138] [138] [21] [114]	350 $6,4\cdot10^4T^{-3/2}$ (50—200°K) $20(\sim T^{-3/2})(s)$*	[138] [138] [114]	15 50	[138] [46]	$1,78_{\parallel c}$ $1,72_{\perp c}$	[138] [138]	$1,15_{\parallel c}$ 1,00	[138] [148]
CdSe	0,131 0,13	[142] [138, 114]	$m_{1\parallel c}>m_0$ $m_{1\perp c}=0,45m_0$ $m_{1d}=0,63\ m_0$ $m_{2\perp c}=0,9\ m_0$	[138] [138] [22] [138]	650 580	[138] [114]	50	[114]	$+0,6_{\parallel c}$ $+0,51_{\perp c}$	[138] [138]	—	—
CdTe	0,095 0,111 0,14 0,11	[138] [142] [114] [15]	0,35 $m_{p1}=0,16\ m_0$ $m_{p2}=1,02\ m_0$	[15, 138] [236] [236]	1050 1200 3000(77°K) $5,7\cdot10^4$(30°K)	[138] [121] [121] [149]	$80(\sim T^{-3/2})$ 50	[114] [121]	—1,1	[202]	$-2_{\parallel c}$	[138]
HgS	—	—	—	—	20—50 60 250	[114] [92] [121]	—	—	—	—	—	—
HgSe	$m_{\parallel[001]}=0,0487m_0$ $m_{\parallel[111]}=0,0502m_0$ $m_{\parallel[110]}=0,0498m_0$	[156] [156] [156]	0,55 0,17(77—300°K)	[112] [84]	18 500 $(\sim T^{-3/2})$ 10^5(4,2°K)	[114] [156]	—	—	—36	[157]	—	—
HgTe	0,017 (300°K) 0,03(4,2°K)	[84, 114] [84]	0,16(300°K) 0,35(4,2°K)	[84] [84]	900 000(4,2°K) 100 000(77°K) 30 000(300°K)	[239] [239] [239]	100 $\mu_p=\mu_n/65$ ($T=77$°K)	[121] [145]	—25 —29 —40	[157] [236] [158]	—	—

* s — данные, относящиеся к модификации типа сфалерита, w — вюрцита; непомеченные данные относятся к основной модификации.
** Масса легких дырок.

Продолжение табл. 21.12

Соединение	$\varkappa$, $\frac{вт}{см \cdot град}$	Литература	T_D, °K	Литература	$\hbar\omega_l$, эв	Литература	$\hbar\omega_t$, эв	Литература
ZnO	—	—	416	[141]	0,0605 0,0732	[220] [254]	0,0545 0,0512	[220] [254]
ZnS	0,026	[138]	315(80°K) 310	[114] [140]	0,044	[138]	0,0394(ω)* 0,0367	[138] [138]
ZnSe	0,19	[138]	400(80°K)	[114]	0,031	[138]	0,0263	[138]
ZnTe	0,18	[138]	250(80°K)	[114]	0,026	[138] [254]	0,024 0,0219	[138] [254]
CdO	—	—	—	—	0,0654	[254]	0,0325	[254]
CdS	0,2	[138]	250—300	[114]	0,038	[138] [254]	0,0324 0,0301	[138] [254]
CdSe	0,043	[138]	230(80°K)	[114]	0,027 0,0263	[138] [254]	0,0263 0,0172	[142] [254]
CdTe	0,075	[138]	200(80°K) 158	[114] [236]	0,0212	[138, 254]	0,0173	[138, 254]
HgS	—	—	—	—	—	—	—	—
HgSe	0,019	[138]	212(80°K) 242(300°K)	[114] [114]	—	—	—	—
HgTe	0,019 0,016 0,027(p-тип)	[236] [138] [199]	141	[250]	~0,014 0,0171	[160] [252]	0,0146	[252]

* s — данные, относящиеся к модификации типа сфалерита, ω — вюрцита; непомеченные данные относятся к основной модификации.

Соединение	$\langle\varepsilon_0\rangle$*	Литература	$\langle\varepsilon_\infty\rangle$*	Литература	ε_{011}	Литература	ε_{033}	Литература	$\varepsilon_{\infty_{11}}$	Литература	$\varepsilon_{\infty_{33}}$	Литература
ZnO	8,5	[159]	4,0	[159]	7,55	[254]	8,63	[254]	3,69	[254]	3,69	[254]
ZnS	8,32	[138]	5,13	[138]	8,32	[138]	—	—	5,13	[138]	—	—

Соединение	$\langle\varepsilon_0\rangle$*	Литература	$\langle\varepsilon_\infty\rangle$*	Литература	ε_{011}	Литература	ε_{033}	Литература	$\varepsilon_{\infty_{11}}$	Литература	$\varepsilon_{\infty_{33}}$	Литература
ZnSe	9,1 8,81 8,33	[138] [254] [142]	5,75 5,9 5,9	[114] [138] [254]	9,12	[138]	—	—	5,9	[138]	—	—
ZnTe	10,1 9,67	[138] [142]	7,28 8,26	[138] [114]	10,1	[138]	—	—	7,28	[138]	—	—
CdO	21,9	[254]	5,4	[254]	—	—	—	—	—	—	—	—
CdS	9,3	[138]	5,2	[138]	9,02	[138]	9,53	[138]	5,17	[138]	5,23	[138]
CdSe	9,4 9,63	[138] [138]	5,98 6,10	[138] [142]	10,2	[138]	9,33	[138]	5,96	[138]	6,05	[138]
CdTe	10,6 9,65 10,6 11,0	[138] [142] [252] [161]	7,6 7,21 7,4 7,1	[114] [138] [252] [161]	10,6	[138]	—	—	7,21	[138]	—	—
HgS	30,7	[114]	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
HgSe	25,6 26 (10^4— —10^6 *гц*)	[114] [138]	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
HgTe	48 21,0 20,1	[114] [252] [254]	14 14 15,2	[138] [254] [252]	—	—	—	—	—	—	—	—

* Значение, усредненное по кристаллографическим направлениям.

Таблица 21.13

Свойства примесей в соединениях $A^{II}B^{VI}$

Соединение	E_D*, эв	Литература	E_A[2*], эв	Литература	E_A[3*], эв	Литература
ZnO	0,05 (доноры Zn, H)	[116]	—	—	—	—
ZnS	0,2—0,3	[138]	0,19 1,2 (Cu)	[138] [138]	—	—
ZnSe	0,19—0,23	[138]	0,11; 0,75 (Cu) 0,66 (Li)	[138] [154]	E_g—0,16	[138]
ZnTe	—	—	0,048 (V_{Zn}^{-});0,14 (V_{Zn}^{2-}) ; 0,15 (Cu); 0,11 (Ag); 0,22 (Au)	[138]	—	—
CdS	0,024—0,032 0,45: 0,63: 0,25[4*]	[138] [138]	0,17	[138]	E_g—0,09	[138]
CdSe	0,014—0,03	[138]	0,1	[138]	—	—
CdTe	0,011—0,022	[138]	0,05 (V_{Cd}^{-});0,33—0,35 (Cu); 0,3—0,33 (Ag); 0,33— —0,4 (Au)	[138]	E_g —0,056 E_g—0,6 (V_{Cd}^{2-})	[138]
HgSe	Доноры: Hg в междоузлиях, вакансии Se, Ge, Si	[114] [138]	—	—	—	—
HgTe	Доноры In, Ga, Al	[251]	Акцепторы: Cu, вакансии Hg, Ag, Au	[138] [114] [251]	—	—

* Энергия ионизации мелких донорных уровней, хорошо описывающихся «водородоподобной моделью». Донорами могут являться Al, Cu, In, Cl, Br, I, F, но основной вид доноров — врожденный дефект: междоузельный Cd или Zn.

2* Энергия ионизации мелких акцепторов; обычно это V_{Zn}^{-} (вакансия однократно заряженная), V_{Cd}^{-}, V_{Zn}^{2-}, V_{Cd}^{2-}, Cu, Ag, Au.

3* Энергия ионизации акцепторных уровней вблизи зоны проводимости. Там, где ие отмечено специально, — комплекс: дефект — примесь.

4* Неопознанные уровни.

Таблица 21.14

Полупроводниковые соединения типа $A^{II}B^{VII}$

Соединение	Кристаллическая структура: Тип	Кристаллическая структура: a, b, c, Å	Литература	E_g, эв	Литература	m_n/m_0	Литература	μ_n, см²/в·сек	Литература
CdF_2	Кубическая O_h^5	a=5,39	[1]	6,05	[26]	0,4	[26]	19	[26]
HgI_2	Орторомбическая C_{2v}^{12}	a=4,67 b=13,76 c=7,32	[1]	1,92—2,24 (черная) 2,11 (красная) 2,13	[242] [242] [10]	—	—	—	—

Соединения типа $A^{III}B^{IV}$—$A^{III}B^{VI}$

Соединения $A^{III}B^{IV}$. Соединение B_4C (плотность $\rho = 2{,}5 \div 2{,}6$ *г/см*^{3} [216]) проявляет полупроводниковые свойства. Ширина запрещенной зоны $E_g = 1{,}64$ *эв*, проводимость *p*-типа, $\alpha = 300$ *мкв/град*. При $T = 2623°$ К разлагается на элементы [16]. Кристаллическая структура — гексагональная, тип D^5_{3d}, $a = 5{,}60$ Å, $c = 12, 12$ Å [242].

Соединения $A^{III}B^{V}$. Для соединений типа $A^{III}B^{V}$ характерны высокая подвижность и малая эффективная масса электронов. Эти свойства обеспечивают им широкое применение. Изучены весьма подробно.

Кристаллизуются в структуру типа сфалерита (T^2_d). Зоны проводимости имеют, как правило, несколько минимумов, расположенных в точке $k = 0$ и на осях [111] и [100].

Абсолютный минимум Γ расположен в центре зоны Бриллюэна ($k = 0$) в InSb, InAs, InP, GaSb, GaAs (рис. 21.57); абсолютный минимум Δ — на оси [100] в GaP, AlSb, AlAs (рис. 21.58). Значения параметров зонной структуры — в табл. 21.15.

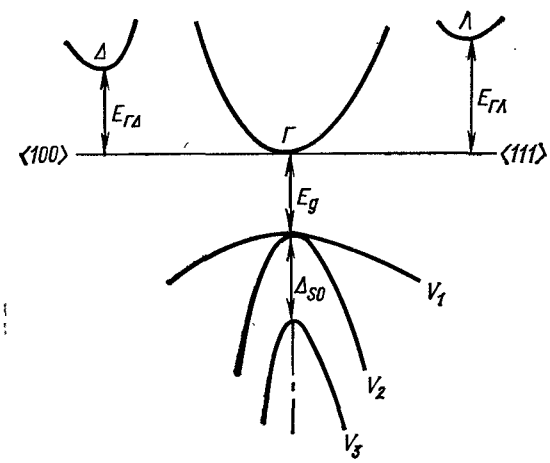


Рис. 21.57. Зонная структура InSb, InAs, InP, GaAs, GaSb [121, 170, 171].

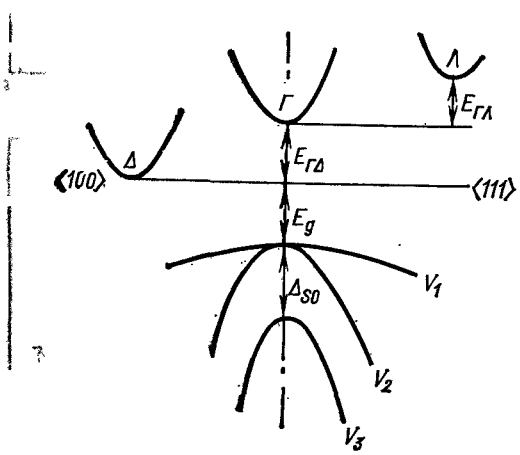


Рис. 21.58. Зонная структура GaP, AlSb, AlAs [121,170—172].

Валентная зона вырождена при $k = 0$. Максимум зоны легких дырок V_2 находится в точке $k = 0$; максимумы зоны тяжелых дырок V_1 расположены несколько выше (на 0,01—0,001 *эв*) и лежат на осях [111]. Имеется также зона V_3, отщепленная за счет спин-орбитального взаимодействия Δ_{so}.

Электрофизические свойства соединений рассматриваемого типа см. на рис. 21.59—21.83.

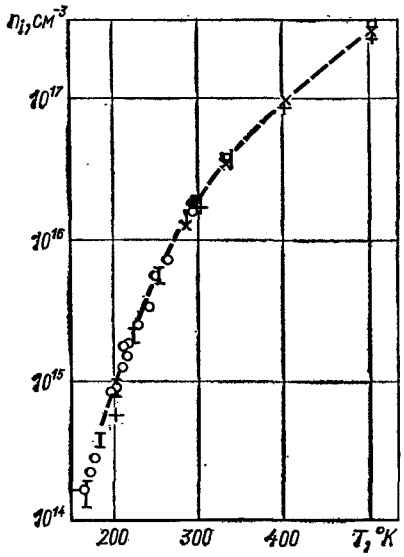


Рис. 21.59. Зависимость собственной концентрации n_i в InSb от температуры [27].

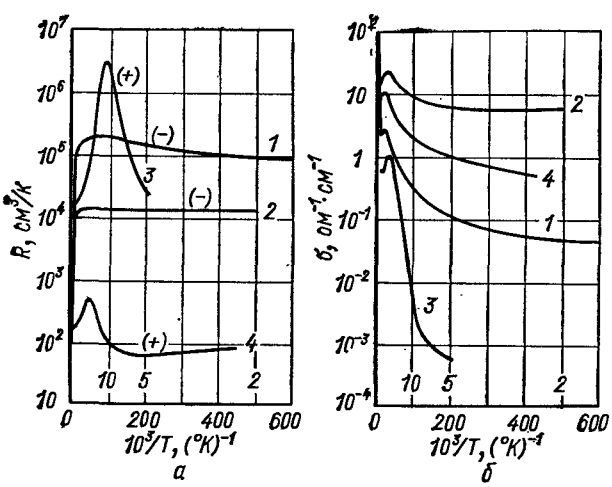


Рис. 21.60. Зависимости коэффициента Холла (*а*) и удельной проводимости (*б*) в InSb при низких температурах от температуры [27].

Эффективная концентрация доноров, $см^{-3}$:

1—$5\cdot10^{13}$, *2*—$5\cdot10^{14}$; эффективная концентрация акцепторов, $см^{-3}$: *3*—$4\cdot10^{14}$, *4*—$4\cdot10^{16}$ [(+) и (—) означают знаки коэффициента Холла].

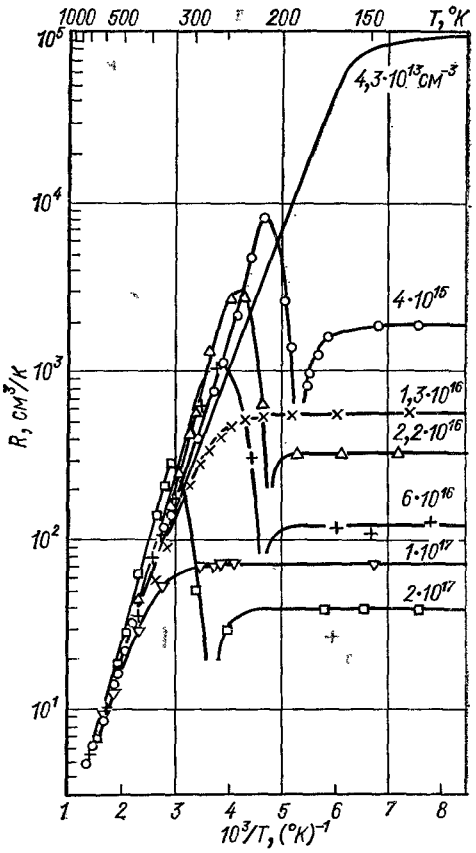


Рис. 21.61. Зависимость постоянной Холла в InSb для образцов *n*- и *p*-типа от температуры [170] при различной концентрации примесей; (*2, 4, 5, 7* сверху), — акцепторы, *1, 3, 6* — доноры, *см*$^{-3}$.

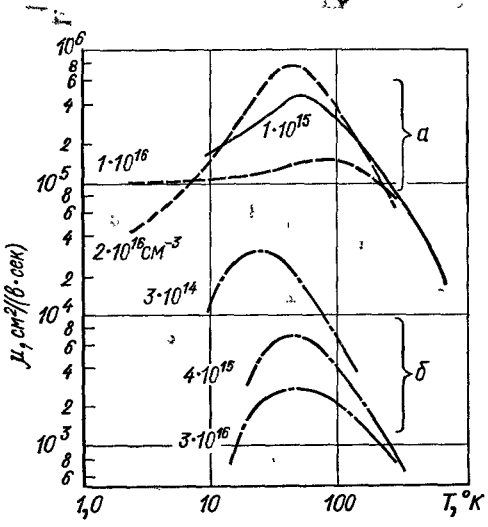


Рис. 21.63. Зависимость подвижности электронов (*а*) и дырок (*б*) в InSb от температуры при различной концентрации носителей [27].

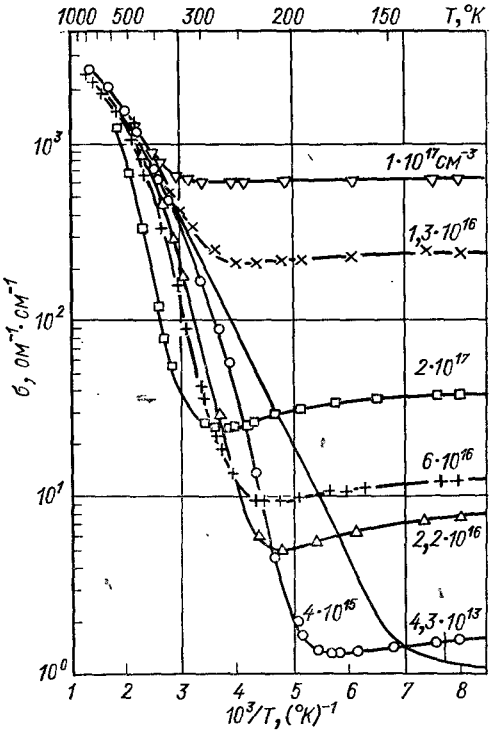


Рис. 21.62. Зависимость удельной проводимости InSb от температуры [170]. Обозначения см. в подписи к рис. 21.61.

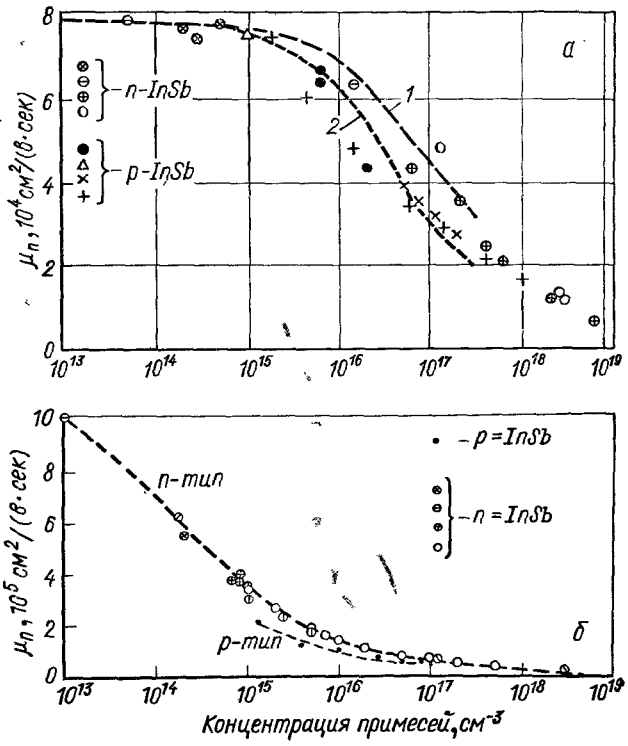


Рис. 21.64 Зависимость подвижности μ_n электронов при $T = 273$ (*а*) и 77° К (*б*) от концентрации примесей в InSb *n*- и *p*-типа [27]:

1 — теория для образцов *n*-типа; *2* — теория для образцов *p*-типа.

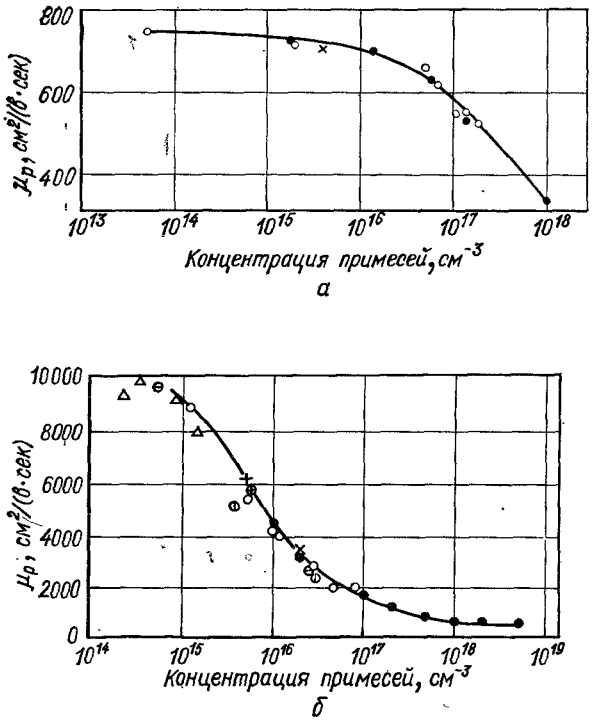


Рис. 21.65. Зависимость подвижности μ_p дырок при $T = 293$ (*а*) и 77°К (*б*) от концентрации примесей в InSb [27]. Точки — данные различных авторов.

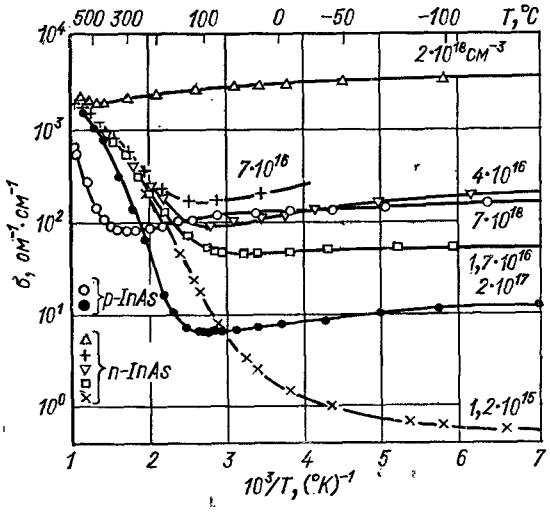


Рис. 21.66. Зависимость удельной проводимости InAs от температуры [170] при различной концентрации акцепторов в *p*-InAs и доноров в *n*-InAs.

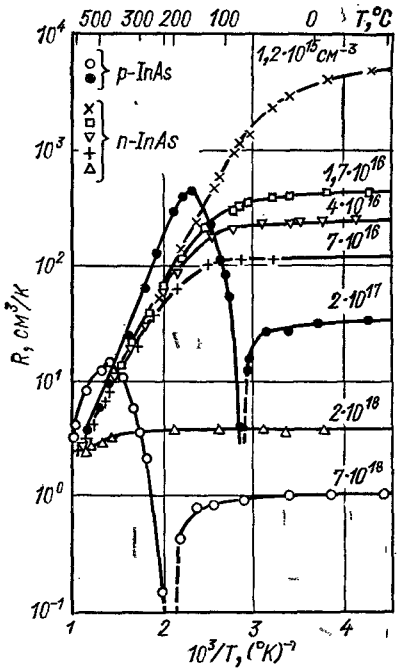


Рис. 21.67. Зависимость постоянной Холла в InAs от температуры [170].

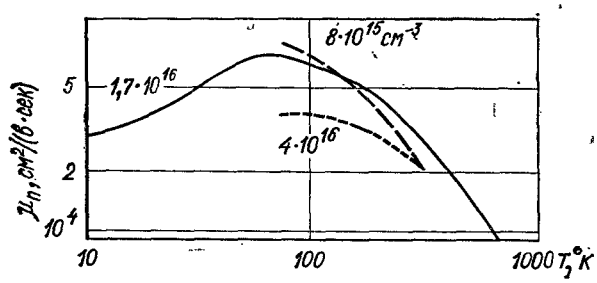


Рис. 21.68. Зависимость подвижности электронов в InAs от температуры [27].

Числа у кривых — концентрация носителей, *см*⁻³.

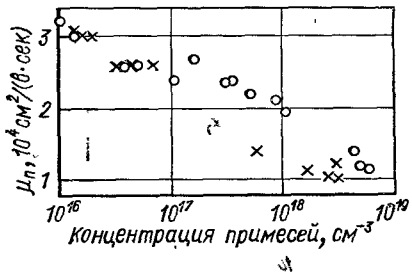


Рис. 21.69. Зависимость подвижности μ_n электронов при $T = 293$°К от концентрации примесей в *n*-InAs [27]:

○ — образцы, прошедшие термообработку; ✕ — необработанные образцы.

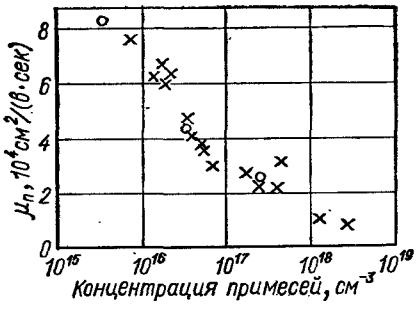


Рис. 21.70. Зависимость подвижности μ_n электронов при $T = 77°K$ от концентрации примесей в n-InAs [27]:
o — образцы, прошедшие термообработку; × — необработанные образцы.

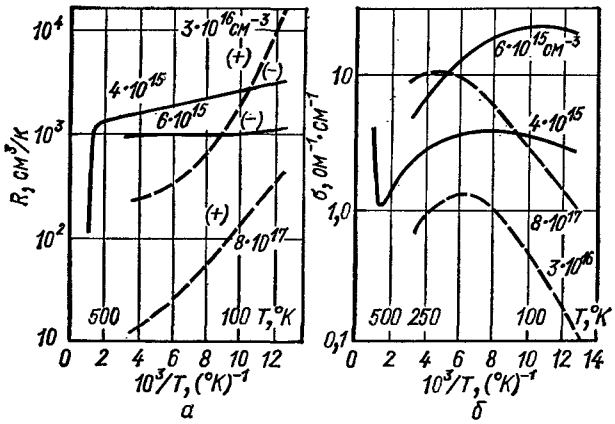
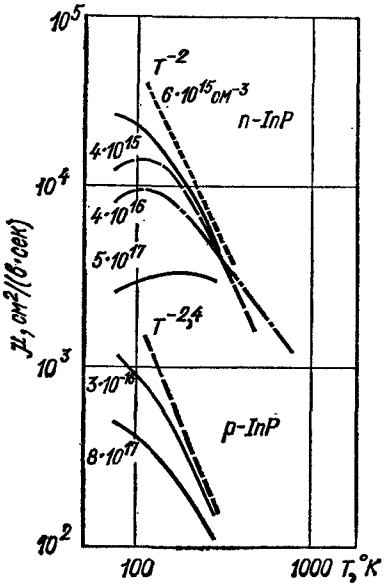
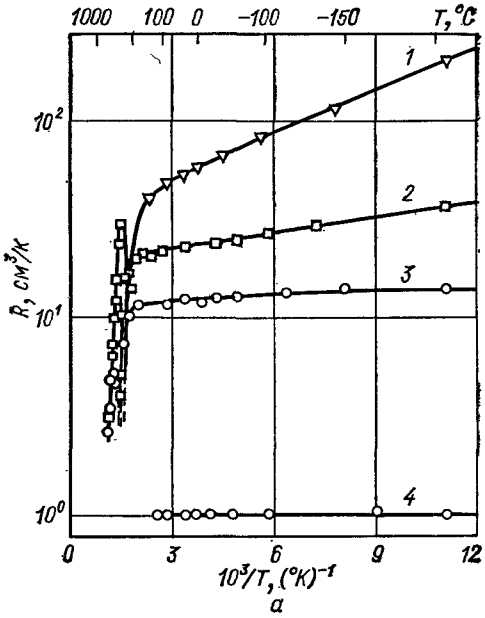


Рис. 21.71. Зависимость постоянной Холла (*а*) и удельной проводимости (*б*) в InP от температуры при различной эффективной концентрации доноров (сплошная кривая) и эффективной концентрации акцепторов (пунктир) [27].





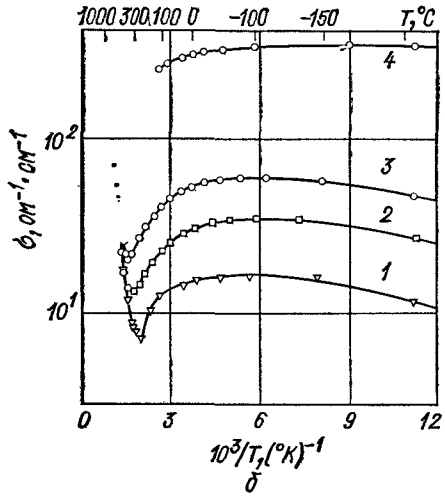


Рис. 21.73. Зависимости постоянной Холла (*а*) и удельной проводимости (*б*) в GaSb на одних и тех же образцах от температуры [170].

Рис. 21.72. Зависимость подвижности μ электронов и дырок в InP от температуры при различной эффективной концентрации доноров и эффективной концентрации акцепторов [27].

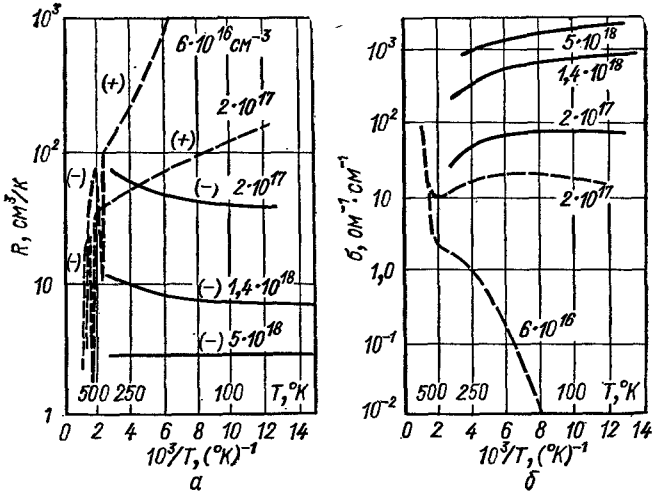


Рис. 21.74. Зависимости постоянной Холла (*а*) и удельной проводимости (*б*) в GaSb от температуры при различной эффективной концентрации доноров (сплошная кривая) и эффективной концентрации акцепторов (пунктир) [27].

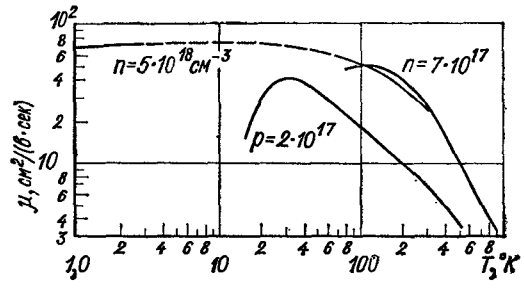


Рис. 21.75. Зависимость подвижности носителей в GaSb от температуры [27].

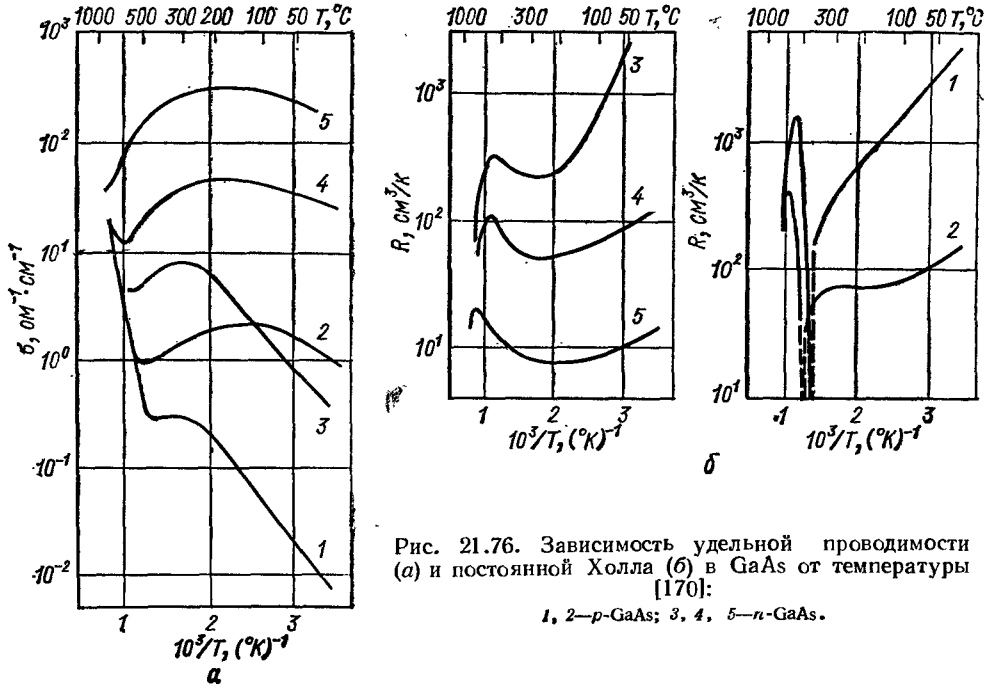


Рис. 21.76. Зависимость удельной проводимости (*а*) и постоянной Холла (*б*) в GaAs от температуры [170]:

1, *2*—*p*-GaAs; *3*, *4*, *5*—*n*-GaAs.

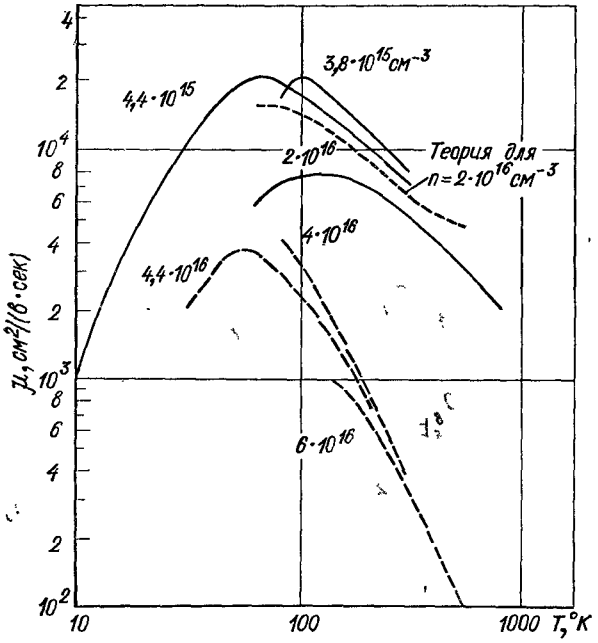


Рис. 21.77. Зависимость подвижности μ электронов (сплошные линии) и дырок (пунктир) в GaAs от температуры [27] при различной эффективной концентрации доноров и эффективной концентрации акцепторов.

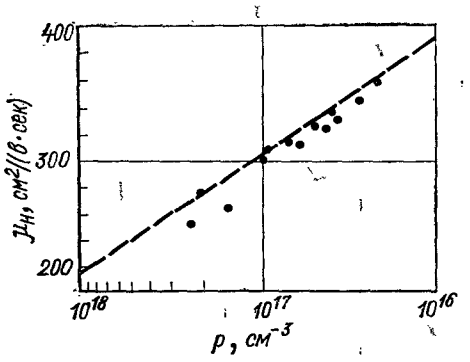


Рис. 21.79. Зависимость холловской подвижности μ_H дырок при $T = 300°$ К от их концентрации в p-GaAs [170].

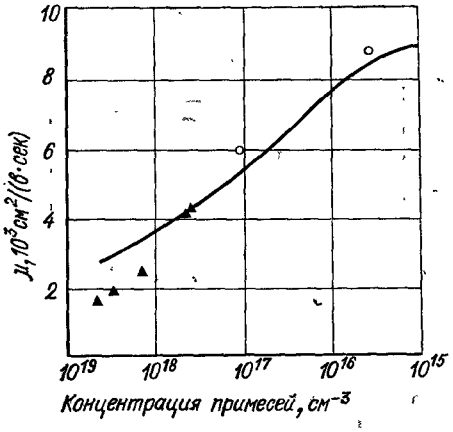


Рис. 21.78. Зависимость подвижности μ электронов при $T = 300°$К от концентрации примесей в GaAs.

Сплошная кривая — теоретическая зависимость для комбинированного рассеяния на полярных колебаниях и ионизованных примесях [170]; ○, ▲ — эксперимент.

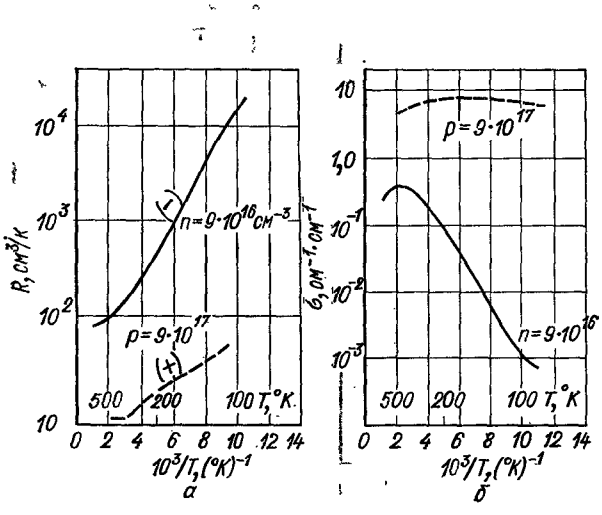


Рис. 21.80. Зависимость постоянной Холла (*а*) и удельной проводимости (*б*) в GaP от температуры [27].

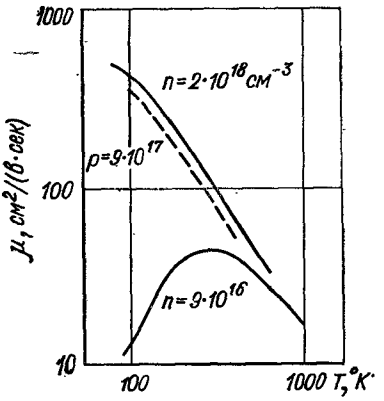


Рис. 21.81. Зависимость подвижности μ электронов и дырок в GaP от температуры [27].

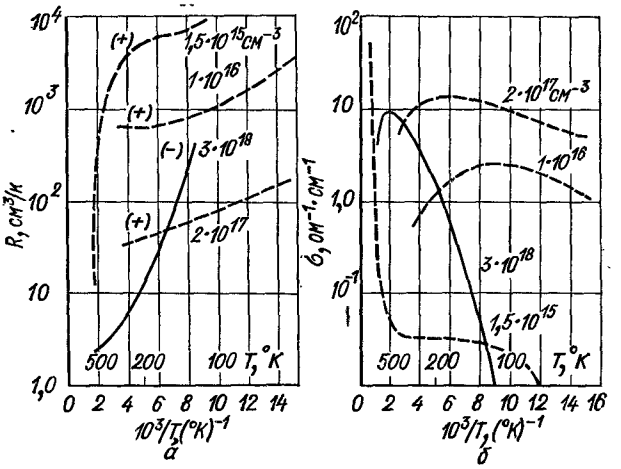


Рис. 21.82. Зависимость постоянной Холла (*а*) и удельной проводимости (*б*) в AlSb от температуры при различной эффективной концентрации доноров (образец легирован теллуром) и акцепторов [27].

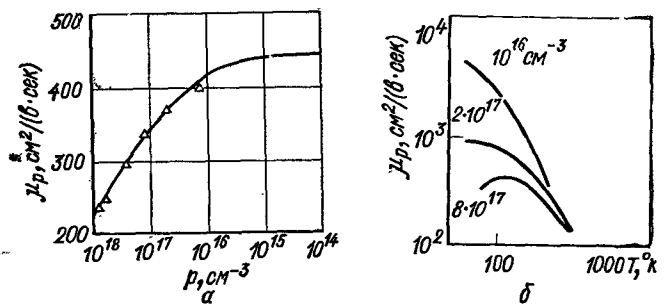


Рис. 21.83. Зависимость подвижности дырок в AlSb при $T = 293°$ К от их концентрации (*а*) и от температуры (*б*) [170].

Сплошная линия — теоретическая зависимость для комбинированного рассеяния на акустических фононах и ионизированных примесях.

Таблица 21.15

Электрофизические свойства полупроводниковых соединений $A^{III}B^{V}$ [2*]

Соединение	Кристаллическая структура: Тип	Кристаллическая структура: a, Å	Литература	ρ, $\frac{Ом}{см^3}$	Литература	$T_{пл}$, °K	Литература	T_D, °K	Литература	$\varkappa$, $\frac{вт}{см \cdot град}$	Литература	$\hbar\omega_l$, эв	$\hbar\omega_t$, эв	Литература	ε_0	Литература	ε_∞	Литература	μ_n, $\frac{см^2}{в \cdot сек}$	Литература	μ_p, $\frac{см^2}{в \cdot сек}$	Литература
BP	Кубическая T_d^2	4,537	[242]	2,89	[242]	2000—3000; 1250	[242] [242]	—	—	—	—	—	—	—	11,6	[242]	—	—	—	—	—	—
AlN	Гексагональная C_{6v}^4	a=3,104 c=4,965	[242]	3,26	[242]	2470*	[242]	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
AlP	Кубическая T_d^2	5,42	[1]	2,85	[123]	1770	[123]	588	[178]	0,92	[216]	0,0621	0,0545	[254]	9,83	[254]	7,56	[254]	50	[28]	150	[28]
AlAs	Кубическая T_d^2	5,62	[1]	3,6	[121]	1870	[123]	417	[121]	0,84	[121]	0,0501	0,0447	[254]	11	[254]	9	[254]	1200	[115]	—	—
AlSb	Кубическая T_d^2	6,10	[1]	4,15	[121]	1327	[123]	292	[121]	0,59	[121]	0,0428 0,0421	0,0394 0,0395	[170] [254]	11,5 11,6	[27] [254]	11,6 10,2	[170] [254]	200	[121]	420 (300°K) 3700 (77° K)	[27] [27]
GaN	Гексагональная C_{6v}^4	a=3,18 c=5,166	[242] [242]	6,10	[242]	~1500	[242]	—	—	—	—	—	—	—	12,2	[214]	5,8	[214]	380	[214]	—	—
GaP	Кубическая T_d^2	5,44	[1]	4,4	[121]	1623	[123]	446	[121]	0,75	[121]	0,04995	0,0072 0,0455	[170] [254]	10,18 10,7	[170] [254]	8,46 8,5	[170] [254]	300 (300°K) 500 (77°K)	[123] [27]	75 (300°K) 420 (77°K)	[27] [27]
GaAs	Кубическая T_d^2	5,69	[1]	5,4	[121]	1510	[123]	344	[121]	0,46	[121]	0,0368 0,0362	0,0462 0,0354	[170] [254]	12,53 12,9	[170] [254]	11,6 10,9	[170] [254]	$8{,}5 \cdot 10^3$ (300°K) $2{,}1 \cdot 10^4$ (77°K)	[27] [27]	420 (300°K) 4200 (77°K)	[27] [27]

Продолжение табл. 21.15

Соединение	Кристаллическая структура: Тип	Кристаллическая структура: a, Å	Литература	ρ, $\frac{г}{см^3}$	Литература	$T_{пл}$, °К	Литература	T_D, °К	Литература	$\varkappa$, $\frac{вт}{см \cdot град}$	Литература	$\hbar\omega_l$, эв	$\hbar\omega_t$, эв	Литература	ε_0	Литература	ε_∞	Литература	μ_n, $\frac{см^2}{в \cdot сек}$	Литература	μ_p, $\frac{см^2}{в \cdot сек}$	Литература
GaSb	Кубическая T_d^2	6,09	[1]	5,65	[121]	985	[123]	265	[121]	0,34	[121]	0,0298	0,0286	[170, 254]	15 16,1	[27] [254]	15,2 14,4	[170] [254]	4000 (300°K) 6000 (77°K)	[27] [27]	1400 (300°K) 3600 (77°K)	[27] [27]
InN	Гексагональная C_{6v}^4	a=3,53 c=5,69	[242] [242]	6,88	[242]	1200	[242]	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
InP	Кубическая T_d^2	5,86	[1]	4,79	[123]	1327	[123]	321	[121]	0,67	[121]	0,0435	0,038	[170, 254]	14 12,4	[27] [254]	10,9 9,6	[170] [254]	$4{,}6 \cdot 10^3$ (300°K) $2{,}4 \cdot 10^4$ (77°K)	[27] [27]	150 (300°K) 1200 (77°K)	[27] [27]
InAs	Кубическая T_d^2	6,06	[1]	5,68	[121]	1216	[123]	249	[121]	0,27	[121]	0,030	0,0272	[170, 254]	14,5 14,9	[27] [254]	11,6 12,3	[170] [254]	$3{,}3 \cdot 10^4$ (300°K) $8{,}2 \cdot 10^4$ (77°K)	[27] [27]	460 (300°K) 690 (77°K)	[27] [27]
InSb	Кубическая T_d^2	6,48	[1]	5,78	[121]	798	[123]	262	[121]	0,17	[121]	0,0244	0,0228 0,0229	[170] [254]	17 17,7	[27] [254]	16,8 15,6	[170] [254]	$7{,}8 \cdot 10^4$ (300°K) $1{,}2 \cdot 10^6$ (77°K)	[27] [27]	750 (300°K) 10^4 (77°K)	[27] [27]

* Давление 4 *атм*, в азоте.

2* Соединения DyN, HoN, ErN имеют кристаллическую структуру типа O_h^5 (кубическая); a=4,905 Å, 4,874 Å для первых двух соответственно; E_g в этих соединениях составляет 2,1—2,9; 1,9—2,2; 2,4—2,8 *эв* соответственно [242]. Для BSb E_g=2,6 *эв* [242].

Продолжение табл. 21.15

Соединение	Абсолютный минимум зоны проводимости	Литература	$E_{\Gamma\Delta}$, эв	Литература	$E_{\Gamma\Lambda}$, эв	Литература	E_g, эв	Литература	Δ_{so}, эв	Литература	$\frac{m_n^{(000)*}}{m_0}$	Литература	$\frac{m_n^{(111)*}}{m_0}$	Литература
BP	—	—	—	—	—	—	4,5; 4,2	[242]	—	—	—	—	—	—

Продолжение табл. 21.15

Соединение	Абсолютный минимум зоны проводимости	Литература	$E_{\Gamma\Delta}$, эв	Литература	$E_{\Gamma\Lambda}$, эв	Литература	E_g, эв	Литература	Δ_{SO}, эв	Литература	$\frac{m_n^{(000)}}{m_0}$ *	Литература	$\frac{m_n^{(111)}}{m_0}$ *	Литература
AlN	—	—	—	—	—	—	3,8—5 (оптич.) 4,0 3,8	[242]	—	—	—	—	—	—
AlP	—	—	—	—	—	—	3,0	[173]	0,05	[173]	—	—	—	—
AlAs	(100)	[170]	1,3	[172]	—	—	2,2	[172]	0,29	[173]	—	—	—	—
AlSb	(100)	[170]	0,7 0,29	[171] [170]	—	—	1,9 1,6	[84] [171]	0,75	[170]	0,09	[123]	—	—
GaN	—	—	—	—	—	—	3,3; 3,25 (300°K)	[242]	—	—	0,19—0,40	[214]	—	—
GaP	(100)	[170]	0,35	[185, 170]	0,25	[185]	2,34 2,3	[171] [84]	0,1	[171]	0,12	[123]	—	—
GaAs	(000)	[170]	0,36	[185]	0,5	[185]	1,52	[171]	0,33	[170]	0,067	[84]	—	—
GaSb	(000)	[170]	0,4	[170]	0,07	[170]	0,813	[170]	0,8 0,749	[171] [84]	0,047	[170]	0,9	[170]
InN	—	—	—	—	—	—	~2,4 (300°K)	[242]	—	—	—	—	—	—
InP	(000)	[170]	0,7	[170]	0,4	[84]	1,416 1,4	[170] [84]	0,1	[171]	0,082 0,073 (300°K)	[174] [84]	—	—
InAs	(000)	[170]	—	—	—	—	0,425 0,43—0,45	[170] [84]	0,43 0,38	[170] [84]	0,023	[170]	—	—
InSb	(000)	[170]	—	—	0,45—0,5	[84]	0,236	[170, 84]	0,98 0,803	[170] [84]	0,014	[170]	—	—

* Индекс в скобках указывает, на какой оси расположен минимум зоны проводимости, к которому относятся приводимые данные.

Соединение	$\frac{m_n^{(100)}}{m_0}$	Литература	$\frac{m_{p1}}{m_0}$	Литература	$\frac{m_{p2}}{m_0}$	Литература	$\frac{m_{dp}}{m_0}$	Литература	g_n	Литература	$\frac{dE_g}{dT}$, 10^{-4} эв/град	Литература	$\frac{dE_g^*}{dP}$, $10^{-6}\frac{эв}{бар}$	Литература
BP	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
AlN	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
AlP	—	—	—	—	0,39	[173]	—	—	—	—	—	—	—	—
AlAs	—	—	—	—	0,22	[173]	—	—	—	—	—	—	—	—
AlSb	0,39 $m_\perp$=0,25	[170] [84]	0,4	[123]	0,12 0,137	[170] [173]	0,9	[173]	—	—	—3,5(0°K) —4,0 (78—300°K)	[170] [123]	—1,6 (100)	[170]
GaN*[2]	—	—	—	—	—	—	0,6—0,10	[214]	—	—	—3,9	[242]	—	—
GaP	0,14 0,35 $m_\perp$=0,22 $m_\parallel$=1,15	[204] [170] [84] [84]	0,5 0,56	[170] [105]	0,13 0,18	[170] [105]	—	—	—	—	—5,5	[170]	—1,7 (100)	[170]
GaAs	1,2	[170]	0,5 0,5 0,475	[170] [232] [231]	0,87 0,089 0,091	[176] [232] [231]	0,5	[173]	0,523 0,37— 0,52	[170] [84]	—5	[170]	12,5 (000) —8,7 (100)	[186] [170]
GaSb	—	—	0,23 $m_\perp$=0,36m_0 $m_\parallel$=0,26m_0	[123] [233]	0,06 0,052	[123] [233]	0,39	[173]	—6	[184]	—3,5 —4,1	[170] [123]	12 (000) —10 (100) 7,3 (111)	[170] [170] [170]
InN	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
InP	—	—	0,2 0,60	[170] [105]	0,086 0,12	[170] [105]	—	—	—0,6	[230]	—4,6 —2,9	[170] [123]	4,6	[170]
InAs	—	—	0,4	[170]	0,025	[170]	0,33	[173]	—32 —14,7	[177] [84]	—2,2 —3,7	[170] [123]	4,8(000) 8,5(000) 3,2(111)	[170] [170]
InSb	—	—	0,04	[123]	0,015 0,0202	[123] [231]	0,2	[173]	—50 —48	[170] [84]	—2,8 —2,9	[170] [123]	15,5 (000) 14,2 (000)	[170] [170]

* См. примечание на с. 390

2* $\rho \sim 5 \cdot 10^6$ ом·см [214].

Соединение	Кристаллическая структура: Тип	Кристаллическая структура: a, b, c, Å	Литература	ρ, $\frac{г}{см^3}$	Литература	$T_{пл}$, °К	Литература	E_g, эв	Литература	$\frac{dE_g}{dT}$, 10^{-4} $\frac{эв}{град}$
GaS	Гексагональная D_{6h}^4	$a = 3,585$ $c = 15,5$	[150] [150]	3,48	[150]	1298	[150]	2,5 2,95(0°K) 2,58(300°K)	[150, 260] [30] [30]	—7,2
GaSe	Гексагональная[2*] D_{6h}^4	$a = 3,755$ $c = 15,92$	[150] [150]	5,03	[150]	1233	[150]	1,95 2,1 1,97	[150] [150] [150]	—3,8 —4,0 —8,0
GaTe	Моноклинная[3*] C_2^1	$a = 11,95$ $b = 4,04$ $c = 14,82$	[150] [150] [150]	5,44—5,57	[150]	1108	[150]	1,05 1,7(300°K) 1,797(77°K)	[150] [152] [152]	—3,6 —4,35
InS	Орторомбическая D_{2h}^{12}	$a = 3,94$ $b = 4,44$ $c = 10,64$	[150] [150] [150]	5,18	[150]	965*	[150]	1,8	[150]	—6
InSe	Гексагональная[4*] D_{6h}^4	$a = 4,04$ $c = 16,90$	[150] [150]	5,55—5,72	[150]	933	[150]	1,2	[150]	—
InTe	Тетрагональная D_{4h}^{18}	$a = 8,437$ $c = 7,139$	[150] [150]	6,29	[150]	966	[150]	—	—	—
TlS	Тетрагональная D_{4h}^{18}	$a = 7,79$ $c = 6,79$	[150] [150]	7,61	[150]	623*	[150]	0,57	[10]	—
TlSe	Тетрагональная D_{4h}^{18}	$a = 8,03$ $c = 7,01$	[150] [150]	8,62—9,05 8,31	[39] [150]	573	[150]	0,574 0,65 0,57 0,7	[14] [150] [32] [32]	—1,19 —3,9
TlTe	Тетрагональная	$a = 12,94$ $c = 6,158$	[150] [150]	8,42	[150]	603*	[150]	—	—	—
SmS	Кубическая O_h^5	$a = 5,97 \div 5,93$	[242]	5,64	[62]	—	—	0,22(300°K) 0,24	[89] [62]	—
SmSe	Кубическая O_h^5	$a = 6,200$	[62]	6,42	[62]	1970	[64]	0,72	[64]	—
SmTe	Кубическая O_h^5	$a = 6594$ a=5,97; 5,93	[62] [242]	6,441	[62]	—	—	0,70(300°K)	[62]	—
EuO	—	—	—	—	—	—	—	1,12(300°K)	[62]	—4,7
EuS	Кубическая O_h^5	$a = 5,969$	[62]	5,88	[62]	—	—	1,65(300°K)	[62]	—1,7
EuSe	Кубическая O_h^5	$a = 6,185$	[62]	6,42	[62]	—	—	1,78 (300°K) 1,85 (300°K)	[62]	—3,2
EuTe	Кубическая O_h^5	$a = 6,585$	[62]	—	—	—	—	2,0(300°K)	[62]	—2
YbSe	Кубическая O_h^5	$a = 5,963$ $a = 5,87$	[62] [1]	—	—	—	—	0,17	[64]	—
YbTe	Кубическая O_h^5	$a = 6,36$ $a = 6,34$	[62] [1]	—	—	—	—	0,3	[64]	—

* Перитектическая точка.

2* Может кристаллизоваться в ромбоэдрическую структуру C_3^5 ($a = 3,755$ Å, $c = 23,92$ Å) [150].

3* Может кристаллизоваться в гексагональную структуру D_{6h}^4 ($a = 4,06$ Å, $c = 16,96$ Å) [150].

4* Может кристаллизоваться в ромбоэдрическую структуру C_3^5 ($a = 4,02$ Å, $c = 25,04$ Å) [150].

Литература	Тип проводимости	Литература	μ_n, $\frac{см^2}{в \cdot сек}$	Литература	μ_p, $\frac{см^2}{в \cdot сек}$	Литература	α, $\frac{мкв}{град}$	Литература	Примечания	Литература
[260]	p	[150]	$\mu_n/\mu_p = 8$	[151]	5—10	[150]	150	[150]	$\mu_n/\mu_p = 8$	[151]
[242] [10] [260]	p	[150]	—	—	$30(T^{-1,6})$ 20	[30] [150]	200	[150]	$\varepsilon_\infty = 5,7$ $\varepsilon_0 = 7,0$	[215] [132]
[31] [152]	p	[150]	50 $14 \cdot \left(\frac{T}{300}\right)^{1/2}$ ($T < 350°K$)	[31] [242]	15 40	[152] [150]	1000	[150]	—	—
[10]	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
—	n	[150]	900	[150]	—	—	200—500	[150]	—	—
—	p	[150]	—	—	—	—	100	[150]	—	—
—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
[14] [32]	n, p	[32, 150]	30	[123]	—	—	400	[150]	$m_{dn} = 0,3m_0$ $m_{dp} = 0,6m_0$ $n_i = 10^{13}$ $см^{-3}$	[32] [32]
—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
—	—	—	$10(T^{-3/2})$ 37	[89] [72]	—	—	—	—	$m_n = 0,78m_0$	[89]
—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
—	—	—	—	—	—	—	26	[62]	—	—
[62]	—	—	—	—	—	—	—	—	$\varepsilon_0 = 9,8$	[62]
[62]	—	—	—	—	—	—	—	—	$\varepsilon_0 = 10,2$	[62]
[62]	—	—	—	—	—	—	—	—	$\varepsilon_0 = 10,5$	[62]
[62]	—	—	44	[62]	—	—	—	—	$\varepsilon_0 = 11,2$	[62]
—	—	—	—	—	0,3	[64]	—	—	—	—
—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—

Таблица 21.17

Свойства примесей в соединениях $A^{III}B^{V}$

Соединение	E_D, эв*	Литература	E_A, эв**	Литература
AlSb	0,27 (Se); 0,13 (Te)	[170]	—	—
GaP[3]*	Доноры: Se, Te	[170]	Акцепторы: Zn, Cd	[170]
GaAs[3]*	~0 (Se, Te)	[170]	0,0125 (Au) 0,098 (Mn) 0,014 (Zn) 0,021 (Cd) 0,0125 (Mg)	[123] [123] [170] [170] [170]
GaSb	0,075 (S) ~0 (Se, Te)	[214] [214]	0,037 (Zn)	[170]
InP	~0 (Se, Te)	[170]	0,03 (Cd, Zn)	[170]
InAs	~0 (Te, Se, S, Cu)	[170, 123]	Акцепторы: Zn, Cd, Mg	[170]
InSb	~0 (Te, Se, S)	[170]	0,0075 (Zn) 0,0075 (Cd) 0,034 (Au) 0,066 0,023 0,039 (Ag)	[170] [170] [170]

* Энергия ионизации доноров.
** Энергия ионизации акцепторов.
3* Cu может быть как акцептором, так и донором.

Соединения $A^{III}B^{VI}$. Наиболее изученные полупроводниковые соединения III и VI групп обладают стехиометрическим составом двух типов: $A^{III}B^{VI}$ и $A_2^{III}B_3^{VI}$ и имеют много кристаллических модификаций.

Соединения $A^{III}B^{VI}$ делятся на два класса.

1. Соединения с гексагональной структурой D_{6h}^4 — GaS, GaSe, GaTe, InSe. Халькогениды галлия — полупроводники p-типа, InSe — n-типа. Все эти соединения обладают диамагнитными свойствами. В GaS, InSe и GaSe — непрямая зонная структура с максимумом валентной зоны, расположенным при $k = 0$ [99, 150].

2. Соединения с тетрагональной структурой D_{4h}^{18} — InTe, TlSe, TlS, из которых первые два — полупроводники p-типа. По физическим свойствам эти соединения близки к соединениям первого класса, но не обладают диамагнетизмом и имеют более низкие значения E_g.

Соединения $A_2^{III}B_3^{VI}$ имеют малую подвижность носителей (следствие дефектной структуры [150]) и обладают, как правило, проводимостью n-типа (за счет избыточного числа атомов халькогена). Эти соединения мало чувствительны к легированию другими примесными атомами. Многие из этих соединений кристаллизуются в структуры нескольких типов, параметры которых приведены в табл. 21.18. На рис. 21.84 представлены температурные зависимости электрофизических свойств (типичного для этой группы) соединения In_2Te_3.

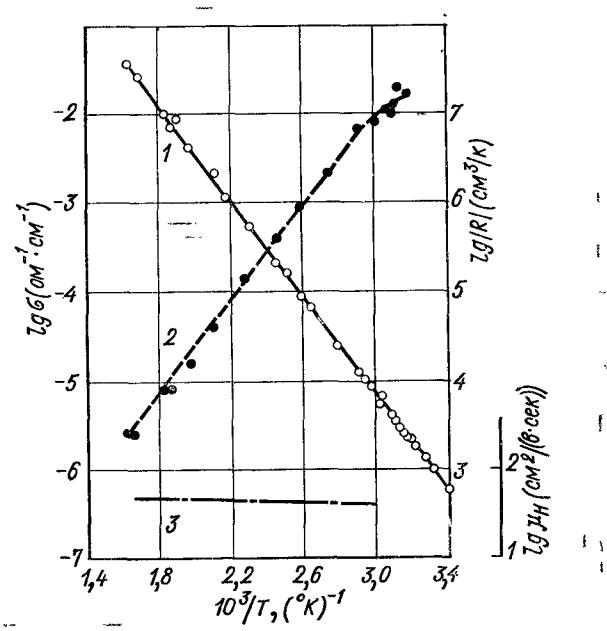


Рис. 21.84. Зависимость удельной проводимости σ (*1*), постоянной Холла R (*2*) и холловской подвижности μ_H (*3*) в In_2Te_3 от температуры [16].

О халькогенидах редкоземельных элементов подробнее см. работу [62]. Сульфиды редкоземельных элементов состава Ln_2X_3 имеют n-тип проводимости, селениды — p-тип и $\mu_n/\mu_p \sim 0,5$ [62]. Халькогениды редкоземельных элементов состава Ln_3X_4 представляют собой полупроводники с E_g близкой к E_g соответствующих халькогенидов состава Ln_2X_3 (1,6 — 3,0 *эв*). Для разных соединений этого типа значения эффективных масс плотности состояний и коэффициенты термо-э. д. с. близки и составляют: $m_d \sim (2,0 \pm 0,5)m_0$; $\alpha \sim (20 \pm 10)$ *мкв/град* (подробнее см. [62]). Халькогениды редкоземельных элементов могут обладать магнитным порядком (ферро- или антиферромагнитное упорядочение) [62].

Известны соединения Tl_2S с $E_g = 1$ *эв* (300° С) и Tl_2Te с $E_g = 0,5$ *эв* (300° К). Tl_2S обладает гексагональной кристаллической структурой типа C_3^4 ($a = 12,2$ Å; $c = 18,2$ Å) и плавится при $T = 443°$ С [242].

Полупроводниковыми свойствами обладает соединение UO_2 ($E_g = 1,3$ *эв* [87], $\mu_p = 10$ *см²/(в·сек)* [249]; O_h^5, $a = 5,46$ Å [1]).

Таблица 21.18

Кристаллическая структура соединений $A_2^{III}B_3^{VI}$ [62, 121, 150, 242]

Соединение	Кристаллическая структура	a, b, c, Å
Al_2O_3	α-Гексагональная D_{3d}^6	$a = 4,758$; $c = 12,95$
	γ-Кубическая	$a = 7,92$; 3,42
Al_2Se_3	α-Гексагональная (тип вюрцита) C_{6v}^4	$a = 3,89$; $c = 6,30$
	α-Моноклинная	a=11,68; b=6,73 β = 121°,1; $c = 7,33$
Al_2Te_3	Гексагональная (тип вюрцита) C_{6v}^4	$a = 4,08$; $c = 6,94$
Ga_2S_3*	α-Моноклинная	$a = 11,14$; $b = 6,41$ β = 121°,22; $c = 7,04$
	α-Гексагональная упорядоченная	$a = 6,38$ $c = 18,09$
α → β (600°C)	β-Гексагональная неупорядоченная (тип вюрцита) C_{6v}	$a = 3,68$; $c = 6,03$
β → γ (1015°C)	α-Кубическая (тип сфалерита) T_d^2	$a = 5,17$
$GaSe_3$*	α-Кубическая (тип сфалерита) T_d^2	$a = 5,43$
α → β (600°C)	β-Тетрагональная	$a = 5,487$; $c = 5,411$
β → γ (800°C)	γ-Орторомбическая	$a = 7,76$; $b = 11,64$; $c = 10,82$
γ → δ (?)	δ-Кубическая (тип сфалерита) T_d^2	$a = 5,46$
Ga_2Te_3	α-Кубическая (тип сфалерита) T_d^2	$a = 5,89$
In_2O_3	Кубическая T^b	$a = 10,118$

Продолжение табл. 21.18

Соединение	Кристаллическая структура	a, b, c, Å
In_2S_3* α → β (300°C)	α-Кубическая (тип γ'-Al_2O_3) O_h^5	$a = 5,36$
	β-Кубическая (тип γ'-Al_2O_3) O_h^5	$a = 10,72$
	β-Тетрагональная	$a = 7,62$; $c = 32,32$
In_2Se_3* α → β (200°C)	α-Гексагональная	$a = 16,0$; $c = 19,24$
	β-Гексагональная (тип вюрцита) C_{6v}^4	$a = 7,1$; $c = 19,3$
β → γ (650°C)	γ-Кубическая (тип сфалерита) T_d^2	$a = 10,10$
γ → δ (750°C)	δ-Моноклинная	—
In_2Te_3*	α-Кубическая упорядоченная (тип сфалерита) T_d^2	$a = 18,40$
α → β (600°C)	β-Кубическая неупорядоченная	$a = 6,16$
Y_2S_3	Моноклинная	$a = 17,52$; $b = 4,019$; $c = 10,97$
La_2S_3	γ-Кубическая	$a = 8,723$
	α-Орторомбическая	$a = 7,584$; $b = 15,86$; $c = 4,144$
La_2Se_3	Кубическая	$a = 4,055$
La_2Te_3	Кубическая	a=9,627; 9,619
Ce_2S_3	γ-Кубическая	$a = 8,634$
	α-Орторомбическая	$a = 7,513$; $b = 15,715$; $c = 4,094$
Ce_2Se_3	Кубическая	$a = 8,973$
Ce_2Te_3	Кубическая	$a = 9,539$

* Указан возможный переход и температура, при которой он происходит.

Продолжение табл. 21.18

Соединение	Кристаллическая структура	a, b, c, Å
Pr_2S_3	γ-Кубическая	$a = 8,527$
	α-Орторомбическая	$a = 7,472$; $b = 15,604$; $c = 4,058$
Pr_2Se_3	Кубическая	$a = 8,927$
Pr_2Te_3	Кубическая	$a = 9,481$
Nd_2S_3	γ-Кубическая	$a = 8,527$
	α-Орторомбическая	$a = 7,442$; $b = 15,519$; $c = 4,029$
Nd_2Se_3	Кубическая	$a = 8,859$
Nd_2Te_3	γ-Кубическая	$a = 9,453$
	Орторомбическая	$a = 12,16$; $b = 11,93$; $c = 4,34$
Sm_2S_3	γ-Кубическая	$a = 8,448$
	α-Орторомбическая	$a = 7,38$; $b = 15,378$; $c = 3,974$
Sm_2Se_3	Кубическая	$a = 8,784$
Sm_2Te_3	γ-Кубическая	$a = 9,480$
	Орторомбическая	$a = 12,06$; $b = 4,34$; $c = 4,34$
Gd_2S_3	γ-Кубическая	$a = 8,387$
	α-Орторомбическая	$a = 7,338$; $b = 15,273$; $c = 3,932$
Gd_2Se_3	γ-Кубическая	$a = 8,717$
	Орторомбическая	$a = 11,18$; $b = 10$; $c = 4,05$

Продолжение табл. 21.18

Соединение	Кристаллическая структура	a, b, c, Å
Gd_2Te_3	Орторомбическая	$a = 11,96$; $b = 11,75$; $c = 4,29$
Dy_2S_3	γ-Кубическая	$a = 8,292$
	δ-Моноклиниая	$a = 7,279$; $b = 15,316$; $c = 3,878$
Dy_2Te_3	Орторомбическая	$a = 12,216$; $b = 8,637$; $c = 25,911$
Ho_2S_3	Моноклиннная	$a = 17,45$; $b = 4,0$; $c = 10,128$
Er_2S_3	Моноклиннная	$a = 17,4$; $b = 3,98$; $c = 10,09$
Er_2Se_3	Орторомбическая	$a = 11,35$; $b = 8,10$; $c = 24,17$
Er_2Te_3	Орторомбическая	$a = 12,134$; $b = 8,579$; $c = 25,737$
Yb_2S_3	Ромбоэдрическая	$a = 6,748$; $c = 18,191$
Yb_2Se_3	Орторомбическая	$a = 11,27$; $b = 8,602$; $c = 23,96$

Электрофизические свойства полупроводниковых соединений типа $A_2^{III}B_3^{VI}$

Соединение	ρ, $\frac{e}{см^3}$	Литература	$T_{пл}$, °К	Литература	E_g, эв	Литература	$\frac{\partial E_g}{\partial T}$ $10^{-4}\frac{эв}{град}$	Литература	Тип проводимости	Литература	μ_n, $\frac{см^2}{в\cdot сек}$	Литература	$\varkappa$, $\frac{вт}{см\cdot град}$	Литература	Примечание	Литература
α-Al_2O_3	—	—	2323	[242]	2,50	[242]	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
α-Al_2S_3	2,32	[242]	1373	[242]	4,1	[242]	—11,5 (90—373°К)	[242]	—	—	—	—	—	—	—	—
α-Al_2Se_3	3,91	[150]	1253	[150]	3,1	[150]	—11,2	[10]	n	[150]	—	—	—	—	—	—
Al_2Te_3	4,5	[150]	1168	[150]	2,2 2,5	[150] [123]	—		n	[150]	—	—	—	—	$\alpha = 270\ \frac{мкв}{град}$	[150]
β-Ga_2S_3	3,65—3,74	[150]	1398	[150]	2,5—2,7 3,06 2,84(300°К)	[150] [150] [123]	—6,7(90—293°К) —7 —8(293—373°К)	[242] [58] [242]	n	[150]	28	[150]	—	—	$\alpha = 900\ \frac{мкв}{град}$	[150]
Ga_2Se_3*	4,92 (α) 1293 (β)	[150]		[150]	1,75(α) 1,9(β)	[150] [121]	—5	[16]	p(α)	[150]	10(α)	[16]	0,005 (α)	[147]	$\alpha = 400\ \frac{мкв}{град}$	[150]
α-Ga_2Te_3	5,57	[150]	1065	[150]	1,56	[31]	—6,6(293—373°К)	[242]	p	[150]	50	[16]	0,0047	[150]	$m_n^* = 0,39m_0$	[123]
					1,4	[150]	—5,4	[242]			26	[150]			$m_p^* = 0,23m_0$	[123]
					1,2	[10]	(90—293°К)	[242]			340	[123]			$\mu_p = 26\ \frac{см^2}{в\cdot сек}$	[123]
In_2O_3	7,04	[132]	2270	[132]	2,8(300°К)	[132]	—7,7 (90°К$<T<$293°К) —8,4 (293°К$<T<$373°К)	[132] [132]	n	[60]	160 271	[242] [60]	—	—	$m_{nd}^* = 0,55\,m_0$	[60]
β-In_2S_3	5,92 4,63	[150] [121]	1363	[150]	1,13*	[150]	—6,8	[10]	n	[150]	<100	[150]	—	—	$\alpha = 700\ \frac{мкв}{град}$ $\varepsilon = 13,3 \div 14,7$	[150] [242]
In_2Se_3*	5,36(β) 5,67(α)	[150] [150]	1173(α)	[150]	1,0(β) 1,2(α)	[150] [10]	—4	[10]	n(α)	[150]	125(α)	[150]	0,01(α)	[150]	$\alpha = 100 \div 800\ \frac{мкв}{град}$ (α)	[150]
In_2Te_3*	5,8(α) 5,73(β)	[121] [121]	940(α)	[150]	1,02 (α, β) 1,12 (α, β)	[150] [16]	—5,6(293—373°К) —4,2(90—293°К) —3,4	[242] [242] [16]	n	[16]	10(α) 50(β) 15—70	[150] [150] [16]	0,0107 (α)	[150]	$\alpha = 500\ \frac{мкв}{град}$ (α) $m_n^* = 0,7m_0$ (α) $m_p^* = 1,1\,m_0$	[150] [150] [150]

Продолжение табл. 21.19

Соединение	$\rho, \frac{г}{см^3}$	Литература	$T_{пл}$, °К	Литература	E_g, эв	Литература	$\frac{dE_g}{dT}$, $10^{-4}\frac{эв}{град}$	Литература	Тип проводимости	Литература	$\frac{\nu_n}{см^2/в \cdot сек}$	Литература	$\frac{вт}{см \cdot град}$	Литература	Примечание	Литература
Tl_2S_3	—	—	—	—	1,2	[10]	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
Sc_2S_3	—	—	—	—	2,78	[180]	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
Sc_2Se_3	—	—	—	—	2,31	[180]	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
Y_2S_3	3,87	[62]	—	—	2,9	[62]	—	—	—	—	—	—	—	—	$\varepsilon_0 = 6,81$ $\varepsilon_\infty = 13,1$	[62] [62]
La_2S_3	4,93	[62]	2423	[62]	1,32 2,7÷2,9	[62] [62]	—	—	—	—	—	—	—	—	$\varepsilon_0 = 8,12$ $\varepsilon_\infty = 16,3; 19,6$	[62] [62]
La_2Se_3	6,15	[62]	2023	[62]	2,25 1,65	[62] [62]	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
La_2Te_3	6,53 6,4	[62] [62]	1868	[62]	2,00	[62]	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
Ce_2S_3	5,15	[62]	2473	[62]	1,12 2,6; 2,2	[242] [62]	—	—	—	—	—	—	—	—	$\varepsilon_0 = 7,5; 6,25$ $\varepsilon_\infty = 19,0$	[62] [62]
Ce_2Se_3	6,17	[62]	2323	[62]	1,62 1,8÷2,0	[242] [62]	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
Ce_2Te_3	6,6	[62]	2073	[62]	1,3—1,7 1,6	[242] [62]	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
Pr_2S_3	5,27	[62]	2323	[62]	1,1 2,2; 2,5—2,7	[242] [62]	—	—	—	—	—	—	—	—	$\varepsilon_\infty = 14,2$	[62]
Pr_2Se_3	6,51	[62]	—	—	2,15 1,81	[62] [97]	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
Pr_2Te_3	6,6	[62]	—	—	1,2—1,6 1,3—1,7	[242] [62]	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
Nd_2S_3	5,36	[62]	2283	[62]	1,06 2,1; 2,7	[242] [62]	—	—	—	—	—	—	—	—	$\varepsilon_\infty = 16,0$	[62]
Nd_2Se_3	6,70	[62]	—	—	2,2 1,6	[62] [97, 62]	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—

Соединение	ρ, $\frac{г}{см^3}$	Литература	$T_{пл}$, °К	Литература	E_g, эв	Литература	$\frac{dE_g}{dT}$, 10^{-4} $\frac{эв}{град}$	Литература	Тип проводимости	Литература	μ_n, $\frac{см^2}{в \cdot сек}$	Литература	$\varkappa$, $\frac{вт}{см \cdot град}$	Литература	Примечание	Литература
Nd_2Te_3	6,94	[62]	1923	[62]	0,8—1,0 0,8—1,12	[242] [62]	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
Sm_2S_3	5,87	[62]	2173	[62]	3,0 2,96	[62] [96]	—	—	—	—	—	—	—	—	$\varepsilon_\infty = 18,0$	[62]
Sm_2Se_3	6,93	[62]	~1813	[62]	2,3—2,5	[62]	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
Sm_2Te_3	—	—	1773	[62]	0,7	[62]	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
Gd_2S_3	6,14	[62]	—	—	2,55 2,2	[62] [62]	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
Gd_2Se_3	6,90	[62]	2023	[62]	2,2	[62]	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
Gd_2Te_3	7,42	[62]	1773	[62]	0,74 0,7	[62] [64]	—	—	—	—	60[2*]	[64]	—	—	—	—
Dy_2S_3	6,50	[62]	1773	[62]	2,94	[62]	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
Dy_2Te_3	—	—	1783	[62]	0,7	[62]	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
Ho_2S_3	—	—	—	—	2,7	[62]	—	—	—	—	—	—	—	—	$\varepsilon_0 = 6,92$ $\varepsilon_\infty = 14,9$	[62]
Er_2S_3	6,09	[62]	—	—	2,8	[62]	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
Er_2Se_3	6,83	[62]	1793	[62]	0,83	[62]	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
Er_2Te_3	—	—	1733	[62]	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
Yb_2S_3	6,02	[62]	—	—	2,5	[62]	—	—	—	—	—	—	—	—	$\varepsilon_0 = 6,81$ $\varepsilon_\infty = 15,1$	[62]
Yb_2Se_3	7,15	[62]	—	—	3,2	[62]	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—

* Представлены две модификации (α и β).

2* $\mu_p = 18$ *см²/(в·сек)* [64].

3* Значение $E_g = 1,1$ *эв* соответствует непрямым переходам. Для прямых переходов $E_g = 2,4$ *эв* [150].

Соединения типа $A^{IV}B^{IV} - A^{IV}B^{VI}$

Таблица 21.20

Полупроводниковые соединения типа $A^{IV}B^{IV}$*
Свойства α- и β-SiC

Соединение	Кристаллическая структура: Тип	Кристаллическая структура: a, b, c, Å	Литература	$T_{пл}$, °K	Литература	ρ, $\frac{г}{см^3}$	Литература	T_D, °K	Литература	$\hbar\omega_l$, эв	Литература	$\hbar\omega_t$, эв	Литература	ε_0	Литература	ε_∞	Литература
α-SiC	Гексагональная C_{6v}^4	$a = 3{,}07$ $c = 37{,}7$ (15,07)	[1] [1]	3073	[132]	3,21	[193]	1200	[193]	0,119	[194]	0,098	[194]	10,2 9,8	[124] [194]	6,9 6,73	[124] [194]
β-SiC	Кубическая T_d^2	$a = 4{,}36$	[1]	2600[2]*	[124]	3,21	[132]	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—

Соединение	E_g, эв	Литература	$\frac{dE_g}{dT}$, $\frac{эв}{10^{-4}\ град}$	Литература	$\frac{m_n}{m_0}$	Литература	$\frac{m_p}{m_0}$	Литература	μ_n, $\frac{см^2}{в\cdot сек}$	Литература	μ_p, $\frac{см^2}{в\cdot сек}$	Литература	g_n	Литература	g_p	Литература	$\varkappa$, $\frac{вт}{см\cdot град}$	Литература
α-SiC	3,0	[5,8]	—3,81	[85]	0,6	[124]	1,2 1,0	[124] [123]	230 200	[34] [49]	70	[16]	2,003	[124]	2,004	[124]	0,55— 0,57	[195]
β-SiC	2,68	[15, 79]	—5.8	[15, 79]	0,25	[73]	$m_d = 0{,}59\,m_0$	[15]	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—

* Для GeSi $E_g = 0{,}88$ эв (300°K), для SnGe $E_g = 0{,}4$ эв (300°K), для SiSn $E_g = 0{,}59$ эв (300 °K) [242].

2* При этой температуре происходит переход β-SiC → α-SiC [124]. Температурные зависимости постоянной Холла и подвижности в SiC представлены на рис. 21.85, 21.86.

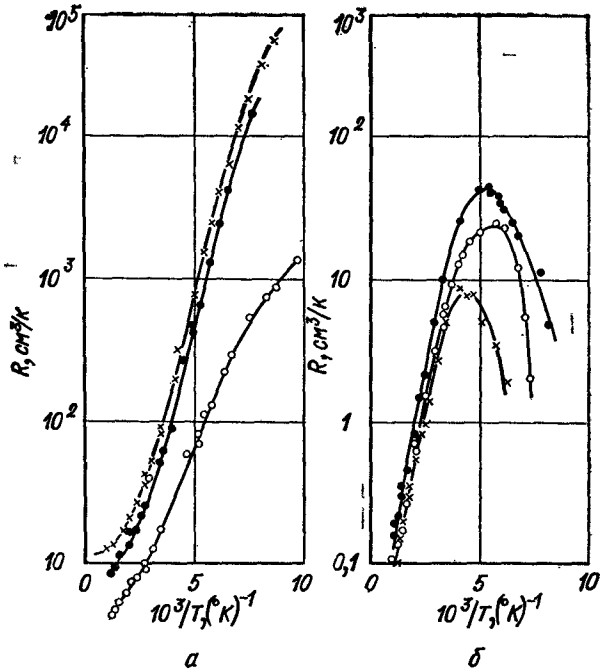


Рис. 21.85. Зависимость постоянной Холла в SiC от температуры для зеленых (*а*) и черных (*б*) образцов *n*-типа [224].

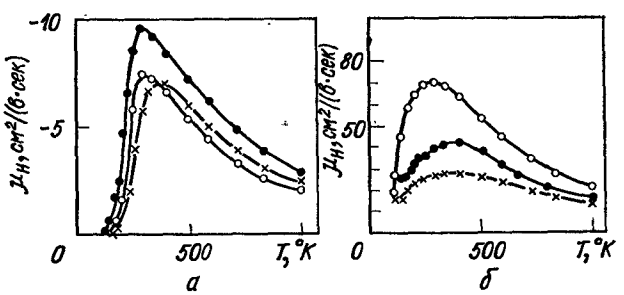


Рис. 21.86. Зависимость холловской подвижности μ_H в SiC от температуры для зеленых (*а*) и черных (*б*) образцов *n*-типа [224].

Полупроводниковые соединения $A^{IV}B^{V}$

Из соединений этого типа известно Sn_3As_2, кристаллизующееся в ромбоэдрической решетке. Температура плавления $T_{пл} = 871°$ К, ширина запрещенной зоны $E_g = 0{,}47$ *эв*, подвижность дырок $\mu_p = 270$ *см²/(в·сек)* [100].

Полупроводниковые соединении типа $A^{IV}B^{VI}$

Наиболее изученными соединениями этого типа являются халькогениды свинца (PbS, PbSe, PbTe), кристаллизующиеся в гранецентрированной кубической решетке (O_h^5). Зонная структура — прямая, причем абсолютные экстремумы зон расположены на краю зоны Бриллюэна в направлении [111] (рис. 21.87). Вблизи экстремумов поверхности постоянной энергии представляют собой эллипсоиды вращения (их эквивалентное

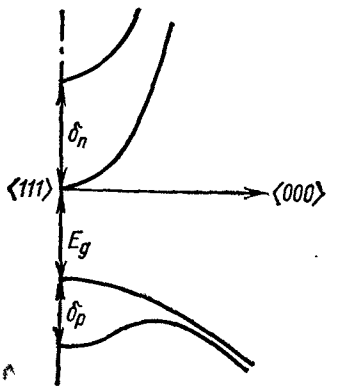


Рис. 21.87. Зонная структура PbS, PbSe, PbTe [125].

число — 4 для каждой зоны). Валентная зона расщеплена на две подзоны; нижняя из них (подзона тяжелых дырок) имеет максимумы внутри зоны Бриллюэна на осях [111] и проявляет себя в материалах *p*-типа при повышенных температурах (для PbTe при $T \geqslant 400°$ К). Халькогениды свинца обладают аномально высокой диэлектрической проницаемостью. Электрофизические свойства халькогенидов свинца см. на рис. 21.88—21.101.

Некоторые соединения рассматриваемого типа характеризуются непрямой зонной структурой, как это имеет место, например, в GeSe, SnS, SnSe [114]. Известно также, что валентные зоны в GeTe и SnTe состоят из двух подзон, разделенных энергетическим интервалом 0,3 *эв* [114].

Тип проводимости рассматриваемых соединений часто определяется их отклонением от стехиометрии.

К соединениям типа $A^{IV}B^{VI}$ относится также TiO_2 (рутил) — полупроводник с поляронной проводимостью (прыжковая энергия 0,13 *эв* [212], 0,15—0,2 *эв* [25]), свойства которого представлены в табл. 21.21.

Таблица 21.21

Свойства рутила (TiO_2)

Кристаллическая структура																	
Тип	a, c, Å	$T_{пл}$, °K	ρ, $\frac{г}{см^3}$	Литература	ε_0	ε_∞	Литература	E_g, эв	Литература	μ_n, $\frac{см^2*}{в \cdot сек}$	Литература	g	Литература	T_D, °K	Литература
Тетрагональная D_{4h}^{14}	a=4,54 c=2,96	2113	4,28	[209]	$\perp c$ 89 $\parallel c$ 173 $\parallel c$ 260 $\perp c$ 140	$\perp c$ 9 $\parallel c$ 6,8 7	[25] [211]	3,0	[16]	$\perp c$ 0,16 $\parallel c$ 0,57	[25] [25]	$\parallel c$ 1,941 $\perp c$ 1,976	[213]	775 650 (10 °K) 670 (68÷373 °K)	[141] [242]

* Подвижность полярона.

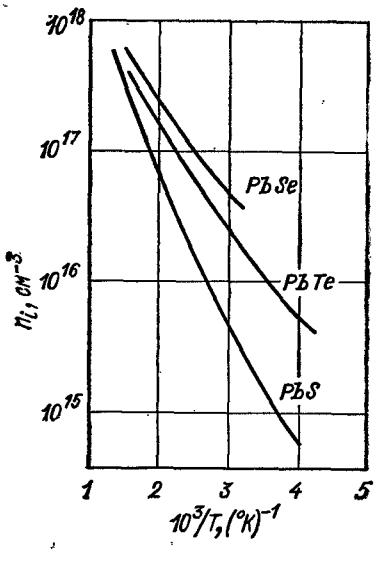


Рис. 21.88. Зависимость собственной концентрации n_i носителей в PbS, PbTe, PbSe от температуры [125].

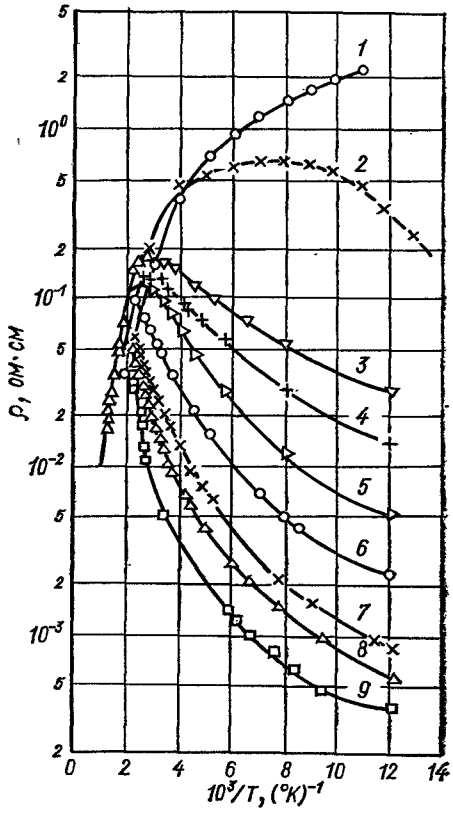
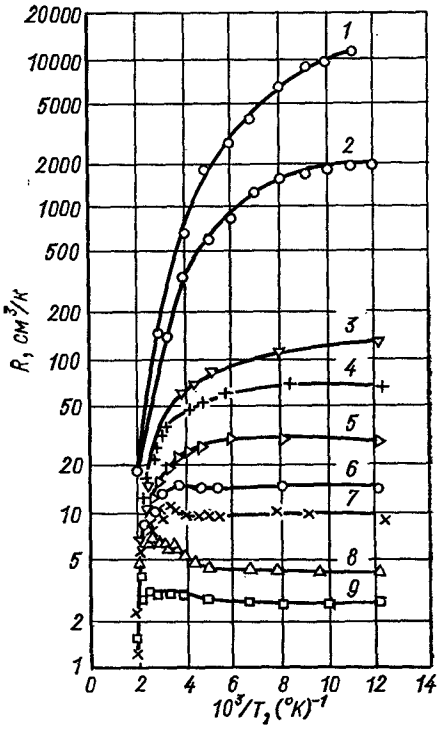


Рис. 21.89. Зависимость удельного сопротивления ρ в PbTe от температуры [117]:
1, *2* — почти собственные образцы; *3*—*9*—*p*-PbTe.
Измерения постоянной Холла на тех же образцах (см. рис. 21.90).



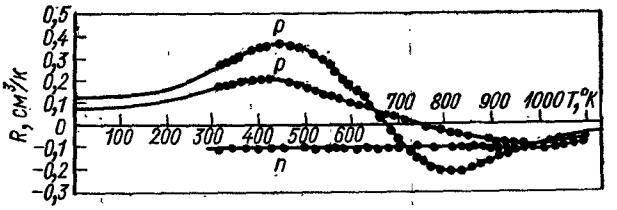


Рис. 21.91. Зависимость постоянной Холла R в сильнолегированных образцах PbTe от температуры [125].

Рис. 21.90. Зависимости постоянной Холла R от температуры [117]. Для p-PbTe приведены только положительные ветви. Образцы те же, что и на рис. 21.89.

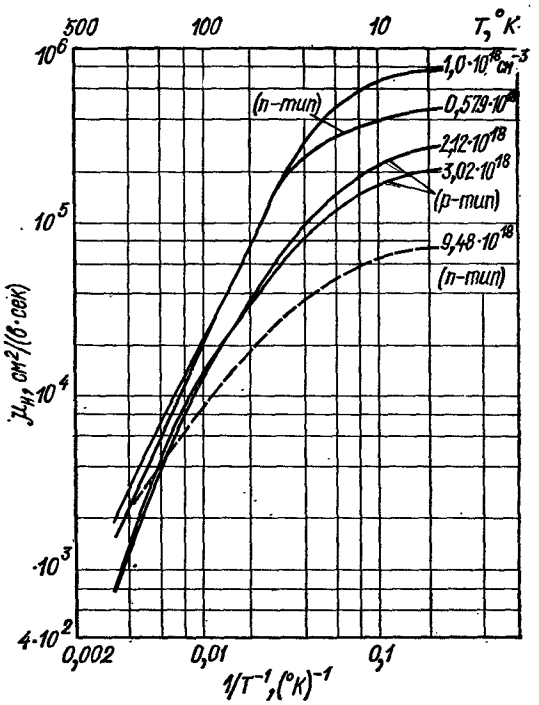


Рис. 21.92. Зависимость холловской подвижности μ_H электронов и дырок в PbTe от температуры при различной концентрации носителей [117].

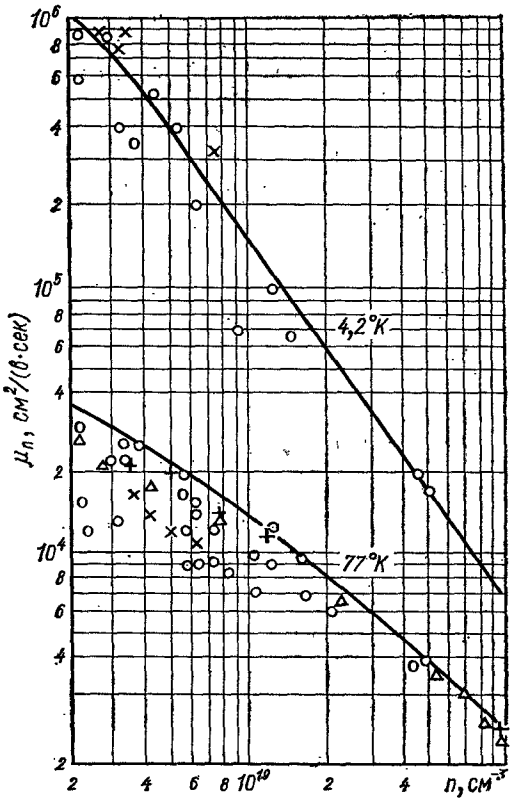


Рис. 21.93. Зависимость подвижности μ_n электронов от их концентрации n в PbTe [125]. Точки — данные различных авторов.

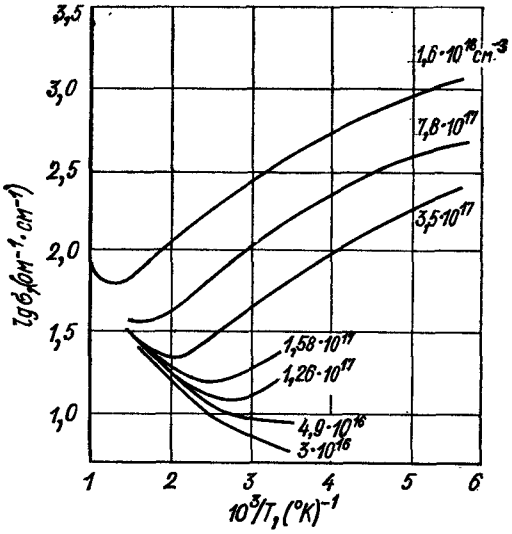


Рис. 21.94. Зависимость удельной проводимости в n-PbSe от температуры при различной концентрации доноров [117].

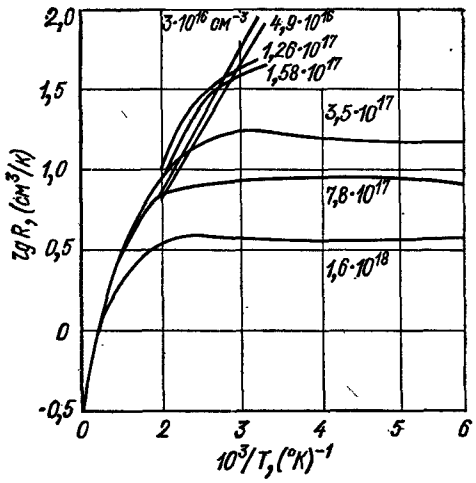


Рис. 21.95. Температурная зависимость постоянной Холла R в n-PbSe при различной концентрации доноров [117].

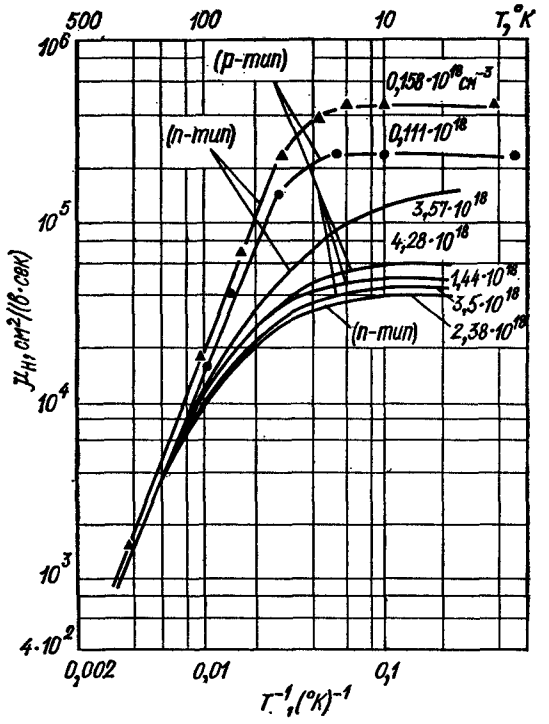


Рис. 21.96. Зависимость холловской подвижности μ_H электронов и дырок в PbSe от температуры при различной концентрации носителей [117].

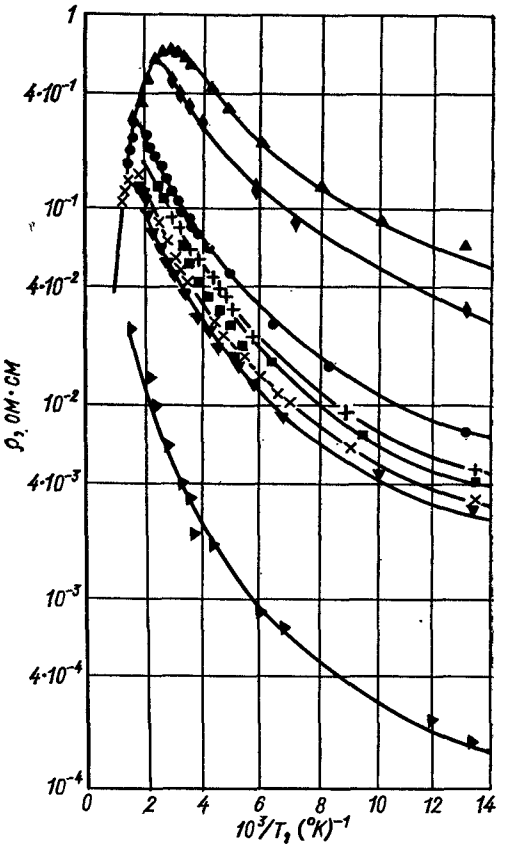


Рис. 21.97. Зависимость удельного сопротивления ρ в n-PbS от температуры [117]. Измерения постоянной Холла нв тех же образцах, что и на рис. 21.98.

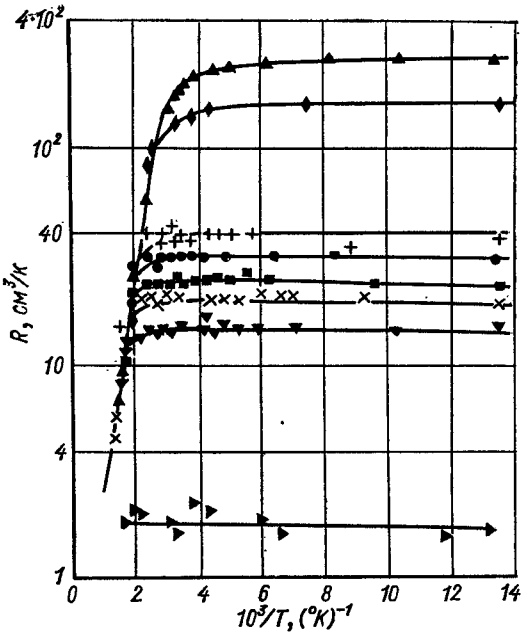


Рис. 21.98. Зависимость постоянной Холла R в n-PbS от температуры [117]. Образцы те же, что и на рис. 21.97.

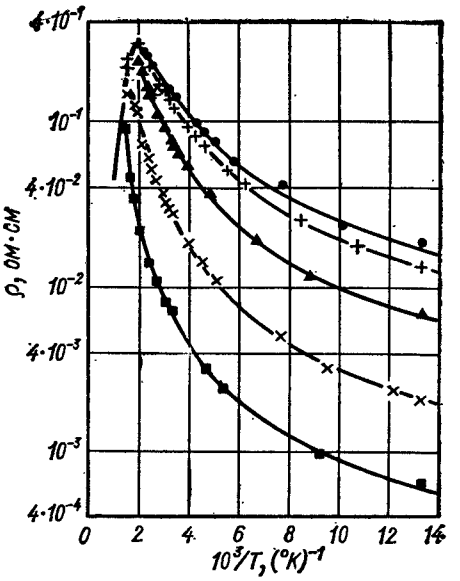


Рис. 21.99. Зависимость удельного сопротивления ρ в p-PbS от температуры [228]. Измерения постоянной Холла на тех же образцах, что и на рис. 21.100.

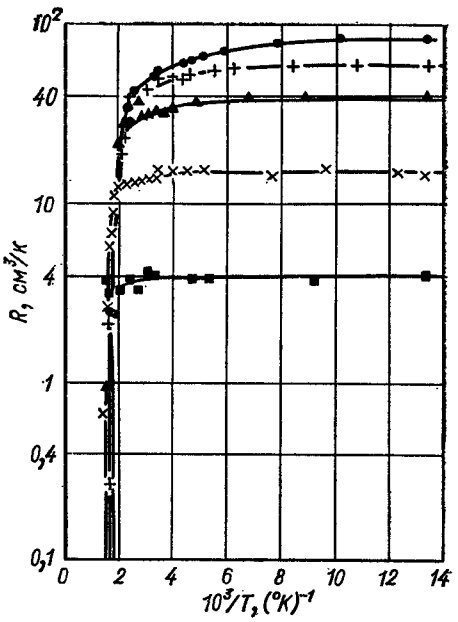


Рис.21.100. Зависимость постоянной Холла R в p-PbS от температуры [228]. Образцы те же, что и на рис. 21.99.

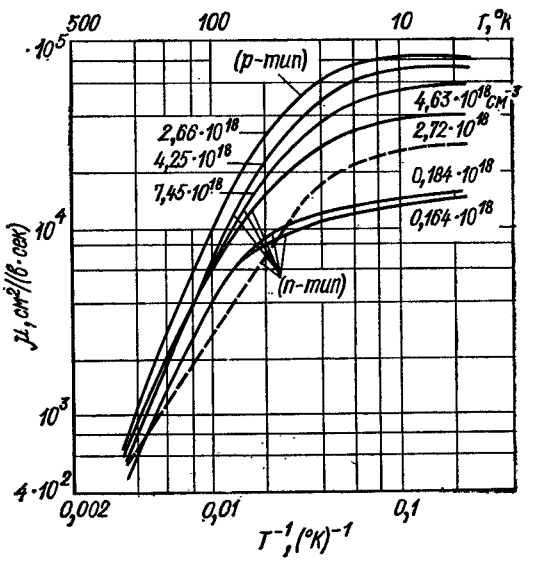


Рис. 21.101. Зависимость холловской подвижности μ_H электронов и дырок в PbS от температуры при различной концентрации носителей [117].

Таблица 21.22

Электрофизические свойства халькогенидов свинца (PbS, PbSe, PbTe) [125]

Соединение	Кристаллическая структура: Тип	Кристаллическая структура: a, Å	ρ, $\frac{г}{см^3}$	$T_{пл}$, °K	E_g, эв	δ_n, эв	δ_p, эв	$\frac{dE_g}{dT}$, эв, 10^{-4} $\frac{эв}{град}$	$\frac{dE_g}{dP}$, эв, 10^{-6} $\frac{эв}{бар}$	$\frac{m_{\parallel p}}{m_0}$	$\frac{m_{\parallel n}}{m_0}$	$\frac{m_{\perp p}}{m_0}$	$\frac{m_{\perp n}}{m_0}$
PbS	Кубическая гранецентрированная O_h^5	5,94	8,2	1387	0,29 (4,2°K) 0,31 (77°K) 0,41 (300°K)	1,46	1,67	4	—8	0,105	0,105	0,075	0,080
PbSe	Кубическая гранецентрированная O_h^5	6,12	8,3	1335	0,165 (4,2°K) 0,176 (77°K) 0,29 (300°K)	1,36	1,72	4	—8	0,068	0,070	0,034	0,040
PbTe	Кубическая гранецентрированная O_h^5	6,50	7,6	1190	0,19 (4,2°K) 0,22 (77°K) 0,32 (300 °K)	1,11	0,77	4*	—8	0,31*	0,24	0,022*	0,024

* Данные относятся к зоне легких дырок, для зоны тяжелых дырок $dE_g/dT = 0$, $m_{p2} = 1{,}2 \div 1{,}5\ m_0$.

Соединение	μ_n, $\frac{см^2}{в \cdot сек}$	μ_p, $\frac{см^2}{в \cdot сек}$	n_i (300°К), $см^{-3}$	ε_0	ε_∞	$\hbar\omega_l$, эв	$\hbar\omega_t$, эв	T_D (200°К), °К	$\varkappa_0$, $\frac{вт}{см \cdot град}$	$g^*_{\parallel n}$	$g^*_{\parallel p}$
PbS	68 500 (4,2 °К) 11 000 (77 К) 610 (300 °К)	80 000 (4,2 °К) 15 000 (77 °К) 620 (300 °К)	$2{,}0 \cdot 10^{16}$	175	17	0,0263	0,082	227	0,025	12	13
PbSe	139 000 (4,2°К) 16 500 (77°К) 1000 (300°К)	57 900 (4,2 °К) 13 700 (77 °К) 1000 (300 °К)	$3{,}0 \cdot 10^{16}$	250	24	0,0165	0,0054	138	0,016	27	32
PbTe	800 000 (4,2°К) 31 600 (77 °К) 1730 (300 °К)	250 000 (4,2 °К) 21 600 (77 °К) 840 (300 °К)	$1{,}5 \cdot 10^{16}$	400	33	0,0136	0,0039	125	0,02	45	51

* $\parallel$ — параллельно большой оси эллипсоида энергий.

Таблица 21.23

Электрофизические свойства соединений типа $A^{IV}B^{VI}$

Соединение	Кристаллическая структура: Тип	Кристаллическая структура: a, b, c, Å	Литература	$\frac{g}{\rho, см^3}$	Литература	$T_{пл}$, °К	Литература	T_D, °К	Литература	E_g, эв	Литература	Тип проводимости	Литература
$SiTe_2$	—	—	—	—	—	—	—	—	—	2,03 (300°К)*	[174]	—	—
Si_2Te_3	—	—	—	—	—	—	—	—	—	1,98[2]*	[53]	—	—
GeS	Орторомбическая D^{16}_{2h}	a=4,30 a=10,44 c=3,65	[1] [1] [1]	4,012	[114]	898	[35]	—	—	1,8 (300°К) 1,77	[114] [165]	—	—
GeSe	Орторомбическая	a=3,82 b=10,79 c=4,38	[1] [1] [1]	5,52	[114]	943	[114]	—	—	1,0 1,16 (300°К)	[8] [114]	p	[114]
$GeSe_2$	Ромбическая	a=6,94 b=12,19 c=22,99	[242] [242] [242]	—	—	1013	[242]	—	—	2,3	[242]	—	—

Продолжение табл. 21.23

Соединение	Кристаллическая структура: Тип	Кристаллическая структура: a, b, c, Å	Литература	ρ, $\frac{г}{см^3}$	Литература	$T_{пл}$, °K	Литература	T_D, °K	Литература	E_g, эв	Литература	Тип проводимости	Литература
GeTe[3]*	Кубическая	a=6,02—5,094[4]*	[114]	6,19	[114]	993	[114]	166	[164]	0,5—1,0 (300°K) 0,27 0,23 1 ($E_{опт}$)	[114] [257] [203] [203]	p	[258]
SnO_2	Тетрагональная D_{4h}^{14}	a=4,72 c=3,17	[1] [1]	6,95	[216]	1400[5]*	[216]	500	[69]	3,97	[93]	n	[60]
SnS	Орторомбическая D_{2h}^{16}	a=3,98 b=4,33 c=11,18	[1] [1] [1]	5,08	[114]	1155	[216]	270 (80°K)	[114]	1,07	[3]	p	[114]
SnS_2	Тригональная D_{3d}^{3}	a=3,64 c=5,87	[1] [1]	4,5	[216]	—	—	—	—	2,07[6]*	[183]	—	—
SnSe[7]*	Орторомбическая D_{2h}^{16}	a=4,19 b=11,57 c=4,16	[1] [1] [1]	6,179	[114]	953[8]*	[39]	210 (80°K)	[114]	0,889[9]* 0,88	[39] [3]	p	[114]
SnSe[2]	Тригональная	—	[1]	5,13	[216]	923	[216]	—	—	0,97[6]*	[183]	—	—
SnTe[10]*	Кубическая O_h^5	a=6,28	[1]	6,45	[114]	1079	[114]	140	[114]	0,26 (300°K)	[114]	p	[114]

Продолжение табл. 21.23

Соединение	m_p/m_0	Литература	μ_n, $\frac{см^2}{в \cdot сек}$	Литература	μ_p, $\frac{см^2}{в \cdot сек}$	Литература
Si_2Te_2	—	—	—	—	—	—
Si_2Te_3	—	—	—	—	—	—
GeS 2	—	—	—	—	—	—
GeSe	—	—	—	—	70 (T^{-2}) 60	[114] [8]

Соединение	m_p/m_0	Литература	μ_n, $\frac{см^2}{в \cdot сек}$	Литература	μ_p, $\frac{см^2}{в \cdot сек}$	Литература
$GeSe_2$	—	—	—	—	—	—
GeTe	$m_1=1,15$[11*] $m_2=5,0$	[114] [258]	130	[203]	55 150	[258] [126]
SnO_2	[12*]	—	200—300 ($\sim T^{-1,1}$) 80 315	[69] [5] [60]	300	[69]
SnS	$m_d=0,95$ $m_\perp=0,2$ $m_\parallel=1,0$	[127] [127] [127]	—	—	$\perp c$ 90 ($\sim T^{-2,2}$)[13*] 65	[127] [4]
SnS_2	—	—	—	—	—	—
SnSe	$m_d=0,15$	[15, 39]	—	—	$\perp c$ 110 [13*] 80	[114] [3]
$SnSe_2$	—	—	27	[183]	—	—
SnTe	$m_1=0,13$ $m_1=0,4$ $m_n=0,1$ $m_2=3,0$ $m_2=1,85$	[205] [8] [206] [7] [205]	—	—	$\mu_1=3500$ (100°K) $\mu_1=1700$ $\mu_2=50$[14*]	[114] [181] [114]

[1*] $\frac{\partial E_g}{\partial T} = -1,226 \cdot 10^{-3}$ *эв/град* [174].

[2*] $\frac{\partial E_g}{\partial T} = -6,5 \cdot 10^{-4}$ *эв/град* [53].

[3*] $\varkappa = 95 \cdot 10^{-3}$ *вт/(см/град)* при $T \sim 100°$ К [258].

[4*] Высокотемпературная модификация; низкотемпературная модификация — ромбоэдрически искаженная структура типа NaCl; $a = 5,886$ Å, $\gamma = 88°35'$; переход происходит при 390—460°С [114].

[5*] Разлагается.

[6*] Непрямые переходы; прямые переходы дают значения 1,62 *эв* для $SnSe_2$ и 2,88 *эв* для SnS_2 [183].

[7*] $\varkappa = 0,018 \frac{вт}{см \cdot град}$ [39].

[8*] При 813°К — полиморфное превращение. При 898° К, 61 ат. % Se: SnSe и $SnSe_2$ образуют эвтектику [39].

[9*] Непрямой переход, $dE_g/dT = -4,3 \cdot 10^{-4}$ *эв/град* [39].

[10*] $\varepsilon_0 = 1280$; $\varepsilon_\infty = 45$, $\omega_l = 139$ *см*$^{-1}$; $\omega_\perp = 26$ *см*$^{-1}$ [254].

[11*] В зависимости от концентрации примесей $m_n^* = 0,48 \div 0,78\ m_0$ [203].

[12*] $m_{dn} = 0,22\ m_0$; $m_{\sigma n} = 0,12 \div 0,18 m_0$ [69]; $m_{\sigma n} = 0,16\ m_0$ [259]; $m_{dn} = 0,44$; $0,32\ m_0$ [60].

[13*] $\parallel c$ μ_p в несколько раз меньше.

[14*] μ_p сильно зависит от концентрации p [128], μ_1, μ_2 — подвижности легких и тяжелых дырок.

Соединения типа A^VB^V—A^VB^{VII}

Полупроводниковые соединения типа A^VB^V

Из соединений этого типа наиболее изучены сплавы Bi_xSb_{1-x}. При $x = 0,92$ [56]:

$\mu_n = 700\ см^2/(в \cdot сек)\ (\sim T^{-3/2})$, $\mu_n/\mu_p = 6$, $m_n/m_0 = 0,17$.

— AsSb — полупроводник с $E_g = 1,6$ *эв* (300°К), $\mu_p = 200\ см^2/(в \cdot сек)$. Плавится при $T = 1080$°К [242].

Полупроводниковые соединения типа A^VB^{VI}

Соединения этого типа используются при создании термоэлектрических устройств. Наиболее изучены Bi_2Se_3 и Bi_2Te_3 и их твердые растворы друг с другом, а также с Bi_2S_3, Sb_2S_3, Sb_2Se_3 и др.

Кристаллы Bi_2Se_3, Bi_2Te_3 кристаллизуются в ромбоэдрической структуре (D_{3d}^5), приводящей к сильной анизотропии их механических и электрических свойств.

Зонная структура — прямая; экстремумы зон расположены на плоскостях отражения зоны Бриллюэна. Вблизи экстремумов поверхности постоянной энергии в обеих зонах близки к эллипсоидам вращения. Дополнительные подзоны имеются как в зоне проводимости, так и в валентной зоне [169] (рис. 21.102).

В других соединениях рассматриваемого типа зонная структура может быть непрямой, как это имеет место, например, в Sb_2Te_3 и As_2Se_3 [197, 198]. Тип про-

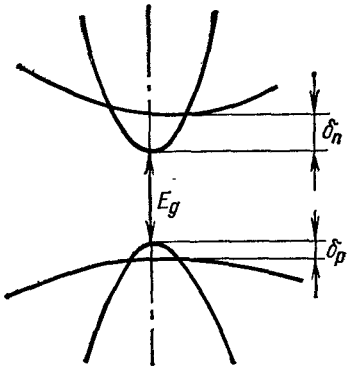


Рис. 21.102. Зонная структура Bi_2Te_3 и Bi_2Se_3. (Для Bi_2Te_3 $\delta_n = 0{,}03$ *эв*, $\delta_p = 0{,}02$ *эв* [169].)

водимости в этих соединениях часто определяется их отклонением от стехиометрии.

Данные по удельной проводимости типичного для этой группы соединения Bi_2Te_3 представлены на рис. 21.103, 21.104.

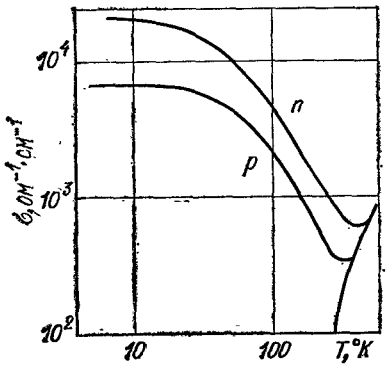


Рис. 21.103. Зависимость удельной проводимости Bi_2Te_3 от температуры (типичные образцы *p*- и *n*-типа) [117].

Полупроводниковые соединения типа A^VB^{VII}

SbI_3 обладает следующими свойствами: $E_g = 2{,}5$ *эв* (300° K), кристаллическая структура гексагональная, C^2_{3i}, $a = 7{,}466 \div 7{,}49$ Å, $c = 20{,}9$ Å [242].

Соединения типа $A^{VI}B^{IV}$—$A^{VI}B^{VI}$

Полупроводниковые соединения типа $A^{VI}B^{IV}$. Из полупроводниковых соединений этого типа известно $CrSi_2$, для которого $E_g = 1{,}3$ *эв*, $\alpha = 87$ мкв/град. Оно обладает проводимостью *p*-типа, подвижность очень мала [16].

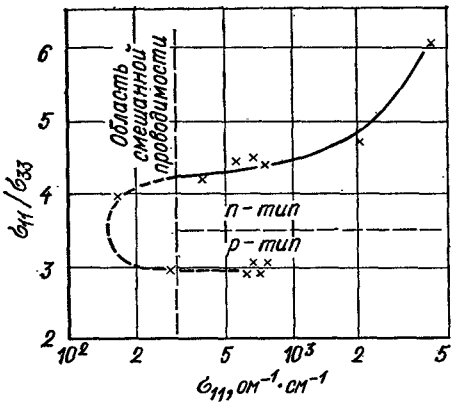


Рис. 21.104. Анизотропия проводимости Bi_2Te_3 [117]:

σ_{11}, σ_{33} — значения удельной проводимости в направлениях, параллельном и перпендикулярном базовой плоскости (001) соответственно.

Таблица 21.25

Электрофизические свойства полупроводниковых соединений типа $A^{VI}B^{VI}$

Соединение	Кристаллическая структура: Тип	Кристаллическая структура: *a*, *c*, Å	Литература	E_g, *эв*	Литература
CrO_3	Кубическая C^{16}_{2v}	$a = 5{,}743$ $b = 8{,}557$ $c = 4{,}789$	[242] [242] [242]	1,4	[242]
Cr_2O_3	Гексагональная D^6_{3d}	$a = 4{,}954$; $4{,}96$ $c = 13{,}584$; $13{,}59$	[242] [242]	1,59—1,63	[242]
$CrTe_2$*	—	—	—	0,17	[16]
$MoS_2$2*	Гексагональная D^4_{6h}	$a = 3{,}15$ $c = 12{,}30$	[1] [1]	1,2	[10]
$MoTe_2$	—	—	—	1,023*	[90]
TeO_2	Тетрагональная D^{14}_{4h}	$a = 4{,}79$ $c = 3{,}77$	[1] [1]	1,5	[10]

* $\mu_n = 12$ *см²/(в·сек)* [70].

2* $\mu_p = 200 \div 300$ *см²/(в·сек)* [249].

3* $dE_g/dT = -5{,}4 \cdot 10^{-4}$ *эв/град* [90].

Электрофизические свойства соединеиий типа $A^V B^{VI}$

Соединение	Кристаллическая структура: Тип	Кристаллическая структура: a, b, c, Å	Литература	ρ, $\frac{г}{см^3}$	Литература	$I_{пл}$, °K	Литература	E_g, эв	Литература	$\frac{dE_g}{dT}$, 10^{-4} $\frac{эв}{град}$	Литература	Тип проводимости	Литература	$\frac{m_n}{m_0}$	Литература	$\frac{m_p}{m_0}$	Литература
As_2S_3	Моноклинная C_{2h}^5	$a = 11,47$ $b = 9,57$ $c = 4,24$	[1] [1] [1]	3,43	[123]	598	[123]	2,5	[123]	—5,6	[10]	—	—	—	—	—	—
As_2Se_3	Моноклинная	—	[207]	4,75	[216]	633	[216]	1,8 1,6 1,9	[114] [123] [107]	—	—	—	—	—	—	—	—
As_2Te_3	Моноклинная C_s^3	$a = 14,4$ $b = 4,85$ $c = 9,92$	[1] [1] [1]	6,1	[123]	635	[116]	1,0 (300°K)	[123]	—	—	—	—	$m_d =$ $= 0,36m_0$	[15]	$m_d =$ $= 0,5m_0$	[15]
Sb_2S_3	Орторомбическая D_{2h}^{16}	$a = 11,2$ $b = 11,28$ $c = 3,83$	[1] [1] [1]	4,64	[123]	819	[116]	1,72 1,62	[114] [12]	—5,7	[114]	n, p^*	[114]	—	—	—	—
Sb_2Se_3	Орторомбическая D_{2h}^{16}	$a = 11,58$ $b = 11,68$ $c = 3,98$	[1] [1] [1]	5,81	[123]	885	[116]	1,2 (300°K)	[123]	—7	[114] [116]	p	[16]	—	—	—	—
Sb_2Te_3	Тригональная D_{3d}^5	$a = 4,25$ $c = 6,07$	[1] [1]	6,57 6,5	[114] [198]	895	[118]	0,3 (300°K) 0,19	[123] [48]	—	—	p	[114]	$m_d =$ $= 0,37m_0$	[15]	$m_d =$ $=0,34m_0$	[15]
Bi_2O_3	Моноклинная C_{2h}^5	$a = 5,83$ $b = 8,14$ $c = 7,48$	[242] [242] [242]	8,76	[242]	1093	[242]	3,2	[242]	—	—	—	—	—	—	—	—
Bi_2S_3	Орторомбическая D_{2h}^{16}	$a = 11,13$ $b = 11,27$ $c = 3,97$	[1] [1] [1]	6,73	[123]	1123	[116]	1,3 (300°K) 1,25 (300°K)	[116] [16]	—	—	n	[114]	1,25	[242]	—	—
BiSe	Ромбоэдрическая	$a = 5,85$: 3,846 $\alpha = 79,0°$	[123] [242]	7,98	[123]	880	[123]	0,4	[123]	—	—	—	—	—	—	—	—
Bi_2Se_3	Тригональная D_{3d}^5	$a = 9,84$ $\alpha = 24,4°$	[132]	7,398	[114]	979	[116]	0,35 0,41	[116] [168]	—2	[168]	n	[167]	$m_\perp =$ $= 0,22m_0$ $m_\parallel =$ $= 0,13m_0$ 0,3	[166] [114]	—	—

Продолжение табл. 21.24

Соединение	Кристаллическая структура: Тип	Кристаллическая структура: a, b, c, Å	Литература	ρ, $г/см^3$	Литература	$T_{пл}$, °K	Литература	E_g, эв	Литература	$\frac{dE_g}{dT}$, 10^{-4} эв/град	Литература	Тип проводимости	Литература	$\frac{m_n}{m_0}$	Литература	$\frac{m_p}{m_0}$	Литература
Bi_2Te_3	Тригональная D_{3d}^5	$a = 10{,}478$ $\alpha = 24°9'32''$	[117]	7,859	[117]	853	[116]	0,16 (300°K) 0,13 (300°K)	[45] [117]	−0,95	[45, 117]	p^{2*}	[114]	$m_d = 0{,}37m_0$ $m_d = 0{,}32m_0$	[117] [123]	$m_d = 0{,}51m_0$ $m_d = 0{,}24m$ $m_{d2} = 2{,}5m_0$ $m_{d2} = 0{,}9m_0$	[117] [123] [196] [182]
V_2O_5	Ромбическая D_{2h}^{13}	$a = 11{,}519$ $b = 3{,}559$ $c = 4{,}371$	[242] [242] [242]	—	—	941	[63]	2,2 2,5	[65] [63]	—	—	—	—	—	—	—	—
α-Nb_2O_5	Моноклинная	$a = 21{,}34$ $b = 3{,}816$ $c = 19{,}47$	[242] [242] [242]	—	—	—	—	1,65	[16]	—	—	n	[16]	—	—	—	—

* Зависит от содержания S.
** При легировании Te можно получить кристаллы n-типа [16].

Продолжение табл. 21.24

Соединение	μ_n, $\frac{см^2}{в \cdot сек}$	Литература	μ_p, $\frac{см^2}{в \cdot сек}$	Литература	$\varkappa$, $\frac{вт}{см \cdot град}$	Литература	α, $\frac{мкв}{град}$	Литература	ε_∞	Литература	ε_0	Литература	Примечания	Литература
As_2S_3	—	—	—	—	—	—	—	—	7,5	[184]	9,7	[184]	$\hbar\omega_l \simeq 0{,}030$ эв	[184]
As_2Se_3	—	—	—	—	—	—	—	—	6,0	[184]	8,9	[184]	$\hbar\omega_l \simeq 0{,}041$ эв	[184]
As_2Te_3	170	[15]	80	[15]	0,025	[114]	230—260	[116]	—	—	—	—	—	—
Sb_2S_3	15	[115]	45	[115]	—	—	—	—	—	—	—	—	$T_D = 310$°K (80°K) $\frac{dE_g}{dP} = -7 \cdot 10$ эв/бар	[132] [210]

Соединение	μ_n, $\frac{см^2}{в \cdot сек}$	Литература	μ_p, $\frac{см^2}{в \cdot сек}$	Литература	$\varkappa$, $\frac{вт}{см \cdot град}$	Литература	α, $\frac{мкв}{град}$	Литература	ε_∞	Литература	ε_0	Литература	Примечания	Литература
Sb_2Se_3	75 15	[16] [114]	45	[16, 114]	—	—	$1{,}2 \cdot 10^3$	[114]	—	—	—	—	$T_D = 240°K$ (80°K) $\frac{dE_g}{dP} =$ $= -14 \cdot 10^{-8}$ *эв/бар*	[132] [210]
Sb_2Te_3*	—	—	280—360 400 2000 (4,2°K)	[114] [44] [83]	0,04	[114]	80 80—100	[116] [114]	—	—	—	—	$T_D = 160°K$ (80°K)	[132]
Bi_2O_3	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	18,2(~2*Мгц*)	[242]	—	—
Bi_2S_3	200	[123]	—	—	0,0206	[114]	700	[114]	—	—	—	—	—	—
BiSe	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
Bi_2Se_3	600—2000 ($\sim T^{-7/2}$) (130—300°K) 600	[114] [114] [16]	—	—	0,024	[147]	300	[16]	—	—	—	—	$T_D = 180°K$(80°K)	[132]
Bi_2Te_3	1200 ($\sim T^{-1,7}$)	[13]	600($\sim T^{-2}$)	[13]	0,025 0,016 0,0175	[242] [147] [242]	170 (*n*-тип) 150 (*p*-тип) 50 (собств.)	[117] [117] [117]	85	[117]	360±50	[192]	$T_D = 212°K$ $T_D = 155{,}5°K$ Расстояние между подзонами дырок 20 *мэв*	[123] [117] [182]
V_2O_5	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
α-Nb_2O_5	22	[242]	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—

* Валентная зона расщеплена на две. Изоэнергетические поверхности первой зоны — 12 эллипсоидов, $m^*_{p1} = 0{,}034m_0$, $m^*_{p2} = 0{,}34m_0$, $m^*_{p3} = 0{,}54m_0$, $m_{d1} = 0{,}18m_0$. Для второй зоны $m_{d2} = 0{,}3\ m_0$ [83]; интервал между зонами 150 *мэв*.

Соединения типа $A^{VII}B^{III}$—$A^{VII}B^{VI}$

Полупроводниковые соединения типа $A^{VII}B^{III}$. Известно полупроводниковое соединение этого типа $MnAl_3$ с шириной запрещенной зоны $E_g = 0{,}45 \div 0{,}58$ *эв* при 300°К, подвижность электронов более 200 $см^2/(в \cdot сек)$, подвижность дырок $\mu_p \sim 200$ $см^2/(в \cdot сек)$ [242].

Полупроводниковые соединения типа $A^{VII}B^{IV}$. Известны полупроводники этого класса $ReSi_2$ с шириной запрещенной зоны $E_g = 0{,}13$ *эв* [16] и MnSi с кубической кристаллической структурой: $a = 4{,}557$ Å, группа T^4, $E_g = 0{,}5 \div 0{,}6$ *эв*, $\mu_p = 10 \div 40$ $см^2/(в \cdot сек)$, $\varkappa = 10^{-2}$ $вт/(см \cdot град)$ [242].

Полупроводниковые соединения типа $A^{VII}B^{VI}$

Таблица 21.26

Электрофизические свойства халькогенидов и окиси маргаица

Соединение	Кристаллическая структура: Тип	Кристаллическая структура: a, b, c, Å	Литература	E_g, эв	μ_n, $\frac{см^2}{в \cdot сек}$	Литература
MnO_2	Ромбическая D_{2h}^{16}	$a = 9{,}27$ $b = 2{,}866$ $c = 4{,}533$	[242] [242] [242]	0,13— —0,19 (300°К)	1,2	[242]
MnSe*	Кубическая O_h^5	$a = 5{,}45$	[216, 242]	0,68 2,5	—	[80] [242]
$MnSe_2$	Кубическая T_h^6	—	[242]	0,15	—	[242]
MnTe2*	Гексагональная D_{6h}^4	$a = 4{,}14$ $c = 6{,}71$	[216] [242]	0,28 1	— 1	[242] [106]
$MnTe_2$3*	—		—	0,48	—	[16]

* Антиферромагнетик. Температура Нееля $T_N = 247$°К.

2* Антиферромагнетик. Температура Нееля $T_N = 310$°К.

3* $\alpha = 439$ *мкв/град*. Температура начала кристаллизации 1154°К [46].

Соединения типа $A^{VIII}B^{V}$ — $A^{VIII}B^{VI}$

Полупроводниковые соединения типа $A^{VIII}B^{V}$. Соединения этого типа изучены слабо. Зона проводимости $PtSb_2$-8 эллипсоидов вращения, большие оси которых расположены в направлениях [111]. Валентная зона — 6 эллипсоидов вращения, расположенных вдоль осей [100] [41]. Энергия прямого перехода $E_d > 0{,}4$ *эв* $E_g = 0{,}08$ *эв* соответствует непрямому переходу [175].

Таблица 21.27.

Электрофизические свойства полупроводниковых соединений типа $A^{VIII}B^{V}$

Соединение	Кристаллическая структура: Тип	Кристаллическая структура: a, b, c, Å	Литература	$T_{пл}$, °К	Литература	E_g, эв	Литература	$\frac{m_n}{m_0}$	Литература	$\frac{m_p}{m_0}$	Литература	μ_n, $\frac{см^2}{в \cdot сек}$	Литература
$CoSb_2$	Орторомбическая D_{2h}^{12}	$a = 3{,}21$ $b = 5{,}78$ $c = 6{,}42$	[1] [1] [1]	—	—	0,2	[16]	—	—	—	—	—	—
$CoSb_3$	Кубическая T_h^5	$a = 9{,}034$; 9,936	[242] [242]	1131	[249]	0,5	[16, 249]	—	—	—	—	300	[16]
$PtSb_2$	Кубическая T_h^6	$a = 6{,}43$	[1]	1503	[41]	0,08	[41]	$m_d = (0{,}42 \div 0{,}54)m_0$ $\frac{m_{\parallel}}{m_{\perp}} = 1{,}4$	[41] [41]	$m_d = (0{,}57 \div 0{,}72)\,m_0$ $m_{\parallel} = 0{,}168m_0$ $m_{\perp 1} = 0{,}098m_0$ $m_{\perp 2} = 0{,}06m_0$	[41] [175] [175] [175]	—	—

Таблица 21.28

Электрофизические свойства полупроводниковых соединеиий типа $A^{VIII}B^{VI}$

Соединение	Кристаллическая структура: Тип	Кристаллическая структура: a, b, c, Å	Литература	$T_{пл}$, °К	Литература	E_g, эв	Литература	μ_n, $\frac{см^2}{в \cdot сек}$	Литература	α, $\frac{мкв}{град}$	Литература
Fe_2O_3	Ромбоэдрическая	$a = 5{,}4271$	[242]	1500 1838	[242] [16]	1,6 2,2	[16] [242, 249]	—	—	—	—
FeS_2	Кубическая T_h^6	$a = 5{,}405$	[242]	962	[249]	1,25	[16]	200	[16]	—	—
$FeSe_2$	Ромбическая D_{2h}^{12}	$a = 3{,}58$ $b = 4{,}79$ $c = 5{,}72$	[1] [1] [1]	1183*	[16]	0,95	[16]	—	—	62	[16]
$FeTe_2$	Ромбическая D_{2h}^{12}	$a = 3{,}85$ $b = 5{,}34$ $c = 6{,}26$	[1] [1] [1]	1015*	[16]	0,46	[16]	1	[51]	64	[16]
Fe_2Te_3	—	—	—	—	—	0,34	[70]	11,5	[242]	—	—
NiO[2]*	Кубическая O_h^5	$a = 4{,}18$	[1]	3170	[42]	3,7[3]*	[95]	—	—	—	—

* Приведены температуры начала кристаллизации, так как эти дихалькогениды плавятся с разложением.

2* $\rho = 6{,}6$ *г/см*³, $\varkappa = 0{,}0024$ *вт/(см·град)* [132], $\mu = 0{,}1$ *см²/(в·сек)* [95], $\mu = 0{,}2$ *см²/(в·сек)* [25], $\varepsilon_\infty = 4{,}75$, $\varepsilon_0 = 11{,}9$ [29]. Поляроиный полупроводник; может обладать магнитным порядком.

3* Соответствует не ширине запрещенной зоны, а электронному переходу $3d \rightarrow 4s$; ширина запрещеиной зоны значительно больше.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Landolt-Börnstein.** Zählenwerte und Funktionen aus Physik, Chemie, Astronomie, Geophysik, Technik.— «J. Springer», 1955, Bd 1, S. 4.
2. **Wifkoff R. W. C.** Cristall Structures. N. Y., Interscience Publ., 1953.
3. **Харциев В. Е.** «Физика твердого тела», 1962, т. 4, с. 433.
4. **Albers W.** «Phys. Chem. Sol.», 1960, v. 15, p. 306.
5. **Maesen F., Witmer C.** Intern. Conf. Semicond. Phys. Paris, 1964, p. 1211.
6. **Wohler L., Shliephake O.** «Z. anorgan. und allgem. Chem.», 1926, Bd 151, S. 1.
7. **Ефимов Б. А.** «Физика твердого тела», 1963, т. 7, с. 2523.
8. **Atanable S.** «J. Phys. Soc. Japan», 1960, v. 15, p. 989.
9. **Физический** энциклопедический словарь. М., «Советская энциклопедия», 1960.
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.** «J. Phys. Soc. Japan », 1955, v. 10, p. 549.
13. **Drabble G.** «Proc. Phys. Soc.», 1956, v. B69, p. 1101; 1958, v. B72, p. 380.
14. **Nayar P. S., Verma J. K. D., Nag B. O.** «J. Appl. Phys.», 1968, v. 39, p. 4465.
15. **Rodot M.** «Phys. St. Sol.», 1963, v. 3, p 10.
16. **Угай Я. А.** Введение в химию полупроводников. М., «Высшая школа», 1965.
17. **Benedict B. P., Look D. C.** «Phys. Rev. B», 1970, v. 2, p. 4949.
18. **Кот М. В., Крецу Л. В.** «Изв. АН СССР. Сер. физ.», 1964, т. 281, с. 295.
19. **Novakov T., Prins R.** «Sol. State Comm.», 1971, v. 9, p. 1975.
20. **Stevenson M. J.** Intern. Conf. Semicond. Phys. Prague, 1960, p. 1083.
21. **Hopfield J. J., Thomas D. G.** «Phys. Rev.», 1961, v. 122, p. 35.
22. **Dimmock J. O., Wheeler R. J.** «J. Appl. Phys.» 1961, v. 32, p. 2271.
23. **Noguet P. C. e. a.** «J. Phys.», 1965, v. 26, p. 317.
24. **Gerstein B. C. e. a.** «J. Chem. Phys.», 1967, v. 47, p. 2109.
25. **Богомолов В. И. и др.** «Физика твердого тела», 1967, т. 9, с. 3175.
26. **Prener I.** Woodbury. Intern. Conf. Semicond. Phys. Paris, 1964, p. 1231.
27. **Хилсум К., Роуз-Инс А.** Полупроводинки типа AIII—BV. Пер. с англ. М., Изд-во иностр. лнт., 1963.

28. **Мосс Т. С.** Оптические свойства полупроводников. Пер. с англ. М., Изд-во иностр. лнт., 1961.
29. **Marshall R.** Intern. Conf. Semicond. Phys. Paris, 1964, p. 1101.
30. **Fisher A. S.** "Helv. Phys. acta", 1963, v. 36, p. 317.
31. **Грамацкий В. И., Мушинский В. П.** «Изв. АН СССР. Сер. физ.», 1964, т. 28, с. 1077.
32. **Ахундов Г. А.** и др. Intern. Conf. Semicond. Phys. Paris, 1964, p. 1277.
33. **Veric C.** New Develop Semiconductors, Leyden, 1973, p. 514.
34. **Мирзабаев М.** и др. «Изв. АН СССР. Сер. физ.», 1964, т. 28, с. 1300.
35. **Dennis L. M., Hulse R. E.** "J. Amer. Chem. Soc.", 1930, v. 52, p. 3553.
36. **Жузе В. П.** Полупроводниковые материалы. Вып. 17. Изд-во Ленингр. дома науч.-тех. пропаганды. Л., 1957.
37. **Парфеньев Р. В.** и др. «Физика твердого тела», 1962, т. 4, с. 3596.
38. **Juldner J.** e. a Proc. XI Conf. Phys. Semicond., Warshawa, 1972, p. 351.
39 **Хворостенко А. С.** Селениды металлов: меди, таллия, олова, свинца. Сер.: Физ. и хим. свойства твердого тела. М., ВНИИКИ, 1971
40. **Rodot M.** "Compt. rend. Acad. Sci.", 1965, v. 260, p. 1908.
41. **Emtage P. R.** "Phys. Rev.", 1965, v. 138, p. 246.
42. **Botling J. F.** "J. Chem. Phys.", 1960, v. 33, p. 305.
43. **Справочник** по полупроводниковым диодам, транзисторам и нитегральным схемам. Под ред. Н. Н. Горюнова. М., «Энергия», 1972.
44. **Von Liebe L.** "Апп. Physik", 1965, Bd 7, N 15, S. 179.
45. **Sälzer O., Nieke H.** "Апп. Physik", 1965, Bd 7, N 15, S. 192.
46. **Onuki M.** "J. Phys. Soc. Japan", 1965, v. 20, p. 171.
47. **Кот М. В.** и др. «Физика твердого тела», 1965, т. 7, с. 1242.
48. **Väschke R.** "Апп. Physik", 1965, Bd 7, N 15, S. 106.
49. **Ломакина Г. А.** «Физика твердого тела», 1965, т. 7, с. 600.
50. **Komiya H.** "Phys. Rev.", 1964, v. 133, p. A1679.
51. **Suchet J.** "Compt. rend. Acad. Sci.", 1964, v. 259, p. 3219.
52. **Rosenman M. J.** "Compt. rend. Acad. Sci.", 1964, v. 259, p. 2621.
53. **Vennik J.** "Compt. rend. Acad. Sci.", 1965, v. 260, p. 496.
54. **Hacke J.** "J. Appl. Phys.", 1964, v. 35, p. 2484.
55. **Redin A. D.** "Phys. Rev.", 1958, v. 109, p. 1916.
56. **Rodot M.** "Compt. rend. Acad. Sci.", 1964, v. 258, p. 5414.
57. **Baer W. S.** "Phys. Rev.", 1964, v. 135, p. 1388.
58. **Koner E., Robenau A.** "Z. Naturforsch.", 1958, Bd 13, S. 531.
59. **Dunstädter H.** "Z. Physik", 1954, Bd 137, S. 383.
60. **Вольфштейн В. М., Фистуль В. И.** В сб.: Электроника и ее применение. Т. 4. Сер. Итоги иауки и техники. М., ВИНИТИ АН СССР, 1973.
61. **Соммер А. Х.** Фотоэмиссионные материалы. Пер. с англ. М., «Мир», 1972.
62. **Физические** свойства халькогенидов редкоземельных элементов. Под ред. В. П. Жузе. Л., «Наука», 1973.
63. **Allersma T.** e. a. "J. Chem. Phys.", 1967, v. 46, p. 154.
64. **Reid F.** "J. Electrochem. Soc.", 1964, v. 111, p. 943.
65. **Мокеров В. Г., Раков А. В.** «Физика твердого тела», 1969, т. 11, с. 197.
66. **Park V. S.** "Phys. Rev.", 1966, v. 143, p. 512.
67. **Lott S. A., Synch D. W.** "Phys. Rev.", 1966, v. 141, p. 681.
68. **Camassel J.** e. a. "Sol. State Comm.", 1973, v. 13, p. 63.
69. **Marby J. A.** "Phys. Rev.", 1965, v. 140, p. 304.
70. **Arumu Z., Mancu P.** Rend. Semin fac. Sci. Univ. Gagliari, 1963, v. 33, N 3—4, p. 26.
71. **Baar N.** "Z. anorg. Chem.", 1911, Bd 70, S. 372.
72. **Ogorbec L.** "Crocc. Chem. Acta", 1965, v. 37, p. 49.
73. **Moss T. S., Ellis B.** Intern. Conf. Semicond. Phys. Paris, 1964, p. 311.
74. **Brüesch P.** e. a. "Sol. State Comm.", 1973, v. 13, p. 9.
75. **Whitaker J.** "Sol. St. Electronics", 1965, v. 8, p. 649.
76. **Угай Я. А., Зюбина Т. А.** «Неорган. материалы», 1965, т. 1, с. 790.
77. **Zdanowich W., Wojkowski A.** "Phys. St. Sol.", 1965, v. 8, p. 569.
78. **Douglas R.** "J. Phys. Chem. Sol.", 1965, v. 21, p. 329.
79. **Richard D.** "J. Phys. Chem. Sol.", 1965, v. 26, p. 439.
80. **Маковецкий Г. И., Сирота И. Н.** «Докл. АН БССР», 1965, т. 9, с. 15.
81. **Abraham A.** «Чехосл. физ. журн.», 1965, т. B15, с. 138.
82. **Tamura H.** e. a. "Sol. State Comm.", 1973, v. 12, p. 11.
83. **Von Middendorff A.** e. a. "Sol. State Comm.", 1973, v. 13, p. 443.
84. **Цидильковский И. М.** Электроны и дырки в полупроводниках. М., «Наука», 1972.
85. **Орлова Н. И., Шишкин П. Т.** «Изв. АН АзССР. Сер. физ.-мат.», 1964, № 4, с. 53.
86. **Winker H.** "Helv. Phys. Acta", 1955, v. 28, p. 633.
87. **Myers H. P.** "Sol. State Comm.", 1964, v. 2, p. 321.
88. **Сорокин Г. П.** «Изв. вузов. Физика», 1965, № 4, с. 140.
89. **Голубков А. В.** и др. «Физика твердого тела». 1965, т. 7, с. 2430.
90. **Sopetit A.** "J. Phys.", 1965, v. 26, p. 175.
91. **Гертович Т. С.** и др. «Укр. фіз. журн.», 1973, т. 18, с. 1523.
92. **Verolinu C.** "J. Appl. Phys.", 1965, v. 36, p. 1791.
93. **Милославский В. К.** «Физика твердого тела», 1965, т. 7, с. 1550.
94. **Сорокин Г. П.** и др. «Физика твердого тела», 1965, т. 7, с. 2244.
95. **Ксендзов Я. М., Драбкин И. А.** «Физика твердого тела», 1965, т. 7, с. 1884.
96. **Лашкарёв Г. В.** «Укр. фіз. журн.», 1965, т. 10, с. 520.
97. **Лашкарёв Г. В.** и др. «Укр. фіз. журн.», 1965, т. 10, с. 516.
98. **Алиев С. А.** и др. «Физика и техника полупроводников», 1973, т. 7, с. 1086.
99. **Aulich E., Brebner J. L., Mooser E.** "Phys. St. Sol.", 1969, v. 31, p. 129.
100. **Угай Я. А.** и др. «Докл. АН СССР», 1965, т. 163, с. 663.
101. **Коломиец Б. Т.** и др. «Физика твердого тела», 1965, т. 7, с. 2534.
102. **Davlen V. R. M.** "Phys. Rev.", 1966, v. 143, p. 666.
103. **Komiya H.** e. a. "Phys. Rev.", 1964, v. A133, p. 679.
104. **Вердиева Н. А.** и др. «Изв. АН АзССР», 1973, № 3, с. 85.
105. **Leotin J.** e. a. "Sol. State Comm.", 1974, v. 15, p. 693.
106. **Wassher J. D.** Intern. Conf. Semicond. Phys. Paris, 1964, p. 1269.
107. **Коломиец Б. Т.** и др. Ibid., p. 1283.
108. **Bliek L. M., Landwehr G.** "Phys. St. Sol.", 1969, v. 33, p. K67.

109. **Кэй Дж., Лэби Т.** Таблицы физических и химических постоянных. Пер. с англ. М., Физматгиз, 1962.
110. **Masumi T.** "Phys. St. Sol.", 1965, v. 11, p. 163.
111. **Zdanovich W., Wojkowski A.** "Phys. St. Sol.", 1966, v. 16, p. K129.
112. **Krevs V. E. a. a.** "Phys. St. Sol. (a)", 1974, v. 65, p. K43.
113. **Адирович Э. И., Гольдштейн Л. М.** «Физика твердого тела», 1966, т. 8, с. 2467.
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 Standards. Technical Note. 1962, p. 153.
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. Хогарта. Пер. с англ. М., «Мир», 1968.
118. **"Thermophysical** Properties of High Temperature Solid Materials". Purdue Uhio, 1967.
119. **Kazuo A., Heihachi M., Tetur T.** 'Japan J. Appl. Phys.", 1971, v. 10, p. 1107
120. **Grosse P.** "Engebnisse der exakten Naturwissenschaften". Bd. 48. Springer Tracts in Modern Physics. Berlin, 1969.
121. **Горюнова Н. А.** Сложные алмазоподобные полупроводники. М., «Советское радио», 1968.
122. **Wagrur R. J., Ewald A. K.** "J. Phys. Chem. Sol.", 1971, v. 32, p. 697.
123. **Родо М.** Полупроводниковые материалы. Пер. с франц. М., «Металлургия», 1971.
124. **Добролеж С. А.** и др. Карбид кремния. Киев, Гос. изд-во тех. лит. УССР, 1963.
125. **Равич Ю. И.** и др. 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.
127. **Albers W.** e. a. "J. Appl. Phys., Suppl.", 1961, v. 32, p. 2220.
128. **Kafals J. A., Brebrick R. F., Strauss A. J.** "Appl. Phys. Lett.", 1963, v. 4, p. 93.
129. **Соболев В. В.** «Физика твердого тела», 1970, т. 12, с. 2687.
130. **Cuhen M. L., Au-Yang M. Y.** "Phys. Rev.", 1969, v. 178, p. 1358.
131. **Winkler H.** "Helv. Phys. acta", 1955, v. 28, p. 663.
132. **Aigrain P., Balkansky M.** Table de constante des Semiconducteur's. Pergamon Press, Paris, 1961.
133. **Turner W. J., Fisher A. S., Reese W. E.** "J. Appl. Phys.", 1961, suppl. to v. 32, p. 2241.
134. **Горюнова Н. А.** и др. «Физика твердого тела», 1969, т. 11, с. 280.
135. **Turner W. J.** "Phys. Rev.", 1961, v. 121, p. 759.
136. **Goncharenko G. I., Sheochenko V. Yu.** "Phys St. Sol.", 1970, v. 41, p. K117
137. **Aubin M., Brizzard R., Messa J. P.** "Canad. J. Phys.", 1970, v. 48, p. 2215.
138. **Физика** и химия соединений типа $A^{II}B^{VI}$. Пер. с англ. Под ред. А. С. Медведева. М., «Мир», 1970.
139. **Hamilton P. H.** "Semicond. Proc. and Sol. St. Technol.", 1964, v. 7, N 6, p. 15.
140. **Betts D. D.** "Canad. J. Phys.", 1961, v. 39, p. 223.
141. **Robic R. A., Edwards J. L.** "J. Appl. Phys.", 1966, v. 37, p. 2659.
142. **Rode D. L.** "Phys. Rev.", 1970, v. 2B, p. 4036.
143. **Милославский В. К., Шкляреаский О. Н.** «Физика и техника полупроводников», 1971, т. 5, с. 926.
144. **Watanabe H., Wada H., Takahashi T.** "Japan J. Appl. Phys.", 1964, v. 3, p. 617.
145. **Полупроводники** с узкой запрещениой зоной и их применение. М., «Мир», 1969.
146. **Sobolev V. V., Surbu N. N.** "Phys. St. Sol. (B)", 1973, v. 51, p. 863.
147. **Драбл Д., Гольдсмит Г.** Теплопроводность полупроводников. Пер. с англ. М., Изд-во иностр. лит., 1962.
148. **Balkansky M., Zellag E. A. M., Longen D.** "J. Phys. Chem.", 1966, v. 27, p. 299.
149. **Segall B., Lorenz M., Woodbury H.** "Phys. Rev.", 1963, v 129, p. 2471.
150. **Медведева З. С.** Халькогениды элементов III Б подгруппы периодической системы. М., «Наука». 1968.
151 **Tagiev B. F.** e. a. "Phys. St. Sol. (a)", 1970, v. 3, p K119.
152. **Chiei T.** e. a. "J. Phys. Soc. Japan", 1970, v. 29, p 150.
153. **Aven M** "J. Appl. Phys.", 1971, v. 42, p. 1204.
154. **Park Y. S., Hemenger P. M., Chung C. H.** "Appl. Phys. Lett.", 1971, v. 18, p. 45.
155. **Reignold D. G., Litton C. W., Collins T.** "Phys. Rev." 1965, v. 146, p. 1726.
156. **Seiler D. G., Galazka R. R., Becher W. M.** "Phys. Rev.". 1971, v. B3, p 4274.
157. **Баширов Р. И., Гаджиев Р. М.** «Физика твердого тела», 1970, т. 4, с. 1936.
158. **Поморцев Р. В.** и др. В кн.: Труды IX Междунар. конф. по физике полупроводников. Т 2. М., «Наука», 1969, с. 763
159. **Dietz R. F., Hopfield J. J., Thomas D. G.** "J. Appl. Phys.", 1961, v. 32, p. 2282.
160. **Dickey D., Mavrodes J.** "Sol. State Comm.", 1964, v. 2, p. 213.
161. **Fisher P., Fan H.** "Bull. Amer. Phys. Soc.", 1959, v. 4, p. 409.
162. **Рывкин С. М.** Фотоэлектрические явления в полупроводниках. М., Физматгиз, 1963.
163. **Marchall G.** "J. Phys. (France)", 1970, v. 31, p. 681.
164. **Fingold L.** "Phys. Rev. Lett.", 1964, v. 13, p. 233.
165. **Yabumoto T** "J. Phys. Soc. Japan", 1962, v. 13, p. 559.
166. **Köhler H., Landwehr G.** "Phys. St. Sol.", 1971, v. 45, p. K109.
167. **Caywood L. P., Miller G. R.** "Phys. Rev. B". 1970, v 2, p. 3209.
168. **Black J.** "Phys. Chem. Sol.", 1957, v. 2, p. 240.
169. **Смирнов И. А., Шадричев Е. В., Кутасов В. А.** «Физика твердого тела», 1969, т. 11, с. 3311
170. **Маделунг О.** Физика полупроводниковых соединений элементов III и V групп. Пер. с англ. М., «Мир», 1967.
171. **Long D.** Energy Bands in Semiconductors. Interscience Publishers. A Division of John Wiley and Sons. New York—London—Sydney, 1968.
172. **Minden H T.** "Appl. Phys. Lett.", 1970, v. 17, p. 358.
173. **Kessler F. R.** "Phys. St. Sol.", 1964, v. 6, p. 3.
174. **Sambros A. P. e. a.** "Phys. St. Sol.", 1973, v. 57, p. 793.
175. **Damon D. H., Miller R. C., Emtage P. R.** "Phys. Rev. B", 1972, v. 5, p. 2175.
176. **Mears A., Stradling R. A.** "J. Phys. C", 1971, v. 4, p. 122.
177. **Tzidilkovsky I. M., Akselrod M. M., Uritsky S. I.** "Phys. St. Sol.", 1965, v. 12, p. 667.
178. **Steigmeier E. F., Kudman I.** "Phys. Rev.", 1966, v. 141, p. 767.

179. **Kusel R., Weichmann F. L.** "Canad. J. Phys.", 1970, v. 48, p. 2643.
180. **Dismukes D.** "J. Phys. Chem. Sol.", 1971, v. 32, p. 1689.
181. **Цуркан А. Е., Максимова О. Г., Верлан В. И.** В сб.: Сложные полупроводники и их физические свойства. Кишинев, «Штиница», 1971, с. 128.
182. **Schröder B. e. a.** "Phys. St. Sol. (B)", 1973, v. 59, p. 561.
183. **Domingo G., Itoga R. S., Kannewur C. R.** "Phys. Rev.", 1966, v. 143, p. 536.
184. **Марков Ю. Ф.** Исследование оптических свойств полупроводниковых соединений в далекой инфракрасной области спектра. Кандидатская диссертация. ФТИ им. А. Ф. Иоффе. Л., 1972.
185. **Ehrenreich H.** "Phys. Rev.", 1960, v. 120, p. 1951.
186. **Панфилов В. В., Субботин С. Л., Верещагин Л. Ф.** «Докл. АН СССР», 1971, т. 96, с. 559.
187. **Drexner J., Heyman P. M.** "Phys. Rev. B", 1971, v. 3, p. 2689.
188. **Heller M. W., Babiskin J., Radoff P. L.** "Phys. Rev.", 1971, v. A36, p. 363.
189. **Чайдс У.** Физические постоянные. Пер. с англ. М., Физматгиз, 1961.
190. **Полупроводники** в науке и технике. Под ред. А. Ф. Иоффе. Т. 1. М., Изд-во АН СССР, 1957.
191. **Becher W., Fuhs W., Stuke J.** "Phys. St. Sol.", 1971, v. 44, p. 147.
192. **Unkelbach K. H. e. a.** "Phys. St. Sol. (B)", 1973, v. 60, p. K41.
193. **Slack G. A.** "J. Appl. Phys.", 1966, v. 143, p. 666.
194. **Мороз А. И., Одарич В. А.** «Укр. физ. журн.», 1971, т. 16, с. 1501.
195. **Сидякин В. Г. Руденко В. Н.** «Изв. АН СССР. Сер. неорган. матер.», 1970, т. 6, с. 1861.
196. **Сологуб В. В., Голецкая А. Д., Парфеньев В. В.** «Физика твердого тела», 1972, т. 14, с. 915.
197. **Коломиец Б. Т. и др.** «Физика и техника полупроводников», 1971, т. 5, с. 2301.
198. **Шутов С. О., Соболев В. В., Смешливый Л. И.** В сб.: Полупроводниковые соединения и их твердые растворы. Ред.-изд. отд. АН МССР, Кишинев, 1970, с. 155.
199. **Whitsett C. R., Nelson D. A.** "Phys. Rev. B", 1972, v. 5, p. 3125.
200. **Overhof H.** "Phys. St. Sol.", 1971, v. 43, p. 221.
201. **Miller K. A., Schneider J.** "Phys. Lett.", 1963, v. 4, p. 288.
202. **Look D. C., Moore D. L.** "Phys. Rev. B", 1972, v. 5, p. 3406.
203. **Lewis J. E.** "Phys. St. Sol. (B)", 1973, v. 59, p. 367.
204. **Onton A.** "Phys. Rev. B", 1971, v. 4, p. 4449.
205. **Brebrick R. F., Strauss A. J.** "Phys. Rev.", 1963, v. 131, p. 104.
206. **Bis R. F., Dixon J. R.** "Phys. Rev. B", 1970, v. 2, p. 1004.
207. **Потемкин А. Я.** Полупроводниковые материалы. М., Изд-во Моск. авиац. ин-та, 1968.
208. **Nilsson N. G.** "Phys. St. Sol. (A)", 1973, v. 19, p. K75.
209. **Grant F. A.** "Rev. Mod. Phys.", 1959, v. 31, p. 646.
210. **Мейлиск А. И., Кирс Я. Я.** «Физика и техника полупроводников», 1969, т. 3, с. 11.
211. **Frederikse H. P. R.** "J. Appl. Phys.", 1961, Suppl. to v. 32, p. 2211.
212. **Остин И. Р., Мотт Н.** Физики о физике. Пер. с англ. М., «Знание», 1972.
213. **Пол В.** В кн.: Труды IX междунар. конф. по физике полупроводников. Т. 1. М., «Наука», 1968, с. 17.
214. **Кесаманлы Ф. П.** «Физика и техника полупроводников», 1974, т. 8, с. 225.
215. **Chiei T. e. a.** "Japan J. Appl. Phys.", 1971, v. 10, p. 1698.
216. **Справочник** химика. М., «Химия», 1964.
217. **Shaver P. J., Blair J.** "Phys. Rev.", 1966, v. 141, p. 649.
218. **Langer D.** Intern. Conf. Semicond. Phys. Paris, 1964, p. 241.
219. **Kahan A., Lipson H. G., Loewenstein E. V.** Intern. Conf. Semicond. Phys. Paris, 1964, p. 1067.
220. **Mitra S. S., Marshall R.** Intern. Conf. Semicond. Phys. Paris, 1964, p. 1085.
221. **Киреев П. С.** Физика полупроводников. М., «Высшая школа», 1969.
222. **Блатт Ф.** Физика электронной проводимости в твердых телах. Пер. с англ. М., «Мир», 1971.
223. **Блатт Ф.** Теория подвижности электронов в твердых телах. Пер. с англ. М., Физматгиз, 1963.
224. **Данлэп У.** Введение в физику полупроводников. Пер. с англ. М., Изд-во иностр. лит., 1959.
225. **Фистуль В. И.** Сильно легированные полупроводники. М., «Наука», 1967.
226. **Prince M. B.** "Phys. Rev.", 1954, v. 93, 1204.
227. **Голикова О. А., Мойжес Г. Я., Стильбанс Л. С.** «Физика твердого тела", 1961, т. 3, с. 3105.
228. **Brebrick R. F., Scanlon W. W.** "Phys. Rev.", 1954, v. 99, p. 598.
229. **Stradling R.** "Sol. State Comm.", 1968, v. 6, p. 665.
230. **Cardona M.** Phys. III—V Compounds. Acad. Press, 1966, v. 3 p. 125.
231. **Stradling R.** Electronic Components, 1135—1142, October 1958.
232. **Walton A., Mishra U.** "Proc. Phys. Soc.", 1967, v. 90, p. 1111.
233. **Stradling R.** "Phys. Lett.", 1966, v. 20, p. 217.
234. **Prince M. B.** "Phys. Rev.", 1953, v. 92, p. 681.
235. **Кот М. В., Прилепов В. Д., Цуркан А. Е.** В сб.: Полупроводниковые соединения и их твердые растворы. Ред. -изд. отд. АН МССР, Кишинев, 1970, с. 3.
236. **Машковский М. В. и др.** «Зарубежная электронная техника», Вып. 12. 1974, с. 3. Произв.-изд. отд. ЦНИИ «Электроника».
237. **Kalashnikow S. G.** "J. Phys. Chem. Sol.", 1959, v. 8, p. 52.
238. **Ewald A. W., Tutle O. N.** Ibid, p. 523.
239. **Иванов-Омский В. И. и др.** «Физика и техника полупроводников», 1970, т. 4, с. 264.
240. **Гельмонт Б. Л. и др.** «Физика и техника полупроводников», 1971, т. 5, с. 266.
241. **Nasledov D. N., Shevchenko V. Ya.** "Phys. St. Sol. (a)", 1973, v. 15, p. 9.
242. **Кристаллохимические,** физико-химические и физические свойства полупроводниковых веществ. М., Стандартгиз, 1973.
243. **Никитин Е. Н., Базанов В. Г., Тарасов В. И.** «Физика твердого тела», 1961, т. 3, с. 3645.
244. **Blunt R. F., Frederikse H. P. R., Hosler W. R.** "Phys. Rev.", 1955, v. 100, p. 663.
245. **Lipson H. C., Kahan A.** "Phys. Rev., 1964, v. 133, p. A800.
246. **Redin R. D., Morric R. G., Danielson G. C.** "Phys. Rev.", 1958, v. 109, p. 1916.
247. **Koenig P., Lynch D. W., Danielson G. C.** "J. Phys. Chem. Sol.", 1963, v. 20, p. 122.
248. **Физико-химия** твердого тела. Сборник. Под ред. Б. Сталинского. М., «Химия», 1972.
249. **Соминский М. С.** Полупроводники. Л., «Наука», 1967.
250. **Alper T., Sanders G. A.** "J. Phys. Chem. Sol.", 1967, v. 28, p. 1637.

251. **Long D., Shmit J. L.** «Semicond. Semimetals», 1970, v. 5, p. 175.
252. **Baars J., Jorger F.** "Sol. State Comm.", 1972, v. 10, p. 875.
253. **Smith J. L., Helzer E. L.** "J. Appl. Phys.", 1969, v. 40, p. 4865.
254. **Burstein E., Pinczuk A., Wallis R. F.** Proceedings of the conference on physics of semimetals and narrow gap semiconductors.— "J. Phys. Chem. Sol.", 1971, v. 32, suppl. N 1, p. 251.
255. **Ih C. S., Langenberg O. N.** Proceedings of the conference on physics of semimetals and narrow gap semiconductros.— "J. Phys. Chem. Sol.", 1971, v. 32, suppl. N 1, p. 73.
256. **Горбачев В. В.** и др. «Физика и техника полупроводников», 1973, т. 7, с. 844.
257. **Сысоева Л. М.** «Физика твердого тела», 1965, т. 7, с. 2223.
258. **Lewis J. E., Rodot H., Haen P.** "Phys. St. Sol.", 1968, v. 29, p. 743.
259. **Wright.** "Proc. Brit. Ceram. Soc.", 1968, v. 10, p. 103.
260. **Исмаилов Р. И., Гусейнова Э. С., Акуидов Г. А.** «Физика твердого тела», 1963, т. 5, с. 3620.
261. **Gerstein B. C., Chung P. L., Danielson G. C.** "J. Phys. Chem. Sol.", 1966, v. 27, p. 1161.
262. **Jelinek F. J., Shikell W. D., Gerstein B. C.** "J. Phys. Chem. Sol.", 1967, v. 28, p. 267.
263. **Коцюмаха П. А. и др.** «Изв. АН СССР. Сер. физ.», 1964, т. 28, с. 1329.
264. **Dexter D. S.** "J. Phys. Chem. Sol.", 1959, v. 8, p. 473.
265. **Андроник И. К., Кот М. В.** «Изв. АН СССР. Сер. физ.», 1964, т. 28, с. 1028.
266. **Соболев В. В.** «Изв. АН СССР. Сер. физ.», 1964, т. 28, с. 1090.
267. **Кот М. В., Мшенский В. А.** «Изв. АН СССР. Сер. физ.», 1964, т. 28, с. 1025.
268. **Иванов-Омский В. И. и др.** «Докл. АН СССР», 1965, т. 162, с. 1269.
269. **Dexter D. S.** "J. Phys. Chem. Sol.", 1959, v. 8, p. 473.
270. **Haan A.** "Metall. V. Erz.", 1914, v. 10, p. 831.
271. **Asanable S., Kazaki A. O.** "Proc. Phys. Soc.", 1959, v. 73A, p. 824.
272. **Syden H.** "Phys. Rev.", 1964, v. 135, p. 514.
273. **Copper J.** "J. Phys. Chem. Sol.", 1964, v. 25, p. 1277.
274. **Palik E.** "Phys. Rev.", 1964, v. 135, p. 763.
275. **Sagar A., Rubenstein M.** "Phys. Rev.", 1966, v. 43, p. 55.
276. **Tippins H.** "Phys. Rev.", 1965, v. 140, p. 316.
277. **Prosser V.** "Чехосл. физ. журн.», 1965, т. B15, с. 128.
278. **Dziuba Z., Zakrjewski T.** "Phys. St. Sol.", 1965, v. 7. p. 1019.
279. **Иванов-Омский В. И. и др.** "Phys. St. Sol.", 1965, v. 8, p. 613.
280. **Adams S.** "Sol. State Comm.", 1964, v. 2, p. 387.
281. **Park J. S., Chan F. S.** "J. Appl. Phys.", 1965, v. 36, p. 800.
282. **Maesen F. D.** Intern. Conf. Semicond. Phys. Paris, 1964, p. 1211.
283. **Eavesetal L.** "J. Phys. G", 1971, v. 4, p. 142.
284. **Ефимова Б. А.** «Физика твердого тела», 1965, т. 7, с. 2524.
285. **Mizuka N., Tanaka L.** "Phys. St. Sol.", 1970, v. 42, p. 257.
286. **Sukioka K., Tamura H.** "Phys. Lett.", 1972, v. A37, p. 243.
287. **Kanimura H., Nakado H.** "J. Phys. Sol. Japan", 1966, v. 21, p. 27.

ГЛАВА 22

ПОТЕНЦИАЛЫ ИОНИЗАЦИИ И ЭНЕРГИИ ДИССОЦИАЦИИ

22.1. ПОТЕНЦИАЛЫ ИОНИЗАЦИИ АТОМОВ

Потенциалом ионизации называется энергия, необходимая для отрыва электрона от атома или иона.

В табл. 22.1 приведены последовательные потенциалы ионизации атомов и ионов в электронвольтах [1, 2]: U_1 — энергия, необходимая для отрыва электрона от нейтрального невозбужденного атома; U_2 — энергия, необходимая для отделения электрона от однозарядного (положительного) невозбужденного иона, и т. д. Таблица составлена на основании работ [1, 2], причем предпочтение отдавалось значениям, для которых указана экспериментальная погрешность.

Таблица 22.1

ПОТЕНЦИАЛЫ ИОНИЗАЦИИ АТОМОВ

Атомный номер	Химический символ	U_1	U_2	U_3	U_4	U_5	U_6	U_7	U_8	U_9	U_{10}	U_{11}
1	H	13,595										
2	He	24,580	54,403									
3	Li	5,390	75,619	122,42								
4	Be	9,320	18,206	153,85	217,66							
5	B	8,296	25,149	37,92	259,298	340,13						
6	C	11,264	24,376	47,864	64,476	391,986	489,84					
7	N	14,54	29,605	47,426	77,45	97,863	551,925	666,83				
8	O	13,614	35,146	54,934	77,394	113,873	138,08	739,114	871,12			
9	F	17,418	34,98	62,646	87,23	114,214	157,117	185,139	935,8±0,3	1101,8		
10	Ne	21,559	41,07	63,5±0,1	97,16	126,4	157,91	207,2±0,1	239,1±0,1	1195,4±0,3	1360,2	
11	Na	5,138	47,29	71,8±0,1	98,88	138,6	172,36	208,444	264,2±0,1	299,7±0,1	1464,7±0,3	1646,4
12	Mg	7,644	15,03	78,2±0,1	109,29	141,23	186,8±0,1	225,31	265,957	328,0±0,1	367,2±0,1	1761,23
13	Al	5,984	18,823	28,44	119,96	153,77	190,42	241,8±0,1	285,13	330,1	398,6±0,1	441,9

Атомный номер	Химический символ	U_1	U_2	U_3	U_4	U_5	U_6	U_7	U_8	U_9	U_{10}	U_{11}
14	Si	8,149	16,34	33,46	45,13	166,73	205,11	246,41	304,0±0,1	351,83	401,3	476,0
15	P	10,55	19,65	30,156	51,354	65,007	220,414	263,31	309,3±0,1	372,8±0,2	425,46	479,4
16	S	10,357	23,4	34,8	47,29	72,5±0,1	88,0±0,1	280,99	328,4±0,1	378,95	448,5±0,2	506,4
17	Cl	13,01	23,80	39,9	53,3	67,8±0,2	96,6±0,3	114,2±0,1	348,5	400,3±0,1	455,3	531,4
18	Ar	15,755	27,62	40,90	59,79	75,0±0,1	91,3±0,3	123,9±0,4	143,4±0,1	422,6±0,2	479,0±0,2	539,5
19	K	4,339	31,81	45,9	61,1	82,6±0,4	99,4±0,4	117,9±0,4	154,3±0,6	176,0±0,1	503,8±0,3	566,2
20	Ca	6,111	11,87	51,21	67,3	84,39	109±1	127,9±0,5	143,3±0,4	187,9±0,7	211,3±0,1	592,5
21	Sc	6,56	12,89	24,75	73,9	91,8	111,1	139±1	159,2±0,5	180,2±0,5	224,9±0,8	249,76
22	Ti	6,83	13,57	28,14	43,24	99,8	119	141±1	172±1	193,1±0,5	216,9±0,6	264,5
23	V	6,74	14,65	29,31	48	65,2	128,9	151	173,7	206±2	230,2±0,6	256,3
24	Cr	6,764	16,49	30,95	49,6	73,2	90,6	161,1	185	209,6	246±2	—
25	Mn	7,432	15,64	33,69	52	76,1	100±1	119,24	196,4	221±1	249±1	—
26	Fe	7,896	16,18	30,64	57,1	78	103±1	130±3	151,1	234,4±0,5	262±1	290,3
27	Co	7,86	17,05	33,49	53	83,5	106	133±1	163±5	185,9±0,1	276,9±0,6	305
28	Ni	7,633	18,15	36,16	56	78	110	136	168±2	200±6	224±1	318
29	Cu	7,724	20,29	36,83	58,9	82	106	140	169	206±4	241±8	—
30	Zn	9,391	17,96	39,70	62	86	112	142	177	212	247±6	—
31	Ga	6,00	20,51	30,7	64,2	90	118	144	174	218	255	—
32	Ge	7,88	15,93	34,21	45,7	93,4	113	148	177	212	262	—
33	As	9,81	18,7±0,1	28,3	50,1	62,9±0,1	127,5	150	182	218	274	—
34	Se	9,75	21,5	32,0	42,9	68,3±0,2	82,1±0,2	155	187	223	260	—
35	Br	11,84	21,6	35,9	47,3	59,7±0,1	88,6±0,2	103,0±0,4	193	228	266	—
36	Kr	13,996	24,56	36,9	52,5	64,7	78,5±0,1	111,0±0,4	126±0,1	234	270	—
37	Rb	4,176	27,56	39,3	52,6	71	84,4	99,2±0,1	136±1	150±2	277	—
38	Sr	5,692	11,02	43,6	57,1	71,6	90,8	106	122,3±0,1	162±1	177±2	324
39	Y	6,38	12,23	20,5	61,8	77,0	93,0	116	129	146,2±0,2	191±1	—
40	Zr	6,835	12,92	24,11	33,97	82,3	99,4	116	139	154	173,0±0,2	—
41	Nb	6,88	13,9	28,1	38,3	49,5	110,4	124	141	165	186	—
42	Mo	7,131	15,72	29,6	46,4	61,2	67	131	153	167	194	—
43	Tc	7,23	14,87	31,9	43	59	76	94	161	183	195	—
44	Ru	7,36	16,6	30,3	46,5	63	81	100	119	192	216	—
45	Rh	7,46	15,92	32,8	45,6	67	85	105	126	147	225	—
46	Pd	8,33	19,42	33,4	48,8	66	90	110	132	155	178	—
47	Ag	7,574	21,48	36,10	52	70	89	116	139	162	187	—
48	Cd	8,991	16,904	44,5	55	73	94	115	146	170	195	—
49	In	5,785	18,86	28,0	58	77	98	120	144	178	204	—
50	Sn	7,332	14,63	30,7	46,4±0,1	81,1	103	126	150	176	213	—
51	Sb	8,64	16,7±0,5	24,8	44,1	63,8±0,5	107,6	132	157	184	211	—
52	Te	9,01	18,8±0,5	30,6	37,9	66±1	83±2	137,1	164	192	220	—
53	I	10,44	19,0	31,4	41,7	71	83±2	104±2	169,9	200	229	—
54	Xe	12,127	21,2	32,1	45,5	57	89	102±3	126±3	204,7	238	—
55	Cs	3,893	25,1	34,6±0,7	45,5	62	74	108	122±3	150±4	256	—
56	Ba	5,210	10,01	37±1	48,8	62	80	93	106	144±4	158±5	—
57	La	5,61	11,43	19,17	52	66	80	100	114	151	165±5	—
58	Ce	6,91	12,3	19,5	36,7	70	85	100	122	137	172	—
59	Pr	5,76	—	—	—	—	89	106	122	146	162	—
60	Nd	6,31	—	—	—	—	—	110	128	147	171	
61	Pm	—	—	—	—	—	—	—	—	—		
62	Sm	5,6	11,2	—	—	—	—	—	—	161	181	
63	Eu	5,67	11,24	—	—	—	—	—	—	—	187	—
64	Gd	6,16	12	—	—	—	—	—	—	—	—	—
65	Tb	6,74	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
66	Dy	6,82	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
67	Ho	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
68	Er	6,08±0,03 [3]	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
69	Tm	6,14±0,06 [3]	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
70	Yb	6,26	12,10	—	—	—	—	—	—	—	—	—
71	Lu	6,15	14,7	19	—	—	—	—	—	—	—	—
72	Hf	5,5	14,9	21	31	—	—	—	—	—	—	—
73	Ta	7,88 [3]	16,2±0,5	22,3	33,1	45	—	—	—	—	—	—
74	W	7,98	17,7±0,5	24,1	35,4	48	61	—	—	—	—	—
75	Re	7,87	16,6±0,5	26	37,7	51	64	79	—	—	—	—
76	Os	8,7	17±1	25	40	54	68	83	99	—	—	—
77	Ir	9,2	17,0±0,3	27	39	57	72	88	104	121	—	—
78	Pt	8,96	18,54±0,1	28,5	41,1	55	75	92	109	127	146	—
79	Au	9,223	20,5	30,5	43,5	58	73	96	114	133	153	—
80	Hg	10,434	18,761	34,21	46	61	77	94	120	139	159	—
81	Tl	6,106	20,42	29,8	50,7	64	81	98	116	145	166	—
82	Pb	7,415	15,03	31,93	42,3	69,73	84	103	122	142	173	—
83	Bi	7,287	19,3	25,6	45,3	56	94,42	107	127	148	169	—
84	Po	8,2±0,4	19,4±1,7	27,3±0,8	38	61	73	112	132	154	176	—
85	At	9,2±0,4	20,1±1,7	29,3±0,9	41	51	78	91	138	160	183	—
86	Rn	10,745	21,4±1,8	29,4±1,0	43,8	55	67	97	111	166	190	—
87	Fr	3,98±0,1	22,5±1,8	33,5±1,5	43	59	71	84	117	133	197	—
88	Ra	5,277	10,144	34,3	46,4	58,5	76	89	103	140	156	—
89	Ac	6,89±0,6	11,5±0,4	—	49	62	76	95	109	123	164	—
90	Th	6,95±0,06 [3]	11,5±1,0	20,0	28,7	65	80	94	115	130	145	—
91	Pa	—	—	—	—	—	84	100	115	138	154	—
92	U	6,2[4]	—	—	—	—		104	121	137	126	—

22.2. ПОТЕНЦИАЛЫ ИОНИЗАЦИИ МОЛЕКУЛ РАДИКАЛОВ

В табл. 22.2—22.6 приведены потенциалы ионизации молекул и радикалов. Имеющиеся во многих случаях различия между значениями потенциалов ионизации, определенными спектроскопически и методом электронного удара, следует объяснить тем, что в первом случае потенциалы ионизации адиабатические, а во втором — вертикальные. Метод фотоионизации в большинстве случаев дает значения, близкие к адиабатическим [3].

Погрешности потенциалов ионизации в тех случаях, когда они указаны авторами, определяют только экспериментальный разброс значений и не содержат возможных систематических ошибок.

Молекулы разбиты по следующим классам: углеводороды, галоидозамещенные углеводороды, азотсодержащие соединения, кислородсодержащие соединения и т. д. Внутри каждого класса молекулы расположены в порядке нарастания числа атомов H и C (например, C_2; C_2H; C_2H_2; ...), заместители — галогены — вводятся в порядке нарастания атомного номера (F, Cl, Br, I). Радикалы находятся перед соединениями, из которых они образуются.

Таблица 22.2

Азотсодержащие молекулы и радикалы [1.3]

Соединение	Потенциал ионизации, эв	Соединение	Потенциал ионизации, эв
NH	13,10±0,05	C_7H_9N	7,34
NH_2	11,4±0,1	N_2	15,51; 15,60
NH_3	10,15—10,40	N_2^+	50 [2]
ND_3	11,52±0,03	N_2H_2	9,85±0,1
CN	15,13	N_2H_3	7,88±0,2
HCN	13,86	N_2H_4	9,56±0,03
CH_3NH_2	9,41±0,02	$CH_3N{-}NH_2$	5,07
CH_5N	8,97	C_2N_2	13,8
C_2N	12,8	$(CH_3)_2N{-}$	8,12±0,1
CH_2CN	10,87±0,1	$-NH_2$	
CH_3CN	11,96	$(CH_3)_3N_2$	4,95
C_2H_5N	9,94±0,15	NCC≡CCN	11,4±0,2
$(CH_3)_2NH$	8,4.	NH_3	10,3±0,2
	8,93±0,03	CH_3N_3	9,5±0,1
$C_2H_5NH_2$	9,32;	NF	12,0
	9,19±0,05	NF_2	12,0±0,1
C_2H_3CN	10,75	NF_3	13,2±0,2
C_2H_5CN	11,85	CH_2FCN	13,0±0,1
C_2N	14,3	N_2F_4	12,04±0,10
C_3HN	11,6±0,2	CNCl	12,49±0,04
CH_3CHCN	9,76±0,1	CH_2ClCN	12,2±0,1
$C_3H_5NH_2$	9,6±0,2	CNBr	11,95±0,08
$н$-$C_3H_7NH_2$	9,17±0,04	CNI	10,98±0,05
$(CH_3)_3N$	8,32±0,02		
C_4N	12,3		
$(CH_3)_2CCN$	9,15±0,1		
$н$-$C_4H_9NH_2$	9,19±0,04		
$(C_6H_5)_2NH$	8,44±0,01		
C_6N	12,0		
C_6H_7N	7,70		

Таблица 22.3

Углеводороды [1.3]

Соединение	Название	Потенциал ионизации, эв
H_2	Водород	15,427
C	Графит	3,8; 4,39
CH_2	Метилен	11,82±0,05
CH	Метил	9,86±0,02
CD_3	—	9,95±0,03
CH_4	Метан	12,99±0,01; 11,2 [2]
CD_4	—	13,25
C_2H_2	Ацетилен	11,41±0,01
C_2H_3	Этенил (винил)	9,45±0,05
C_2H_4	Этилен	10,516±0,01
C_2H_5	Этил	8,80±0,05
C_2H_6	Этан	11,65
C_3H_3	Пропаргил	8,25±0,08
C_3H_4	Метилацетилен	10,34
C_3H_6	Пропилен	9,73±0,01
C_3H_6	Циклопропан	10,06±0,02
C_3H_8	Пропан	11,08
C_4H_2	Диацетилен	10,73
C_4H_6	Дивинил (бутадиен-1,3)	9,07
C_4H_6	Диметилацетилен	11,46
C_4H_6	Этилацетилен	10,18
C_4H_8	Бутилен	9,58
C_4H_8	Изобутилен	9,23
C_4H_8	Метилциклопропан	9,88
C_4H_{10}	Бутан	9,07
C_5H_6	Циклопентадиен	8,58
C_5H_8	(2-Метилбутадиен-1,3)	8,85
C_5H_{10}	2-Метилбутен-1	9,12
C_5H_{10}	Пентен-1	9,50
C_5H_{12}	2,2-Диметилпропан (неопентан)	10,37
C_6H_4	Фенилен	10,23±1
C_6H_6	Бензол	9,245
C_6H_{10}	Диизопропенил (2,3-диметилбутадиен-1,3)	8,72
C_6H_{10}	Циклогексен	8,945
C_6H_{12}	Гексен-1	9,46
C_6H_{12}	Тетраметилэтилен	8,30
C_6H_{12}	Циклогексан	9,08
C_6H_{14}	Гексан	10,17
C_7H_7	Толил	7,73±0,08
C_7H_8	Толуол	8,820±0,005
C_7H_{14}	Метилциклогексан	9,86
C_7H_{16}	Гептан	10,06
C_8H_8	Стирол	8,86±0,04
C_8H_{10}	*о*-Ксилол	8,56; 7,61
C_8H_{10}	Этилбензол	8,76
C_8H_{16}	Октен-1	9,52
C_8H_{18}	Октан	10,24; 9,86
C_9H_{12}	Пропилбензол	8,72
C_9H_{20}	Нонан	10,21
$C_{10}H_8$	Нафталин	8,12±0,02
$C_{10}H_{14}$	Бутилбензол	8,69
$C_{10}H_{22}$	Декан	10,19
$C_{14}H_{10}$	Антрацен	7,38
$(CH_2)_n$	Полиметилен	10,15

Таблица 22.4

Молекулы и радикалы, содержащие галогены [3]

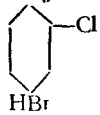
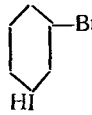
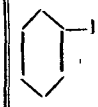
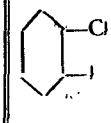
Соединение	Потенциал ионизации, эв	Соединение	Потенциал ионизации, эв
HF	15,77±0,02	$C_2F_2Cl_2$	10,0±0,2
F_2	15,83±0,05	C_2F_3Cl	10,4±0,2
CF	13,81±0,12	C_2Cl_4	9,5
CF_2	13,30±0,12	C_2H_5Cl	10,97±0,02
CHF_2	9,45	$CH_3C{\equiv}CCl$	9,9±0,1
CF_3	10,10±0,05		9,07 [1]; 9,42
CH_3F	12,85±0,01		
CF_4	17,8		
C_2H_3F	10,37		
$H_2C{=}CF_2$	10,30	HBr	11,62 [1]; 12,04
C_2HF_3	10,14		
C_2H_4	10,12	Br_2	10,55±0,02
C_2H_5F	12,00±0,04	BrCl	11,1±0,2
$CH_2{=}CHCF_3$	10,9	CBr_2	10,11±0,09
C_6H_4F	10,86	CH_2Br	8,34±0,11
C_6H_5F	9,197±0,005	$CHBr_2$	8,13
C_6ClF_5	10,4	CH_3Br	10,54±0,01
C_6BrF_5	9,6	$CHBrF_2$	12,1±0,2
$C_6F_5CH_3$	9,6	CF_3Br	12,3±0,3
HCl	12,74±0,01	CH_2Br_2	10,8±0,1
ClF_3	13,0±0,2	C_2H_3Br	9,80
Cl_2	11,48±0,01	*цис*-BrHC=	9,69±0,05
CCl	12,9±0,1	=CHBr	
CCl_2	13,10±0,08	C_2HBr_3	9,27
CH_2Cl	9,70±0,09	C_2H_5Br	10,29±0,01
CCl_3	8,78±0,05	$CH_3{-}C{\equiv}CBr$	10,1±0,1
CH_3Cl	11,28±0,01		8,98 [1];
CF_3Cl	12,92±0,01		9,41±0,04
CClF	13,13±0,25		
CCl_2F	8,96±0,15	HI	10,38±0,02
CCl_3	7,92±0,35	IF_5	13,5±0,2
CCl_4	11,1;	ICl	10,4±0,2
	11,47 [1]	IBr	10,3±0,2
CH_2Cl_2	11,4±0,1	I_2	9,28 [1];
CF_2Cl_2	11,8±0,5		9,35±0,03
$CHCl_3$	11,42±0,03	CH_3I	9,51±0,02
C_2HCl_3	9,47±0,01	CF_3I	10,0±0,3
C_2H_3Cl	9,995	C_2H_5I	9,33±0,01
$Cl_2C{=}CH_2$	9,79	*н*-C_3H_7I	9,41±0,04
цис-ClHC–CHCl	9,67±0,05	$CH_2I{-}C_4H_9$	9,19±0,01
			8,73 [1]; 9,10±0,04
			8,35±0,1

Таблица 22.5

Молекулы и радикалы, содержащие кислород [3]

Соединение	Потенциал ионизации, эв	Соединение	Потенциал ионизации, эв
OH	13,18±0,1	$HCOOCH_3$	10,82
H_2O	12,60±0,01	CH_3COCHO	9,60±0,06
CO	14,01±0,01 [2, 3]	C_2H_5COOH	10,47
		CH_3COOCH_3	10,27
CO^+	43 [2]	*н*-C_3H_7COOH	10,22
CH_2O	10,90±0,03	O_3	11,7
CH_3O	9,2	FO	13,0
CH_2OH	8,2	F_2O	13,7±0,2
CH_3OH	10,95±0,10	HFC=O	11,4
$CH_2{=}C{=}O$	9,60±0,2	$(CF_3)_2C{=}O$	11,82
C_2H_5O	9,2	ClO	10,4
C_2H_4OH	7,0	$COCl_2$	11,77±0,04
C_2H_5OH	10,25 [1]; 10,65	$CH_2ClCOCH_3$	9,91±0,02
		$CHCl_2COCH_3$	10,12±0,03
$(CH_3)_2O$	10,00±0,02	ClO_2	11,1
н-C_3H_7OH	10,42±0,10	ClO_3	11,7
н-C_4H_9OH	10,30±0,10	ClO_3F	13,6±0,2
$(C_2H_5)_2O$	9,53±0,02		
C_6H_5OH	8,50±0,01	NO	9,25±0,02 [3]
		$NH_2HC{=}O$	10,16±0,03
$(C_6H_5)HC{=}O$	9,51±0,02	N_2O	12,63—12,90 [1—3]
O_2	14,01 [1]; 12,075±0,01		
O_2^+	50 [2]	NO_2	9,78—12,3
HO_2	11,53±0,1	CH_3ONO	10,7
H_2O_2	10,92±0,05	CH_3NO_2	11,34±0,09
CO_2	13,79±0,01		
HCOO	9,0		
COOH	8,7		
HCOOH	11,05±0,03		
CHOCHO	9,48±0,08		
$(H_2CO)_2$	10,51±0,03		
CH_3COOH	10,38±0,03		

Таблица 22.6

Молекулы и радикалы, содержащие бор, кремний, серу и другие элементы [3]

Соединение	Потенциал ионизации, *эв*	Соединение	Потенциал ионизации, *эв*
BH	10,06	$(CH_3)_2S$	8,684
BH_2	8,12	CH_3CH_2SH	9,21±0,05
BH_3	10,09	SO_2	12,34±0,02
BCH_3	9,28	SF_6	19,3
BC_2H_5	8,73	S_2	8,3±0,2
$B(CH_3)_2$	6,44	CS_2	10,08—10,15 [1,3]
$B(CH_3)_3$	8,8±0,2		
$B(C_2H_5)_2$	5,90	S_8	8,9±0,2
B_2H_6	11,9	He_2	4,251 [2]
B_5H_9	10,8±0,5	LiI	8,55±0,15
$B_{10}H_{14}$	11,0±0,5	NaI	8,8±0,3
BF_3	15,5±0,5	NaN_3	11,7±0,2
BCl	10,4	MgC_5H_5	7,62
BCl_2	7,20	AlF	9—10
BCl_3	10,91	Al_2O	7,7±0,2
BBr	9,25—10,14	PH_3	10,0±0,2
BBr_2	7,06	PCl_3	12,3
BBr_3	9,7	KI	8,3±0,2
BI	8,96	$TiCl_4$	11,7±0,2
BI_2	7,13	VC_5H_5	6,63
BI_3	9,0	CrC_5H_5	8,90
SiH_4	12,2±0,3	CrO_2F_2	14,0±0,2
$SiH(CH_3)_3$	9,8±0,3	CrO_2Cl_2	12,6±0,3
SiF	7,2	$Cr(CO)_6$	8,03 [1]
SiF_4	15,4±0,4	MnC_5H_5	7,94
$SiCl_4$	11,6±0,2	FeC_5H_5	9,78
SiO	10,8±0,5	$Fe(CO)_5$	7,95 [1]
SiO_2	11,7±0,5	CoC_5H_5	10,05
Si_2O_2	10±1	$Ni(CO)_4$	8,28 [1]
$P(CF_3)_3$	11,3±0,1	NiC_5H_5	9,32
PAs	11,2±0,5	GeH_4	12,3±0,3
PAs_3	10,0±0,3	$Ge(CH_3)_4$	9,2±0,2
P_2	11,8±0,5	GeF	7,2
P_2As_2	10,3±0,3	Ge_2	8,1
P_3As	10,3±0,3	Ge_3	8,1
P_4	10,8±0,3	AsH_3	10,6±0,1
H_2S	10,46±0,01	$As(CH_3)_3$	8,3±0,1
CS	10,7±0,3	$AsCl_3$	12,4
CHS	6,8	As_2	11,0±0,5
CH_2S	6,7	As_4	9,9±0,2
CH_3SH	9,44	SeH_2	9,88
C_2H_3S	9,1	$Mo(CO)_6$	8,12 [1]
		SnH_4	11,7±0,3
		$Sn(CH_3)_4$	8,25±0,15
		SnF_4	7,0
		$SbCl_3$	11,5
		Sb_2	8,4±0,3
		Sb_4	7,7±9,1
		Ba_2O	~4
		$W(CO)_6$	8,18
		$Hg(CH_3)_2$	8,90±0,2
		$Pb(CH_3)_4$	8,0±0,4
		PbTe	8,2±0,5
		UCl_4	11,5

22.3. СРОДСТВО К ЭЛЕКТРОНУ И ПРОТОНУ

Сродством к электроиу χ иазывается эиергия, выделяемая при образоваиии отрицательиого иоиа из иейтральиого атома и электроиа, т. е. отвечающая процессу $A + e^- = A^-$. При этом предполагается, что до образоваиия отрицательиого иоиа иейтральиый атом иаходился в состояиии с иаимеиьшей эиергией. Сродство к электроиу с обратиым зиаком представляет собой потенциал иоиизации, т. е. энергию, иеобходимую для отрыва электроиа от отрицательиого иоиа с образоваиием иейтральиого атома (молекулы).

В случае присоедииеиия к атому (молекуле) нескольких электроиов указывается их число, например $N + 3e^-$.

Таблица 22.7

Сродство атомов к электроиу [1, 5]

Атом	χ, *эв*	Атом	χ, *эв*
H	0,754	As	2,0
He	0,08	Se	2,0; 3,7 [3]
Li	0,6; 0,82[3]	Br	3,37; 3,54 [3]
Be	Не существует	Rb	0,27
B	0,3	Sr	Не существует
C	1,2	Y	0,3
$C+4e^-$	30,7	Zr	0,8
N	0,2 [6]; 0,69	Nb	1,3
$N+3e^-$	23,7	Mo	1,3
O	1,46	Tc	1,0
$O+2e^-$	6,76±0,04	Ru	1,4
F	3,40—3,62[3, 5]	Rh	1,5
Ne	Не существует	Pd	1,2
Na	0,35—1,21	Ag	2,0; 2,5[3]
Mg	Не существует	Sn	1,8
Al	0,5	Sb	1,5; 2,0[3]
Si	1,4—2,0	Te	2,0; 3,6[3]
P	0,8—0,9	I	3,08—3,23
S	2,07—2,33 [3,6]	Cs	0,23
$S+2e^-$	3,47	La	0,6
Cl	3,82±0,06	Hf	Не существует
Ar	Не существует	Ta	0,2
K	0,3—0,69	W	1,2
Ca	Не существует	Re	0,4
Ti	0,4	Os	1,4
V	0,8	Ir	2,0
Cr	1,0	Pt	2,6
Mn	Не существует	Au	2,1[3]; 2,8
Fe	0,5	Hg	1,54—1,8[3,2]
Co	0,9	Tl	2,1
Ni	1,3	Pb	1,6
Cu	1,9—2,4 [3,5]	Bi	0,7

Таблица 22.8

Сродство к электроиу молекул и радикалов [1, 3]

Соединение	χ, эв	Соединение	χ, эв	Соединение	χ, эв	Соединение	χ, эв
H_2	0,72	HO_2	3,4	$C_6H_5CH=CH_2$	0,29	ClO_3	3,96
CH	~1,65	CO_2	3,8	$C(C_6H_5)_3$	2,08±0,22	ClO_4	5,81
CH_2	0,95	NO_2	1,62; 3,82±	Графит	4,39	Cl_2	⩽1,7
CH_3	1,08; 1,8		±0,06	NH_2	1,21	$SiCl_2$	>2,6
C_2	3,1	O_3	2,89	CN	3,7±0,2	CCl_3	⩾2,10±0,35
C_2H_4	1,81	NO_3	3,88	OH	1,73±2,65	SeH	2,04
C_2H_5	1,4	BF_3	0,78; 2,17	H_2O	0,9	SeO_2	~2,3
C_3	1,8	SiC	~4	C_6H_5O	1,17	Br_2	2,6
$H_2C=CH-CH_2$	2,1	SH	2,6	NO	3,2±0,2	MoO_3	2,73
$н$-C_3H_7	1,0	SO	⩾1,8	O_2	0,3—0,87 [1—3]	AgCl	3,79
$изо$-C_3H_7	1,0	SO_2	1,1; 2,8			AgBr	3,57
C_6H_6	0,54	ClO	2,91			AgI	3,29
$C_6H_5CH_2$	1,8	ClO_2	3,43			I_2	2,4

Таблица 22.9

Сродство некоторых атомов и молекул к протону [9]

Атом	Сродство к протону, эв	Молекула	Сродство к протону, эв
H	2,75	H_2	3,0
He	1,8	CH	5,1
C	6,0	CH_2	5,2
O	4,9	CH_3	5,1
F	3,7	CH_4	5,3
Ne	2,2	C_2H_4	6,8
Cl	5,4	HCl	5,2
Ar	2,3	OH	6,2
Br	5,8	H_2O	7,3
Kr	3,7	NH_3	9,4
I	6,4	H_2S	7,6

22.4. ФОТОИОНИЗАЦИЯ АТОМОВ

Атомы ионизуются при поглощении квантов света, энергия которых равна потенциалу ионизации атома или превосходит его. Сечение фотоионизации $\sigma_ф$ есть отношение вероятиости иоиизации атома в единицу времени к плотиости падающего светового потока; $\sigma_ф$ имеет размерность [$см^2$]. Коэффициеит поглощеиия K связаи с $\sigma_ф$ соотношеиием $K = N\sigma_ф$, где N — число атомов в единице объема.

Сечеиия $\sigma_ф$ имеют сложиую структуру, зависящую от длииы волиы падающего света и строеиия электроиных оболочек атома-мишеии.

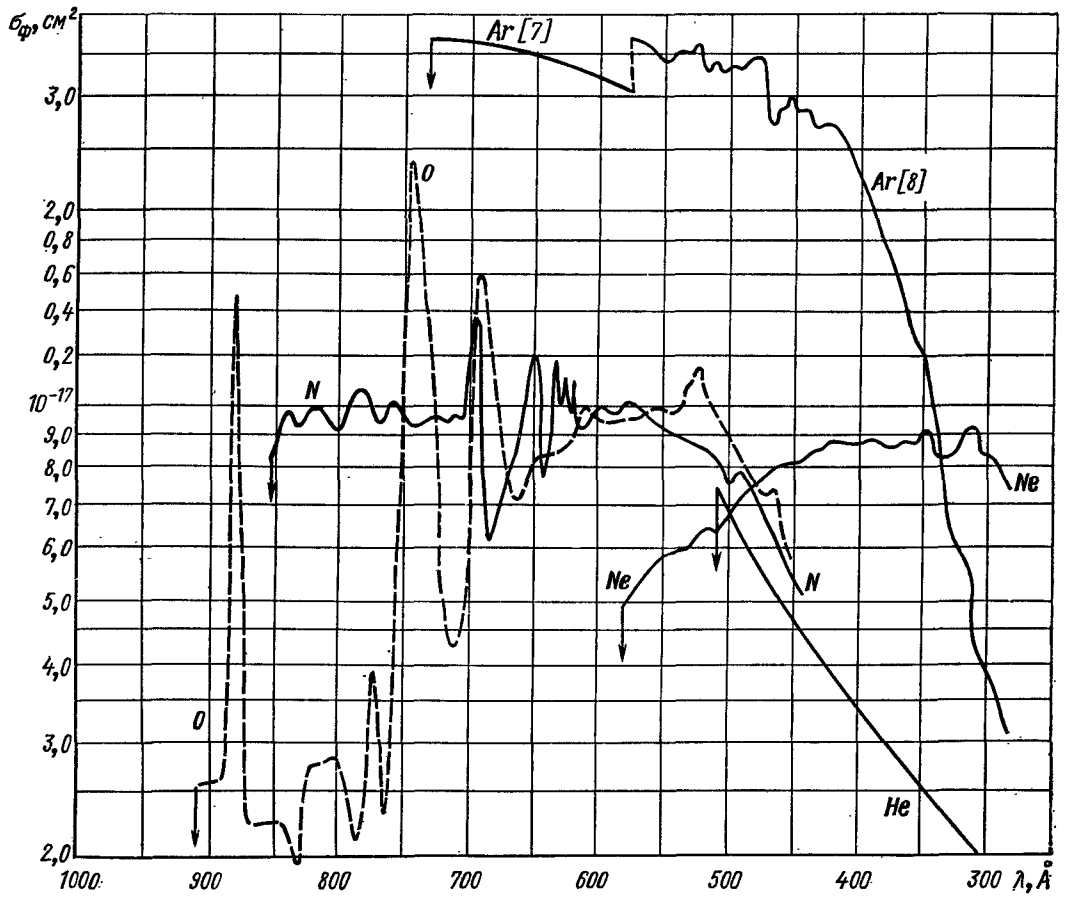


Рис. 22.1. Сечения фотоионизации He [7], атомарных азота и кислорода [8], Ne[8] и Ar [7,8]. (Стрелками у длииоволиового края кривых указаны пороги фотоионизации.)

22.5 ПЕРЕЗАРЯДКА ПРИ АТОМНЫХ СТОЛКНОВЕНИЯХ

Перезарядкой иазывают обмен электроном при столкиовеиии двух атомиых систем (атомов, иоиов, молекул и т. п.):

$$A + (B + e^-) \rightarrow (A + e^-) + B.$$

Эффективиое сечение перезарядки σ есть отиошеиие вероятиости обмеиа электроиом в единицу времеии к плотиости потока иалетающих частиц A при едииичиой плотиости частиц мишеии. Сечеиие резоиаисиой перезарядки обычио превышает сечеиие упругого рассеяиия иоиа иа атоме даже при тепловых эиергиях столкиовеиия.

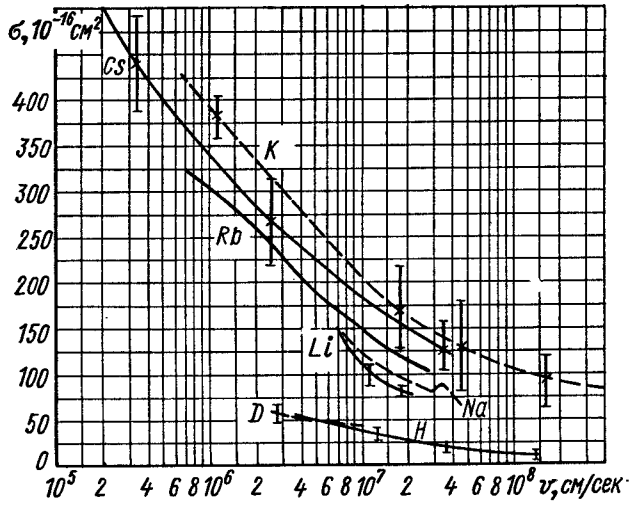


Рис. 22.2. Зависимость сечеиия резоиансиой перезарядки иоиов иа иейтральиых атомах этих элемеитов от скорости иоиов. Кривые получеиы усредиеиием эксперимеитальиых даииых, собраииых в работе [5]. Погрешиости указывают иа разброс даииых различиых авторов.

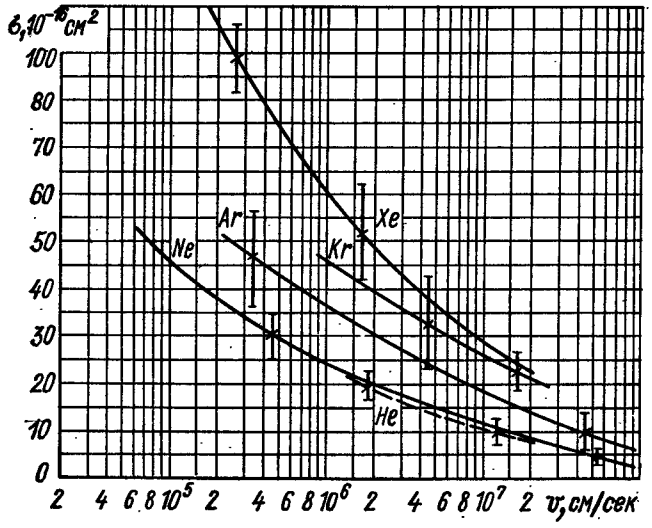


Рис. 22.3. Зависимость сечеиия резоиаисиой перезарядки иоиов гелия, иеоиа, аргоиа, криптоиа и ксеиоиа иа иейтральиых атомах этих элемеитов от скорости иоиов. (Кривые получеиы усредиением экспериментальиых даиных, собраиных в работе [5]. Погрешиости указывают иа разброс даиных различиых авторов.)

22.6. ЭНЕРГИИ ДИССОЦИАЦИИ МОЛЕКУЛ

Таблица 22.10

Эиергии диссоциации $E_{дис}$ двухатомиых молекул [3]

Молекула	$E_{дис}$, эв	Молекула	$E_{дис}$, эв
Ag_2	1,8	Cu_2	0,2
AgBr	3,1	CuBr	3,4
AgCl	3,4	CuCl	3,7
AgH	2,36	CuF	3,0
AgI	2,6	CuH	2,9
AgO	2,5	CuI	3,0
AgSn	2,55	CuO	4,8
AlBr	4,6	D_2	4,55
AlC	1,9	F_2	1,6
AlCl	5,1	FO	1,9
AlF	7,65	H_2	4,48
AlH	2,9	HD	4,51
AlI	3,84	HT	4,52
AlO	5,0	HBr	3,75
AlS	3,5	HCl	4,43
AsN	6,6	HF	5,9
AsO	5,0	HI	3,05
Au_2	2,28	Hg_2	0,06
AuAl	3,1	HgBr	0,7
AuCl	3,1	HgCl	1,0
AuCr	2,2	HgF	1,8
AuCu	2,4	HgH	0,38
AuH	3,1	HgI	0,36
AuMg	2,7	HgS	2,8
AuSn	2,55	I_2	1,54
BBr	4,5	IBr	1,82
BCl	5,2	ICl	2,15
BF	8,1	IF	2,9
BH	3,0	IO	1,9
BO	7,45	K_2	0,51
BaBr	2,8	KBr	3,95
BaCl	2,7	KCl	4,4
BaF	3,8	KF	5,1
BaH	1,8	KH	1,86
BaO	4,7	KI	3,33
BaS	2,4	Li_2	1,1
BeCl	4,8	LiBr	4,4
BeF	7,0	LiCl	4,8
BrCl	2,23	LiF	6,0
BrF	2,4	LiH	2,4
BrO	2,4	LiI	3,6
CaBr	2,9	LiO	3,4
CaCl	2,8	MnBr	3,2
CaF	3,1	MnCl	3,9
CaH	1,7	MnF	5,0
CaI	2,8	MnH	2,2
CaO	5,0	MnO	3,4
CaS	3,0	Na_2	0,73
C_2	6,2	NaBr	3,8
CCl	2,8	NaCl	4,2
CF	4,7	NaF	5,0
CH	3,47	NaH	2,1
CN	8,4	NaI	3,1
CO	11,1	NaK	0,61
Cl_2	2,48	N_2	9,76
ClF	2,6	NBr	2,9
ClO	2,8	NF	2,6
Cs_2	0,45	NH	3,6
CsBr	4,3	NO	3,5
CsCl	4,4	NS	5,0
CsF	5,0	O_2	5,1
CsH	1,9	OH	4,4
CsI	3,6		

Продолжение табл. 22.10

Молекула	$E_{дис}$, эв	Молекула	$E_{дис}$, эв
P_2	5,0	SO	5,3
Rb_2	0,48	T_2	4,59
RbBr	4,0	TlBr	3,4
RbCl	4,4	TlCl	3,8
RbF	5,4	TlF	4,7
RbH	1,8	TlH	2,0
RbI	3,3	TlI	2,8
S_2	4,3	ZnCl	2,6
SF	2,8	Zn H	0,85
SH	3,5	Zn I	1,4

Таблица 22.11

Энергия диссоциации молекулярных ионов [3]

Ион	$E_{дис}$, эв	Ион	$E_{дис}$, эв
Ar_2^+	1,1	HBr^+	4,0
As_2^+	2,56	HCl^+	4,7
AsO^+	7,7	HF^+	3,7
BH^+	1,3	HI^+	3,1
BCl^+	3,1	He_2^+	2,24
BeH^+	3,3	HgH^+	2,3
Br_2^+	3,3	I_2^+	2,8
C_2^+	5,5	IBr^+	2,0
CF^+	2,2	ICl^+	2,2
CH^+	3,6	K_2^+	0,75
CO^+	8,35	MgH^+	2,19
Cs^+	7,3	N_2^+	8,7
CdH^+	2,13	NO^+	10,9
Cl_2^+	4,2	O_2^+	6,7
ClO^+	5,3	O_2^-	4,1
Cs_2^+	0,7	OH^+	4,9
F_2^+	3,3	OH^-	4,7
FO^+	2,58	Rb_2^+	0,7
H_2^+	2,65	SiF^+	6,4
H_2^-	0,18	Xe_2^+	1,0

22.7. ЭНЕРГИИ РАЗРЫВА СВЯЗЕЙ В МОЛЕКУЛАХ И РАДИКАЛАХ

Таблица 22.12

Энергия разрыва связей $E_{разрыв}$ в неорганических молекулах и радикалах [3]

Реакция	$E_{разрыв}$, эв	Реакция	$E_{разрыв}$, эв
$ClO \rightarrow Cl+O$	2,7	$(Li\,OH) \rightarrow LiO+H$	5,5
$ClO_2 \rightarrow Cl+O_2$	2,5	$NF_2 \rightarrow NF+F$	2,6
$FNO \rightarrow NO+F$	2,4	$NF_3 \rightarrow NF_2+F$	3,5
$HF_2^- \rightarrow HF+F^-$	2,5	$NH_3 \rightarrow NH_2+H$	4,2
$HO_2 \rightarrow H+O_2$	2,0	$NO_2 \rightarrow NO+O$	3,1
$HO_2 \rightarrow OH+O$	2,8	$N_2O \rightarrow NO+N$	5,0
$H_2O \rightarrow H+OH$	5,0	$N_2O \rightarrow N_2+O$	1,7
$H_2O_2 \rightarrow 2OH$	2,1	$(NaBr)_2 \rightarrow 2\,NaBr$	2,0
$H_2S \rightarrow SH+H$	4,0	$(NaCl)_2 \rightarrow 2NaCl$	2,2
$(KBr)_2 \rightarrow 2KBr$	2,0	$(NaI)_2 \rightarrow 2NaI$	1,9
$(KCl)_2 \rightarrow 2KCl$	1,8	$NaOH \rightarrow Na+OH$	3,9
$(KF)_2 \rightarrow 2KF$	2,2	$NaOH \rightarrow Na+OH$	4,8
$(KI)_2 \rightarrow 2KI$	1,7	$O_3 \rightarrow O_2+O$	0,11
$(LiBr)_2 \rightarrow 2LiBr$	2,0	$(Rb\,Cl)_2 \rightarrow 2RbCl$	1,9
$(LiCl)_2 \rightarrow 2LiCl$	2,6	$(RbF)_2 \rightarrow 2RbF$	2,1
$(LiI)_2 \rightarrow 2LiI$	1,8	$SF_2 \rightarrow SF+F$	3,0
$(Li_2O) \rightarrow LiO+Li$	3,8	$SO_3 \rightarrow SO_2+O$	3,6
$(Li\,OH) \rightarrow Li+OH$	4,5		

Таблица 22.13

Энергии разрыва связей $E_{разрыв}$ в органических молекулах и радикалах [3]

Связь	$E_{разрыв}$, эв	Связь	$E_{разрыв}$, эв
$CBr_3—Br$	2,13	$C_2H_3—H$	4,5
$CBr_3—H$	4,0	$C_2H_5—BF_2$	4,2
$CCl_3—Cl$	2,9	$C_2H_5—H$	4,2
$CF_3—Cl$	3,5	$C_2H_5—Li$	2,07
$CF_3—CN$	5,3	$C_2H_5—OH$	4,0
$CF_3—H$	4,5	$C_2H_5—SH$	2,8
$(CF_3)_2As—CF_3$	2,5	$C_6H_5—Br$	3,1
$CH—H$	5,5	$C_6H_5—I$	2,65
$CH_2—H$	4,4	$CHCl_2—H$	3,9
$CH_2CHCH_2—H$	3,33	$CHI_2—I$	1,6
$CH_2CH—I$	2,9	$CH_2Br—Br$	2,7
$CH_3—Br$	2,9	$CH_2F—CN$	5,1
$CH_3—BF_2$	4,3	$CH_3Cd—CH_3$	1,8
$CH_3—Cl$	3,5	$CH_3O—NO$	1,59
$CH_3—CN$	4,5	$CH_3O—NO_2$	1,66
$CH_3—F$	5,1	$CH_3S—SCH_3$	3,3
$CH_3—I$	2,3	$CO—H$	1,32
$CH_3—OH$	3,9	$NC—H$	4,8
$CH_3—NH_2$	3,5	$NC—CN$	5,5
$CH_3—NO_2$	2,5	$NC_2—CN$	5,2
$CH_3—SH$	2,91	$NC_2—N$	7,0
$C_2H—H$	5,2	$NC_3—N$	6,8
$C_2H_3—CHO$	3,9	$NC_6—N$	7,05

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Справочник** химика. Под ред. Б. П. Никольского. Т. 1. Изд. 3-е. Л., «Химия», 1971.
2. **Аллен К. У.** Астрофизические величины. Пер. с англ. М., Изд-во иностр. лит., 1960.
3. **Энергия** разрыва химических связей. Потенциалы ионизации и сродство к электрону. Справочник. Под ред. В. Н. Кондратьева. М., Изд-во АН СССР, 1962.
4. **Meggers W. F., Corliss C. H., Scribner B. F.** Tables of Spectral Line Intensities. National Bureau of Standards, 1961.
5. **Смирнов Б. М.** Асимптотические методы в теории атомных столкновений. М., Атомиздат, 1973.
6. **Дей М. К., Селбин Д.** Теоретическая неорганическая химия. Пер. с англ. М., «Химия», 1969.
7. **Хастед Дж.** Физика атомных столкновений. Пер. с англ. М., «Мир», 1965.
8. **Hudson R. D., Kieffer L. J.** «Atomic Data», 1971, v. 2, p. 205.
9. **Смирнов Б. М.** Атомные столкновения и элементарные процессы в плазме. М., Атомиздат, 1968.

ГЛАВА 23

ГАЗОВЫЙ РАЗРЯД

23.1. ВВЕДЕНИЕ

Термином *газовый разряд* объединяются все явления, связанные с прохождением электрического тока через газ [1]. Обычно газовый разряд происходит между проводящими электродами, создающими граничную конфигурацию электрического поля и играющими значительную роль в качестве источников и стоков заряженных частиц. Однако наличие электродов не обязательно (высокочастотный, тороидальный разряд).

При достаточно больших давлениях и длинах разрядного промежутка основную роль в возникновении и протекании разряда играет газовая среда. Поддержание разрядного тока определяется поддержанием равновесной ионизации газа, происходящей при малых токах за счет таунсендовских процессов каскадной ионизации, а при больших токах — за счет термической ионизации.

При уменьшении давления газа p и длины разрядного промежутка d все бо́льшую роль играют процессы на электродах; при $pd < 0{,}02 \div 0{,}04$ *мм рт. ст.·см* процессы на электродах становятся определяющими и меньшие значения pd соответствуют области вакуумного разряда, или электрического пробоя вакуума*.

В области газового разряда ($pd \gtrsim 0{,}04$ *мм рт. ст.·см*) произведение этих величин в значительной степени определяет характер возникновения и протекания разряда, в частности пробивное напряжение (закон Пашена).

При малых разрядных токах между холодными электродами и в достаточно однородном электрическом поле основным типом разряда является тлеющий разряд, характеризующийся значительным (50 — 400 *в*) катодным падением потенциала. Катод в этом типе разряда испускает электроны под действием заряженных частиц и световых квантов, а тепловые явления не играют роли в поддержании разряда.

Тлеющий разряд в сильно неоднородном электрическом поле и при значительном давлении ($p \gtrsim 100$ *мм рт. ст.*) называется *коронным разрядом*.

Дуговой разряд наблюдается при силе тока не менее нескольких ампер. Для этого типа разряда характерно малое, порядка 10 *в*, катодное падение потенциала и высокая плотность тока. Для горения дугового разряда существенна высокая электронная эмиссия катода, термическая ионизация в плазменном столбе. Спектр дуги обычно содержит линии материала катода.

* Вопросы вакуумного пробоя подробно освещены в работе [3].

23.2. ПРОЦЕССЫ НА ЭЛЕКТРОДАХ

Возникновение и характер газового разряда в значительной степени зависят от эмиссии электронов из катода. В случае холодного катода эмиссия происходит в основном при ионной бомбардировке и облучении его фотонами; горячий катод испускает электроны в результате термоэлектрической эмиссии.

В случае коронного разряда и электрического пробоя вакуума заметную роль играет автоэлектронная эмиссия; на горячих электродах может также происходить образование ионов за счет поверхностной ионизации.

Основной материал по электронной эмиссии изложен в гл. 24. Ниже приводятся сведения о ионно-электронной эмиссии и поверхностной ионизации.

Ионно-электронная эмиссия. Ион, падающий на поверхность электрода, выбивает из нее электроны, имеющие энергию не более 10—30 *эв* (рис. 23.1 и 23.2).

Поверхностная ионизация. Адсорбированный атом может покинуть нагретую поверхность как в атомном, так и в ионизованном состоянии. Для того чтобы про-

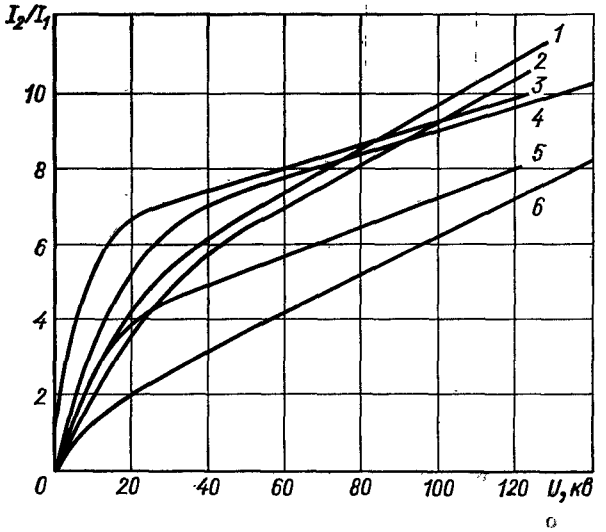


Рис. 23.1. Эмиссия электронов при падении ионов гелия на поверхность различных металлов:
1 — свинец; *2* — золото; *3* — алюминий; *4* — магний; *5* — сталь; *6* — медь [3].

цент ионов в потоке десорбированных частиц был значителен, необходимо выполнение условия $U > E_{валент}$, где U — работа выхода адсорбирующей поверхности,

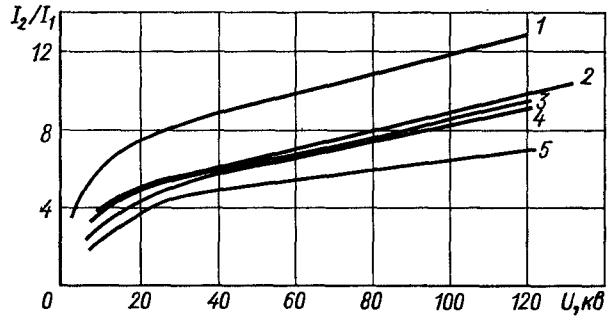


Рис. 23.2. Эмиссия электронов при падении различных ионов на поверхность алюминия:
1 — азот; *2* — ксенон; *3* — гелий; *4* — ртуть; *5* — водород [3].

$E_{валент}$ — энергия ионизации уровня валентного электрона адсорбированных атомов. Это условие выполняется при ионизации щелочных элементов на вольфраме и платине (рис. 23.3).

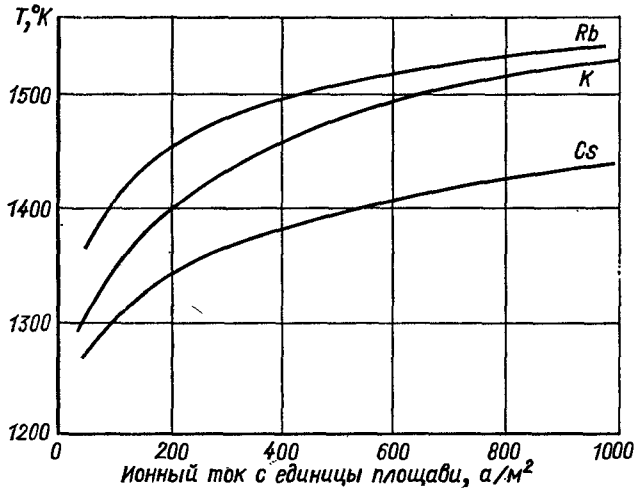


Рис. 23.3. Зависимость максимального значения тока ионов K, Rb, Cs от температуры поверхности вольфрама [4].

23.3. ПОДВИЖНОСТЬ И РЕКОМБИНАЦИЯ ЗАРЯЖЕННЫХ ЧАСТИЦ

Подвижность ионов k_i и коэффициент их диффузии D_i связаны равенством [5]

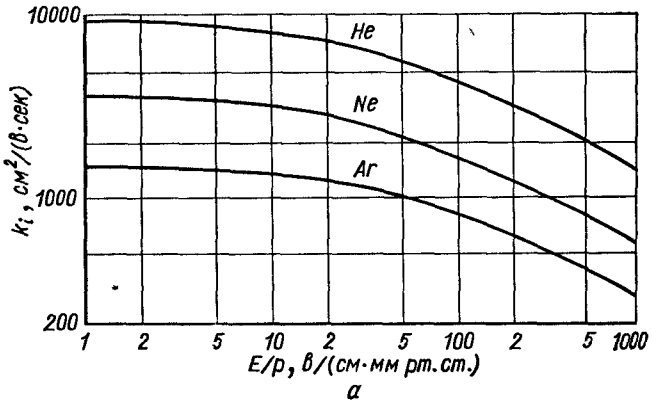
$$k_i = N_e D_i / p.$$

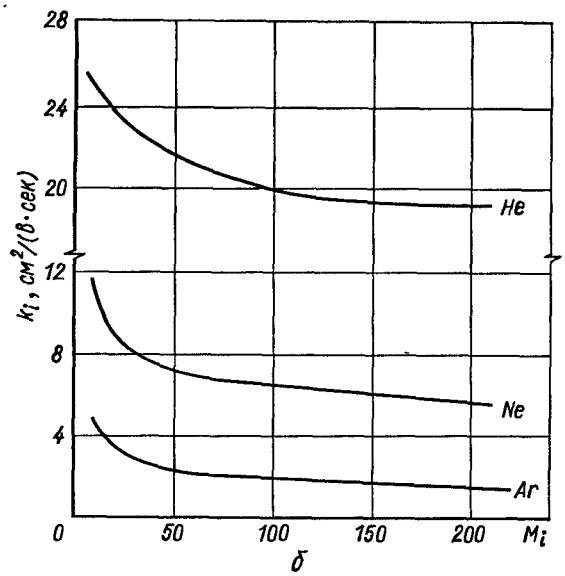
Подвижность ионов не зависит от E/p вплоть до $E/p \ll 20$ *в* /(*см·мм рт. ст.*).

Теория, учитывающая взаимодействие дипольных моментов иона и молекулы, дает для k_i следующее выражение [2]:

$$k_i = A \left[\frac{1 + m/m_i}{\rho\,(\varepsilon - 1)}\right]^{1/2}. \qquad (23.1)$$

Здесь m — масса молекулы; m_i — масса иона, ε — диэлектрическая постоянная газа. Постоянная A при больших (для газа) ε, малых температурах и малых размерах ионов и молекул равна 0,52, а при больших радиусах и температурах и малых ε уменьшается до 0,1.





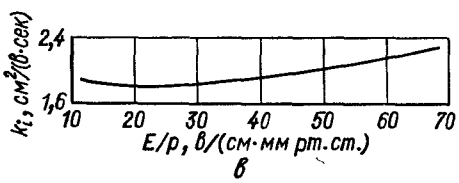
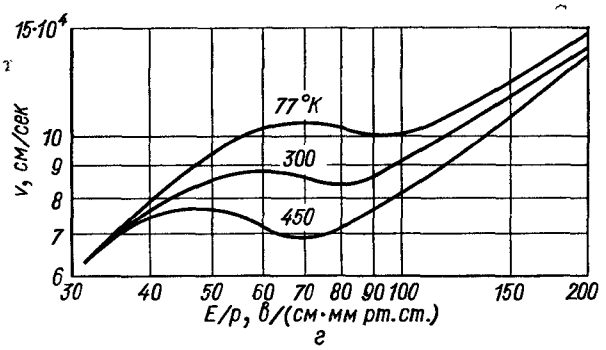
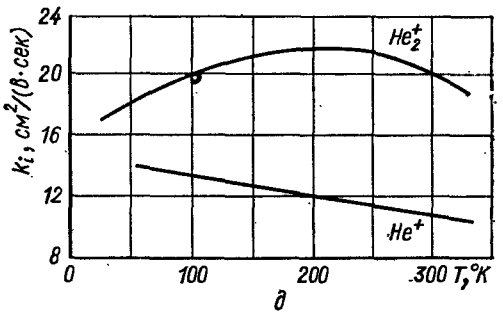


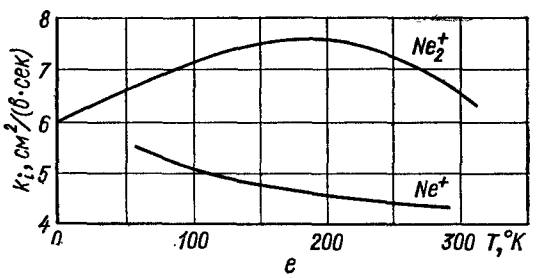
Рис. 23.4. Зависимость подвижности ионов в различных газах от E/p [8]:
а — подвижность собственных ионов в гелии, неоне и аргоне, p=1 *мм рт.ст.*; *б* — зависимость подвижности от массы иона в гелии, неоне и аргоне, p=760 *мм рт. ст.*; *в* — подвижность ионов



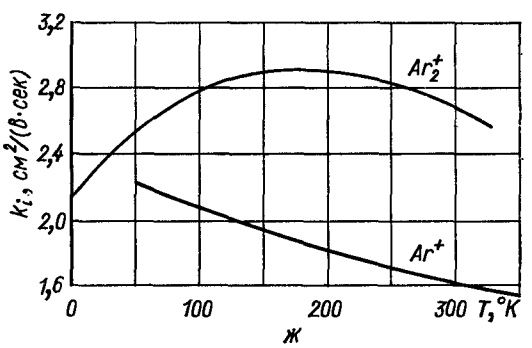
г



д

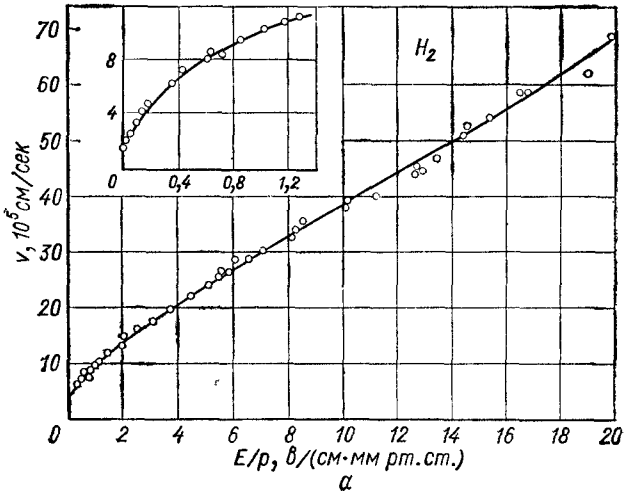


е

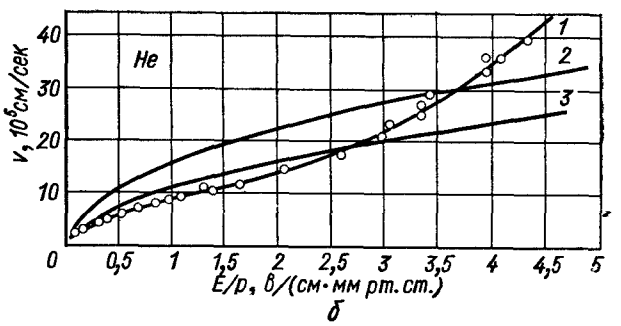


ж

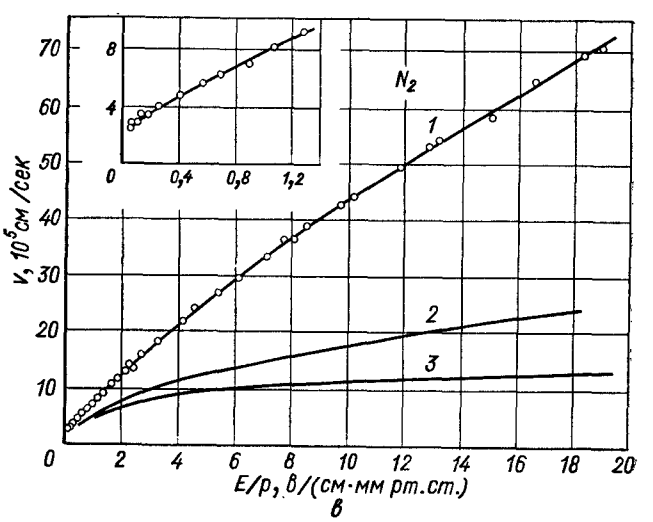
ртути в аргоне при 300°К, p_{Ar} =760 *мм рт. ст.*; *г* — скорость дрейфа ионов в азоте при различных температурах; N_1^+ — для низких значений E/p и N_2^+ для высоких значений E/p; плотность азота постоянна и соответствует нормальным условиям; *д* — зависимость подвижности ионов гелия от температуры; *е* — зависимость подвижности ионов неона от температуры; *ж* — зависимость подвижности ионов аргона от температуры (плотность гелия, неона и аргона постоянна и соответствует нормальным условиям).



а

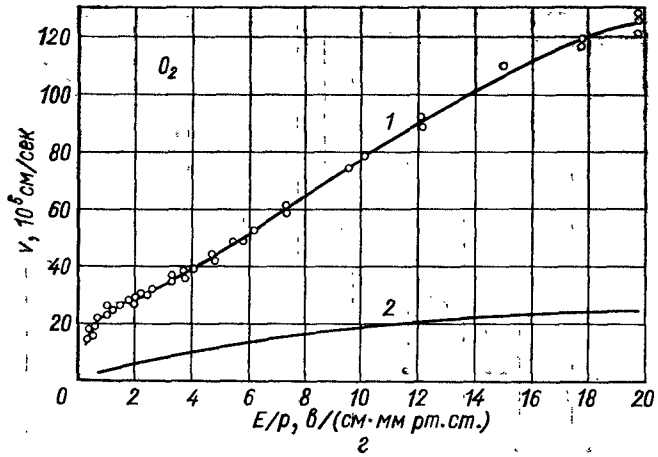


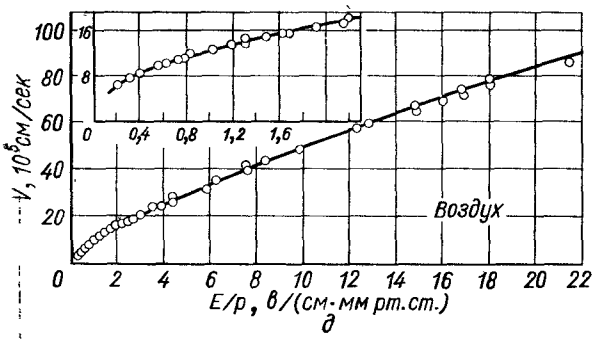
б

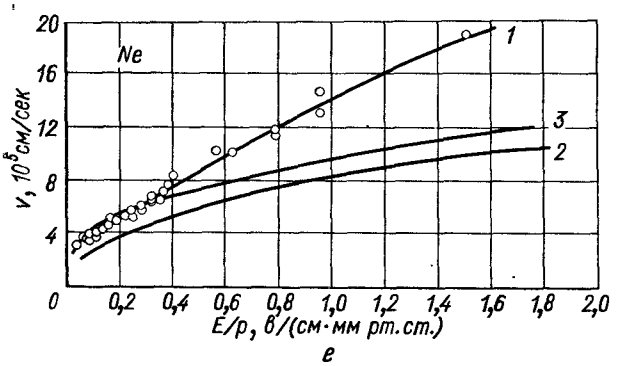


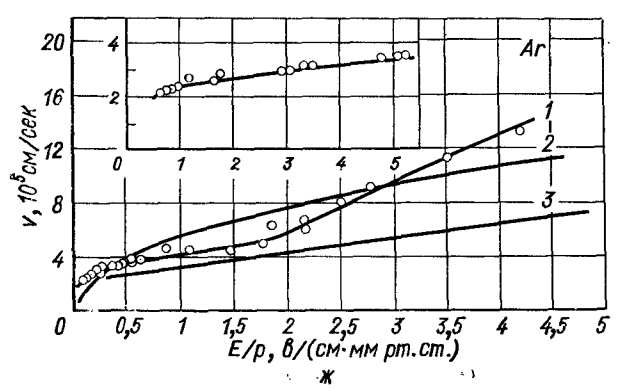
в

Рис. 23.5. Зависимость скорости дрейфа электронов от E/p в различных газах [5]:
1 — эксперимент; *2*, *3* — теория.









Электроны даже в слабых полях приобретают энергию, значительно превышающую тепловую, поэтому их скорость дрейфа нелинейно зависит от напряженности поля (рис. 23.5).

Коэффициент объемной рекомбинации α определяет скорость взаимной нейтрализации заряженных частиц и связан с их концентрацией соотношением

$$dN_{\pm} / dt = -\alpha N_+ N_- . \qquad (23.2)$$

При малых давлениях ($p < 1$ *атм*) коэффициент ион-ионной рекомбинации определяется соотношением [2]

$$\alpha_{ii} = \frac{8\pi}{27} \cdot \frac{e^6}{(k_0 T)^3} \cdot \frac{1}{\lambda_i} \sqrt{\frac{6k_0 T_i}{M}} . \qquad (23.3)$$

Здесь λ_i и T_i — длина свободного пробега и температура ионов.

При высоких давлениях газа

$$\alpha_{ii} = 4\pi e (k_i + k_e) \qquad (23.4)$$

(см. рис. 23.6 и табл. 23.2).

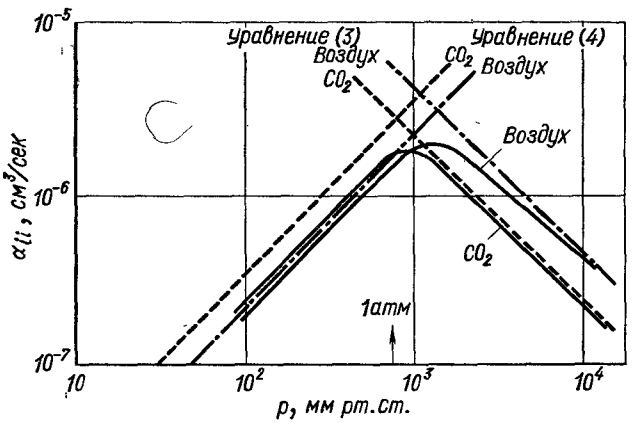


Рис. 23.6. Зависимость коэффициента рекомбинации ионов α_{ii} в воздухе и CO_2 от давления [2].

Таблица 23.1

Среднее число столкновений электрона δ до момента прилипания к нейтральному атому [1]

Газ	δ	Газ	δ
Инертные газы, H_2, N_2	∞	Воздух	$2{,}1 \cdot 10^5$
		O_2, H_2O	$4{,}0 \cdot 10^4$
CO	$1{,}6 \cdot 10^3$	Cl_2	$2{,}1 \cdot 10^3$
NH_3	$9{,}9 \cdot 10^7$		
N_2O	$6{,}1 \cdot 10^5$		

Таблица 23.2

Коэффициенты ион-ионной рекомбинации α_{ii} в собственном газе [2]
($p = 760$ *мм рт. ст.*, $T = 0$°C, возраст ионов $\simeq 0{,}1$ *сек*)

Газ	α_{ii}, 10^{-6} *см³/сек*	Газ	α_{ii}, 10^{-6} *см³/сек*
CO_2	1,7	SO_2	1,4
O_2	1,5	H_2O	0,9 (100°C)
Воздух	1,4	CO	0,85
N_2O	1,4		

Таблица 23.3

Коэффициенты ион-электронной рекомбинации α_{ie} в различных газах [2]

Газ	p, *мм рт. ст.*	Температура электронов, *эв*	α_{ie}
Hg	0,3	0,15	$2 \cdot 10^{-10}$
Cs	0,01—0,1	0,15	$(3 \div 4) \cdot 10^{-10}$
He	1	0,03	$1{,}7 \cdot 10^{-8}$
Ne	15—30	0,03	$2 \cdot 10^{-7}$
O_2	2—20	0,03	$2{,}7 \cdot 10^{-7}$
Ar	15—30	0,03	$3 \cdot 10^{-7}$
N_2	2—5	0,03	$1{,}4 \cdot 10^{-6}$
H_2	3—12	0,03	$2{,}5 \cdot 10^{-6}$

В инертных газах α_{ie} растет с увеличением плотности газа. При $T < 300$°K $\alpha_{ie} \sim \sqrt{p}$.

23.4. СЛАБОТОЧНЫЕ РАЗРЯДЫ

Тлеющий разряд. Тлеющий разряд возникает в достаточно однородном электрическом поле между холодными электродами при давлении от $\sim 0{,}1$ до десятков и сотен миллиметров ртутного столба. Катод в этом типе разряда испускает электроны вследствие его бомбардировки образующимися в зоне разряда ионами и световыми квантами.

Основную роль в возникновении тлеющего разряда играет лавинный процесс размножения электронов. Он описывается формулой Таунсенда [2]:

$$i = i_0 \frac{\exp(\alpha d)}{1 - \gamma[\exp(\alpha d) - 1]},$$

где i_0 — ток первичных электронов; d — длина разрядного промежутка; α — первый коэффициент ионизации Таунсенда, определяющий число новых электронов, создаваемых первичным электроном при прохождении 1 *см* пути в направлении поля; γ — второй коэффициент ионизации Таунсенда, равный числу электронов, выбиваемых из катода одним положительным ионом. Обращение знаменателя этого выражения в нуль соответствует пробою газового промежутка.

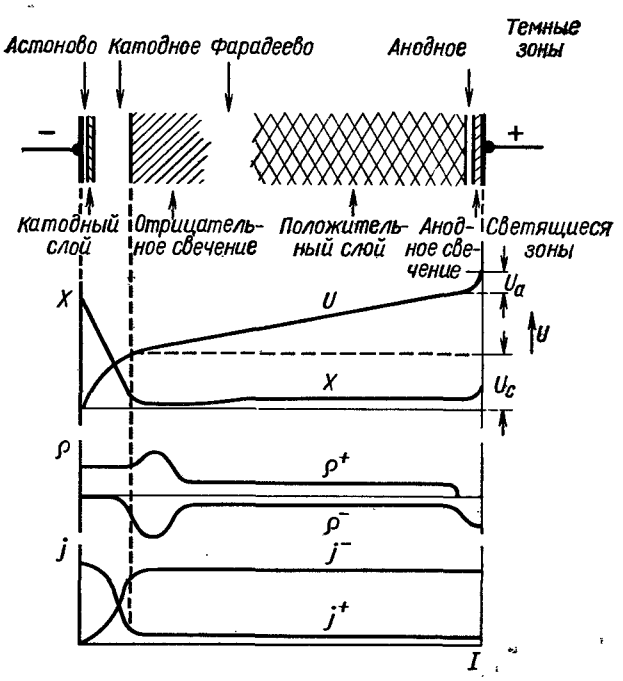


Рис. 23.7. Пространственное распределение темных и светящихся зон, напряженность электрического поля X, потенциала U, плотностей пространственного заряда ρ^+ и ρ^- и плотностей тока j^+ и j^- в тлеющем разряде (схема) [2].

На рис. 23.7 показано пространственное распределение темных и светящихся зон, электрического поля и других характеристик тлеющего разряда.

Изменение расстояния между катодом и анодом влияет лишь на длину положительного столба, а изменение давления ведет к обратно пропорциональному изменению длины прикатодных и прианодных областей разряда.

Таблица 23.4

Катодное падение потенциала в различных газах, *в* [2]

Материал катода	H_2	He	Ne	N_2	Воздух	Ar	Hg	Другие газы
C	280	—	—	—	424	—	475	575 (CO)
Al	170	140	120	180	230	100	245	280 (Cl_2)
K	94	60	68	170	180	64	—	80 (K)
Fe	250	150	150	215	270	165	300	290 (O_2)
								306 (Xe)
								80 (K)
								340 (Cs)
Ni	210	160	140	200	226	130	275	—
Cu	214	177	220	208	375	130	450	484 (CO)
								460 (CO_2)
Zn	184	143	—	216	280	119	—	354 (O_2)
								480 (CO)
Pt	276	165	152	216	277	130	—	364 (O_2)
								275 (Cl_2)
Hg	337	143	—	226	—	—	340	—

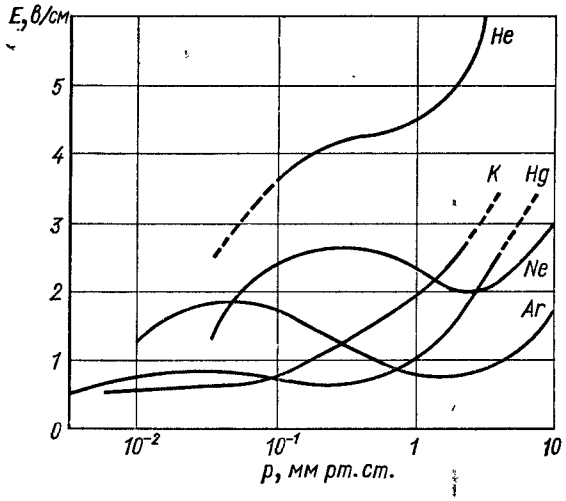
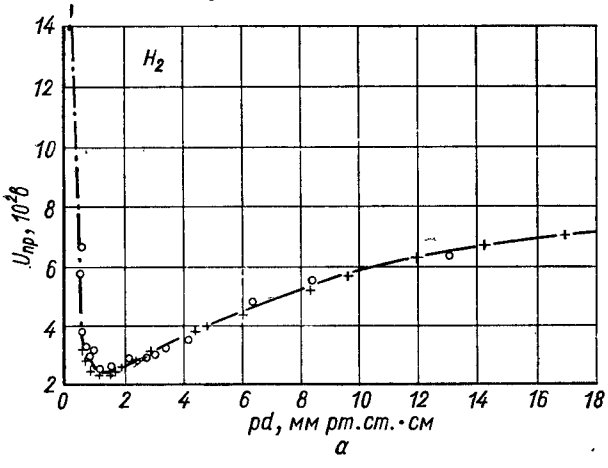
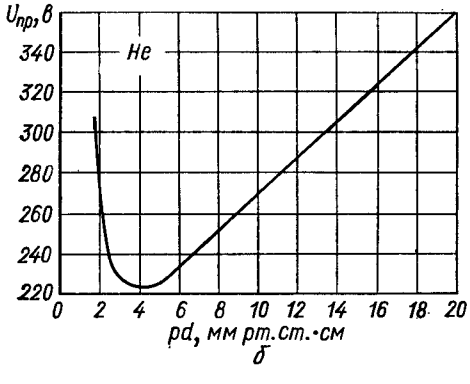


Рис. 23.8. Зависимость напряженности поля в положительном столбе разряда в различных газах и парах от давления. (Ток 0,3 *а*, радиус трубки 1 *см* [2].)

Наибольшая напряженность поля тлеющего разряда наблюдается в области темного катодного пространства. Электроны, испущенные катодом, еще не успевают здесь набрать энергию, необходимую для возбуждения и ионизации молекул газа.



а



б

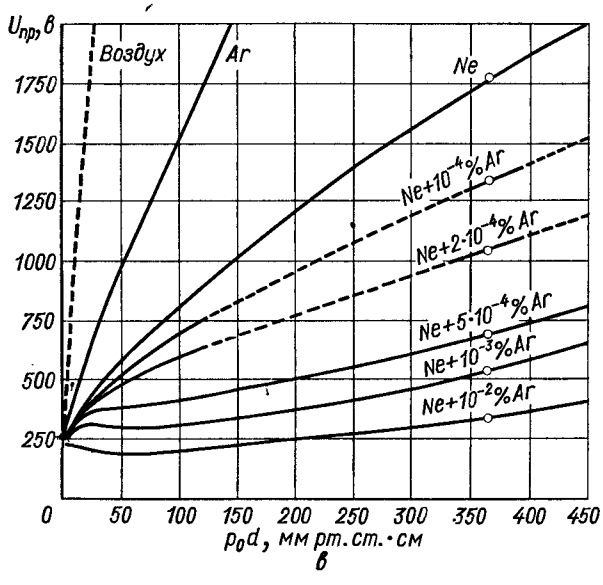
Таблица 23.5

Приведенная ширина темного катодного пространства $d_i p$. *см·мм рт. ст.*. для различных газов [2]

Материал катода	H_2	He	Ne	N_2	Воздух	Ar	Hg	Другие газы
C	0,9	—	—	—	—	—	0,69	—
Mg	0,61	1,45	—	0,35	—	—	—	0,25 (O_2)
Al	0,72	1,32	1,64	0,31	0,25	0,29	0,33	0,24 (O_2)
Fe	0.9	1.3	0,72	0.42	0.52	0,33	0.34	0,31 (O_2)
								0,23 (Xe)
Cu	0,8	—	—	—	0,23	—	0,6	—
Hg	0.9	—	—	—	—	—	—	—

Часть площади катода, активно участвующая в разряде, пропорциональна току разряда.

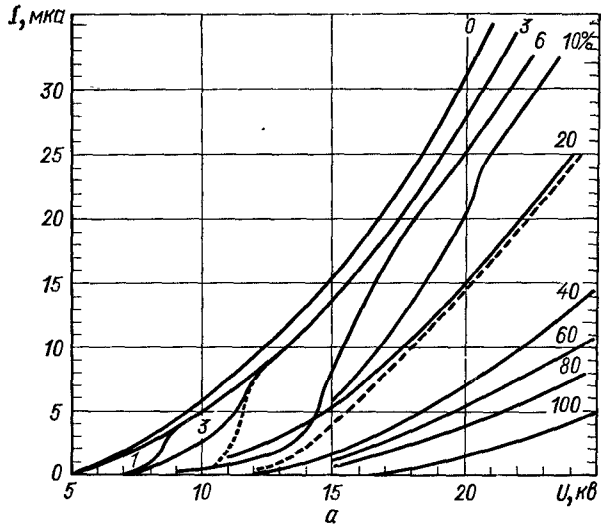
При очень малых токах (обычно меньше 10^{-5} *а*), когда диаметр катодного пятна меньше ширины катодного пространства, катодное падение потенциала увеличивается из-за радиальной диффузии зарядов (поднормальное катодное падение потенциала). При большой плотности тока, когда уже вся поверхность катода покрыта разрядом, катодное падение потенциала также нарастает (аномальное катодное падение потенциала). На рис. 23.8 даны значения напряженности поля в положительном столбе разряда для различных газов. Даже небольшая примесь электроотрицательного газа приводит к резкому возрастанию напряженности поля положительного столба. Примесь молекулярных газов приводит также к появлению в положительном столбе *страт*, т. е. расположенных поперек градиента электрического поля темных и светящихся зон. В тлею-



в

Рис. 23.9. Зависимость пробивного напряжения в различных газах от pd [5]:

а — водород (+ — эксперимент; ○ — расчет, катод никелевый); *б* — гелий; *в* — аргон, неон и их смеси (железные электроды, промежуток 2 *см*), воздух (катод — нержавеющая сталь, d=13,5 *мм*, T=23°C).



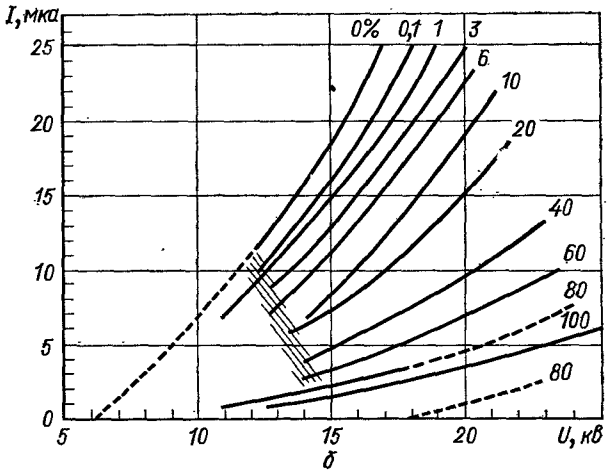


Рис. 23.10. Вольт-амперные характеристики короны для смесей фреона-12 с воздухом. Общее давленне — 745 *мм рт. ст*:

а — разряд с положительного острия (пунктирные кривые — результат другого эксперимента); *б* — разряд с отрицательного острия. Ток в заштрихованной области сильно флуктуирует.

щем разряде, происходящем в смеси газов, наблюдается явление *катафореза* — разделения газовой смеси. Газ с меньшим потенциалом ионизации накапливается у катода. Питание люминесцентных ламп, рекламных трубок, работающих на газовых смесях, и т. п. для предотвращения катафореза осуществляется только переменным током.

В большинстве случаев пробивное напряжение в однородном электрическом поле является функцией произведения длины разрядного промежутка d на давление газа p (рис. 23.9):

$$U_{\text{пр}} = f(pd).$$

Эта закономерность известна под названием *закона Пашена*.

На абсолютную величину пробивного напряжения оказывает влияние также материал электродов и такие факторы, как освещение и облучение разрядного промежутка.

Коронный разряд — это особая форма тлеющего разряда в сильно неоднородном электрическом поле. Этот тип разряда достаточно четко выражен лишь при давлении газа от 0,1 до нескольких бар.

Ток коронного разряда имеет характер импульсов, вызываемых электронными лавинами. Частота повторения импульсов 10—100 *кгц* (рис. 23.10, 23.11).

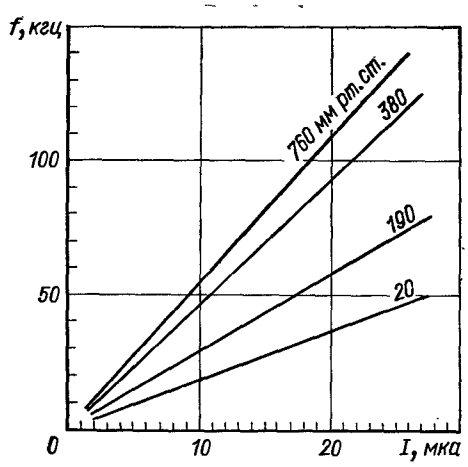


Рис. 23.11. Зависимость частоты импульсов от тока отрицательной короны в воздухе при различных давлениях [5].

23.5. ДУГОВОЙ РАЗРЯД

Электрическая дуга — это разряд при большой силе тока (более 1 *а*) и низком катодном падении потенциала (менее 20 *в*). Плотность эмиссии электронов с катода дугового разряда достигает значеиий 10^3—10^7 *а/см*^{2}.

У самостоятельных дуг эта эмиссия поддерживается тепловыделением самой дуги, у несамостоятельных — специальным его нагревом. Проводимость газового канала самостоятельных (термических) дуг обусловливается термической ионизацией газа, причем температуры электронов, ионов и нейтральных частиц в канале приблизительно одинаковы. Разряды низкого давления с подогреваемым активированным катодом* (несамостоятельные дуги) могут, как и в случае тлеющего разряда, иметь температуру электронов, много бо́льшую ионной температуры (рис. 23.12—23.15).

* Наиболее распространенное изделие с таким типом разряда — люминесцентная лампа.

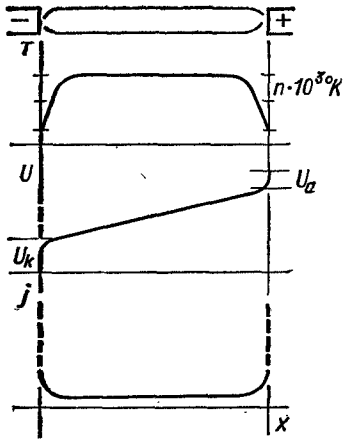


Рис. 23.12. Зависимость температуры газа T, потенциала U и плотности тока j от расстояния x для длинной дуги; $U_к$ и $U_а$ — катодное и анодное падение потенциала [2].

Температура столба дуги весьма неоднородна по длине и диаметру, максимум температуры столба у обычных дуг составляет $(4—8)\cdot10^3$ °К, а у некоторых специальных дуг достигает $5\cdot10^4$ °К [6] (рис. 23. 20 и 23.21).

Диаметр свободно горящей дуги уменьшается с ростом давления. При увеличении силы тока диаметр дуги вначале увеличивается, а затем остается неизменным (рис. 23.16). Вольт-амперные характеристики свободно горящих дуг обычно являются падающими для не слишком больших токов (рис. 23.17). При токах в десятки и сотни ампер характеристика может стать возрастающей (рис. 23.18).

На рис. 23.19 показана зависимость катодного падения потенциала от силы тока для аргоновой дуги, на рис. 23.20 и 23.21 — распределение температур в столбе дуги с угольными электродами.

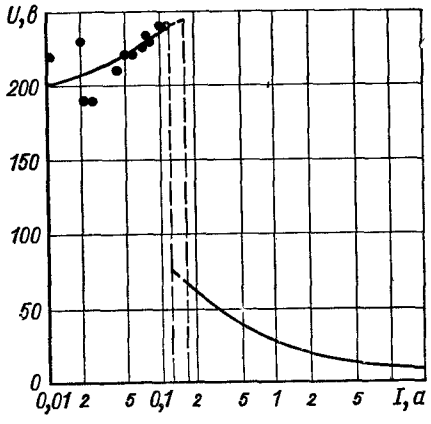


Рис. 23.13. Вольт-амперная характеристика разряда в ксеноновой лампе (5 *атм*) при режиме, переходном от тлеющего разряда к дуговому [6].

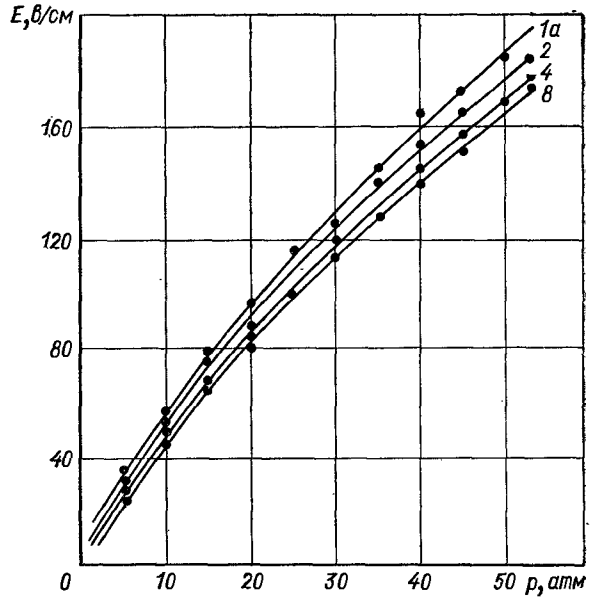


Рис. 23.14. Зависимость напряженности поля от давления в столбе дуги ртутной лампы высокого давления для различных значений тока [6].

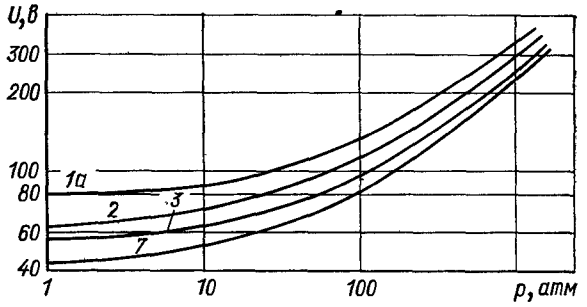


Рис. 23.15. Зависимость напряжения от давления для дуги, горящей в азоте при различных значениях тока[6].

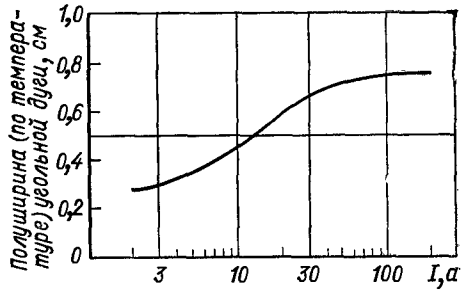


Рис. 23.16. Зависимость полуширины дуги между угольными электродами от тока [6].

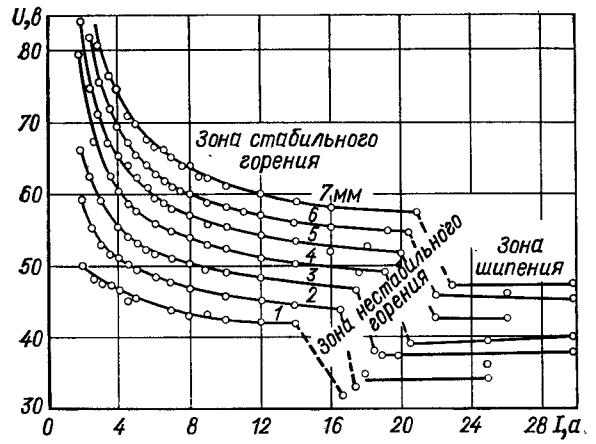


Рис. 23.17. Вольт-амперные характеристики дуг с угольными электродами различной длины с переходной областью от стабильно горящей дуги к «шипящему» разряду [6].

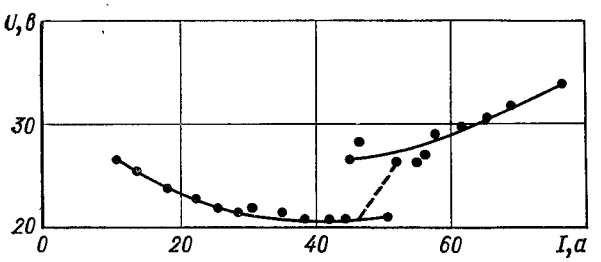


Рис. 23.18. Вольт-амперная характеристика дуги высокой интенсивности с угольными электродами (в том числе при начавшемся выбросе паров из анода) [6].

Таблица 23.6

Характеристика различных электродов для дуги при $p = 1$ атм [2]

Электрод	Газ	Ток дуги, а	$T_к$, °К	$T_а$, °К	$i_а$, $\frac{а}{см^2}$	$U_к$, в	$U_а$, в
C—C	Воздух	1—10	3500	4200	65	9—11	11—12
C—C	N_2	4—10	3500	4000	70	—	—
Cu—Cu	Воздух	5	2200	2400	—	8—9	2—6
Fe—Fe	»	5	2400	2600	—	8—12	2—6
Ni—Ni	»	5	2400	2400	—	—	—
W—W	»	5	3000	4200	—	—	—
Al—Al	»	5	3400	3400	—	—	—
Al—Al	N_2	5	2500	2500	—	—	—
Zn—Zn	Воздух	5	3000	3000	—	—	—
Hg—C	Hg	2	600	600	—	7—10	0—10

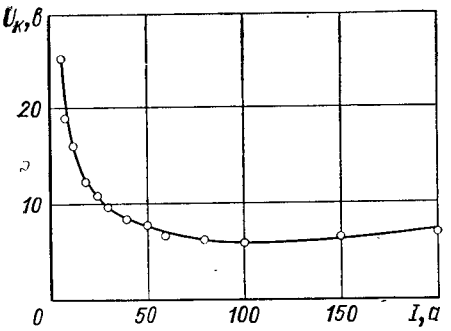


Рис. 23.19. Зависимость катодного падения потенциала от тока в аргоновой дуге [6].

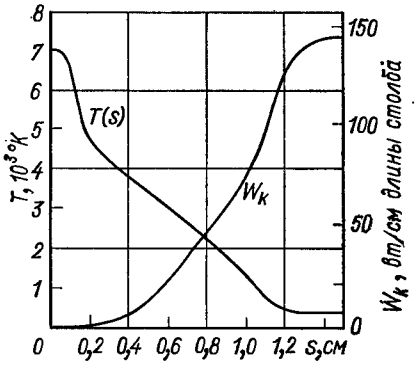


Рис. 23.20. Распределение температуры $T(s)$ в дуге с угольными электродами при $l = 10$ *а*:
Кривая $W_к$ — мощность, отводимая конвекцией; T (s) — расстояние от оси дуги [6].

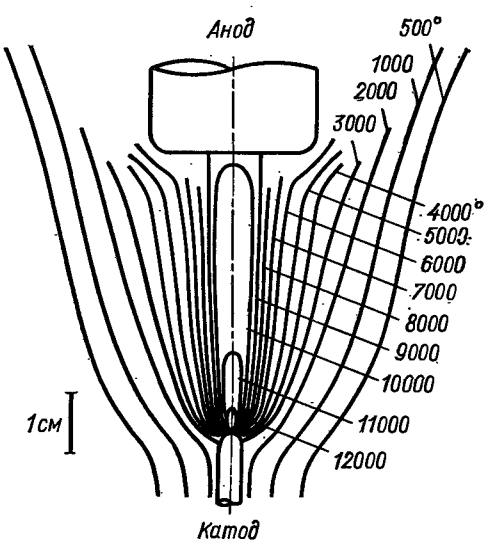


Рис. 23.21. Поле температур в столбе дуги с угольными электродами, горящей в воздухе при $l = 200$ *а* [6].

23.6. НИЗКОТЕМПЕРАТУРНАЯ ПЛАЗМА

Область состояний, именуемая низкотемпературной плазмой, определена недостаточно четко. Температура такой плазмы обычно ниже 50 000° К, степень ионизации меняется от долей процента до почти 100%. Излуча-

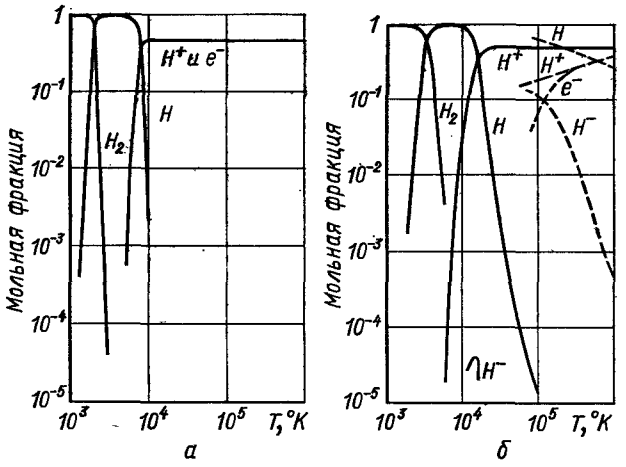


Рис. 23.22. Зависимость состава водородной плазмы от ее температуры [4]:
а — для $p=10^{-6}$ *атм*; *б* — для $p=1$ и 10^{6} *атм* (пунктир).

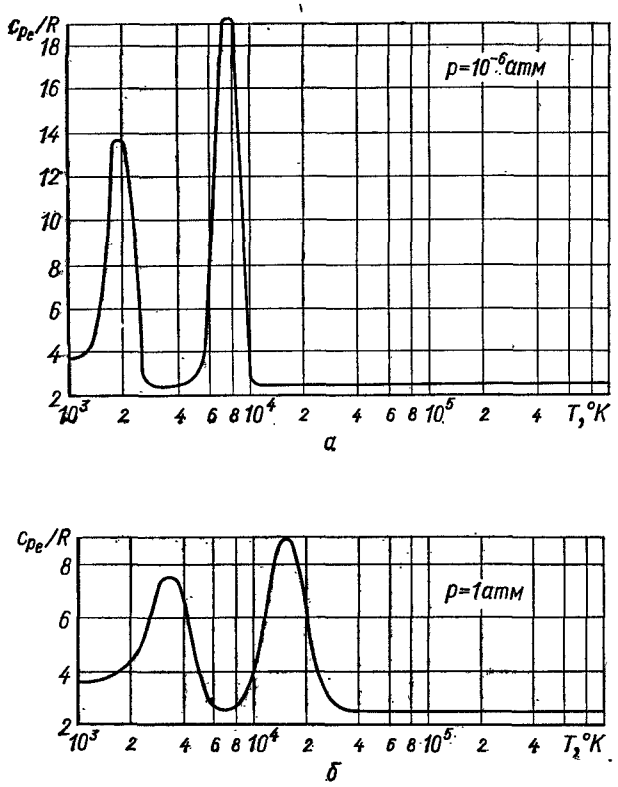


Рис. 23.23. Удельная теплоемкость равновесной водородной плазмы [4]:
а — для $p=10^{-6}$ *атм*; *б* — для $p=1$ *атм*,

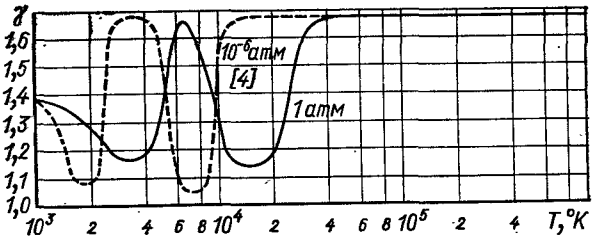


Рис. 23.24. Зависимость отношения удельных теплоемкостей $c_p/c_V = \gamma$ для равновесной водородной плазмы от температуры.

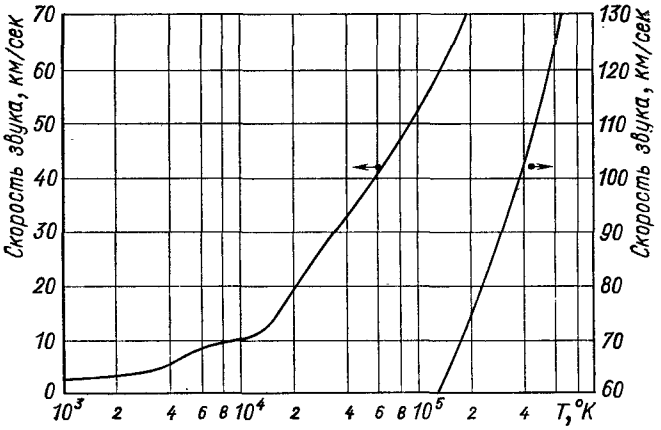


Рис. 23.25. Зависимость скорости звука в равновесной водородной плазме ($p = 1$ *атм*) от температуры [4].

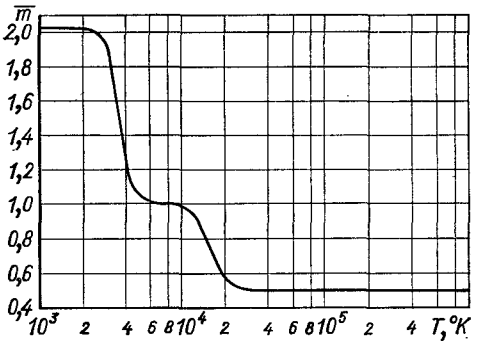


Рис. 23.26. Зависимость средней молекулярной массы водородной плазмы $\bar{m}$ от температуры при $p = 1$ *атм* [4].

тельная способность плазмы может быть значительной, приближающейся к излучательной способности черного тела. Расчет и изучение низкотемпературной плазмы усложняются из-за многокомпонентности ее состава. Так, плазма H_2 состоит из H_2, H, H^+, H^-, e^-.

На рис. 23.22—23.27 приводятся некоторые сведения о свойствах низкотемпературной плазмы. Большинство приводимых данных — расчетные.

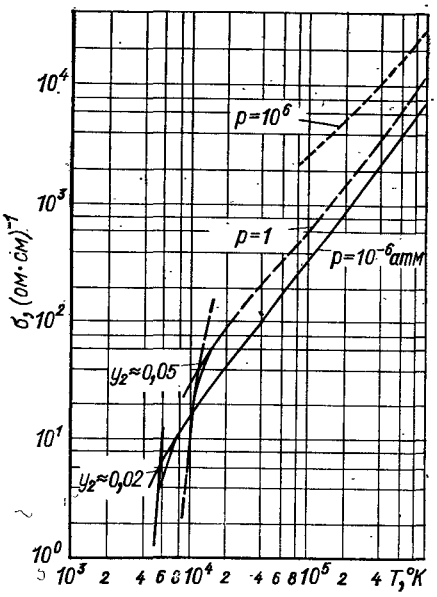


Рис. 23.27. Зависимость проводимости водородной плазмы от температуры [4].

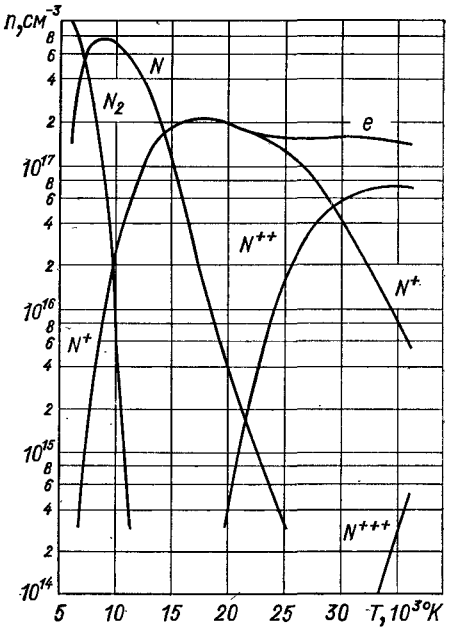


Рис. 23.29. Состав азотной плазмы при атмосферном давлении [6].

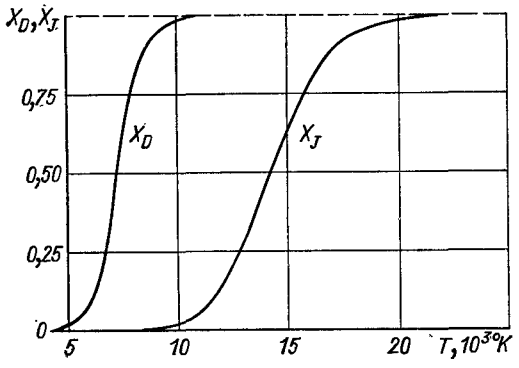


Рис. 23.28. Степень диссоциации X_D и степень ионизации X_J азота при атмосферном давлении [6].

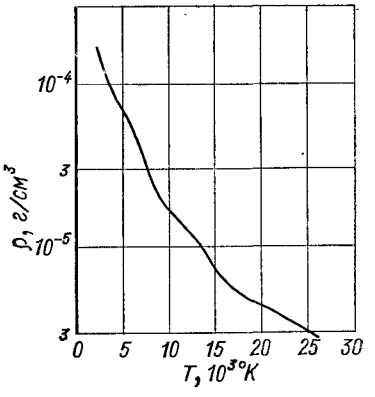


Рис. 23.30. Зависимость плотности азота от температуры при атмосферном давлении [6].

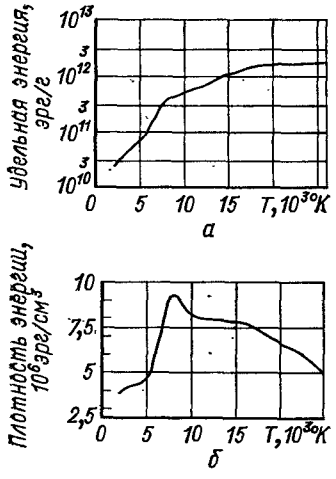


Рис. 23.31. Зависимость удельной энергии (*а*) и плотности энергии (*б*) азотной плазмы от температуры [6].

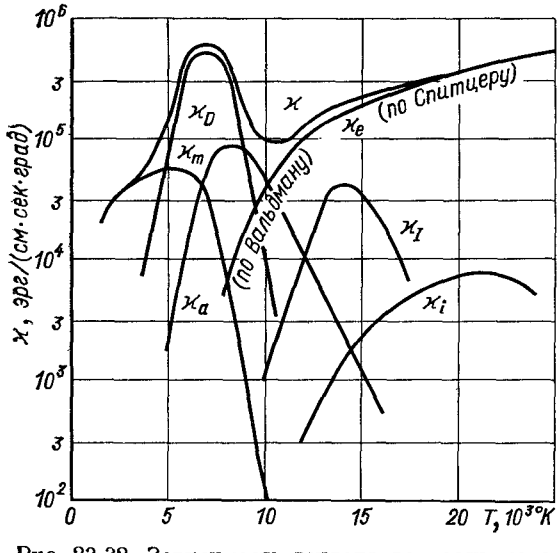


Рис. 23.32. Зависимость теплопроводности молекул $\varkappa_m$, атомов $\varkappa_a$, ионов $\varkappa_i$ и электронов $\varkappa_e$ азотной плазмы от температуры. $\varkappa_D$ — теплопроводность вследствие диффузии энергии диссоциации, $\varkappa_I$ —ионизации, $\varkappa$ — сумма всех компонент [6].

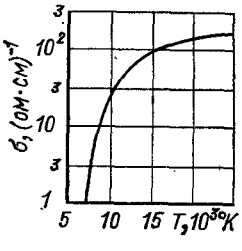


Рис. 23.33. Зависимость проводимости азотной плазмы при атмосферном давлении от температуры [6].

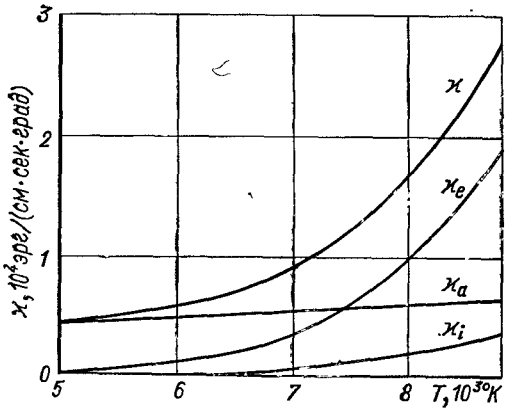


Рис. 23.34. Зависимость теплопроводности ксенона при давлении 25 *атм* от температуры (обозначения см. на рис. 23.32) [6].

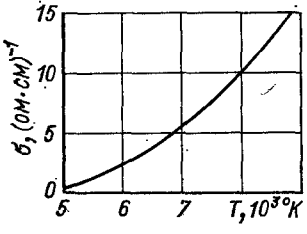


Рис. 23.35. Зависимость проводимости ксенона при $p = 25$ *атм* от температуры [6]

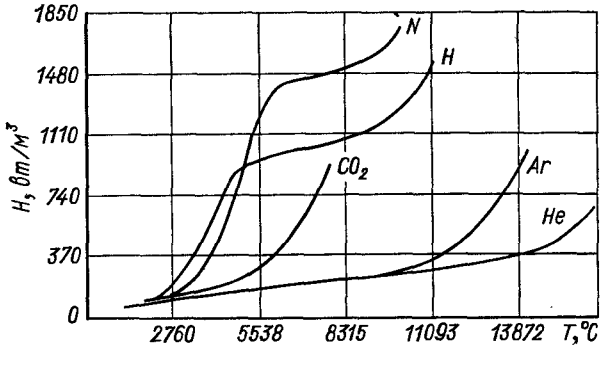


Рис. 23.36. Зависимость энтальпии от температуры для различных газов.

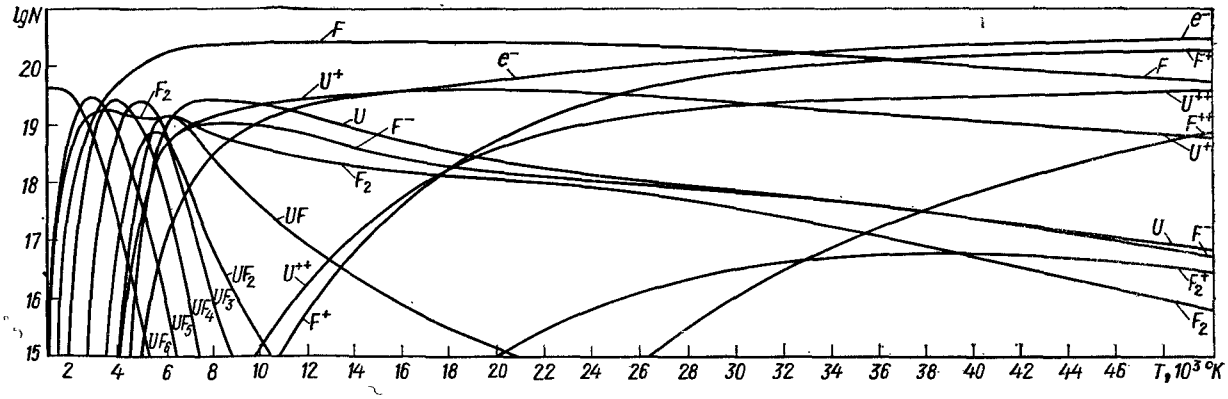


Рис. 23.37. Концентрация различных компонентов в плазме гексафторида урана [7] ($p = 1{,}6$ *ат* при $T = 273°$K).

23.7. ИСКРОВОЙ РАЗРЯД

Искровой разряд начинается с образования стримеров — самораспространяющихся электронных лавин, образующих проводящий канал между электродами. Вторая стадия искрового разряда — главный разряд происходит вдоль канала, образованного стримером, и по своим характеристикам близка к дуговому разряду, ограниченному во времени емкостью электродов и недостаточностью питания.

Пробивное напряжение. Пробивное напряжение в воздухе при 20° С и 760 *мм рт. ст.* дается приближенной формулой Ритца [5]:

$$U_{\text{пр}} = 24{,}55d + 6{,}66\sqrt{d}\ \text{кв}.$$

На рис. 23.38 приводится зависимость пробивного напряжения от давления воздуха и расстояния между электродами.

Материал и состояние поверхности электродов не оказывают заметного влияния на пробивное напряжение

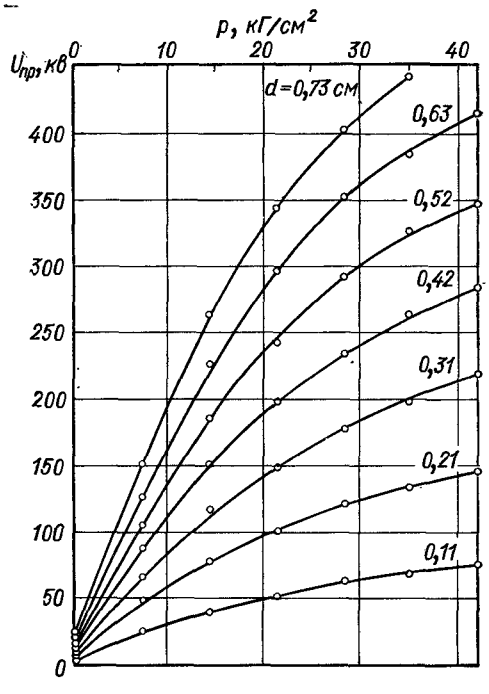


Рис. 23.38. Зависимость пробивного напряжения от давления воздуха и расстояния между плоскими электродами [5].

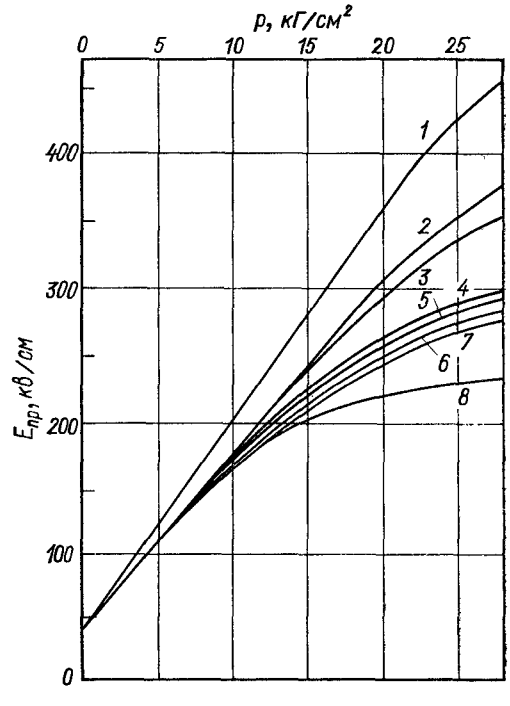


Рис. 23.39. Зависимость градиента пробивной напряженности от давления газа для различных газов и электродов [5]:

1 — воздух + нержавеющая сталь; *2* — CO_2 + нержавеющая сталь; *3* — CO_2 + N_2 + нержавеющая сталь; *4* — воздух + Al; *5* — CO_2 + Al; *6* — N_2 + нержавеющая сталь; *7* — CO_2 + N_2 + Al; *8* — N_2 + Al.

лишь при давлениях ~1 *атм*. При бо́льших давлениях материал и состояние электродов играют заметную роль (рис. 23.39).

Таблица 23.7

Пробивные напряжения (50 *гц*, амплитудное значение) для однородного поля в воздухе (*T*=20°C, *p*=760 *мм рт. ст.*, парциальное давление 10 *мм рт. ст.*) [5]

d, *см*	$U_{пр}$, *кв*	$E_{пр}$, *кв/см*	*d*, *см*	$U_{пр}$, *к*	$E_{пр}$, *кв/см*
0,06	3,13	52,16	0,2	7,90	39,50
0,07	3,49	49,86	0,3	11,02	36,73
0,08	3,84	48,06	0,4	14,01	35,03
0,09	4,18	46,44	0,5	17,00	34,00
0,10	4,54	45,40	0,8	25,70	32,13
0,12	5,23	43,58	1,0	31,35	31,35
0,15	6,25	41,67			

Расстояние между сферическими электродами, соответствующее возникновению искрового пробоя, весьма часто служит для измерения высокого напряжения.

Запаздывание пробоя от момента приложения напряжения изменяется в широких пределах в зависимости от давления и состава газа, материала и конфигурации электродов (рис. 23.42).

Разряд молнии. Разряд молнии имеет, как правило, прерывистый характер, он состоит из отдельных импульсов тока, разделенных промежутками ~10 *мсек*.

Процесс разряда (между облаком и землей) начинается со стримера, распространяющегося ступенями вниз с интервалами между ступенями 15—100 *мксек*. (В случае молнии стример носит название *ступенчатого лидера*.) Средняя скорость распространения стримера $(1—5)10^7$ *см/сек*; на отдельных ступенях она составляет $5 \cdot 10^9$ *см/сек*.

Когда лидер (стример) достигает земли, по ионизованному каналу начинает в обратном направлении (вверх) развиваться главный разряд. Скорость его развития $2 \cdot 10^9$—$1{,}5 \cdot 10^{10}$ *см/сек*.

После паузы в несколько сотых долей секунды распространяется второй (стреловидный) лидер со скоростью

Таблица 23.8

Пробивные напряжения между плоскими электродами в воздухе [5] (*T*=20° C, *p*=760 *мм рт. ст.*)

d, *см*	$U_{пр}$, *кв*	*d*, *см*	$U_{пр}$, *кв*
1	31,35	9	240,0
2	58,7	10	265,0
3	85,8	11	290,0
4	112,0	12	315,5
5	138,5	13	338,1
6	163,8	14	363,2
7	189,9	15	387,7
8	215,0	16	412,6

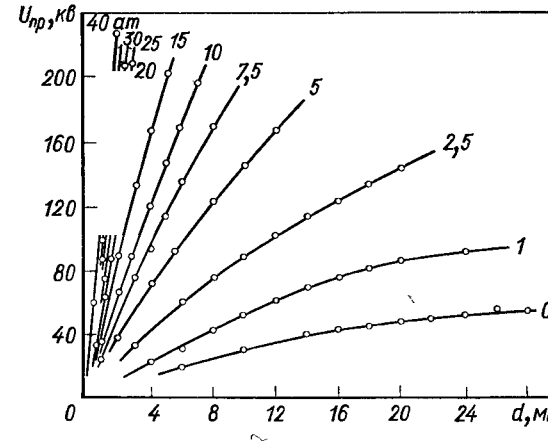


Рис. 23.40. Зависимость пробивного напряжения в воздухе при различных давлениях от длины промежутка шар (∅ = 50 *мм*) —плоскость. Давление — избыточные атмосферы (*am*) [5].

Таблица 23.9

Пробивные напряжения (*кв*) для промежутков между шарами различных диаметров в воздухе [5] (*p*=760 *мм рт. ст.*, *T*=20°C) (рис. 23.40)

d, *см*	Диаметр шара, *см*					
	6,25	12,5	25	50	100	200
1	31,9	31,5	31	—	—	—
1,5	45,9	45,6	45	—	—	—
2	58,2	59,2	59	58	—	—
2,5	69,6	72,0	72	72	71	—
3	79,1	85,2	86	85	84	—
4	94,8	109	112	112	112	—
5	—	129	137	137	137	137
6	—	146	161	164	163	163
8	—	174	205	214	215	215
10	—	—	243	243	266	265
15	—	—	314	372	387	389
20	—	—	—	461	503	510
25	—	—	—	532	611	630
30	—	—	—	591	709	745
35	—	—	—	640	797	858
40	—	—	—	—	876	965
45	—	—	—	—	949	1070
50	—	—	—	—	1010	1180
75	—	—	—	—	1240	1600
100	—	—	—	—	—	1930
150	—	—	—	—	—	2350

Таблица 23.10

Пробивное напряжение различных газов (рис. 23.41) относительно воздуха (p=760 *мм рт. ст.*) [5]

Газ	Относительное пробивное напряжение	Газ	Относительное пробивное напряжение
CCl_4	6,3	SOF_2	2,5
SeF_6	4,5	CCl_2F_2	2,4—2,5
CCl_3F	3—4,4	SO_2	1,9—2,3
CCl_3H	4,3	C_2H_5Br	1,5
C_2H_5I	3,0	C_2H_5Cl	1,25
C_3H_3I	2,9	CF_4	1,1
$C_2Cl_2F_2$	2,8	N_2	1,0
SF_6	2,3—2,5	CO_2	0,9

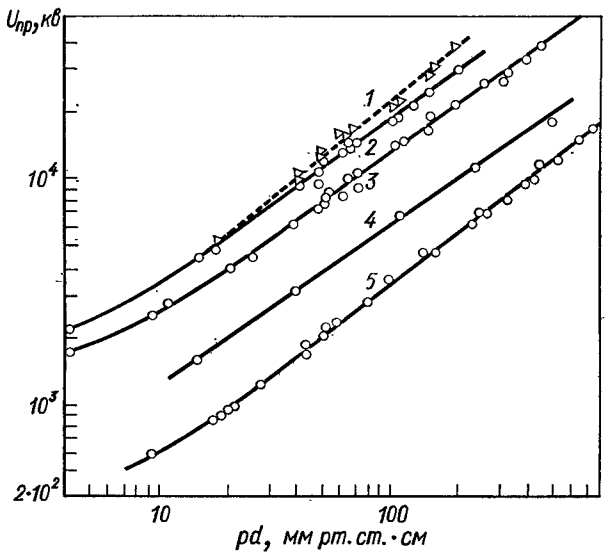


Рис. 23.41. Зависимость пробивного напряжения от pd для различных газов [5]:
1, *2* — CSF_8; *3* — фреон-12 (CCl_2F_2); *4* — воздух; *5* — водород.

$\sim 2 \cdot 10^8$ *см/сек*, а затем новый главный разряд и т. д. (до 40 отдельных разрядов). Обычно последующие разряды происходят по каналу первого разряда. В случае разряда молнии, ударяющей в высокое сооружение, первый ступенчатый лидер может начать движение не от облака, а от земли. Главный разряд в первом импульсе может отсутствовать, замещаясь непрерывно протекающим током. В большинстве разрядов земля является анодом, а атмосфера — катодом (рис. 23.43, 23.44).

Разрядный ток молнии в редких случаях превышает 10^5 *а*. Обычное его значение $\sim 10^4$ *а* (рис. 23.45). Характерная осциллограмма тока показана на рис. 23.46. Во многих случаях кроме импульсов тока по каналу разряда протекает и непрерывный ток от десятков до нескольких тысяч ампер. Время нарастания импульса

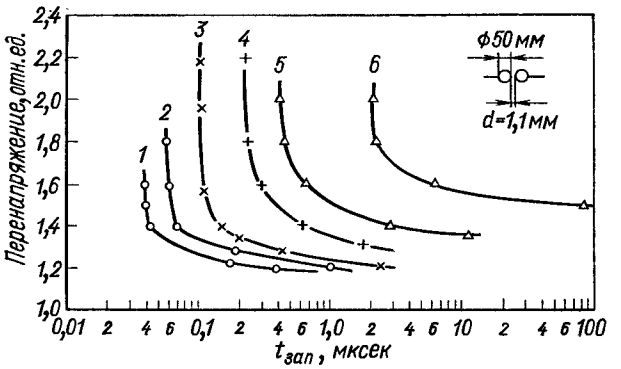


Рис. 23.42. Зависимость среднего статистического времени запаздывания $t_{зап}$ от перенапряжения при различных материалах электродов [5] (p = = 1 *атм*, воздух):
1 — сплав «электрон»; *2* — алюминий; *3* — железо; *4* — серебро; *5* — медь; *6* — окись медн.

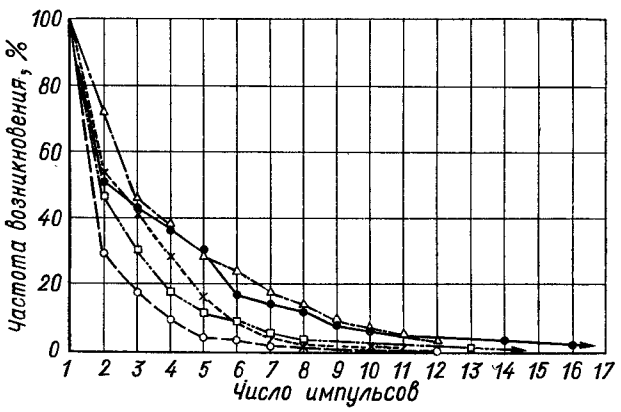


Рис. 23.43. Частота возникновения разрядов молнии с различными числами импульсов (% разрядов, в которых число импульсов меньше указанной величины); кривые получены различными авторами [5].

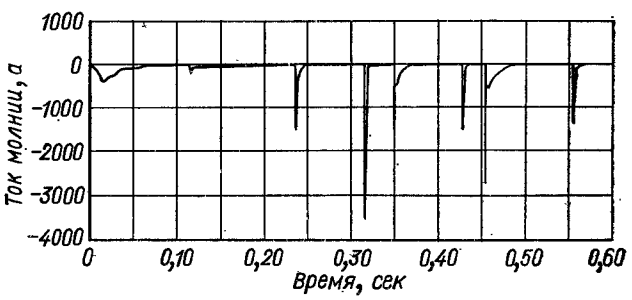


Рис. 23.44. Осциллограмма тока характерного разряда молнии [5].

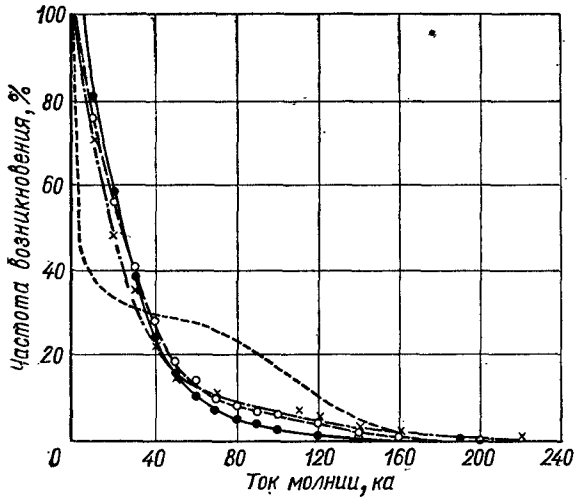


Рис. 23.45. Частота возникновения разрядов молнии с различной величиной максимального тока (далее см. подпись к рис. 23.43) [5].

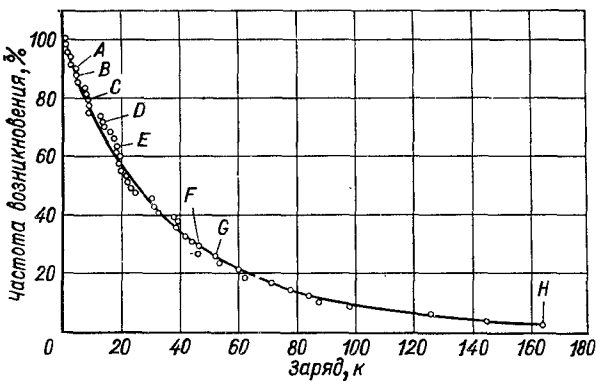


Рис. 23.47. Частота возникновения разрядов молнии с различной величиной общего нейтрализуемого заряда (далее см. подпись к рис. 23.43) [5].

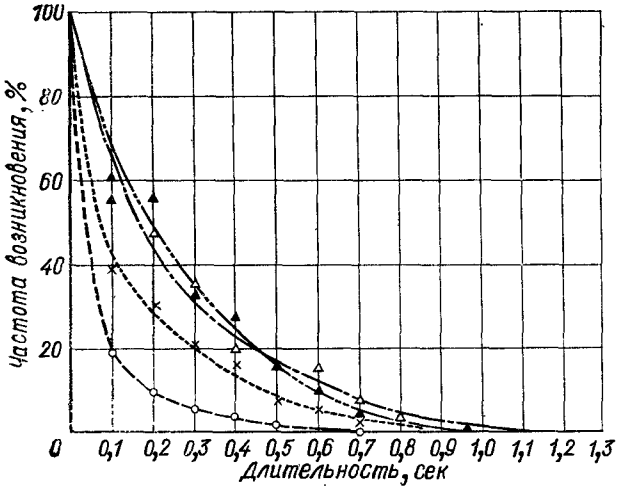


Рис. 23.46. Частота возникновения разрядов молнии различной длительности (см. подпись к рис. 23.43) [5].

тока составляет 1—19 *мксек*, время спада тока импульса 7—100 *мксек*.

Заряд, переносимый отдельным импульсом тока, меняется от 0,1 до 5 *к* (5% импульсов несут более чем по 1,5 *к*). Суммарный заряд, нейтрализуемый при разряде молнии, может быть более 100 *к* (рис. 23.47).

23.8. ВЫСОКОЧАСТОТНЫЙ РАЗРЯД

Пробивное напряжение (амплитудное значение) при частоте 50 *гц* практически соответствует пробивному напряжению постоянного тока, а сам разряд на переменном токе низкой частоты является последовательной разверткой во времени тех разрядов, которые существовали бы при данном мгновенном значении тока и напряжения. При повышении частоты эта квазистационарная картина нарушается.

Зависимости пробивного напряжения от частоты, длины разрядного промежутка и давления для различных газов представлены на рис. 23.48—23.52. Рис. 23.50 на примере зависимости пробивного напряжения в водороде от длины волны иллюстрирует эффект падения пробивного напряжения по достижении электронами амплитуды колебаний (с учетом их соударений с молекулами газа), равной разрядному промежутку.

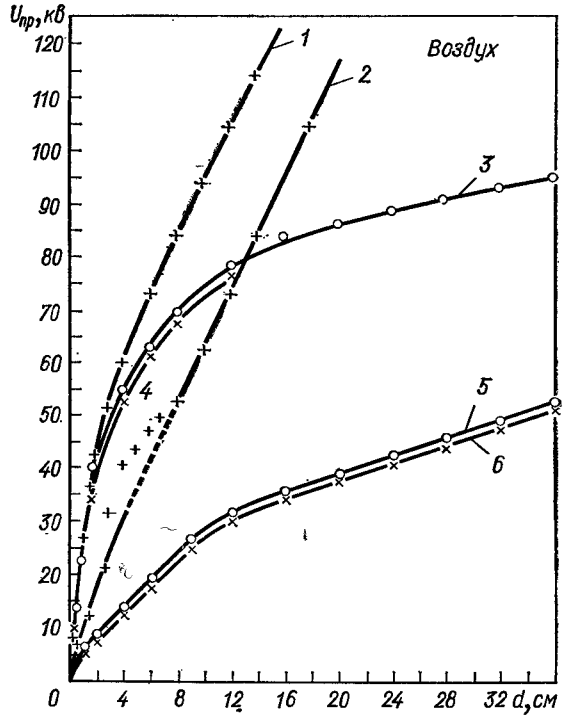


Рис. 23.48. Зависимость пробивного напряжения (воздух, $p = 760$ *мм рт. ст.*) от длины разрядиого промежутка при различных частотах [5]:

1 — плоские электроды, 50 *гц*; *2* — игольчатые электроды, 50 *гц*; *3* — плоские электроды, 0,5 *Мгц*; *4* — плоские электроды, 1 *Мгц*; *5* — игольчатые электроды, 0,5 *Мгц*; *6* — игольчатые электроды, 1 *Мгц*.

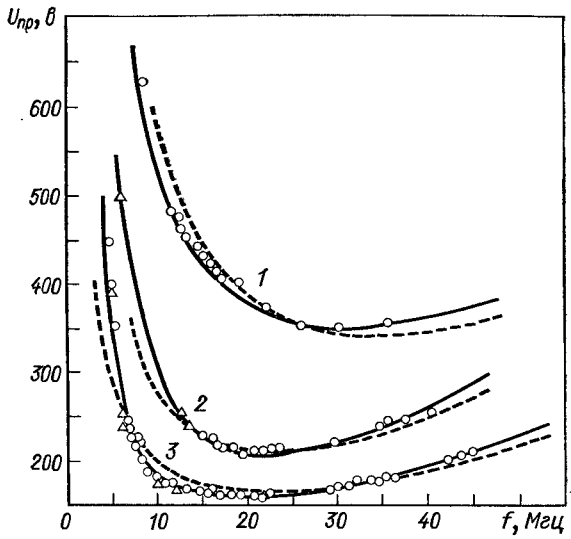


Рис. 23.49. Зависимость пробивного напряжения в аргоне от частоты при различном давлении и длине разрядного промежутка [5]: пунктирные кривые — теория:

1—$p = 49 \cdot 10^{-3}$ *мм рт. ст.*, $d = 10$ *см*; *2* — $p = 30 \cdot 10^{-3}$ *мм рт.ст.*, $d = 10$ *см*; *3*—$p = 30 \cdot 10^{-3}$ *мм рт. ст.*, $d = 5$ *см*.

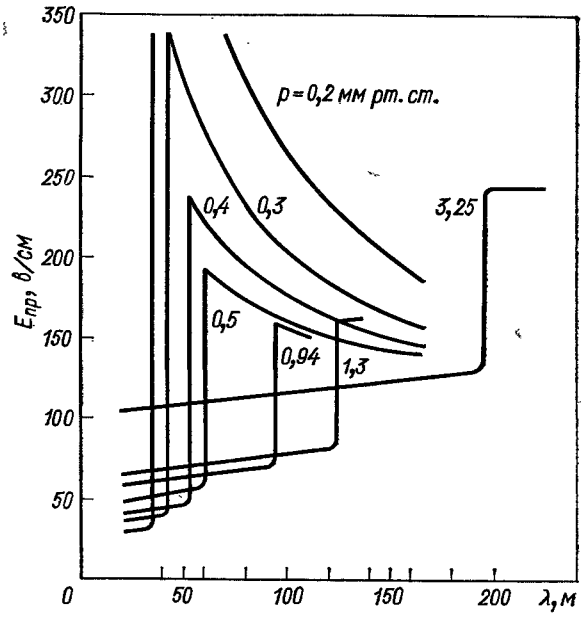


Рис. 23.50. Зависимость пробивной напряженности поля в водороде от длины волны при различных давлениях [5]. Электроды — цилиндрические трубы с плоскими торцами. Зазор — 3,55 *см*.

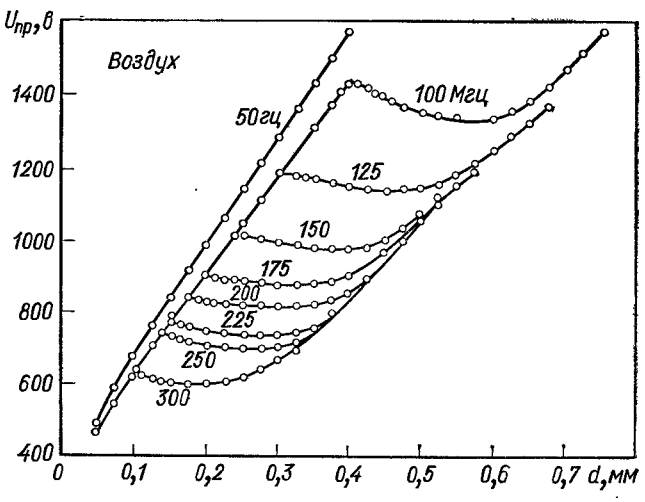


Рис. 23.51. Зависимость пробивного напряжения в воздухе от длины промежутка и частоты. Электроды плоские [5].

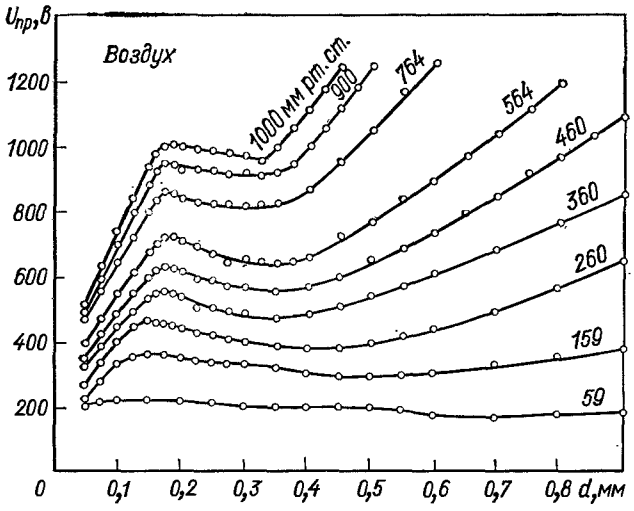


Рис. 23.52. Зависимость пробивного напряжения в воздухе от длины промежутка и давления. Частота 200 *Мгц*, электроды плоские [5].

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Капцов Н. А.** Электрические явления в газах и вакууме. М.—Л., Гостехиздат, 1950.
2. **Энгель А.** Ионизованные газы. М., Физматгиз, 1959.
3. **Сливков И. Н.** и др. Электрический пробой и разряд в вакууме. М., Атомиздат, 1966
4. **Ионные**, плазменные и дуговые ракетные двигатели. Пер. с англ. М., Госатомиздат, 1961.
5. **Мик Дж., Крэгс Дж.** Электрический пробой в газах. Пер. с англ. М., Изд-во иностр. лит., 1960.
6. **Финкельбург В., Меккер Г.** Электрические дуги и термическая плазма. Пер. с англ. М., Изд-во иностр. лит., 1961.
7. **Сапожников В. П., Базь А. И.** Уравнение состояния гексафторида урана при высоких температурах.— В сб.: Труды Всесоюз. науч.-тех. конф. по теплофизическим свойствам веществ при высоких температурах. М., Стандартгиз, 1967.
8. **Браун С.** Элементарные процессы в плазме газового разряда. Пер. с англ. М., Госатомиздат, 1961.

ГЛАВА 24

ЭЛЕКТРОННАЯ ЭМИССИЯ

24.1. ВВЕДЕНИЕ

Электронная эмиссия — испускание электронов телами под влиянием внешних воздействий: нагревания, потока фотонов, электронов, ионов или сильного электрического поля. В зависимости от характера внешнего воздействия различают соответственно термоэлектронную, фотоэлектронную, вторичную электронную, ионно-электронную и автоэлектронную эмиссии. Во всех видах эмиссии, кроме автоэлектронной, роль внешних воздействий сводится к увеличению энергии части электронов или отдельных электронов тела до значения, позволяющего преодолеть потенциальный порог на границе тела, с последующим выходом в вакуум или в другую среду. В случае автоэлектронной эмиссии внешнее электрическое поле превращает потенциальный порог на границе тела в барьер конечной ширины и уменьшает его высоту относительно высоты первоначального порога, вследствие чего становится возможным квантовомеханическое туннелирование электронов сквозь барьер. При этом эмиссия происходит без затраты энергии электрическим полем, чем и обусловлено название этого вида эмиссии.

Тело, испускающее электроны, называется *эмиттером*, или *катодом*.

24.2. РАБОТА ВЫХОДА

Важнейшей эмиссионной характеристикой твердых тел является *работа выхода* $e\varphi$ (e — заряд электрона, φ — потенциал), равная минимальной энергии, необходимой для перемещения электрона с поверхности Ферми в твердом теле в вакуум (в точку пространства, в которой электрическое поле равно нулю) [1, 2]. Если отсчитывать потенциал от уровня, соответствующего покоящемуся электрону в вакууме, то φ — потенциал внутри кристалла, соответствующий уровню Ферми.

Внешнее электрическое поле уменьшает работу выхода (*эффект Шоттки*). Если поверхность эмиттера однородна, то уменьшение работы выхода при наложении электрического поля напряженностью E (*в/см*) равно

$$\Delta(e\varphi) = (e^3E)^{1/2} = 3{,}79 \cdot 10^{-4} E^{1/2} \text{ эв}.$$

Таблица 24.1

Работа выхода для химических элементов-поликристаллов (приведены рекомендуемые значения из работы [2])

Элемент	$e\varphi$, эв	Элемент	$e\varphi$, эв
Li	2,38	Mo	4,3
Be	3,92	Ru	4,60
B	4,5	Rh	4,75
C	4,7	Pd	4,8
Na	2,35	Ag	4,3
Mg	3,64	Cd	4,1
Al	4,25	In	3,8
Si	4,8	Sn	4,38
K	2,22	Sb	4,08
Ca	2,80	Te	4,73
Sc	3,3	Cs	1,81
Ti	3,95	Ba	2,49
V	4,12	La	3,3
Cr	4,58	Ce	2,7
Mn	3,83	Hf	3,53
Fe	4,31	Ta	4,12
Co	4,41	W	4,54
Ni	4,50	Re	5,0
Cu	4,40	Os	4,7
Zn	4,24	Ir	4,7
Ga	3,96	Pt	5,32
Ge	4,76	Au	4,30
As	4,72	Hg	4,52
Se	4,72	Tl	3,7
Rb	2,16	Pb	4,0
Sr	2,35	Bi	4,4
Y	3,3	Th	3,30
Zr	3,9	U	3,3
Nb	3,99		

Таблица 24.2

Работа выхода для химических элементов на полнокристаллических подложках, покрытых оптимальным слоем адсорбата [2]

Адсорбент — адсорбат	$e\varphi$, эв	Адсорбент — адсорбат	$e\varphi$, эв
Be—Cs	1,94	Pt—O	6,55
C—Cs	1,37	Pt—Na	2,10
Ti—Cs	1,32	Pt—K	1,62
Cr—Cs	1,71	Pt—Rb	1,57
Fe—Cs	1,82	Pt—Cs	1,38
Ni—Cs	1,37	Pt—Ba	1,9
Cu—Cs	1,64	Pt—Ba	3,28
Cu—Ba	3,35	Au—O	6,46
Ge—Ba	2,2	Au—O	5,66
Zr—Cs	3,93	Au—Ba	2,3
Mo—Cs	1,54	Au—Ba	3,35
Mo—Th	2,58	W—O—Na	1,72
Ag—Ba	1,56	W—O—K	1,76
Hf—Cs	3,62	Сталь	1,41
Ta—Cs	1,1	1Х1869Т — Cs	
Ta—Cs	1,6	Сталь 304—Cs	1,52
W—Li	2,18	Ag_2O—Cs	0,75
W—O	6,20	NbC—Cs	1,2
W—Ba	1,75	ZrC—Cs	1,60
W—La	2,2	Mo_2C—Cs	1,45
W—Th	2,63	Ta_2C—Cs	1,4
Re—Cs	1,45	$MoSi_2$—Cs	1,75
Re—Ba	2,3	$TaSi_2$—Cs	1,47
Re—Th	2,58	WSi_2—Cs	1,47

Таблица 24.3

Работа выхода соединений на подложках [2]. Слои активированы прогревом

Адсорбент — адсорбат	$e\varphi$, эв	Адсорбент — адсорбат	$e\varphi$, эв
Al—BaO	1,80	Ag—BaO	1,32
Ti—BaO	1,58	Ta—BaO	1,58
Cr—BaO	1,72	W—BaO	1,34
Fe—BaO	1,61	W—ThO_2	2,5
Ni—BaO	1,35	Pt—BaO	1,71
Mo—BaO	1,39	Au—BaO	1,90
Mo—ThO_2	2,9	LaB_6—BaO	2,27—2,07

24.3. ТЕРМОЭЛЕКТРОННАЯ ЭМИССИЯ

Плотность тока насыщения термоэлектронной эмиссии j_s эмиттера с однородной поверхностью при слабом внешнем электрическом поле, не влияющем на работу выхода, определяется уравнением Ричардсона — Дешмана [3]:

$$j_s = AT^2 \exp(-e\varphi_0/kT),$$

где $A \approx A_0(1 - \overline{R}_e)$, $e\varphi_0$ — эффективная работа выхода эмиттера; $\overline{R}_e$ —коэффициент отражения электронов от потенциального барьера, усредненный по энергиям электронов; $A_0 = 4\pi mek^2/h^3 = 120{,}4$ $a/(см^2 \times град^2)$ — универсальная постоянная; k — постоянная Больцмана.

Термоэмиссионный катод (термокатод) — элемент электровакуумного прибора, являющийся источником электронов. Основные типы термоэмиссионных катодов: металлические, оксидный, металлопористый и боридный.

Металлические термокатоды, изготавливаемые из торированного вольфрама и торированного карбидированного вольфрама, в настоящее время находят лишь ограниченное применение.

Оксидный термокатод — смесь окислов металлов, нанесенная на металлический керн. В низкотемпературных катодах, работающих в интервале температур от 900 до 1300° К, используются смеси окислов щелочноземельных металлов — бария, кальция и стронция. Эти окислы 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 используются в электровакуумных приборах. В высокотемпературных оксидных катодах, работающих в интервале температур от 1400 до 1900° К, используются окислы иттрия и тория. Такие термокатоды применяются главным образом в магнетронах.

Металлопористый вольфрамо-бариевый термокатод — пористая вольфрамовая губка, внешняя поверхность которой покрыта пленкой бария, снижающей работу выхода и обеспечивающей получение большого тока термоэмиссии. В процессе работы пленка бария разрушается вследствие испарения, ионной бомбардировки и под воздействием газов, выделяющихся из деталей приборов. Возобновление пленки происходит при поступлении бария из вольфрамовой губки, освобождающегося при разложении содержащегося в ней активного вещества. Существует несколько типов металлопористых вольфрамо-бариевых 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* и *прессованные* (представляют собой пористую губку из тугоплавкого металла — вольфрама, рения или молибдена, — поры которой заполнены активным веществом — алюминатом или вольфраматом бария-кальция. Металлопористые вольфрамо-бариевые термокатоды широко используются в вакуумных СВЧ-приборах); *керамо-металлические*, или *керметкатоды* (представляют собой пористую вольфрамовую губку, заполненную активным веществом, окисью тория или металлическим торием. Катоды этого типа работают при температуре 1650—2000° К и предназначены для использования главным образом в магнетронах).

Боридный термокатод — катод на основе металлоподобных соединений типа MeB_6, где Me — щелочноземельные и редкоземельные металлы или торий. В качестве термокатода наиболее широко применяется гексаборид лантана, реже — гексабориды иттрия и гадолиния и диборид хрома. Термоэмиссионные катоды из гексаборида лантана работают при температуре 1650° К и обеспечивают получение плотности термоэмиссионных токов до 40—50 $a/см^2$ в режиме пространственного заряда, а при большой напряженности электрического поля у поверхности катода — до 200 $a/см^2$. Высокая механическая прочность и устойчивость таких катодов к ионной бомбардировке позволяет использовать их в режиме автоэлектронной эмиссии (при напряженностях внешнего электрического поля $\geqslant 10^6$ $в/см$ значительная часть эмиссионного тока обусловлена туннелированием

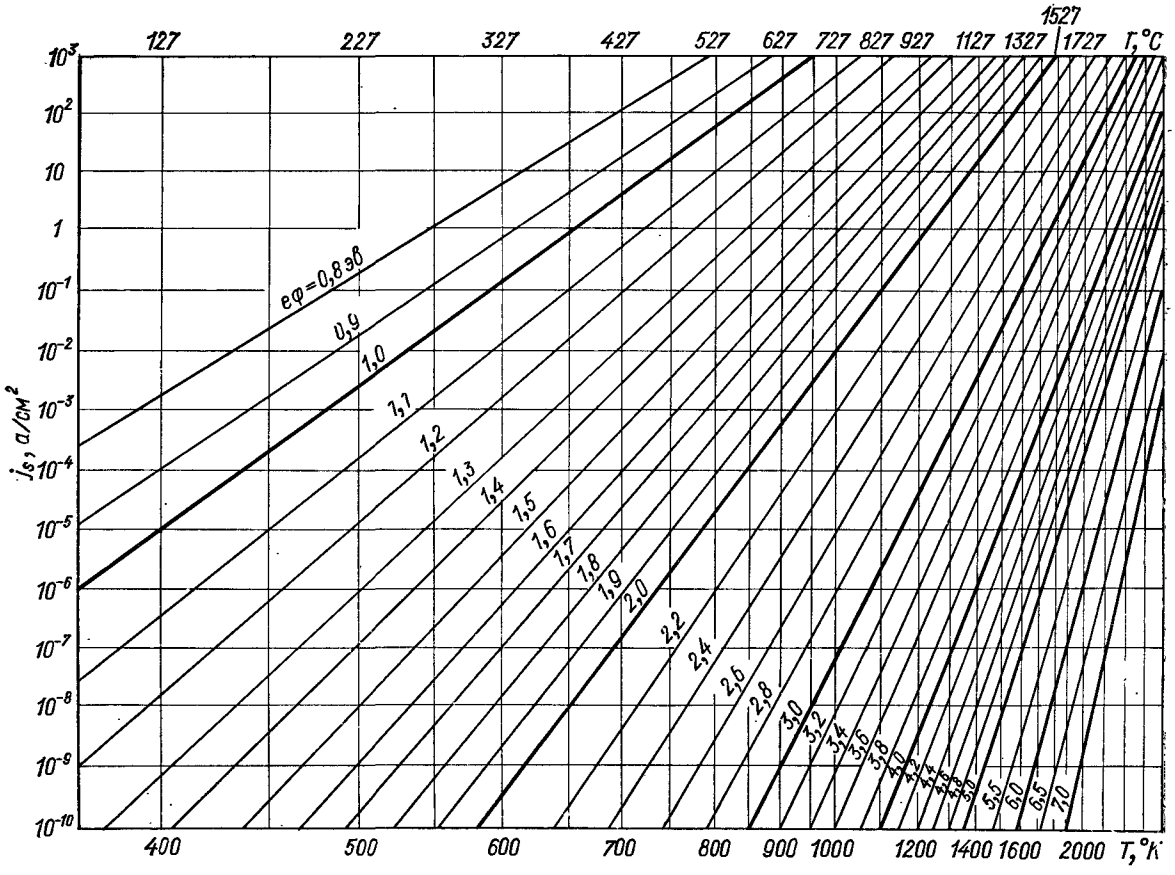


Рис. 24.1. Зависимости тока термоэлектронной эмиссии от температуры и работы выхода катода [10].

электронов сквозь барьер). В этом режиме катод из гексаборида лантана при температуре 1400—1500° К может давать плотность термоэмиссионного тока до 1000 *а/см*². 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 вплоть до давлений $\sim 10^{-4}$ *мм рт. ст.* Эти катоды используются в ускорителях и в различных вакуумных устройствах.

Основные характеристики термоэмиссионных катодов: работа выхода $e\varphi$, рабочая температура T; плотность термоэмиссионного тока j_s и ее зависимость от температуры; скорость испарения активного вещества при рабочей температуре $v_{исп}$; эффективность катода η — отношение плотности термоэмиссионного тока к мощности, затрачиваемой на нагревание катода, критерий качества катода — отношение работы выхода к теплоте испарения или отношение плотности термоэмиссионного тока к скорости испарения активного вещества при данной температуре.

Свойства термокатодов

В табл. 24.4—24.6, 24.10 используются обозначения: d — толщина слоя, испаряющегося за 1 *ч*, $d_{кр}$ — критическая толщина слоя [10], $v_{исп}$ — скорость испарения катода.

Таблица 24.4

Термоэмисснонные свойства вольфрамового термокатода [10]
Чистый вольфрам; $\rho=19{,}3$ *г/см*^{3}; работа выхода $e\varphi=4{,}54$ *эв*

T, °К	I_S, *а/см*^{2}	$v_{исп}$, *г/(см*$^2\cdot$*сек)*	$I_S/v_{исп}$, *к/г*	d, *мм*	Срок службы, *ч*		
					∅=0,1 *мм*; $d_{кр}\sim3$ *мкм*	∅=1 *мм*; $d_{кр}\sim39$ *мкм*	Массивный катод $d_{кр}\sim150$ *мкм*
2100	$3{,}9\cdot10^{-3}$	$2{,}0\cdot10^{-13}$	$2{,}0\cdot10^{10}$	$3{,}7\cdot10^{-10}$	$8\cdot10^6$	$8\cdot10^7$	$4\cdot10^8$
2200	$1{,}3\cdot10^{-2}$	$2{,}1\cdot10^{-12}$	$6{,}2\cdot10^9$	$3{,}9\cdot10^{-9}$	$8\cdot10^5$	$8\cdot10^6$	$4\cdot10^7$
2300	$4{,}1\cdot10^{-2}$	$1{,}8\cdot10^{-11}$	$2{,}3\cdot10^9$	$3{,}3\cdot10^{-8}$	$9\cdot10^4$	$9\cdot10^5$	$5\cdot10^6$
2400	$1{,}2\cdot10^{-1}$	$1{,}2\cdot10^{-10}$	$9{,}3\cdot10^8$	$2{,}4\cdot10^{-7}$	$1\cdot10^4$	$1\cdot10^5$	$5\cdot10^5$
2500	$3{,}0\cdot10^{-1}$	$7{,}6\cdot10^{-10}$	$4{,}0\cdot10^8$	$1{,}4\cdot10^{-8}$	2150	$2\cdot10^4$	$1\cdot10^5$
2600	$7{,}0\cdot10^{-1}$	$3{,}9\cdot10^{-9}$	$1{,}8\cdot10^8$	$7{,}3\cdot10^{-6}$	410	4100	$2\cdot10^4$
2700	1,6	$1{,}8\cdot10^{-8}$	$9{,}0\cdot10^7$	$3{,}3\cdot10^{-5}$	90	900	4500
2800	3,5	$7{,}4\cdot10^{-8}$	$4{,}7\cdot10^7$	$1{,}4\cdot10^{-4}$	21	210	1080
2900	7,3	$2{,}8\cdot10^{-7}$	$2{,}6\cdot10^7$	$5{,}2\cdot10^{-4}$	5,8	58	290
3000	14,0	$9{,}5\cdot10^{-7}$	$1{,}7\cdot10^7$	$1{,}8\cdot10^{-3}$	1,7	17	84

Оксидный термокатод

Таблица 24.5

Термоэмиссионные свойства BaO—SrO-оксидного термокатода [10]
Средняя плотность $\rho=5{,}5$ *г/см*^{3}; работа выхода $e\varphi=1{,}6$ *эв*; толщина активного слоя 20 *мкм* (10 *мг/см*^{2}); керн никелевый; $d_{кр}=6$ *мкм*

T, °К	I_S, *а/см*^{2}	$v^*_{исп}$, *г/(см*$^2\cdot$*сек)*	$I_S/v^*_{исп}$, *к/г*	d^*, *мм*	Срок службы*, *ч*
500	10^{-5}	—	—	—	—
600	$4\cdot10^{-4}$	—	—	—	—
700	$7\cdot10^{-3}$	—	—	—	—
800	$4\cdot10^{-2}$	—	—	—	—
900	0,4	—	—	—	—
1000	3,0	$5\cdot10^{-11}$	$6\cdot10^{10}$	$3{,}2\cdot10^{-7}$	$5000(2\cdot10^1)$
1100	12	$2\cdot10^{-9}$	$6\cdot10^9$	$1{,}3\cdot10^{-5}$	115 (460)
1200	50	$8\cdot10^{-8}$	$6\cdot10^8$	$5{,}2\cdot10^{-4}$	3 (11)
1300	200	$1\cdot10^{-6}$	$2\cdot10^8$	$6{,}5\cdot10^{-3}$	0,23 (0,92)

* Значения для BaO. Для BaO—SrO-термокатодов скорость испарения несколько меньше.

Таблица 24.6

Термоэмнссионные свойства металлопорнстого вольфрамо-бариевого термокатода (*L*-катод) [10]
Работа выхода $e\varphi=1{,}8\div2{,}0$ *эв*; количество BaO 30 *мг/см*^{2}

T, °К	I_S, *а/см*^{2}	$v_{исп}$, *г/(см*$^2\cdot$*сек)*	$I_S/v_{исп}$, *к/г*	d, *мм*	Срок службы*, *ч*
800	$1\cdot10^{-5}$	—	—	—	—
900	$3\cdot10^{-4}$	—	—	—	—
1000	$5\cdot10^{-3}$	—	—	—	—
1100	$6\cdot10^{-2}$	—	—	—	—
1200	0,4	—	—	—	—
1300	2	$1{,}7\cdot10^{-10}$	$1{,}2\cdot10^{10}$	$6\cdot10^{-4}$	$5\cdot10^4$
1400	10	$2\cdot10^{-9}$	$5\cdot10^9$	$7\cdot10^{-3}$	4300
1500	30	$1{,}7\cdot10^{-8}$	$1{,}8\cdot10^9$	$6\cdot10^{-2}$	500
1600	90	$1\cdot10^{-7}$	$9\cdot10^8$	0,4	75
1700	300	$5{,}5\cdot10^{-7}$	$5{,}5\cdot10^8$	2	15

* Срок службы определяется запасом активного вещества; данные приведены для стандартного катода [10].

Таблица 24.7

Термоэмиссионные характеристики и срок службы прессованных металлопористых оксидно-никелевых катодов [3]

T, °К	i_s, $a/см^2$	Срок службы, $ч$	Режим отбора тока
1200	0,5	5000	Стационарный
1220	0,5	5000	»
1270	1	5000	»
1340	3	3000	»
1250	10	600	Импульсный

Таблица 24.8

Термоэмиссионные свойства керамо-металлических термокатодов различного состава [3]

Катод (состав, %)	T, °С	i_s, $a/см^2$	
		Импульсный режим	Стационарный режим
ThH_2+W_2C+W (0,5+10+89,5)	1700	—	—
$W+ThO_2$ (96+4)	1500	0,8	—
	1600	2,0	—
$W+ThO_2+B$ (95+4+1)	1370	—	0,4
$W+ThO_2+B$ (97,5+2+0,5)	1370	—	0,4
$W+La_2O_3$ (70+30)	1300	—	1,4
$W+Nd_2O_3$ (70+30)	1300	—	0,5
$W+Gd_2O_3$ (70+30)	1400	—	0,4
$W+\left[\frac{3}{4}\ Gd_2O_3+\frac{1}{4}\ La_2O_3\right]$ (70+30)	1400	—	0,86
W+Th (пропитанный)	1600	—	2—3

Таблица 24.9

Термоэмиссионные константы боридов [3]

$$\varphi_T=\varphi_0+\frac{\partial\varphi}{\partial T}\,T$$

Соединение	φ_0, $эв$	$\partial\varphi/\partial T$, 10^{-4} $эв/град$	Коэффициент вторичной эмиссии σ	Соединение	φ_0, $эв$	$\partial\varphi/\partial T$, 10^{-4} $эв/град$	Коэффициент вторичной эмиссии σ
ScB_6	2,96	2,3	0,58	NdB_6	3,97	1,6	0,8
TiB_2	3,88	—	0,82	EuB_6	4,9	—	—
VB_2	3,95	—	0,8	GdB_6	2,05	4,0	0,8
CrB_2	3,36	—	0,77	TbB_6	3,26	—	—
MnB_2	4,14	—	—	DyB_6	3,53	1,5	0,8
SrB_6	2,67	2,5	—	HoB_6	3,42	1,6	0,7
YB_6	2,22	2,18	1,0	ErB_6	3,37	2,3	—
ZrB_2	3,67	2,0	0,85	TmB_6+TmB_4	3,38	—	—
BaB_6	3,45	7,5	—				
LaB_6	2,68	1,4	0,95	YbB_6	3,13	3,0	—
CeB_6	2,59	2,3	0,68	LuB_6	3,0	1,6	0,8
PrB_6	3,46	2,5	0,8	ThB_6	2,92	2,0	—

Таблица 24.10

Термоэмиссионные свойства гексаборида лантана LaB_6 [10]. Плотность $\rho=2{,}61$ $г/см^3$; работа выхода $e\varphi=2{,}68$ $эв$

T, °К	j_s, $a/см^2$	$v_{исп}$, $г/(см^2\cdot сек)$	$j_s/v_{исп}$, $к/г$	d, $мм$	Срок службы катода с косвенным подогревом, $ч$	
					Точечный монокристаллический, $d_{кр}\sim 3мкм$	Массивный, $d_{кр}\sim 100мкм$
1600	0,4	$1\cdot10^{-11}$	$4{,}0\cdot10^{10}$	$1{,}4\cdot10^{-7}$	$2\cdot10^4$	$7\cdot10^5$
1700	1,0	$1\cdot10^{-10}$	$1{,}0\cdot10^{10}$	$1{,}4\cdot10^{-6}$	2150	$7\cdot10^4$
1800	3,0	$1\cdot10^{-9}$	$3{,}0\cdot10^{9}$	$1{,}4\cdot10^{-5}$	215	$7\cdot10^3$
1900	8,5	$9\cdot10^{-9}$	$9{,}5\cdot10^{8}$	$1{,}2\cdot10^{-4}$	25	800
2000	25	$7\cdot10^{-8}$	$3{,}6\cdot10^{8}$	$1{,}0\cdot10^{-3}$	3	100
2100	100	$6\cdot10^{-7}$	$1{,}7\cdot10^{8}$	$8{,}3\cdot10^{-3}$	0,35	12
2200	400	$4\cdot10^{-6}$	$1{,}0\cdot10^{8}$	$5{,}55\cdot10^{-2}$	0,05	1,8

Сравнительные характеристики различных термокатодов

Таблица 24.11

Работа выхода $e\varphi$, теплота испарения q и критерий качества $e\varphi/q$ современных термокатодов [3]

Тип катода	$e\varphi$, $эв$	q, $эв$	$e\varphi/q$	Рабочая температура (°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*
Ториевооксидный . .	3,2	7,6	0,42	1770	1870
Боридный	2,8	6,8	0,41	1720	1870
Вольфрамо-бариевый	2,1	4,7	0,45	1300	1420
Оксидный	1,6	4,0	0,4	1030	1100

* Значения ориентировочные, так как долговечность катодов прямого накала зависит также от диаметра катода.

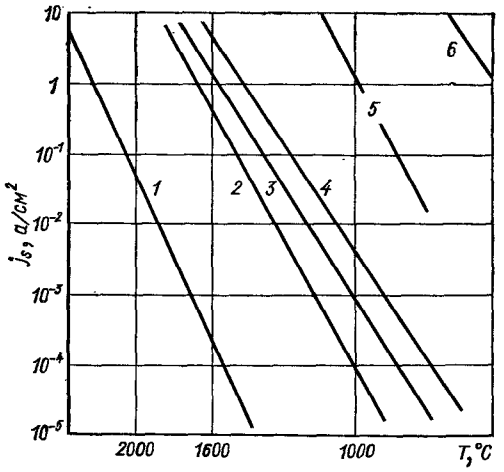


Рис 24.2. Зависимость тока термоэлектронной эмиссии от температуры для различных катодов [3]:

1 — вольфрам; *2* — торированный вольфрам; *3* — окись тория; *4* — гексаборид лантана; *5* — *L*-катод; *6* — оксидный.

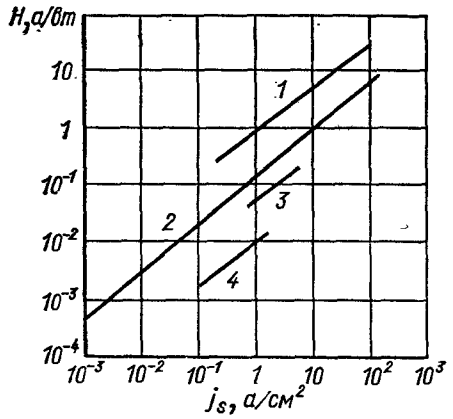


Рис. 24.3. Зависимость эффективности (расчетной) от плотности тока эмиссии для катодов различных типов [3]:

1 — оксидный; *2* — *L*-катод; *3* — оксидно-ториевый; *4* — вольфрамовый.

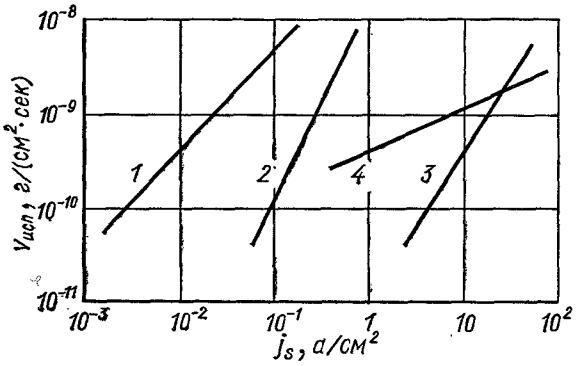


Рис. 24.4. Зависимость скорости испарения от плотности тока эмиссии для различных материалов [3]:

1 — вольфрам; *2* — торированный вольфрам; *3* — импрегнированный катод; *4* — гексаборид лантана.

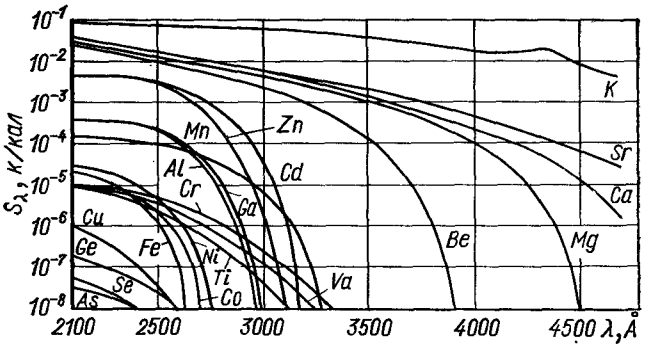


Рис. 24.5. Спектральная чувствительность металлов в ультрафиолетовом диапазоне [5]. Плохообезгаженные поверхности.

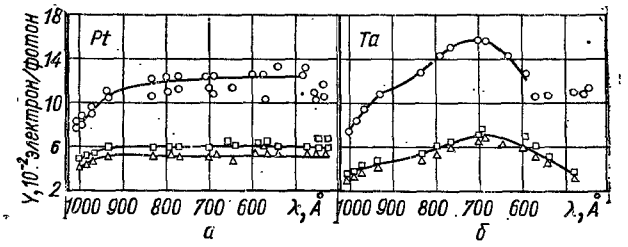


Рис. 24.6. Спектральные характеристики платины (*а*) и тантала (*б*) в вакуумном ультрафиолетовом диапазоне [14]:

○, △ — необезгаженные и обезгаженные металлы, □ — после пребывания на воздухе в течение 17 ч.

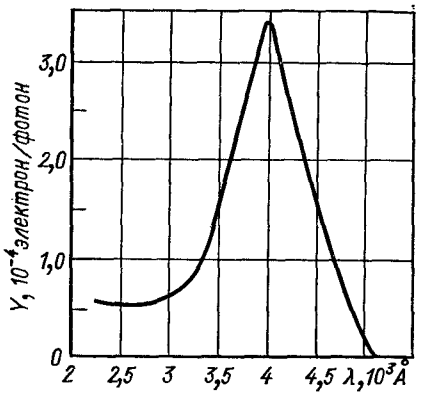


Рис. 24.7. Спектральная характеристика квантового выхода фотоэмиссии калия [6].

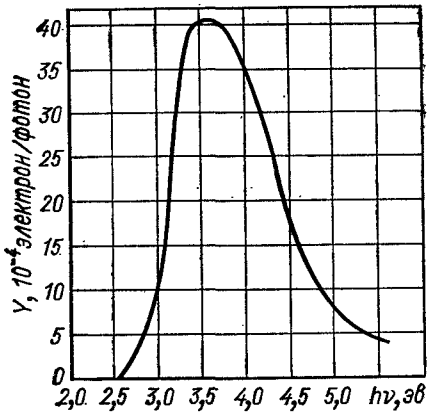


Рис. 24.8. Спектральная характеристика квантового выхода фотоэмиссии натрия [6].

24.4. ФОТОЭЛЕКТРОННАЯ ЭМИССИЯ

Основные законы фотоэлектронной эмиссии (ФЭ) [1, 4—6]. 1. Величина фототока насыщения пропорциональна потоку фотонов, падающих на поверхность тела:

$$I = eYF/h\nu,$$

где F — интенсивность излучения в энергетических единицах, Y — квантовый выход (*электрон/фотон*) — число эмиттированных электронов на каждый фотон, падающий на поверхность фотоэмиттера.

2. Для каждого вещества при $T = 0$ существует минимальная (пороговая) частота излучения ν_0, способного вызвать ФЭ; $\lambda_0 = c/\nu_0$ — «красная граница» ФЭ; $h\nu_0$ — пороговая энергия, или фотоэлектрическая работа выхода.

3. Максимальная кинетическая энергия фотоэлектронов не зависит от интенсивности излучения и линейно связана с его частотой: $(mv^2/2)_{макс} = h(\nu - \nu_0)$. Пороговая частота ФЭ ν_0 строго определена только при $T = 0$. При $T > 0$ ФЭ наблюдается вблизи порога и при частотах $\nu < \nu_0$. ФЭ из металлических фотокатодов при частотах излучения, не очень далеких от пороговой частоты ($\nu \ll 1{,}5\,\nu_0$), хорошо описывается феноменологической теорией Фаулера [1], согласно которой

$$I = \alpha A_0 T^2 \exp\left(-\frac{h\nu_0 - h\nu}{kT}\right), \quad \nu < \nu_0;$$

$$I = \alpha \frac{A_0}{2}\left[\frac{h^2}{k^2}(\nu - \nu_0)^2 + \frac{\pi^2}{3}T^2\right], \quad \nu > \nu_0,$$

где α — отношение плотности возбужденных светом электронов вблизи поверхности эмиттера к плотности нормального электронного газа в эмиттере ($\alpha \sim F/h\nu$), $A_0 = 4\pi emk^2/h^3$ — постоянная Ричардсона. Пороговая энергия ФЭ $h\nu_0$ в металлах совпадает с термоэлектронной работой выхода $e\varphi$. В полупроводниках спектральная зависимость квантового выхода ФЭ вблизи порога ФЭ имеет вид:

$$Y \sim (h\nu - h\nu_0)^m,$$

где $m = 5/2$ для непрямых оптических переходов, $m = 1$ или $m = 2$ для прямых оптических переходов и выхода электронов из полупроводника соответственно без рассеяния и при упругом рассеянии. ФЭ из полупроводника может быть обусловлена оптическим возбуждением электронов из зоны проводимости (в вырожденных полупроводниках n-типа), с уровней примесей или дефектов или из валентной зоны. Для каждого из этих случаев $h\nu_0$ имеет свое значение. Обычно, если иное не оговорено, под фотоэлектрической работой выхода понимают минимальную энергию фотонов, при которой начинается ФЭ из валентной зоны полупроводника. Это значение может совпадать с термоэлектронной работой выхода $e\varphi$ полупроводника или быть больше нее. Специальной обработкой поверхности цезием и кислородом у некоторых полупроводников p-типа (Si, GaAs, твердые растворы GaAs — GaSb, GaAs — InAs, InAs—InP) удается снизить сродство к электрону, (т. е. разность энергий покоящегося электрона в вакууме и на дне зоны проводимости в полупроводнике) до нуля или даже сделать его отрицательным. При этом фотоэлектрическая работа выхода становится равной ширине запрещенной зоны полупроводника, а квантовый выход ФЭ резко возрастает, так как выходить из полупроводника в вакуум могут электроны, переведенные излучением из валентной зоны в зону проводимости и имеющие в ней практически нулевую энергию.

Основные типы фотоэмиссионных катодов. Металлические фотокатоды (используются для регистрации коротковолнового ультрафиолетового излучения с длинами волн $\lambda < 2000$ Å); *сурьмяно-щелочные* SbCs$_3$, SbBi, SbKNaCs (используются для регистрации ближнего ультрафиолетового, видимого и ближнего инфракрасного излучений 2000 Å $< \lambda <$ 9000 Å); *кислородно-серебряно-цезиевый* фотокатод (используется для регистрации длинноволновой части видимого и инфракрасного излучений с длинами волн до $\lambda \simeq 1{,}4$ *мкм*); *фотокатоды с отрицательным сродством* к электрону на основе монокристаллических кремния или полупроводников типа $A^{III}B^{V}$ и их твердых растворов или тонких пленок этих материалов со сниженной работой выхода (используются главным образом для регистрации ближнего инфракрасного излучения).

Осиовные характернстнки фотокатодов. *Квантовый выход* $Y\left(\frac{\text{электрон}}{\text{фотон}}\right) = \frac{I/e}{F_\nu / h\nu}$ — число вышедших в вакуум фотоэлектронов, приходящихся на каждый падающий на поверхность фотокатода фотон

Спектральная чувствительность $S_\lambda\left(\frac{a}{вт}\right) = \frac{\lambda\ (см)}{1{,}236 \cdot 10^{-4}} Y$ — фототок насыщения на единицу мощности падающего на фотокатод монохроматического излучения.

Спектральная характеристика — зависимость S_λ или Y от частоты или длины волны излучения.

Интегральная чувствительность S — отношение фототока насыщения к интенсивности потока излучения стандартного источника света, за который обычно принимают вольфрамовую лампу накаливания с температурой нити 2850° К:

$$S = \frac{\int_0 S_\lambda F_\lambda\, d\lambda}{F_\lambda\, d\lambda}\ a/вт,$$

или

$$S = \frac{\int_0^\infty S_\lambda F_\lambda d\lambda}{683 \int_0^\infty F_\lambda K_\lambda d\lambda} \; a/лм,$$

где K_λ — относительная спектральная чувствительность «нормального» человеческого глаза $K_{\lambda_{макс}} = K_{\lambda=0,555\ мкм} = 683\ лм/вт$.

Плотность темнового тока $j_т$ — плотность тока термоэмиссии необлучаемого фотокатода при рабочей температуре. Темновой ток является основным источником шума в фотоэлектронных приборах при регистрации слабых потоков излучения. Среднеквадратический ток шума в отсутствие излучения дается формулой Найквиста:

$$\left(\overline{i^2_ш}\right)^{1/2} = (4kTj_тs\Delta f)^{1/2},$$

где s — площадь фотокатода, Δf — ширина полосы частот регистрирующего устройства.

Таблица 24.12

Длина волны фотоэлектрического порога чистых металлов [5]

Металл	λ_0, Å	Металл	λ_0, Å	Металл	λ_0, Å
Церий	4800	Титан	3150	Хром	2840
Кальций	3850	Тантал	3080	Вольфрам	2700
Торий	3650	Кадмий	2920		
Уран	3400	Висмут	2870	Железо	2680
Магний	3350	Молибден	2850	Никель	2550
Цирконий	3300			Платина	2000

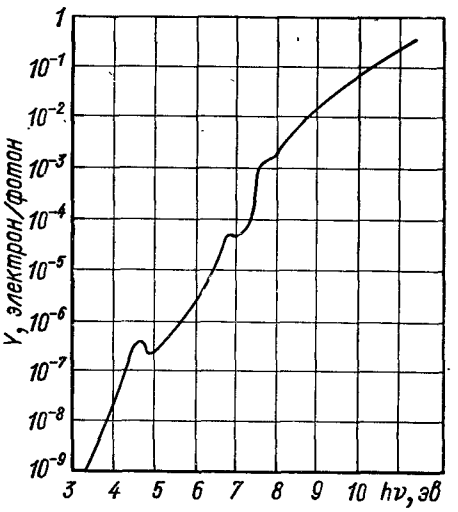


Рис. 24.9. Спектральная характеристика квантового выхода фотоэмиссии MgO [6].

Таблица 24.13

Ширина запрещенной зоны E_g, сродство к электрону χ и порог фотоэмиссии $h\nu_0$ различных полупроводниковых материалов [6]

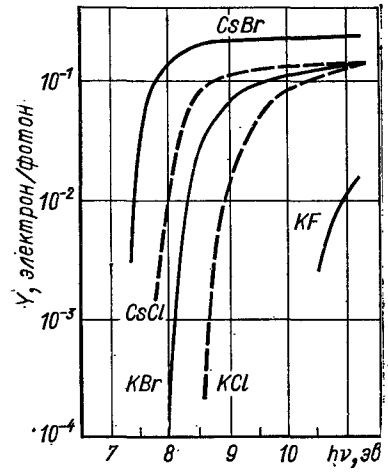
Материал	Химическая формула	E_g, эв	χ, эв	$h\nu_0$, эв
Бария окись	BaO	3,7	1,3	5
Барня титанат	$BaTiO_3$	2,7	2,6	5,3
Висмута теллурид	Bi_2Te_3	0,1	5,2	5,3
Галлия антимонид	GaSb	0,7	4,1	4,8
Галлия арсенид	GaAs	1,4	4,1	5,5
Германий	Ge	0,7	4,2	4,9
Индия антимонид	InSb	0,2	4,6	4,8
Индия арсенид	InAs	0,4	4,9	5,3
Индия фосфид	InP	1,3	4,4	5,7
Кадмия селенид	CdSe	3	4	7
Кадмия сульфид	CdS	2,4	3,8—4,8	6,2—7,2
Кадмия теллурид	CdTe	1,5	4,4	5,9
Калия иодид	KI	6,2	1,1	7,3
Кремний	Si	1,1	4	5,1
Кремния карбид (кубич.)	SiC	2,2	4,8	7
(гекс.)	SiC	2,9	4,1	7
Лития иодид	LiI	5,9	1,4	7,3
Лития фторид	LiF	12	1	13
Магния антимонид	Mg_3Sb_2	0,8	3,0	3,8
Магния окись	MgO	8,7	1	<10
Меди иодид	CuI	3	3	6
Натрия иодид	NaI	5,8	1,5	7,3
Ртути селенид	HgSe	0,7	4,4	5,1
Ртути теллурид	HgTe	0,5	4	4,5
Рубидия иодид	RbI	6,1	1,2	7,3
Рубидия теллурид	Rb_2Te	3,3	<0,5	3,7
Свинца сульфид	PbS	0,4	<4,2	<4,6
Свинца теллурид	PbTe	0,3	4,7	5
Селен	Se	2,3	3,7	6
Серебра бромид	AgBr	2,5	3,5	6
Серебра хлорид	AgCl	3	3	6
Теллур	Te	0,3	4,6	4,9
Цезия аурит	CsAu	2,6	1,4	4
Цезия иодид	CsI	>6	<0,5	6,4
Цезия теллурид	Cs_2Te	3,3	<0,5	3,5

Свойства фотокатодов

Таблица 24.14

Ширина запрещенной зоны E_g и сродство к электроиу χ для щелочных галогенидов

Соединение	E_g, эв	χ, эв	Соединение	E_g, эв	χ, эв
CsI	6,3	0,1	NaI	5,8	1,5
KI	6,2	1,1	RbI	6,1	1,2
LiI	5,9	1,4			



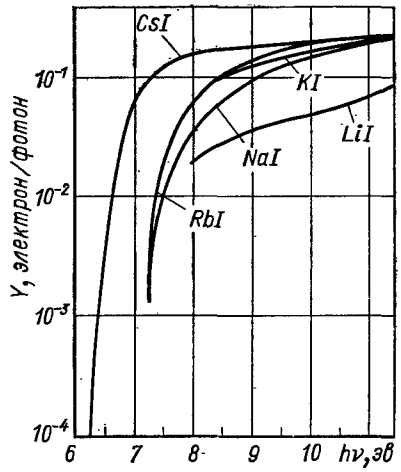
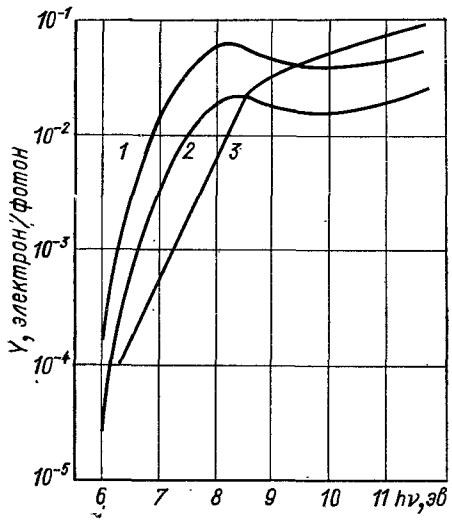


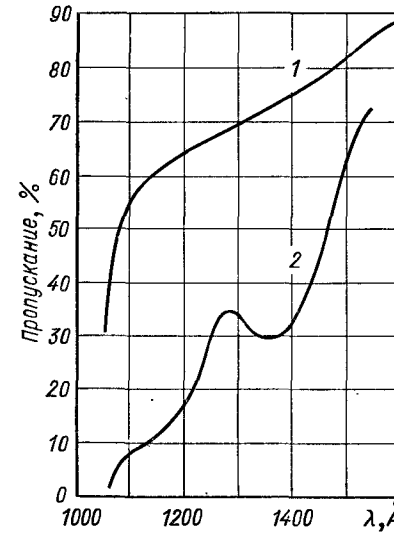
Рис. 24.10. Спектральные характеристики квантового выхода фотоэмиссии щелочных галогенидов [6].



←

Рис. 24.11. Спектральные характеристики квантового выхода фотоэмиссии галогенидов серебра [6]:

1 — монокристаллический AgBr; *2* — плавленый AgBr; *3* — AgCl.



→

Рис. 24.12. Пропускание сколотых кристаллов LiF до (*1*) и после (*2*) экспозиции на воздухе [6].

Таблица 24.15

Основные свойства фотокатодов на основе щелочных антимонидов [6]

Обозначения: $Y_{макс}$ — максимальный квантовый выход; $S_{макс}$ — максимальная чувствительность; λ — длина волны, соответствующая чувствительности в 1 % $Y_{макс}$; χ — сродство к электрону; n — электронная, p — дырочная проводимости; j_s — плотность термоэмиссионного тока при комнатной температуре

Фотокатод	Тип кристаллической решетки	$Y_{макс}$, $\frac{электрон}{фотон}$	λ_0, Å	$S_{макс}$, $\frac{мка}{лм}$	E_g, эв	χ, эв	Тип проводимости	j_s, а/см²
K_3Sb	куб.	0,07	5500	12	1,4	0,9	p	—
K_3Sb	гекс.	0,07	4600	2	1,1	1,6	n	—
K_2CsSb	куб.	0,30	6600	100	1,0	1,1	p	10^{-17}
$K_2CsSb(O)$	»	0,35	7800	130	1,0	1,1	p	10^{-16}
Na_3Sb	гекс.	0,02	3300	?	1,1	2,44	n	—
Na_2KSb	куб.	0,30	6000	60	1,0	1,0	p	10^{-16}
Rb_3Sb	»	0,10	5800	25	1,0	1,2	p	—
Cs_3Sb	»	0,15	5800	25	1,6	0,45	p	10^{-16}
Cs_3Sb на MgO	»	0,20	6500	80	1,6	0,45	p	10^{-15}
$(Cs)Na_2KSb$	»	0,30	8700	300	1,0	0,55	p	10^{-15}

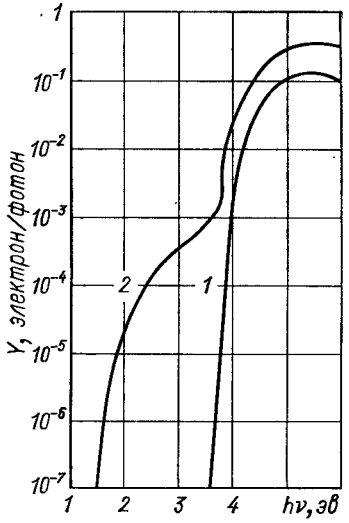


Рис. 24.13. Спектральная характеристика квантового выхода фотоэмиссии Cs_2Te-фотокатода [6]:
1 — без избытка Cs; *2* — с избытком Cs.

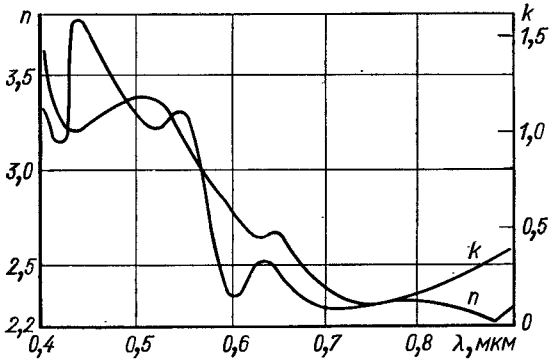


Рис. 24.14. Спектральная зависимость показателей преломления (n) и поглощения (k) Cs_3Sb [4].

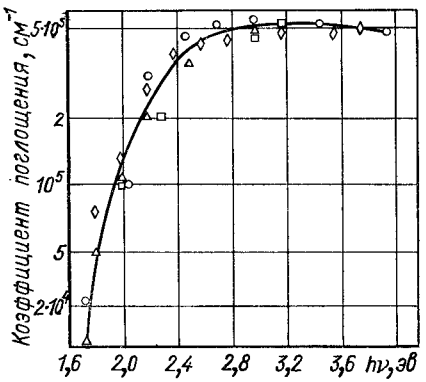


Рис. 24.15. Спектральная характеристика коэффициента поглощения Cs_3Sb [6]. Точки — данные различных авторов.

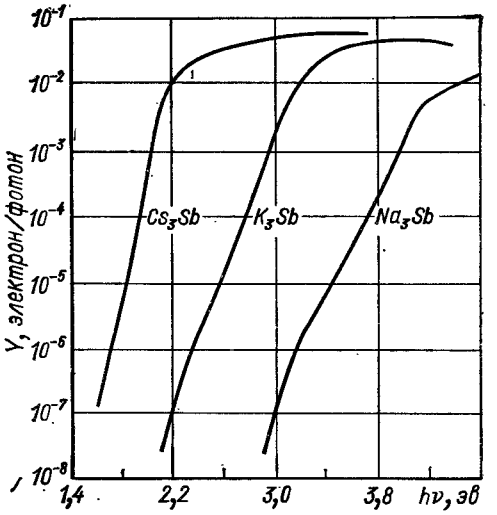


Рис. 24.16. Спектральные характеристики квантового выхода фотоэмиссии сурьмяно-щелочных фотокатодов [6].

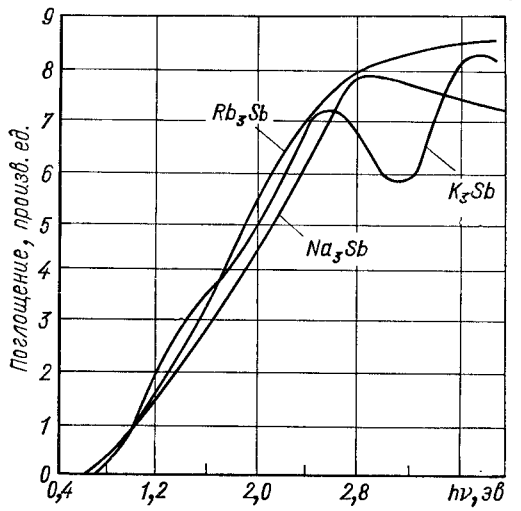
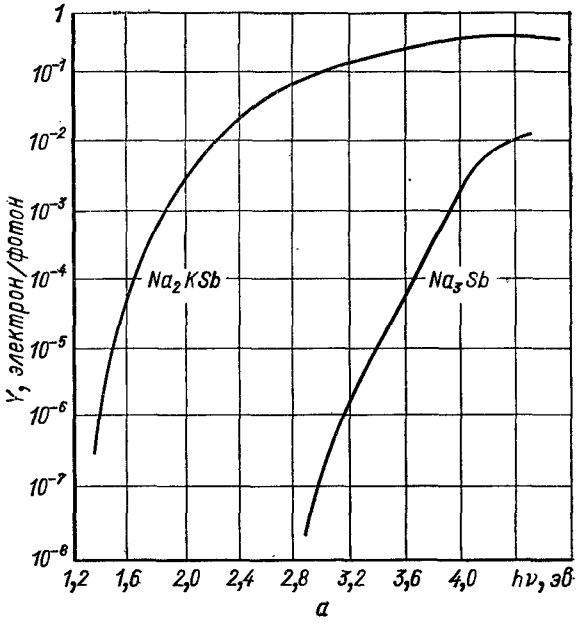
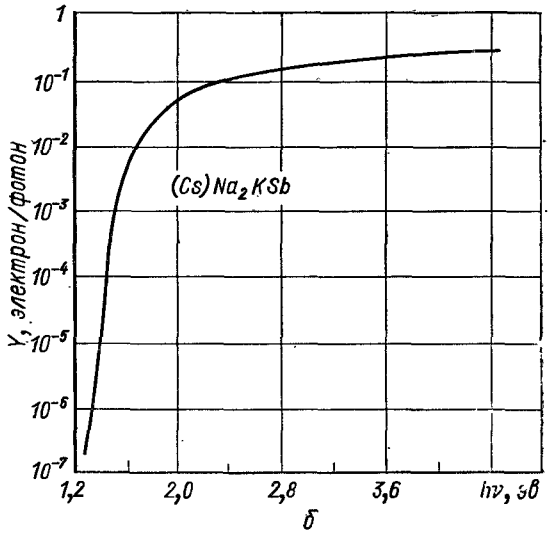
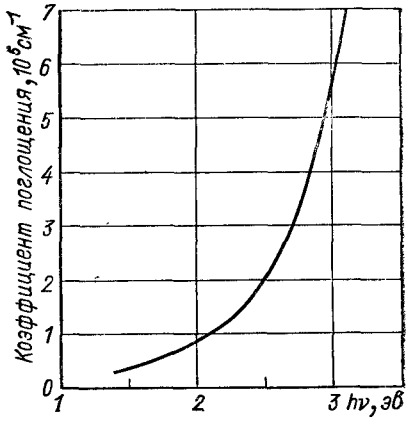


Рис. 24.17. Спектральные зависимости оптического поглощения Na_3Sb, K_3Sb (гекс.) и Rb_3Sb [6].







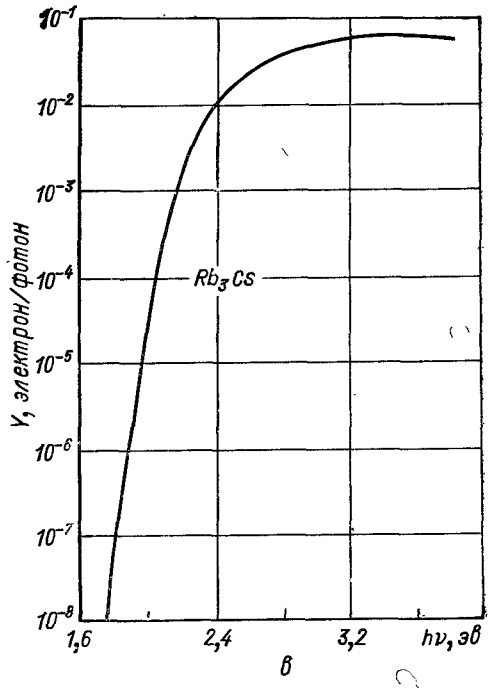


Рис. 24.18. Спектральные характеристики квантового выхода фотоэмиссии сурьмяно-щелочных фотокатодов [6]:
а — Na_2KSb и Na_3Sb; *б* — (Cs)Na_2KSb; *в* — Rb_3Cs.

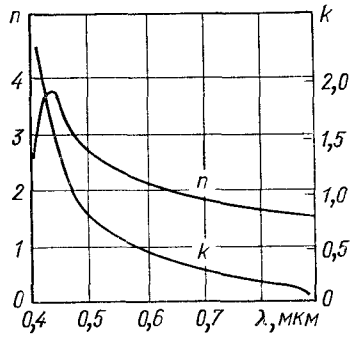


Рис. 24.20. Спектральные зависимости показателей преломления (n) и поглощения (k) (Cs)Na_2KSb-фотокатода [4].

Рис. 24.19. Спектральная зависимость коэффициента оптического поглощения (Cs)Na_2KSb [6].

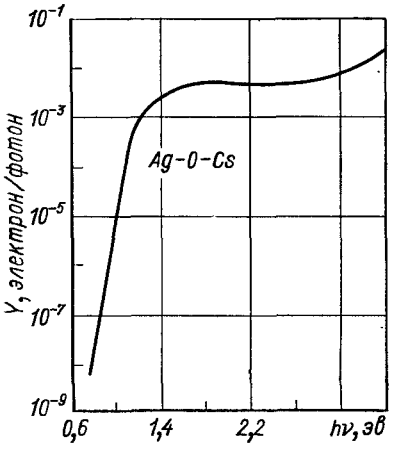
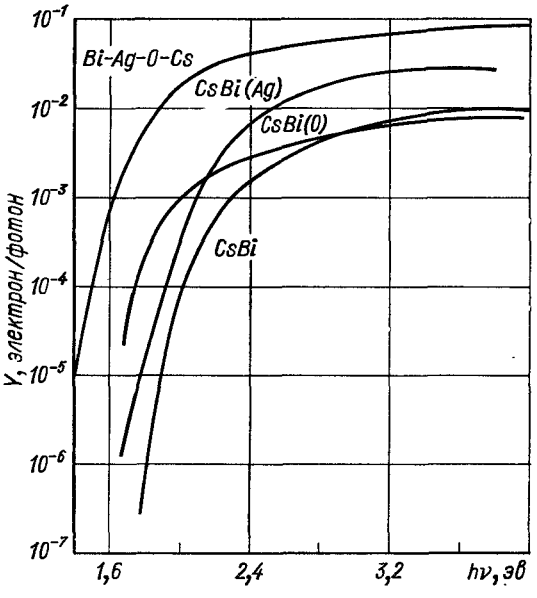


Рис. 24.21. Спектральные характеристики квантового выхода фотоэмиссии Ag-O-Cs- и висмуто-цезиевых фотокатодов [6].



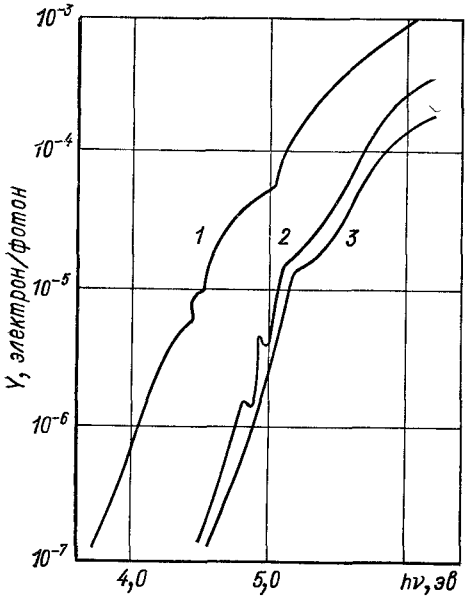


Рис. 24.22. Спектральные характеристики квантового выхода фотоэмиссии ZnS для образцов с различной обработкой [6]:

1 — сколотый и отожженный либо подвергнутый ионной бомбардировке и отожженный; *2* — необработанный; *3* — свежесколотый.

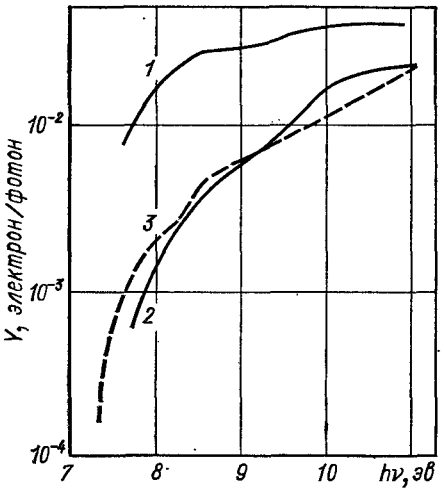


Рис. 24.23. Спектральные характеристики квантового выхода фотоэмиссии SiC *n*- и *p*-типа [6]:

1 — *p*-SiC (гекс.); *2* — *n*-SiC (гекс.); *3* — SiC (куб.).

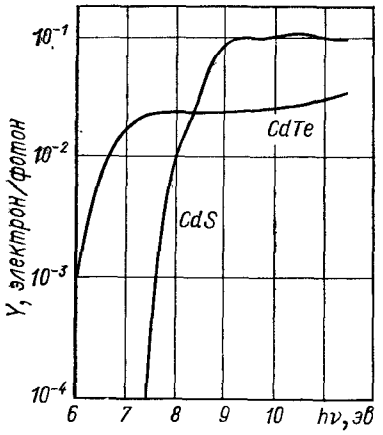
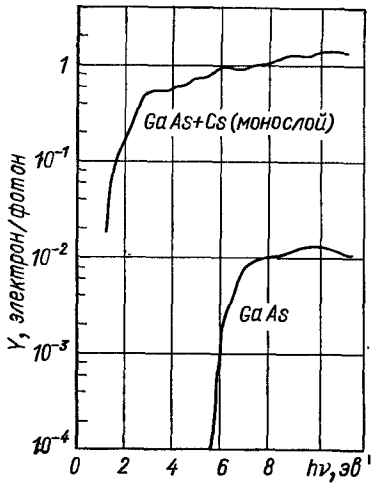


Рис. 24.24. Спектральные характеристики квантового выхода фотоэмиссии для сколотых кристаллов CdS и CdTe [6].



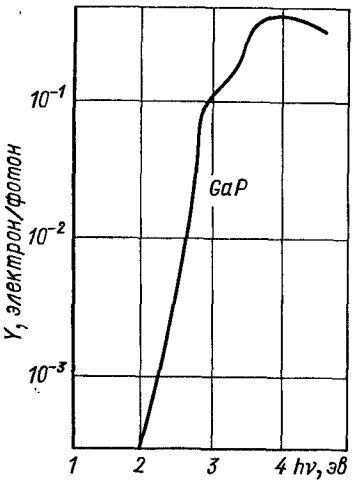


Рис. 24.25. Спектральные характеристики квантового выхода фотоэмиссии p^+-GaAs (сколотый образец) [4] и p-GaP [6]. Квантовый выход GaAs увеличивается после нанесения на сколотую поверхность монослоя Cs и может превысить единицу за счет генерации пар.

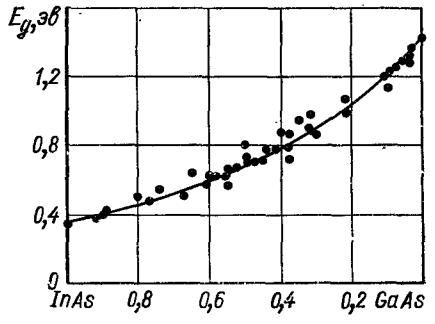


Рис. 24.26. Зависимость ширины запрещенной зоны E_g для твердых растворов $In_xGa_{1-x}As$ от x [11].

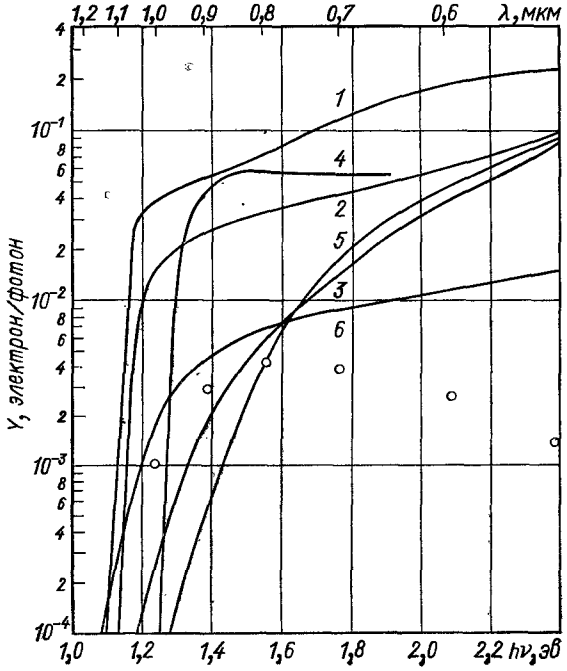


Рис. 24.27. Спектральные характеристики квантового выхода фотоэмиссии фотокатодов с отрицательным сродством к электрону на основе твердых растворов соединений $A^{III}B^{V}$ [11]:

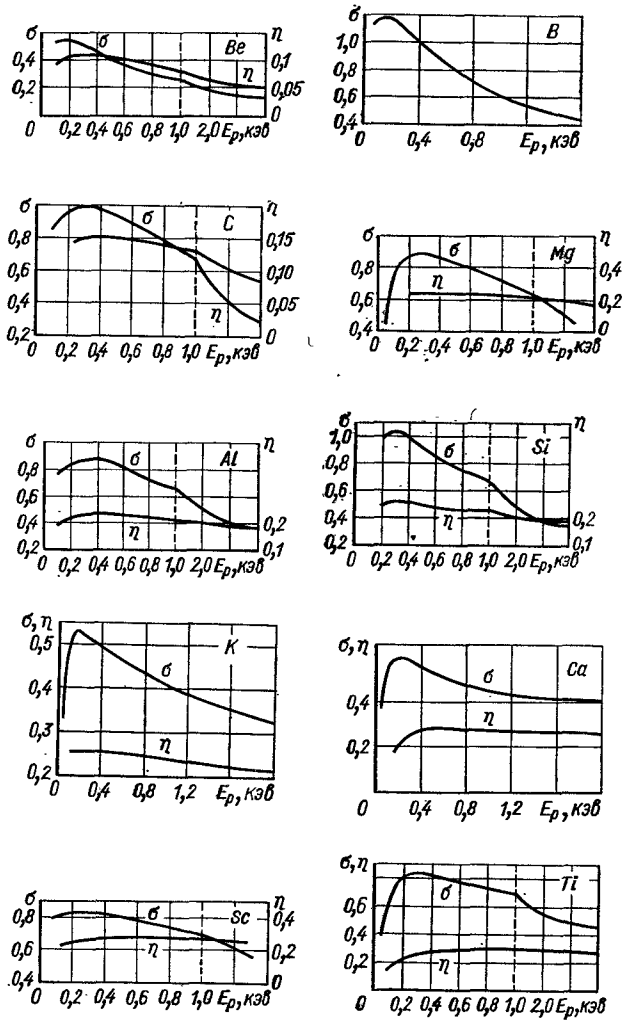
1 — $InAs_{0,13}P_{0,87}$ (ширина запрещенной зоны $E_g = 1,17$ эв); *2* — $GaAs_{0,82}Sb_{0,18}$ ($E_g = 1,17$ эв); *3* — $In_{0,3}Ga_{0,7}As$ ($E_g = 0,9$ эв); *4* — $In_{0,05}Ga_{0,95}As$ ($E_g = 1,32$ эв); *5* — $In_{0,4}Ga_{0,6}As$ ($E_g = 0,8$ эв); *6* — $In_{0,25}Ga_{0,75}As$ ($E_g = 0,96$ эв). Кружками показана характеристика квантового выхода фотоэмиссии Ag-O-Cs-фотокатода.

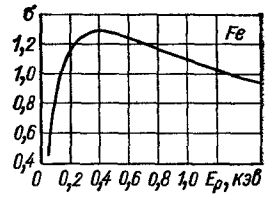
24.5. ВТОРИЧНАЯ ЭЛЕКТРОННАЯ ЭМИССИЯ

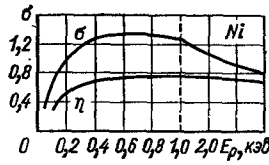
Вторичная электронная эмиссия (ВЭЭ) — эмиссия электронов, вызываемая бомбардировкой тел электронами [7]. Электроны, бомбардирующие поверхность тела, называются *первичными*; электроны, эмиттированные телом, — *вторичными*. Вторичные электроны могут эмиттироваться как со стороны облучаемой первичным пучком поверхности тела (ВЭЭ «на отражение»), так и — в тонкопленочных эмиттерах — со стороны поверхности, противоположной облучаемой (ВЭЭ «на прострел»). Отношение числа электронов N_2, испускаемых телом, к числу падающих на него за то же время первичных электронов N_1 называется *коэффициентом* ВЭЭ σ данного тела: $\sigma = N_2/N_1 = I_2/I_1$ (I_1, I_2 — первичный и вторичный токи соответственно). Значение σ зависит от свойств и структуры эмиттера, состояния его поверхности, энергии первичных электронов E_p и угла падения первичного пучка на поверхность эмиттера. В потоке вторичных электронов имеются две группы электронов: истинно вторичные — электроны вещества, получившие от первичного пучка достаточно энергии для выхода в вакуум, и отраженные (упруго и неупруго) — часть первичного пучка, отразившаяся от поверхности эмиттера. При малых E_p ($E_p < 0{,}1$ *кэв*) основную долю вторичных электронов составляют упруго отраженные электроны. С ростом E_p доля упруго отраженных электронов быстро уменьшается и при $E_p > 0{,}1$ *кэв* составляет лишь несколько процентов всей ВЭЭ. Истинно первичные электроны имеют энергии от 0 до ~50 *эв*. Наиболее вероятная энергия истинно вторичных электронов составляет 1,5—3,5 *эв* и при $E_p > 20$ *эв* практически не зависит от E_p. Неупруго отраженными условно принято считать электроны вторичного пучка, энергия которых превышает 50 *эв*. Отношение числа неупруго отраженных электронов к числу первичных электронов $\eta = N_2$ ($E_2 > 50$ *эв*)$/I_1$ называется коэффициентом неупругого отражения (в I_2 входят и упруго отраженные электроны, но число их мало и на величине η не сказывается). В металлах и полупроводниках максимальное значение σ лежит в пределах 0,5—1,8. В некоторых диэлектриках (MgO, щелочно-галоидные кристаллы) σ значительно больше (10—20). Это обусловлено тем, что в таких материалах запрещенная зона велика ($E_g \approx 6 \div 12$ *эв*), сродство к электрону мало ($\chi < 1$ *эв*), вследствие чего медленные электроны с энергией, лежащей между χ и E_g, могут из большой глубины без потерь энергии подходить к поверхности тела и выходить в вакуум. При наложении на диэлектрик сильного электрического поля, направленного от эмиттирующей поверхности вглубь слоя (т. е. ускоряющего вторичные электроны к поверхности), σ значительно возрастает. Обычно сильное поле создается бомбардировкой тонкого слоя диэлектрика на металлической подложке электронами с E_p, при котором $\sigma > 1$. В результате поверхность диэлектрика заряжается положительно относительно металлической подложки до потенциала, близкого к потенциалу коллектора, на который отсасывается ток ВЭЭ. Ток ВЭЭ, возникающий в присутствии сильного электрического поля в эмиттере, состоит из двух компонент: *малоинерционной*, быстро следующей за изменениями первичного тока (эта часть ВЭЭ называется вторичной электронной эмиссией, усиленной полем, ее инерционность $<10^{-6}$ *сек*), и *самоподдерживающейся*, существующей и при отсутствии первичного пучка, после того как осуществлена первоначальная зарядка слоя. В некоторых случаях ВЭЭ с электродов вакуумных приборов, подвергающихся бомбардировке электронами, является нежелательным паразитным эффектом. Для его устранения электроды покрывают веществами с малым σ: углерод (сажа, аквадаг), титан, цирконий, дисилициды переходных металлов. Такие покрытия называются *антидинатронными*. Эффективные эмиттеры вторичных электронов: сурьмяно-цезиевый Cs_3Sb- и многощелочной SbKNaCs-фотокатоды одновременно являются эффективными эмиттерами вторичных электронов, обладающими наиболее высоким σ при малых E_p ($E_p \ll 100$ *эв*). В фотоэлектронных умножителях (ФЭУ) широко применяются в качестве эмиттеров вторичных электронов (ВЭ) пленки окиси магния и окиси бериллия с избыточным содержанием атомов этих металлов. Такие пленки получаются на поверхности двух- и трехкомпонентных сплавов серебра или меди с магнием и бериллием при прогреве их в атмосфере кислорода (иногда для улучшения механических свойств сплавов в их состав добавляют алюминий или кремний). В канальных ФЭУ используются эмиттеры ВЭ из проводящих стекол.

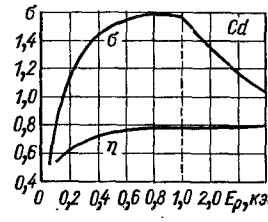
Основные характеристики эмиттеров ВЭ: зависимости коэффициента вторичной эмиссии σ и коэффициента неупругого отражения η от энергии первичных электронов E_p и максимальные значения этих коэффициентов: $\sigma_{макс}$ и $\eta_{макс}$.

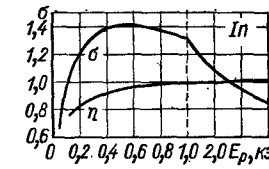
Коэффициенты вторичной электронной эмиссии и неупругого отражения электронов

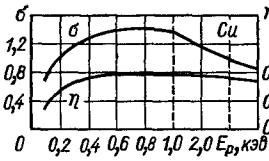


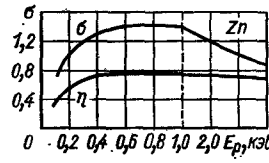

Fe
σ
η
E_p, кэв

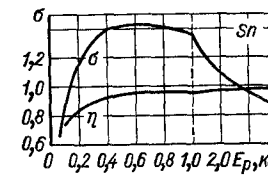

Ni
σ
η
E_p, кэв

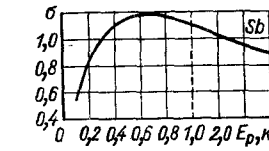

Cd
σ
η
E_p, кэв

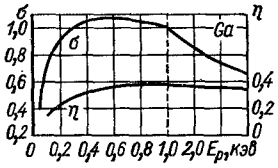

In
σ
η
E_p, кэв

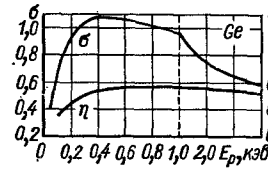

Cu
σ
η
E_p, кэв

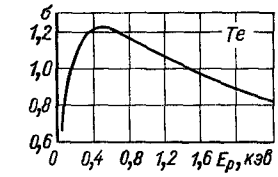

Zn
σ
η
E_p, кэв

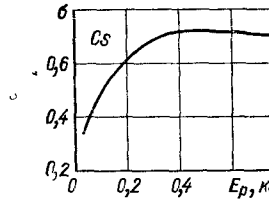

Sn
σ
η
E_p, кэв

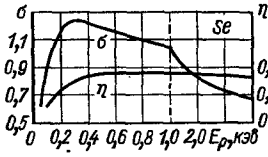

Sb
E_p, кэв

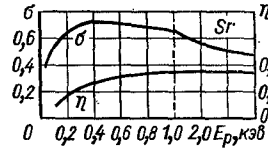

Ga
σ
η
E_p, кэв

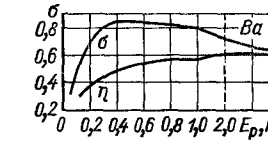

Ge
σ
η
E_p, кэв

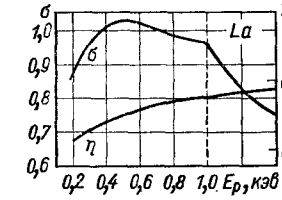

Te
E_p, кэв

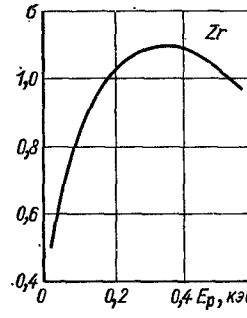

Cs
E_p, кэв

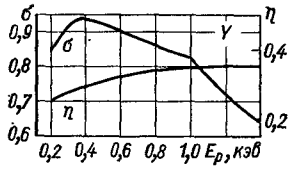

Se
σ
η
E_p, кэв

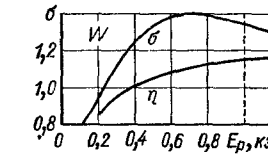

Sr
σ
η
E_p, кэв

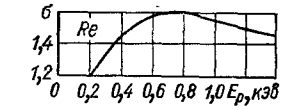

Ba
σ
η
E_p, кэв

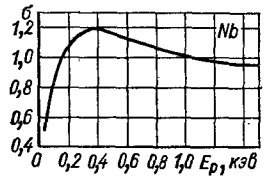

La
σ
η
E_p, кэв

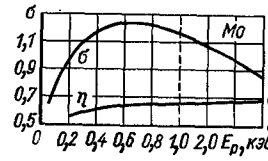

Zr
E_p, кэв

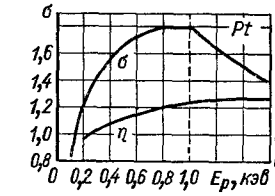

Y
σ
η
E_p, кэв

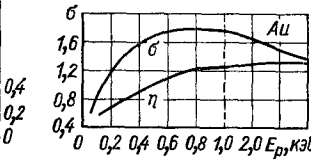

W
σ
η
E_p, кэв

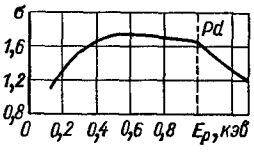

Re
E_p, кэв

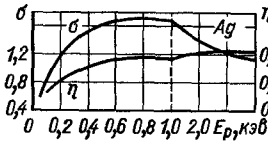

Nb
E_p, кэв

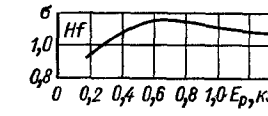

Mo
σ
η
E_p, кэв

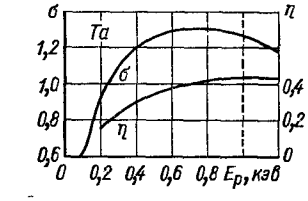

Pt
σ
η
E_p, кэв


Au
σ
η
E_p, кэв


Pd
E_p, кэв


Ag
σ
η
E_p, кэв


Hf
E_p, кэв


Ta
σ
η
E_p, кэв

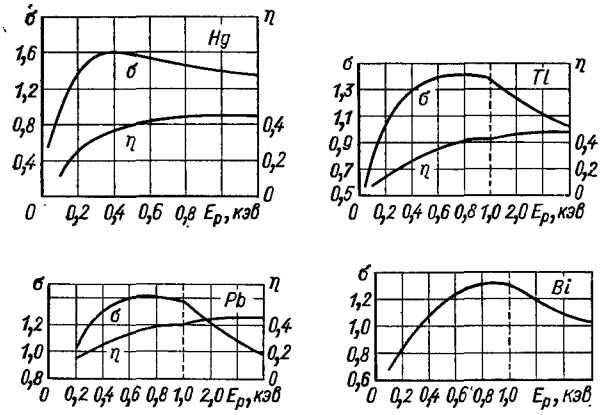


Рис. 24.28. — Рис. 24.69. Зависимости коэффициента вторичной электронной эмиссии σ и коэффициента неупругого отражения электронов η от энергии первичных электронов E_p для простых веществ [7].

Эффективные эмиттеры вторичных электронов

Таблица 24.16

$\sigma_{макс}$ и соответствующие им энергии первичных электронов E_p для эффективных эмиттеров [5]

Эмиттер	$\sigma_{макс}$	E_p, эв
Кислородно-магниевый	9—12	600—900
Медно-бериллиевый сплав	6—12	500—700
Медно-кислородно-цезиевый	6	700
Медно-магниевая смесь (полученная испарением)	~12	500
Никель-бериллиевый сплав	12	700
Серебряно-кислородно-цезиевый	7—11	600—1100
Серебряно-магниевая смесь (полученная испарением)	~9,5	500
Сложные бариевые поверхности (окислы металлов Ni, Mo, активированные барием)	12	600
Сурьмяно-литиевый	15	700—800
Сурьмяно-цезиевый	8—12	500

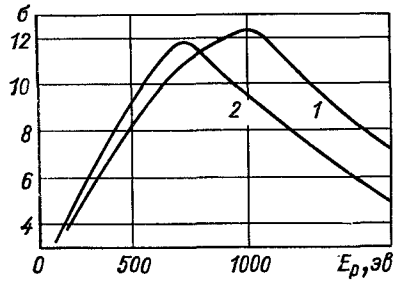


Рис. 24.70. Зависимости коэффициента вторичной электронной эмиссии σ от энергии первичных электронов E_p для эмиттеров [Ni] - NiO - Ba (*1*) и [Mo]-MoO_3-Ba (*2*) [5].

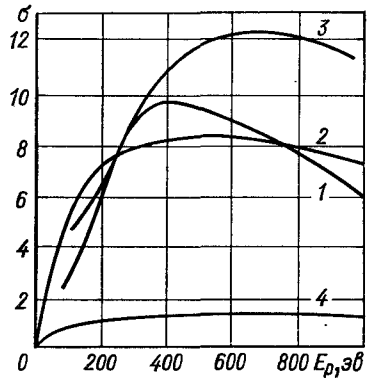


Рис. 24.71. Зависимости коэффициента вторичной электронной эмиссии σ от энергии первичных электронов для эмиттеров:
1 — серебряно-магниевого; *2* — серебряно-цезиевого; *3* — никель-бериллиевого; *4* — никелевого [5].

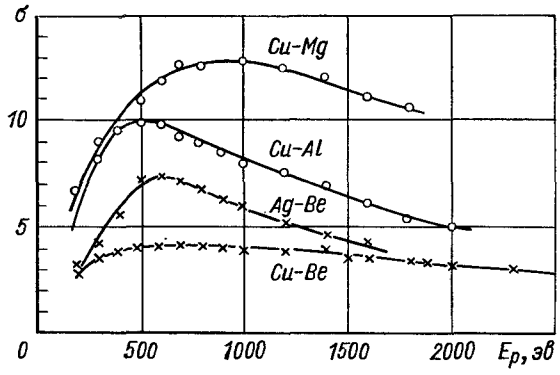


Рис. 24.72. Зависимости коэффициента вторичной электронной эмиссии σ от энергии первичных электронов E_p для различных металлических смесей, полученных испарением [5].

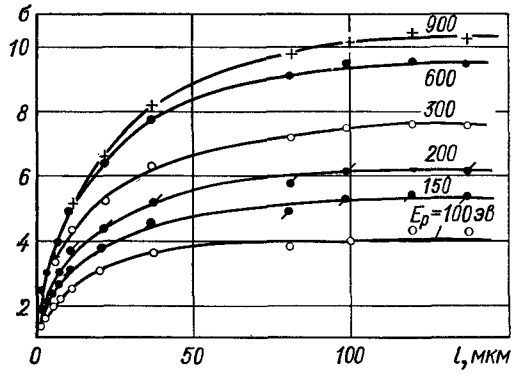


Рис. 24.73 Зависимости коэффициента вторичной электронной эмиссии σ от толщины Sb-Cs-эмиттера l при различных энергиях первичных электронов E_p [5].

Таблица 24.17

Коэффициенты ВЭЭ некоторых двухкомпонентных металлических смесей [5]

Указанные в таблице значения коэффициентов ВЭ для различных металлических смесей не являются максимальными

Основной металл Ag				Основной металл Cu			
Массовое содержание, %	σ при E_p=500 эв	Формирование в кислороде при давлении 10^{-4}—10^{-3} мм рт.ст.		Массовое содержание, %	σ при E_p=500 эв	Формирование в кислороде при давлении 10^{-4}—10^{-3} мм рт. ст.	
		t, °C	Время, мин			t, °C	Время, мин
Al 2,2	5,1	600—680	70	Al 15	7,6	600	40
1,4	3,8	620—670	50	5	9,6	620	30
Ba 5	2,0	550—780	90	Be 2,3	5,7	720—770	60
Be 5	4,9	720	60	5	6,2	650—700	40
15	7,8	650	50	2 (сплав компактный)	5	650—700	40
Ca 1,3	4,9	700—750	30				
Mg 5	9,5	570—620	30	Mg 5	12,2	550—620	35
15	8,5	570—620	40	10	9,4	570	30
5 (сплав)	9,2	570	30	15	9,1	570—620	30

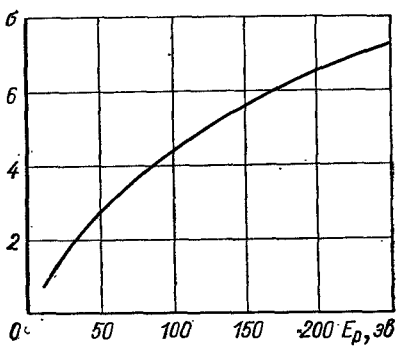


Рис. 24.74. Зависимость коэффициента вторичной электроиной эмиссии σ серебряно-кислородно-цезиевого эмиттера от энергии первичных электронов E_p [5].

24.6. АВТОЭЛЕКТРОННАЯ ЭМИССИЯ

Автоэлектронная эмиссия (АЭ) — эмиссия электронов под действием внешнего электрического поля. Если внешнее электрическое поле достаточно велико для того, чтобы потенциальный порог превратился в барьер конечной и малой ширины и высоты, 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 в твердом теле, а электрическое поле совершает работу только на разгон электронов в вакууме в межэлектродном промежутке между эмиттером и анодом.

Плотность автоэмиссионного тока из металла при низкой ($T \ll 300°$ К) температуре эмиттера [8]:

$$j = \frac{e^2 E^2}{8\pi h\varphi} \exp\left[-\frac{8\pi}{3}\frac{(2m)^{1/2}}{h}\frac{(e\varphi)^{3/2}}{eE}\theta(y)\right],$$

где $\theta(y)$ — функция Нордгейма, в которой аргументом является относительное снижение работы выхода внешним электрическим полем по Шоттки:

$$y = \frac{\Delta(e\varphi)}{e\varphi} = \frac{(eE)^{1/2}}{\varphi}$$

(см. табл. 24.18).

Если $e\varphi$ — в эв, а E — в в/см, то

$$j = 1{,}55 \cdot 10^{-6}\frac{E^2}{e\varphi}\exp\left[-\frac{6{,}85\cdot 10^7 (e\varphi)^{3/2}}{E}\times\right.$$
$$\left.\times\,\theta\left(\frac{3{,}62\cdot 10^{-4}E^{1/2}}{e\varphi}\right)\right].$$

Отсюда видно, что АЭ зависит от электрического поля так же, как термоэмиссия от температуры: $\ln(j/E^2) = f(1/E)$.

Теория АЭ полупроводников развита Страттоном, Елинсоном и др. [12]. АЭ эмиттеры используются пока ограниченно — в некоторых специальных электронно-лучевых приборах, в приборах для генерирования миллиметровых и субмиллиметровых волн [13]. Наиболее широкое применение явление АЭ нашло в автоэмиссионной и автоионной микроскопии [9]. В качестве АЭ эмиттеров чаще всего используются металлические острия из наиболее тугоплавких металлов: вольфрама, рения.

Таблица 24.18

Фуикция Нордгейма $\theta(y)$

y	θ(y)	y	θ(y)
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	0,3117
0,3	0,8718	0,85	0,2379
0,35	0,8323	0,9	0,1613
0,4	0,7888	0,95	0,0820
0,45	0,7413	1	0
0,5	0,6900		

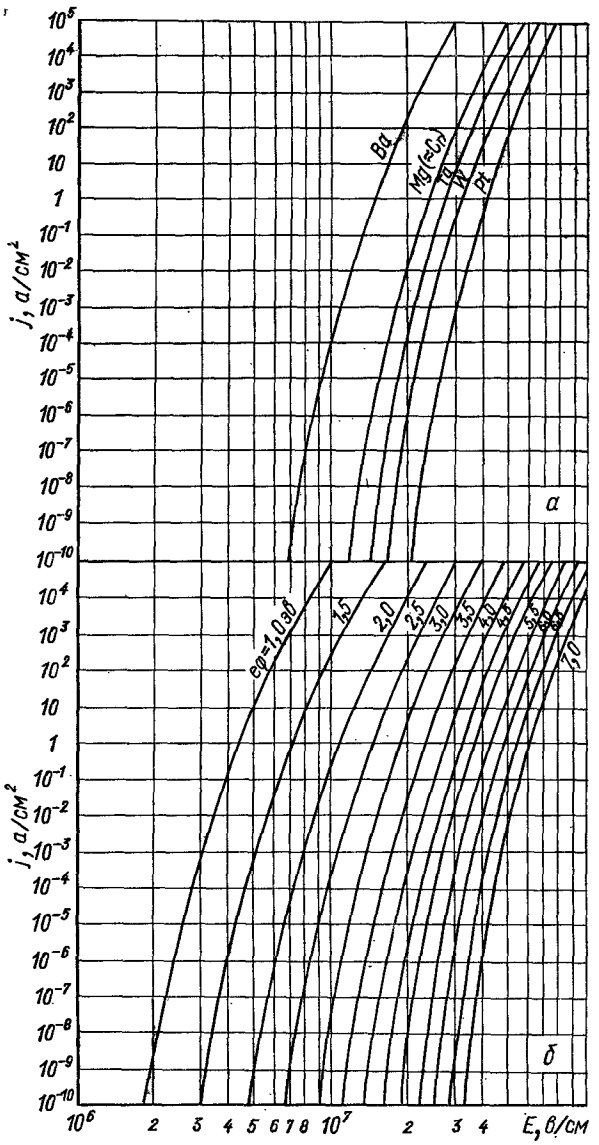


Рис. 24.75. Зависимости плотности автоэмиссионного тока j от напряженности электрического поля E для некоторых металлов (*а*) и эмиттеров с различной работой выхода (*б*) [10].

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Добрецов Л. Н., Гомоюнова М. В.** Эмиссионная электроника. М., «Наука», 1966.
2. **Фоменко В. С.** Эмиссионные свойства материалов. Справочник. Киев, «Наукова думка», 1970.
3. **Кудинцева Г. А.** и др. Термоэлектронные катоды. М.—Л., «Энергия», 1966.
4. **Соболева Н. А.** и др. Фотоэлектронные приборы. М., «Наука» 1965.
5. **Чечик Н. О., Файнштейн С. М., Лифшиц Т. М.,** Электронные умножители. М., Физматгиз, 1957.
6. **Соммер А. Х.** Фотоэмиссионные материалы. Пер. с англ. М., «Мир», 1972.
7. **Бронштейн И. М., Фрайман Б. С.** Вторичная электронная эмиссия. М., «Наука», 1969.
8. **Елинсон М. И., Васильев Г. Ф.** Автоэлектронная эмиссия. М., Физматгиз, 1958.
9. **Автоионная** микроскопия. Под ред. Д. Рена и С. Ранганатана. Пер. с англ. М., «Мир», 1971.
10. **Ardenne M.** Tabellen der Elektronenphysik, Ionenphysik und Übermikroskopie. Bd I. Berlin, 1956.
11. **Bell R. L., Spicer W. E.** "Proc. IEEE", 1970, v. 58, p. 1788.
12. **Stratton R.** "Proc. Phys. Soc.", 1955, v. 63, N 430, p. 746; "Phys. Rev.", 1962, v. 125, p. 67; **Елинсон М. И.** «Радиотехника и электроника», 1959, т. 4, с. 140; **Васильев Г. Ф.** «Радиотехника и электроника», 1958, т. 3, № 7; **Моргулис Н. Д.** «Журн. техн. физ.», 1947, т. 7, с. 963.
13. **Техника** спектроскопии в дальней инфракрасной, субмиллиметровой и миллиметровой областях спектра. Под ред. Д. Х. Мартина. Пер. с англ. М., «Мир», 1970, с. 268.
14. **Wainfan N., Walker W. G.** "J. Appl. Phys.", 1953 v. 24, p. 1318.

ГЛАВА 25

ТЕРМОЭЛЕКТРИЧЕСКИЕ ЯВЛЕНИЯ

25.1. ЭФФЕКТ ЗЕЕБЕКА

Эффект Зеебека состоит в том, что в замкнутой электрической цепи из разнородных металлов возникает термоэлектродвижущая сила (термо-э. д. с.) E_{12}, если места контактов поддерживаются при разных температурах T_1 и T_2.

E_{12} зависит только от температур T_1 и T_2 соединенных проводников и от природы материалов, составляющих термоэлемент. По E_{12} оценивают температуру в месте спая. В небольшом интервале температур имеет место зависимость $E_{12} = e_{12}(T_1 - T_2)$, где e_{12} — коэффициент термо-э. д. с., определяемый природой материалов термоэлемента и интервалом температур, в котором применяется термоэлемент. Поведение e_{12} может резко меняться с температурой (может даже менять знак).

Измеряемые термо-э. д. с. относятся всегда к двум металлам и поэтому не являются характеристиками отдельных металлов. В таблицах обычно приводят термо-э. д. с. материалов по отношению к свинцу, платине или меди.

Абсолютные коэффициенты термо-э. д. с. e_1, e_2 отдельных металлов вычисляются с помощью термодинамического соотношения:

$$e_{12} = \int_0^T \frac{S_1}{T}\,dT - \int_0^T \frac{S_2}{T}\,dT = e_1 - e_2,$$

где S_1 и S_2 — коэффициенты Томсона пары соединенных проводников (см. эффект Томсона, с. 466), e_1 и e_2 — абсолютные коэффициенты термо-э. д. с. этих проводников.

Таблица 25.1

Абсолютные коэффициеиты термо-э. д. с. для некоторых металлов в зависимости от температуры [1]. *мкв/град*

(Определены с помощью коэффициентов Томсона)

T, °C	Pb	Cu	Pt
−255	−0,74	+0,34	+1,81
−240	−0,74	+0,89	+4,04
−200	−0,75	+1,37	+5,88
−160	−0,88	+1,15	+3,56
−120	−0,99	+1,15	+1,18
−80	−1,08	+1,30	−0,92
−40	−1,15	+1,51	−2,78
0	−1,22	+1,73	−4,42
+20	−1,26	+1,86	−5,13

Продолжение табл. 25.1

T, °C	Pb	Cu	Pt
+100	−1,44	+2,23	−7,3
+200	—	+2,77	−9,2
+300	—	+3,31	−10,9
+400	—	+3,85	−12,5
+500	—	+4,39	−14,0
+600	—	+4,93	−15,6
+700	—	+5,47	−17,1
+800	—	+6,01	−18,6
+900	—	+6,55	−20,1
+1000	—	+7,09	−21,6
+1200	—	+17	−24,6
+1400	—	—	−27,6
+1600	—	—	−30,6

Таблица 25.2

Абсолютные коэффициенты термо-э. д. с. для различных металлов в зависимости от температуры [2]

Приводимые значения e_1 вычислены, исходя из измеренных относительных коэффициентов e_{12} различных металлов по отношению к парному металлу, заключенному в круглые скобки, и абсолютных коэффициентов термо-э. д. с. этих парных металлов e_2, которые приведены в табл. 25.1 и 25.2.

Термо-э. д. с. положительна, если ток в нагретом спае течет из металла 2 в металл 1.

Li(Pt)		Na(Pt)		K(Pt)		Rb (Pt)		Cs(Pt)	
T, °C	e_1, мкв/град	T, °C	e_1, мкв/град	T, °C	e_1, мкв/град	T, °C	e_1, мкв/град	T, °C	e_1, мкв/град
−50	+8,3	−50	−7,1	−50	−13,0	−50	−8,2	−50	−0,1
−25	+10,0	−25	−7,7	−25	−14,4	−25	−9,2	−25	−0,1
0	+11,5	0	−8,3	0	−15,6	0	−10,2	0	+0,1
+25	+12,2	+25	−8,7	+25	−16,6	+25	−11,1	+25	+0,1
+50	+11,5	+50	−9,2	+50	−17,6	+50	−7,5	+50	−5,8
+75	+11,0	+75	−9,7	+75	−16,9	+75	−8,3	+75	−4,6
+100	+10,4	+100	−10,4	+100	−18,0	+100	−8,9		
+125	+9,9			+125	19,1				

Продолжение табл. 25.2

Be (Pb)		Mg (Cu) монокристалл			Al(Pt)		Ti(Pt)		Th(Pt)	
T, °C	e_1, мкв/град	T, °C	e_1, мкв/град		T, °C	e_1, мкв/град	T, °C	e_1, мкв/град	T, °C	e_1, мкв/град
			∥*	⊥**						
−150	−5,1				0	−1,6	0	+7,3	+400	−2,5
−100	−3,8	0	+3,38	+3,58	+50	−1,8	+100	+8,1	+500	−4,5
−50	−3,1	+25	+4,05	+4,77	+100	−1,9	+200	+7,4	+600	−6,5
0	−3,3	+50	+4,59	+5,67	+150	−1,8	+300	+4,3	+700	−9,5
+50	−2,0	+75	+4,98	+6,30	+200	−1,8	+400	+1,7	+800	−13
+100	−0,3	+100	+5,24	+6,63	+300	−2,0	+500	−0,7	+900	−16
+150	+0,4				+400	−2,3	+600	−2,1	+1000	−19
					+500	−2,5	+700	−2,6	+1100	−23
					+600	−2,8	+800	−2,8		
					+650	−3,0	+900	+0,6		
							+1000	+1,4		

Продолжение табл. 25.2

V(Ag)		Nb (Ag)		Ta(Ag)		Cr (Ag)		Mo(Ag)	
T, °C	e_1, $\frac{мкв}{град}$	T, °C	e_1, $\frac{мкв}{град}$	T, °C	e_1, $\frac{мкв}{град}$	T, °C	e_1, $\frac{мкв}{град}$	T, °C	e_1, $\frac{мкв}{град}$
−240	0,0	−240	+1,0	−240	+0,5			−240	+4,5
−200	+2,3	−200	+3,4	−200	+0,8	−200	+1,4	−200	+3,0
−100	+1,7	−100	+1,6	−100	−1,1	−100	+7,5	−100	+3,1
0	+1,0	0	−0,5	0	−2,3	0	+20,0	0	+5,9
+100	+0,7	+100	−1,5	+100	−3,3	+100	+15,8	+100	+8,6
+200	+0,9	+200	−1,6	+200	−3,5	+200	+15,0	+200	+11,2
+300	+1,3	+300	−1,6	+300	−3,3	+300	+15.8	+300	+13
		+400	−1,4	+400	−3,0			+400	+15

Продолжение табл. 25.2

W(Pt)		U (Pt)		Fe (Pt)		Co (Pt)		Ni (Pt)	
T, °C	e_1, $\frac{мкв}{град}$	T, °C	e_1, $\frac{мкв}{град}$	T, °C	e_1, $\frac{мкв}{град}$	T, °C	e_1, $\frac{мкв}{град}$	T, °C	e_1, $\frac{мкв}{град}$
−100	−1,9	0	+8	+800	−0,1	+100	−32,3	+450	−20,2
0	+0,2	+100	+10	+900	−0,6	+200	−39,8	+550	−23,6
+100	+3,5	+200	+13	+910	−9,8	+300	−43,5	+650	−27,1
+200	+6,8	+300	+15	+1000	−9,1	+400	−46,0	+750	−30,3
+400	+12,6	+400	+18	+1100	−8,1	+500	−43,0	+850	−32,8
+550	+15,8	+500	+20	+1200	−6,6	+600	−39,0	+950	−35,2
+650	+19,2	+600	+20	+1300	−6,6	+800	−28,8	+1050	−37,3
+800	+22,3	+700	+21	+1400	−4,6	+900	−22,0		
+1000	+25,6	+800	+22	+1405	−1,7	+1000	−14,0		
+1100	+26,0	+900	+23	+1450	−1,4	+1100	−9,0		
+1300	+23,6								

Продолжение табл. 25.2

Ru (Pt)		Rh (Pt)		Pd (Pt)		Ir (Pt)		Ag (Pt)	
T, °C	e_1, $\frac{мкв}{град}$	T, °C	e_1, $\frac{мкв}{град}$	T, °C	e_1, $\frac{мкв}{град}$	T, °C	e_1, $\frac{мкв}{град}$	T, °C	e_1, $\frac{мкв}{град}$
+200	−29,7	0	+0,9	0	−9,6	0	+0,8	−40	+1,0
+250	−31,7	+100	+0,8	+100	−13,4	+100	+0,2	+50	+1,4
+300	−32,5	+200	+0,8	+200	−16,3	+200	−0,1	+150	+1,8
+350	−35,2	+300	+0,6	+300	−18,8	+300	−0,6	+250	+2,3
+400	−38,8	+400	+0,5	+400	−21,7	+400	−0,9	+350	+3,4
+500	−42,2	+500	+0,2	+600	−28,5	+600	−1,7	+450	+4,5
+600	−44,3	+600	0	+800	−35,3	+800	−2,4	+550	+5,1
+700	−43,3	+800	−0,4	+1000	−41,5	+1000	−3,2	+650	+7,1
+800	−43 3	+1000	−0,9	+1200	−47	+1200	−4,7	+750	+7,9
+1000	−47	+1200	−1,5	+1400	−51	+1500	−9,0	+850	+8,8
+1150	−50			+1500	−53				
+1200	−51								
+1300	−53,5								

Продолжение табл. 25.2

Au (Pt)		Zn(Cu)			Cd (Cu)			Hg (Cu)		Tl (Cu)	
T, °C	e_1, $\frac{мкв}{град}$	T, °C	e_1, $\frac{мкв}{град}$		T, °C	e_1, $\frac{мкв}{град}$		T, °C	e_1, $\frac{мкв}{град}$	T, °C	e_1, $\frac{мкв}{град}$
			∥*	⊥2*		∥*	⊥2*				
0	+1,1	−253	−0,76	+1,28	−253	−0,15	+3,14	−200	+1,3	0	+0,84
+100	+1,8	−245	−0,81	+1,71	−240	−0,34	+2,24	−150	+1,75	+ 50	+0,09
+200	+2,4	−227	−1,90	+1,75	−225	−0,51	+1,59	−100	+1,95	+100	−0,41
+400	+3,1	−218	−2,41	+1,45	−183	−0,83	+0,67	− 40	+3,60	+150	−0,67
+600	+3,3	−197	−1,06	+1,15	−149	−1,04	+0,59	− 35	+7,20	+200	−0,69
+800	+3,7	−160	−0,46	+1,22	−140	−1,04	+0,63	0	+7,84	+233	−0,57
+1000	+3,7	−112	−0,06	+1,39	− 81	−0,95	+1,20	+ 50	+9,51	+250	−0,46
		− 80	+0,06	+1,57	0	−0,04	+3,16	+100	+11,55		
		0	+0,42	+2,16	+ 98	+1,98	+7,22	+150	+13,39		
		+ 98	+0,82	+3,36							

Продолжение табл. 25.2

Sb(Cu)			Bi(Cu)			Se (Ni)		Te (Cu)		C (Pt)	
T, °C	e_1, $\frac{мкв}{град}$		T, °C	e_1, $\frac{мкв}{град}$		T, °C	e_1, $\frac{мкв}{град}$	T, °C	e_1, $\frac{мкв}{град}$	T, °C	e_1, $\frac{мкв}{град}$
	∥*	⊥2*		∥*	⊥2*						
0	+20,6	+46,8	−160	−75	−35	+35	+850	−190	+550	+1200	−6,5
+20	+21,3	+48,0	−120	−95	−45	+50	+860	−100	+550	+1500	−7,0
+40	+22,0	+49,1	− 80	−104	−53	+100	+940	−50	+300	+1750	0
+60	+22,7	+50,2	− 40	−105	−53	+150	1020	0	−100	+2000	+23
+80	+23,4	+51,4	0	−100	−53	+200	1100	+100	−150	+2200	+13,5
+100	+24,2	+52,6						+200	−100	+2400	−1,5
										+2700	−11
										+3100	−15

* ∥ — гексагональная ось кристалла параллельна градиенту температур.
2* ⊥ — гексагональная ось кристалла перпендикулярна градиенту температур.

Таблица 25.3

Термо-э. д. с. важнейших сплавов для термопар относительно платины при разных температурах [3], *мв*

T, °C	Хромель 90%Ni+10%Cr	Алюмель 94%Ni+Al+Si+Mn	Константан 60%Cu+40%Ni
−200	−3,36	+2,39	+5,35
−100	−2,20	+1,29	+2,98
0	0	0	0
+100	+2,81	−1,29	−3,51
200	5,96	−2,17	−7,45
300	9,32	−2,89	−11,71
400	12,75	−3,64	−16,19
500	16,21	−4,43	−20,79
600	19,62	−5,28	−25,47
700	22,96	−6,18	−30,18
800	26,23	−7,08	−34,86
900	29,41	−7,95	−39,45
1000	32,52	−8,79	−43,92
1100	35,56	−9,58	—
1200	38,51	−10,34	—
1300	41,35	−11,06	—
1400	44,04	−11,77	—

Таблица 25.4

Термо-э. д. с. металлов и сплавов при различных давлениях и температурах [4], *мкв*

В таблице дана зависимость от температуры термо-э. д. с. (*мкв*) между металлом, сжатым всесторонним давлением p ($кГ/см^2$), и тем же металлом, находящимся при нормальном давлении. Термо-э. д. с. считается положительной, если ток в нагретом спае течет от несжатого металла к сжатому.

Металлы и сплавы	T, °C	p, 10^3 $кГ/см^2$		
		4	8	12
Алюминий	20	−0,081	−0,098	−0,068
	60	−0,060	+0,146	+0,543
	100	+0,294	+0,929	+1,962
Вольфрам	20	+0,90	+1,80	+2,70
	60	+2,87	+5,72	+8,58
	100	+4,99	+10,12	+15,14
Висмут	20	+42	+106	+185
	60	+134	+308	+539
	100	—	—	—

Продолжение табл. 25.4

Металлы и сплавы	T, °C	p, 10^8 кГ/см²		
		4	8	12
Железо (отожженное)	20	—0,15	—0,50	—0,99
	60	+1,08	+1,31	+1,40
	100	+3,25	+5,82	+7,68
Железо (неотожженное)	20	—0,15	—0,45	—0,74
	60	+1,05	+1,54	+2,20
	100	+4,42	+8,70	+12,80
Золото	20	+0,333	+0,670	+0,990
	60	+1,115	+2,196	+3,213
	100	+2,051	+3,974	+5,760
Кадмий	20	+1,10	+3,46	+6,68
	60	+6,22	+13,98	+23,92
	100	+14,38	+28,74	+45,56
Кобальт	20	—1,20	— 2,37	— 3,52
	60	—3,86	— 7,70	—11,47
	100	—6,92	—13,60	—20,61
Константан	20	+ 2,29	+ 4,53	+ 6,75
	60	+ 6,99	+13,82	+20,77
	100	+11,81	+23,79	+35,47
Магний	20	—0,72	—1,58	— 2,59
	60	—2,17	—4,75	— 7,79
	100	—3,62	—7,91	—12,96
Манганин	20	—0,103	—0,215	—0,308
	60	—0,286	—0,573	—0,846
	100	—0,452	—0,894	—1,314
Медь	20	+0,224	+0,424	+0,596
	60	+0,700	+1,370	+1,976
	100	+1,216	+2,420	+3,546
Молибден	20	+0,052	+0,101	—0,146
	60	+0,218	+0,436	+0,649
	100	+0,278	+0,555	+0,833
Никель	20	+0,55	+1,17	+ 1,88
	60	+1,85	+3,97	+ 6,32
	100	+3,40	+7,19	+11,44
Олово	20	0,000	—0,045	—0,182
	60	+0,083	+0,122	+0,103
	100	+0,165	+0,292	+0,390
Палладий	20	+1,76	+ 3,40	+ 5,09
	60	+5,28	+10,41	+15,64
	100	+8,80	+17,69	+26,52
Платина	20	+1,29	+ 2,56	+ 3,88
	60	+4,39	+ 8,96	+13,39
	100	+7,31	+14,35	+21,57

Продолжение табл. 25.

Металлы и сплавы	T, °C	p, 10^8 кГ/см²		
		4	8	12
Свинец	20	+0,32	+0,69	+1,06
	60	+1,14	+2,29	+3,44
	100	+2,12	+4,21	+6,33
Серебро	20	+0,66	+1,28	+ 1,90
	60	+2,10	+4,08	+ 6,02
	100	+3,72	+7,19	+10,56
Таллий	20	+ 3,55	+ 6,44	+ 8,78
	60	+11,45	+21,01	+29,15
	100	+20,29	+37,63	+52,46
Цинк	20	+4,9	+9,6	+14,4
	60	+15,9	+32,1	+47,4
	100	+28,5	+58,1	+87,4

Таблица 25.5

Коэффициенты термо-э. д. с. различных металлов и сплавов в магнитном поле при насыщении относительно тех же самых металлов без магнитного поля [5, 6]

Металл	Область температур, °C	e^*_{12}, мкв/град	
		$e_{12\parallel}$	$e_{12\perp}$
Fe	10—95	+0,90	—0,058
Ni	10—97	+0,301	—0,136
Ni	5—100	+0,20	—0,11
Ni + 5% Mn	5—100	+0,26	—0,12
Ni + 10% Mn	5—100	+0,12	—
Ni + 15% Mn	5—100	+0,065	—0,02
Ni + 25% Mn	5—100	—	—0,05
Ni + 30% Mn	5—100	—	—0,10

* $e_{12\parallel}$ — коэффициент термо-э. д. с. в магнитном поле, параллельном градиенту температуры; $e_{12\perp}$ — коэффициент термо-э. д. с. в магнитном поле, перпендикулярном градиенту температуры.

25.2. ЭФФЕКТ ПЕЛЬТЬЕ

Эффект Пельтье обратен эффекту Зеебека. При прохождении тока через спай различных проводников кроме джоулева тепла выделяется или поглощается, в зависимости от направления тока, некоторое количество тепла $Q_П$, пропорциональное протекающему через контакт заряду (т. е. силе тока I и времени t) $Q_П = \Pi It$, где Π — коэффициент Пельтье, который зависит от природы находящихся в контакте материалов.

Согласно термодинамической теории, коэффициент Пельтье связан с коэффициентом термо-э. д. с. $e = dE/dT$ соотношением $\Pi = eT$.

Таблица 25.6

Коэффициент Пельтье для различных металлов [7]

Стрелка показывает направление тока через нагретый спай

Пара металлов	T, °С	П, $\frac{мкал}{к}$	Пара металлов	T, °С	П, $\frac{мкал}{к}$
As → Pb	20	0,91	Fe → Cu	0	0,664
$Bi_{\parallel} \rightarrow Bi_{\perp}$	20	3,59*	Fe → Hg	18,4 99,64 182,3	1,1644 1,388 1,511
$Cd_{\parallel} \rightarrow Cd_{\perp}$	20	0,208*	Fe → Ni	15	2,288
Cd → Ni	15	1,53	Fe→Константан	0	3,10
Cu → Ag	0	0,0168	Pb → Bi	20	5,16
Cu → Al	14	0,405	Pb → Константан	0 100 200 300	1,90 2,73 3,6 4,4
Cu → Au	0	0,0813	Sb → Bi	20	10,7
Cu → Bi	18	3,85	Sb → Pb	20	0,186
Cu → Ni	0	1,90	Zn → Ni	15	1,534
	14,4	1,385	$Zn_{\parallel} \rightarrow Zn_{\perp}$	20	0,126*
Cu → Pd	0	0,588	Графит → Cu	20	0,703
Cu → Pt	0	0,238			
Cu → Константан	15,5	2,436			

* Вычислено по термодинамической формуле из значений коэффициента Томсона и термо-э. д. с.

Таблица 25.7

Зависимость коэффициента Пельтье, измеренного калориметрическим методом для различных пар металлов, от температуры

Чтобы получить коэффициенты Пельтье в милликалориях на кулон, надо приведенное в таблице число умножить на 0,239.

Железо — константан * (8)		Медь — никель (6)		Свинец — константан (9)	
t, °С	П, *мв*	T, °С	П, *мв*	T, °С	П, *мв*
0	+13	19	+8,0	20	+8,7
20	+15	55	+9,0	110	+11,8
130	+19	205	+10,3	235	+16,0
240	+26	290	+8,6	305	+18,7
320	+34	340	+8,0	360	+20,6
560	+52	445	+10,0	440	+23,4

* Медь — константан: П = 11,0 *мв при* $T = 20$°С [10].

25.3. ЭФФЕКТ ТОМСОНА

Если вдоль проводника, по которому протекает электрический ток, существует перепад температур ($T_2 - T_1$), то кроме джоулева тепла в объеме проводника выделяется или поглощается, в зависимости от направления тока, некоторое количество тепла

$$Q_S = S(T_2 - T_1)\,It,$$

где S — коэффициент Томсона, зависящий от природы материала; I — ток; t — время.

Согласно термодинамической теории, коэффициент термо-э. д. с. пары проводников связан с их коэффициентами Томсона соотношением

$$de/dt = (S_1 - S_2)/T.$$

Таблица 25.8

Значения коэффициента Томсона для различных металлов

Чтобы получить коэффициент Томсона в *мккал/(к×град)*, надо умножить S на 0,239. Коэффициент Томсона имеет положительный знак, если направление потока тепла совпадает с направлением тока.

Металл		T, °К	S, $\frac{мкв}{град}$	Литература
Ag		105 150 300	−0,10 +0,55 +1,31	[11] [11] [11]
Al(99%)		260 300 400	+0,11 −0,08 −0,56	[11] [11] [11]
Au		105 150 300	+0,29 +0,96 +1,61	[11] [11] [11]
Cd (монокристалл)	∥ *	373 473	+6,9 +7,3	[18] [18]
	⊥ 2*	373 473	+8,2 +8,7	[18] [18]
Co		100 200 300	− 8,4 −19,6 −25,4	[19] [19] [19]
Cu		70 170 300	−0,26 +0,47 +1,52	[14] [14] [14]
Cu+0,37 ат. % Au		20 40 60 90 130 300	+0,44 +2,17 +2,96 +2,20 +1,71 +2,33	[14] [14] [14] [14] [14] [14]
Fe (Армко)		323 423 523	−15,3 −22,8 −26,3	[12] [12] [12]

Продолжение табл. 25.8

Металл		T, °К	S, $\frac{мкв}{град}$	Литература
Ni		100	— 4,5	[19]
		200	—12,1	[19]
		260	—15,7	[19]
Pb (99,99%)		120	—0,19	[11]
		200	—0,45	[11]
		400	—0,85	[11]
Pd		20	+1,9	[19]
		100	—7,8	[19]
		200	—12,1	[19]
		300	—18,2	[19]
Pt		203	—9,6	[13]
		273	—9,1	[13]
		393	—9,2	[13]
Sn(99,99%)		100	+0,86	[11]
		200	+0,42	[11]
		300	—0,07	[11]
		400	—0,45	[11]
Zn (монокристалл)	∥*	322,5	+1,6	[17]
		398	+4,6	[17]
	⊥2*	322,5	+4,1	[17]
		398	+8,8	[17]
W		328	+8,5	[11]
Константан		323	—24,6	[16]
		384	—25,5	[16]
		446	—26,0	[16]
Нейзильбер		328	—12,0	[15]

* ∥ — образец вырезан вдоль гексагональной оси кристалла (Томсон-эффект измеряется вдоль образца).

2* ⊥ — образец вырезан под углом 90° к гексагональной оси кристалла.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Borelius G.** Handb. Metallphysik. Berlin, J. Springer, 1935.
2. **Landolt-Börnstein.** Zahlenwerte und Funktionen aus Physik, Chemie, Astronomie, 6 Teil, Elektrishe Eigenschaften. Berlin, Göttingen—Heidelberg, Springer-Verlag, 1959.
3. **American** Institute of Physics Handbook. Ed. D. Gray. Mc Graw-Hill Book, Company., Inc., New — York—Toronto—London, 1957.
4. **Bridgmen P. W.** "Proc. Amer. Acad. Arts Sci.", 1917/18, v. 53, p. 267.
5. **Аннаев Р. Г.** «Докл. АН СССР», 1948, т. 63, с. 639.
6. **Konsmine I.** "Helv. Phys. Acta", 1934, v. 7, p. 732.
7. **Сборник** физических констант. Ред. Дорфман Я. Г. и Фриш С. Э. М., ОНТИ, 1937.
8. **Cerman P.** "Ann. Physik", 1907, v. 24, p. 351.
9. **Cerman P.** "Ann. Physik", 1908, v. 26, p. 521.
10. **Woodall A. J.** "Proc. Phys. Soc.", 1935, v. 47A, p. 615.
11. **Borelius G.** "Ann. Physik", 1921, v. 65, p. 519.
12. **Joung J.** "Proc. Phys. Soc.", 1925, v. 37A, p. 145.
13. **Berg O.** "Ann. Physik", 1910, v. 32, p. 477.
14. **Borelius G., Kessom W. H.** "Comm. Kamerlingh Onnes Lab. Univ. Leiden", 1929, v. 196a, p. 3.
15. **Smith H. E.** "Pros. Phys. Soc.", 1925, v. 38A, p. 1.
16. **Nettleton R.** "Proc. Phys. Soc.", 1922, v. 34A, p. 77.
17. **Ware L. A.** "Phys. Rev.", 1930, v. 35, p. 989.
18. **Verleger H.** "Ann. Physik", 1931, v. 9, p. 366.
19. **Borelius G. e. a.** "Proc. Amsterdam", 1930, v. 33, p. 17.

ГЛАВА 26

ГАЛЬВАНОМАГНИТНЫЕ И ТЕРМОМАГНИТНЫЕ ЯВЛЕНИЯ

26.1. ВВЕДЕНИЕ

Гальваномагнитные явления — совокупность явлений, возникающих под действием магнитного поля в проводниках (металлах и полуметаллах), по которым 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 активным воздействием внешнего магнитного поля на движение носителей тока.

При поперечном намагничивании проводника с током ($\mathbf{H} \perp \mathbf{J}$) наблюдаются следующие гальваномагнитные явления:

1) в направлении, перпендикулярном к вектору магнитного поля и вектору плотности тока $\mathbf{J}$, возникает электрическое поле (эффект Холла) $\mathbf{E} = R[\mathbf{JH}]$, где R — коэффициент Холла;

2) в направлении, перпендикулярном к вектору маг-

нитного поля **H** и вектору плотности тока **J**, возникает температурный градиент (эффект Эттингсгаузена) $\nabla T = P[\mathbf{JH}]$, где P — коэффициент Эттингсгаузена;

3) изменяется сопротивление проводника, что эквивалентно возникновению добавочной разности потенциалов вдоль направления электрического тока.

При поперечном намагничивании проводника возникают следующие термомагнитные явления:

1) в направлении, перпендикулярном градиенту температур ∇T и направлению магнитного поля **H**, возникает электрическое поле (эффект Нернста) $\mathbf{E} = Q[\nabla T\mathbf{H}]$ при $\mathbf{J} = 0$, где Q — коэффициент Нернста;

2) в направлении, перпендикулярном градиенту температур $\nabla_x T$ и направлению магнитного поля **H**, возникает градиент температур (эффект Риги—Ледюка) $\nabla_y T = S[\mathbf{H}\cdot\nabla_x T]$, где S — коэффициент Риги—Ледюка. При продольном намагничивании образца изменяются электросопротивление, термо-э. д. с. и теплопроводность.

Значения коэффициентов гальваномагнитных эффектов в металлах отличаются большим разнообразием, связанным со сложностью зонной структуры и формы поверхности Ферми. Гальвано- и термомагнитные эффекты очень чувствительны ко всякого рода примесям и неоднородностям. По этой причине приведенные в таблицах значения коэффициентов надо рассматривать лишь как наиболее заслуживающие доверия.

Различают гальваномагнитные явления нечетные (т. е. зависящие от нечетных степеней H) и четные (т. е. зависящие от четных степеней H). Наиболее важен из нечетных — эффект Холла, наиболее существен из четных эффектов — эффект изменения сопротивления в магнитном поле.

Эффект Холла

Опыт показывает, что коэффициент Холла R может быть положительным и отрицательным и даже менять знак с изменением температуры. Для большинства металлов наблюдается почти полная независимость коэффициентов Холла от температуры. Резко аномальным эффектом Холла обладают висмут и другие металлы V группы периодической системы. Значения гальваномагнитных коэффициентов этих металлов помещены в отдельную таблицу (табл. 26.7).

В ферромагнетиках поле **H** изменяет направление намагниченности доменов, так что на электроны проводимости воздействует магнитное поле, отличное от внешнего. При этом наблюдается особый, ферромагнитный, эффект Холла. Для ферромагнетиков экспериментально найдено, что

$$E_R = (R_0\mu_0 H + R_1 M)J, \qquad (26.1)$$

где E_R — поле Холла в направлении y (рис. 26.1); H — напряженность магнитного поля; μ_0 — постоянная индукции; M — намагниченность образца; J — плотность тока, протекающего через образец; R_0 и R_1 — обыкновенный и необыкновенный (аномальный) коэффициенты Холла.

Последнее соотношение с учетом равенства $B = \mu_0 H + M$ можно записать в виде

$$e = \frac{U_R d}{I} = R_0 B + R_S M, \qquad (26.2)$$

где U_R — напряжение Холла; I — полный ток через образец; d — толщина образца; $R_S = R_1 - R_0$ — так называемый *спонтанный*, или *ферромагнитный*, коэффициент Холла. Для большинства ферромагнитных металлов обнаружено, что $R_0 \ll R_1$ и $R_S \cong R_1$.

Из этого выражения определяют коэффициенты Холла, используя экспериментальные зависимости $e(B)$ (рис. 26.2).

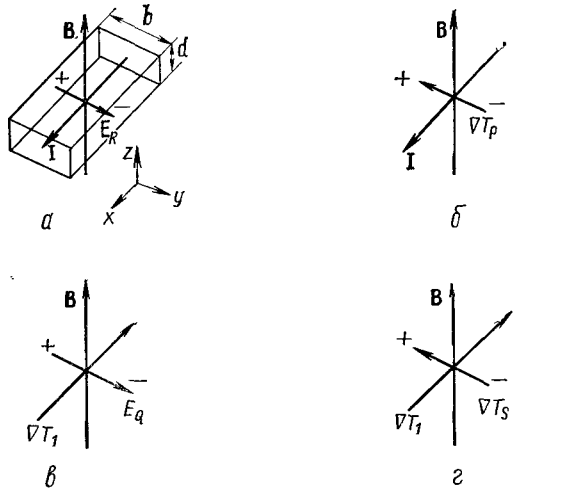


Рис. 26.1. Схемы ориентации векторов **B**, **I**, $\mathbf{E}_R$, grad T

а — для эффекта Холла; *б* — для эффекта Нернста; *в* — для эффекта Эттингсгаузена; *г* — для эффекта Риги — Ледюка.

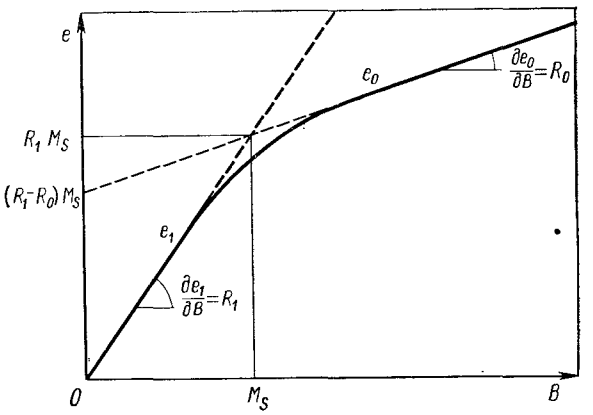


Рис. 26.2. Зависимость э. д. с. Холла e от магнитной индукции для ферромагнитной пластинки. Определение обыкновенного R_0 и аномального R_1 коэффициентов Холла.

Выше магнитного насыщения второй член в (26.2) постоянен, и тогда зависимость $e(B)$ переходит в прямую линию. Ее наклон дает R_0. Продолжив прямую линию до $B = 0$, получим отрезок на оси ординат, равный $R_S M_S$, где M_S — намагниченность насыщения образца. Отсюда определяют R_S. Обычно $R_S \gg R_0$ и сильно зависит от температуры. С повышением температуры коэффициент Холла R_S возрастает, достигая максимума в точке Кюри, а затем снижается. В парамагнитной области температур эффект Холла определяется соотношением

$$e = R^* H,$$

где $R^* = R_0 + \chi R_S = R_0 + R_p$; χ—диэлектрическая восприимчивость вещества; R_p—парамагнитный коэффициент Холла—Кикоина.

Значения гальваномагнитных коэффициентов ферромагнитных металлов помещены в отдельную таблицу (26.13).

Термомагнитные эффекты в ферромагнетиках определяются аналогично по следующим формулам:

эффект Эттингсгаузена

$$\frac{\partial T_P}{\partial y} = (P_0 \mu_0 H + P_1 M)\, I;$$

эффект Риги — Ледюка

$$\frac{\partial T_S}{\partial y} = (S_0 \mu_0 H + S_1 M)\, \frac{\partial T}{\partial x};$$

эффект Нернста

$$\frac{\partial U_Q}{\partial y} = (Q_0 \mu_0 H + Q_1 M)\, \frac{\partial T}{\partial x}.$$

Изменение сопротивления в магнитном поле (магнетосопротивление)

При обычно используемых напряженностях поля $H \ll 10^4$ э и комнатной температуре магнетосопротивление $\Delta\rho/\rho_0$ ($\Delta\rho$ — изменение сопротивления в магнитном поле, ρ_0 — сопротивление при $H = 0$) для большинства металлов весьма мало. Например, для меди $\Delta\rho/\rho_0 \approx 10^{-4}$ при $H = 2 \cdot 10^4$ э. Исключением является висмут, у которого $\Delta\rho/\rho_0 \approx 2$ при $H = 3 \cdot 10^4$ э. В полупроводниках этот эффект значительно больше, чем в металлах (например, в германии при $T \approx 100°$ К и $H = 2 \cdot 10^4$ э $\Delta\rho/\rho_0 \approx 3$).

У большинства металлов и полупроводников (за исключением ферромагнитных) удельное сопротивление ρ с ростом магнитного поля возрастает. В сильных магнитных полях характер зависимости сопротивления от H существенно связан с характером энергетического спектра электронов. Все металлы с замкнутыми поверхностями Ферми, у которых число электронов n_1 не равно числу дырок n_2 (Na, Al, In), имеют сопротивление, которое сравнительно слабо возрастает в сильных магнитных полях.

Металлы с замкнутыми поверхностями Ферми, для которых число электронов равно числу дырок ($n_1 = n_2$) (Bi, Be и др.), характеризуются квадратичной зависимостью ρ от H, причем это имеет место при любом направлении **H**. Исключение составляет случай продольного поля (**H** ∥ **I**), когда сопротивление стремится к насыщению. Для металлов с замкнутыми поверхностями Ферми линейное возрастание сопротивления с увеличением напряженности поля, по-видимому, наблюдается в промежуточных полях.

У металлов с открытыми поверхностями Ферми (Sn, Au, Zn, Ta и др.) наблюдается резкая анизотропия гальваномагнитных свойств; при одних направлениях **H** — квадратичное возрастание с увеличением напряженности, при других — насыщение. В ряде случаев линейное возрастание сопротивления с ростом H является результатом усреднения.

В ферромагнитных металлах зависимость ρ от H имеет ряд особенностей, которые обусловлены наличием в этих веществах самопроизвольной намагниченности. В больших магнитных полях выше технического насыщения материала (или в области пара-процесса) сопротивление с ростом поля всегда уменьшается независимо от направления магнитного поля по отношению к току.

Значения всех гальвано- и термомагнитных коэффициентов даны в таблицах в системе СИ. Для перевода в другие системы единиц следует пользоваться табл. 26.1

Таблица 26.1

Таблица перевода единиц измерения коэффициентов гальвано- и термомагнитных явлений из системы СИ в другие системы

Величина	Обозначение	Система СИ	Практическая система (внесистемные единицы)	Система СГСМ
Магнитная индукция	B	$\frac{вб}{м^2} = \frac{в \cdot сек}{м^2}$	10^4 гс	10^4 $см^{-1/2} \cdot г^{1/2} \cdot сек^{-1}$
Коэффициент Холла	R	$\frac{м^3}{к} = \frac{м^3}{а \cdot сек}$	$10^{-2}\, \frac{в \cdot см}{а \cdot гс}$	10^7 $см^{5/2} \cdot г^{-1/2}$
Коэффициент Эттингсгаузена	P	$\frac{град \cdot м^3}{в \cdot а \cdot сек}$	$10^{-2}\, \frac{град \cdot см}{а \cdot гс}$	10^{-1} $град \cdot см \cdot г^{-1} \cdot сек^2$
Коэффициент Риги — Ледюка	S	$\frac{м^2}{в \cdot сек}$	10^{-4} $гс^{-1}$	10^{-4} $см^{1/2} \cdot г^{-1/2} \cdot сек$
Коэффициент Эттингсгаузена — Нернста	Q	$\frac{м^2}{град \cdot сек}$	$10^{-4}\, \frac{в}{град \cdot гс}$	10^4 $град^{-1} \cdot см^2 \cdot сек^{-1}$

26.2 КОЭФФИЦИЕНТЫ ХОЛЛА ДЛЯ МЕТАЛЛОВ И СПЛАВОВ

Таблица 26.2

Коэффициенты Холла для металлов

Металл	T, °К	B, $вб/м^2$	R, 10^{-10} $м^3/к$	Литература
Li	297	1,7—1,8	—1,70	[1]
Be (99,5%)*	290	0,3—2,0	+7,7	[4]
Na	298	0,2—2,04	—2,1	[2]
Mg	300	0,4—2,5	—0,83	[5]
Al (99,5%)	83	0,54	—0,22	[8]
	273	0,54	—0,33	[8]
	573	0,54	—0,39	[8]
	873	0,54	—0,41	[8]
K	258—333	0,4—2,04	—4,2	[2]
Ca (99%)	293	0,3—1	—1,78	[6]
Ti (99,91%)	291	1,2—2,9	—0,26	[15]
Ti (99,87%)	294	0,4—2,8	+0,10	[15]
	294	—	+0,7[2]*	[16]
	294	—	—1,08[3]*	[16]
	294	—	+0,42[2]*	[17]
	294	—	—0,77[3]*	[17]
V	301	0,3—2,9	+0,82	[14]
V (99,63%)	293	—	+0,79	[21]
	20	—	+0,62	[21]
Cr (99,9%)	287	1,0—2,9	+3,63	[14]
Mn(99,99%)	297	0,6—2,9	+0,84	[14]
Cu	298,2	1,13—1,14	—0,536	[31]
	328,2	1,13—1,14	—0,537	[31]
	358,2	1,13—1,14	—0,538	[31]
Cu (99,9%)	83	0,54	—0,560	[30]
	173	0,54	—0,510	[30]
	273	0,54	—0,513	[30]
	573	0,54	—0,543	[30]
	873	0,54	—0,587	[30]
Cu (отожженная)	300	0—1,5	—0,53	[32]
	150	0—1,5	—0,54	[32]
	50	0—1,5	—0,63	[32]
	40	0—1,5	—0,68	[32]
	4	0—1,5	—0,65	[32]
Zn (технический)	293	0,5—1,1	+1,04	[29]
Ga	293	1,63	—0,63	[36]
Rb	293—308	0,2—1,6	—4,2	[3]

Продолжение табл. 26.2

Металл	T, °К	B, $вб/м^2$	R, 10^{-10} $м^3/к$	Литература
Y (99,2%)	293	0,56	—0,770	[9]
Y (монокристалл $\frac{\rho_{293°К}}{\rho_{4,2°К}} = 10,4$)	290	0—1,0	—1,72[2]*	[10]
	290	0—1,0	—0,47[3]*	[10]
	4	0—1,0	—0,4[2]*	[10]
Y (монокристалл $\frac{\rho_{293°К}}{\rho_{4,2°К}} = 16$) См. рис. 26.3 [11]	4	0—1,0	—0,98[3]*	[10]
Zr (97,3% Zr + + 2,4% Hf)	83	0,54	+1,08	[8]
	273	0,54	+1,385	[8]
	573	0,54	+0,695	[8]
	873	0,54	+0,215	[8]
Zr $\left(\frac{\rho_{293°К}}{\rho_{4,2°К}} = 38\right)$	100	0—1,5	+3,15	[18]
	200	0—1,5	+2,72	[18]
	300	0—1,5	+2,15	[18]
Nb	83	0,54	+0,92	[8]
	273	0,54	+0,88	[8]
	873	0,54	+0,91	[8]
Mo	83	0,54	+1,79	[8]
	273	0,54	+1,80	[8]
	873	0,54	+1,76	[8]
Ru	293	4,47	+2,2	[26]
Rh (99,5%)	291	4,9	+0,505	[27]
Pd	299	0,87—0,92	—0,845	[28]
	318	0,87—0,92	—0,855	[28]
	337	0,87—0,92	—0,844	[28]
Ag (техническое)	293	0,5—1,1	—0,897	[29]
Ag (99,9%)	83	0,54	—0,925	[30]
	173	0,54	—0,902	[30]
	273	0,54	—0,909	[30]
	573	0,54	—0,949	[30]
	873	0,54	—1,002	[30]
Ag (отожженное)	300	0—1,5	—0,89	[32]
	150	0—1,5	—0,88	[32]
	50	0—1,5	—0,97	[32]
	40	0—1,5	—1,13	[32]
	4	0—1,5	—1,12	[32]
Cd (99,9%)	293	0.310—0,842	+0,531	[34]
In	297	1,7—1,8	—0,073	[1]
	78	0,6—2.0	—0,105	[37]
Sn	294,7	0,300—0,812	—0,022	[38]
Cs	268	0,337—1.86	—7,8	[2]

Продолжение табл. 26.2

Металл	T, °К	B, вб/м²	R, 10^{-10} м³/к	Литература
La (99,8%)	293	0,56	—0,8	[9]
Ce (99,88%)	293	0,56	+1,81	[9]
Pr(99,9%)	293	0,56	+0,709	[9]
Nd (99,98)	293	0,56	+0,971	[9]
Sm	213	0—0,55	—0,08	[13]
	300	0—0,55	—0,21	[13]
Sm $\left(\frac{\rho_{273°К}}{\rho_{4,2°К}}=17,3\right)$	4,2	—	+1,5	[14]
	30	—	+2,8	[14]
	170	—	0	[14]
	300	—	—0,5	[14]
Tm	60	0—0,55	—3,4	[13]
	120	0—0,55	—2,4	[13]
	180	0—0,55	—1,9	[13]
	300	0—0,55	—1,5	[13]
Yb	77	0—0,55	3,8	[13]
	180	0—0,55	3,75	[13]
	300	0—0,55	3,7	[13]
Lu	60	0—0,55	—0,55	[13]
	180	0—0,55	—0,54	[13]
	300	0—0,55	—0,53	[13]
Lu (монокристалл $\frac{\rho_{293°К}}{\rho_{4,2°К}}=25$)	См. рис. 26.3 [11]			
Hf (99,4%)	4,2	—	—0,26	[19]
	100	—	+0,19	[19]
	200	—	+0,30	[19]
	300	—	+0,42	[19]
Ta (99,8%)	83	0,54	+0,975	[8]
	273	0,54	+0,971	[8]
	773	0,54	+0,967	[8]
W	297	1,7—1,8	+1,18	[1]
W (99,9%)	83	0,54	+1,20	[8]
	173	0,54	+1,06	[8]
	273	0,54	+1,11	[8]
	873	0,54	+1,56	[8]
Re	293	4,82	+3,15	[25]
Re $\left(\frac{\rho_{293°К}}{\rho_{4,2°К}}=27\right)$	100	0—1,5	+0,4	[18]
	200	0—1,5	+0,9	[18]
	300	0—1,5	+1,6	[18]
Ir	293	0,5—1,1	+0,402	[29]
Pt	293	0,5—1,1	—1,27	[29]

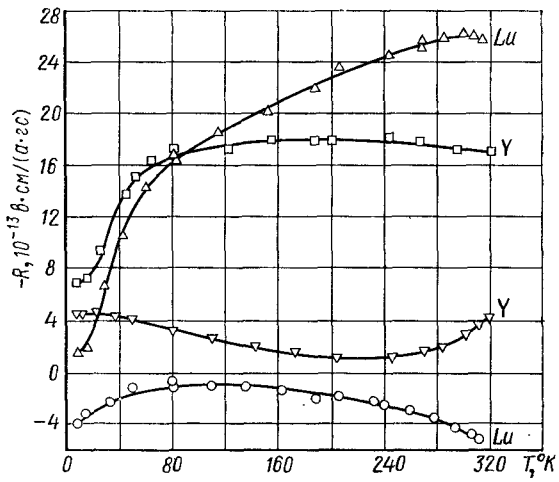


Рис. 26.3. Температурная зависимость коэффициента Холла R для монокристаллических образцов лютеция и иттрия [11]:
△— Lu (**H** ∥ оси c); □ — Y (**H** ∥ оси c); ○ — Lu (**H** ∥ оси a); ▽ — Y (**H** ∥ оси b).

Продолжение табл. 26.2

Металл	T, °К	B, вб/м²	R, 10^{-10} м³/к	Литература
Pt (99,9%)	83	0,54	—0,203	[30]
	173	0,54	—0,181	[30]
	273	0,54	—0,214	[30]
	573	0,54	—0,253	[30]
	873	0,54	—0,278	[30]
Au	290	0,87—0,92	—0,705	[28]
	345	0,87—0,92	—0,696	[28]
Au (отожженное)	300	0—1,5	—0,73	[32]
	150	0—1,5	—0,72	[32]
	50	0—1,5	—0,73	[32]
	40	0—1,5	—0,84	[32]
	4	0—1,5	—0,98	[32]
Au (99,9%)	83	0,54	—0,715	[30]
	123	0,54	—0,697	[30]
	273	0,54	—0,695	[30]
	573	0,54	—0,721	[30]
	873	0,54	—0,755	[30]
Hg	293	1,0—2,24	<0,02	[35]
Tl	297	1,7—1,8	+0,240	[1]
Pb	2,8	0,03[4*]	<+0,06	[40]
	2,8	1,13	+0,13	[40]
	4,2	0,03[4*]	<+0,06	[40]
	4,2	0,10	+0,08	[40]
	4,2	0,50	+0,08	[40]
	4,2	1,13	+0,18	[40]
Th	293	0,37—0,45	—1,2	[20]
U	293—573	0,5—1,7	+0,34	[23]

* В скобках указана чистота металла.
[2*] **H** ∥ гексагональной оси.
[3*] **H** ⊥ гексагональной оси.
[4*] В сверхпроводящем состоянии.

Таблица 26.3

Коэффициенты Холла для монокристаллических образцов [41]

Металл	T, °К	B, вб/м²	Номер кристалла*	$R_{\parallel}$, 10^{-10} м³/к ($B \parallel [0001]$)	$R_{\perp}$, 10^{-10} м³/к ($B \perp [0001]$)
Zn	77	1,35	1	+1,87	+0,16
	77	1,35	4	+2,01	+0,18
	77	1,35	5	+1,86	+0,19
	288	1,35	1	+1,44	+0,04
	288	1,35	4	+1,43	—0,06
	288	1,35	5	+1,44	—0,025
Cd	77	1,35	1	+1,66	+0,38
	77	1,35	3	+1,74	+0,27
	288	1,35	1	+1,20	+0,11
	288	1,35	3	+1,32	0

* В работе [41] измерения эффекта Холла были проведены на нескольких образцах. Дан номер кристалла.

Таблица 26.4

Коэффициенты Холла для жидких металлов и сплавов

Металл	R, 10^{-11} м³/к	Литература
Ga	—4,1	[42]
	—3,9	[45]
	—3,83	[44]
In	—5,4	[42]
	—5,3	[44]
In_2Bi	—4,6	[42]
Sn	—4,4	[42]
	—4,4	[44]
Hg	—7,6	[42]
	—7,46	[43]
	—7.6	[44]
Сплав 58% Hg + 42% Sn	—6,75	[42]
Сплав 36% Hg + 64% Sn	—6,2	[42]

Таблица 26.5

Коэффициенты Холла для различных сплавов

Сплав	Атомное содержание компонента, %	T, °К	R, 10^{-10} м³/к	Литература
Mg—Li	Li			
	0	293	—0,842	[46]
	0,49	293	—0,683	[46]
	2,55	293	—0,173	[46]
	4,42	293	+0,113	[46]
Mg—Al	Al			
	0,29	293	—0,787	[46]
	0,80	293	—0,707	[46]
	1,31	293	—0,653	[46]
	2,18	293	—0,667	[46]
	2,41	293	—0,669	[46]
Mg—Ag	Ag			
	0,11	293	—0,801	[46]
	0,22	293	—0,770	[46]
	0,33	293	—0,734	[46]
	0,528	293	—0,676	[46]
	0,998	293	—0,606	[46]
Mg—Cd	Cd			
	0,55	293	—0,708	[46]
	1,92	293	—0,487	[46]
	3,92	293	—0,290	[46]
	8,64	293	+0,072	[46]
	12,68	293	+0,319	[46]
Mg—In	In			
	0,446	293	—0,731	[46]
	1,46	293	—0,619	[46]
	6,76	293	—0,984	[46]
	10,57	293	—1,456	[46]
Mg—Tl	Tl			
	1,32	293	—0,362	[46]
	2,94	293	—0,173	[46]
	4,84	293	—0,271	[46]
Mg—Sn	Sn			
	0,047	293	—0,837	[46]
	0,29	293	—0,749	[46]
	1,08	293	—0,865	[46]

Продолжение табл. 26.5

Сплав	Атомное содержание компонента, %	T, °К	R, 10^{-10} м³/к	Литература
Mg—Pb	Pb			
	0,24	293	—0,798	[46]
	1,32	293	—0,732	[46]
	2,01	293	—0,724	[46]
Al—Cu*	3,93 Cu	293[3*]	—0,274	[47]
	0,005 Si			
	0,03 Fe	293[4*]	—0,196	[47]
Al—Ag[2*]	Ag			
	0	291,7	—0,350	[48]
	10,02	291,7	—0,340	[48]
	30,01	292,2	—0,301	[48]
Al—Ag	50,19	290,7	—0,228	[48]
	70,23	290,7	—0,045	[48]
	80,60	290,7	+0,139	[48]
	90,41	291,4	—0,305	[48]
Al—Si*	0,52 Si	293	—0,316	[47]
	1,00 Fe			
	0,018 Cu			
Pd—Ti	Ti			
	0	293	—1,15	[49]
	4,94	293	—2,21	[49]
Pd—Re	Re			
	0,7	293	—1,32	[49]
	2,09	293	—1,69	[49]
	2,91	293	—2,11	[49]
Pd—Ag	Ag			
	20	4,2[5*]	—3,52	[50]
	20	77[6*]	—2,87	[50]
	20	298[6*]	—2,01	[50]
	40	4,2[5*]	—4,30	[50]
	40	77[6*]	—3,77	[50]
	40	302[6*]	—3,10	[50]

*. B=1,7 вб/м².
2* B=0,307—0,829 вб/м².
3* Медленное охлаждение.
4* Резкое охлаждение.

Продолжение табл. 26.5

Сплав	Атомное содержание компонента, %	T, °К	R, 10^{-10} м³/к	Литература
Cu—Pd	Pd			
	15[7*]	293	—0,871	[51]
	15[8*]	293	—0,270	[51]
	25[7*]	293	—1,668	[51]
	44[7*]	293	—3.22	[51]
Cu—Au	$AuCu_3$[7*]	293	—0,645	[52]
	$AuCu_3$[8*]	293	+0,326	[52]
	AuCu[7*]	293	—0,736	[52]
	AuCu[8*]	293	—0,382	[52]
Cu—Zn	Cu			
	0	293	+0,830	[53]
	6	293	+0,496	[53]
	67	293	—0,116	[53]
	81,3	293	—0,404	[53]
	100	293	—0,520	[53]
Cu—Cd[9*]	Cu			
	0	290,0	+0,530	[54]
	13,3	288,7	—1,379	[54]
	20,9	287,4	—0,986	[54]
	30,5	288,1	—0,683	[54]
	100	288,4	—0,523	[54]
Cu—Sn	Cu			
	0[10*]	294,7	—0,022	[38]
	9,88[11*]	295,7	—0,107	[38]
	39,60[12*]	291,7	—0,209	[38]
	69,70[12*]	290,7	+0,470	[38]
	100 [12*]	290,2	—0,524	[38]
Mo—Nb	Nb			
	0	290	+1,85	[57]
	0	4,2	+2,61	[57]
	7,9	290	+2,82	[57]
	7,9	80	+3,43	[57]
	7,9	4,2	+3,64	[57]

5* B=0,4—1,7 вб/м².
6* B=0,7—2,3 вб/м².
7* Разупорядоченный сплав.
8* Упорядоченный сплав.
9* B=0,3—0,85 вб/м².
10* B=0,749—0,812 вб/м².
11* B=0,552—0,812 вб/м².
12* B=0,300—0,812 вб/м².

Продолжение табл. 26.5

Сплав	Атомное содержание компонента, %	T, °К	R, 10^{-10} $м^3/к$	Литература
Mo—Re	Re			
	7,4	290	+1,40	[57]
	7,4	80	+1,00	[57]
	7,4	4,2	+0,82	[57]
Pd—Ta	Ta			
	3,03	250	+1,45	[58]
	4,89	250	+1,78	[58]
	6,18	250	+1,83	[58]
Hf—Sc	Sc			
	0	250	—0,25	[58]
	33	250	—0,73	[58]
	45	250	—0,90	[58]
	70	250	—1,60	[58]
Ag—Sn	Ag			
	5,62*	290,2	+0,02	[55]
	30,43[2]*	289,0	+0,278	[55]
	81,00[2]*	292,2	—0,275	[55]
	100 [3]*	289,2	—0,892	[55]

Продолжение 26.5

Сплав	Атомное содержание компонента, %	T, °К	R, 10^{-10} $м^3/к$	Литература
Ag—Zn	Zn			
	50 (β-фаза)	290	—0,06	[61]
	50 (γ-фаза)	290	+0,06	[61]
Au—Zn	Zn			
	50	290	+0,11	[61]
Au_3—Mn		130	+0,33	[56]
		180	+0,26	[56]
		230	+0,25	[56]

* B=0,835 $вб/м^2$.
[2]* B=0,600—0,835 $вб/м^2$.
[3]* B=0,309—0,835 $вб/м^2$.
Для сплавов Al—Cu, Al—Ag, Al—Si, Cu—Zn, Cu—Au, Pd—Ag, Cu—Cd, Cu—Sn, Ag—Sn — содержание компонента дано в %.

Таблица 26.6

Термомагнитные коэффициенты для металлов

Металл	T, °К	B, $вб/м^2$	P, 10^{-8} $\frac{град \cdot м^3}{в \cdot к}$	S, 10^{-3} $\frac{м^2}{в \cdot сек}$	Q, 10^{-8} $\frac{м^2}{град \cdot сек}$	Литература
Ag (технический)	323	0,5—1,4	—	—4,04	—4,3	[29]
Al (99,5%)	313	2,27	—	—0,63	+0,39	[7]
Mn (99,99%)	330	—	—	—	+0,15	[24]
Cu	298,2	1,13—1,14	—1,446	—2,698	—2,155	[31]
	328,2	1,13—1,14	—1,544	—2,448	—2,104	[31]
	358,2	1,13—1,14	—1,674	—2,272	—2,014	[31]
Zn (технический)	323	0,5—1,1	—	+1,29	—2,40	[29]
	319,6	0,8—2,1		+1,05	—1,27	[7]
	347,6	0,8—2,1		+0,97	—1,38	[7]
	401,5	0,8—2,1	—	+0,82	—1,25	[7]

Металл	T, °К	B, $вб/м^2$	P, $10^{-8}\ \frac{град \cdot м^3}{в \cdot к}$	S, $10^{-3}\ \frac{м^2}{в \cdot сек}$	Q, $10^{-8}\ \frac{м^2}{град \cdot сек}$	Литература
Mo	333	1,7—1,8	—	—	—1,72	[1]
Pd	299	0,87—0,92	+16,2	—0,487	+3,27	[28]
	318	0,87—0,92	+17,8	—0,414	+3,26	[28]
	337	0,87—0,92	+20,6	—0,378	+3,35	[28]
Cd	337	1,122	—	+1,1	—	[22]
	320	—	—	+0,89	—1,20	[33]
Y	298	2,5	$75 \cdot 10^4$	—	—	[12]
In	333	1,7—1,8	—	—	+0,32	[1]
Sn	330	1,4	—	—	—0,04	[39]
Ta (99,8%)	83	0,54	—	—	+0,98	[8]
W	333	1,7—1,8	—	—	—10	[1]
	332	1,22	—	+1,5	—	[22]
Ir	323	0,5—1,1	—	+0,55	—0,05	[29]
Pt	323	0,5—1,1	—	—0,21	—	[29]
Au	298	0,87—0,92	—	—3,00	—1,81	[28]
	330	0,87—0,92	—	—2,63	—1,81	[28]
Tl	333	1,7—1,8	—	—	—0,37	[1]
Pb	330	1,4	—	—	—0,05	[39]

26.3. ГАЛЬВАНОМАГНИТНЫЕ ЯВЛЕНИЯ В МЫШЬЯКЕ, ВИСМУТЕ, СУРЬМЕ И ИХ СПЛАВАХ

Коэффициенты гальвано- и термомагнитных эффектов в As, Bi и Sb отличаются от коэффициентов других металлов относительно большими значениями и сложной температурной зависимостью.

В As и Bi кроме необычной температурной зависимости поперечный эффект зависит еще и от магнитной индукции. При низких температурах наблюдается осцилляция эффекта Холла (эффект Де Гааза — ван Альфена). Периодическая зависимость коэффициента Холла от обратной магнитной индукции представлена в следующем виде:

$$R(B, T) = \sum_i \left\{ C_i(B, T) + D_i(B, T) \times \right.$$

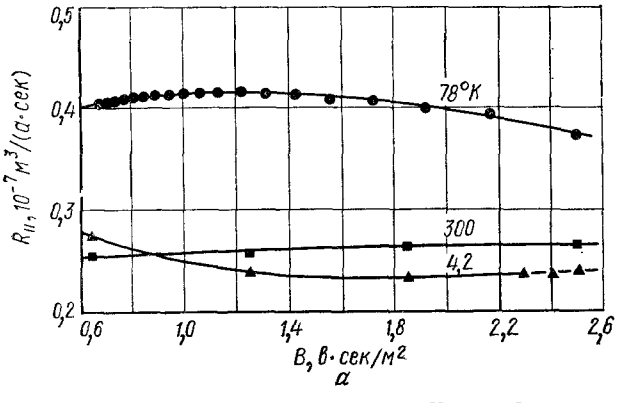
$$\left. \times \sin\left(2\pi\left(\frac{E_0}{\beta}\right)_i \frac{1}{B} - \theta_i\right)\right\},$$

где суммирование производится по носителям различного типа. Здесь B — магнитная индукция; T — абсолютная температура; R — общий коэффициент Холла; C — монотонная часть коэффициента Холла; D — амплитуда осцилляторной части коэффициента Холла; β/E_0 — период осцилляции; θ — фаза; E_0 — энергия Ферми; $\beta = eh/m^*c$ — эффективный магнетон Бора; m^* — соответствующая эффективная масса носителей.

Коэффициенты гальвано- и термомагнитных явлений в мышьяке, висмуте и сурьме

Металл	T, °К	B, $\frac{вб}{м^2}$	R, $10^{-7}\frac{м^3}{к}$	P, $10^{-5}\frac{град \cdot м^3}{(в \cdot к)}$	S, $10^{-2}\frac{м^2}{(в \cdot сек)}$	Q, $10^{-6}\frac{м^2}{град \cdot сек}$	Литература
As	293	0,4 и 0,8	+0,0452	+0,175	+0,415	+0,225	[59]
Sb (99,916%)	291	0,8	+0,219	+1,94	+2,01	+1,76	[60]
	296	1,10		+3,66			[1]
	325	1,10			+2,62		[22]
	291*	0,309—0,683	+0,213	—	—	—	[63]
	289,5²*	0,309	+0,232	—	—	—	[63]
	289,5	0,463	+0,232	—	—	—	[63]
	289,5	0,579	+0,234	—	—	—	[63]
	289,5	0,683	+0,232	—	—	—	[63]
	289,5	0,770	+0,229	—	—	—	[63]
	289,5	0,847	+0,217	—	—	—	[63]
Bi	291	0,266	—	—	—	+12,5	[60]
	291	0,393	—6,33	+35,3	—2,05	+17,8	[60]
	291	0,629	—5,80	+51,6	—1,12	+23,4	[60]
	291	0,830	—5,28	+58,3	—0,55	+26,1	[60]
	291	1,057	—4,82	+62,7	—0,19	+27,5	[60]
	325	1,04	—	—	—	+20	[64]
	325	1,09	—	—	—4,05	—	[22]

* Мелкокристаллическая
²* Крупнокристаллическая



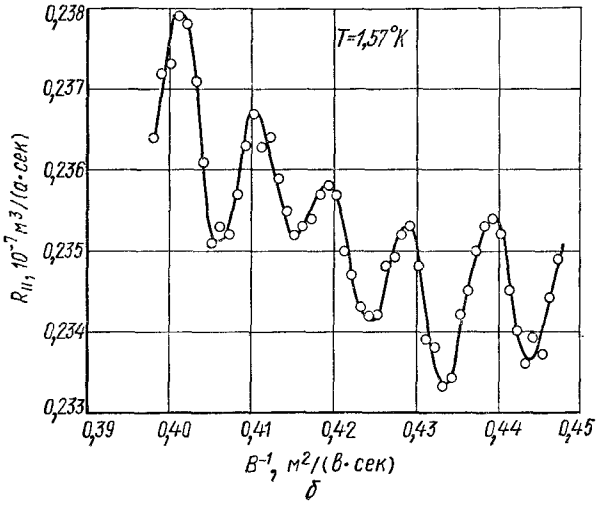


Рис. 26.4. Зависимости коэффициента Холла R_{II} монокристалла Sb от магнитной индукции [65] (*а*) и от обратного значения магнитной индукции [65] (*б*). Тригональная ось перпендикулярна плоскости пластинки (т. е. параллельна магнитному полю). Угол между бинарной осью и осью вдоль длины пластинки (направление первичного тока) составляет 15°.

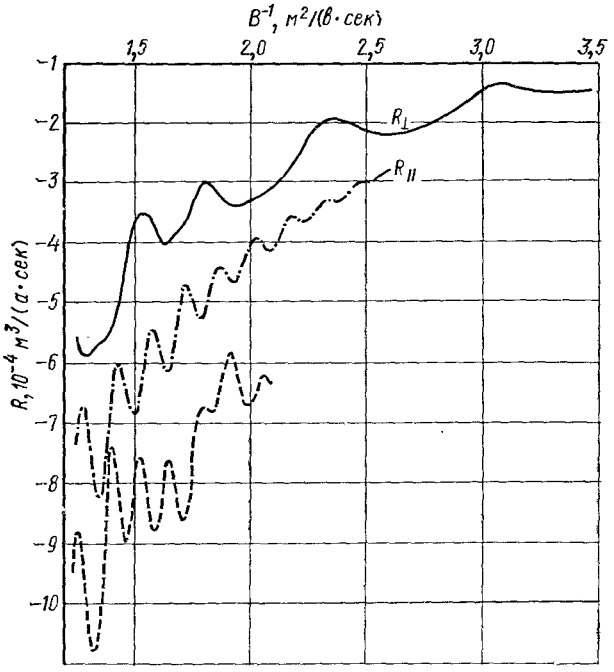


Рис. 26.5. Зависимость коэффициентов Холла ($R_\perp$ и $R_\parallel$) монокристалла висмута от обратного значения магнитной индукции при $T = 1{,}4°$ К [71]:

— — — — — угол между направлением магнитного поля и тригональной осью 25°, первичный ток параллелен биарной оси; —·—·— магнитное поле параллельно тригональной оси, ——— магнитное поле перпендикулярно тригональной оси.

Таблица 26.8

Коэффициенты Холла монокристаллических образцов Bi (экстраполированный коэффициент Холла при $B = 0$)

T, °К	$R^{*}_{\perp}$, 10^{-7} м³/к	$R^{2*}_{\parallel}$, 10^{-7} м³/к	Литература
20	—180	—	[66]
65	—103	+6	[66]
90	—80	+3	[66]
125	—57	+2	[66]
168	—38	+1	[66]
230	—22	0	[66]
290	—15	0	[66]
113	—59	+1,7	[67]
203	—27,4	+0,9	[67]
273	—16,9	+0,6	[68]
318	—12,1	+0,6	[68]

* $B \perp$ к тригональной оси.
2* $B \parallel$ тригональной оси.

Таблица 26.9

Осцилляция эффекта Холла в Bi

Чистота кристалла $\rho_{42°К}/\rho_{273°К}$	P, атм	T, °К	B, вб/м²	Монотонная часть C, 10^{-4} м³/к		Осцилляция		Литература
				*	2*	Период β/E_0, м³/вб	Фаза θ	
$1{,}7\cdot10^{-3}$	—	14	1,8	—6,5	—	—	—	[69]
$1{,}7\cdot10^{-3}$	—	1,4—4,2	0,3	—4	—	0,4	—	[70]
$1{,}7\cdot10^{-3}$	—	—	1,4	—26	—	—	—	[70]
>99,996% $5\cdot10^{-3}$	—	1,38—4,2	0,2—0,8	—	—	0,15	—	[71, 72]
99,99%	6,8	4,2	0,840	—	—9,22	—	—	[73]
	6,8	4,2	0,968	—	—11,00	0,157	$1{,}47\,\frac{\pi}{4}$	[73]
	6,8	4,2	1,146	—	—13,26	—	—	[73]
	114	4,2	0,840	—	—9,30	—	—	[73]
	114	4,2	0,968	—	—11,08	0,159	$1{,}77\,\frac{\pi}{4}$	[73]
	114	4,2	1,146	—	—13,35	—	—	[79]

* $B \perp$ к тригональной оси.
2* $B \parallel$ тригональной оси.

Таблица 26.10

Коэффициенты Холла в различных сплавах Sb

Добавляемый металл	Содержание, %	T, °K	B, $вб/м^2$	R, 10^{-10} $м^3/к$	Литература
Ag	0	288	0,464	224	[75]
	2,25	288	0,464	222	[75]
	13,78	286	0,464	216	[75]
	50,07	290	0,464	166	[75]
	70,74	289,5	0,464	—1,213	[75]
	89,20	289,5	0,464	—0,864	[75]
	100	289	0,464	—0,898	[75]
Cu	20	289	0,3—0,85	+67,6	[74]
	30	288,1	0,3—0,85	+32,3	[74]
	40	289,2	0,3—0,85	+13,6	[74]
	51,4	294,9	0,3—0,85	+1,50	[74]
	70	291,3	0,3—0,85	+0,111	[74]
	80	296,0	0,3—0,85	—0,324	[74]
Pb	0	291,0	0,305—0,847	+213	[63]
	15	291,0	0,305—0,847	+87,6	[63]
	30	293,5	0,305—0,847	+33,3	[63]
	50	293,5	0,305—0,847	+11,2	[63]
	96	293,5	0,305—0,847	+0,997	[63]
Te	4,26	293	—	140	[75]
Tl	81	293	—	0,5	[76]
	85,4	293	—	10	[76]

Таблица 26.11

Коэффициенты Холла в сплавах Bi с малыми добавками других элементов

Добавляемый элемент	Атомное содержание, %	T, °K	R, 10^{-7} $м^3/к$, при B, $вб/м^2$		Литература
			0,36	2,32	
	0	293	—6,8	—4,08	[77]
S	1	293	—7,0	—	[77]
Zn	0,33	293	—6,4	—	[77]
Ga	0,5	293	—6,8	—	[77]
As	1	293	—6,0	—5,8	[77]
Se	1	293	—5,0	—	[77]
Cd	0,33	293	—6,5	—	[77]
In	0,5	293	—6,9	—	[77]
Sn	1	293	—2,8	+0,25	[77]
Sb	1	293	—7,2	—4,83	[77]
Te	1	293	—0,6	—	[77]
I	0,5	293	—6,7	—	[77]
Hg	0,33	293	—6,7	—	[77]
Tl	0,5	293	—6,8	—	[77]
Pb	1	293	—6,4	—	[77]
As	0,1	293	—7,3	—	[78]
	0,25	293	—6,3	—	[78]
	0,5	293	—5,95	—	[78]
	0,75	293	—5,85	—	[78]
Te	0,01	293	—6,25	—4,2	[78]
	0,05	293	—3,92	—3,37	[78]
	0,10	293	—2,38	—2,22	[78]
	0,25	293	—1,235	—1,23	[78]
	0,50	293	—0,59	—0,63	[78]
Pb—Se	Pb 0,5; Se 0,5	293	—6,71	—4,57	[78]

Таблица 26.12

Коэффициенты Холла в сплавах Bi с большим количеством примесей

Сплав	Примесь, %	T, °K	B, $вб/м^2$	R, 10^{-7} $м^3/к$	Литература
Bi—Cd	1	$289 < T < 296$	0,842	—3,78	[79]
	10	$289 < T < 296$	0,842	—1,22	[79]
	40	$289 < T < 296$	0,842	—1,06	[79]
	85,1	$289 < T < 296$	0,842	0,0009995	[79]
Bi—Sn	0,2	$285 < T < 288$	0,842	—0,106	[80]
	1	$285 < T < 288$	0,842	+0,395	[80]
	4	$285 < T < 288$	0,842	+0,287	[80]
	12	$285 < T < 288$	0,842	+0,0903	[80]
	32	$285 < T < 288$	0,842	+0,00470	[80]
	63	$285 < T < 288$	0,842	+0,000621	[80]
Bi—Tl	30	293	—	$160 \cdot 10^{-3}$	[76]
	37	293	—	$1,7 \cdot 10^{-3}$	[76]
	44	293	—	$1,1 \cdot 10^{-3}$	[76]
Bi—Pb	1	$286 < T < 293$	0,894	—1,4	[81]
	2	$286 < T < 293$	0,894	—0,222	[81]
	2,7	$286 < T < 293$	0,894	+0,832	[81]
	3	$286 < T < 293$	0,894	+1,1	[81]
	4	$286 < T < 293$	0,894	—0,267	[81]
	10	$286 < T < 293$	0,894	+0,0932	[81]
	20	$286 < T < 293$	0,894	+0,0577	[81]
	30	$286 < T < 293$	0,894	+0,0180	[81]
	40	$286 < T < 293$	0,894	—0,00103	[81]
	50	$286 < T < 293$	0,894	—0,000739	[81]

26.4. ГАЛЬВАНО-И ТЕРМОМАГНИТНЫЕ ЯВЛЕНИЯ В ФЕРРОМАГНЕТИКАХ

Таблица 26.13

Гальваномагнитные коэффициенты железа и кобальта. Значения термомагнитных коэффициентов см. в сносках

Металл	T, °K	ρ, 10^{-8} $ом \cdot м$	B, $вб/м^2$	R_1 10^{-10} $м^3/к$	Литература
Fe	299	—	0,3—1,7	+5,5	[82]
См. рис. 26.6, 26.9,	313*	11,65	2,3	+6,43	[83]
	323[2]*	13,21	2,3	+7,27	[83]
	333[3]*	12,77	2,3	+8,10	[83]
	343[4]*	13,33	2,3	+8,94	[83]
26.11	14,23	1,090	0,1—2	+0,350	[84]
	20,37	1,103	0,1—2	+0,345	[84]
	63,8	1,491	0,1—2	+0,286	[84]
	83	1,809	0,1—2	+0,330	[84]
	293	11,11	0,1—2	+6,98	[84]

Продолжение табл. 26.13

Металл	T, °K	$\rho \cdot 10^{-8}$ ом·м	B, вб/м²	R_1, 10^{-10} м³/к	Литература
Железо электролитическое	79	1,07	0,1—2,7	+0,130	[85]
	101	2,03	0,1—2,7	+0,347	[85]
	145	3,08	0,1—2,7	+0,860	[85]
	198	6,01	0,1—2,7	+2,04	[85]
	254	8,74	0,1—2,7	+4,07	[85]
	308	11,9	0,1—2,7	+7,36	[85]
	388	17,0	0,1—2,7	+14,8	[85]
	483	23,7	0,1—2,7	+28,0	[85]
	587	32,7	0,1—2,7	+49,5	[85]
	689	43,7	0,1—2,7	+84,2	[85]
	792	57,7	0,1—2,7	+133	[85]
	843	65,7	0,1—2,7	+162	[85]
Железо Армко	286[5]*	—	0,2—3	+6,31	[86]
Co	83	—	0,1—1,6	+1,51	[87]
См. рис. 26.8, 26.9, 26.10	296[6]*	—	0,4—2,1	+5,88	[87]
	373	—	0,1—1,6	+8,65	[87]
	457	—	0,1—1,5	+13,6	[87]
	573	—	0,1—1,5	+21,2	[87]
	789	—	0,1—1,5	+48,3	[87]
	933	—	0,1—1,5	+89,4	[87]
	1113	—	0,1—1,5	+158	[87]
	1233	—	0,2—1	+200	[87]
	1303	—	0,86	+170	[87]
	1373	—	0,86	+60	[87]
	300[7]*	—	0,2—1,3	+5,88	[88]
	400[8]*	—	0,2—1,3	+10,0	[88]
	500[9]*	—	0,2—1,3	+16,0	[88]
	600[10]*	—	0,2—1,3	+24,6	[88]
	700[11]*	—	0,2—1,3	+35,0	[88]
	800[12]*	—	0,2—1,3	+46,8	[88]
<1% примесей	292[13]*	—	0,9—0,95	+3,55	[89]
	298[14]*	—	0,9—0,95	+3,72	[89]
	321[15]*	—	0,9—0,95	+4,44	[89]
	287*	—	0,2—3	+0,19	[90]

*P_1=—20,3·10⁻⁸ *град·м³/(в·к)*; S_1=3,28·10⁻³ *м²/(в·сек)*; Q_1=—20,4·10⁻⁸ *м²/(град·сек)*; [83].

2* P_1=—20,8·10⁻⁸ *град·м³/(в·к)*; S_1=3,39·10⁻³ *м²/(в·сек)*; Q_1=—20,6·10⁻⁸ *м²/(град·сек)*; [83].

3* P_1=—21,4·10⁻⁸ *град·м³/(в·к)*; S_1 = 3,50 · 10⁻³ *м²/(в · сек)*; Q_1=—20,8·10⁻⁸ *м²/* *(град·сек)*; [83].

4* P=—22·10⁻⁸ *град·м³/(в·к)*; S_1=3,61·10⁻³ *м²/(в·сек)*; Q_1=—21·10⁻⁸ *м²/(град·сек)* [83].

5* R_0=0,247·10⁻¹⁰ *м³/к* [86].

6* R_0=0,4·10⁻¹⁰ *м³/к* [87], R_0=—1,33·10⁻¹⁰ *м³/к* [90].

7* Q_1=18·10⁻⁸ *м²/* *(град·сек)* [88].

8* Q_1=27·10⁻⁸ *м²/(град·сек)* [88].

9* Q_1=40·10⁻⁸ *м²/(град·сек)* [88].

10* Q_1=—57·10⁻⁸ *м²/* *(град·сек)* [88].

11* Q_1=78·10⁻⁸ *м²/* *(град·сек)* [88].

12* Q_1=100·10⁻⁸ *м²/(град·сек)* [88].

13* P_1=81·10⁻⁸ *град·м³/(в·к)* [89].

14* P_1=87·10⁻⁸ *град·м³/* *(в·к)*, S_1=3,77·10⁻³ *м²/* *(в·сек)*, Q_1=19·10⁻⁸ *м²/* *(град·сек)* [89].

15* P_1=109·10⁻⁸ *град·м³/* *(в·к)*, S_1=4,32·10⁻³ *м³/* *(в·сек)* Q_1=22·10⁻⁸ *м²/* *(град·сек)* [89].

Таблица 26.14

Гальваномагнитные коэффициенты никеля. Значения термодинамических коэффициентов см. в сносках

Металл	T, °K	ρ, 10^{-8} ом·м	B, вб/м²	R_0, 10^{-10} м³/к	R_1, 10^{-10} м³/к	Литература
Ni (технически чистый) См. рис. 26.7, 26.9, 26.12	313*	12,15	0,667	—	—15,3	[83]
	323[2]*	12,63	0,667	—	—16,0	[83]
	333[3]*	13,04	0,667	—	—16,6	[83]
	343*	13,46	0,667	—	—17,2	[83]
Ni (электролитический)	14,20	0,391	0,1—2	—0,306	—0,568	[84]
	20,37	0,407	0,1—2	—0,301	—0,554	[84]
	63,3	0,821	0,1—2	—0,327	—0,615	[84]
	83,0	1,125	0,1—2	—0,35	—0,845	[84]
	293	7,74	0,1—2	—0,55	—7,33	[84]
Ni (технически чистый)	81	4,15	0,1—2,7	—	—3,54	[85]
	101	4,69	0,1—2,7	—	—4,06	[85]
	157	6,30	0,1—2,7	—	—5,71	[85]
	207	7,88	0,1—2,7	—	—7,50	[85]
	249	9,39	0,1—2,7	—	—9,49	[85]
	307	11,9	0,1—2,7	—	—13,2	[85]
	408	17,4	0,1—2,7	—	—22,4	[85]
	484	22,5	0,1—2,7	—	—31,9	[85]
	536	26,4	0,1—2,7	—	—38,7	[85]
	569	29,2	0,1—2,7	—	—41,8	[85]
	612	32,9	0,1—2,7	—	—37,3	[85]
Примеси: Co 0,23% Cu 0,12%	282	—	0,2—3	—0,56	—5,21	[90]
Ni (99,99%)[5]*	293	7	0,6	—	—7,3	[91]
$\frac{\rho_{4,2°K}}{\rho_{293°K}}$ = =10,3·10⁻³	293	—	2,2	—0,64	—6,92	[92]
	4	—	—	—0,21	—0,17	[92]

* P_1=67·10⁻⁸ *град·м³/(в·к)*, S_1= —6,87·10⁻³ *м²/(в·сек)*, Q_1=59,3·10⁻⁸ *м²/(град·сек)* [83].

2* P_1=107·10⁻⁸ *град·м³/(в·к)*, S_1=—6,65·10⁻³ *м²/(в·сек)*, Q_1=66,2·10⁻⁸ *м²/(град·сек)* [83].

3* P_1= 127·10⁻⁸ *град·м³/(в·к)*, S_1=—6,47·10⁻³ *м²/(в·сек)*, Q_1=73,1·10⁻⁸ *м²* *(град·сек)* [83].

4* P_1 = 148·10⁻⁸ *град м³/(в·к)*, S=—6,28·10⁻³*м²/* *(в·сек)*, Q_1=80·10⁻⁸ *м²/(град·сек)* [83].

5* P_1=55·10⁻⁸ *град·м³/* *(в·к)*, S_1=—4,9·10⁻³ *м²/* *(в·сек)*, Q_1=48,2·10⁻⁸ *м²/(град·сек)* [91].

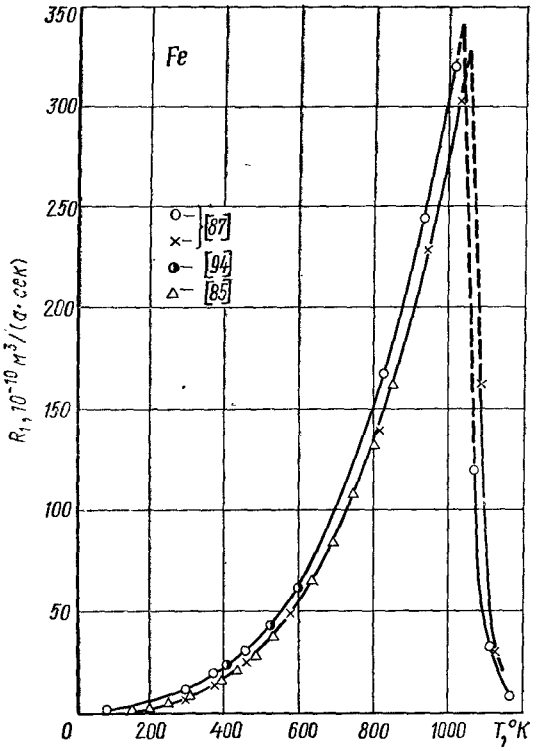


Рис. 26.6. Зависимость аномального коэффициента Холла R_1 железа от температуры.

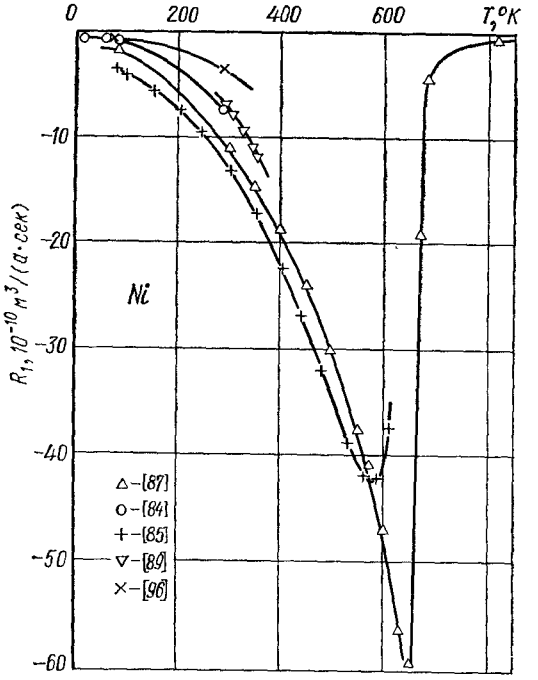


Рис. 26.8. Зависимость аномального коэффициента Холла никеля от температуры.

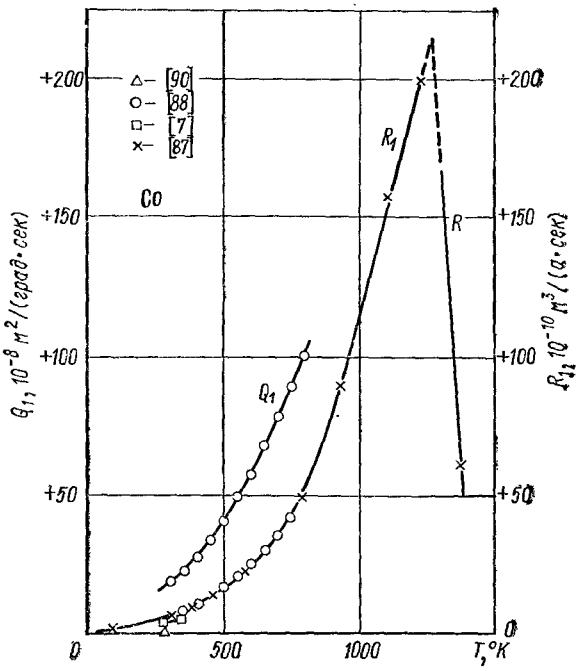


Рис. 26.7. Зависимость аномального коэффициента Холла и аномального коэффициента Эттингсгаузена кобальта от температуры.

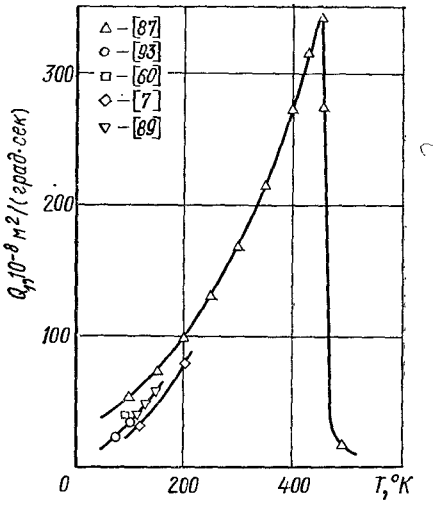


Рис. 26.9. Зависимость аномального коэффициента Эттингсгаузена никеля от температуры.

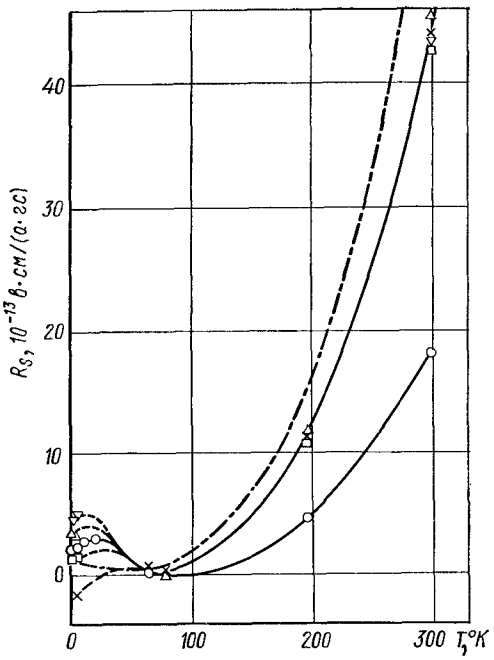


Рис. 26.10. Зависимость ферромагнитного коэффициента Холла для усов железа от температуры [98]. (Штрих-пунктирная линия — данные [97] для поликристаллического железа).

Образец	Ось усов железа и направление первичного тока	Направление магнитного поля	Направление э. д. с. Холла	$\gamma = \frac{\rho_{298°K}}{\rho_{4,2°K}}$
×	<111>	<110>	<112>	196
△	<111>	<110>	<112>	213
○	<100>	<010>	<001>	213
□	<100>	<010>	<001>	452
▽	<100>	<010>	<001>	180

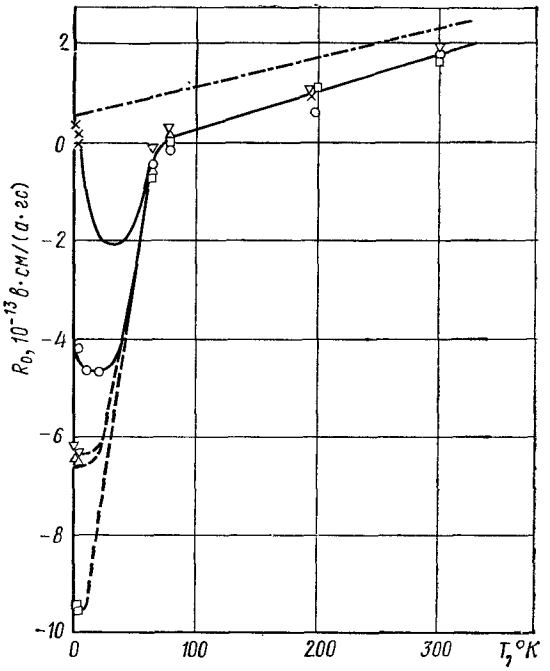


Рис. 26.11. Зависимость обыкновенного коэффициента Холла для усов железа от температуры [98]. Обозначения те же, что на рис. 26.10.

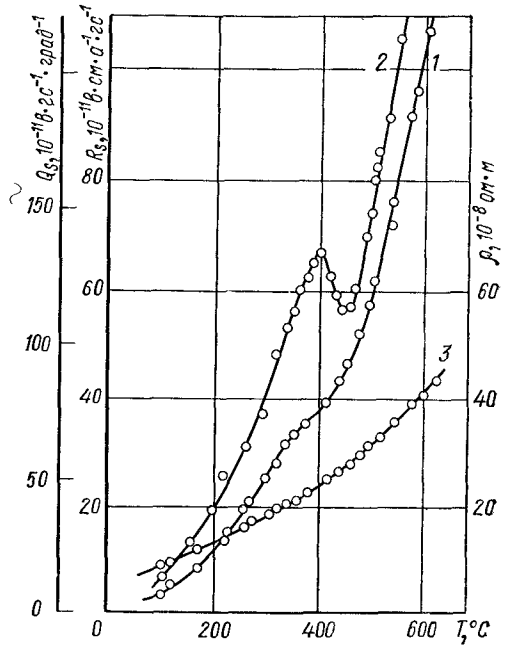


Рис. 26.12. Зависимость ферромагнитных коэффициентов Холла (*1*) и Нернста — Эттингсгаузена (*2*) и удельного сопротивления (*3*) для кобальта от температуры [99].

Гальваномагнитные коэффициенты для сплавов Fe
Значения термомагнитных коэффициентов см. в сносках

Сплав	T, °K	ρ, 10^{-8} ом·м	B, вб/м²	R_0, 10^{-10} м³/к	R_1, 10^{-10} м³/к	Литература
Fe—Co*						
Атомное содержание Co, %						
33	297	—	1,7—1,8	—	+1,33	[100]
Fe—Ni						
Массовое содержание Ni, %:						
0[2]*	293	12,0	0,3—2,25	—	+11,2	[102]
1,07[3]*	293	14,5	0,3—2,25	—	+16,9	[102]
7,05[4]*	293	25,2	0,3—2,25	—	+42,5	[102]
13,11[5]*	293	33,1	0,3—2,25	—	+61,5	[102]
56[6]*	293	29	0,3—2,25	—	+46,9	[102]
Атомное содержание Ni, %						
20	20	4,6	0,6—1,4	—2,35	—1,95	[96]
33	290	14,4	0,6—1,4	—1,7	—0,75	[96]
84						
Массовое содержание Ni, %						
45	301	—	0,25—3	—1,87	+87,5	[103]
71,8	289	—	0,25—3	—1,88	+3,39	[103]
Атомное содержание Ni, %						
20	100	17	до 3,3	—1,8	17	[104]
20	200	22,5	» 3,3	—1,58	26	[104]
20	300	30	» 3,3	—1,4	42	[104]
15	100	17,5	3,3	—1,2	20	[104]
15	200	23	» 3,3	—1,35	29	[104]
15	300	30	» 3,3	—1,18	44	[104]
10	100	15	» 3,3	—0,2	17	[104]
10	200	21	» 3,3	—0,6	27	[104]
10	300	27,5	» 3,3	—0,3	39	[104]
5	100	11	» 3,3	+0,15	9	[104]
5	200	15	» 3,3	—0,10	17	[104]
5	300	22	» 3,3	0,00	28	[104]
Fe—Ni	См. рис. 26.14					[105]
Fe—C	293	—	0,5—1,1	—	+13,36	[106]
	323[7]*	—	—	—	—	[106]
Массовое содержание C, %	293	22,67	0,5—3	+5,39	+18,2	[107]
1,18						
Fe—Si						
Массовое содержание Si, %						
0,25	291	—	0,71	—	+11,5	[94]
0,25	314[8]*	—	0,1—2,2	—	—	[94]
0,25	402	—	0,71	—	+23,4	[94]
0,25	508	—	0,71	—	+44,3	[94]
0,25	580	—	0,71	—	+62,3	[94]
3,80	292	—	0,6	—	+152	[94]

* $Q_1 = 25 \cdot 10^{-8}$ м²/(град·сек) [100].
2* $Q_1 = -9{,}75 \cdot 10^{-8}$ м²/(град·сек) [102].
3* $Q_1 = -4{,}21 \cdot 10^{-8}$ м²/(град·сек) [102].
4* $Q_1 = 3{,}06$ м²/(град·сек) [102].
5* $Q_1 = 49{,}5 \cdot 10^{-8}$ м²/(град·сек) [102].
6* $Q_1 = 1{,}33 \cdot 10^{-8}$ м²/(град·сек) [102].
7* $S_1 = 6{,}87 \cdot 10^{-8}$ м²/(в·сек), $Q_1 = -16{,}6 \cdot 10^{-8}$ м²/(град·сек); $P_1 = -67 \cdot 10^{-8}$ град·м³/(в·к) [106].
8* $Q_1 = -0{,}8 \cdot 10^{-8}$ м²/(град·сек) [94].

Сплав	T, °К	ρ, 10^{-8} *ом·м*	B, *вб/м²*	R_0, 10^{-10} *м³/к*	R_1, 10^{-10} *м³/к*	Литература
3,80	311*	—	0,1—2,2	—	—	[94]
3,80	403	—	0,6	—	+175	[94]
3,80	517	—	0,6	—	+208	[94]
3,80	583	—	0,6	—	+226	[94]
Массовое содержание Si, %						
0	298	11,0	—	—	+6.53	[108]
1,3	300	32,5	—	—	+49,7	[108]
3,01	299	46,6	—	—	+95,5	[108]
3,91	298	63,7	—	—	+161	[108]
5,09	300	76,5	—	—	+191	[108]
Fe—Si	См. рис. 26.15					[109]
Fe—Cu						
Массовое содержание Cu, %						
0	293	12,0	0,3—2,25	—	+11,2	[102]
0,804	293	13,6	0,3—2,25	—	+12,2	[102]
2,0	293	13,4	0,3—2,25	—	+19,0	[102]
4,0	293	12,7	0,3—2,25	—	+16,3	[102]
7,05	293	15,8	0,3—2,25	—	+15,2	[102]
Fe—Cr						
Атомное содержание Cr, %						
94,4	77	—	—	—	10,8	[110]
94,4	293	—	—	—	2,5	[110]
90	77	—	—	—	4,6	[110]
90	293	—	—	—	2,6	[110]
85	77	—	—	—	11,6	[110]
85	293	—	—	—	1,9	[110]
70	293	—	—	—	3,8	[110]
0,75	309	14,4	2,109	0,414	11,6	[111]
0,75	231	10,6	2,119	0,924	5,6	[111]
0,75	112	4,8	2,132	0,789	0,542	[111]
0,75	20	2,0	2,137	1,83	2,31	[111]
0,75	4,2	2,0	2,137	1,71	2,63	[111]
2,3	316	21,1	2,064	0,599	22,2	[111]
2,3	231	15,8	2,078	0,402	12,3	[111]
2,3	112	8,3	2,095	1,18	2,78	[111]
2,3	20	4,5	2,101	2,26	6,57	[111]
2,3	4,2	—	2,101	1,75	7,88	[111]
5,1	313	30,4	1,988	0,626	42,8	[111]
5,1	331	2,35	2,00	0,814	22,3	[111]
5,1	1.2	13,8	2,03	1,55	6,19	[111]
5,1	20	—	2,03	2,87	10,6	[111]
5,1	4,2	9,1	2,03	2,23	11,9	[111]

* Q_1=6,4·10⁻⁸ *м²/(град·сек)* [94].

Сплав	T, °K	ρ, 10^{-8} ом·м	B, вб/м²	R_0, 10^{-10} м³/к	R_1, 10^{-10} м³/к	Литература
Fe—Cr						
Атомное содержание Cr, %						
12,7	308	42,3	1,74	0,671	64,2	[111]
12,7	231	33,0	1,75	0,887	39,6	[111]
12,7	112	19,1	1,78	1,64	11,8	[111]
12,7	20	13,7	1,79	4,48	7,08	[111]
12,7	4,2	13,7	1,79	4,08	7,90	[111]
25,1	307	47,4	1,42	0,614	73,3	[111]
25,1	231	36,7	1,45	0,808	45,4	[111]
25,1	112	20,4	1,48	1,38	14,6	[111]
25,1	20	13,5	1,49	1,87	6,61	[111]
25,1	4,2	13,4	1,49	2,53	5,05	[111]
FeCr	См. рис. 26. 16					[122]
FeCd	См. рис. 26. 17					[122]
FeMo	См. рис. 26. 18					[123]
Fe_3Pt	См. рис. 26. 19					[124]
FeMn	См. рис. 26. 20					[129]
FeV	См. рис. 26. 21					[129]

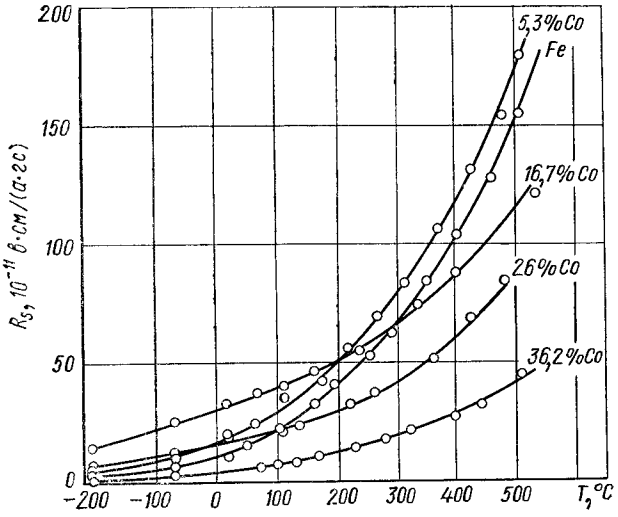


Рис. 26.13. Зависимость ферромагнитного коэффициента Холла от температуры для железо-кобальтовых сплавов [101].

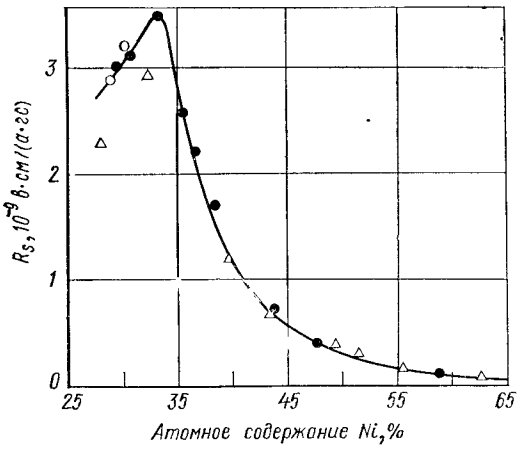


Рис. 26.14. Зависимость ферромагнитного коэффициента Холла сплава Fe — Ni от концентрации Ni [105] (Δ, ●, ○ — данные разных авторов).

Таблица 26.16

Коэффициенты Холла для сплавов кобальта с никелем [115]

Массовое содержание Ni, %	T, °K	B, вб/м²	R_0, 10^{-10} м³/к	R_1, 10^{-10} м³/к
0	287	0,2—3	—1,33	+0,19
15	286	0,2—3	—1,64	+1,48
30	285	0,2—3	—1,96	+2,16
45	285	0,2—3	—1,95	+2,73
62	282	0,2—3	—1,99	+1,99
78	284	0,2—3	—1,56	—0,16
89	281	0,2—3	—1,13	—8,25
100	282	0,2—3	—0,56	—5,21

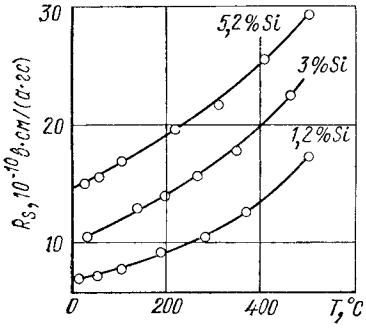


Рис. 26.15. Зависимость ферромагнитного коэффициента Холла от температуры для сплавов Fe — Si различного состава [109].

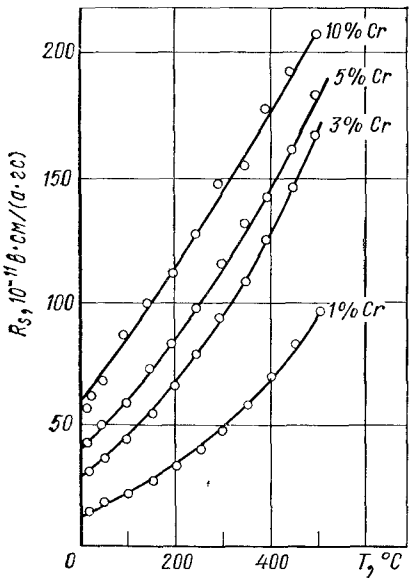


Рис. 26.16. Зависимость ферромагнитного коэффициента Холла от температуры для сплавов Fe — Cr различного состава [112].

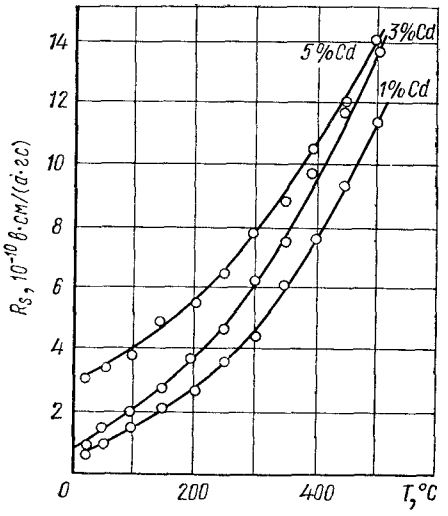


Рис. 26.17. Зависимость ферромагнитного коэффициента Холла от температуры для сплавов Fe — Cd различного состава [112].

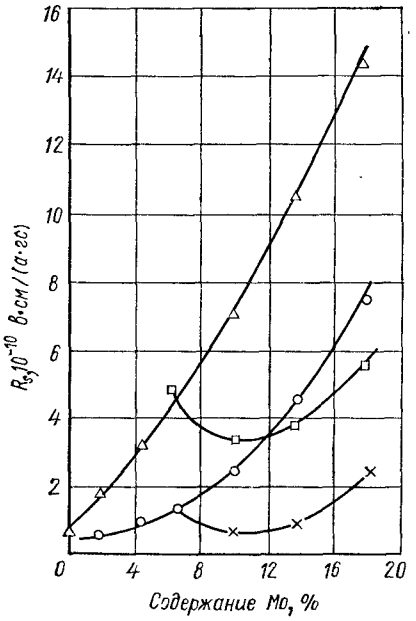


Рис. 26.18. Зависимость ферромагнитного коэффициента Холла для сплава Fe — Mo от концентрации Mo[113]:
после закалки: △ — $T = 18$°C; ○ — $T = -195$°C; после отжига: □ — $T = 18$°C; × — $T = -195$°C.

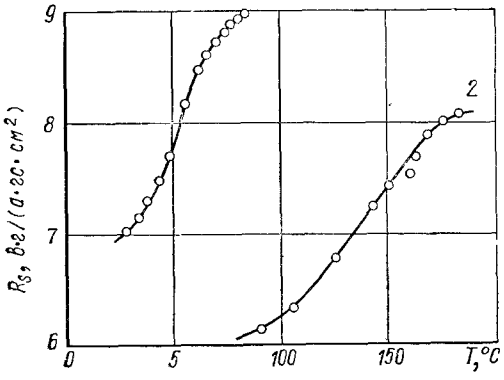


Рис. 26.19. Зависимость ферромагнитного коэффициента Холла для сплава Fe_3Pt от температуры [114]:
1 — для закаленного состояния; *2* — для отожженного состояния.

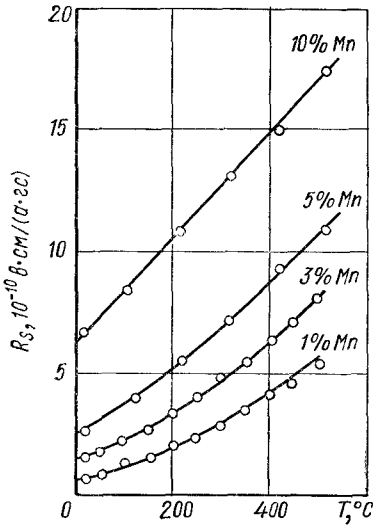


Рис. 26.20. Зависимость ферромагнитного коэффициента Холла для сплавов Fe — Mn различного состава от температуры [109].

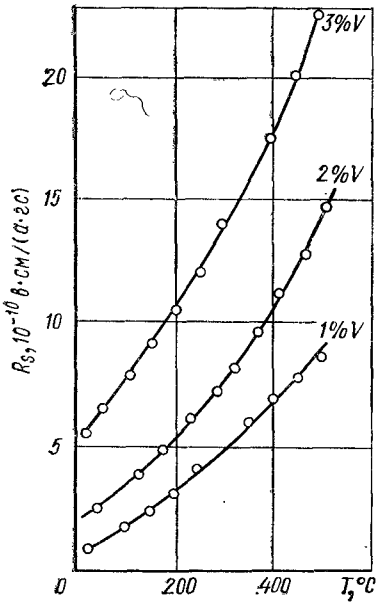


Рис. 26.21. Зависимость ферромагнитного коэффициента Холла для сплавов Fe — V различного состава от температуры [102].

Таблица 26.17

Гальваномагнитные коэффициенты для сплавов с никелем
Значения термомагнитных коэффициентов см. в сносках

Сплав	T, °K	ρ, 10^{-8} ом·м	B, вб/м²	$R_э$, 10^{-10} м³/к	R_1, 10^{-10} м³/к	Литература
Ni—Al						
Атомное содержание Al, %						
8	20	12,4	—	—1,8	—38	[96]
8	77	13,1	1,4	—1,8	—44	[96]
8	290	24,8	—	—1,0	86	[96]
Ni—V						
Атомное содержание V, %						
7	20	33,3	—	—1,6	—239	[96]
7	77	34,1	1,4	—1,95	—257	[96]
7	290	43,9	—	—4,8	—226	[96]
Ni—Cr						
нихром	290	—	—	+5	+199	[94]
	393*	—	0,1—1,1	+4	+220	[94]
Массовое содержание, %						
9,6 Cr+0,2 Mn+0,3 Si	293	67,0	+1,7	—	—1,63[2*]	[116]
20,7% Cr+0,6% Mn+0,3%Si	293	104	1,7		—0,402	[116]
29,2%Cr+0,9% Mn+0,6% Si	293	108, 5	1,7		—0,082	[116]
Ni—Mo						
Атомное содержание Mo, %						
3	20	20,9	1,4	—1,15	—84	[96]
3	77	21,9	1,4	—1,05	—85	[96]
3	290	30,7	1,4	—1,5	—108	[96]
Ni—Mo	См. рис. 26.22					[143]
Ni—W						
Атомное содержание W, %						
1,6	20	11,0	1,4	—0,7	—21	[96]
1,6	77	11,9	1,4	—1,05	—22	[96]
1,6	290	19,6	1,4	—1,1	—40,7	[96]
Ni—Mn						
Атомное содержание Mn, %						
2,5	309	71,9	3	+0,64	+34	[117]
Ni—Pd						
Атомное содержание Pd, %						
93	293	—	—	—	—5,66	[118]
93	369	—	—	—	—2,48	[118]
93	466	—	—	—	—2,21	[118]
98,5	291	—	—	—	—2,43	[118]
98,5	370	—	—	—	—2,00	[118]
98,5	464	—	—	—	—1,65	[118]
Ni—Cu[3*]						
Массовое содержание Cu, %						
0[4*]	293	—	0,1—2,2	—0,65	—7,65	[102]
5[5*]	293	—	0,1—2,2	—1,05	—29,8	[102]

* Q_1=88·10^{-8} м²/(*град·сек*) при T=478° K [94].
2* В работе [116] из измерений гальваномагнитных эффектов определен коэффициент $R=Ed/IH$.
3* Значения R и Q для Ni—Cu см. в работах [118, 121].
Значения Q_1, 10^{-8} м²/(*град·сек*) [102]: 4* 34,8; 5* 118.

Сплав	T, °K	ρ, 10^{-8} ом·м	B, вб/м²	R_0, 10^{-10} м³/к	R_1, 10^{-10} м³/к	Литература
10 *	293	—	0,1—2,2	—1,1	—52,0	[102]
15[2]*	293	—	0,1—2,2	—1,1	—59,1	[102]
25[1]*	293	—	0,1—2,2	—1,7	—83,7	[102]
30[1]*	293	—	0,1—2,2	—1,8	—41,9	[102]
35	293	—	0,1—2,2	—2,6	—6,31	[102]
Атомное содержание Cu, %						
9	20	8,3	1,4	—2,4	—9,6	[96]
9	77	9,3	1,4	—2,1	—10,3	[96]
9	290	18,5	1,4	—1,15	—28,9	[96]
18	20	15,5	1,4	—2,5	—20	[96]
18	77	16,7	1,4	—2,3	—22,3	[96]
18	290	28,8	1,4	—1,35	—45,4	[96]
40	64	34,12	⩽1,55	—2,03	—34,86	[119]
40	77	35,34	⩽1,55	—1,87	—36,00	[119]
40	112	37,76	⩽1,55	—1,75	—39,19	[119]
40	169	42,00	⩽1,55	—1,80	—44,89	[119]
40	231	45,33	⩽1,55	—2,22	—	[119]
40	250	—	⩽1,55	—2,16	—	[119]
40	281	—	⩽1,55	—1,67	—	[119]
40	310	47,29	⩽1,55	—1,50	—	[119]
40	342	—	⩽1,55	—1,55	—	[119]
30	64	24,89	⩽1,55	—1,96	—32,0	[119][5]*
30	77	25,31	⩽1,55	—1,86	—34,4	[119]
30	122	27,55	⩽1,55	—1,69	—38,6	[119]
30	169	31,40	⩽1,55	—1,48	—47,1	[119]
30	230	36,22	⩽1,55	—1,47	—57,3	[119]
30	269	39,55	⩽1,55	—1,40	—69,4	[119]
30	295	41,89	⩽1,55	—1,65	—81,6	[119]
30	304	42,55	⩽1,55	—1,93	—92,7	[119]
30	316	43,71	⩽1,55	—2,32	—203,0	[119]
30	341	44,90	⩽1,55	—2,66	—	[119]
30	399	46,48	⩽1,55	—1,83	—	[119]
20	77	16,22	⩽1,55	—2,06	—18,5	[119]
20	112	17,55	⩽1,55	—1,97	—20,6	[119]
20	169	20,26	⩽1,55	—1,85	—25,4	[119]
20	231	23,83	⩽1,55	—1,67	—31,5	[119]
20	298	—	⩽1,55	—1,37	—47,4	[119]
20	302	29,27	⩽1,55	—	—	[119]
Атомное содержание Ni, %						
100	$T>T_c$	—	—	—0,6	—4,1	[120]
90,62		—	—	—1,2	—38,9	[120]
81,23		—	—	—1,4	—47,0	[120]
71,68		—	—	—1,7	—32,5	[120]
61,87		—	—	—1,6	—25,0	[120]
CuNi+добавки						
Массовое содержание Ni, % 68	Монель 29,5% Cu 1,5% Fe 1% Mn	298	—	0,04—1,1	—1,1	—35,1	[94]
		329[5]*	—	0,04—1,1	—	—	[94]
		339	—	0,04—1,1	—2,7	—4,2	[94]
		366[6]*	—	0,04—1,1	—	—	[94]

Значения Q_1, 10^{-3} м²/(*град·сек*) [102]: * 207; [2]* 256; [3]* 350; [4]* 174.
Значения Q_0, Q_1, 10^{-8} м²/(*град·сек*) [94]: [5]* $Q_0 = 8$, $Q_1 = 370$; [6]* $Q_0 = 12$; $Q_1 = 221$.

Сплав		T, °K	ρ, 10^{-8} ом·м	B, вб/м²	R_0, 10^{-10} м³/к	R_1, 10^{-10} м³/к	Литература
		369	—	0,04—1,1	—2,5	—10	[94]
		400*	—	0,04—1,1	—	—	[94]
		410	—	0,53	—	—2,38[3]*	[94]
		440[2]*	—	0,106	—	—	[94]
40	константан	293	—	1,1	—	—0,90[3]*	[60]
37,77	константан 59,62% Cu 1,39% Mn 0,65% Fe	80 293	— —	0,4—1,6 0,4—1,6	— —	—0,91[3]* —1,16[3]*	[122] [122]
20	нейзильбер 50% Cu 30% Zn	293		—	—	—0,53[3]*	[123]
9,21	нейзильбер 87,35% Cu 2,89% Al 0,50% Fe	80 293	— —	0,4—1,6 0,4—1,6	— —	—0,12[3]* —0,32[3]*	[122] [122]
4	манганин	423 633 1083	— — —	0,41 0,494 0,492	— — —	—0,569[3]* —0,455[3]* —0,460[3]*	[124] [124] [124]
4,88	манганин 80,88% Cu 12,72% Mn 1,27% Fe	80 293	— —	—1,6 —1,6	— —	—0,32[3]* —0,52[3]*	[122] [124]
4,11	манганин 85,40% Cu 10,03% Mn 0,42% Fe	80 293	— —	1,6 1,6	— —	—0,33[3]* —0,55[3]*	[122] [122]
Cu—Ni		См. рис. 26.23, 26.25					[125, 126]
Ni—Co		См. рис. 26.24, 26.28					[125, 128]
Ni с малыми добавками		См. рис. 26.27					[127]
Ni—Si Атомное содержание Si, %							
3		20	9,5	1,4	—0,7	—19	[96]
3		77	10,1	1,4	—1,0	—20	[96]
3		290	18,0	1,4	—1,1	—40	[96]

Значения Q_0, Q_1, 10^{-8} м²/(град·сек) [94]: * Q_0=20, Q_1=65; [2]* Q=9,7.
[3]* В работах [121]—[124] из измерений гальвано- и термомагнитных эффектов определены коэффициенты $R=Ed/IH$ и $Q=Ed/\Delta TH$.

Сплав	T, °К	ρ, 10^{-8} ом·м	B, вб/м²	R_0, 10^{-10} м³/к	R_1, 10^{-10} м³/к	Литература
Ni—Sn						
Атомное содержание Sn, %						
3	20	10,8	1,4	—0,85	—19	[96]
3	77	11,4	1,4	—0,9	—19	[96]
3	290	17,2	1,4	—2,0	—36	[96]
Ni—Cu—Fe						
Атомное содержание, %	300	10,6	4,79	—0,753	—12,0	[129]
97Ni+2Cu+1Fe	27	3,62	5,18	—0,853	—1,67	[129]
	20	2,96	5,21	—0,978	—1,19	[129]
93Ni+4,5 Cu+2,5Fe	300	15,3	4,84	—1,05	—15,0	[129]
	77	6,99	5,23	—1,40	—38,9	[129]
	20	5,79	5,26	—1,53	—2,78	[129]
86Ni+9,3Cu+4,7Fe	300	23,4	4,49	—1,42	—20,5	[129]
	77	13,6	5,00	—2,19	—6,36	[129]
	20	12,8	5,06	—2,28	—5,49	[129]
70Ni+20Cu+10Fe	300	32,8	4,77	—1,82	+5,06	[129]
	77	18,0	5,15	—2,53	+3,02	[129]
	30	16,7	5,19	—2,72	+2,94	[129]
$Ni_3(MnFe)$						
Ni_3Mn	300	—	—	+0,09	0	[130]
75,2Ni+20Mn+4,8Fe	300	—	—	—0,41	12,69	[130]
75Ni+16Mn+9Fe	300	—	—	—1,21	25,58	[130]
73,3Ni+12,4Mn+13,3Fe	300	—	—	—1,65	27,15	[130]
74,6Ni+9,4Mn+16Fe	300	—	—	—1,88	22,53	[130]
74,5Ni+6,3Mn+19,2Fe	300	—	—	—2,03	14,52	[130]
Ni_3Fe	300	—	—	—2,13	4,43	[130]
75Ni+21Mn+4Co	300	—	—	—1,76	27,8	[130]
75,4Ni+16Mn+8,6Co	300	—	—	—1,36	7,69	[130]
70Ni+17,5Mn+12,5Co	300	—	—	—1,99	13,93	[130]
37,5Ni+5,7Cr+56,8Fe (инварный сплав)	4,2	—	—	—	24	[131]

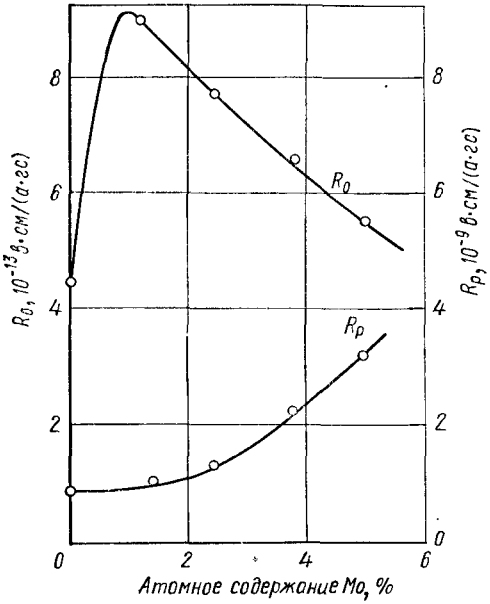


Рис. 26.22. Зависимость коэффициентов Холла R_0 и R_p от содержания Mo в сплавах с Ni в парамагнитной области температур [143].

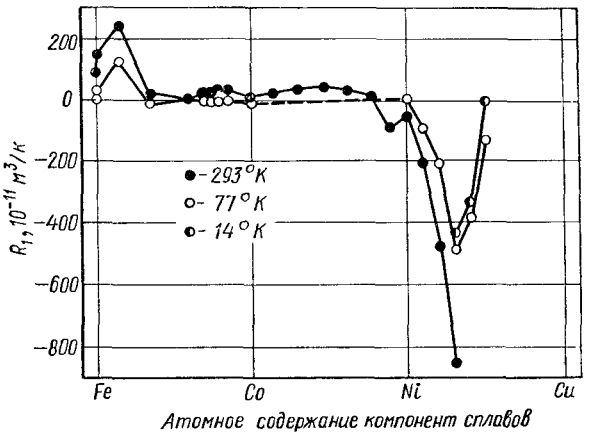


Рис. 26.24. Аномальные коэффициенты Холла для сплавов Fe — Co, Co — Ni, Ni — Cu при температуре 20° С [125].

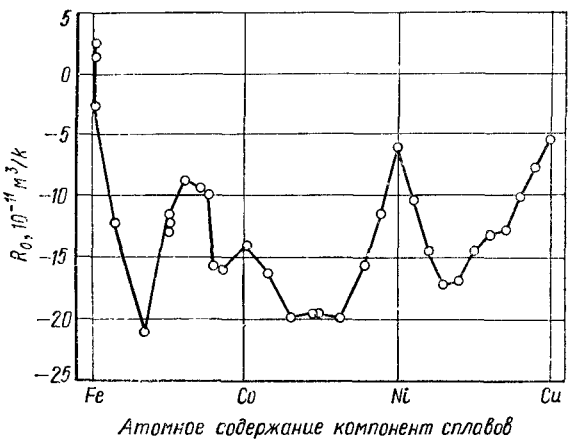


Рис. 26.23. Обыкновенные коэффициенты Холла для сплавов Fe — Co, Co — Ni, Ni — Cu при температуре 20° С [125].

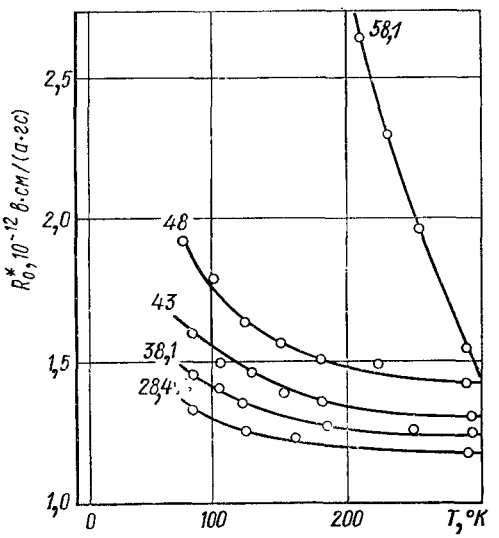


Рис. 26.25. Зависимость обыкновенного коэффициента Холла для сплавов Cu — Ni с большим содержанием никеля от температуры [126]. Числа у кривых означают атомное содержание Ni, %.

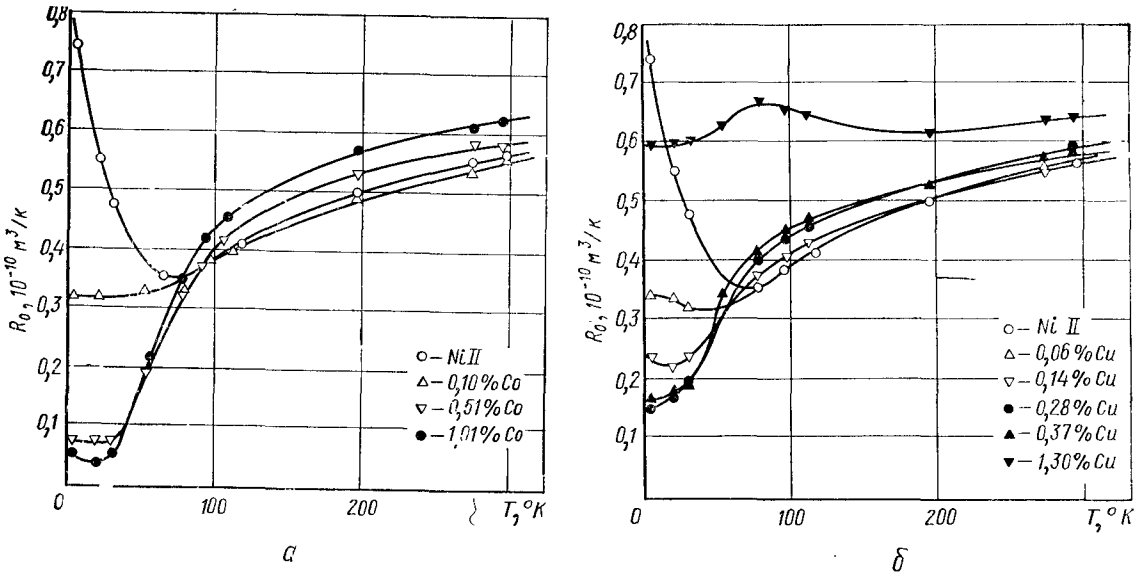


Рис. 26.26. Зависимость от температуры обыкновенного коэффициента Холла для сплавов Ni с малыми добавками Co (*а*) и с малыми добавками Cu (*б*) [127].

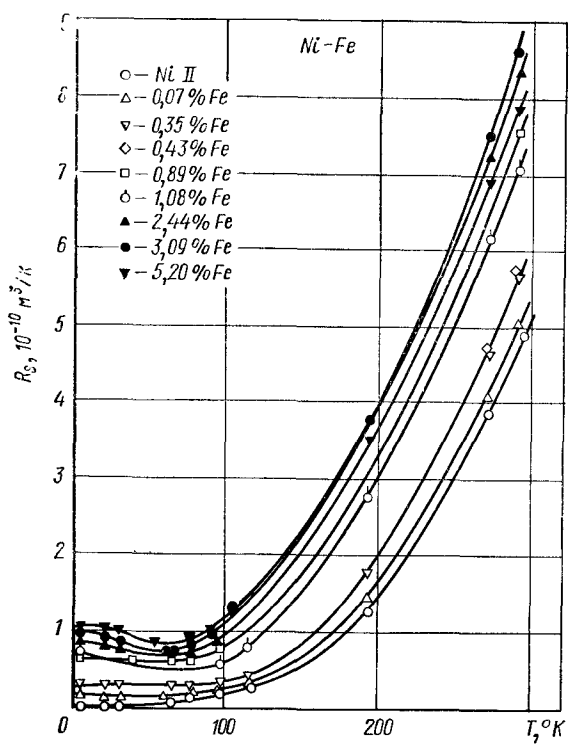


Рис. 26.27. Зависимость ферромагнитного коэффициента Холла для сплавов Ni с малыми добавками Fe от температуры [127].

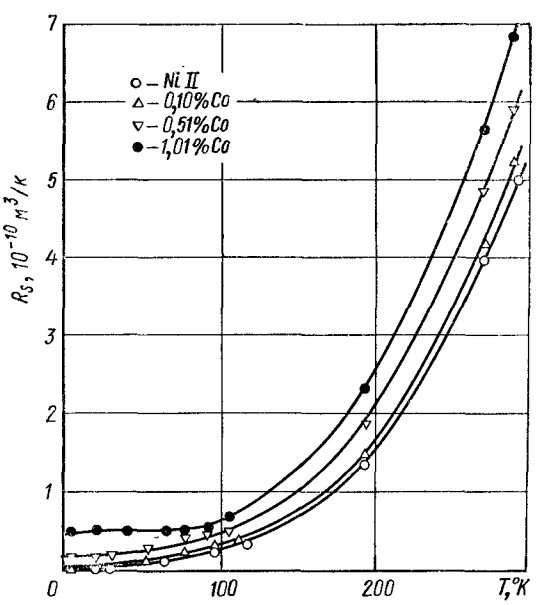


Рис. 26.28. Зависимость ферромагнитного коэффициента Холла для сплавов Ni с малыми добавками Co от температуры [127].

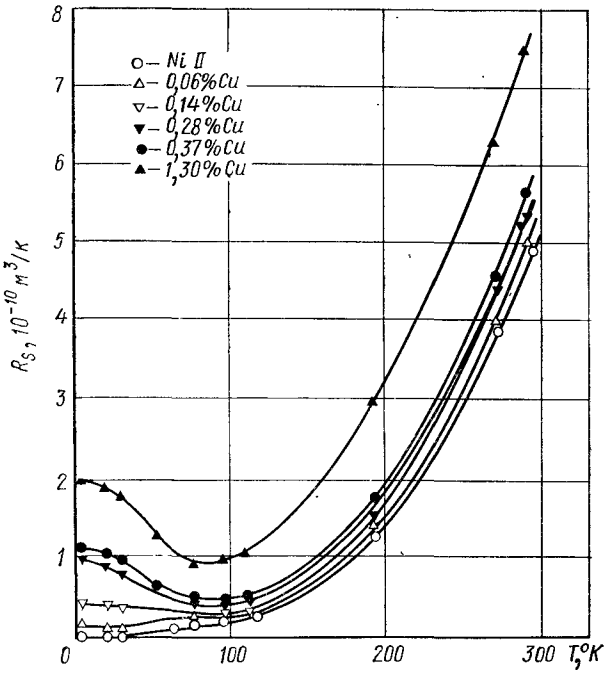


Рис. 26.29. Зависимость ферромагнитного коэффициента Холла для сплавов Ni с малыми добавками Cu [27].

Таблица 26.18

Гальваномагнитные коэффициенты редкоземельных ферромагнетиков и их сплавов
Значения термомагнитных элементов см. в сносках

Металл	T, °K	ρ, 10^{-8} ом·м	R_0, 10^{-10} м³/к	R_1, 10^{-10} м³/к	Литература
Gd* $\left(\frac{\rho_{293°K}}{\rho_{4,2°K}} = 50\right)$ $B=0\div3{,}2$ вб/м²	227	117	—	—2900	[132]
	194,5	97	—	—2400	[132]
	182	90	—	—2100	[132]
	168	83	—	—1800	[132]
	146	71	—	—1330	[132]
	119,5	56	—	—885	[132]
	105,3	48	—	—692	[132]
	86	38	—	—410	[132]
	77	32	—	—282	[132]
	56,5	19,5	—	—128	[132]
	40,5	10	—	—51	[132]
	32	6	—	—10,3	[132]
	20	2,5	—	—3,9	[132]
	>290	—	—3,0	—2700	[132]
$\left(\frac{\rho_{293°K}}{\rho_{4,2°K}} = 51\right)$	>290	—	—2,0	—3840	[133]
Монокристалл	>290	—	—	$R_b = -4570$ $R_c = -2570$[2*]	[134]

* $P = 11{,}6\cdot10^{-4}$ град·м³/(в·к) (поликрист. Gd), $P = 70\cdot10^{-4}$ град·м³/(в·к) (монокрист. Gd) [12].
2* R_b — вдоль оси b, R_c — вдоль оси c.

Металл	T, °K	ρ, 10^{-8} ом·м	R_0, 10^{-10} м³/к	R_1, 10^{-10} м³/к	Литература
Пленка	300	—	—8,0	—1700	[135]
Монокристалл $\left(\frac{\rho_{293°K}}{\rho_{4,2°K}} = 46\right)$	См. рис. 26.30, 26.31				[136]
Tb* $\left(\frac{\rho_{293°K}}{\rho_{4,2°K}} = 38\right)$ $B = 0 \div 3{,}2$ вб/м²	195	87	—	+17,5	[132]
	180	79	—	+41,7	[132]
	170	74	—	+37,3	[132]
	160	69	—	+61,1	[132]
	146	62	—	+64,8	[132]
	130	54	—	+62,5	[132]
	115	46	—	+46,5	[132]
	108	43	—	+39,1	[132]
	100	39	—	+30,7	[132]
	90	35	—	+25,6	[132]
	80	30	—	+15,3	[132]
	60	20	—	+4,47	[132]
	50	15	—	—1,20	[132]
	39	11	—	—6,33	[132]
	29,5	8	—	—7,84	[132]
	20	5	—	—10,5	[132]
	> 230	—	—4,48	—47,50	[132]
Монокристалл[2*]	> 230	—	—1,0	—40,5	[138][5*]
$H \parallel < 10\bar{1}0 >$	140	—	—	+22,4	[138]
	205	—	+8,8	—	[138]
	< 90	—	—1,0	—	[138]
	30	—	—	0	[138]
$H \parallel$ оси c (см. рис. 26.32)	> 230	—	—3,6	—77,0	[138]
$\frac{\rho_{293°K}}{\rho_{4,2°K}} = 20$[3*]	> 230	—	—4,2	—52	[139][5*]
Монокристалл					
$H \parallel < 0001 >$	> 230	—	—1,1	—40	[139]
$H \parallel < 1210 >$	150	—	+3	+12	[139]
Dy[4*]					
Монокристалл	> 178	—	—1,1	—32,6	[140][5*]
$\frac{\rho_{293°K}}{\rho_{4,2°K}} = 10$	> 178	—	—5,7	—25,5	[140]
$H \parallel < 10\bar{1}0 >$					

* $P = 29{,}3 \cdot 10^{-4}$ град·м³/(в·к) (поликрист. Tb) [12].
2* $B = 0 \div 3{,}2$ вб/м².
3* $B = 0 \div 3{,}4$ вб/м².
4* $P = 30{,}4 \cdot 10^{-4}$ град·м³/(в·к) (поликрист. Dy) [12].
5* В работах [138—140] R_S определялось из выражения: $e = R_0 H + R_S 4\pi M$ [сравн. с (26.2), с. 468].

Металл	T, °K	ρ, 10^{-8} ом·м	R_0, 10^{-10} м³/к	R_1, 10^{-10} м³/к	Литература
Монокристалл $\frac{\rho_{293°K}}{\rho_{4,2°K}} = 16$					
$\mathbf{H} \parallel \langle 1120 \rangle$	> 178	—	—0,3	—18	[141]*
$\mathbf{H} \parallel \langle 0001 \rangle$ (см. рис. 26.33)	> 225	—	—3,7	—23	[141]
Ho					
Поликристалл $\frac{\rho_{293°K}}{\rho_{4,2°K}} = 12$	> 160	—	—2,2	—2,8	[142]*
Gd—Y					
Атомное содержание Gd, %					
100	240	79	—	—2400	[144]
100	200	66	—	—1670	[144]
100	150	48	—	—950	[144]
100	100	31	—	—410	[144]
100	50	11	—	—75	[144]
100	20	3	—	—8	[144]
100	> 350	—	—	—2270	[144]
84	240	98	—	—2780	[144]
84	200	85	—	—1960	[144]
84	150	66	—	—1170	[144]
84	100	47	—	—650	[144]
84	50	37	—	—240	[144]
84	20	19	—	—65	[144]
84	> 350	—	—	—219	[144]
72	200	99	—	—2160	[144]
72	150	81	—	—1220	[144]
72	100	61	—	—570	[144]
72	50	38	—	—182	[144]
72	20	28	—	—50	[144]
72	> 300	—	—	—2130	[144]
55	150	88	—	—2140	[144]
55	100	71	—	—1300	[144]
55	50	51	—	—570	[144]
55	20	43	—	—300	[144]
55	> 250	—	—	—1900	[144]
46	> 200	—	—	—1700	[144]

* См. сноску 5* на с. 493.

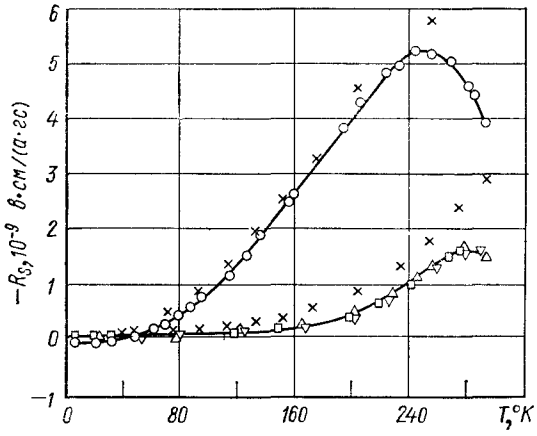


Рис. 26.30. Зависимость ферромагнитного коэффициента Холла для монокристаллов гадолиния от температуры [136]:

▽ — **H** ∥ *a*; □ — **H** ∥ *b*; ○ — **H** ∥ *c*; ▽ — **H** ∥ *a*; × — данные [134].

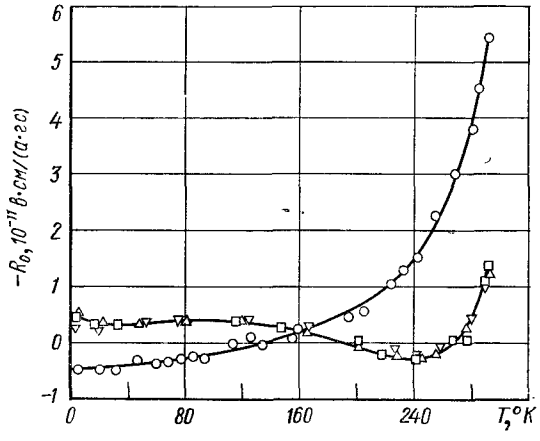


Рис. 26.31. Зависимость обыкновенного коэффициента Холла для монокристаллов гадолиния от температуры [136]:

▽ — **H** ∥ *a*; □ — **H** ∥ *b*; ○ — **H** ∥ *c*; ▽ — **H** ∥ *a*.

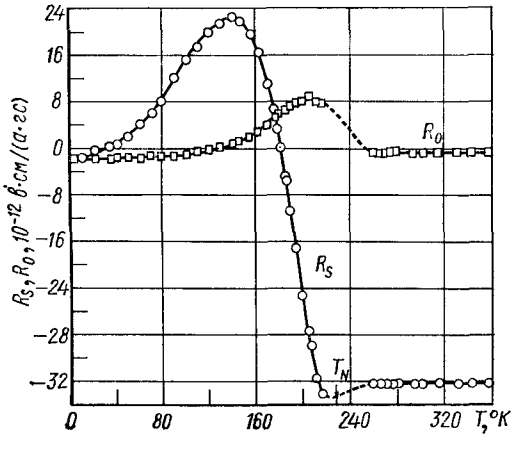


Рис. 26.32. Зависимость обыкновенного и ферромагнитного коэффициентов Холла монокристаллических образцов тербия от температуры **H** ∥ ⟨1010⟩ [138].

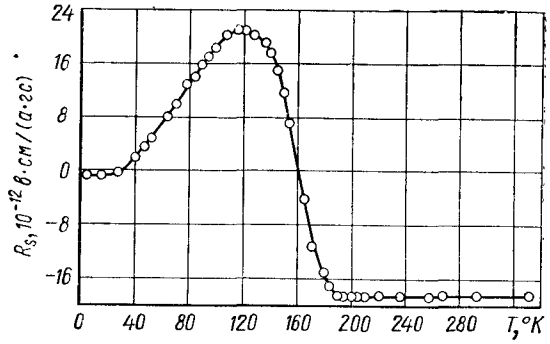


Рис. 26.33. Зависимость ферромагнитного коэффициента Холла монокристалла диспрозия от температуры **H** ∥ ⟨1120⟩ [141].

Таблица 26.19

Гальваномагнитные коэффициенты ферромагнитных сплавов из неферромагнитных компоиентов

Сплав	T, °K	ρ, 10^{-8} ом·м	R_0, 10^{-10} м³/к	R_1, 10^{-10} м³/к	Литература
14,6% Al + + 26,5% Mn + + 58,9 % Cu (сплав Гейслера)*	83	—	—	+ 8,8	[145]
	291	—	—	+24,4	[145]
	331	—	—	+29,0	[145]
$MnSb^{2*}$	177	35	—	530	[146]
	235	55	—	940	[146]
	293	72	+8	1 200	[146]
	353	90	—	1 560	[146]
	412	112	—	2 410	[146]
	470	132	—	3 560	[146]
	530	170	—	6 660	[146]
	590	—	—	10 500	[146]
$MnAu_2$	295	—	2,19	—242	[149]
	295	—	—	—100	[150]
	450	—	—1,2	—	[150]
Mn_5Ge_2 (ферромагнетик)^{3*}	328	—	—	—11 800	[151]
CrTe	93	—	—	— 7 000	[147]
	152	—	—	— 8 500	[147]
	273	—	—	—31 500	[147]
Cr—V ат. % V					
5	293	—	—	2,1	[148]
	77	—	—	5,2	[148]
10	293	—	—	2,7	[148]
	77	—	—	3,5	[148]

* $B = 0{,}44$ *вб/м²*; $Q_1 = 10^{-8}$ *м²/(град·сек)*; $Q_1 = 12{,}0$ (253°K), $Q_1 = 10{,}4$ (298°K), $Q_1 = 7{,}1$ (355°K) [64].

2* $B = 0$—$2{,}0$ *вб/м²*.

3* $B = 0$—$1{,}6$ *вб/м²*.

26.5. ВЛИЯНИЕ МАГНИТНОГО ПОЛЯ НА СОПРОТИВЛЕНИЕ МЕТАЛЛОВ ПРИ РАЗЛИЧНЫХ ТЕМПЕРАТУРАХ

В таблицах этого раздела приняты обозначения:
R_{HT} — сопротивление при напряженности поля H и температуре T;
R_{0T} — сопротивление при $H = 0$ и при температуре T;

$$r_{273,2} = R_{0T} / R_{0\,273,2};$$

$$r_{290} = R_{0T} / R_{0\,290};$$

$$\Delta R = R_{HT} - R_{0T}.$$

Для ферромагнетиков вместо R_{0T} берется R_{BT}, где B — магнитная индукция внутри металла.

Для монокристаллов:

а) для кубического кристалла:

Φ — угол между главной осью и направлением тока;

Ψ — угол между главной осью и направлением магнитного поля;

б) для тетрагональных, гексагональных и ромбоэдрических систем: Φ — угол между осью c и направлением тока; φ — угол между осью a и направлением тока; Ψ — угол между осью c и направлением магнитного поля; Ψ — угол между осью a и направлением магнитного поля.

Таблица 26.20

Изменение сопротивления чистых металлов в магнитном поле (магнитное поле перпендикулярно к направлению электрического тока через образец, так называемый поперечный четный гальваномагнитный эффект)

Металл	Состояние	T, °K	а) $r_{273,2}$ б) r_{290}	Угол, *град*	H, *кэ*	$\Delta R/R_{0T}$	Литература
Li	Поликристалл (0,1% примесей)	78	б) 0,137	—	100 200 300	0,024 0,082 0,152	[152] [152] [152]
	Поликристалл	20,4	а) 0,0243	—	30,4	0,11	[153]
Be	»	291 78	б) 1 б) 0,33	— —	300 300	0,66 2,28	[152] [152]
	Монокристалл	90,3	а) 0,02775	$\Phi = 90$ $\varphi = 2$ $\Psi = 0$	3,4 10,1 11,7	0,428 2,180 2,720	[154] [154] [154]
		90,3	а) 0,02775	$\Phi = 90$ $\varphi = 2$ $\Psi = 30$	3,4 10,1 11,7	0,461 2,67 3,422	[154] [154] [154]
		90,3	а) 0,02775	$\Phi = 90$ $\varphi = 2$ $\Psi = 90$	3,4 10,1 11,7	0,2835 1,516 1,935	[154] [154] [154]
Na	Поликристалл	80	б) 0,2	—	300	0,07	[152]
		20,4	а) 0,00675	—	9,36 35,1	0,0745 0,503	[153] [153]
Mg	»	291	б) 1	—	100 200 300	0,022 0,082 0,167	[152] [152] [152]
		195	б) 0,68	—	100 200 300	0,048 0,173 0,317	[152] [152] [152]
		78	б) 0,17	—	100 200 300	0,54 1,65 2,82	[152] [152] [152]

Металл	Состояние	T, °K	а) $r_{273,2}$ б) r_{290}	Угол, *град*	H, *кэ*	$\Delta R/R_0T$	Литература
Al	Поликристалл	77,2	а) 0,161	—	5,2 23,5	0,0008 0,0110	[156] [156]
		20,4	а) 0,067	—	4,1 23,5	0,0033 0,0640	[156] [156]
		14,2	а) 0,066	—	5,2 23,5	0,0056 0,0678	[156] [156]
K	»	20,4	а) 0,0247	—	15,45 35,1	0,0184 0,0502	[153] [153]
Ti	Монокристалл	20,4 14,2	а) 0,1423 а) 0,1394	—	23,6 23,6	0,002 0,002	[156] [156]
V	Поликристалл	291 80.	б) 1 б) 0,225	— —	300 300	$<0,01$ $\sim 0,04$	[152] [152]
Cr	»	291 78	б) 1 б) 0,083	— —	300 300	0,3 4,36	[152] [152]
Fe	»	80	—	—	300	0,053	[152]
	Поликристалл электролитический (0,001% примесей)	290	—	—	30	—9,78	[160]
Co	Поликристалл (1,6% примесей)	290	—	—	6,0 10,0 18,0	—0,0004 —0,0011 —0,0016	[161] [161] [161]
Ni	Поликристалл	573	—	—	2 5 10	$3 \cdot 10^{-4}$ $-8 \cdot 10^{-4}$ $-21 \cdot 10^{-4}$	[161] [161] [161]
		291 80	— —	— —	300 300	—0,046 —0,029	[152] [152]
Cu	»	78	б) 0,141	—	100 200 300	0,093 0,274 0,469	[152] [152] [152]
		78 20,4	б) 0,148 б) 0,020	— —	23,6 23,6	0,009 0,192	[156] [156]
	Монокристалл	20,4	а) 0,00092	$\Phi = 22$ $\Phi = 69$ $\Psi = 0$	2,28 4,49 10,88	0,548 0,957 1,893	[158] [158] [158]
Zn	Поликристалл (0,0004% примесей)	291 78	б) 1 б) 0,19	—	300 300	0,06 0,927	[152] [152]
	Поликристалл	77,2	а) 0,202	—	23,6	0,018	[156]

Металл	Состояние	T, °K	а) $r_{273,2}$ б) r_{290}	Угол, *град*	H, *кэ*	$\Delta R/R_{0T}$	Литература
Ga	Поликристалл (0,27% примесей)	195	б) 0,65	—	100 200 300	0,033 0,115 0,173	[152] [152] [152]
	Монокристалл	77,4	—	$\Phi = 0$ $\psi = 0$	1,200 8,400 23,500	0,00018 0,00349 0,01394	[165] [165] [165]
		77,4	—	$\Phi = 0$ $\psi = 90$	1,200 8,400 23,500	0,00006 0,00284 0,01279	[165] [165] [165]
Rb	Поликристалл	14	а) 0,0339	—	40	$<0,004$	[153]
Zr	Поликристалл	195 80	б) 0,63 б) 0,23	— —	300 300	$<0,01$ 0,05	[152] [152]
Nb	» 0,08% O_2 0,02% Ta	20,4	а) 0,0682	—	40	0,001	[157]
Mo	Поликристалл	195 78	б) 0,61 б) 0,136	— —	300 300	0,095 0,915	[152] [152]
Ru	Поликристалл (0,01% примесей)	20,4	б) 0,0683	—	40	0,151	[162]
Rh	Поликристалл	20,4 4,22	б) 0,0036 б) 0,0029	— —	36,3 37,6	1,546 1,867	[163] [163]
Pd	Поликристалл (0,01% примесей)	78	б) 0,17	—	300	0,102	[152]
Ag	Поликристалл	78 20,4	б) 0,181 а) 0,00293	— —	300 10,85	0,376 1,334	[152] [158]
Cd	Поликристалл	291 195 78	б) 1 б) 0,68 б) 0,22	— — —	300 300 300	0,08 0,19 0,927	[152] [152] [152]
	Монокристалл	78	а) 0,2466	$\Phi = 84$ $\Psi = 90$	4,8 17,3 34,7	0,005 0,044 0,117	[156] [156] [156]
		20,4	а) 0,0218	$\Phi = 0$	10,0 26,5 35,1	0,184 0,672 1,07	[156] [156] [156]
In	Поликристалл	165 80	б) 0,63 б) 0,22	— —	300 300	0,03 0,14	[152] [152]
		78	а) 0,2171	—	40	0,0084	[166]
Sn	Поликристалл (0,01% примесей)	291 80	б) 1 б) 0,22	—	300 300	0,02 0,23	[152] [152]
	Поликристалл	14,2	—	—	23,5	0,0046	[167]

Металл	Состояние	T, °К	а) $r_{273,2}$ б) r_{290}	Угол, *град*	H, *кэ*	$\Delta R/R_{0T}$	Литература
Sb	Поликристалл	291 80	б) 1 б) 0,30	— —	300 300	3,5 40,0	[152] [152]
	Монокристалл	77,8	а) 0,1763	$\Phi = 1,5$ $\Psi = 90$ $\varphi = 90$	3,43 6,75 10,1	0,105 0,309 0,598	[168] [168] [168]
		77,8	а) 0,1763	$\Phi = 1,5$ $\Psi = 90$ $\varphi = 0$	3,43 6,75 10,1	0,105 0,295 0,542	[168] [168] [168]
		78,1	а) 0,1826	$\Phi = 85$ $\Psi = 90$ $\varphi = 88$	3,43 6,75 10,1	0,152 0,433 0,812	[168] [168] [168]
Cs	Поликристалл	20,4	а) 0,0746	—	40	0,03	[153]
Ba	»	20,4	а) 0,027	—	8,5 33,2	0,041 0,41	[155] [155]
		14,0	а) 0,015	—	17,6 33,2	0,337 0,962	[155] [155]
		1,85	а) 0,0071	—	29,4 33,9	2,39 3,08	[155] [155]
Ta	Поликристалл (0,1% примесей)	291 80	б) 1 б) 0,3	— —	300 300	0,001 0,01	[152] [152]
	Поликристалл	20,4	а) 0,0144	—	6,67 11,1 17,4 25,4 35,0	0,0067 0,0135 0,0297 0,0580 0,0985	[157] [157] [157] [157] [157]
W	»	78	а) 0,195	—	300	0,938	[152]
		20,4	а) 0,00216	$\Phi = 0$ $\Psi = 0$	2,28 12,20	0,861 9,92	[158] [158]
		20,4	а) 0,00216	$\Phi = 0$ $\Psi = 45$	2,28 12,20	0,915 14,22	[158] [158]
Re	Поликристалл (0,42% примесей)	80 20,4	а) 0,166 а) 0,0179	— —	34,3 34,3	0,0196 0,266	[159] [159]
Pt	Поликристалл	78	б) 0,185	—	100 200 300	0,008 0,037 0,102	[152] [152] [152]
		20,4	а) 0,00425	—	2,28 4,49 8,79 12,20	0,012 0,036 0,099 0,157	[158] [158] [158] [158]

Металл	Состояние	T, °K	а) $r_{273,2}$ б) r_{290}	Угол, *град*	H, *кэ*	$\Delta R/R_{0T}$	Литература
Au	Монокристалл (0,001% примесей)	78,5	а) 0,2175	$\Phi = 38$ $\Phi = 63$	2 4	0,17 0,69 } 10^{-4}	[164]
		20,4	а) 0,00601	—	2 4 10	4,32 11,8 39,3 } 10^{-4}	[164]
	Поликристалл (0,001% примесей)	79	а) 0,219	—	18,5 25,5 40,1	0,0048 0,0096 0,0180	[157] [157] [157]
Tl	Поликристалл	80	б) 0,23	—	300	0,159	[152]
Pb	Поликристалл (0,001% примесей)	291 80	б) 1 б) 0,25	—	300 300	$<0,01$ 0,05	[152] [152]
	Поликристалл	20,4	а) 0,0296	—	39,8	0,0470	[157]
Bi	Поликристалл (0,01% примесей)	291 80	б) 1 б) 0,346	— —	300 300	37 1360	[152] [152]
	Монокристалл	288	—	$\Phi = 0$ $\psi = 90$	100 200 300	12,5 31,5 49,5	[62] [62] [62]
		91	—	$\Phi = 0$ $\psi = 90$	100 200 300	600 1150 1680	[62] [62] [62]
		288	—	$\Phi = 0$ $\psi = 0$	100 200 300	9,5 23,5 36,5	[62] [62] [62]
		91	—	$\Phi = 0$ $\psi = 0$	100 200 300	500 1050 1570	[62] [62] [62]
Th	Поликристалл	195 80	б) 0,66 б) 0,266	— —	300 300	0,03 0,157	[152] [152]

Таблица 26.21

Изменение сопротивления металлов в магнитном поле (магнитное поле параллельно направлению электрического тока через образец — продольный четный гальваномагнитный эффект)

Металл	Состояние	T, °K	а) $r_{273,2}$ б) r_{290}	Угол, *град*	H, *кэ*	$\Delta R/R_{0T}$	Литература
Be	Монокристалл	80,3	а) 0,0168	$\Phi = 90$ $\varphi = 90$	4,85	0,191	[169]
		79,5	а) 0,0164	$\Phi = 90$ $\varphi = 0$	4,85	0,214	[169]
Na	Поликристалл	78	а) 0,189	—	16,5	0,0006	[153]

Продолжение табл. 26.21

Металл	Состояние	T, °K	а) $r_{273,2}$ б) r_{290}	Угол, *град*	H, *кэ*	$\Delta R/R_{0T}$	Литература
Al	Поликристалл	78	б) 0,121	—	300	0,358	[152]
		77,2	а) 0,158	—	23,5	0,0038	[156]
K	»	14,0	а) 0,0155		35	0,0249	[153]
Fe	Поликристалл электролитический (0,001% примесей)	290	—	—	20	18,0	[171]
Co	Поликристалл (1,6% примесей)	290	—	—	18,0	0,002	[161]
Cu	Поликристалл	78	б) 0,155	—	300	0,23	[152]
		4,2	а) 0,0089	—	30 150	0,337 1,61	[172] [172]
Ga	Поликристалл (0,27% примесей)	78	б) 0,2	—	100 200 300	0,300 0,625 0,960	[152] [152] [152]
	Монокристалл*	70,2	—	$\Phi = 0$	11,8 18,1 22,3	0,00183 0,00419 0,00634	[176] [176] [176]
		20,4	—	$\Phi = 0$	4,8 11,8 18,1 22,3	0,00238 0,00664 0,00897 0,01003	[176] [176] [176] [176]
		20,4	—	$\Phi = 0$ $\varphi = 0$	6,0 18,1 22,3	0,00126 0,00452 0,00519	[176] [176] [176]
		20,4	—	$\Phi = 90$ $\varphi = 90$	11,8 18,1 22,3	0,00264 0,00483 0,00618	[176] [176] [176]
Mo	Поликристалл	78	б) 0,135	—	300	0,225	[152]
Ag	»	20	а) 0,0096	—	20	0,190	[173]
Cd	»	78	б) 0,22	—	300	0,705	[152]
In	»	20,4	а) 0,023	—	25,74	0,0451	[166]
W	Монокристалл	20,4	а) 0,0055	$\Phi = 0$	9,33	0,12	[170]
Pt	Поликристалл	20,4	а) 0,0066	—	33,4	0,146	[163]
Bi	Монокристалл	289	—	$\Phi = 0$	10,0 20,0	0,07 0,17	[174] [174]
		289	—	$\Phi = 90$ $\varphi = 0$	10,0 20,0	0,31 0,66	[174] [174]
		289	—	$\Phi = 90$ $\varphi = 90$	10,0 20,0	0,15 0,20	[174] [174]

Продолжение табл. 26.21

Металл	Состояние	T, °К	а) $r_{273,2}$ б) r_{290}	Угол. *град*	H, *кэ*	$\Delta R/R_{0T}$	Литература
Bi	Монокристалл	293	—	Ф = 0	2,51 5,02 7,54	0,008 0,029 0,050	[175] [175] [175]
		293	—	Ф = 90 φ = 0	2,51 5,02 7,54	0,029 0,092 0,150	[175] [175] [175]
		293	—	Ф = 90 φ = 90	2,51 5,02 7,54	0,046 0,150 0,264	[175] [175] [175]

* В графе $\Delta R/R_{0T}$ приведены значения $\Delta R/R_{0\,273}$.

Таблица 26.22

Изменение сопротивления сплавов в магнитном поле

Сплав	Состояние	T, °К	B, *кгс**	$\Delta R/R_{0T}$	Литература
Au—Ag	Атомное содержание Ag, %				
	0,1	4,23	1,63 ⊥	0,00028	[180]
	0,1	4,23	8,49 ⊥	0,00268	[180]
	0,1	1,63	1,68 ⊥	—0,00051	[180]
	0,1	1,63	8,49 ⊥	—0,01123	[180]
Cd—Hg	Поликристалл Атомное содержание Hg, %				
	1	77,2	23,6 ⊥	0,0132	[156]
	1	20,4	23,6 ⊥	0,0549	[156]
	30	77,2	23,6 ⊥	0,005	[156]
	30	20,4	23,6 ⊥	0,018	[156]
	50	20,4	23,6 ⊥	0,0007	[156]
Cr—Te	Поликристалл	298	5 ∥	$2 \cdot 10^{-3}$	[106]
		298	10 ∥	$7 \cdot 10^{-3}$	[106]
		298	15 ∥	$12 \cdot 10^{-3}$	[106]
Cu_2MnAl (сплав Гейслера)	»	—	4 ∥	$2{,}3 \cdot 10^{-2}$	[137]
			6 ∥	$3{,}2 \cdot 10^{-2}$	[137]
			4 ⊥	$5{,}5 \cdot 10^{-2}$	[137]
			6 ⊥	$7{,}8 \cdot 10^{-2}$	[137]

Продолжение табл. 26.22

Сплав	Состояние	T, °К	B, *кгс**	$\Delta R/R_{0T}$	Литература
Cu—Zn	Поликристалл Массовое содержание Zn, %				
	70	77,2	23,6 ⊥	0,027	[156]
	70	20,4	23,6 ⊥	0,040	[156]
	70	14,2	23,6 ⊥	0,040	[156]
Ni_3Mn	Поликристалл неупорядоченный	77	4 ∥	$92 \cdot 10^{-4}$	[95]
		77	8 ∥	$55 \cdot 10^{-4}$	[95]
		77	16 ∥	$30 \cdot 10^{-4}$	[95]
		293	8 ∥	$15 \cdot 10^{-4}$	[95]
		293	16 ∥	$3 \cdot 10^{-4}$	[95]
		293	8 ⊥	$-20 \cdot 10^{-4}$	[95]
		293	16 ⊥	$-25 \cdot 10^{-4}$	[95]
	Поликристалл упорядоченный	293	4 ∥	$-70 \cdot 10^{-4}$	[95]
		293	8 ∥	$-155 \cdot 10^{-4}$	[95]
		293	16 ∥	$-220 \cdot 10^{-4}$	[95]
		293	4 ⊥	$-100 \cdot 10^{-4}$	[95]
		293	8 ⊥	$-150 \cdot 10^{-4}$	[95]
		293	16 ⊥	$-180 \cdot 10^{-4}$	[95]

* ⊥, ∥ — B перпендикулярно к направлению тока или параллельно ему.

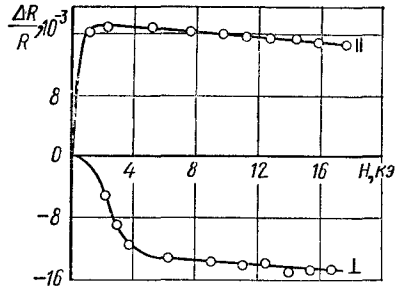


Рис. 26.34. Поперечное и продольное магнетосопротивление никеля при температуре 20° С [181].

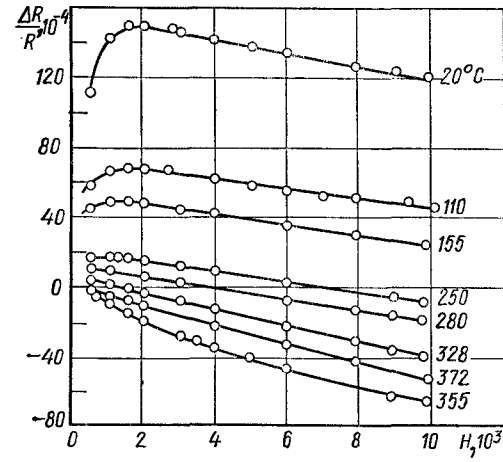
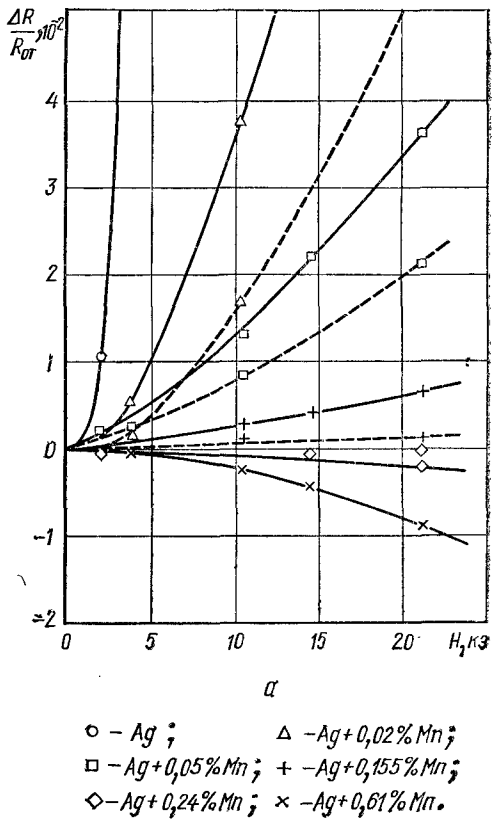


Рис. 26.35. Магнетосопротивление никеля при различных температурах [177].



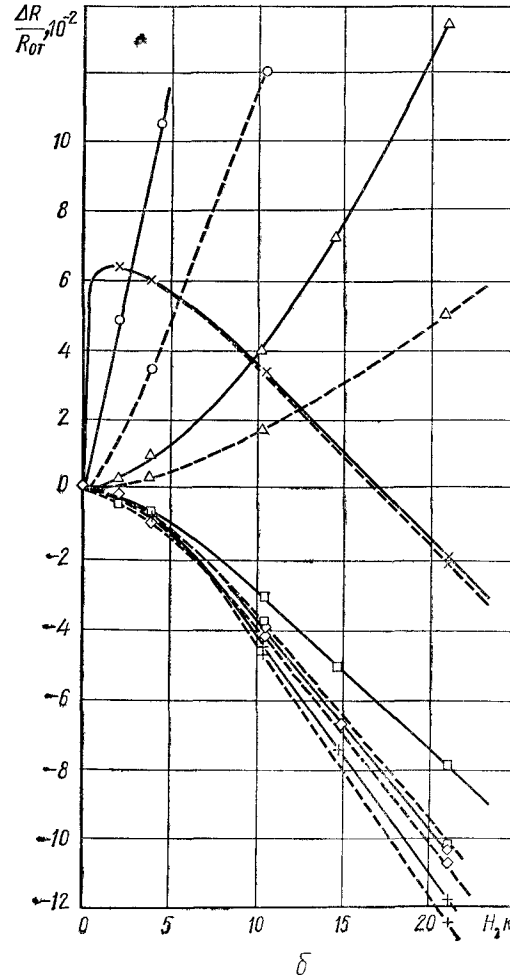


Рис. 26.36. Магнетосопротивление сплава Ag — Mn в поперечном (сплошная кривая) и продольном (пунктир) магнитных полях при 20 (*а*) и 4,09° К (*б*) [173] (указано атомное содержание компонента).

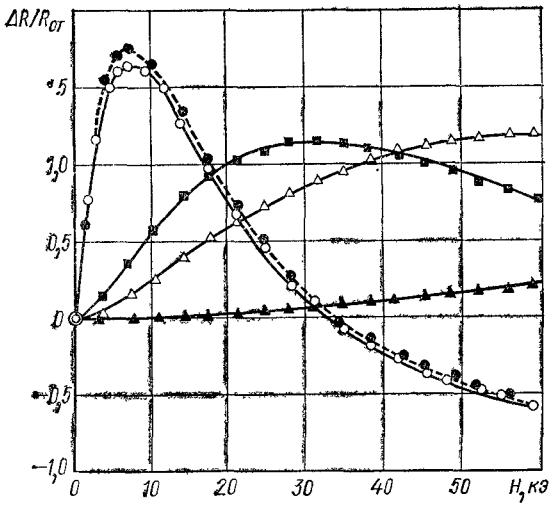


Рис. 26.37. Продольное магнетосопротивление $\Delta R / R_{0T}$ монокристалла сурьмы при различных температурах (главная ось перпендикулярна к направлению тока) [178]:
▲ — 300°К; △ — 78°К; ▩ — 52°К; ○ — 4,22°К; ● — 1,52°К.

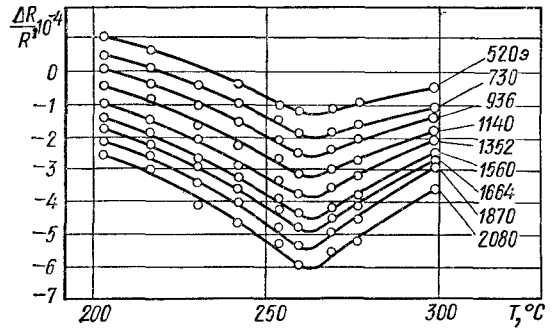
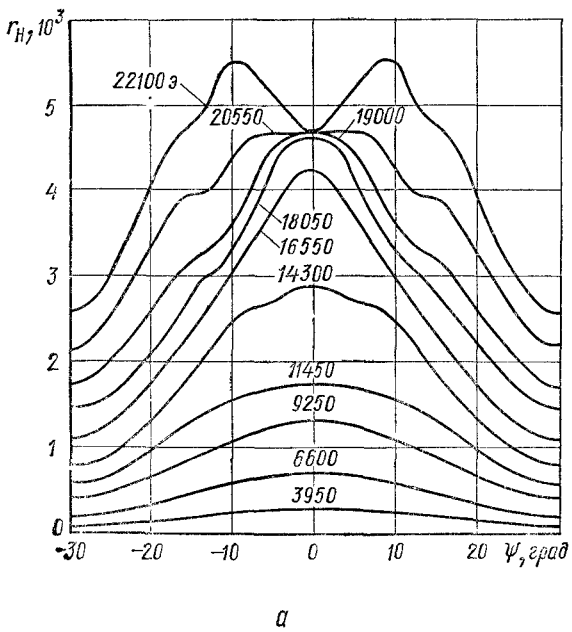
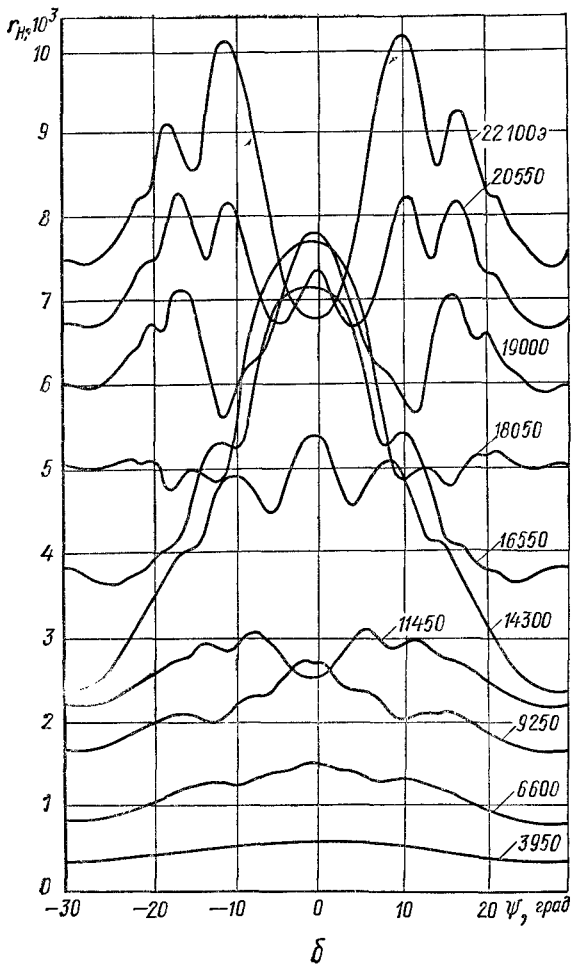


Рис. 26.38. Зависимость магнетосопротивления в области точки Кюри при различных полях для сплава 36% Ni, 64% Fe от температуры [181].



а



б

Рис. 26.39. Зависимость $r_H = R_{HT}/R_{0\,273,2}$ от ориентации магнитного поля относительно бинарной оси для монокристалла висмута при 14,15° (*а*) и 4,22° К (*б*) (главная ось параллельна направлению тока [179]).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Smith A. W.** "Phys. Rev.", 1916, v. 8 (2), p. 79.
2. **Studer F. J., Williams W. D.** "Phys. Rev.", 1935, v. 47, p. 291.
3. **Факидов И. Г.** «Докл. АН СССР», 1948, т. 63, с. 123.
4. **Боровик Е. С.** «Журн. эксперим. и теор. физ.», 1952, т. 23, с. 83.
5. **Боровик Е. С.** «Журн. эксперим. и теор. физ.», 1954, т. 27, с. 355.
6. **Frank V., Jeppesen O. G.** "Phys. Rev.", 1953, v. 89, p. 1153.
7. **Unwin F.** "Proc. Roy. Soc. Edinburgh", 1913, v. 34, p. 208.
8. **Frank V.** "Appl. Scient. Res.", 1958, v. B7, p. 41.
9. **Kevane C. J., Legvold S., Spedding F. H.** "Phys. Rev.", 1953, v. 91, p. 1372.
10. **Волкенштейн Н. В., Галошина Э. В.** «Физика металлов и металловедение», 1967, т. 24, № 6, с. 1105.
11. **Lee R. S., Legvold S.** "Phys. Rev.", 1967, v. 162, N 2, p. 434.
12. **Zeechina L.** "Phys. St. Sol.", 1970, v. 42, p. K 153.
13. **Anderson G. S., Legvold S., Spedding F. H.** "Phys. Rev.", 1959, v. 111, N 5, p. 257.
14. **Волкенштейн Н. В., Федоров Г. В.** «Физика твердого тела», 1965, т. 7, с. 3213.
15. **Foner S.** "Phys. Rev.", 1953, v. 91, p. 447; 1957, v. 107, p. 1513.
16. **Scovil G. W.** "Appl. Phys. Lett.", 1966, v. 9, p. 24.
17. **Roesch L., Willens R. M.** "J. Appl. Phys.", 1963, v. 34, p. 2159.
18. **Волков Д. Н., Козлова Т. М., Прудников В. Н.** «Журн. эксперим. и теор. физ.», 1968, т. 55, с. 2103.
19. **Волкенштейн Н. В., Галошина Э. В.** «Физика металлов и металловедение», 1964, т. 18, с. 784.
20. **Bodine J. H.** "Phys. Rev.", 1956, v. 102, p. 1459.
21. **Амитин Е. Б., Ковалевская Ю. А., Ковдря Ю. З.** «Физика твердого тела», 1967, т. 9, с. 905.
22. **Smith A. W.** "Phys. Rev.", 1915, v. 5, p. 35.
23. **Boeschoten F., Huiszoon C.** "Physica", 1957, v. 23, p. 704.
24. **Zahn H., Schmidt H.** "Der Deutsch. Phys. Ges.", 1907, Bd 9, S. 98.
25. **Aschermann G., Justi E.** "Phys. Z.", 1942, Bd 43, S. 207.
26. **Justi E.** "Z. Naturforsch.", 1949, Bd 4a, S. 472.
27. **Gehlhoff P. O., Justi E.** "Z. Naturforsch.", 1949, Bd 4a, S. 561.
28. **Hall E. H.** "Phys. Rev.", 1925, v. 26, p. 820.
29. **Zahn H.** "Ann. Physik", 1905, Bd 16, S. 148.
30. **Frank V.** "Appl. Scient. Res.", 1957, v. B6, p. 379.
31. **Hall E. H.** "Proc. Nat. Acad. Sci.", 1937, v. 23, p. 600.
32. **Alderson J. E., Farrel T., Hurd C. M.** "Phys. Rev.", 1968, v. 174, p. 729.
34. **Unwin F.** "Proc. Roy. Soc. Edinburgh", 1920, v. 41, p. 44.
33. **Gabe S. E., Evans J.** «Philos. Mag.», 1935, v. 19, p. 773.
35. **Кикоин И. К., Факидов И. Г.** "Z. Physik", 1931, Bd 71, S. 393.
36. **Fakidov J.** "Phys. Z. Soviet Union", 1935, v. 7, p. 677.
37. **Боровик Е. С.** "Изв. АН СССР. Сер. физ.", 1955, т. 19, с. 429.
38. **Andrewartha G. G., Evans E. J.** "Philos. Mag.", 1941, v. 31, p. 265.
39. **Hernst W.** "Wield. Ann. Physik", 1887, Bd 31, S. 760.
40. **Onnes H., Kamerlingh, K. Hof.** "Proc. Amsterdam", 1914, v. 17, p. 520.
41. **Носков М. М.** «Журн. эксперим. и теор. физ.», 1938, т. 8, с. 717.
42. **Андреев А. А., Регель А. Р.** «Физика твердого тела», 1966, т. 8, с. 3681.
43. **Cusack N., Kendall P.** "Philos. Mag.", 1961, v. 6, p. 419.
44. **Greenfield A. J.** "Phys. Rev.", 1964, v. 135, p. 6A.
45. **Busch G., Tieche Y.** "Phys. Kondens. Mater.", 1963, v. 1, p. 78.
46. **Salkovitz E. I., Schindler A. I., Kammer E. W.** "Phys. Rev.", 1957, v. 105, p. 887.
47. **Köster W., Frei A.** "Z. Metallkunde", 1953, Bd 44, S. 495.
48. **Powell H., Evans E. J.** "Philos. Mag.", 1943, v. 34, p. 145.
49. **Cohen J.** "Compt. rend.", 1956, v. 243, p. 1105.
50. **Allison F. E., Pugh E. M.** "Phys. Rev.", 1957, v. 107, p. 103.
51. **Сидоров С. К.** «Журн. эксперим. и теор. физ.», 1946, т. 16, с. 629.
52. **Комар А. П., Сидоров С. К.** "Журн. эксперим. и теор. физ.», 1941, т. 11, с. 711.
53. **Jeppesen O. J.** "Nature", 1954, v. 173, p. 591.
54. **Richards W., Evans E. J.** «Philos. Mag.», 1932, v. 13, p. 201.
55. **John W. G., Evans E. J.** "Philos. Mag.", 1937, v. 23, p. 1033.
56. **Новогрудский В. Н., Факидов И. Г.** «Физика твердого тела», 1965, т. 7, с. 1095.
57. **Cox W. R., Hayex D. J.** "Phys. Rev." B, 1973, v. 7, p. 3580.
58. **Прудников В. Н., Волков Д. И., Козлова Т. М.** «Физика металлов и металловедение», 1970, т. 30, № 1, с. 31.
59. **Little N. C.** "Phys. Rev.", 1926, v. 28, p. 418.
60. **Zahn H.** "Ann. Phys.", 1904, Bd 14, S. 886.
61. **Muldawer L.** "Phys. Rev.", B, 1973, v. 7, p. 4464.
62. **Kapitza P.** "Proc. Roy. Soc. (London)", 1928, v. A 119, p. 358.
63. **Stephens E.** "Philos. Mag.", 1930, v. 9, p. 517.
64. **Smith A. W.** "Phys. Rev.", 1911, v. 32, p. 1 8.
65. **Steele M. C.** "Phys. Rev.", 1955, v. 99. p. 1751.
66. **Thompson N.** "Proc. Roy. Soc. (London)", 1938, v. A164, p. 24.
67. **Okado T.** "Memoris Faculty Sci. Kyushu Univ.", 1955, v. B1, p. 157.
68. **Okado T.** "J. Phys. Soc. Japan", 1956, v. 11, p. 89.
69. **Brodie L. C.** "Phys. Rev.", 1954, v. 93, p. 935.
70. **Marcus J. A.** "Phys. Rev.", 1955, v. 98, p. 1540.
71. **Reynolds J. M., Hemstreet H. M.** "Phys. Rev.", 1954, v. 96, p. 1203.
72. **Reynolds J. M., Leinhardt T. E.** "Phys. Rev.", 1954, v. 93, p. 247.
73. **Overton V. C., Berlincourt T. G.** "Phys. Rev.", 1955, v. 99, p. 1165.
74. **Stephens E., Evans E. J.** "Philos. Mag.", 1929, v. 7, p. 161.
75. **Van Aubel E.** "Compt. rend.", 1936, v. 203, p. 614.
76. **Кикоин И. К., Лазарев Б. Г.** «Журн. эксперим. и теор. физ.», 1933, т. 3, с. 44; "Nature", 1932, v. 129, p. 57; "Phys. Z. Sovjet Union", 1933, Bd 3, S. 351; 1933, Bd 4, S. 567.
77. **Иванов Г. А., Регель А. Р.** «Журн. техн. физ.», 1955, т. 25, с. 39.
78. **Иванов Г. А., Регель А. Р.** «Журн. техн. физ.», 1955, т. 25, с. 49.
79. **Gabe S., Evans E. J.** "Philos. Mag.", 1935, v. 19, p. 773.
80. **Thomas W. R., Evans E. J.** "Philos. Mag.", 1934, v. 17, p. 65.
81. **Thomas W. R., Evans E. J.** "Philos. Mag.", 1933, v. 16, p. 329.
82. **Pugh E. M.** "Phys. Rev.", 1928, v. 32, p. 824.

83. Butler E. H., Pugh E. M. "Phys. Rev.", 1940, v. 57, p. 916.
84. Jan J. P., Gijsman H. M. "Physica", 1952, v. 18, p. 339.
85. Jan J. P. "Helv. Phys. Acta", 1952, v. 25, p. 677.
86. Foner S. "Phys. Rev.", 1956, v. 101, p. 1648.
87. Smith A. W. "Phys. Rev.", 1910, v. 30, p. 1.
88. Smith A. W. "Phys. Rev.", 1911, v. 33, p. 295.
89. Hall E. H. "Phys. Rev.", 1925, v. 26, p. 820.
90. Foner S., Pugh E. M. "Phys. Rev.", 1953, v. 91, p. 20.
91. Rindner W., Koch K. M. "Z. Naturforsch.", 1958, Bd 13a, S. 26.
92. Волкенштейн Н. В., Федоров Г. В., Вонсовский С. В. «Журн. эксперим. и теор. физ.», 1958, т. 35, с. 85.
93. Moreau G. ,"J. Physica", 1900, v. 9, p. 497.
94. Smith A. W. "Phys. Rev.", 1913, v. 1, p. 339.
95. Комар А. П., Портнягина И. И. «Докл. АН СССР», 1948, т. 60, с. 569.
96. Smit J. "Physica", 1955, v. 21, p. 877
97. Волкенштейн Н. В., Федоров Г. В. «Журн. эксперим. и теор. физ.», 1960, т. 38, с. 61.
98. Dheer P. N. "Phys. Rev.", 1967, v. 156, p. 637.
99. Черемушкина А. В., Васильева Р. П. «Физика твердого тела», 1966, т. 8, с. 822.
100. Smith A. W. "Phys. Rev.", 1916, v. 8, p. 79.
101. Черемушкина А. В., Королева М. И. «Вестн. МГУ», 1966, № 5, с. 118.
102. Smith A. W. "Phys. Rev.", 1921, v. 17, p. 23.
103. Foner S. "Phys. Rev.", 1955, v. 99, p. 1079.
104. Soffer S. e. a. "Phys. Rev.", 1965, v. 140, p. A668.
105. Бажанова Н. В. «Физика металлов и металловедение», 1964, т. 17, с. 774.
106. Факидов И. Г., Гражданкина Н. П., Кикоин А. К. «Докл. АН СССР», 1949, т. 68, с. 491.
107. Andres M. P. de, Jellighaus W. "Inst. hierro y acero", 1956, v. 9, p. 626.
108. Kooi C. "Phys. Rev.", 1954, v. 95, p. 843.
109. Черемушкина А. В., Архипов Ю. Н., Саркисова К. Н. «Изв. вузов. Физика», 1968, т. 6, с. 156.
110. Schröder K. "Phys. Rev.", 1964, v. 135, p. A 149.
111. Carter G. C. Pugh E. M. "Phys. Rev.", 1966, v. 152, p. 489.
112. Черемушкина А. В., Архипов Ю. Н. «Вести. МГУ», 1966, № 4, с. 101.
113. Черемушкина А. В. «Вестн. МГУ», 1957, № 2, с. 127
114. Свирина Е. П., Сирота З. Д. "Вестн. МГУ», 1960, № 6, с. 27.
115. Pugh E. M., Rostoker H. "Rev. Mod. Phys.", 1953, v. 25, p. 161.
116. Köster W., Rocholl P. "Z. Metallkunde", 1957, Bd 48, S. 485.
117. Foner S., Allison F. E., Pugh E. M. "Phys. Rev.", 1958, v. 109, p. 1129.
118. Кикоин И. К. «Журн. эксперим. и теор. физ.", 1940, т. 10, с. 1242.
119. Allison F. E., Pugh E. M. "Phys. Rev.", 1956, v 102, p. 1281.
120. Dutta S. K., Subrahmnayam A. V. "Phys. Rev.", 1969, v.117, p. 177
121. Кикоин И. К., Факидов И. Г. «Журн. эксперим. и теор. физ», 1941, т. 11, с. 113.
122. Obata J. "Japan J. Physics", 1927, v. 4, p. 43.
123. Ettingshausen A. von, Nernst W., Sitzungsler K. "Akad. Wiss. Wien», 1886, Bd 94, S. 560.
124. Foner S., Pugh E. "Phys. Rev.", 1953, v. 91, p. 20.
125. Beitel A. F., Pugh E. M. "Phys. Rev.", 1958, v. 112, p 1516.
126. Федоров Г. В., Рябинина Н. М. «Физика металлов и металловедение», 1970, т. 29, с. 83.
127. Huguenin R., Rivier D. "Helv. Phys. Acta", 1965, v. 38, p. 900.
128. Васильева Р. П., Акмурзаев Б., Коидорский Е. М. «Вестн. МГУ», 1970, т. 4, с. 459.
129. Sanford E. R., Ehrlich A. C., Pugh E. M. "Phys. Rev.", 1961, v. 123, p. 1947.
130. Жукова В. М., Фадин В. П. «Изв. вузов. Физика», 1970, № 3, с. 21.
131. Свирина Е. П., Немчинов Ю. В. «Физика твердого тела», 1967, т. 9, с. 704.
132. Бабушкина Н. А. «Физика твердого тела», 1965, т. 7, с. 3026.
133. Волкенштейн Н. В., Федоров Г. В. «Физика металлов и металловедение», 1964, т. 18, с. 26.
134. Волкенштейн Н. В., Григорова И. К., Федоров Г. В. «Журн. эксперим. и теор. физ.», 1966, т. 50, с. 1525.
135. Wald F. J., Juretschke H. J. "Phys. Rev.", 1971, v. B3, p. 2412.
136. Lee R. S., Legvold S. "Phys. Rev.", 1967, v. 162, p. 431.
137. Potter H. H. "Philos. Mag.", 1932, v. 31, p. 233.
138. Rhyne I. J. "J. Appl. Phys.", 1969, v. 40, p. 1001.
139. Федоров Г. В., Волкенштейн Н. В. «Физика твердого тела», 1970, т. 12, с. 1374.
140. Волкенштейн Н. В., Григорова И. К., Федоров Г. В. «Журн. эксперим. и теор. физ.», 1966, т. 51, с. 780.
141. Rhyne I. J. "Phys. Rev.", 1969, v. 172, p. 523.
142. Волкенштейн Н. В., Федоров Г. В. «Физика твердого тела», 1966, т. 8, с. 1895.
143. Волков Д. И., Козлова Т. М. «Физика металлов и металловедение», 1965, т. 20, с. 355.
144. Бабушкина Н. А. «Физика твердого тела», 1971, т. 10, с. 3026.
145. Zahn H., Schmidt. "Der. Deutsch. Phys. Ges.", 1907, Bd 9, S. 98.
146. Кикоин И. К., Бабушкина Н. А., Игошева Т. Н. «Физика металлов и металловедение», 1960, т. 10, с. 488.
147. Кикоин И. К., Буряк Е. М., Муромкин Ю. А. «Докл. АН СССР», 1959, т. 125, с. 1011.
148. Schröder K "Phys. Rev.", 1964, v. 135, p. 149.
149. Новогрудский В. Н., Факидов И. Г. «Физика твердого тела», 1961, т. 3, с. 3278.
150. Карчевский А. И., Николаев В. И. «Физика металлов и металловедение», 1961, т. 2, с. 519.
151. Новогрудский В. Н., Факидов И. Г. «Журн. эксперим и теор. физ.», 1964, т. 47, с. 40.
152. Kapitza P. "Proc. Roy. Soc. (London)", 1929, v. A 123, p. 292, 342
153. Justi E "Ann. Physik", 1948, Bd (6) 3, S. 183.
154. Grüneisen E., Erfling H. D. "Ann. Physik", 1940, Bd (5) 38, S. 399.
155. Justi E.. Kramer J. "Physikal Z.", 1940, Bd 41, S. 197.
156. Haas W. J. de, Van Alphen P. M. «Proc. Amsterdam», 1933, v. 36, p. 253; "Comm. Kamerlingh Onnes Lab. Leiden", 1933, Nr. 225a.
157. Justi E. "Physikal Z.", 1940, Bd 41, S. 486.
158. Grüneisen E., Adenstedt A. "Ann. Physik", 1938, Bd 5(31), S. 714.
159. Aschermann G., Justi E. "Physikal Z.", 1942, Bd 43, S. 207.
160. Stierstadt O. "Z. Physik", 1931, Bd 67, S. 725.
161. Bates L. F. "Proc. Phys. Soc. (London)", 1946, v. 58, p. 153.
162. Justi E. "Z. Naturforsch.", 1949, Bd 4a, S. 472.
163. Schulze R. "Physik. Z.", 1941, Bd 42, S. 297.
164. Meißner W., Scheffers H. "Physik. Z.", 1929, Bd 30, S. 827.
165. Haas W. J. de, Blom J. W. "Physika", 1933/34, v. 1, p. 465.

166. **Foroud A., Justi E., Kramer J.** "Physikal. Z.", 1940, Bd 41, S. 113.
167. **Van Alphen P. M.** Diss. Leiden, 1933.
168. **Rausch K.** "Ann. Physik", 1947, Bd (6)1, S. 190.
169. **Erfling H. D., Grüneisen E.** "Ann. Physik", 1942, Bd (5)41, S. 89.
170. **Justi E., Scheffers H.** "Physikal. Z.", 1937, Bd 38, S. 891.
171. **Stierstadt O.** "Z. Phys.", 1930, Bd 65, S. 575.
172. **Olsen J. L., Rinderer L.** "Nature", 1954, v. 173, p. 682.
173. **Gerritsen A. N., Linde J. O.** "Physika", 1951, v. 17, p. 573.
174. **Kaye G. W. C.** "Proc. Roy. Soc.", 1939, v. A 170, p. 561.
175. **Stierstadt O.** "Z. Phys.", 1933, Bd 80, S. 636.
176. **Haas W. J. de, Blom J. W.** "Physika", 1937, v. 4, p. 778.
177. **Белов К. П.** Упругие тепловые и электрические явления в ферромагнетиках. М., Изд-во иностр. лит., 1957.
178. **Steele M. C.** "Phys. Rev.", 1955, v. 97, p. 1720.
179. **Haas W. J. de, Blom J. W., Schubnikov L.** "Physika", 1935, v. 2, p. 453.
180. **Giaugue W. F., Stout J. W., Clark C. W.** "Phys. Rev.", 1937, v. 51, p. 1108
181. **Белов К. П.** «Журн. эксперим. и теор. физ.», 1951, т. 21, с. 809.

ГЛАВА 27

МАГНИТНЫЕ СВОЙСТВА ДИА- И ПАРАМАГНЕТИКОВ

Магнитная восприимчивость единицы объема χ_V определяется отношением $\chi_V = M/H$, где M — магнитный момент единицы объема, H — напряженность магнитного поля.

Вещества с отрицательной магнитной восприимчивостью называются *диамагнитными* ($\chi < 0$), а с положительной — *парамагнитными* ($\chi > 0$).

Для характеристики магнитных свойств используется *удельная магнитная восприимчивость* вещества (т. е. магнитная восприимчивость на единицу массы) $\chi = \chi_V/\rho$, где ρ — плотность.

Часто магнитную восприимчивость относят к одному молю вещества (χ_m). Между величинами χ и χ_m существует следующее соотношение: $\chi_m = \chi M$; здесь M — относительная молекулярная масса. Значения χ в таблицах даны в системе СГСМ ($см^3/г$). Для пересчета в систему СИ нужно значение величины χ, выраженное в системе СГСМ, умножить на 10^{-3}.

Принятые сокращения: газообразный — (г.); жидкий — (ж.); твердый — (тв.); p — концентрация дырок в полупроводнике; n — концентрация электронов в полупроводнике.

Таблица магнитной восприимчивости диа- и парамагнитных веществ

Вещество	T, °K	χ, 10^{-6} $см^3/г$	Литература
H	293	—1,9867	[1]
	90	—1,97	[1]
H_2O*	293	—0,7019 (тв.)	[2]
	273	—0,7177 (ж.)	[2]
	293	—0,7220	[2]
	413	—0,727	[2]
	0—153	—0,699 (тв.)	[3]
	293	—0,72183 (ж.)	[4]
	313	—0,72286	[4]
	373	—0,72454	[4]
D_2O	293	—0,638	[5]
H_3AsO_3	293	—0,406 (тв.)	[6]
H_3BO_3	295	—0,562 (тв.)	[6]
HBr[2*]	300	—0,427	[6]
HCl	300	—0,602	[6]
HI	297	—0,418	[6]
H_3PO_3	297	—0,518	[6]
H_3PO_4	298	—0,481	[6]

Продолжение табл.

Вещество	T, °K	χ, 10^{-6} $см^3/г$	Литература
H_2SO_4	297	—0,395	[6]
H_2SeO_3	290	—0,368 (тв.)	[6]
H_2SeO_4	298	—0,353	[6]
H_2TeO_3	288	—0,24	[7]
H_2TeO_4	291	—0,43	[7]
He	293	—1,906	[1]
	90	—1,91	[1]
Li[3*]	14	3,6	[9]
	293	3,6	[9]
	298	3,35	[8]
$LiCH_3COO$	283	—0,513	[6]
Li_2CO_3	296	—0,398	[6]
LiCl	287	—0,587	[6]
LiI	283,2	—0,417	[6]
$LiNO_3$	292	—0,48	[7]
$LiNO_3 \cdot 3H_2O$	291	—0,326	[6]
Li_2O	293	—0,57	[7]
LiOH	283	—0,516	[6]
$Li_2SO_4 \cdot H_2O$	290	—0,43	[7]
Li_2SO_4	281,5	—0,378	[6]
	288	—0,38	[7]
Be (монокристалл) $\chi_{\parallel}$[4*]	293	—2,38	[10]
Be (монокристалл) $\chi_{\perp}$	293	—0,80	[10]
Be (поликристалл)	103	—0,75	[11]
	291	—1,0	[11]
	573	—1,2	[11]
	1200	—1,3	[11]
$BeCO_3 \cdot 2BeO$	288	—0,34	[7]
$BeCl_2$	290	—0,60	[7]
$Be(NO_3)_2 \cdot 3H_2O$	298	—0,311	[6]
$Be(OH)_2$	290	—0,537	[12]
$BeSO_4$	301	—0,354	[7]
$BeSO_4 \cdot 4H_2O$	290	—0,51	[7]
B	90	—0,63	[13]

* Температурный коэффициент $\frac{T}{\chi} \cdot \frac{d\chi}{dT}$ уменьшается от 2,9·10⁻⁴ при 278°K до 0,62·10⁻⁴ при 343°K [2].

2* Измерения на растворе.

3* При уменьшении температуры от 298 до 78°K χ увеличивается на 1,3% [8].

4* См. рис. 27.1.

Продолжение табл.

Вещество	T, °K	χ, 10^{-6} см³/г	Литература
B	293	—0,62	[13]
	291	—0,71	[14]
	373	—0,73	[14]
	503	—0,76	[14]
	1373	—0,77	[14]
BCl_3	286	—0,530 (ж.)	[6]
B_2O_3	287	—0,55	[7]
H_3BO_3	293	—0,52	[15]
C (алмаз)	103	—0,49	[11]
	293	—0,491	[14]
	473	—0,50	[14]
	673	—0,51	[14]
	1173	—0,54	[14]
	1473	—0,56	[14]
C (графит)	14	—4,7	[16]
	289	—3,0	[16]
C (монокристалл)			
∥ гексагон. оси	293	—22,8	[17]
⊥ гексагон. оси	293	—0,4	
CCl_4	291	—0,442	[6]
CH_2	293	—0,4936	[19]
CO_2	293	—0,423 (г.)	[18]
CS_2	293	—0,54	[15]
N	293	—0,426 (г.)	[1]
	298	—0,528	[20]
	88	—0,507	[20]
NH_3	289	—1,1 (г.)	[19]
NO	295	—48,66 (г.)	[18]
	132	—81,45	[21]
	292	—49,07 (г.)	[21]
NO_2	408	—3,26 (г.)	[18]
N_2O	285	—0,429 (ж.)	[18]
	289	—0,429 (г.)	[18]
N_2O_3	291	—0,206 (ж.)	[18]
N_2O_4	257	—0,276 (тв.)	[18]
N_2O_5	289	—0,332 (тв.)	[18]
HNO_3	295	—0,467	[22]
	296	—0,530	[6]
NH_4Br	285	—0,484 (тв.)	[6]
NH_4Cl	284	—0,640 (тв.)	[6]
NH_4F	298	—0,659 (тв.)	[6]
NH_4I	285	—0,455 (тв.)	[6]
$(NH_4)_2HPO_4$	295	—0,538 (тв.)	[6]
$(NH_4)H_2PO_4$	296	—0,50	[15]
NH_4NO_3	284	—0,421 (тв.)	[6]
NH_4OH	299	—0,784 (ж.)	[6]
$(NH_4)_2SO_4$	287	—0,478	[6]
$(NH_4)_2S_2O_8$	294	—0,440	[6]
$(NH_4)_2SbBr_6$	293	—0,036	[23]
O I-я модификация	14	54 (тв.)	[24]
	33	60 (тв.)	[24]
O II-я модификация	33	118 (тв.)	[24]
	43	115 (тв.)	[24]
	54	113 (тв.)	[24]
O (ж.)	54	310	[24]
	60	295	[24]
	70	273	[24]
	77	260	[24]
	293	104,1 (г.)	[18]
	293	107,7 (г.)	[25]
O_3 (озон)	90	0,15 (г.)	[26]
	90	0,14 (ж.)	[26]
Ne	293	—0,33 (г.)	[27]

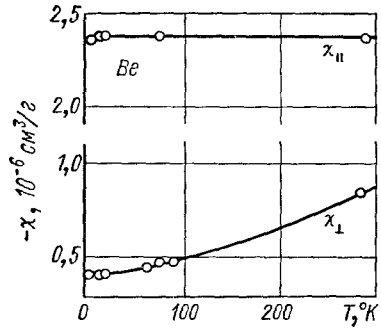


Рис. 27.1. Зависимость $\chi_{\parallel}$ и $\chi_{\perp}$ для Be от температуры [10].

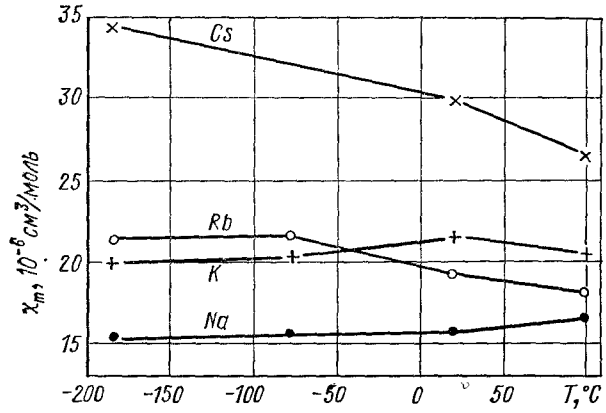


Рис. 27.2. Зависимость χ_m для Cs, Rb, Na, K от температуры [103, 165].

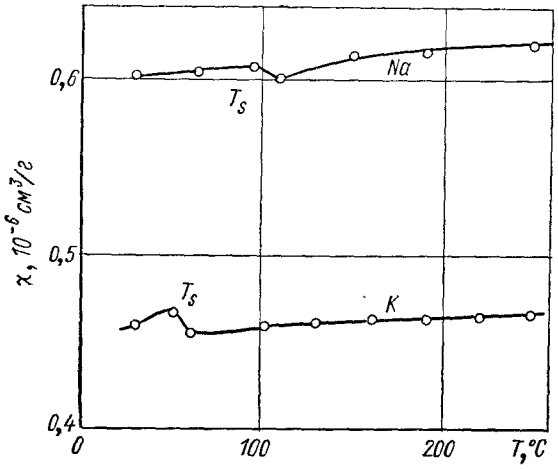


Рис. 27.3. Зависимость удельной магнитной восприимчивости Na, K от температуры [28, 103].

Продолжение табл.

Вещество	T, °K	χ, 10^{-6} $см^3/г$	Литература
Na*	298	0,610	[8]
	78	0,582	[8]
	303	0,600	[28]
	523	0,620	[28]
NaOH	290	—0,59	[7]
	300	—0,395[2*]	[6]
NaF	302	—0,465 (тв.)	[6]
	294	—0,51	[7]
NaCl	123	—0,501	[29]
	282	—0,506 (тв.)	[6]
	291	—0,499	[29]
	635	—0,499	[29]
	1206	—0,508	[29]
$NaClO_3$[2*]	298	—0,356[2*]	[6]
NaBr	291	—0,47	[7]
$NaBr \cdot 2H_2O$[2*]	291	—0,420	[6]
$NaI \cdot 2H_2O$[2*]	300	—0,405	[6]
$NaHCO_3$	293	—0,21	[15]
$NaHPO_4$	293	—0,399	[12]
$NaHPO_4 \cdot H_2O$	296	—0,438 (тв.)	[6]
NaH_2PO_2	293	—0,381	[12]
$NaNO_3$	293	—0,28	[15]
	295	—0,301	[6]
$NaPO_3$	292	—0,384	[6]
$NaCH_3COO \cdot 3H_2O$	282	—0,483	[6]
$NaC_2H_3O_2 \cdot 3H_2O$	293	—0,50	[15]
Na_2HPO_3	293	—0,457	[12]
Na_2CO_3	284	—0,412 (тв.)	[6]
	290	—0,24	[7]
$Na_2CO_3 \cdot 10H_2O$	290	—0,58	[7]
$Na_2SO_3 \cdot 7H_2O$	293	—0,462	[12]
$Na_2SO_4 \cdot 10H_2O$	293	—0,86	[15]
	298	—0,385 (тв.)	[6]
$Na_2S_2O_3$	293	—0,391	[12]
$Na_2S_2O_3 \cdot 3H_2O$	290	—0,368 (тв.)	[6]
$Na_2S_2O_4$	294	—0,352	[6]
Na_2FeO_3	283	—0,328 (тв.)	[6]
$Na_2B_4O_7 \cdot 10H_2O$	293	—0,59	[15]
$CH_3AsO(ONa)_2 \cdot H_2O$	293	—0,529	[12]
$SnO(ONa)_2 \cdot 3H_2O$	293	—0,370	[12]
Mg[3*] (поликристалл)	1,2	0,25	[31]
	14	1,13	[16]
	289	0,49	[16]
	291	0,26	[11]
	293	0,25	[31]
	293	0,46	[30]
Mg (монокристалл) $\chi_\parallel$	293	0,46	[30]
Mg (монокристалл) $\chi_\perp$	293	0,46	[30]
$MgBr_2$	293	—0,57	[7]
$MgCO_3$	286	—0,381	[6]
$MgCO_3 \cdot 3H_2O$	293	—0,525	[12]
$Mg(C_2H_5SO_2)_2 \cdot 2H_2O$	293	—0,525	[12]
$MgCl_2$[2*]	288	—0,620	[6]
$MgCl_2 \cdot 6H_2O$	291	—0,57	[7]
$Mg(NO_3)_2 \cdot 6H_2O$[2*]	291	—0,287	[6]
MgO	290	—0,25	[7]

* См. рис. 27.2, 27. 3.

2* Измерения на растворе.

3* См. рис. 27.4.

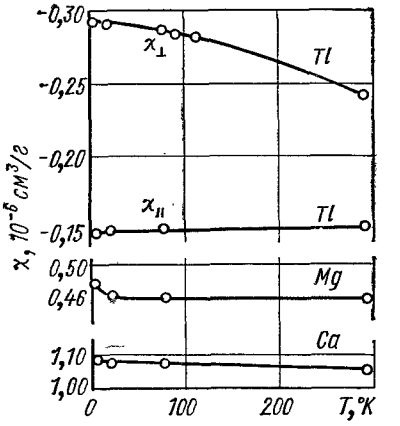


Рис. 27.4. Зависимость удельной магнитной восприимчивости Ca, Mg, Tl от температуры [30].

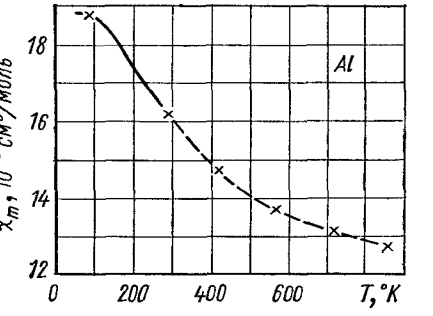


Рис. 27.5. Зависимость χ_m для Al от температуры [30].

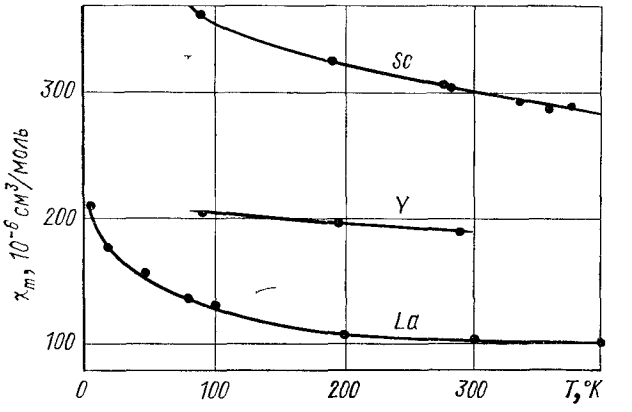


Рис. 27.6. Зависимость χ_m для La, Sc, Y от температуры: La [46, 123]; Sc, Y [46, 103].

Продолжение табл.

Вещество	T, °K	χ, 10^{-6} $см^3/г$	Литература
$Mg(OH)_2$	288	—0,377	[6]
$MgSO_4$*	293	—0,45	[32]
$MgSO_4 \cdot 7H_2O$	284	—0,342	[6]
Al[2*, 3*]	293	0,60	[33]
	291	0,65	[14]
$AlBr_3$	292	—0,32	[7]
$AlCl_3$	292	—0,60	[7]
Al_2O_3	293	—0,098	[34]
$Al_2O_3 \cdot 2H_2O$	293	—0,337	[34]
$Al_2(SO_4)_3$	291	—0,48	[7]
Si, $p<5 \cdot 10^{13} см^{-3}$	293	—0,111	[35]
$n=5,4 \cdot 10^{13}$ $см^{-3}$	141	$-1,23 \cdot 10^{-2}$	[36]
$n=5,4 \cdot 10^{18}$ $см^{-3}$	297	$-8,5 \cdot 10^{-3}$	[36]
$n=2,8 \cdot 10^{18}$ $см^{-3}$	141	$-8,0 \cdot 10^{-3}$	[36]
$n=2,8 \cdot 10^{13}$ $см^{-3}$	297	$-3,9 \cdot 10^{-3}$	[36]
$p=8,48 \cdot 10^{13}$ $см^{-3}$	141	$+5,18 \cdot 10^{-3}$	[36]
$p=8,48 \cdot 10^{18}$ $см^{-3}$	297	$+3,34 \cdot 10^{-4}$	[36]
$p=5,6 \cdot 10^{18}$ $см^{-3}$	141	$+3,94 \cdot 10^{-3}$	[36]
$p=5,6 \cdot 10^{18}$ $см^{-3}$	297	$+2,2 \cdot 10^{-4}$	[36]
$p=4,7 \cdot 10^{18}$ $см^{-3}$	141	$4,22 \cdot 10^{-3}$	[36]
$p=4,7 \cdot 10^{18}$ $см^{-3}$	297	$3,22 \cdot 10^{-4}$	[36]
$p=4,31 \cdot 10^{18}$ $см^{-3}$	141	$3,42 \cdot 10^{-3}$	[36]
$p=4,31 \cdot 10^{18}$ $см^{-3}$	297	$6,7 \cdot 10^{-5}$	[36]
$p=3 \cdot 10^{17}$ $см^{-3}$	297	$-1,22 \cdot 10^{-4}$	[36]
$SiCl_4$	292	—0,514	[6]
SiO_2	293	—0,493	[37]
$SiO(OH)_2$	293	—0,427	[37]
$Si_2O(OH)_6$	293	—0,429	[37]
$SiOH_4$	293	—0,443	[37]
$Si(OC_2H_5)_4$	293	—0,663	[37]
$Si_2O(OC_2H_5)_6$	293	—0,635	[37]
P черный	293	—0,86	[12]
P белый	103	—0,90	[11, 14]
	317	—0,90	[11, 14]
P красный	293	—0,67	[14]
	318	—0,90 (ж.)	[14]
	393	—0,90 (ж.)	[14]
PCl_3	292	—0,463	[6]
PCl_5	298	—0,490	[6]
P_2O_5	291	—0,46	[7]
$POCl_3$	286	—0,449	[6]
S (ромбическая)	293	—0,487	[38]
S (моноклинная)	293	—0,462	[38]
SCl_2	285	—0,479	[6]
SF_6	293	—0,301 (ж.)	[39]
$SOCl_2$	287	—0,451	[6]
SO_2Cl_2	283	—0,402	[6]
Cl	213	—0,57 (ж.)	[19]
Ar	90	—0,49 (г.)	[1]
	293	—0,48 (г.)	[1]
K[4*]	103—335	0,52	[11, 14]
	336	0,52 (ж.)	[14]
	463	0,52 (ж.)	[14]
	293	0,532	[40]

Продолжение табл.

Вещество	T, °K	χ, 10^{-6} $см^3/г$	Литература
K	303	0,460	[28]
	523	0,467 (ж.)	[28]
KF	298	0,46	[8]
KCl	298	—0,443	[6]
$KClO_3$	283	—0,481	[6]
KBr	293	—0,30	[15]
$KBrO_3$	296	—0,404	[6]
KI	295	—0,323	[6]
KIO_4	291	—0,405	[6]
KOH*	295	—0,292	[6]
KHF_2	288,5	—0,390	[6]
KCNO	293	—0,428	[22]
KH_2PO_4	293	—0,465	[41]
KH_2AsO_4	290	—0,435	[6]
KNO_3	298	—0,390	[6]
$(KSO_3) \cdot NOH$	293	—0,336	[6]
K_2CO_3*	293	—0,401	[12]
K_2SO_4	286	—0,412	[6]
$K_2S_2O_3$	289	—0,385	[6]
$K_2S_2O_5$	299	—0,393	[6]
$K_2S_4O_6$	295	—0,389	[6]
$K_2S_2O_7$	293	—0,412	[12]
$K_2S_2O_8$	295	—0,398	[6]
K_2SiO_3*	293	—0,371	[12]
$K_2SO_4Al_2(SO_4)_3$	299	—0,383	[6]
	113,4	—0,480	[29]
	189	—0,476	[29]
$K_2SO_4 \cdot Al_2(SO_4)_3 \cdot 24H_2O$	290	—0,470	[29]
$K_3Mn(CN)_6$	293	—0,579	[43]
$K_3Fe(CN)_5 \cdot CO$	292,1	13,48	[167]
$K_4Fe(CN)_6 \cdot 3H_2O$	293	—0,26	[44]
KCH_3COO*	293	—0,420	[79]
$KNa(C_4H_4O_6)$	283	—0,485	[6]
Ca[5*] (поликристалл)	293	—0,54	[42]
Ca (монокристалл) $\chi_{\parallel}$	291	1,1	[11]
$CaCO_3$	293	1,05	[30]
$Ca(CH_2COO)_2$	294	—0,354	[6]
$CaCl_2$	283	—0,446	[6]
$CaCl_2 \cdot 6H_2O$	290	—0,49	[17]
CaF_2	288	—0,462	[6]
$Ca(NO_3)_2 \cdot 4H_2O$	293	—0,360	[12]
CaO	291	—0,282	[6]
$Ca(OH)_2$	289	—0,27	[7]
$CaSO_4$	298	—0,288	[6]
$CaSO_4 \cdot H_2O$	293	—0,364	[12]
$CaSO_4 \cdot {}^1/_2(H_2O)$	293	—0,384	[12]
Sc[6*]	288	—0,344	[6]
	90	8,2	[46]
$Sc_2(C_2O_4)_3$	292	7,0	[46]
Sc_2O_3	293	—0,25	[15]
$Sc_2(SO_4)_3$	293	—0,018	[15]
Ti (поликристалл)[7*]	293	—0,33	[47]
Ti (монокристалл) $\chi_{\parallel}$	293	3,36	[48]
	298	3,35	[49]
Ti (монокристалл) $\chi_{\perp}$	573	3,65	[49]
	298	3,07	[49]

* Измерения на растворе.

2* См. рис. 27.5.

3* При плавлении (933°K) χ изменяется от $0,57 \cdot 10^{-6}$ до $0,46 \cdot 10^{-6}$ $см^3/г$ [90].

4* См. рис. 27.2, 27.3; при уменьшении температуры от 298 до 78°K χ уменьшается на 0,2% [8].

5* См. 27.4.

6* См. рис. 27.6.

7* См. рис. 27.7.

Продолжение табл.

Вещество	T, °K	χ, 10^{-6} $см^3/г$	Литература
	573	3,38	[49]
TiC*	293	0,6	[50]
$TiCl_4$	308	—0,287	[52]
TiF_3	300	11,9	[51]
TiN*	293	1,00	[50, 53]
TiO_2	293	0,066	[54]
Ti_3O_5	293	8,1	[54]
TiS_2	293	0,56	[54]
Ti_2S_3	293	0,91	[54]
V[2*]	293	5,30	[55]
VCl_4NO	298	5,0	[56]
V_2Cl_7NO	298,5	10,504	[57]
$V_2Cl_8(NO)_5$	298,5	10,998	[57]
Cu[3*]	298,5	5,944	[57]
	296	—0,0860	[58]
	295	—0,0859	[59]
	500	—0,0833	[59]
	900	—0,0767	[59]
CuCl	296	—0,385	[6]
Cu_2O	293	—0,185	[60]
Cu_3P_2	291	—0,23	[7]
CuS	293	—0,03	[61]
Cu_2S	291	—0,18	[7]
CuSe	293	—0,14	[61]
Cu_2Se	291	—0,15	[7]
Zn[4*] (поликристалл)	293	—0,14	[62]
Zn (монокристалл) $\chi_{\parallel}$	293	—0,169	[62]
Zn (монокристалл) $\chi_{\perp}$	293	—0,124	[62]
ZnO	293	—0,33....0,66	[65]
	293	—0,362	[22]
$ZnBr_2$	292	—0,40	[7]
$Zn(CH_3 \cdot COO)_2 \cdot 2H_2O$	286	—0,419	[6]
$ZnCl_2$[5*]	288	—0,427	[6]
$Zn(NO_3)_2$[5*]	283	—0,333	[6]
$Zn(OH)_2$	293	—0,76	[64]
$ZnSO_4 \cdot 7H_2O$	292	—0,277	[6]
Ga[6*] (поликристалл)	80	—0,35	[65]
	290	—0,31	[65]
Ga (монокристалл)	303	+0,036 (ж.)	[65]
Ga (монокристалл)	303	+0,0003 (ж.)	[66]
$\parallel$ оси a χ_a	80	—0,240	[65]
$\parallel$ оси b χ_b	80	—0,467	[65]
$\parallel$ оси c χ_c	80	—0,343	[65]
$\parallel$ оси a χ_a	290	—0,150	[65]
$\parallel$ оси b χ_b	290	—0,506	[65]
$\parallel$ оси c χ_c	290	—0,278	[65]
$\parallel$ оси a χ_a	298	—0,12	[66]
$\parallel$ оси b χ_b	298	—0,42	[66]
$\parallel$ оси c χ_c	298	—0,23	[66]
Ga As	293	—0,224	[2]
$GaCl_2$	293	—0,45	[67]
GaI_2	293	—0,33	[67]
GaN	293	—0,332	[2]
GaP	293	—0,274	[2]
GaSb	293[7*]	—0,201	[2]

* χ почти не зависит от T [50].
[2*] См. рис. 27.8.
[3*] См. рис. 27.9.
[4*] См. рис. 27.10.
[5*] Измерения на растворе.
[6*] См. рис. 27.11.
[7*] Концентрация дырок $p=6{,}4\cdot10^{18}$ $см^{-3}$.

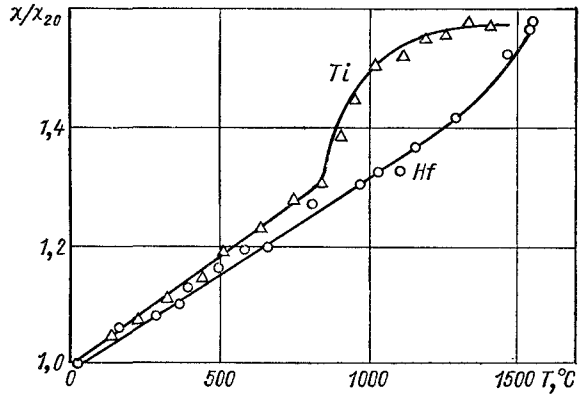


Рис. 27.7. Зависимость относительной магнитной восприимчивости χ/χ_{20} для Ti, Hf от температуры (χ_{20} — восприимчивость при 20° С) [48].

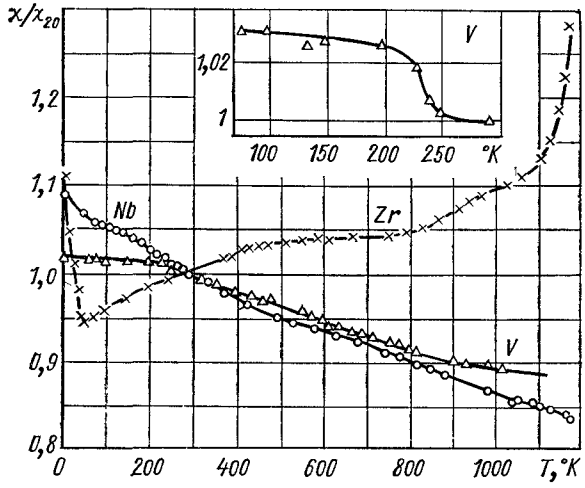


Рис. 27.8. Зависимость относительной магнитной восприимчивости χ/χ_{20} для V, Zr, Nb от температуры (χ_{20} — восприимчивость при 20° С) [55].

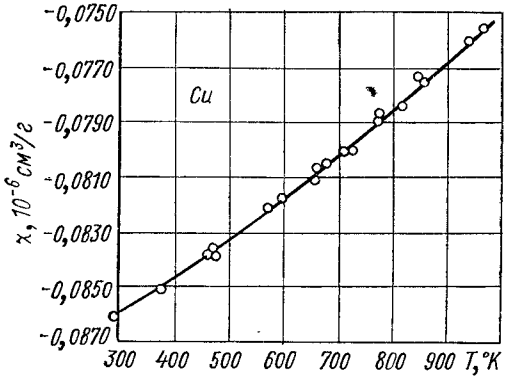


Рис. 27.9. Зависимость удельной магнитной восприимчивости Cu от температуры [59].

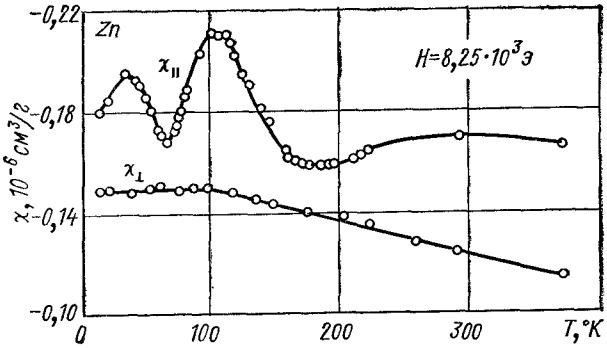


Рис. 27.10. Зависимость $\chi_{\parallel}$ и $\chi_{\perp}$ для Zn (по отношению к гексагональной оси) от температуры [62, 103].

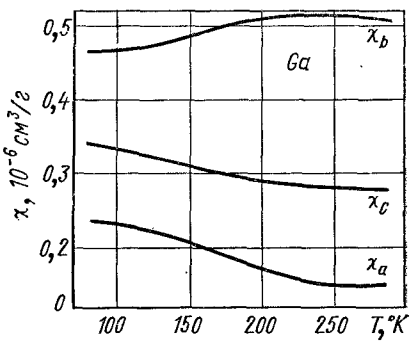


Рис. 27.11. Зависимость χ_a, χ_b, χ_c для Ga от температуры [65].

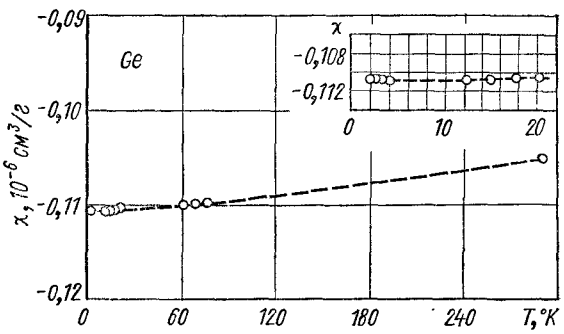


Рис. 27.12. Зависимость удельной магнитной восприимчивости Ge от температуры. Удельное сопротивление 44—46 *ом·см*; концентрация примеси Sb $<$ $<10^{14}$ *см*$^{-3}$ [69].

Продолжение табл.

Вещество	T, °K	χ, 10^{-6} *см*^{3}/*г*	Литература
Ge*	298	—0,1060	[68]
	4,2	—0,1102	[69]
	77,3	—0,1095	[69]
	293	—0,1050	[69]
Ge, $n<5\cdot10^{14}$ *см*$^{-3}$	293	—0,105	[35]
$n<10^{15}$ *см*$^{-3}$	293	—0,104	[70]
$n<10^{16}$ *см*$^{-3}$	293	—0,105	[70]
$n=8\cdot10^{16}$ *см*$^{-3}$	293	—0,105	[70]
$n=2{,}9\cdot10^{17}$ *см*$^{-3}$	293	—0,106	[70]
$n=6{,}8\cdot10^{17}$ *см*$^{-3}$	293	—0,110	[70]
$n=1{,}5\cdot10^{18}$ *см*$^{-3}$	293	—0,121	[70]
$n=10^{14}$ *см*$^{-3}$	1,3—100	—0,110	[71]
$n=1{,}1\cdot10^{17}$ *см*$^{-3}$	1,3—100	—0,113	[71]
$n=3\cdot10^{17}$ *см*$^{-3}$	1,3—100	—0,118	[71]
$n=2\cdot10^{18}$ *см*$^{-3}$	1,3—100	—0,146	[71]
$n=10^{19}$ *см*$^{-3}$	1,3—100	—0,180	[71]
$n=3{,}2\cdot10^{19}$ *см*$^{-3}$	1,3—100	—0,218	[71]
Ge	293	—0,1055	[68]
	293	—0,1061	[68]
	293	—0,1066	[68]
	293	—0,1105	[68]
Ge, $n=6{,}5\cdot10^{18}$ *см*$^{-3}$	141	$-4{,}7\cdot10^{-2}$	[68]
$n=6{,}5\cdot10^{18}$ *см*$^{-3}$	297	$-2{,}82\cdot10^{-2}$	[68]
$n=5{,}2\cdot10^{16}$ *см*$^{-3}$	141	$-6{,}71\cdot10^{-4}$	[68]
$n=5{,}2\cdot10^{16}$ *см*$^{-3}$	297	$-2{,}54\cdot10^{-4}$	[68]
$p=4\cdot10^{19}$ *см*$^{-3}$	141	$-1{,}2\cdot10^{-2}$	[72]
$p=4\cdot10^{19}$ *см*$^{-3}$	297	$-1{,}06\cdot10^{-2}$	[72]
$p=3{,}6\cdot10^{17}$ *см*$^{-3}$	141	$-1{,}3\cdot10^{-3}$	[72]
$p=3{,}6\cdot10^{17}$ *см*$^{-3}$	297	$3{,}29\cdot10^{-4}$	[72]
As	90	+0,01	[73]
As (поликристалл)	298	—0,07	[73]
	84	+0,146	[74]
	181	+0,092	[74]
	298	+0,016	[74]
	364	—0,034	[74]
	461	—0,087	[74]
As (монокристалл) $\chi_{\parallel}$	82	+1,005	[74]
	194	+0,765	[74]
	292	+0,578	[74]
	311	+0,547	[74]
	391	+0,435	[74]
	531	+0,273	[74]
As (монокристалл) $\chi_{\perp}$	82	—0,238	[74]
	180	—0,262	[74]
	292	—0,279	[74]
	433	—0,302	[74]
	510	—0,302	[74]
As (аморфный)	90	—0,30	[73]
	298	—0,31	[73]
$AsCl_3$	291	—0,408 (ж.)	[6]
As_2O_3	291	—0,27	[7]
As_2S_3	291	—0,03	[7]
Se (гексагональный)**	293	—0,336	[75]

* См. рис. 27.12, 27.13, 27.14.
** См. рис. 27.15.

Продолжение табл.

Вещество	T, °К	χ, 10^{-6} $см^3/г$	Литература
Se (гексагональный)	293	—0,280	[76]
Se (аморфный)	293	—0,306	[75]
	293	—0,290	[76]
	300	—0,279	[77]
	513 (ж.)	—0,307	[78]
	613	—0,308	[78]
	688	—0,305	[78]
Br	103	—0,40 (тв.)	[11]
	265	—0,40 (тв.)	[11]
	266	—0,40 (ж.)	[11]
	291	—0,40 (ж.)	[11]
Kr	291	—0,38 (ж.)	[79]
	—	—0,35 (г.)	[80]
Rb*	298	0,21	[8]
	303	0,198	[81]
	373	0,198	[81]
Rb_2CO_3	293	—0,321	[37]
RbCl	293	—0,327	[37]
$RbNO_3$	293	—0,281	[37]
Rb_2SO_4	293	—0,331	[37]
Sr	273	1,02	[82]
	295	1,05	[82]
	338	1,09	[82]
	533	0,73	[82]
$SrBr_2$	292	—0,39	[7]
	293	—0,53	[83]
$SrBr_2 \cdot 6H_2O$ 2*	286	—0,356	[6]
$SrCO_3$	298	—0,300	[6]
$Sr(CH_3 \cdot COO)_2$	284	—0,385	[6]
$SrCl_2$	293	—0,56	[7]
$SrCl_2 \cdot 6H_2O$ 2*	289	—0,387	[6]
SrF_2	293	—0,296	[12]
SrI_2	292	—0,44	[7]
	293	—0,38	[6]
$Sr(NO_3)_2 \cdot 4H_2O$	286	—0,392	[6]
SrO	293	—0,060	[7]
$SrSO_4$	296	—0,286	[6]
$Sr(OH)_2 \cdot 8H_2O$	282	—0,264	[6]
Y3*	292	2,1	[46]
Zr4*	293	1,38	[55]
	293	1,33	[48]
ZrC	293	—0,22	[50]
ZrN5*	293	0,57	[50]
ZrO_2	288	—0,112	[7]
$ZrSiO_4$	292	—0,215	[6]
Nb6*	293	2,34	[55]
	298	2,20	[56]
	14	2,34	[10]
	289	2,28	[10]
$NbH_{0,86}$	81	0,62	[84]
	291	0,70	[84]
Mo7*	293	0,82	[48]
$MoBr_2$	293	1,34	[86]
$MoBr_4$	293	1,62	[87]
$Mo(CO)_6$	293	—0,28	[88]

* См. рис. 27.2; при уменьшении температуры от 298 до 78°К χ увеличивается на 2,5% [8].
2* Измерения на растворе.
3* См. рис. 27.6.
4* См. рис. 27.8, 27.16.
5* Магнитное поле H=1945 э.
6* См. рис. 27.8.
7* См. рис. 27.17.

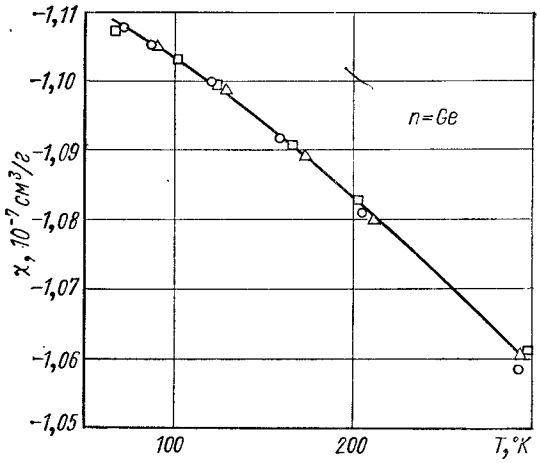


Рис. 27.13. Зависимость удельной магнитной восприимчивости n-Ge от температуры. Концентрация носителей в образцах: ○, △ — 10^{13} $см^{-3}$; □ — 10^{14} $см^{-3}$ [68, 103].

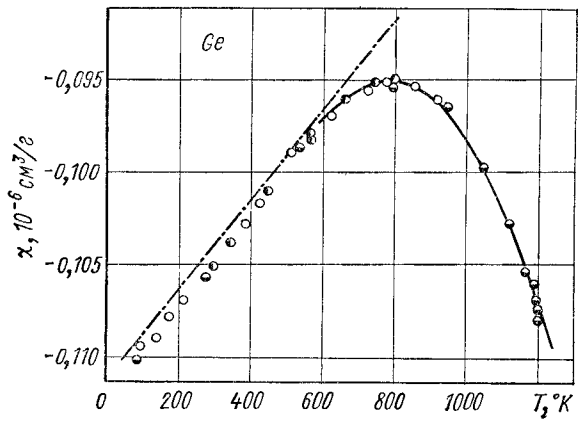


Рис. 27.14 Зависимость удельной магнитной восприимчивости Ge от температуры [35, 103].

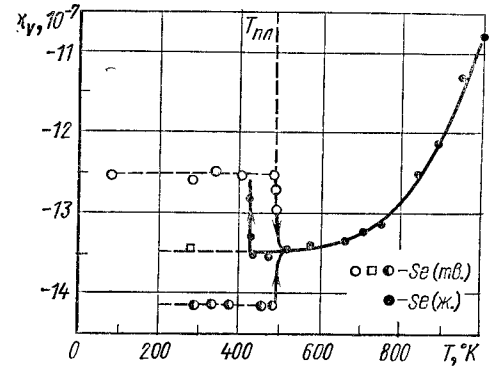


Рис. 27.15. Зависимость χ_V твердого и жидкого Se от температуры [77].

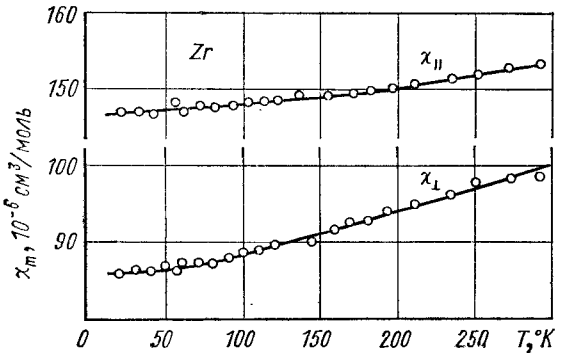


Рис. 27.16. Зависимость $\chi_{\parallel}$ и $\chi_{\perp}$ для Zr от температуры [166] ($\parallel$ и $\perp$ гексагональной оси; $H = 11$ кэ).

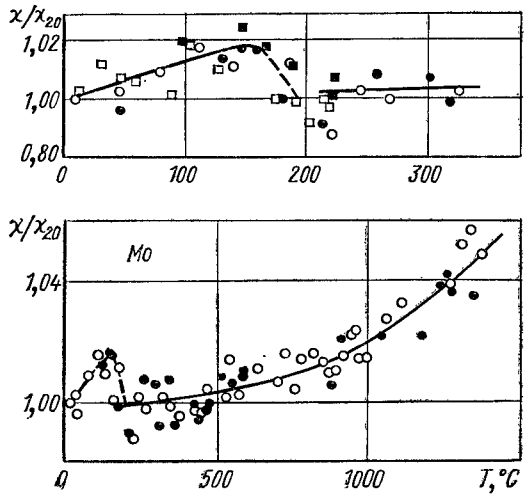


Рис. 27.17. Зависимость относительной магнитной восприимчивости χ/χ_{20} Mo от температуры [48] (χ_{20} — магнитная восприимчивость при 20° С).

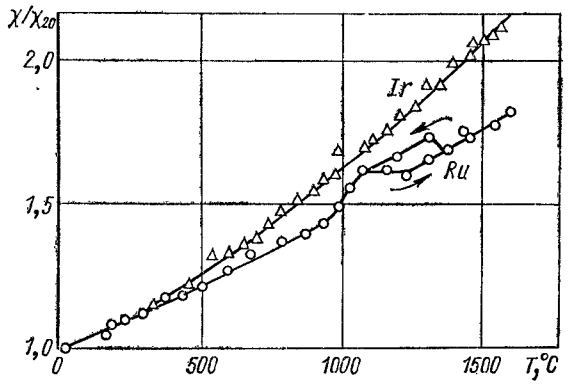


Рис. 27.18. Зависимость относительной магнитной восприимчивости χ/χ_{20} для Ru, Ir от температуры [6] (χ_{20} — магнитная восприимчивость при 20°С).

Продолжение табл.

Вещество	T,°K	χ, 10^{-6} см^3/г	Литература
MoF_6	293	—0,12	[39]
MoO_2	293	0,33	[54]
	293	0,31	[85]
MoO_3	293	0,88	[54]
	293	0,02	[85]
Mo_2O_3	289	—0,35	[7]
Mo_2O_5	293	0,23	[86]
Mo_3O_8	289	0,30	[54]
MoS_2	289	—0,33	[7]
	293	—0,84	[85]
H_2MoO_4	289	—0,015	[7]
Tc	78	2,9	[89]
	298	2,7	[89]
	402	2,5	[89]
$TcO_2 \cdot 2H_2O$	78	3,4	[89]
	197	1,86	[89]
	256	1,63	[89]
	300	1,46	[89]
	348	1,40	[89]
	398	1,34	[89]
Ru*	18	0,43	[11]
	103	0,55	[11]
	173	0,50	[11]
	233	0,46	[11]
	293	0,34	[48]
$RuCl_3$	298	7,21	[90]
	423	5,18	[90]
RuO_2	298	1,21	[90]
	623	1,46	[90]
Rh2*	293	1,03	[48]
	20	0,926	[91]
	40	0,928	[91]
	60	0,930	[91]
	80	0,932	[91]
	100	0,935	[91]
	200	0,960	[91]
	290	0,988	[91]
	623	1,17	[91]
Rh_2O_3	298	0,408	[90]
	623	0,398	[90]
RhF_4	293	2,99	[45]
Pd3*	293	5,4	[48]
	20	7,32	[91]
	40	7,37	[91]
	60	7,49	[91]
	70	7,54	[91]
	80	7,56	[91]
	90	7,54	[91]
	100	7,50	[91]
	150	7,06	[91]
	200	6,44	[91]
	250	5,79	[91]
	270	5,53	[91]
	290	5,27	[91]
	291	5,8	[14]
	473	4,6	[14]
Pd	1023	2,6	[14]
	1503	1,7	[14]

* См. рис. 27.18.
2* См. рис. 27.19.
3* См. рис. 27.20.

Продолжение табл.

Вещество	T, °K	χ, 10^{-6} $см^3/г$	Литература
Ag*	296	—0,181	[58]
	293	—0,192	[92, 93]
	63,8	—0,190	[94]
	289	—0,188	[94]
	14	—0,19	[16]
	293	—0,1807	[59]
	400	—0,1792	[59]
	600	—0,1769	[59]
	975	—0,1786	[59]
AgBr	291	—0,33	[7]
AgCN	299	—0,322	[6]
$AgCO_3$	295	—0,292	[6]
AgCl	290	—0,35	[7]
AgI	292	—0,37	[7]
$AgNO_3$	300	—0,274	[6]
Ag_2SO_4	299	—0,292	[6]
Cd[2]* (поликристалл)	14	—0,326	[99]
	289	—0,183	[99]
	293	—0,175	[96]
Cd (монокристалл) $\perp$ гексагональной оси	14	—0,130	[97]
	293	—0,142	[97]
Cd $\parallel$ гексагональной оси	14	—0,679	[97]
	293	—0,243	[97]
$CdBr_2 \cdot 4H_2O$	288	—0,343	[6]
$Cd(CH_3COO)_2 \cdot 3H_2O$	291	—0,365	[6]
$Cd(CN)_2$	290	—0,292	[6]
$CdCO_3$	288	—0,305	[6]
$CdCl_2 \cdot H_2O$	285	—0,368	[6]
CdI_2	294	—0,308	[6]
$Cd(NO_3)_2 \cdot 4H_2O$	292	—0,265	[6]
CdO	293	0,234	[98]
CdS	293	—0,346	[98]
CdSb	293	—0,213	[100]
	293	—0,30	[101]
$3CdSO_4 \cdot 8H_2O$	286	—0,281	[6]
In (поликристалл)[3]*	293	—0,11	[11]
	110	—0,14	[11]
	293	—0,077	[102]
	295	—0,089	[103]
In (монокристалл) $\chi_{\parallel}$	293	—0,121	[102]
	293	—0,158	[104]
In (монокристалл) $\chi_{\perp}$	293	—0,054	[102]
	293	—0,078	[104]
InAs	293[4]*	—0,301	[35]
$InCl_3$	291	—0,39	[7]
InN	293[5]*	—0,320	[106]
InP	293[6]*	—0,313	[35]
$InP_{0,2}As_{0,8}$	293	—0,282	[35]
InS_3	293	—0,19	[7]
InSb	293[7]*	—0,281	[35]
	293[8]*	—0,284	[105]

* См. рис. 27.21; при плавлении (1233°K) χ изменяется от $-0{,}2 \cdot 10^{-6}$ до $-0{,}3 \cdot 10^{-6}$ $см^3/г$ [95].
[2]* См. рис. 27.22.
[3]* См. рис. 27.23.
[4]* $n = 7 \cdot 10^{17}$ $см^{-3}$.
[5]* Решеточная часть χ.
[6]* $n = 1{,}9 \cdot 10^{16}$ $см^{-3}$.
[7]* Концентрация электроиов $n = 6{,}2 \cdot 10^{15}$ $см^{-3}$.
[8]* $n = 4 \cdot 10^{14}$ $см^{-3}$.

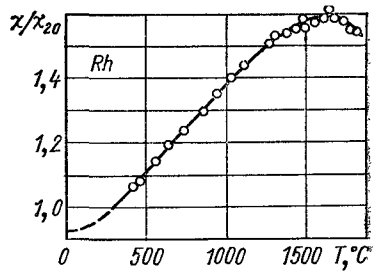


Рис. 27.19. Зависимость относительной магнитной восприимчивости χ/χ_{20} для Rh от температуры [48] (χ_{20} — магнитная восприимчивость при 20° С).

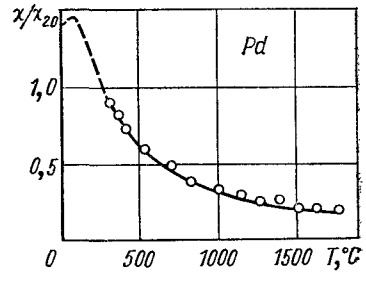


Рис. 27.20. Зависимость относительной магнитной восприимчивости χ/χ_{20} для Pd от температуры [48] (χ_{20} — магнитная восприимчивость при 20° С).

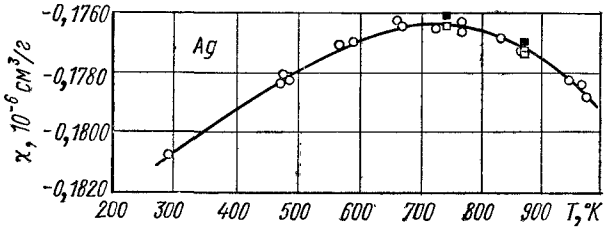


Рис. 27.21. Зависимость удельной магнитной восприимчивости Ag от температуры [59]:
○ — нормальный образец; ■ — выдержка в течение 12 ч при температуре измерения; □ — обезгаженный образец.

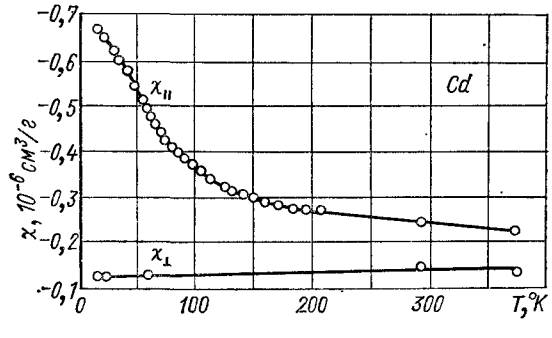


Рис. 27.22. Зависимость $\chi_{\parallel}$ и $\chi_{\perp}$ для Cd от температуры [97, 103]

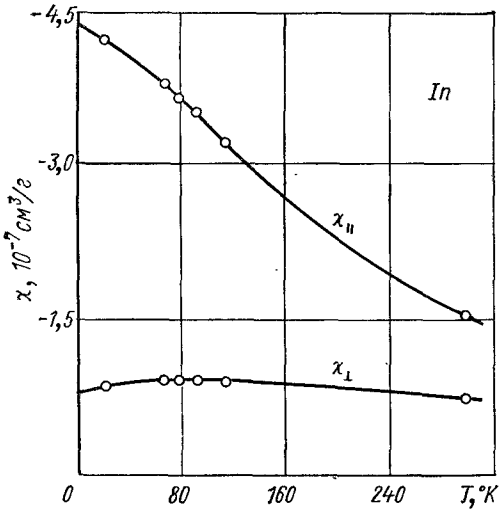


Рис. 27.23. Зависимость $\chi_{\parallel}$ и $\chi_{\perp}$ для In от температуры [104].

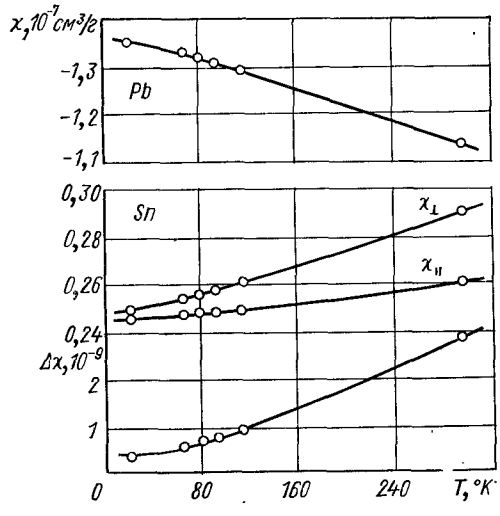


Рис. 27.24. Зависимость удельной магнитной восприимчивости Sn, Pb и $\Delta\chi = \chi_{\perp} - \chi_{\parallel}$ для Sn от температуры [104].

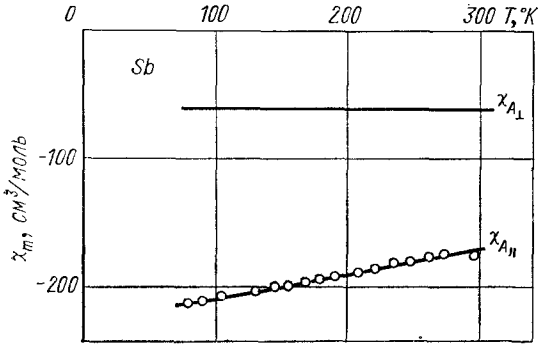


Рис. 27.25. Зависимость $\chi_{m\parallel}$ и $\chi_{m\perp}$ для Sb от температуры [103, 113].

Продолжение табл.

Вещество	T,°K	χ, 10^{-6} см³/г	Литература
Sn-α	20	—0,20	[94]
	289	—0,25	[94]
	80	—0,26	[107]
	288	—0,31	[107]
	273*	—0,310	[108]
	273²*	—0,265	[108]
Sn-β (поликристалл)³*	4,2	+0,023	[69]
	293	+0,026	[69, 94]
Sn-β (монокристалл) $\chi_{\parallel}$	293	+0,0241	[109]
	293	+0,026	[104]
Sn-β (монокристалл) $\chi_{\perp}$	293	+0,0270	[109]
	293	+0,029	[104]
$SnBr_4$	293	—0,354	[19]
$Sn(CH_3)_4$	293	—0,218	[110—112]
$Sn(C_2H_5)_4$	293	—0,138	[110—112]
$Sn(C_4H_9)_4$	293	—0,085	[110—112]
$SnCl_2$	291	—0,37	[7]
$SnCl_4$	287	—0,438	[6]
$SnCl_2 \cdot 2H_2O$	284	—0,343	[6]
SnO	290	—0,11	[7]
SnO_2	288	—0,050	[7]
Sn_2O_3	289	—0,33	[7]
$SnO(OH)_2$	293	—0,278	[12]
$Sn(OH)_4$	293	—0,321	[12]
$SnO(OH)(CH_3)$	293	—0,324	[12]
$SnSO_4$	291	—0,29	[7]
Sb (поликристалл)⁴*	297	—0,80	[113]
Sb(монокристалл) $\chi_{\parallel}$	90	—1,73	[114]
	293	—1,42	[114]
Sb (монокристалл) $\chi_{\perp}$	90	—0,50	[114]
	293	—0,50	[114]
$SbBr_3$	293	—0,275	[6]
SbCd	293	—0,213	[116]
$SbCl_3$	284	—0,376	[6]
$SbCl_5$	288	—0,386 (ж.)	[6]
SbF_3	293	—0,255	[12]
Sb_2O_3	287	—0,19	[7]
$Sb_2Se_3$⁵*	130—500	—0,383	[115]
Sb_2Te_3	130—500	—0,398	[115]
	293	—0,153	[116]
	293	—0,040 (ж.)	[116]
SbZn	293	—0,285	[116]
Sb_2Zn_3	293	—0,261	[116]
	—	—0,107 (ж.)	[116]
Te (поликристалл)⁶*	14,2	—0,293	[94]
	289	—0,290	[94]
	293	—0,290	[76]
	300	—0,288	[77]
	293	—0,307	[116]

* $n = 10^{17}$ см$^{-3}$.
²* Решеточная часть χ.
³* См. рис. 27. 24.
⁴* См. рис. 27.25.
⁵* p-Проводимость.
⁶* См. рис. 27.26.

Продолжение табл.

Вещество	T, °K	χ, 10^{-6} $см^3/г$	Литература
Te (монокристалл)* $\chi_{\parallel}$	293	—329	[116]
Te (монокристалл) $\chi_{\perp}$	293	—0,296	[116]
	>713	—0,029 (ж.)	[100]
TeO_2	291	—0,14	[7]
$Te(OH)_6$	293	—0,353	[6]
I	14	—0,313	[94]
	289	—0,336	[94]
	290	—0,35	[77]
	298	—0,35	[14]
	368	—0,38	[14]
	386	—0,39 (ж.)	[14]
	433	—0,33 (ж.)	[14]
ICl	285	—0,336 (ж.)	[6]
ICl_2[2*]	288	—0,387	[6]
Xe	293	—0,51	[117]
	293	—0,53	[118]
Cs[3*]	293	0,226	[40]
	293	0,22	[119]
Cs	298	0,23	[8]
$Cs_2AgAuCl_6$	293	—0,33	[120]
Cs_2CO_3	293	—0,320	[12, 37]
CsCl	293	—0,363	[12, 37]
$CsNO_3$	293	—0,412	[12, 37]
Cs_2SO_4	293	—0,322	[12, 37]
$CsSO_4Al_2(SO_4)_3$	282	—0,51	[7]
$24H_2O \cdot CsSO_3Al_2(SO_4)_3$	287	—0,49	[7]
Ba	103—291	0,9	[11]
	293	0,147	[121]
	573	0,316	[121]
	673	0,415	[121]
$Ba_3(AsO_3)_2$	293	—0,280	[12]
$BaBr_2$	293	—0,39	[7]
$BaBr_2 \cdot 2H_2O$	293	—0,371	[22]
$BaCO_3$	282,5	—0,270	[6]
$BaCl_2$	293	—0,41	[7]
$BaCl_2 \cdot 2H_2O$	284	—0,323	[6]
BaF_2	293	—0,291	[37]
BaI_2[4*]	295	—0,39	[122]
$BaI_2 \cdot 2H_2O$	292	—0,38	[7]
$Ba(NO_3)_2$	293	—0,254	[12]
BaO	293	—0,13	[7]
$Ba(OH)_2$	291	—0,32	[7]
$Ba(OH)_2 \cdot 8H_2O$	293	—0,497	[37]
BaS	291	—0,32	[7]
$BaSO_4$	293	—0,306	[12]
$BaS_2O_6 \cdot 2H_2O$	293	—0,359	[12]
La[4*]	293	0,73	[123]
$LaCl_3$	288	5,6	[7]
$La(NO_3)_3 \cdot 2NH_4NO_3$	288	—0,29	[7]
La_2O_3	297	—0,40	[124]
LaS_3	293	—0,03	[124]

1* При повышении температуры $\chi_{\parallel}$ уменьшается, а $\chi_{\perp}$ почти постоянно; при 493°K $\chi_{\parallel} = \chi_{\perp}$.

2* Измерения на растворе.

3* При уменьшении температуры от 298°K до 78°K χ увеличивается на 12% [8].

4* См. рис. 27.6.

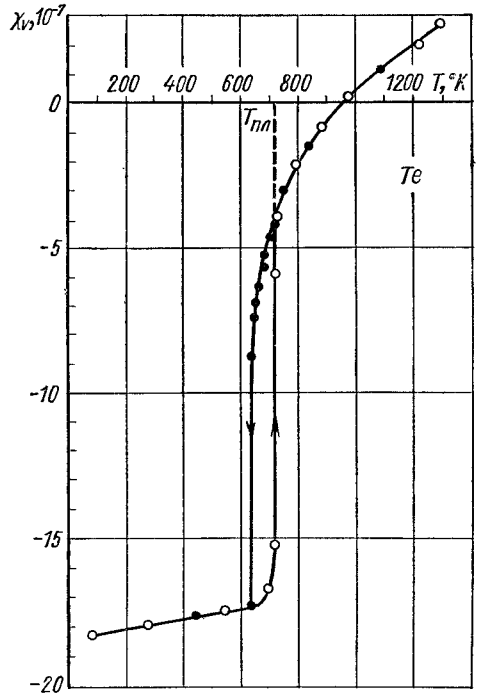


Рис. 27.26. Зависимость χ_V твердого и жидкого Te от температуры [77].

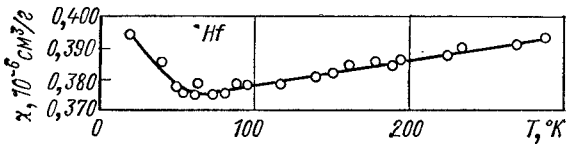


Рис. 27.27. Зависимость удельной магнитной восприимчивости Hf от температуры [126].

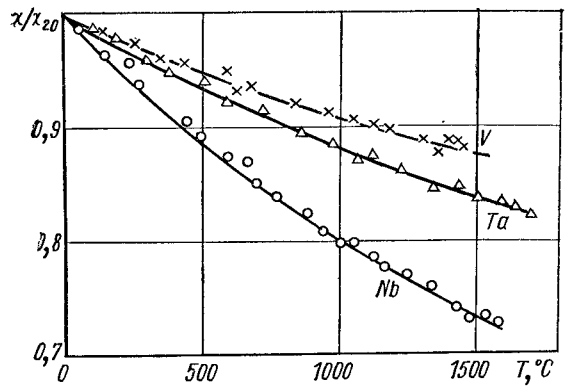


Рис. 27.28. Зависимость относительной магнитной восприимчивости χ/χ_{20} для V, Ta, Nb от температуры (χ_{20} — магнитная восприимчивость при 20° C) [48].

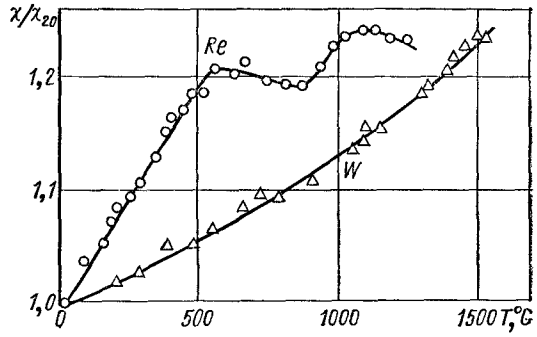


Рис. 27.29. Зависимость относительной магнитной восприимчивости χ/χ_{20} для Re, W от температуры (χ_{20} — магнитная восприимчивость при 20°С) [48].

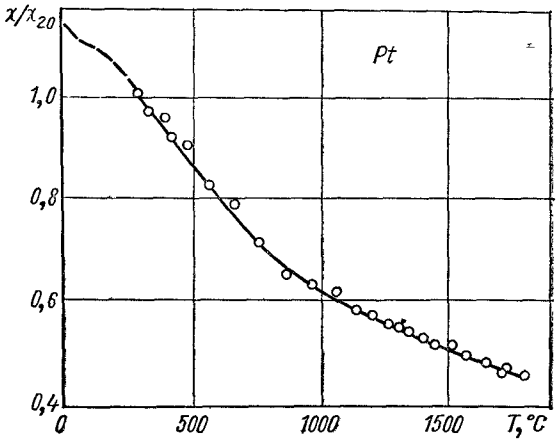


Рис. 27.30. Зависимость относительной магнитной восприимчивости χ/χ_{20} для Pt от температуры (χ_{20} — магнитная восприимчивость при 20° С) [48].

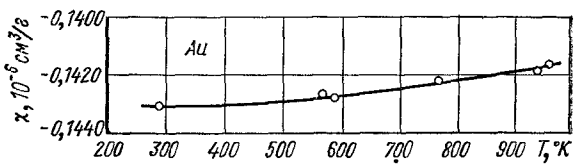


Рис. 27.31. Зависимость удельной магнитной восприимчивости Au от температуры [59].

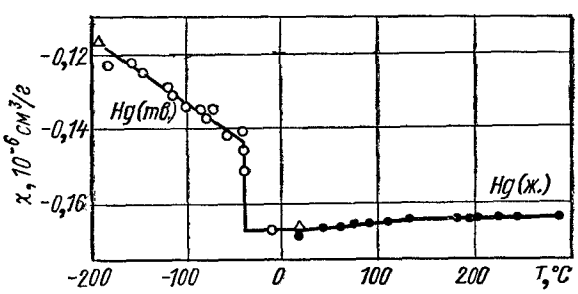


Рис. 27.32. Зависимость удельной магнитной восприимчивости Hg от температуры [103].

Продолжение табл.

Вещество	T, °К	χ, 10^{-6} $см^3/г$	Литература
LaS_4	293	—0,26	[124]
$La_2(SO_4)_3$	293	—0,30	[47]
Hf*	4,2	0,46	[125]
	77	0,40	[125]
	295	0,42	[125]
	293	0,39	[126]
	293	0,38	[48]
Ta (поликристалл)[2*]	298	0,827	[56]
	298	0,840	[127]
	293	0,85	[48]
Ta (монокристалл) $\chi_{\parallel}$	303	—0,329	[103, 116]
	493—633	—0,296	[116]
Ta (монокристалл) $\chi_{\perp}$	303	—0,296	[103, 116]
	493—633	—0,296	[116]
W[3*]	293	0,29	[48]
	293	0,291	[128]
WBr_5	293	0,130	[129]
WBr_6	293	0,03	[129]
WC[4*]	293	0,05	[50]
WF_6	293	—0,134 (ж.)	[39]
WO_2	293	0,11	[129]
W_2O_5	293	0,20	[129]
WO_3	288	0,81	[54]
Re[5*]	293	0,35	[48]
	194—293	0,369	[130]
ReO_2	78—298	0,073	[89]
Re_2O_2	293	0,2	[131]
Re_2O_3	293	0,16	[131]
ReO_4K	293	—0,119	[130]
ReO_3NH_4	293	—0,150	[130]
Os	298	0,052	[132]
Ir[6*]	293	0,14	[8]
	291	0,15	[14]
	473	0,17	[14]
	1123	0,26	[14]
	1423	0,31	[14]
$IrCl_3$	298	—0,114	[133]
IrO_2	298	+0,997	[133]
	623	+0,926	[133]
Pt[7*]	293	0,97	[48]
	20	1,094	[91]
	100	1,065	[91]
	200	1,028	[91]
	290	0,972	[91]
	298	0,982	[90]
	623	0,795	[90]
	973	0,45	[14]
	1493	0,30	[14]

1* См. рис. 27.7, 27.27.
2* См. рис. 27.28.
3* См. рис. 27.29.
4* При $H = 3630$ э $\chi = 0{,}07 \cdot 0^{-6}$ $см^3/г$ для $T = 293$°К, $\chi = 0{,}06 \cdot 10^{-6}$ $см^3/г$ для $T = 513$°К, $\chi = 0{,}02 \cdot 10^{-6}$ $см^3/г$ для $T = 723$°К [50].
5* См. рис. 27.29.
6* См. рис. 27.18.
7* См. рис. 27.30.

Продолжение табл.

Вещество	T, °К	χ, 10^{-6} $см^3/г$	Литература
PtCl	298	—0,51	[90]
$PtCl_2CO$	293	—0,29	[88]
$PtCl_2 \cdot 2CO$	293	—0,37	[88]
K_2PtCl_6	293	—0,393	[134]
K_2PtCl_4	293	—0,356	[134]
$K_2Pt(C_2O_4)_2 \cdot 2H_2O$	293	—0,31	[134]
Au*	296	—0,142	[58]
	14	—0,132	[96]
	295	—0,1430	[59]
	975	—0,1417	[59]
AuBr	293	—0,22	[135]
$AuCl_3$	294	—0,37	[135]
AuCl	289	—0,288	[6]
AuI	293	—0,28	[135]
$AuKCl_4$	293	—0,4	[135]
Hg (поликристалл)[2*]	560,5	—0,1637 (ж.)	[136]
	291,5	—0,1681 (ж.)	[136]
	293	—0,167 (ж.)	[40]
	80	—0,118 (тв.)	[137]
Hg (монокристалл) $\chi_\parallel$	80	—0,112	[137]
Hg (монокристалл) $\chi_\perp$	80	—0,121	[137]
$HgBr_2$	288	—0,30	[7]
$Hg(CH_3)_2$	293	—0,199	[37]
$Hg(C_2H_5)_2$	293	—0,158	[37]
$Hg(C_4H_9)_2$	293	—0,115	[37]
$Hg(C_5H_{11})_2$	293	—0,103	[37]
$Hg(CH_3COO)_2$	301	—0,317	[6]
$Hg_2(CH_3COO)_2$	300	—0,276	[6]
$Hg(CN)_2$	284	—0,268	[6]
HgCl	292	—0,23	[7]
$HgCl_2$	298	—0,298	[6]
Hg_2Cl_2	298	—0,253	[6]
HgI_2	289	—0,295	[6]
Hg_2I_2	298	—0,245	[6]
$Hg(NO_3)_2$	287	—0,231	[6]
$Hg_2(NO_3)_2 \cdot 2H_2O$	298	—0,225	[6]
HgO	289	—0,24	[7]
HgS	289	—0,23	[7]
$HgSO_4$	297	—0,218	[6]
Hg_2SO_4	299	—0,247	[6]
Tl (поликристалл)	293	—0,247	[138]
	14,2	—0,258	[94]
	289	—0,215	[94]
Tl (монокристалл)[3*] $\chi_\parallel$	293	—0,412	[138]
	293	—0,420	[139]
	293	—0,150	[30]
Tl (монокристалл) $\chi_\perp$	293	—0,165	[138]
	293	—0,164	[139]
	293	—0,244	[30]
Pb (поликристалл)	14,2	—0,132	[94]
	289	—0,111	[94]
	289	—0,107	[138]
	291—603	—0,12	[14]
	603—873	—0,08 (ж.)	[14]

* См. рис. 27.31; при плавлении (1336°К) χ изменяется от $-0{,}16 \cdot 10^{-6}$ до $-0{,}23 \cdot 10^{-6}$ $см^3/г$ [95].
2* См. рис. 27.32.
3* См. рис. 27.4.

Продолжение табл.

Вещество	T, °К	χ, 10^{-6} $см^3/г$	Литература
Pb (монокристалл)[4*] $\chi_\parallel$	293	—0,114	[104]
$PbBr_2$	293	—0,28	[7]
$PbCl_2$	286	—0,264	[6]
	288	—0,32	[7]
PbF_2	289	—0,24	[7]
PbI_2	292	—0,33	[7]
$Pb(NO_3)_2$	293	—0,248	[43]
PbO	293	—0,19	[140]
	291	—0,13	[7]
PbO_2	293	—0,09	[140]
Pb_3O_4	291	—0,24	[7]
PbSe[5*]	293	—0,447	[115]
PbTe	293	—0,446	[115]
	293	—0,150 (тв.)	[141]
	293	—0,051 (ж.)	[141]
Bi (поликристалл)[6*]	14	—1,55	[87]
	294	—1,34	[142]
	300	—1,30	[87]
Bi (монокристалл)[7*] $\chi_\parallel$	14	—1,20	[87]
	85	—1,295	[143]
	290	—1,08	[143]
	294	—1,05	[142]
Bi (монокристалл) $\chi_\perp$	14	—1,77	[87]
	85	—2,04	[143]
	290	—1,49	[143]
	294	—1,48	[142]
$BiBr_3$	293	—0,328	[144]
$BiCl_3$	293	—0,322	[144]
BiI_3	293	—0,49	[7]
$HBiO_2$	288	—0,22	[7]
$Bi(NO_3)_3 \cdot 5H_2O$	293	—0,365	[144]
Bi_2O_3	293	—1,170	[22]
Bi_2S_3	293	—0,385	[144]
	293	—0,342	[144]
Bi_2Se_3	130—600[8*]	—0,410	[115]
Bi_2Te_3	130—600[9*]	—0,402	[115]
BiTe	293	—0,493	[100]
Th	293	0,57	[13]
	90	0,66	[13]
	293	1,92	[145]
	130—300	0,410	[146, 147]
$Th(CO_3)_2$	293	$\chi < 0$	[153]
$Th(NH_2)I_3 \cdot 4NH_3$[10*]	293	$\chi < 0$	[152]
ThO_2[10*, 11*]	83; 298	—0,056	[148]
ThS	293	$\chi < 0$	[149]
Th_2S_3	293	$\chi < 0$	[149]
Th_7S_{12}	293	$\chi < 0$	[149]
ThS_2	293	$\chi < 0$	[149]
ThSe[12*]	293	$\chi > 0$	[150]
Th_2Se_3	293	$\chi < 0$	[151]

4* См. рис. 27.24; анизотропия χ в плоскости (100) отсутствует.
5* Решеточная часть χ.
6* См. рис. 27.33.
7* В точке плавления (544°К) $\chi_{тв} = -0{,}98 \cdot 10^{-6}$ $см^3/г$, $\chi_ж = -0{,}05 \cdot 10^{-6}$ $см^3/г$.
8* n-Проводимость.
9* p-Проводимость.
10* Не введена поправка на диамагнетизм.
11* Приведено значение χ, среднее для интервала температур 83—298°К.
12* χ не зависит от T [150].

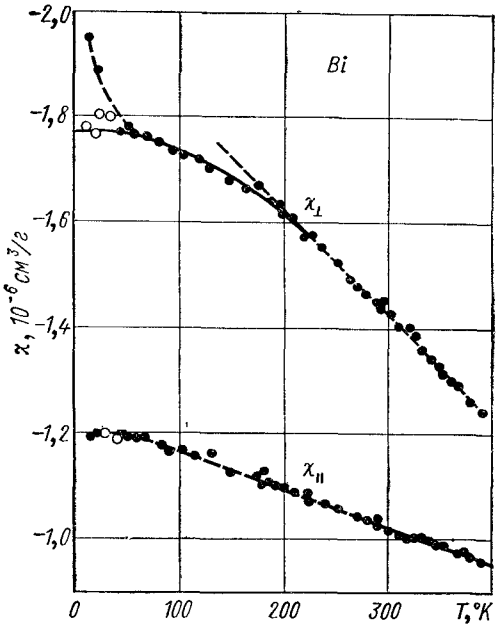


Рис.27.33. Зависимость $\chi_\parallel$ и $\chi_\perp$ для Bi от температуры [103]:
● — $H = 9{,}5$ кэ; ○ — $H = 4{,}85$ кэ.

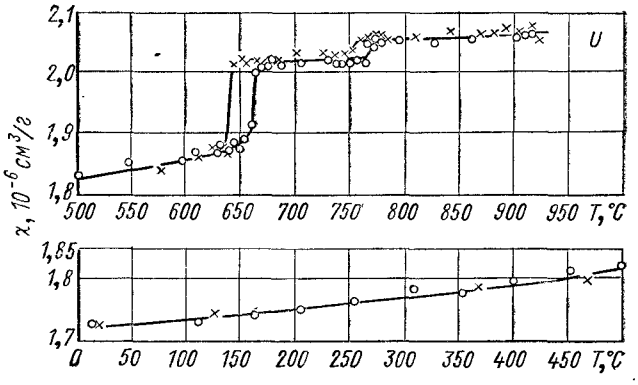


Рис. 27.34. Зависимость удельной магнитной восприимчивости U от температуры [103, 154].

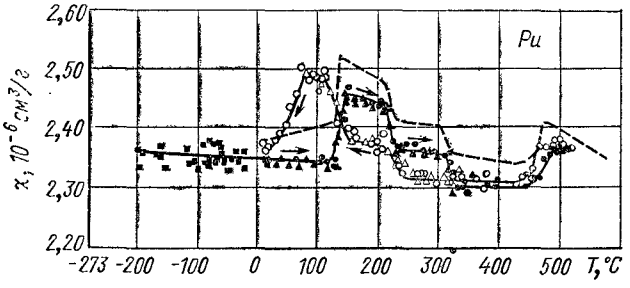


Рис. 27.35. Зависимость удельной магнитной восприимчивости Pu от температуры [103, 164]:
▲,● — измерения при нагреве; △,○ — при охлаждении.

Продолжение табл.

Вещество	T, °K	χ, 10^{-6} см^3/г	Литература
α-U*	80	1,63	[154]
	293	1,72	[154]
β-U[2*]	288—1193	2,02	[154]
γ-U[3*]	288—1193	2,06	[154]
$UO_2(C_5H_7O_2)\cdot H_2O$	298	$\chi < 0$	[155]
UF_6[4*]	90	0,01	[39]
	293	0,12	[39]
$U(C_2O_4)_2$	293	6,086	[153]
UOS	290,5	10,527	[159]
UOSe	291	7,687	[163]
US	296	15,481	[149]
	293	17,031	[156]
U_2S_2	296	7,307	[149]
	293	4,545	[157]
U_3S_5	293	4,279	[157]
US_3	293	8,083	[162]
α-US_2	290,5	10,387	[159]
β-US_2	290,5	11,490	[159]
γ-US_2	293	12,317	[160]
USe_3	293	6,554	[161]
U_3Se_5	293	3,567	[158]
α-Pu[5*,6*]	78—793	2,35	[164]
β-Pu[6*,7*]	78—793	2,44	[164]
γ-Pu[6*,8*]	78—793	2,36	[164]
δ-Pu[6*,9*]	78—793	2,31	[164]
ε-Pu[6*]	78—793	2,36	[164]

* См. рис. 27.34.
2* α-U переходит в β-U при T=933°K; значение χ для β-U—среднее для приведенного интервала температур.
3* β-U переходит в γ-U при T=1040°K; значение χ для γ-U—среднее для приведенного интервала температур.
4* χ не зависит от T.
5* См. рис. 27.35; α-Pu переходит в β-Pu при T=400°K.
6* Приведено среднее значение χ для интервала температур 78—793°K [164].
7* β-Pu переходит в γ-Pu при T=490°K.
8* γ-Pu переходит в δ-Pu при T=590°K.
9* δ-Pu переходит в ε-Pu при T=740°K.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Havens G.** "Phys. Rev.", 1933, v. 43 (2), p. 992.
2. **Cabrera B., Fahlenbrach H.** "Ann. Soc. espan. fôs. quim.", 1934, v. 32, p. 525.
3. **Ishiwara T.** "Sci. Repts Tôhoku Univ., Ser. I", 1914, v. 3, p. 127, 303; 1915; v. 5, p. 53; 1920, v. 9, p. 233.
4. **Auer H.** "Ann. Phys.", 1933, Bd. 18, S. 593.
5. **Cabrera B., Fahlenbrach H.** "Naturforsch.", 1934, Bd 22, S. 417.
6. **Kido K.** "Sci. Repts Tôhoku Univ.", 1932, v. 21, p. 149, 288, 869.
7. **Meyer St.** "Phys. Z.", 1925, Bd 26, S. 51.
8. **Collings E. W.** "J. Phys. Chem. Solids", 1965, v. 26, p. 949.

9. **Starr C., Kaufmann A. R.** "Phys. Rev.", 1941, v. 59, p. 476.
10. **Веркин Б. И., Дмитренко И. М., Свечкарев И. В.** «Журн. эксперим. и теор. физ.», 1961, т. 40, с. 670.
11. **Owen M.** "Ann. Phys.", 1912, Bd 37, S. 657.
12. **Pascal P.** "Compt. rend.", 1921, v. 173, p. 144, 712; 1922, v. 174, p. 457, 1698; 1923, v. 175, p. 1063.
13. **Klemm L.** "Z. Electrochem.", 1939, Bd 45, S. 354.
14. **Honda K.** "Ann. phys.", 1910, v. 32, p. 1027.
15. **Meslin J.** "Ann. de chim. et de phys.", 1906, v. 7, p. 145.
16. **De Haas W., van Alphen P. M.** "Proc. Koninkl nederl. acad. wet. Amst.", 1933, v. 36, p. 263.
17. **Krishnan K. S.** "Phys. Rev.", 1934, v. 45, p. 115.
18. **Sonè I.** "Sci. Repts Tôhoku Univ., Ser. I", 1919, v. 8, p. 115; 1922, v. 11, p. 139.
19. **Pascal P.** "Compt. rend.", 1908, v. 147, p. 56, 242, 742; 1909, v. 148, p. 413; 1910, v. 150, p. 1167. "Ann. de chimie et de phys.", 1910, v. 19, p. 5.
20. **Bitter F.** "Phys. Rev.", 1930, v. 35, p. 1572.
21. **Wiersma E. C., de Haas W., Capel W. H.** "Proc. Koninkl nederl. akad. wet. Amst.", 1930, v. 33, p. 1119.
22. **Endo H.** "Sci. Repts Tôhoku Univ. Ser. I", 1925, v. 14, p. 479.
23. **Elliot N.** "J. Chem. Phys.", 1934, v. 2, p. 298.
24. **Onnes H., Parrier A.** "Proc. Roy. Acad. Sci. Amst.", 1910, v. 12, p. 799; 1911, v. 14, p. 115; 1912; v. 14, p. 674; 1914, v. 16, p. 894, 901.
25. **Bauer E., Weiss P., Piccard A.** "Compt. rend.", 1918, v. 167, p. 484.
26. **Laine P.** "Compt. rend.", 1933, v. 196, p. 910.
27. **Hector L. G.** "Phys. Rev.", 1924, v. 24, p. 418.
28. **Venkateswarlu K., Sriraman S.** "Z. Naturforsch.", 1958, Bd 13a, S. 445, 451.
29. **Ishiwara T.** "Sci. Repts Tôhoku Univ. Ser. I", 1914, v. 3, p. 303; 1916, v. 5, p. 53; 1920, v. 9, p. 233.
30. **Веркин Б. И., Свечкарев И. В.** «Укр. физ. журн.», 1962, т. 7, № 3, с. 322.
31. **Thomas J. G., Mendoza E.** "Philos. Mag.", 1951, v. 43, p. 900.
32. **Studley J.** "Phys. Rev.", 1907, v. 24, p. 22.
33. **Lingelback R., Vogt E.** "Acta Metall.", 1959, v. 7, p. 441.
34. **Wilson J.** "Proc. Roy. Soc.", 1921, v. A 98, p. 274; 1923, v. 103, p. 185.
35. **Busch G., Kern R.** "Helv. phys. acta", 1959, v. 32, p. 24.
36. **Geist D.** "Z. Physik", 1960, Bd 157, v. 430.
37. **Pascal P.** "Compt. rend.", 1913, v. 156, p. 323; 1914, v. 158, p. 37.
38. **Bhatnagar S. S., Mathur R. M.** "Philos. Mag.", 1929, v. 7 (8), p. 1041.
39. **Henkel P., Klemm W.** "Z. anorgan. und allgem. Chem' 1935, Bd 222, S. 70.
40. **Klemm W., Hauschulz B.** "Z. Elektrochem.", 1939, Bd 45, S. 346.
41. **Pascal P.** "Compt. rend.", 1923, v. 176, p. 1887; 1923, v. 177, p. 765; 1925; v. 180, p. 1569.
42. **Lane C. T.** "Phys. Rev.", 1934, v. 45 (2), p. 66.
43. **Voigt N., Kinoshita S.** "Ann. Physik", 1907, Bd 24, S. 492.
44. **Klemm W., Jacobi H., Tilk W.** "Z. anorg. Chem.", 1931, Bd 202, S. 209.
45. **Nyholm R. S., Shape A. G.** "J. Chem. Soc.", 1952, p. 3579.
46. **Bommer H.** "Z. Elektrochem.", 1939, Bd 45, S. 357.
47. **Wedekind E.** "Z. angew. Chem.", 1924, Bd 37, S. 87.
48. **Kojima H., Tebble R. S., Williams D. E. G.** "Proc. Roy. Soc., Ser A", 1961, v. 260, p. 237.
49. **Rukie J., Yao Y. L.** "Proc. Phys. Soc. (London)", 1956, v. B 69, p. 417.
50. **Klemm W., Schüth W.** "Z. anorg. Chem.", 1931, Bd 201, S. 24.
51. **Ehrlich P., Pietzka G.** "Z. anorg. Chem.", 1951, Bd 275, S. 121.
52. **Vaidyanathan V. I.** "Nature", 1931, v. 128, p. 189.
53. **Münster A., Sagel K.** "Z. Physik", 1956, Bd 144, S. 139.
54. **Wedekind E., Horst C.** "Ber. Dtsch chem. Ges.", 1912, Bd 45, S. 262; 1915, Bd 48, S. 105.
55. **Suzuki H., Miyahara S.** "J. Phys. Soc. Japan", 1965, v. 20, p. 2102.
56. **Kriessman C. J.** "Rev. Modern. Phys.", 1953, v. 25, p. 122; "Phys. Rev.", 1954, v. 14, p. 837.
57. **Whitteker A. G., Yost Don. M.** "J. Amer. Chem. Soc.", 1949, v. 71, p. 3135.
58. **Henry W. C., Rogers J. L.** "Philos. Mag.", 1956, v. 1, p. 223.
59. **Garber M., Henry W. G., Hoeve H. G** "Canad. J. Phys.", 1960, v. 38, p. 1595.
60. **Khanna M. L.** "J. Scient. and Industr. Res. (India)", 1947, v. 6B, p. 4.
61. **Klemm W., Schüth W.** "Z. anorg. Chem.", 1931, Bd 203, S. 104.
62. **Marcus J. A.** "Phys. Rev.", 1949, v. 76, p. 413, 621.
63. **Hüttig G., Toischer K.** "Z. anorgan. und allgem. Chem." 1932, Bd 207, S. 273.
64. **Hüttig G. F., Toischer K.** "Z. anorg. Chem.", 1932, Bd 207, S. 273.
65. **Marchand A.** "Compt. rend.", 1955, v. 241, p. 468.
66. **Pankey T.** "J. Appl. Phys.", 1960, v. 31, p. 1802.
67. **Klemm W., Tilk W.** "Z. anorg. Chem.", 1932, Bd 207, S. 175.
68. **Stevens D. K. e. a.** "Phys. Rev.", 1955, v. 100, p. p. 1084.
69. **Van Itterbeck A., Duchateau W.** "Physica", 1956, v. 22, p. 649; 1957, v. 23, p. 169.
70. **Hedgcock F. T.** "J. Electronics", 1957, v. 2, p. 513.
71. **Bowers R.** "Phys. Rev.", 1,957, v. 108, p. 683.
72. **Geist D.** "Z. Physik", 1960 Bd 157, S. 430.
73. **Stöhr H.** "Z. anorgan. und allgem. Chem.", 1938, Bd 242, S. 138.
74. **Bennett S. L., Heyding R. D.** "J. Phys. Chem. Solids", 1966, v. 27, p. 471.
75. **Prasad M., Dharmafti S. S.** "Indian J. Phys.", 1937, v. 11, p. 2.
76. **Busch G., Vogt O.** "Helv. phys. acta", 1957, v. 30, p. 224.
77. **Busch G., Risi M., Yuan S.** "Helv. phys. acta", 1960, v. 33, p. 1002.
78. **Curie P.** "Ann. chim. et phys.", 1895 (7), v. 5, p. 325.
79. **Honda K., Ishiwara T.** "Sci. Repts Tôhoku Univ.", 1915, v. 4, p. 215.
80. **Abonnenc L.** "Compt. rend.", 1939, v. 208, p. 986.
81. **Venkateswarly K., Sriraman S.** "J. Scient and. Industr. Res. (India)", 1955, v. 14, p. 611.
82. **Rao S. R., Savithri K.** "Proc. Indian Acad. Sci.", 1941, v. 14A, p. 584.
83. **Ikenmeyer K.** "Ann. Phys.", 1929, v. 1, p. 169.
84. **Trzebiatowski W., Stalinski B.** "Bull. Acad. polon. sci., Cl.", 1953, v. 111, p. 317.
85. **Tjabbes B. Ph.** "Proc. Koninkl nederl. acad. wet. Amst.",1932, v. 35, p. 693.
86. **Fendins H.** Dissert., Hannover, 1931.
87. **Shoenberg D., Uddin M. Z.** "Proc. Roy. Soc.", 1936, v. A 156, p. 687.
88. **Klemm W., Yaeobi H., Tilk W.** "Z. anorg. Chem.", 1931, Bd 210, S. 1.
89. **Nelson C. M., Boyd E. E., Smith Wm. T.** "J. Amer. Chem. Soc.", 1954, v. 76, p.348.

90. **Goutrie A. N., Bourland L. T.** "Phys. Rev.", 1931, v. 37, p. 303.
91. **Moare F. E., Mattnews J. C.** "Proc. Roy. Soc.", 1952, v. A 212, p. 137.
92. **Scott A. B., Cromwell T. M.** "J. Amer. Chem. Soc.", 1948, v. 70, p. 3981.
93. **Vogt E., Friedewold H.** "Ann. Phys.", 1956, Bd 17, S. 281.
94. **De Haas W. J., van Alphen P. M.** "Acad. Sci. (Amsterdam)", 1933, v. 36, p. 158.
95. **Shimizu Y.** "Sci. Repts Tôhoku Univ.", 1932, v. 21, p. 826; 1936, v. 25, p. 921.
96. **Rao S. R., Sriraman S.** "Proc. Indian. Acad. Sci.", 1937, v. 5 A, p. 343.
97. **Marcus J. A.** "Phys. Rev.", 1949, v. 76, p. 413, 621.
98. **Prasad M.** e. a. "Proc. Indian. Acad. Sci.", 1950, v. 31 A, p. 289.
99. **De Haas W., Gorter U. C. I.** "Proc. Koninkl nederl. acad. wet. Amst.", 1931, v. 34, p. 317.
100. **Endô H.** "Sci. Repts Tôhoku Univ.", 1927, v. 16, p. 201.
101. **Pilaf J. M.** "Физика металлов и металловедение», 1957, т. 4, с. 232.
102. **Verhaeghe H., Vandermeerssche G., le Conepte C.** "Phys. Rev.", 1959, v. 80, p. 758.
103. **Landolt-Börnstein.** Zahlenwerte und Funktionen. II Bd, 9 teil, 1962.
104. **Александров Б. Н., Веркин Б. И., Свечкарев И. В.** «Журн. эксперим. и теор. физ.», 1960, т. 39, с. 37.
105. **Stevens D. K., Crawford J. H.** "Phys. Rev.", 1955, v. 99, p. 487.
106. **Yuza R., Hahn H.** "Z. anorgan. und allgem. Chem.", 1940, Bd 244, S. 111, 113.
107. **Busch G., Moser E.** "Z. phys. Chem.", 1951, Bd 198, S. 23.
108. **Busch G., Kern R.** "Helv. phys. acta", 1959, v. 32, p. 24.
109. **Hoge J. H.** "Phys. Rev.", 1935, v. 48, p. 615.
110. **Pascal P.** "Compt. rend.", 1911, v. 152, p. 862, 1010.
111. **Pascal P.** "Bull. Soc. chim. France", 1910, v. 9, p. 6, 79, 134, 177, 336; 1911, v. 10, p. 809, 868; 1912, v. 11, p. 159, 201, 636.
112. **Pascal P.** "Ann. de chim. et de phys.", 1912, v. 25, p. 289.
113. **Browne S. H., Lane C. T.** "Phys. Rev.", 1941, v. 60, p. 895, 899.
114. **Broniewski W., Franczek S., Witkowski R.** "Ann. Phys.", 1938, v. 10, p. 5.
115. **Matyás M.** "Czechoslov. J. Phys.", 1958, v. 8, p. 301.
116. **Endô H.** "Sci. Repts Tôhoku Univ.", 1927, v. 16, p. 201.
116a. **Rao S. R., Govindarajan S. R.** "Proc. Indian. Acad. Sci.", 1939/40, v. A 10, p. 235, 239.
117. **Mann K. E.** "Z. Physik", 1936, Bd 98, S. 548.
118. **Abonnenc L.** "Compt. rend.", 1939, v. 208, p. 986.
119. **Lane C. T.** "Philos. Mag.", 1929, v. 8, p. 354.
120. **Elliot N.** "J. Chem. Phys.", 1934, v. 2, p. 419.
121. **Lane C. T.** "Phys. Rev.", 1933, v. 44, p. 43.
122. **König H.** "Ann. Phys.", 1887, Bd 31, S. 273.
123. **Lock J. M.** "Proc. Phys. Soc. (London)", 1957, v. B 70, p. 476, 566.
124. **Klemm W., Meisel R., Uv. Vogel H.** "Z. anorg. Chem.", 1930, Bd 190, S. 143.
125. **Kreissman C. Y., McCuire T. R.** "Phys. Rev.", 1955, v. 98, p. 936.
126. **Волкенштейн Н. В., Галошина Э. В.** «Физика металлов и металловедение», 1964, т. 18, с. 784.
127. **Asmussen R. W., Soling H.** "Acta chem. scand.", 1954, v. 8, p. 563.
128. **Asmussen R. W., Potts-Jensen J.** "Acta chem. scand"., 1957, v. 11, p. 1271.
129. **Fendins H.** Dissert., Hannover, 1931.
130. **Perakis N., Capatos L.** "Compt. rend.", 1934, v. 198, p. 1905; 1933, v. 196, p. 611.
131. **Biltz W.** "Z. anorg. Chem.", 1930, Bd 214, S. 227.
132. **Guthrie A. N., Bourland L. T.** "Phys. Rev.", 1931, v. 37, p. 303.
133. **Goutrie A. N., Bourland L. T.** "Phys. Rev.", 1931, v. 37, p. 303.
134. **Feytis.** "Compt. rend.", 1911, v. 152, p. 708; 1911; v. 153, p. 668; 1913, v. 156, p. 886.
135. **Klemm W., Tilk U. W.** "Z. anorg. Chem.", 1932, Bd 207, S. 175.
136. **Bates L. F., Baker C. I. W.** "Proc. Phys. Soc. (London)", 1938, v. 50, p. 409.
137. **Vogt E.** "Ann. Phys.", (5), 1932, Bd 14, S. 1.
138. **Rao S. R., Subramanian K. C.** "Philos. Mag.", 1936, v. 21, p. 609.
139. **Rao S. R., Narayanaswamy A. S.** "Philos. Mag.", 1938, v. 26, p. 1018.
140. **Pascal P., Mine P.** "Compt. rend.", 1931, v. 193, p. 1303.
141. **Endô H.** "Sci. Repts Tôhoku Univ.", 1927, v. 16, p. 201.
142. **Goetz A., Focke A. B.** "Phys. Rev.", 1934, v. 45, p. 170.
143. **Kapitza P.** "Proc. Roy. Soc.", 1931, v. A 131, p. 243.
144. **Gnesotto, Binghinotto.** "Atti. Ist. veneto sci. Torino", 1910, v. 69, p. 1343; 1915, v. 72, p. 1515; 1914, v. 74, p. 25; 1915, v. 75, p. 333.
145. **McKay H. A. C., Nairn J. S., Waldron M. B.** Proc. of the Second United Nations Intern. Conf. on the Peaceful Uses of Atomic Energy. V. 28. 1958, p. 299.
146. **Smith J. F., Greiner J. D.** "Phys. Rev.", 1959, v. 115, p. 884.
147. **Watt G. W., Sowards D. M., Malhotra S. C.** "J. Amer. Chem. Soc.", 1958, v. 79, p. 4908.
148. **Trzebiatowski W., Selwood P. W.** "J. Amer. Chem. Soc.", 1950, v. 72, p. 4505.
149. **Eastman E. D.** e. a. "J. Amer Chem. Soc.", 1950, v. 72, p. 4019.
150. **Dawson J. K.** "J. Chem. Soc.", 1951, v. 28, p. 89.
151. **Dawson J. K.** "Nucleonics", 1952, v. 10, N 9, p. 39.
152. **Watt G. W., Sowards D. M., Malhotra S. C.** "J. Amer. Chem. Soc.", 1958, v. 79, p. 4908.
153. **Bose D. M., Bhar H. G.** "Z. Physik", 1928, Bd 48, S. 716.
154. **Bates L. F., Hughes D.** "Proc. Phys. Soc. (London)", 1954, v. B 67, p. 28.
155. **Comyns A. E., Gatehouse B. M., Wait E.** "J. Chem. Soc.", 1958, v. 46, p. 55.
156. **Picon M., Flahaut J.** "Compt. rend.", 1955, v. 241, p. 655.
157. **Picon M., Flahaut J.** "Compt. rend.", 1955, v. 240, p. 784.
158. **Khodadad P.** "Compt. rend.", 1958, v. 247, p. 1205.
159. **Picon M., Flahaut J.** "Compt. rend.", 1953, v. 237, p. 1160.
160. **Picon M., Flahaut J.** "Bull. Soc. chim. France", 1958, v. 772.
161. **Khodadad P., Flahaut J.** "Compt. rend.", 1957, v. 244, p. 462.
162. **Picon M., Flahaut J.** "Compt. rend.", 1957, v. 244, p. 1777.
163. **Khodadad P.** "Compt. rend.", 1957, v. 245, p. 2286.
164. **Seguin M.** e. a. "Compt. rend.", 1958, v. 246, p. 3243.
165. **Böhm B., Klemm W.** "Z. anorgan. und allgem. Chem.", 1939, Bd 243, S. 69.
166. **Волкенштейн Н. В., Галошина Э. В., Щеголихина Н. И.** «Физика металлов и металловедение», 1968, т. 25, с. 180.

ГЛАВА 28

МАГНИТНЫЕ СВОЙСТВА ФЕРРОМАГНЕТИКОВ

28.1. ВВЕДЕНИЕ

Ферромагнетиками называют вещества, магнитная проницаемость μ которых зависит от напряженности магнитного поля [1]. *Магнитная индукция* $B(H)$ ферромагнетиков при первом намагничивании изменяется по так называемой *нулевой кривой* или *кривой намагничивания* (кривая OA рис. 28.1); при циклическом изменении поля процесс протекает по одному из двух S-образных отрезков, которые ограничивают некоторую площадь и образуют *петлю гистерезиса* (см. рис. 28.1).

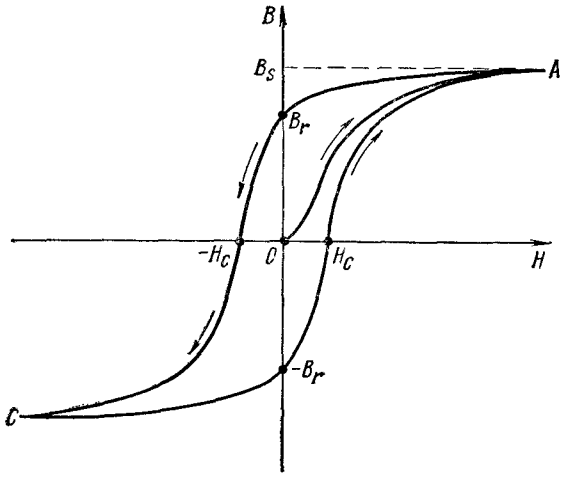


Рис. 28.1. Схематическое изображение петли гистерезиса.

Намагниченность насыщения $J_s = (B - \mu_0 H)_s/4\pi$ — предельное значение *намагниченности* J при возрастании H. (Здесь μ_0 — *абсолютная магнитная проницаемость* вакуума, или индукционная постоянная.)

Остаточная индукция B_r (точка пересечения петли гистерезиса с ординатой) есть умноженная на 4π остаточная намагниченность при $H = 0$.

Коэрцитивная сила H_C (точка пересечения петли гистерезиса с абсциссой) есть напряженность магнитного поля, необходимая для устранения остаточной индукции. Вместо индукции и намагниченности в технике легко намагничиваемые (магнитомягкие) материалы характеризуются магнитной проницаемостью μ.

Вводятся следующие величины, характеризующие магнитную проницаемость: *дифференциальная* $\mu_d = \frac{1}{\mu_0} \times \frac{dB}{dH}$; *начальная* $\mu_a = \mu_d\ (H = 0)$; *максимальная* $\mu_{\text{макс}} = \max \mu_d$; *наложенная* μ_Δ — средний наклон петли гистерезиса, смещенной при постоянном намагничивании, в случае намагничивания переменным током; *обратимая* μ_r — предельное значение μ_Δ для малых напряженностей поля; *полная* μ_c — отношение значения индукции B к соответствующему значению напряженности магнитного поля H в данной точке кривой намагничивания:

$$\mu_c = \frac{1}{\mu_0} \cdot \frac{B}{H}.$$

Намагниченность насыщения, как и остаточная индукция и коэрцитивная сила, уменьшается с повышением температуры и приближается к нулю вблизи *ферромагнитной точки Кюри* Θ_f.

В случае ферромагнетиков эффективное магнитное поле $H_{\text{эф}}$, действующее на диполи, состоит из приложенного поля H плюс внутреннее поле, которое пропорционально намагниченности J («молекулярное поле» Вейсса):

$$H_{\text{эф}} = H + \gamma J.$$

Намагниченность определяется уравнением $J = N\tilde{\mu} L\left[\tilde{\mu}(H + \gamma J)/kT\right]$, где N — число атомов в единице объема; μ — дипольный момент атома; $L(x) = \operatorname{cth} x - 1/x$ — функция Ланжевена.

Неисчезающее решение для J при $H = 0$ существует, когда $T \leqslant \Theta_f$, где $\Theta_f = N\tilde{\mu}^2\gamma/3k$ — ферромагнитная точка Кюри.

Для $T > \Theta_f$ восприимчивость определяется законом Кюри—Вейсса:

$$\varkappa = \frac{N\tilde{\mu}^2}{3k(T - \Theta_f)} = \frac{C}{T - \Theta_f}.$$

При $T \gg \Theta_f$ он записывается в виде

$$\varkappa = C/(T - \Theta_p),$$

где Θ_p, называемая *парамагнитной точкой Кюри*, немного больше, чем Θ_f.

Восприимчивость многих твердых тел подчиняется закону Кюри—Вейсса.

28.2. ОСНОВНЫЕ ФИЗИЧЕСКИЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ ФЕРРОМАГНЕТИКОВ

Намагниченность насыщения и точка Кюри

Намагниченность единицы массы вещества называется *удельной намагниченностью* σ. Удельную намагниченность насыщения σ_s можно экстраполировать к 0° К и из значения σ_0 по формуле

$$n_B = \frac{\sigma_0 M_0}{5585}\ (\mu_B)$$

(M_0 — молекулярная масса) определить число магнетонов Бора на молекулу n_B.

Таблица 28.1

Намагниченность насыщения и точка Кюри (Θ_f) ферромагнитных элементов [2, 4]

Z	Элемент	20°C			σ_0, $\frac{эрг \cdot см^3}{г}$	n_B	Θ_f, °C
		σ_s, $\frac{эрг \cdot см^3}{г}$	J_s, эрг	$4\pi J_s$, эрг			
26	Fe	218,0	1714	21580	221,9*	2,219*	770
27	Co	161	1422	17900	162,5	1,715	1331
28	Ni	54,39	484,1	6084	57,5*	0,604*	358
64	Gd	0	0	0	253,5	7,55	20
65	Tb	0	0	0	173,5	9,24	—50
						9,10	—50
66	Dy	0	0	0	235	10,20	—186
67	Ho	0	0	0	290	10,34	—253
68	Er	0	0	0	—	8,0	—253
69	Tm	0	0	0	—	7,0	—235

* Согласно данным работы [3], для Fe $\sigma_0 = 221{,}71 \pm 0{,}08$ эрг·см³/г, $n_B = 2{,}216 \pm 0{,}0008$, а для Ni $\sigma_0 = 58{,}57 \pm 0{,}03$ эрг·см³/г, $n_B = 0{,}6155 \pm 0{,}0003$.

Таблица 28.2

Относительная самопроизвольная удельная намагниченность σ_s/σ_0 Fe, Co, Ni как фуикция относительной температуры T/Θ_f [2]

T/Θ_f	σ_s/σ_0		T/Θ_f	σ_s/σ_0	
	Fe	Co, Ni		Fe	Co, Ni
0	1	1	0,70	0,85	0,83
0,1	0,996	0,996*	0,80	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
0,50	0,93	0,94	1,0	0	0
0,60	0,90	0,90			

* Только для никеля.

Таблица 28.3

Удельная намагниченность насыщения σ_s и точка Кюри бинарных сплавов железа [2]

Добавка	Атомное содержание, %	σ_s, $\frac{эрг \cdot см^3}{г}$ (20°C)	n_B (на атом)	Θ_f, °C
Al	7,1	207	2,05	756
	19,7	184	1,74	664
	24,9	134	1,29	441
	26,0	149	1,40	494
Au	6,2	174	2,08	767
	10,5	154	2,02	768
Co	20	236	2,42	950
	33	238	2,52	970
	50	233	2,42	980
	75	203	2,14	870
	80	184	1,94	910
Cr	17,7	196	1,70	678
	47,5	90	0,98	483
	67.8	35	0,53	268
Ir	4,0	200	2,25	750
	15,0	120	1,67	—
Ni	10	217	2,26	750
	20	209	2,22	720
	40	152	1,82	330
	60	136	1,45	560
	80	98	1,04	560
Os	8,1	158	1,97	—
	12,5	50	0,69	—
Pd	5,5	203	2,19	754
	40,0	129	1,89	—
	74,8	45	0,97	~250
Pt	8,1	191	2,36	—
	12,4	177	2,43	—
	24,8	104	2,23	164
	50,0	32	0,75	—
Rh	10,0	209	2,32	—
	25,0	192	2,39	714
	40	161	2,26	624
Ru	7,0	200	2,18	660
	12,5	105	1,17	—
Sn	2,3	208	2,18	768
	6,0	197	2,16	768
Si	8,3	204	2,00	720
	15,9	174	1,67	653
	23,5	141	1,32	587
V	5,9	204	2,09	815
	10,6	184	1,91	805
	18,6	149	1,58	783

Таблица 28.4

Удельная намагниченность насыщения и точка Кюри бинарных сплавов кобальта [2]

Добавка	Атомное содержание, %	σ_s, $\frac{гс \cdot см^3}{г}$ (20°С)	n_B (на атом)	Θ_f, °С
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	—
Ni	40	124	1,33	900
	70	90	0,97	680

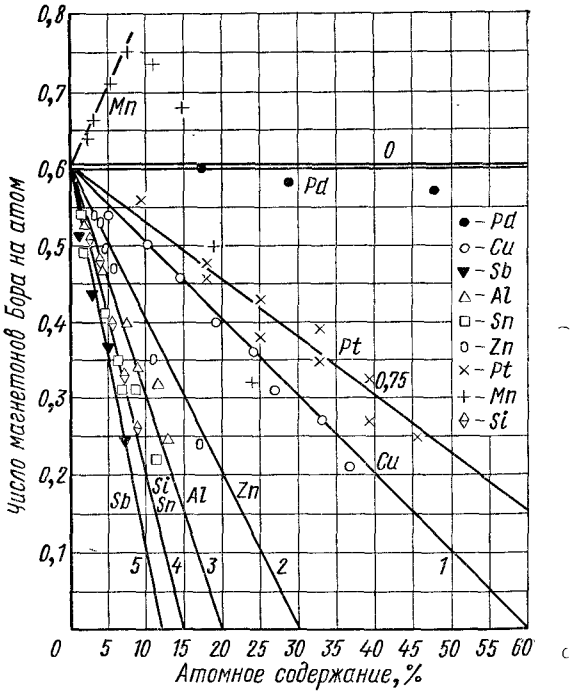


Рис. 28.2. Изменение магнитного насыщения Ni с увеличением концентрации неферромагнитного компонента при различном числе электронов на внешних оболочках второго элемента (1, 2, 3, 4, 5) [6].

Таблица 28.5

Удельная намагниченность насыщения и точка Кюри бинарных сплавов никеля [2] (см. также рис. 28.2 и 28.3[6])

Добавка	Атомное содержание, %	σ_s, $\frac{гс \cdot см^3}{г}$ (20°С)	n_B (на атом)	Θ_f, °С
Al	2,0	47,1	0,54	293
Au	3,4	46,0	0,58	321
Cr	1,7	49,8 (—123°С)	0,53	298
	6,7	25,4 (—123°С)	0,30	72
Mo	1,9	42,3	0,51	266
	4,2	23,1	0,37	120
Mn	25 (упоряд.)	90	1,02	470
Pd	12,1	—	0,60	330
	45,2	—	0,57	217
	91,3	—	—	—116
Pt	9,1	37,7	0,55	245
	25,0	16,4	0,44	86
	45,0	—	0,25	— 71
Sb	7,5	12,6	0,24	23
Si	3,7	40,3	0,48	234
	6,8	23,7	0,36	117
	8,8	—	0,28	19
Sn	2,7	40,1	0,49	234
	9,0	9,9	0,30	225
Ta	3,6	—	0,41	—
	6,3	—	0,28	—
Ti	4,8	34,5	0,43	207
	10,3	—	0,22	30
W	2,1	39,2	0,49	270
	3,9	19,9	0,34	150
Y	5,5	15,3	0,29	67
Zn	4,1	45,3	0,52	300
	10,8	25,4	0,37	157

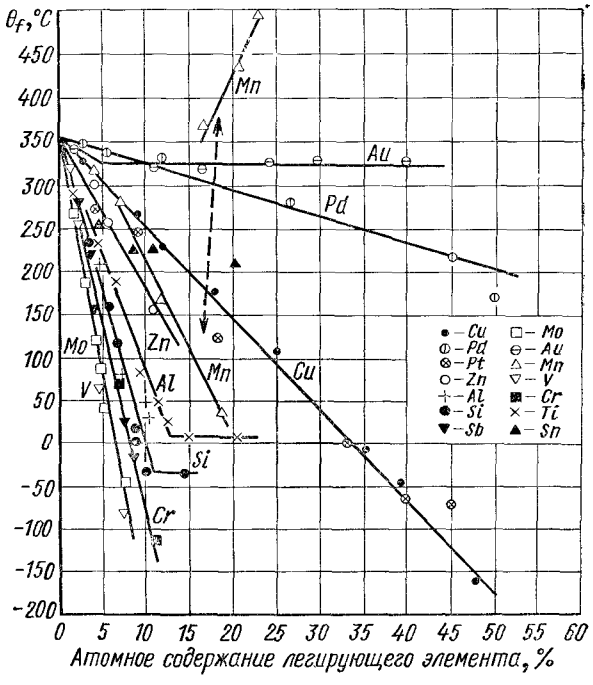


Рис. 28.3. Зависимость точки Кюри от состава никелевых сплавов [6].

Таблица 28.6

Намагниченность насыщеиия и точка Кюри некоторых бинарных соединений

Вещество	$4\pi J_s$, гс (20°С)	n_B (на молекулу)	Θ_f, °С	Литература
Co_2B	—	—	510	[2]
Co_5Nd	—	10,4	—	[5]
Co_2P	—	—	920	[2]
Co_5Pr	—	10,4	—	[5]
CoPt	7200—0	—	$\leqslant$ 600	[2]
CoS_2	—	0,84	—163	[2]
Co_5Se	—	6,6	—	[5]
Co_5Sm	—	7,7	—	[5]
Co_5Y	—	7,8	—	[5]
CoZn	—	—	195	[2]
Co_4Zn	—	—	490	[2]
CrO_2	—	2,1	—	[2]
CrS	—	—	30	[2]
CrTe	3100	2,4; 2,5	66	[2]
$EuH_{1,86}$	—	6,0	—249	[2]
EuO	—	7	—176	[2]
Fe_3Al	11 000	5,2	500	[2]
Fe_2B	15 100	5,7	739	[2]
$FeBe_2$	—	—	520	[2]
$FeBe_5$	—	—	0	[2]
Fe_3C	12 400	5,3	213	[2]
Fe_2Ce	—	—	116	[2]
FeCo	24 000	4,8	970	[2]
Fe_4N	17 500	8,9	490	[2]
$FeNi_3$	12 200	5,0	600	[2]
Fe_3P	—	—	420	[2]
FeS	—	—	320	[6]
FeS_2	—	—	$\geqslant$0	[6]
Fe_3S_8	780	2,0	300	[2]
Fe_3Si_2	—	—	90	[6]
Fe_3Si	—	4,8	530	[2]
Fe_2U	—	1,02	—101	[7]
$GdCo_2$	6500	5,7	180	[2]
$GdCo_5$	5500	0,85	815	[2]
$GdFe_2$	5000	3,4	530	[2]
$GdFe_5$	5600	4,9	210	[2]
$GdMn_2$	2700	2,8	30	[2]
MnAs	8400	3,4	45	[2]
$MnAu_4$	—	4,15	90	[8]
MnB	1850	—	260	[2]
MnBi	7800	3,5	360	[2]
Mn_4N	2300	0,97	470	[2]
MnP	—	1,2	25	[2]
$MnPt_3$	5000	—	—	[2]
Mn_2Sb	2900	1,9	277	[2]
MnSb	8900	3,5	314	[2]
Mn_4Sn	1250	—	150	[2]
Mn_2Sn	—	2,7	—10	[2]
Ni_2Mg	—	—	235	[2]
NiMn	9000	4,1	460	[2]

Намагниченность ферромагнетиков как функция напряженности магнитного поля и температуры (табл. 28.7 и 28.8; рис. 28.4—28.16)

Таблица 28.7

Зависимость намагниченности J железа от температуры T и напряженности магнитного поля H [9, 10]

T, °С	H, э	J, гс	T, °С	H, э	J, гс
—273	4 350	1730,1	734	8200	752,8
	8 020	1735,2		9160	755,5
	11 980	1735,0			
	19 900	1735,6	744,5	1307	611
				3115	632
—173	4 350	1726,4		4480	642,5
	8 020	1731,5		5340	649
	11 980	1731,3		5920	652,5
	19 900	1732,2		6810	658
				7410	661,5
—73	4 350	1714,7		8510	667
	8 020	1719,8		9470	672
	11 980	1719,8			
	19 900	1714,7	747	1457	577
				3265	599,5
+7	4 350	1700,2		4630	612
	8 020	1705,5		5490	619
	11 980	1705,5		6070	623,2
	19 900	1705,8		6970	630
				7570	633,5
+15	4 350	1698,6		8670	639,5
	8 020	1703,7		9620	644
	11 980	1704,0			
	19 900	1704,1			
			756	996	396,8
523,5	2860—6500	1390		2087	425,5
620,5	3010—7250	1210		3855	457,0
663	3470—7710	1100		5180	478,4
				6020	489
				6590	496
716	307	853		7490	505,5
	2125	871,4		8070	511,8
	3510	878		9160	521,2
	4390	881,2		10 100	529,0
	4980	884,8			
	5490	886,8			
	5895	887,8			
	6490	890,6	759	470	206
	7610	892,8		1459	288,4
	8570	896		2463	337,7
				4169	384
				5465	412
730	702	757,5		6300	425
	2525	773,8		6867	433
	3900	783,3		7365	438,5
	4750	787,8		7755	443,0
	5350	790,0		8330	451,5
	5870	792,2		9412	463,0
	6260	793,5		10 349	471,0
	6850	796			
	7970	799	764,5	450	62,8
	8930	802		860	114,2
				1850	190,3
734	897	712		2840	243,1
	2735	726		4480	299,8
	4110	735		5720	331,0
	4980	740,4		6550	348
	5570	743,0		7150	359
	6080	745,5		8000	375
	6480	747		8580	384
	7080	749		9600	399,5
				10 550	410

Продолжение табл. 28.7

T, °C	H, э	J, гс	T, °C	H, э	J, гс
773	1140	46,7	794	6 800	76,6
	2280	89,8		8 300	94,8
	3300	125,3		9 700	109,5
	5000	172.2		11 600	129,0
	6230	206,0			
	7100	226			
	7600	237			
	8500	256,7	811	9 900	61,2
	9050	266,5		11 900	75,6
	10 100	282,7			
	11 000	295,2			
			817	9 980	52,8
				12 050	62,7
781	3 570	73,6			
	5 300	109	822,5	10 000	48,1
	6 600	134		12 100	56,3
	7 450	149,5			
	8 000	158,4			
	8 850	174			
	9 400	183	826	10 000	45,4
	10 420	198		12 100	54,2
	11 400	210			

Таблица 28.8

Зависимость удельной намагниченности σ никеля от напряженности поля и температуры [12]

T, °C	σ, $\frac{гс \cdot см^3}{г}$			σ_s, $\frac{гс \cdot см^3}{г}$
	H=8000 э	H=12000 э	H=18000 э	
—273	—	—	—	57,53
18,4	—	—	—	54,5
20,0	54,55	54,63	54,73	—
53,8	53,48	53,53	54,63	53,4
79,3	52,63	52,68	52,76	52,4
104,0	51,55	51,63	51,06	51,4
127,9	50,44	50,51	50,62	50,2
151,0	49,09	49,17	49,30	49,0
173,3	47,74	47,83	47,97	47,5
184,3	47,02	47,07	47,23	—
195,1	46,13	46,25	46,34	45,9
205,7	45,25	45,38	45,56	—
216,3	44,28	44,40	44,57	44,0
226,7	43,26	43,39	43,60	—
237,1	42,17	42,32	42,53	—
237,3	—	—	—	41,9
247,3	41,07	41,19	41,42	—
257,0	39,81	39,96	40,14	39,5
267,5	38,43	38,62	38,90	—
277,5	36,99	37,21	37,51	36,6
281,5	36,48	36,61	36,94	—
285,4	35,71	35,93	36,27	—
289,3	35,06	35,28	35,64	—
293,2	34,35	34,59	34,94	—
297,1	33,61	33,86	34,28	—
301,0	32,88	33,15	33,52	32,3
304,9	32,06	32,36	32,78	—

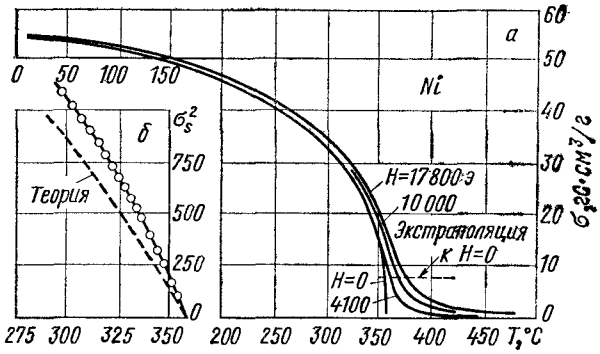


Рис. 28.4. Зависимость удельной намагниченности σ (*а*) и квадрата самопроизвольной намагниченности насыщения σ_s^2 (*б*) Ni от температуры [6].

Продолжение табл. 28.8

T, °C	σ, $\frac{гс \cdot см^3}{г}$						σ_s, $\frac{гс \cdot см^3}{г}$
	H=1000 э	H=2000 э	H=4000 э	H=8000 э	H=12000 э	H=18000 э	
308,8	—	—	30,83	31,24	31,58	32,00	—
312,7	—	—	29,94	30,37	30,71	31,14	—
316,5	28,30	28,65	29,00	29,45	29,87	30,26	28,7
320,3	—	—	27,95	28,44	28,82	29,33	—
324,2	—	—	26,85	27,36	28,28	28,35	—
328,0	—	25,31	25,70	26,28	26,74	27,35	—
331,8	—	24,00	24,39	25,04	25,56	26,28	—
333,7	—	—	—	—	—	—	23,1
335,6	22,08	22,40	22,91	23,66	24,27	25,04	—
339,4	20,42	20,78	21,36	22,21	22,86	23,75	—
341,2	—	—	—	—	—	—	19,8
343,1	18,36	18,85	19,55	20,60	21,39	22,38	—
346,9	16,01	16,62	17,53	18,83	19,81	20,97	16,4
350,7	12,83	13,82	15,12	16,75	17,93	19,37	—
352,5	—	—	—	—	—	—	10,7
354,4	8,36	10,19	12,22	14,46	15,99	17,66	—
358,1	3,68	6,03	8,83	11,95	13,80	15,77	—
361,8	1,78	3,41	5,98	9,41	11,61	13,85	—
365,4	—	2,13	4,13	7,30	9,56	12,06	—
369,1	—	1,51	2,97	5,58	7,72	10,25	—
372,8	—	1,15	2,29	4,43	6,35	8,75	—
376,5	—	0,91	1,82	3,60	5,24	7,39	—
380,1	—	0,75	1,49	2,97	4,38	6,33	—
387,5	—	—	1,11	2,18	3,25	4,80	—
394,8	—	—	—	1,71	2,54	3,79	—
405,7	—	—	0,64	—	1,88	2,83	—

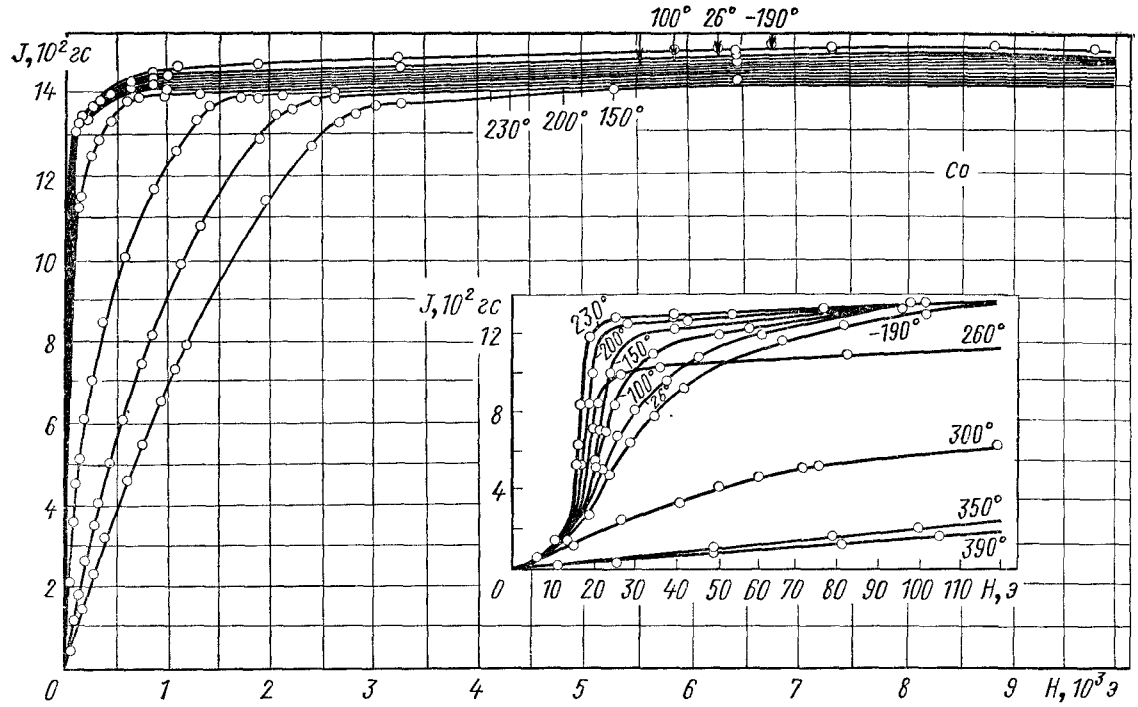


Рис. 28.5. Кривые намагниченности монокристалла Co для гексагональной оси [0001] при различных температурах [1].

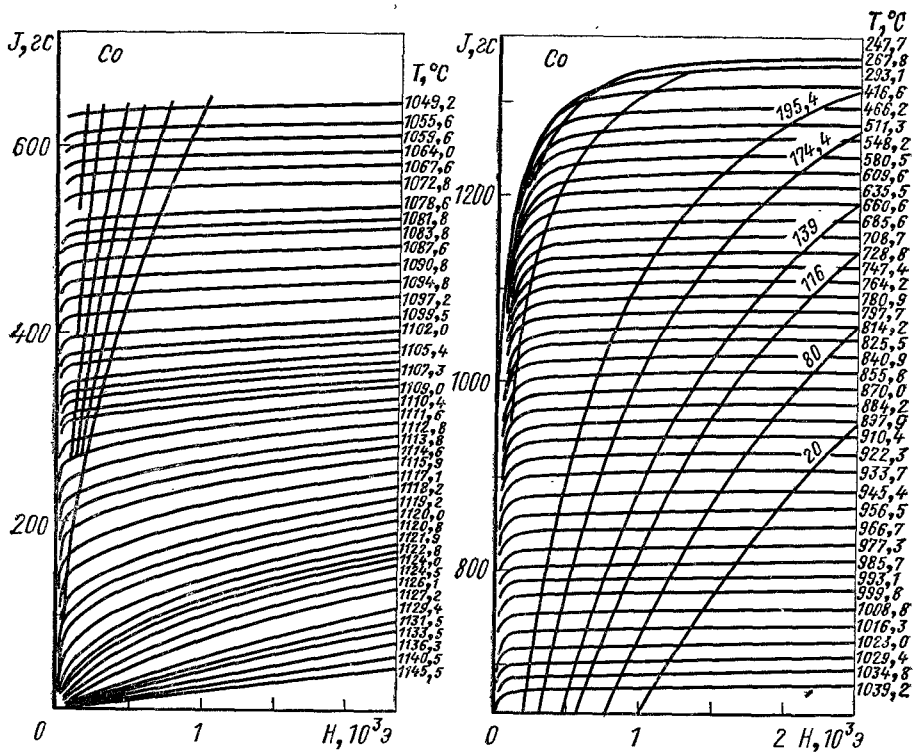


Рис. 28.6. Зависимость намагниченности поликристаллического Co от напряженности магнитного поля и температуры [11]

Кривые намагниченности редкоземельных металлов (рис. 28.7—28.14)

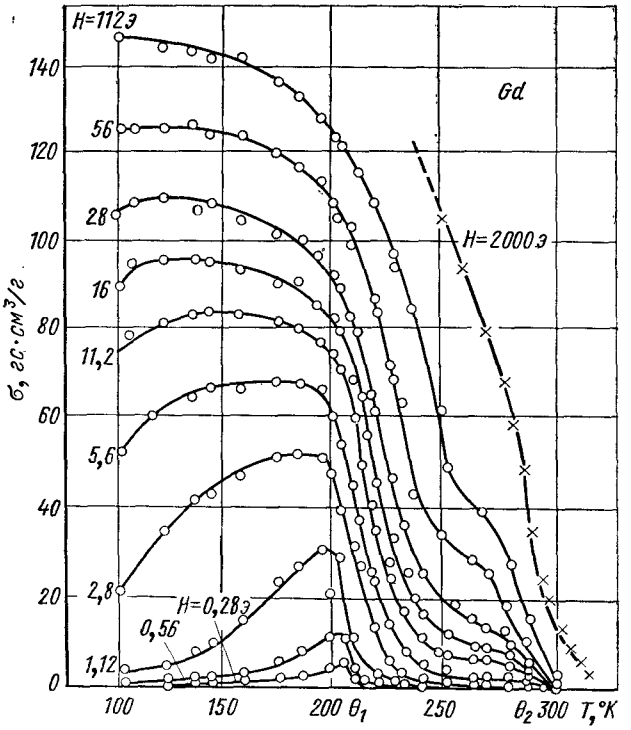


Рис. 28.7. Зависимость удельной намагниченности Gd для различных значений напряженности магнитного поля от температуры [13]. Отмеченные на оси абсцисс точки θ_1 и θ_2 означают соответственно температуры перехода ферромагнетик — аитнферромагнетик и антиферромагнетик — парамагнетик [13]

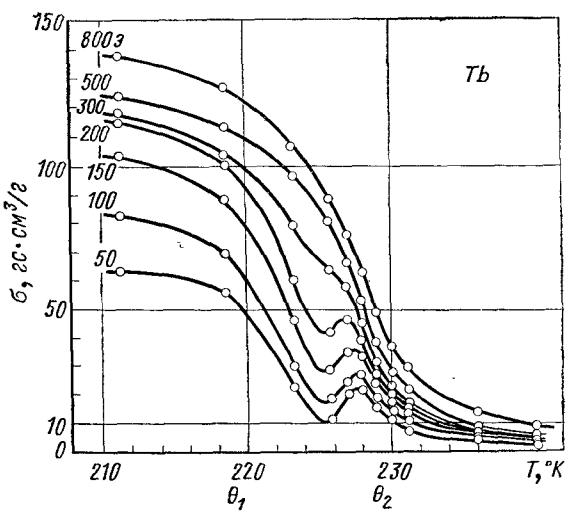


Рис. 28.8. Зависимость удельной намагниченности монокристалла Tb для различных значений напряженности магнитного поля, приложенного в базисной плоскости образца вдоль оси *a*, от температуры [13].

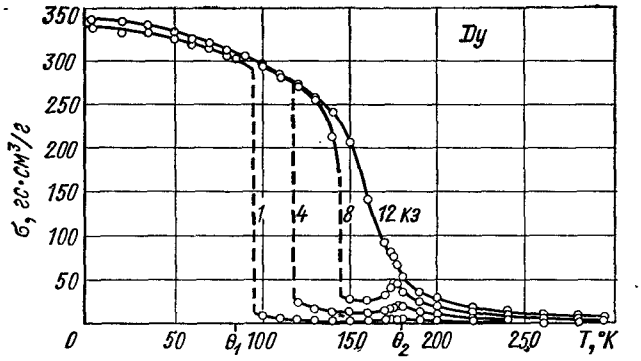


Рис. 28.9. Зависимость удельной намагниченности монокристалла Dy для различных значений напряженности магнитного поля, приложенного вдоль оси *a* в базисной плоскости образца, от температуры [13]

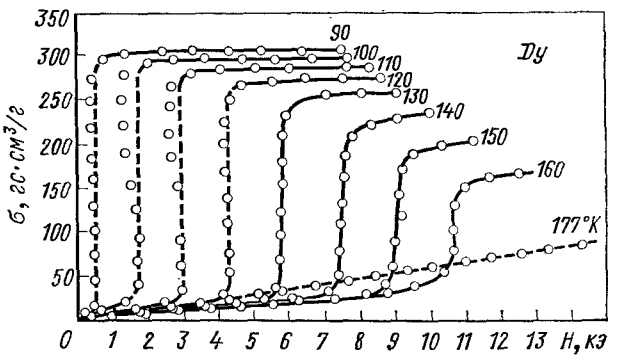


Рис. 28.10. Изотермы удельной намагниченности монокристалла Dy, полученныеири направлении магнитного поля вдоль оси *a* в базисной плоскости образца [13]

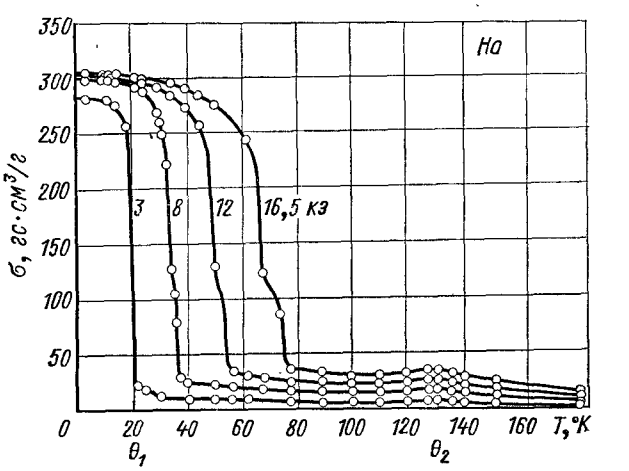


Рис. 28.11. Зависимость удельной намагниченности монокристалла Ho, полученная для различных значений напряженности магнитного поля в базисной плоскости образца вдоль оси *a*, от температуры [13]

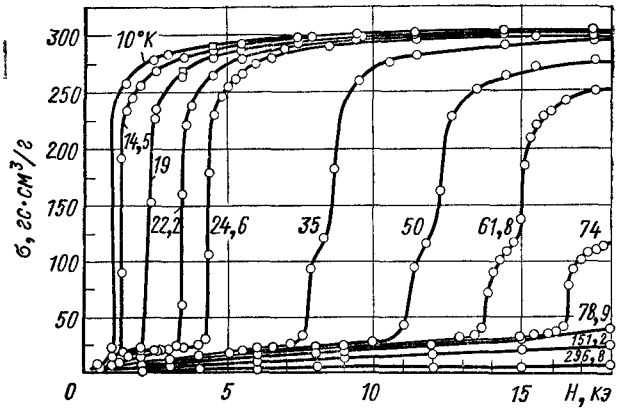


Рис. 28.12. Изотермы удельной намагниченности монокристалла Ho (вектор напряженности магнитного поля направлен вдоль оси *a* в базисной плоскости образца) [13]

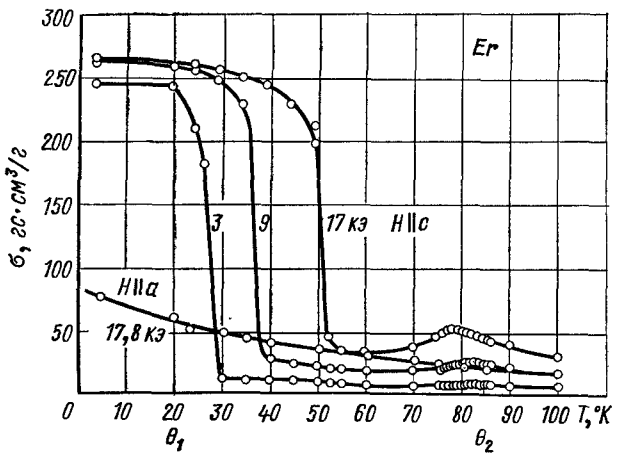


Рис. 28.13. Зависимость удельной намагниченности монокристалла Er для различных значений напряженности магнитного поля, направленного вдоль гексагональной оси *c* и в базисной плоскости (вдоль оси *a*), от температуры [13]

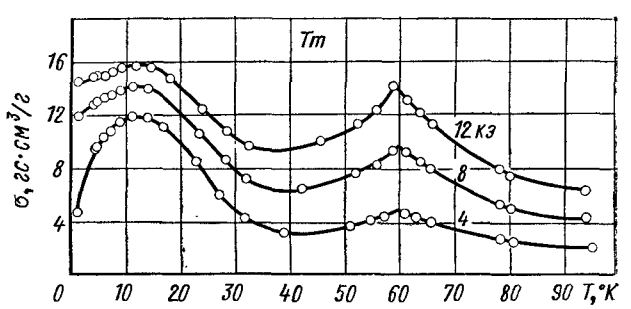


Рис. 28.14. Зависимость удельной намагниченности поликристаллического Tm от температуры при различных значениях напряженности магнитного поли [13]

Зависимости удельной намагниченности для ферромагнитных сплавов (рис. 28.15,28.16)

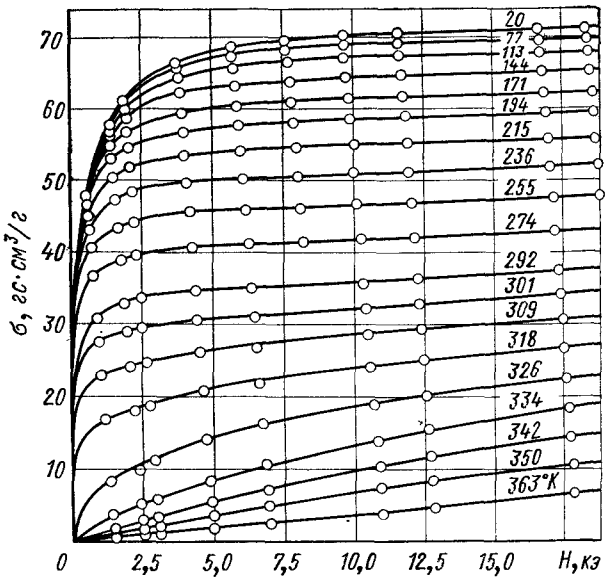


Рис. 28.15. Изотермы удельной намагниченности ферромагнитного сплава Cr — Te [14]

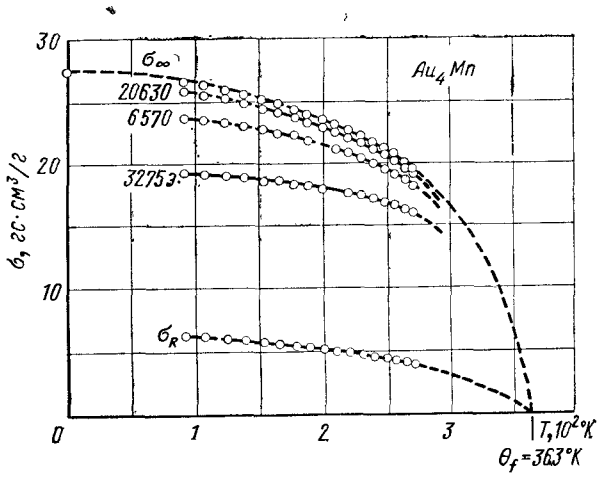


Рис. 28.16. Зависимость удельной намагниченности (при различных значениях напряженности магнитного поля) и остаточной намагниченности ферромагнитного сплава Au_4Mn от температуры [8]

Магнитная анизотропия

На рис. 28.17—28.19 приведены кривые намагниченности $J(H)$ для основных кристаллографических направлений монокристаллов железа, никеля и кобальта.

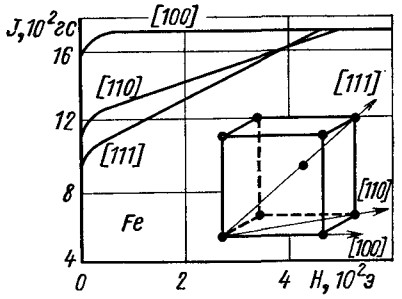


Рис. 28.17. Кривые намагниченности для основных кристаллографических направлений монокристалла Fe [1]

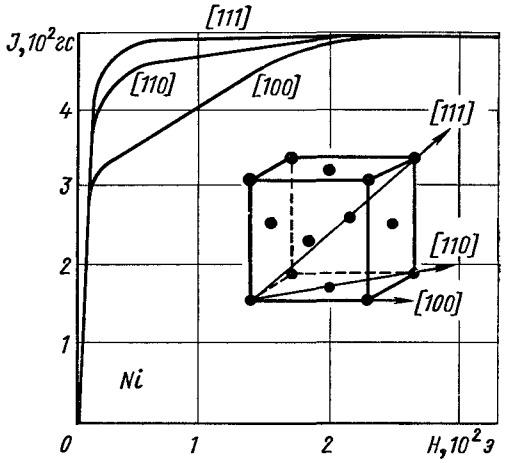


Рис. 28.18. Кривые намагниченности для основных кристаллографических направлений монокристалла Ni [1]

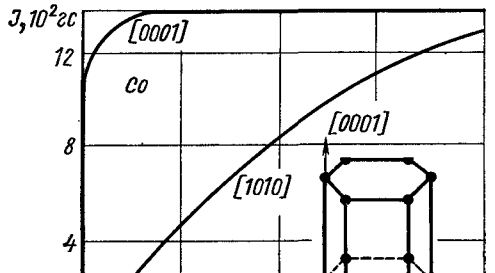


Рис. 28.19. Кривые намагниченности для основных кристаллографических направлений монокристалла Co [1]

Площадь между кривой намагничивания кристалла $J(H)$ и осью J представляет работу, требуемую для намагничивания до насыщения. Направления, в которых эта работа оказывается наименьшей, называют *направлениями легкого намагничивания*. Из рис. 28.17 видно, что в монокристаллах железа направления ребер куба (тетрагональные оси) [100] являются направлениями легкого намагничивания. Направления диагоналей граней [110] (диагональные оси) — *направления промежуточного намагничивания* и направления диагоналей куба [111] (тригональные оси) являются *направлениями трудного намагничивания*.

В случае кристаллов никеля (рис. 28.18) последовательность направлений по трудности намагничиваиия следующая: легкое направление — ось [111], промежуточное — ось [110] и трудное — ось [100].

В кобальте (рис. 28.19) легким иаправлением является гексагональная ось [0001], а трудным — любое направление в плоскости базиса.

При количественном рассмотрении магнитной анизотропии кристаллов удобно пользоваться константами магнитной анизотропии K_1, K_2, ... Они определяются с помощью формул, описывающих зависимость свободной энергии магнитной анизотропии E_a от направления вектора намагниченности по отношению к кристаллографическим осям. Общие выражения для E_a в наиболее важных кристаллических системах имеют вид:

1) *для кубических кристаллов* (с точностью до членов, не зависящих от направляющих косинусов α_1, α_2, α_3)

$$E_a = K_1\left(\alpha_1^2\alpha_2^2 + \alpha_2^2\alpha_3^2 + \alpha_3^2\alpha_1^2\right) + K_2\alpha_1^2\alpha_2^2\alpha_3^2 + \\ + K_3\left(\alpha_1^2\alpha_2^2 + \alpha_2^2\alpha_3^2 + \alpha_3^2\alpha_1^2\right)^2 + \ldots;$$

2) *для гексагональных кристаллов*

$$E_a = K_1\sin^2\varphi + K_2\sin^4\varphi + K_3\sin^6\varphi + \\ + K_4\sin^6\varphi\cos^6\psi + \ldots,$$

где φ — угол между направлением намагничивания и гексагональной осью ([001]); ψ — угол между направлением намагниченности и осью [100];

3) *для тетрагональных кристаллов*

$$E_a = K_1\sin^2\vartheta + K_2\sin^4\vartheta + K_3\cos^2\alpha\cos^2\beta + \ldots,$$

где ϑ — угол между направлением намагниченности и тетрагональной осью ([001]); α и β — углы между направлением намагниченности и осями [100] и [010] соответственно.

Коэффициенты K_i ($i = 1, 2, \ldots$) зависят от температуры и химического состава ферромагнитного материала (рис. 28.20—28.23). На рис. 28.24 показано, как изменяется направление оси легкого намагничивания в кристалле гадолиния с изменением температуры. В интервале от 0 до 170° К направления легкого намагничивания расположены под углом к гексагональной оси («конус» направлений легкого намагничивания); при этом угол раствора конуса изменяется от 32 до 90°. В области температур 170—230° К направления легкого намагничивания лежат в базисной плоскости («плоскость» направлений легкого намагничивания). В интервале температур 250—290° К конус разрушается и возникает одно направление легкого намагничивания.

Особенностью магнитокристаллической анизотропии гадолиния является также ее сильная зависимость от магнитного поля. На рис. 28.25 приведена зависимость коистанты магнитиой анизотропии K_1 гадолиния от иапряженности магнитного поля H при различных температурах T, °С.

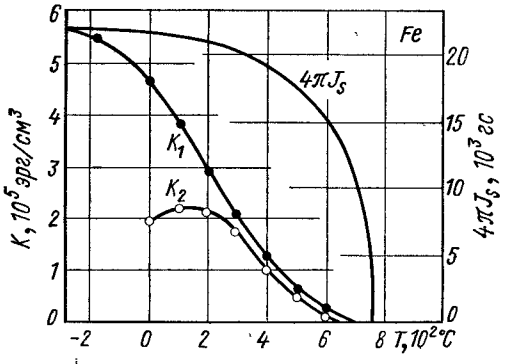


Рис. 28.20. Зависимость констант магнитной анизотропии Fe от температуры [1]

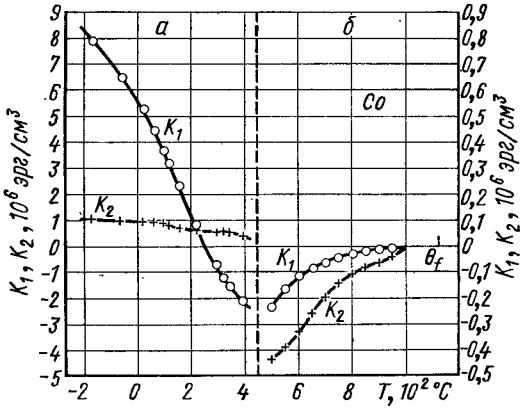


Рис. 28.21. Зависимость констант магнитной анизотропии Co от температуры для гексагональной (*а*) и кубической гранецентрированной (*б*) структур [8]

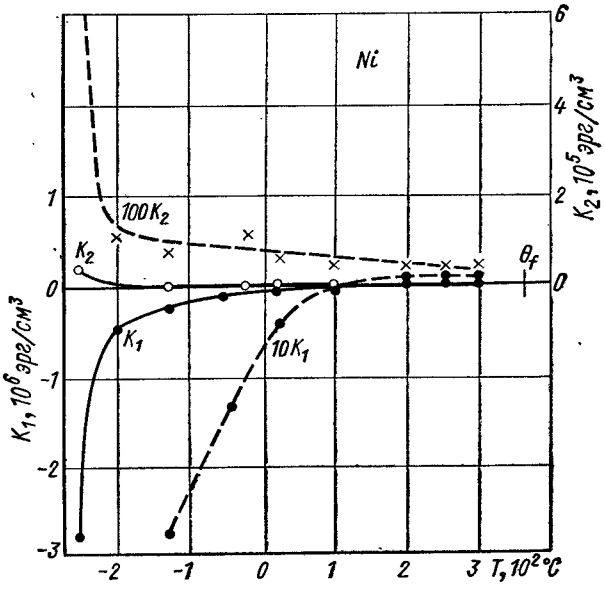


Рис. 28.22. Зависимость констант магнитной анизотропии Ni от температуры [1]

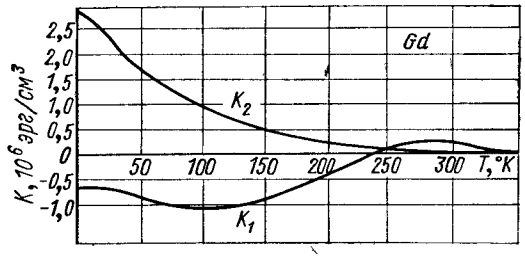


Рис. 28.23. Зависимость констант K_1 и K_2 магнитной анизотропии Gd от температуры [13]

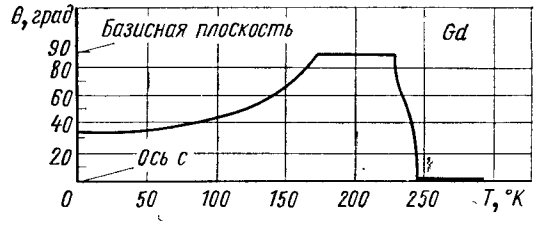


Рис. 28.24. Изменение направления легкого намагничивания Gd с ростом температуры (угол θ отсчитывается от гексагональной оси c кристалла) [13]

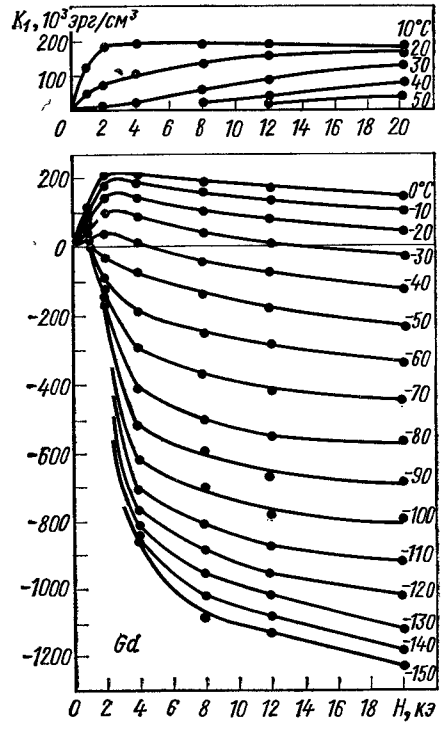


Рис. 28.25. Зависимость константы K_1 магнитной анизотропии Gd от напряженности магнитного поля при различных температурах [13]

Направления легкого намагничивания в тербии и диспрозии лежат в базисной плоскости, а в гольмии и эрбии — под углом к гексагональной оси [13].

Для сплавов Fe — Co, Fe — Ni, Co — Ni и Fe — Co — Ni значения констант магнитной анизотропии K_1 и K_2 при различных температурах T, °С, приведены в табл. 28.9. Из этой таблицы видно, что значения нулевой анизотропии находятся вблизи 70% Ni, 30% Fe для железоникелевого сплава, вблизи 45% Co, 55% Fe для железокобальтового сплава и вблизи 100% Ni для кобальтникелевого сплава. Для тройных сплавов Fe—Co—Ni ход кривой $K_1 = 0$ точно не определен, но полагают, что эта кривая проходит вблизи точки, соответствующей сплаву перминвар (30% Fe, 25% Co, 45% Ni), подвергнутому обычной для этих сплавов термообработке (отжиг при температуре 400—600° С). По измерениям на монокристалле, для этого сплава $K_1 = -2000$ *эрг/см*³ [6].

В табл. 28.10 приведена последовательность главных направлений легкого, промежуточного и трудного намагничиваний кубических кристаллов в зависимости от знаков и соотношения значений констант магнитной анизотропии K_1 и K_2.

Таблица 28.9

Зависимость констант магнитной анизотропии K_1 и K_2 (10^3 *эрг/см*³) для сплавов Fe—Co, Fe—Ni, Co—Ni и Fe—Co—Ni от температуры T [6, 8]

Состав, %			20° С		200° С		300° С		398° С	
Fe	Co	Ni	K_1	K_2	K_1	K_2	K_1	K_2	K_1	K_2
100	—	—	420	150	300	22	—	—	—	—
70	30	—	102	160	—	—	—	—	—	—
60	40	—	45	—110	—	—	—	—	—	—
50	50	—	—68	—390	—	—	—	—	—	—
30	70	—	—433	50	—	—	—	—	—	—
50	—	50	33	—180	25	—80	18	—7	—	—
35	—	65	15	—70	12	—40	10	—32	—	—
30	—	70	7	—17	2	— 4	0	0	—	—
10	—	90	—7	—23	—2	—10	0	—8	—	—
—	—	100	—34	53	5	20	—	—	—	—
—	65	35	—258	150	—	—	—	—	—	—
—	50	50	—108	—40	—	—	—	—	—	—
—	40	60	—74	40	—	—	—	—	—	—
—	20	80	—4	8	—	—	—	—	—	—
—	10	90	16	—40	—	—	—	—	—	—
—	3	97	—10	9	—	—	—	—	—	—
50	10	40	61	—160	19	4	—	—	7	—60
25	25	50	4	16	4	2	—	—	—3	22
20	15	65	9	—110	—1	—18	—	—	—3	2
15	25	60	—26	34	—10	—45	—	—	—3	—15
10	40	50	—72	—4	—54	41	—	—	—9	—102
10	30	60	—38	—80	—17	—50	—	—	—12	—37
10	20	70	—29	17	—25	70	—	—	—14	29
10	10	80	—2	—39	—2	—20	—	—	—2	6

Таблица 28.10

Направления легкого, промежуточного и трудного намагничиваний кубических кристаллов в зависимости от констант магнитной анизотропии K_1 и K_2 [1, 6]

K_1	+	+	+	—	—	—
K_2	От $+\infty$ до $-\frac{9}{4}K_1$	От $-\frac{9}{4}K_1$ до $-9K_1$	От $-9K_1$ до $-\infty$	От $-\infty$ до $\frac{9}{4}\lvert K_1\rvert$	От $\frac{9}{4}\lvert K_1\rvert$ до $9\lvert K_1\rvert$	От $9\lvert K_1\rvert$ до $+\infty$
Легкое	[100]	[100]	[111]	[111]	[110]	[110]
Промежуточное	[110]	[111]	[100]	[110]	[111]	[100]
Трудное	[111]	[110]	[110]	[100]	[100]	[111]

Значения констант магнитной анизотропии для сплавов железа и других ферромагнетиков приведены на рис. 28. 26—28.28 и в табл. 28.11 и 28.12.

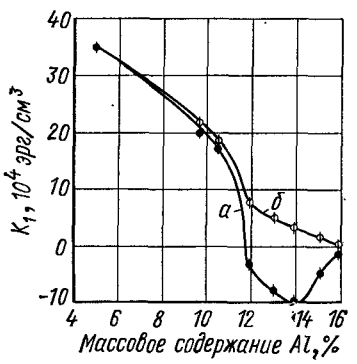


Рис. 28.26. Зависимость константы магнитной анизотропии при комнатной температуре от состава сплавов Fe—Al [8]:

а — после медленного охлаждения (упорядоченный сплав); *б* — после закалки от 650° С (неупорядоченный сплав)

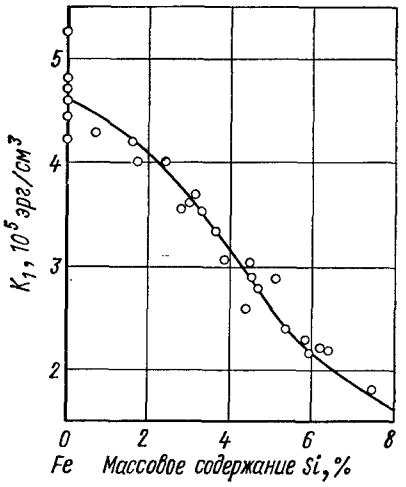


Рис. 28.27. Зависимость константы анизотропии K_1 для сплавов Fe — Si при температуре 20° С от содержания кремния по данным разных авторов [8]

Таблица 28.11

Зависимость коистант магнитной анизотропии K_1 и K_2 от температур сплавов Fe—Si [8]

Содержание Si, %	T, °С	K_1, 10^4 $\frac{эрг}{см^3}$	K_2, 10^4 $\frac{эрг}{см^3}$
0	—196	52,0±1,0	0±5
0	—78	50,5±1,0	0±5
0	27	48,0±1,0	0±5
3,1±1	—196	42,5±1,0	—
3,1±1	—78	40,5±1,0	—
3,1±1	27	36,5±1,0	—
5,1±1	—196	35,5±1,0	—5±5
5,1±1	—78	32,5±1,0	—5±5
5,1±1	27	28,5±1,0	—5±5

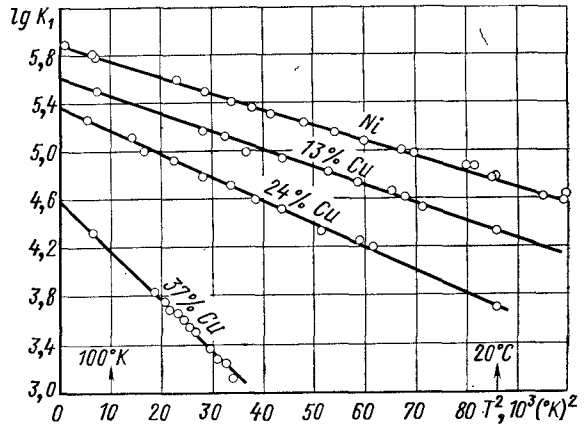


Рис. 28.28. Зависимость константы магнитной анизотропии сплавов Ni — Cu от квадрата абсолютной температуры и состава [6]

Таблица 28.12

Коистаиты магнитной анизотропии K_1 соединений кобальта с редкоземельными элементами при температуре 27 и —196°С [5]

Соединение	Co_5Ce	Co_5Nd	Co_5Pr	Co_5Sm	Co_5Y
K_1, 10^7 эрг/см³(27°С)	3,1	1,2	7,0	4,7	5,7
K_1, 10^7 эрэ/см³ (—196 °С)	—	—33,9	—6,0	—	—

Зависимость $K = K_1 + K_2$ для гексагонального кристалла MnBi от T см. на рис. 28.29.

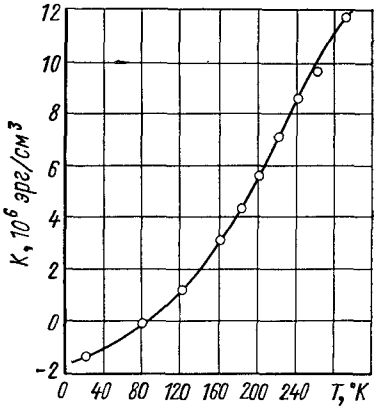


Рис. 28.29. Зависимость константы $K = K_1 + K_2$ для гексагонального кристалла MnBi от температуры. При температуре 20 °С $K_1 = 9{,}1 \cdot 10^6$ эрг/см³, $K_2 = 2{,}6 \cdot 10^6$ эрг/см³ [8]

Магнитострикция

Изменения размеров тела, вызванные изменениями его намагниченности, называют *магнитострикцией*. Изменение объема тела называют *объемной магнитострикцией*, а изменение размеров тела при постоянном объеме — *линейной магнитострикцией*.

Объемная магнитострикция. Относительное изменение объема $\Delta V/V = \omega$ при изменении намагниченности в общем случае складывается из трех составляющих различного происхождения [8]:

$$\omega = \omega_I + \omega_K + \omega_F .$$

Член ω_I зависит только от истинной намагниченности ($J - J_s > 0$). Изменение объема ω_I может происходить под воздействием температуры (изменение самопроизвольной намагниченности) и при изотермическом изменении истинной намагниченности во внешнем поле. В сильных магнитных полях, когда изменение ориентации вектора намагниченности уже не происходит, ω_I в общем изменяется линейно с напряженностью магнитного поля. В сильных полях $(d\omega_I/dH)_T$ зависит только от материала и температуры. Член ω_K описывает изменение объема кристалла в зависимости от ориентации

$\alpha_1, \alpha_2, \alpha_3$ самопроизвольной намагниченности по отношению к кристаллографическим осям при постоянной температуре. «Эффект формы» ω_F зависит только от формы образца и от общей намагниченности и, таким образом, не является свойством материала.

Линейная магнитострикция. Относительное изменение длины $\lambda_{\alpha\beta} = (\Delta l/l)_{\alpha\beta}$ в направлениях $\beta_1, \beta_2, \beta_3$ при изотермическом намагничивании ферромагнитного кристалла до насыщения в направлениях $\alpha_1, \alpha_2, \alpha_3$ называют *магнитострикцией насыщения* при условии, что в начальном состоянии намагниченность кристалла была ориентирована по направлению легкого намагничивания (идеально размагниченное состояние).

Для кубических кристаллов $\lambda_{\alpha\beta}$ дается выражением

$$\lambda_{\alpha\beta} = h_1\left(\alpha_1^2\beta_1^2 + \alpha_2^2\beta_2^2 + \alpha_3^2\beta_3^2 - 1/3\right) +$$

$$+2h_2(\alpha_1\alpha_2\beta_1\beta_2 + \alpha_2\alpha_3\beta_2\beta_3 + \alpha_3\alpha_1\beta_3\beta_1) + h_4\left(\alpha_1^4\beta_1^2 +\right.$$

$$\left. + \alpha_2^4\beta_2^2 + \alpha_3^4\beta_3^2 + \frac{2}{3}s - 1/3\right) + 2h_5\left(\alpha_1\alpha_2\alpha_3^2\beta_1\beta_2 +\right.$$

$$\left. + \alpha_2\alpha_3\alpha_1^2\beta_2\beta_3 + \alpha_3\alpha_1\alpha_2^2\beta_3\beta_1\right) + \ldots +$$

$+ h_3 s$ — (если ось [100] является направлением легкого намагничивания) или

$+ h_3 (s - 1/3)$ — (если направлением легкого намагничивания является ось [111]). (28.1)

Здесь $h_1, \ldots, h_5$ — константы и $s = \alpha_1^2\alpha_2^2 + \alpha_2^2\alpha_3^2 + \alpha_3^2\alpha_1^2$. Направляющие косинусы α_i, β_i относятся к кубическим осям. Этого приближения достаточно, чтобы описывать экспериментальные результаты.

Из уравнения (28.1) можно получить член объемной магнитострикции ω_K:

$$\omega_K = 3h_3 s$$

(если ось [100] является направлением легкого намагничивания),

$$\omega_K = 3h_3 (s - 1/3) \qquad (28.2)$$

(если направлением легкого намагничивания является ось [111]) и продольную магнитострикцию ($\alpha_i = \beta_i$) по главным кристаллографическим осям [100], [110] и [111]:

$$\lambda_{100} = \frac{2}{3}h_1 + \frac{2}{3}h_4; \quad \lambda_{110} = \frac{1}{6}h_1 + \frac{1}{2}h_2 + \frac{1}{12}h_4;$$

$$\lambda_{111} = \frac{2}{3}h_2 + \frac{2}{9}h_5. \qquad (28.3)$$

При $h_3 = h_4 = h_5 = 0$ получается упрощенное выражение:

$$\lambda_{\alpha\beta} = \frac{3}{2}\lambda_{100}\left(\alpha_1^2\beta_1^2 + \alpha_2^2\beta_2^2 + \alpha_3^2\beta_3^2 - 1/3\right) +$$

$$+ 3\lambda_{111}(\alpha_1\alpha_2\beta_1\beta_2 + \alpha_2\alpha_3\beta_2\beta_3 + \alpha_3\alpha_1\beta_3\beta_1) \qquad (28.4)$$

только с двумя константами λ_{100} и λ_{111}, которых часто достаточно для описания экспериментальных результатов.

Для поликристаллического материала с произвольным распределением ориентации кристаллических осей из соотношений (28.3) можно получить линейную магнитострикцию в виде:

$$\lambda_\theta = \frac{3}{2}\lambda_s\left(\cos^2\theta - \frac{1}{3}\right), \qquad (28.5)$$

где

$$\lambda_s = \frac{2\lambda_{100} + 3\lambda_{111}}{5}. \qquad (28.6)$$

Здесь θ — угол между направлением измерения и направлением намагниченности. Из уравнения (28.1) получаем выражение для объемной магнитострикции поликристалла:

$$\omega_K = (3/5)\, h_3,$$

если оси [100] являются направлениями легкого намагничивания, или

$$\omega_K = -(2/5)\, h_3, \qquad (28.7)$$

если оси [111] являются направлениями легкого намагничивания.

Магнитострикция насыщения гексагональных кристаллов описывается выражением

$$\lambda_{\alpha\beta} = \lambda_A\left[(\alpha_1\beta_1 + \alpha_2\beta_2)^2 - (\alpha_1\beta_1 + \alpha_2\beta_2)\,\alpha_3\beta_3\right] +$$

$$+ \lambda_B\left[\left(1 - \alpha_3^2\right)\left(1 - \beta_3^2\right) - (\alpha_1\beta_1 + \alpha_2\beta_2)^2\right] +$$

$$+ \lambda_C\left[\left(1 - \alpha_3^2\right)\beta_3^2 - (\alpha_1\beta_1 + \alpha_2\beta_2)\,\alpha_3\beta_3\right] +$$

$$+ 4\lambda_D\,(\alpha_1\beta_1 + \alpha_2\beta_2)\,\alpha_3\beta_3 \qquad (28.8)$$

с четырьмя константами $\lambda_A, \ldots, \lambda_D$. Направляющие косинусы α_i, β_i относятся к системе прямоугольных координат, где ось z совпадает с гексагональной осью [001], а оси x, y — с направлениями [100] и [120] соответственно. Объемная магнитострикция монокристалла дается выражением

$$\omega_K = (\lambda_A + \lambda_B + \lambda_C)\left(1 - \alpha_3^2\right). \qquad (28.9)$$

Для поликристаллического материала с произвольно ориентированными кристаллическими осями *продольная магнитострикция насыщения* (измеренная параллельно направлению намагничения, т. е. $\alpha_i = \beta_i$) может быть получена из уравнения (28.8):

$$\lambda_\parallel = \lambda_s = \frac{2}{5}\lambda_A + \frac{8}{15}\lambda_D. \qquad (28.10)$$

Поперечная магнитострикция насыщения выражается формулой

$$\lambda_\perp = \frac{2}{15}\lambda_A + \frac{1}{3}(\lambda_B + \lambda_C) - \frac{4}{15}\lambda_D, \qquad (28.11)$$

а объемная определяется соотношением

$$\omega_K = \frac{2}{3}(\lambda_A + \lambda_B + \lambda_C). \qquad (28.12)$$

В сильных полях (выше технического насыщения, т.е. при $J > J_s$) зависимость $(\Delta l/l)_{\alpha\beta}$ от напряженности магнитного поля в основном линейна. Эта так называемая *«вынужденная» магнитострикция* описывается для кубических кристаллов выражением

$$\frac{\partial(\Delta l/l)_{\alpha\beta}}{\partial H} = h_0' + h_1'\left(\alpha_1^2\beta_1^2 + \alpha_2^2\beta_2^2 + \alpha_3^2\beta_3^2 - \frac{1}{3}\right) +$$

$$+ 2h_2'(\alpha_1\alpha_2\beta_1\beta_2 + \alpha_2\alpha_3\beta_2\beta_3 + \alpha_3\alpha_1\beta_3\beta_1) + \ldots \qquad (28.13)$$

с константами h_0', $h_1' h_2'$. Здесь $h_0' = \frac{1}{3}\left(\frac{\partial\omega_I}{\partial H}\right)$ — изменение длины, соответствующее члену ω_I изотропной объемной магнитострикции.

К о и стан ты, входящие в уравнения (28.1)—(28.13), определяются экспериментально. (см. табл. 28.13—28.23 и рис. 28.30—28.64).

Таблица 28.13

Производиая $(\partial w_I/\partial H)_T$ для металлов и сплавов в сильных магнитных полях [8]

Вещество	T, °C	$\left(\frac{\partial w_I}{\partial H}\right)_T$, 10^{-10} э$^{-1}$	Вещество	T, °C	$\left(\frac{\partial w_I}{\partial H}\right)_T$, 10^{-10} э$^{-1}$
Fe	20	~6	40%Ni+ +60%Fe	20	~32
Ni	20	—0,55	50%Ni+ +50%Fe	20	~4
Ni	280	—6	3%Al+ +97%Fe	20	8
Ni	348	—36	8,1%Al+ +91,9%Fe	20	8
Co	20	~6	11,9%Al+ +88,1%Fe	20	7
20%Ni+80%Fe	20	~20	15%Al+ +85%Fe	20	14
30%Ni+70%Fe	20	~300	16,9%Al+ +83,1%Fe	20	30

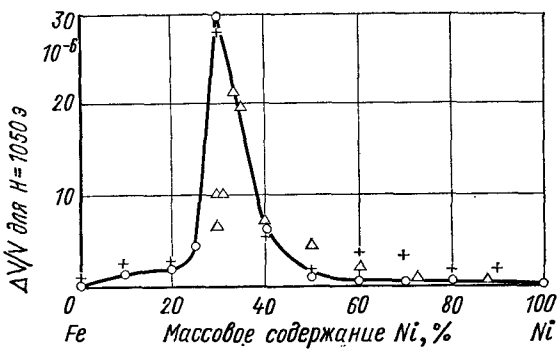


Рис. 28.30. Изменение объема $\Delta V/V$ сплавов Fe — Ni (при температуре 20 °C) при изменении напряженности магнитного поля от 0 до 1050 э по данным разных авторов [8]

Таблица 28.14

Константы магнитострикции железа при 20°C [8]

λ_{100}, 10^{-6}	λ_{111}, 10^{-6}	Вычислено по формуле (28.6) λ_S, 10^{-6}	Измерено при 20°C λ_S, 10^{-6}
20,3	—21,1	—4,5	—10±2

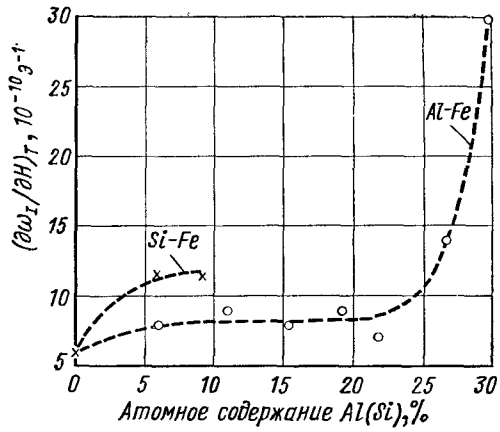


Рис. 28.31. Зависимость производной $(\partial w_I/\partial H)_T$ для сплавов Si — Fe и Al — Fe от концентрации Al(Si) [8]

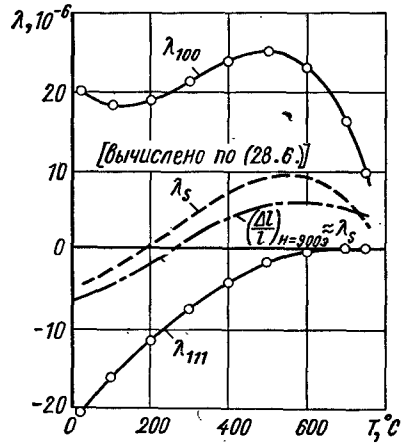


Рис. 28.32. Зависимость константы магнитострикции λ_{100} и λ_{111} Fe от температуры [8]

Таблица 28.15

Константы магнитострикции монокристалла кобальта [8]

λ_A, 10^{-6}	λ_B, 10^{-6}	λ_C, 10^{-6}	λ_D, 10^{-6}	ω_K, 10^{-6}
—45	—95	+110	—100	—30 $(1-\alpha_3^2)$ [см. уравнение (28.9)]

Таблица 28.16

Константа магнитострикции поликристаллического кобальта (см. также рис. 28.33)

λ_S, 10^{-6} [см. уравнение (28.10)]	ω_K, 10^{-6} [см. уравнение (28.12)]
—71,4	—20

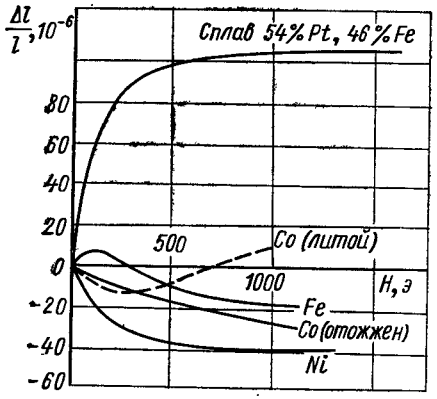


Рис. 28.33. Зависимость относительного изменения длины ($\Delta l/l$) поликристаллических образцов Fe, Co, Ni и сплава (54% Pt+46% Fe) при температуре 20 °С от напряженности магнитного поля [15]

Таблица 28.17

Константы магнитострикции никеля при температуре 20°С [8]

h_1, 10^{-6}	h_2, 10^{-6}	h_3, 10^{-6}	h_4, 10^{-6}	h_5, 10^{-6}
$-68,8\pm3,8$	$-36,5\pm1,9$	$-2,8\pm3,1$	$-7,7\pm5,2$	$7,7\pm3,1$

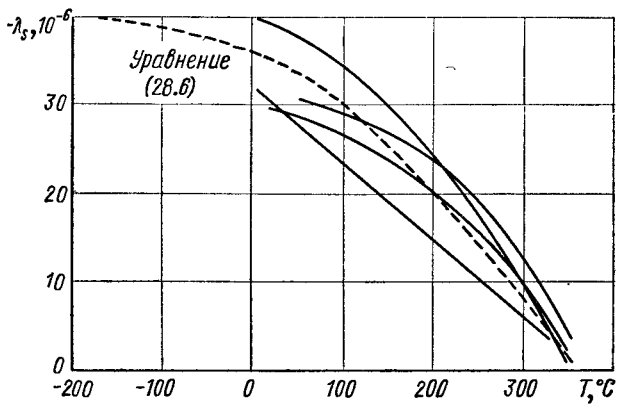


Рис.28. 34. Зависимость константы магнитострикции λ_s поликристаллического Ni от температуры по данным работ различных авторов [8]

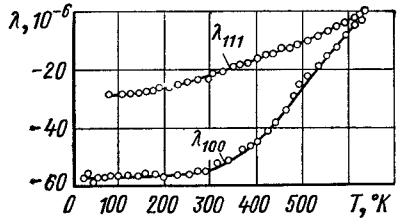


Рис. 28.35. Зависимость констант магнитострикции λ_{100} и λ_{111} Ni от температуры [8]

Таблица 28.18

Константы магнитострикции сплава 22% Fe + 78%Ni (пермалой) при температуре 20°С [8]

Охлаждение	h_1, 10^{-6}	h_2, 10^{-6}	h_3, 10^{-6}	h_4, 10^{-6}	h_5, 10^{-6}
Быстрое	13,7 ($\pm1,0$)	2,6 ($\pm0,5$)	$-0,3$ ($\pm0,8$)	1,1 ($\pm1,4$)	$-0,1$ ($\pm0,8$)
Медленное	20,9 ($\pm0,7$)	2,8 ($\pm0,3$)	1,7 ($\pm0,5$)	$-1,4$ ($\pm1,0$)	$-0,2$ ($\pm0,5$)

Таблица 28.19

Температуриая зависимость константы λ_s некоторых поликристаллических сплавов железо — никель [8] (см. также рис. 28.36 и 28.37)

Содержаиие Ni в сплаве, %	λ_s, 10^{-6}	
	20°С	—186°С
36	20,3	30,5
46	25,4	30,7
50	24,3	26,8
70	11,6	12,6

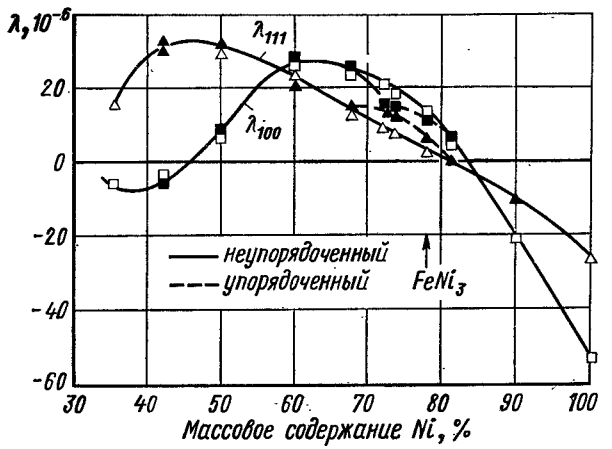


Рис. 28.36. Зависимость константы магнитострикции λ_{100} и λ_{111} кубических гранецентрированных сплавов Fe — Ni при температуре 20 °С от концентрации никеля [8]

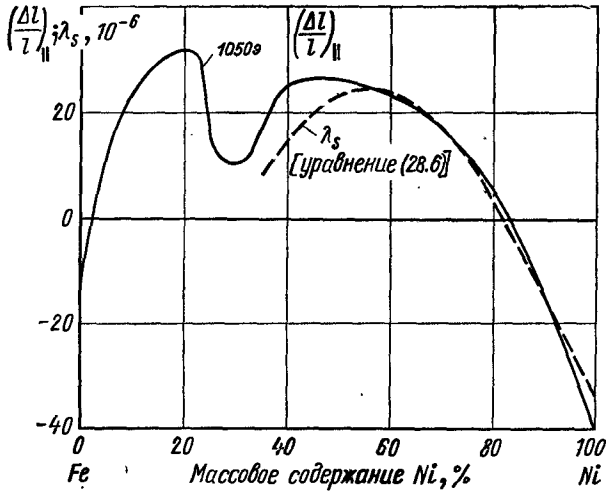


Рис. 28.37. Относнтельное изменение длины $(\Delta l/l)_{\parallel}$ в магнитном поле напряженностью 1050 э и констаита λ_S, вычисленная по формуле (28.6) на основании данных рис. 28.36 для поликристаллических сплавов Fe — Ni различных составов при температуре 20°С [8]

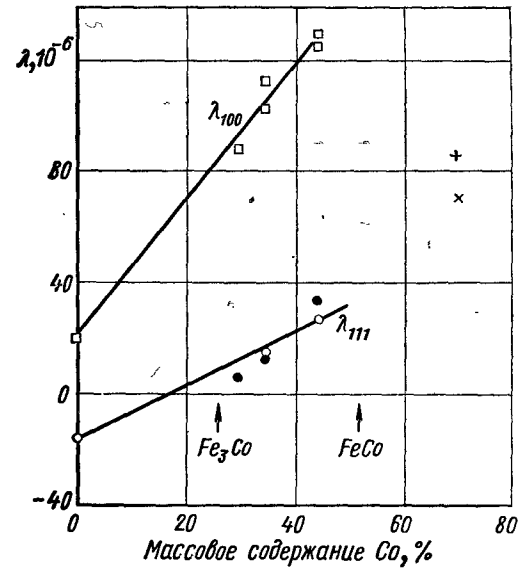


Рис. 28.38. Константы магнитострикции λ_{100} и λ_{111} кубических объемноцентрированных сплавов Fe — Co различных составов при температуре 20°С по данным работ различных авторов [8]

Таблица 28.20

Влияиие структурного упорядочения на константу λ_S сплава Ni_3Fe при температуре 20°С [8]

λ_S, 10^{-6} (данные различных авторов)

Неупорядочеиный сплав	Упорядоченный сплав
1,9	4,15
7,1	10,1
8,5	10,7

Характеристики моно- и поликристаллических сплавов железо — кобальт (рис. 28.38 и 28.39)

В ряде областей техники находнт применение магнитострикционный сплав железа с кобальтом марки К-65, для которого в поле насыщения $\Delta l/l \geqslant 10^{-4}$ [16].

Таблица 28.21

Химический состав сплава К-65 [16]

Элемент	Co	C	Si	Mn	S	P	Fe
Содержание, %	63,0—65,0	0,05	0,15—0,30	0,30—0,60	0,025	0,02	Остальное

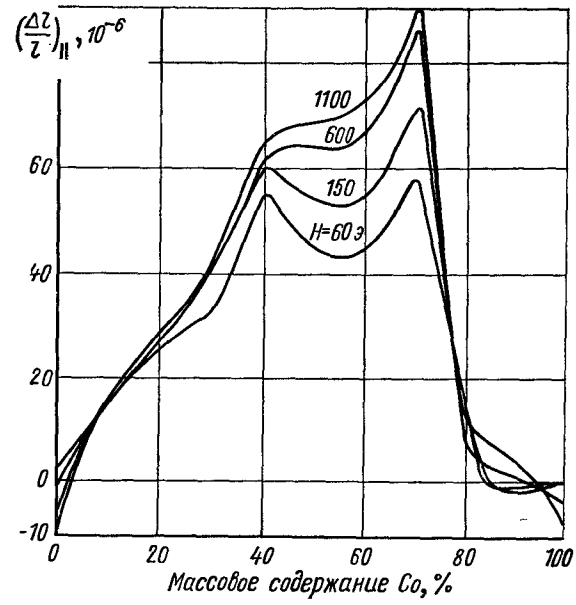


Рис. 28.39. Зависимость относительного изменения длины $(\Delta l/l)_{\parallel}$ поликристаллических сплавов Fe — Co в магнитных полях напряженностью от 60 до 1100 э от содержания Co при температуре 20° С [8]

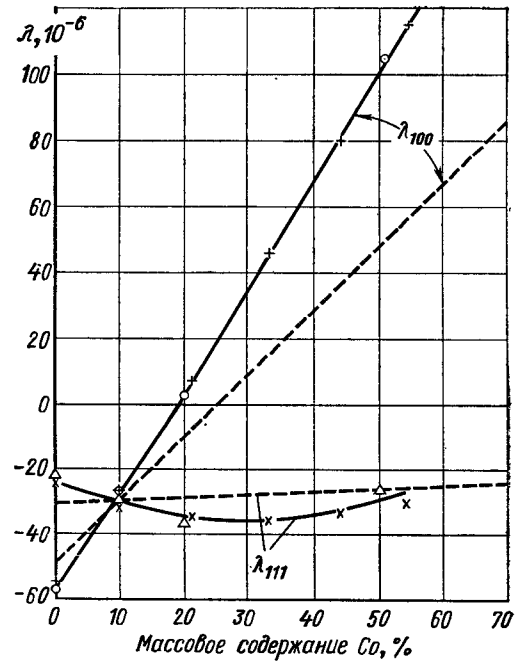


Рис. 28.40. Константы магнитострикции λ_{100} и λ_{111} кубических гранецентрированных сплавов Ni — Co различных составов при температуре 20 °С [8]

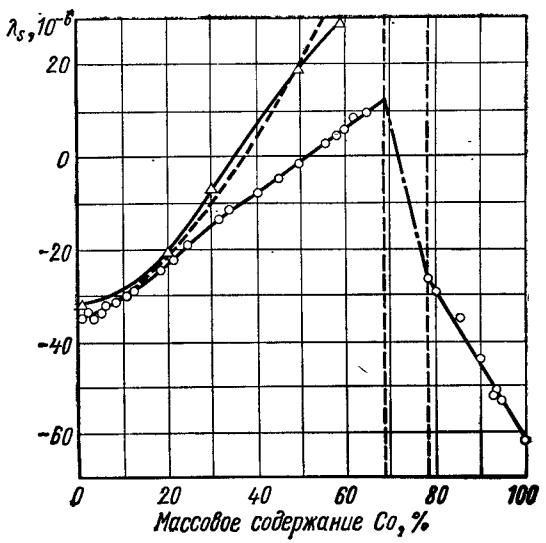


Рис. 28.41. Константа магнитострикции λ_s поликристаллических сплавов Ni — Co различных составов при температуре 20 °С Обозначения ○ и △ соответствуют данным работ различных авторов. Пунктир — вычисления по данным рис. 28.40 [8].

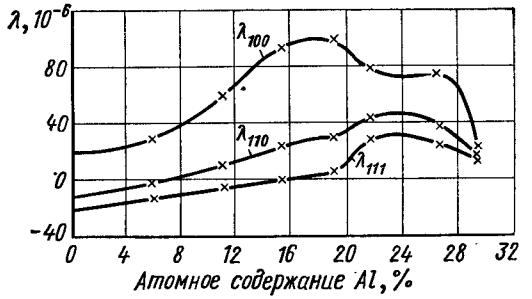


Рис. 28.42. Константы магнитострикции λ_{100}, λ_{111} и λ_{110} медленно охлажденных (упорядоченных) сплавов Fe — Al при температуре 20°С [8]

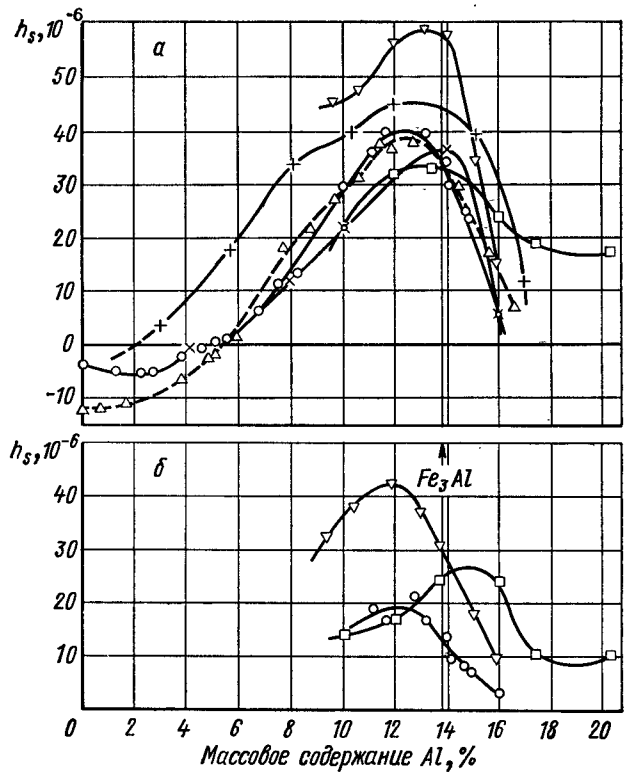


Рис. 28.43. Константа магнитострикции h_s упорядоченных (*а*) и неупорядоченных (*б*) полнкристаллических сплавов Fe — Al при температуре 20°С по данным работ различных авторов [8]

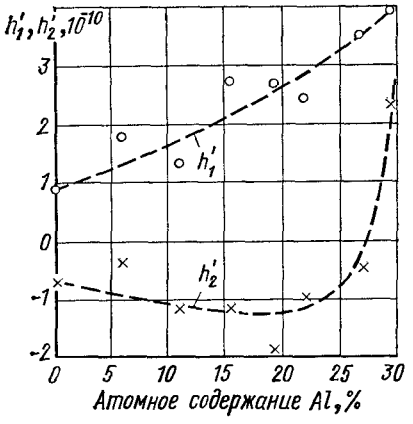


Рис. 28.44. Константы h'_1 и h'_2 «вынужденной» магнитострикции сплавов Fe — Al при температуре 20° С [8]

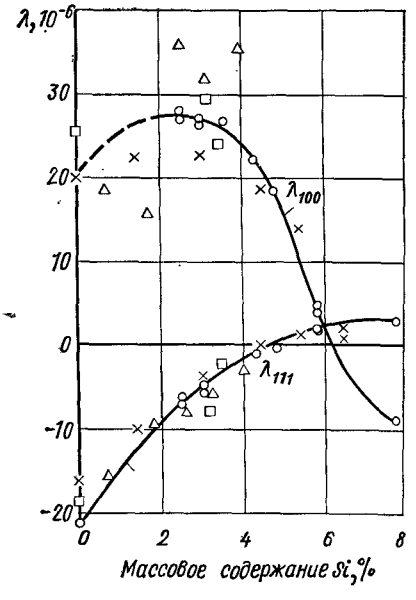


Рис.28.45. Константы магнитострикции λ_{100} и λ_{111} сплавов Fe — Si при температуре 20°С по данным работ различных авторов [8]:

×—неупорядоченные сплавы; □, △, ○—упорядоченные сплавы

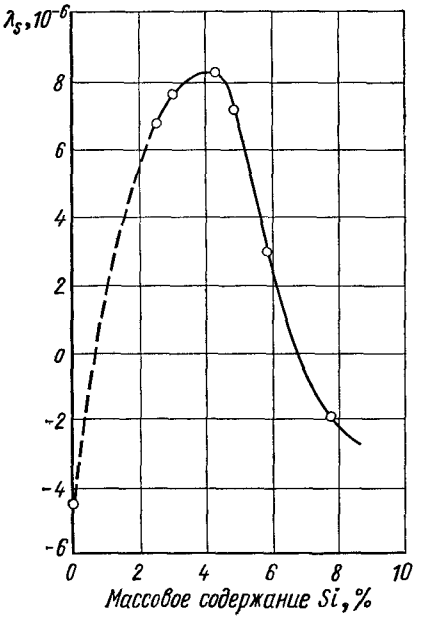


Рис. 28.46. Константа магнитострикции λ_s поликристаллических сплавов Fe — Si при температуре 20 °С. Значения λ_s вычислены по (28.6). Пунктир соответствует области, для которой нет экспериментальных данных [8].

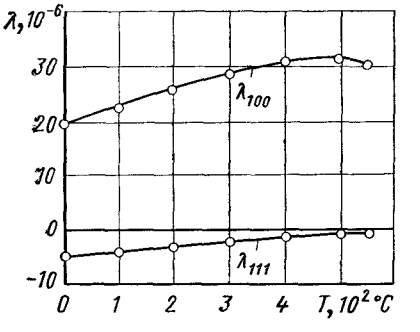


Рис. 28.47. Зависимость констант магнитострикции λ_{100} и λ_{111} сплава Fe + 3,5% Si от температуры [8].

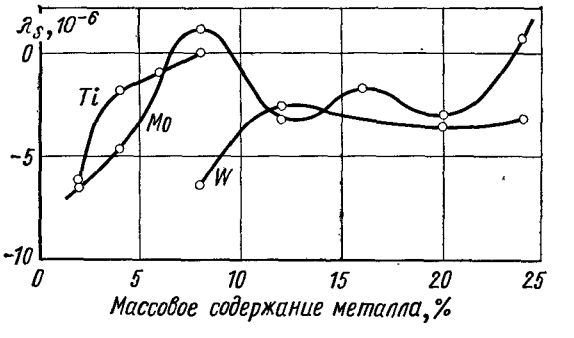


Рис. 28.48. Константа магнитострикции λ_s поликристаллических бинарных сплавов Fe с Ti, Mo и W при температуре 20° С [8]

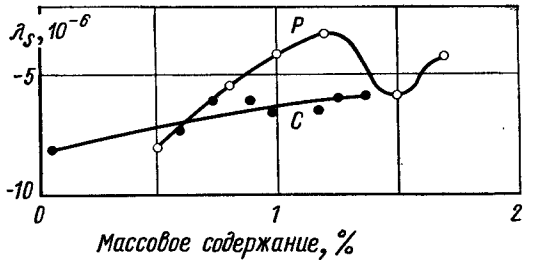


Рис. 28.49. Константа магнитострикции λ_s поликристаллических бинарных сплавов Fe с C и P при температуре 20 °C [8]

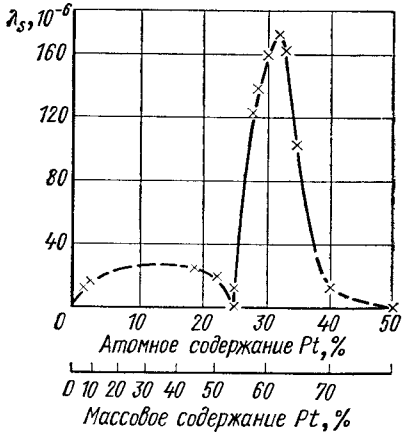


Рис. 28.50. Константа магнитострикции λ_s системы Fe — Pt при комнатной температуре [8]

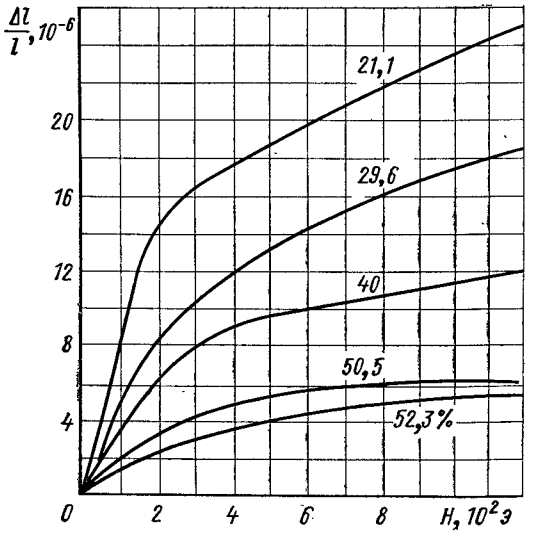


Рис. 28.51. Относительное изменение длины ($\Delta l/l$) сплавов Fe — Cr после закалки от 1050°C в масле в зависимости от содержания Cr и напряженности магнитного поля [16]

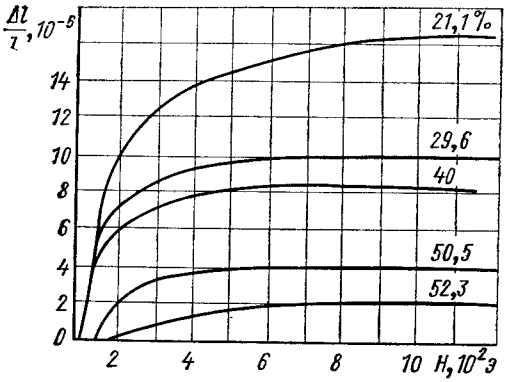


Рис. 28.52. Относительное изменение длины ($\Delta l/l$) сплавов Fe — Cr после отжига при 900°C в течение 2 ч в зависимости от содержания Cr и напряженности магнитного поля [16]

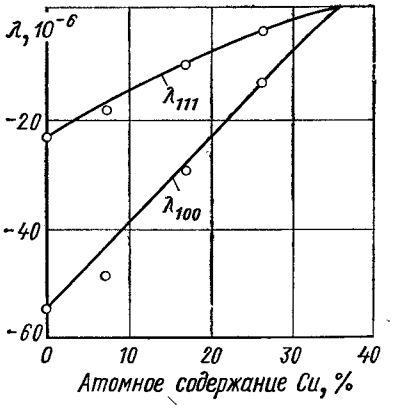


Рис. 28.53. Константы магнитострикции λ_{100} и λ_{111} сплавов Ni — Cu различных составов при температуре 20°C [8]

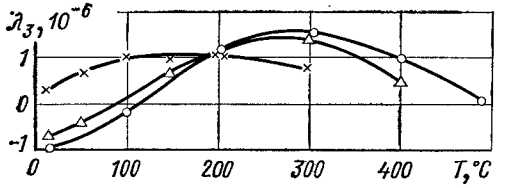


Рис. 28.54. Зависимость константы магнитострикции λ_s сплава Ni_3Mn от температуры при различных степенях упорядочения [8]:

○ — упорядоченный; △ — закаленный от 400° C; × — закаленный от 480° C

Таблица 28.22

Константа магнитострикции λ_s поликристаллических бинарных сплавов никеля [8]

Атомный состав, %				λ_s, 10^{-6}			Θ_f, °C	Термообработка
Ni	Co	X	Остальное	17°C	—183°C	—273°C		
99,3	0,5	—	0,2	—32,5	—35	—36	357	
91,0	0,4	8,3Al	0,3	—7,1	—14,5	—16	137	
87,0	0,5	12,5Al	0	0	—8,0	—9,2	22	1 *ч* 700°C медленное охлаждение
84,3	0,5	15,1Al	0,1	0	—5,0	—8,5	—78	
94,9	1,0	4,1Si	0,2	—15,5	—22	—22,5	243	
89,5	1,0	9,2Si	0,3	—1,2	—7,0	—9,5	94	
95,3	0,7	3,5V	0,5	—15,5	—23	—24	219	
93,0	0,4	6,4V	0,2	—1,7	—11,5	—14	52	
89,7	0,4	9,6V	0,3	0	—1,2	—2,2	—150	
98,1	0,5	1,1Cr	0,3	—26	—32	—33	317	
94,3	0,5	4,05Cr	0,2	—8,5	—18	—19	157	
89,8	0,5	9,3Cu	0,4	—24	—32	—33	263	
80,7	0,6	18,7Cu	0	—12,5	—21,5	—23	177	
71,3	0,4	28,1Cu	0,2	—3,2	—13,5	—14,5	74	
97,5	0,5	1,85Mo	0,2	—22,5	—29,5	—30	277	
94,4	0,5	5,0Mo	0,1	—3,5	—12	—14	82	
97,6	0,5	1,4Sn	0,5	—27,5	—32,5	—33	314	
96,4	0,5	3,0Sn	0,1	—22	—29	—30	264	
94,7	0,4	4,9Sn	0	—15,5	—23	—23,5	209	
97,1	0,75	1,65W	0,5	—22,5	—29	—30	212	
95,6	0,8	3,35W	0,3	—11,5	—18	—19	164	
93,5	0,9	5,05W	0,5	—2,5	—11,5	—13	127	
93,2	0,5	6,0Mn	0,3	—18,5	—24,5	—24,5	297	1 *ч*, 800°C, медленное охлаждение
87,9	0,5	11,4Mn	0,2	—8,0	—13,5	—13,5	209	
83,3	0,8	13,7Mn	2,0	—0,6	—7,6	—9	127	Упоряд. 2 *ч* 450°C
78,8	0,3	19,7Mn	1,2	+1,3	—0,5	—0,7	—	
77,1	0	22,7Mn	0,2	+1.8	—0,5	—1.3	—	
83,3	0,8	13,7Mn	2,0	—0,85	—7,4	—7,8	—	Неупоряд.
78,8	0,3	19,7Mn	1,2	—	0	—0,6	—	1/2 *ч* 800°C
77,1	0	22,7Mn	0,2	—	—0,15	—0,25	—	Закаленный
80	—	20Pd	—	—39,0	—45,0	—46	302	
90	—	10Pd	—	—35,0	—40,0	—41	—	
85,6	0,5	10Fe, 3,9Cr	0	—4,9	—6,0	—6,0	351	
85,1	0,5	10,1Fe,3,9W	0,4	—2,2	—3,1	—3,2	330	
65	—	16Pd, 19Fe	—	0	+0,7	—	502	

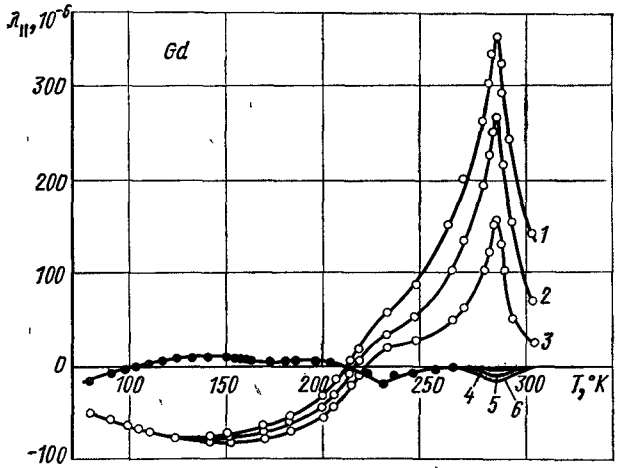


Рис. 28.55. Зависимость продольной магнитострикции монокристалла Gd вдоль осей *c* (кривые *1*, *2*, *3*) и *a* (кривые *4*, *5*, *6*) при различных значениях напряженности магнитного поля от температуры [13]:

1,6 — $H = 14000$ *э*; *2,5* — $H = 9000$ *э*; *3,4* — H-5000 *э*

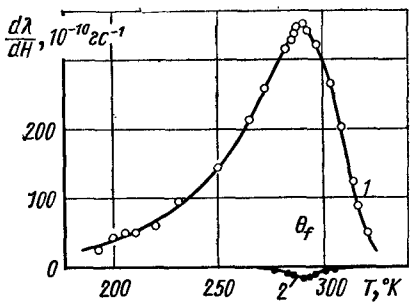


Рис. 28.56. Зависимость $d\lambda/dH$ для монокристалла Gd от температуры [13]:

1 — вдоль оси *c*; *2* — вдоль оси *a*

Рис. 28.58. Зависимость продольной $\lambda_{\parallel}$ (черные кружки) и поперечной $\lambda_{\perp}$ (светлые кружки) магнитострикции поликристаллического Tb при различных значениях напряженности магнитного поля от температуры [13]

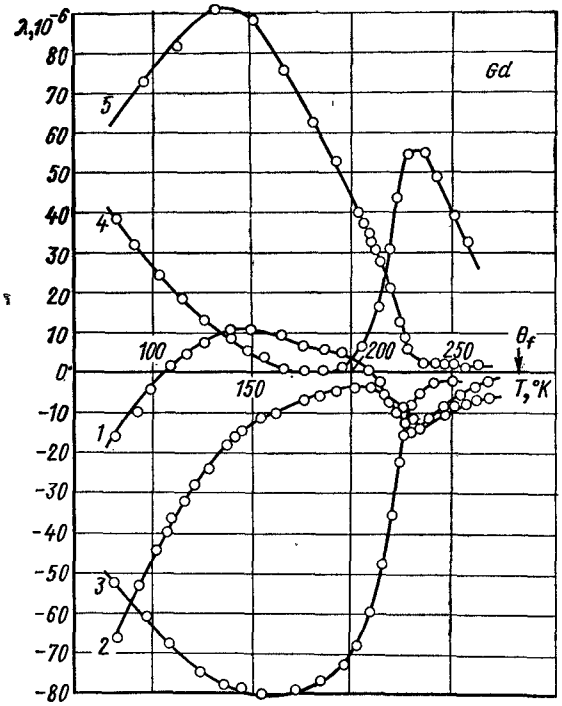
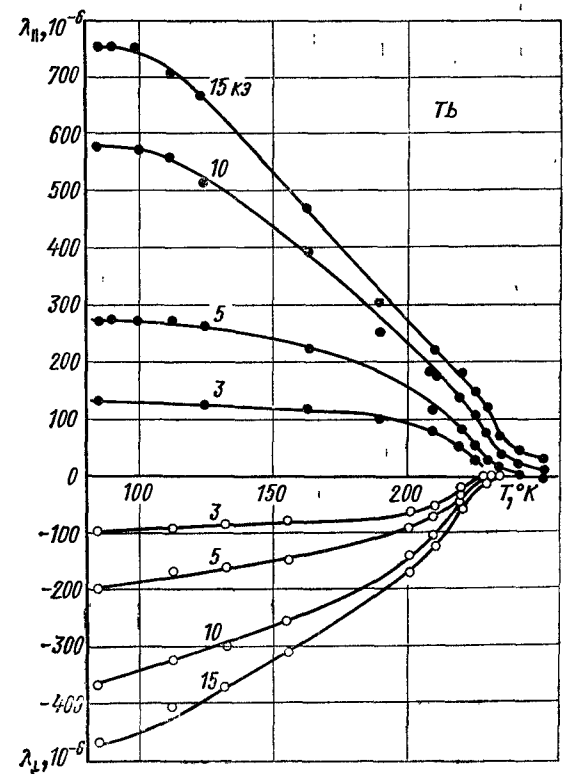


Рис. 28.57. Зависимость константы магнитострикции насыщения λ_s Gd от температуры [13]:

1 — $H \parallel \lambda \parallel a$; *2* — $H \parallel b$, $\lambda \parallel a$; *3* — $H \parallel \lambda \parallel c$; *4* — $H \parallel a$, $\lambda \parallel c$; *5* — $H \parallel c$, $\lambda \parallel a$



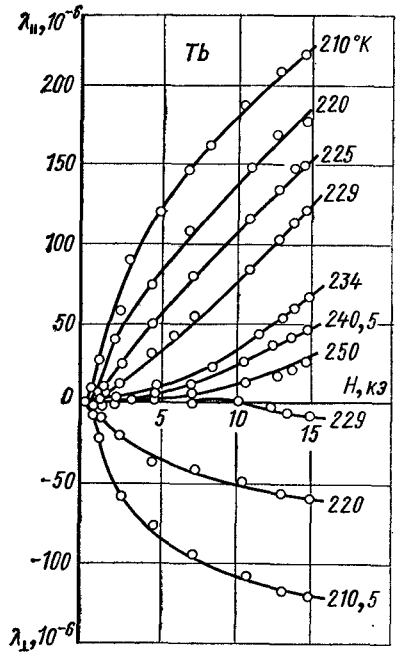


Рис. 28.59. Изотермы продольной $\lambda_{\parallel}$ и поперечной $\lambda_{\perp}$ магнитострикции поликристаллического Tb [13].

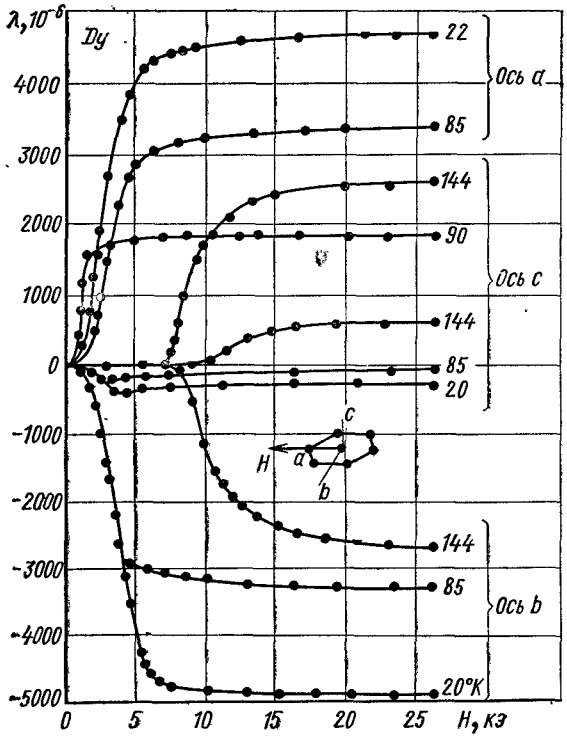


Рис. 28.60. Зависимость магнитострикции в Dy вдоль осей *a*, *b* и *c* от напряженности магнитного поли, приложенного вдоль оси *a* [13]

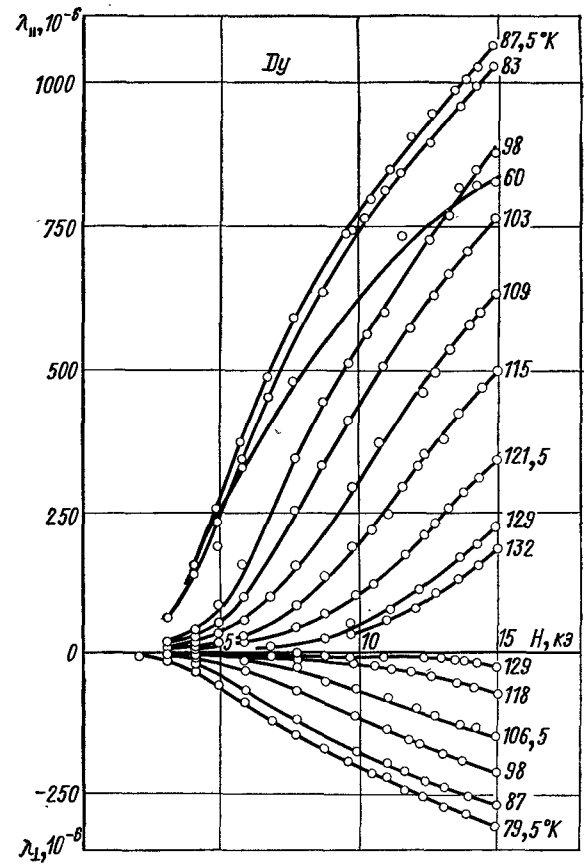


Рис. 28.61. Изотермы продольной $\lambda_{\parallel}$ и поперечной $\lambda_{\perp}$ магнитострикции поликристаллического Dy [13]

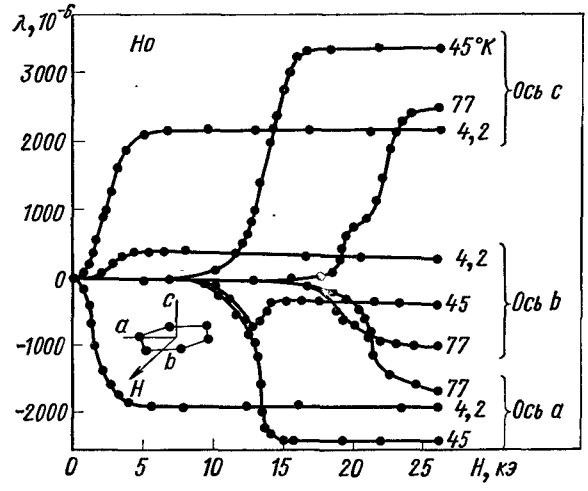


Рис. 28.62. Зависимость магнитострикции монокристалла Ho вдоль осей *a*, *b* и *c* от напряженности магнитного поля, приложенного вдоль оси *b*, для различных значений температуры *T* [13]

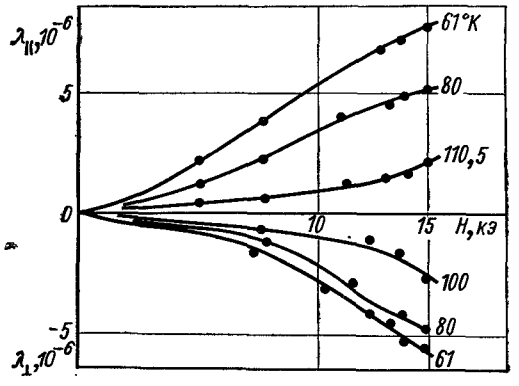


Рис. 28.63. Изотермы продольной $\lambda_{\parallel}$ и поперечной $\lambda_{\perp}$ магнитострикции поликристаллического Но [13]

Таблица 28.23

Магнитострикция насыщения ферромагнитных сплавов на основе марганца при температуре 20°С [15] (см. также рис. 28.64)

Сплав	Магнитострикция насыщения $(\Delta l/l)_s$, 10^{-6}
31%Mn + 69%Sb	—83
30,9% Cu + 14% Mn + +55,1% Bi	—140

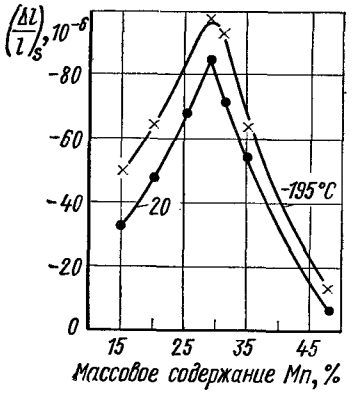


Рис. 28.64. Относительное изменение длины $(\Delta l/l)_s$ сплавов Mn—Sb в зависимости от состава и температуры [15]

Коэффициент размагничивания

При намагничивании эллипсоидальных образцов во внешнем магнитном поле напряженностью H_e напряженность истинного (внутреннего) магнитного поля H в каком-либо сечении образца представляет собой сумму напряженностей H_e и $-\Delta H$ внешнего и размагничивающего полей:

$$H = H_e - \Delta H.$$

В первом приближении напряженность размагничивающего поля ΔH пропорциональна намагниченности образца:

$$\Delta H = NJ = \frac{N}{4\pi}(B - H).$$

Коэффициент пропорциональности N называется *коэффициентом размагничивания*. Значение коэффициента размагничивания зависит от формы образца. Значения $N/4\pi$ приведены в табл. 28.24 и на рис. 28.65 и 28.66.

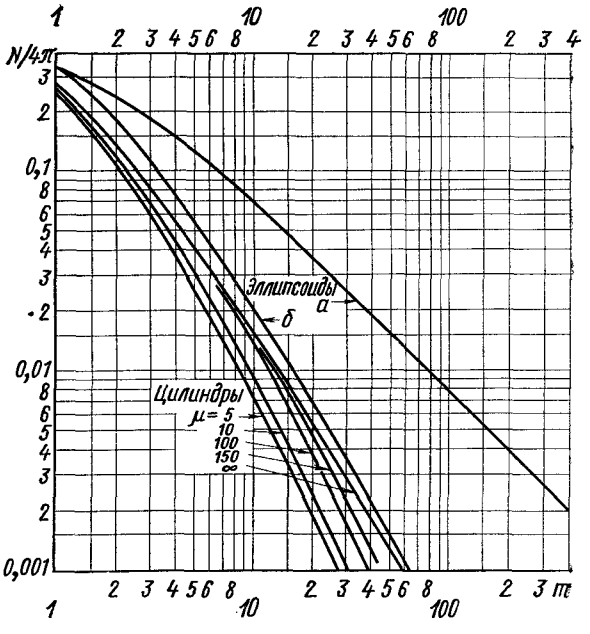


Рис. 28.65. Коэффициент размагничивания эллипсоидов и цилиндров для m, лежащих в интервале от 1 до 400:

а — сжатые эллипсоиды, *б* — вытянутые эллипсоиды. По оси абсцисс отложено m — отношение длины большой оси к длине малой оси (для эллипсоидов) или длины к диаметру (для цилиндров) [6]

Отношение B/H_e, т. е. отношение индукции в образце к напряженности внешнего магнитного поля называется кажущейся проницаемостью μ'. В тех случаях, когда $1/\mu \ll 1$, для определения истинной проницаемости можно пользоваться следующей формулой:

$$1/\mu = (1/\mu') - (N/4\pi).$$

Связь истинной магнитной проницаемости μ с кажущейся μ' для цилиндров с различным отношением m длины к диаметру показана на рис. 28.67.

В цилиндрическом образце индукция распределена неравномерно: она максимальна в средней части и убывает к концам. Только у образцов, имеющих форму эллипсоидов и находящихся в однородном магнитном поле, индукция однородна по всему объему образца. Коэффициент размагничивания эллипсоидов с заданным отношением длин их трех осей можно точно рассчитать; для них можно определить также направление индукции. Ниже приводятся формулы для основных случаев: 1) вытянутого эллипсоида вращения (овоида), имеющего одну большую полуось, отношение которой к малой

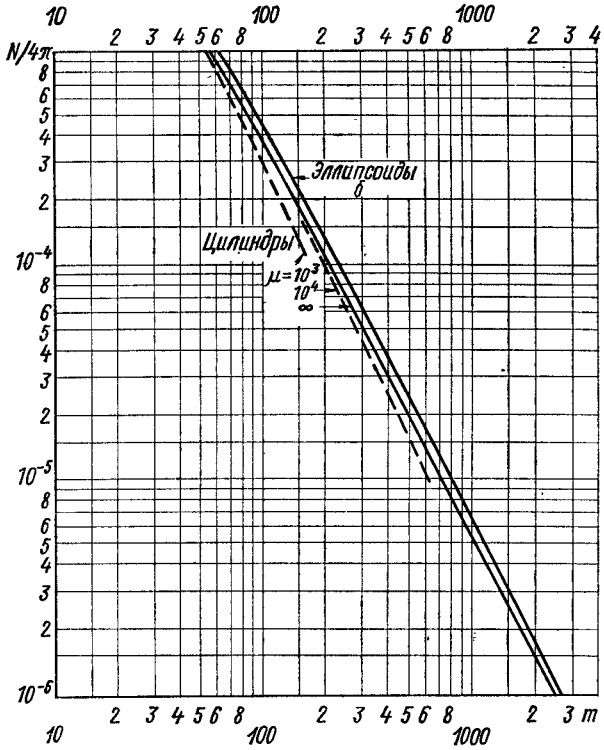


Рис. 28.66. Коэффициент размагничивания эллипсоидов и цилиндров для m, лежащих в интервале от 10 до 4000 (обозначения те же, что и на рис. 28.65) [6]

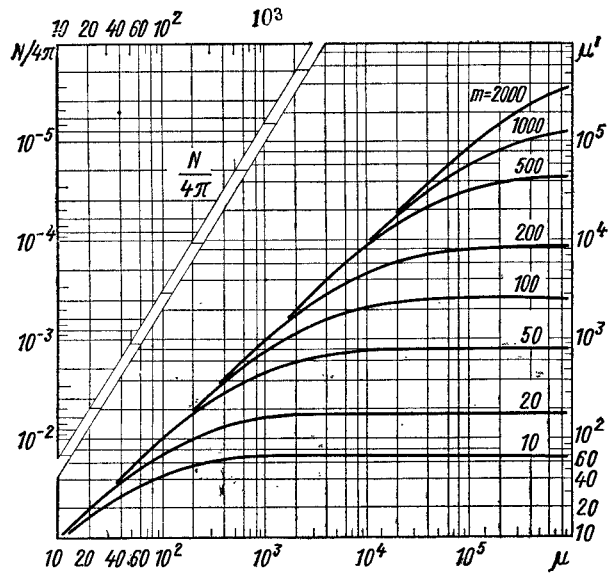


Рис. 28.67. Связь между истинной магнитной проницаемостью μ и кажущейся магнитной проницаемостью μ′ для цилиндров с различным отношением длины к диаметру [6]

равно m, и 2) сжатого эллипсоида вращения (сфероида), имеющего одну малую полуось, отношение которой к большой равно $1/m$. В том и другом случае предполагается, что образец намагничивается параллельно большой оси:

$$\frac{N}{4\pi} = \frac{1}{m^2-1}\left[\frac{m}{\sqrt{m^2-1}}\ln\left(m+\sqrt{m^2-1}\right)-1\right];$$

$$\frac{N}{4\pi} = \frac{1}{2}\left[\frac{m^2}{(m^2-1)^{3/2}}\arcsin\frac{\sqrt{m^2-1}}{m}-\frac{1}{m^2-1}\right].$$

Таблица 28.24

Коэффициент размагничивания $N/4\pi$ для цилиндров и эллипсоидов, намагничиваемых параллельно большой оси [6]

Отношение длины к диаметру m	Цилиндры	Эллипсоиды	
		вытянутые	сжатые
0	1,0	1,0	1,0
1	0,27	0,3333	0,3333
2	0,14	0,1735	0,2364
5	0,040	0,0558	0,1248
10	0,0172	0,0203	0,0696
20	0,00617	0,00675	0,0369
50	0,00129	0,00144	0,01472
100	0,00036	0,000430	0,00776
200	0,000090	0,000125	0,00390
500	0,000014	0,0000236	0,001567
1000	0,0000036	0,0000066	0,000784
2000	0,	0,0000019	0,000392

28.3. ФЕРРОМАГНЕТИКИ, ИМЕЮЩИЕ ВАЖНОЕ ЗНАЧЕНИЕ В ТЕХНИКЕ

Магнитомягкие материалы

Сталь электротехиическая нелегированиая. *Нелегированной электротехнической сталью* называют сплавы железа, содержащие менее 0,1% углерода и минимальное количество марганца, кремния и других примесей (табл. 28.25—28.27, рис. 28.68).

Наименование «*железо*» условно дано низкоуглеродистой стали, полученной с применением электролитического, карбонильного процессов или методом прямого восстановления наиболее чистых руд.

Таблица 28.25

Химический состав железа [16]

Название	Химический состав, % (не более)					
	C	Si	Mn	S	P	Cu
Кипящая низкоуглеродистая электротехническая сталь («Армко»)	0,025	0,05	0,035	0,025	0,015	0,08
Электролитическое железо	0,004	0,004	0,002	0,004	0,003	—
Карбонильное железо	0,01	0,01	0,01	0,005	0,005	—

Таблица 28.26

Магнитные свойства железа [6,16]

Название	H_c, э	μ_a	$\mu_{макс}$	B_r, гс
Низкоуглеродистая сталь с минимальным содержанием примесей	0,01	—	350 000	—
Электролитическое железо (после переплавки в вакууме и последующего отжига)	0,36	500	15 000	1500
Карбонильное железо	0,08	2000—3000	20 000—21 500	5500—6000

Таблица 28.27

Магнитные свойства электротехнической нелегированной стали (ГОСТ 3836—73)*

Марка**	H_c, э (не более)	$\mu_{макс}$ (не менее)
10 895 20 895	1,2	3000
10 880 20 880	1,0	4000
10 864 20 864	0,8	4500
10 848 20 848	0,6	4800
20 832	0,4	5000

* Химический состав: C ⩽ 0,04%; Si ⩽ 0,3%; Mn ⩽ 0,3%.

** B, *кгс*, при напряженностях (в индексе, *а/м*) не менее: B_{500} = =13,8; B_{1000} = 15,0; B_{2500} = 16,2; B_{5000} = 17,1; B_{10000} = 18,1; B_{30000} = 20,5.

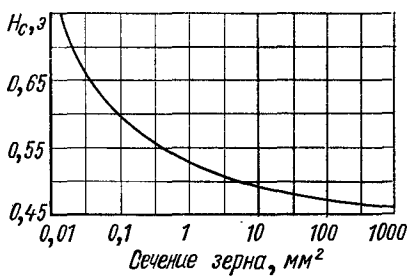


Рис. 28.68. Влияние размера зерна на коэрцитивную силу стали с содержанием углерода 0,02% [16]

Сплавы железа с кремнием. Листовая электротехническая сталь. Сплавы железа, содержащие от 0,8 до 5,00% кремния, изготовляются в виде листов и лент различных толщин под наименованием *листовой* и *ленточной* электротехнической стали. В СССР в соответствии с ГОСТ 802—58 изготавливаются шесть групп этой стали, отличающихся содержанием кремния и методом изготовления (табл. 28.28).

По степени легирования кремнием, магнитным и электрическим свойствам листовая электротехническая сталь подразделяется на марки. Буквы и цифры в марках условно означают: Э — электротехническая сталь; первая цифра после буквы Э (1, 2, 3, 4) — степень легирования стали кремнием: 1 — слаболегированная сталь, 2 — средиелегированная сталь, 3 — повышенолегированная сталь, 4 — высоколегированная сталь; вторая цифра (1, 2, 3, 4, 5, 6, 7, 8)— гарантированные электрические и магнитные свойства стали: 1, 2, 3 — удельные потери при перемагничивании стали с частотой 50 *гц* и магнитная индукция в сильных полях (1 — с нормальными удельными потерями, 2 — с пониженными, 3 — с низкими), буква А после цифры обозначает особо низкие удельные потери, 4 — удельные потери при перемагничивании стали с частотой 400 *гц* и магнитная индукция в средних полях, 5, 6 — магнитная проницаемость в слабых полях — от 0,002 до 0,008 *а/см* (5 — с нормальной магнитной проницаемостью, 6 — с повышенной), 7,8 — магнитная проницаемость в средних полях от 0,03 до 10 *а/см* (7 — с нормальной магнитной проницаемостью, 8 — с повышенной);

третья цифра (0) обозначает, что сталь холоднокатаная текстурованная;

третья и четвертая цифры (00) обозначают, что сталь холоднокатаная и малотекстурованная.

Указанные выше обозначения марок относятся к стали нормальной точности проката и нормальной отделки поверхности.

Для стали повышенной точности проката и повышенной отделки поверхности в обозначение марки вводится в конце буква П.

Электротехническая листовая сталь, изготовляемая отечественной промышленностью, согласно ГОСТ 802—58, должна обладать магнитными свойствами, указанными в табл. 28.29—28.32.

Условные индексы: $B_{0,002}$; $B_{0,004}$; $B_{0,008}$; $B_{0,03}$; $B_{0,05}$; $B_{0,1}$; $B_{0,2}$; $B_{0,5}$; $B_{0,7}$; B_1; B_2; B_5; B_{10}; B_{25}; B_{50}; B_{100}; B_{300} — обозначают магнитную индукцию в *кгс* на основной коммутационной кривой намагничивания при напряженности магнитного поля в амперах на 1 *см* (*а/см*), равной соответствующей цифре при букве В (0,002, 0,004 и т. д.);

$P_{10/50}$, $P_{15/50}$, $P_{17/50}$ обозначают полные удельные потери в ваттах на 1 *кг* стали (*вт/кг*) при перемагничивании ее с частотой 50 *гц* и максимальных значениях индукции — 10, 15, 17 *кгс*; $P_{7,5/400}$, $P_{10/400}$ — полные удельные потери в ваттах на 1 *кг* стали при перемагничивании ее с частотой 400 *гц* и максимальных значениях индукции 7,5 и 10 *кгс* соответственно, отнесенных к синусоидальному изменению индукции.

Потери на гистерезис за цикл определяются площадью петли:

$$W_h = \frac{1}{4\pi} \oint HdB = \oint HdJ.$$

W_h выражается в *эрг/см*³, если B и H выражены соответственно в гауссах и эрстедах. Потери на гистерезис P измеряют также в *вт/кг* , относя их к определенной частоте переменного магнитного поля f. Связь между P в этих единицах и в *эрг/см*³ за цикл имеет вид

Таблица 28.28

Содержание кремиия в листовой электротехиической стали (ГОСТ 802—58)

Сталь	Содержание кремиия, %
Слаболегированная:	
а) горячекатаная	0,8—1,8
б) холоднокатаная	1,0—1,8
Среднелегированная	1,8—2,8
Повышеннолегированная:	
а) горячекатаная	2,8—3,8
б) холоднокатаная	2,8—3,5
Высоколегированная	3,8—4,8

$$P\ (вт/кг) = \frac{10^{-4} f \cdot W_h}{d},$$

где d — плотность, $г/см^3$

Согласно ГОСТ 802—58, удельные потери стали после старения не должны превышать потерь, указанных в табл. 28.29 и 28.30, на следующие значения:

высоколегированная сталь	3%
средне- и повышеннолегированная сталь	6%
слаболегированная сталь марок Э11, Э1100	7%
слаболегированная сталь марок Э12, Э13, Э1200, Э1300	9%

Таблица 28.29

Магнитиая иидукция и удельиые потери при высокой напряженности поля и частоте 50 гц (ГОСТ 802—58)

Марка стали	Номинальная толщина, мм	Магнитная индукция (не менее), кгс, при напряженности магнитного поля (а/см)					Удельные потери (не более), вт/кг, при индукции и частоте (кгс/гц)		
		B_{10}	B_{25}	B_{50}	B_{100}	B_{300}	$P_{10/50}$	$P_{15/50}$	$P_{17/50}$
Горячекатаная сталь									
Э11	1,0	—	15,3	16,3	17,6	20,0	5,8	13,4	—
Э12	1,0	—	15,0	16,2	17,5	19,8	5,5	12,5	—
Э11	0,5	—	15,3	16,4	17,6	20,0	3,3	7,7	—
Э12	0,5	—	15,0	16,2	17,5	19,8	3,2	7,5	—
Э13	0,5	—	15,0	16,2	17,5	19,8	2,8	6,5	—
Э21	0,5	—	14,8	15,9	17,3	19,5	2,5	6,1	—
Э22	0,5	—	14,8	15,9	17,3	19,5	2,2	5,3	—
Э31	0,5	—	14,6	15,7	17,2	19,4	2,0	4,4	—
Э32	0,5	—	14,6	15,7	17,1	19,2	1,8	3,9	—
Э31	0,35	—	14,6	15,7	17,1	19,2	1,6	3,6	—
Э32	0,35	—	14,6	15,7	17,1	19,2	1,4	3,2	—
Э41	0,5	13,0	14,6	15,7	17,0	19,0	1,55	3,5	—
Э42	0,5	12,9	14,5	15,6	16,9	18,9	1,4	3,1	—
Э43	0,5	12,9	14,4	15,5	16,9	18,9	1,25	2,9	—
Э43А	0,5	12,9	14,4	15,5	16,9	18,9	1,15	2,7	—
Э41	0,35	13,0	14,6	15,7	17,0	19,0	1,35	3,0	—
Э42	0,35	12,9	14,5	15,6	16,9	18,9	1,2	2,8	—
Э43	0,35	12,9	14,4	15,5	16,9	18,9	1,05	2,5	—
Э43А	0,35	12,9	14,4	15,5	16,9	18,9	0,9	2,2	—

Продолжение табл. 28.29

Марка стали	Номинальная толщина, мм	Магнитная индукция, (не менее), кгс при напряженности магнитного поля (а/см)					Удельные потерн (не более), вт/кг, при индукции и частоте (кгс/гц)		
		B_{10}	B_{25}	B_{50}	B_{100}	B_{300}	$P_{10/50}$	$P_{15/50}$	$P_{17/50}$
Холоднокатаная малотекстурованная сталь									
Э1100	0,5	—	15,3	16,4	17,6	20,0	3,3	7,5	—
Э1200	0,5	—	15,3	16,4	17,6	20,0	2,8	6,5	—
Э1300	0,5	—	15,5	16,4	17,6	20,0	2,5	5,8	—
Э3100	0,5	—	15,0	16,0	17,3	19,6	1,7	3,7	—
Э3200	0,5	—	14,8	15,8	17,2	19,5	1,5	3,4	—
Холоднокатаная текстурованная сталь									
Э310	0,50	16,0	17,5	18,3	19,1	19,8	1,1	2,45	3,2
Э320	0,50	16,5	18,0	18,7	19,2	20,0	0,95	2,1	2,8
Э330	0,50	17,0	18,5	19,0	19,5	20,0	0,8	1,75	2,5
Э310	0,35	16,0	17,5	18,3	19,1	19,8	0,8	1,75	2,5
Э320	0,35	16,5	18,0	18,7	19,2	20,0	0,7	1,5	2,2
Э330	0,35	17,0	18,5	19,0	19,5	20,0	0,6	1,3	1,9
Э330А	0,35	17,0	18,5	19,0	19,5	20,0	0,5	1,1	1,6

Примечания. 1. Свойства горячекатаной и малотекстурованной холодиокатаной стали указаны для проб, не подвергавшихся после нарезки отжигу. Свойства текстурованной холоднокатаной стали указаны для проб, подвергнутых после иарезки отжигу для снятия наклепа.

2. Для малотекстурованной холоднокатаной стали разница в значениях магнитной индукции B_{25} вдоль и поперек листа не должна превышать для марок Э1100, Э1200, Э1300—1,30 кгс, а для марок Э3100, Э3200—1,6 кгс.

Таблица 28.30

Магнитная индукция и удельные потери при частоте 400 гц (ГОСТ 802—58)

Марка стали	Толщина листа, мм	Магнитная индукция, кгс (не менее)			Удельные потери, вт/кг (не более)	
		B_5	B_{10}	B_{25}	$P_{7,5/400}$	$P_{10/400}$
Э44	0,35	12,1	13,0	14,4	10,7	19,0
Э44	0,20	12,0	12,9	14,2	7,2	12,5
Э44	0,10	11,9	12,8	14,0	6,0	10,5
Э340	0,20	15,0	16,0	17,0	7,0	12,0

Таблица 28.31

Магнитиая индукция листовой электротехнической стали при малой напряженности магнитного поля (ГОСТ 802—58)

Марка стали	Толщина листа, мм	Магнитная индукция, гс (ие менее) при напряженности магнитного поля (а/см)		
		$B_{0,002}$	$B_{0,004}$	$B_{0,008}$
Э45	0,35	1,2	2,6	7,7
Э46	0,35	1,5	3,3	8,8
Э45	0,20	1,3	2,8	7,0
Э46	0,20	1,6	3,5	8,8

Таблица 28.32

Магнитная индукция при средней напряженности поля (ГОСТ 802—58)

Марка стали	Толщина листа, *мм*	Магнитная индукция, *кгс* (не менее), при напряженности поля (*а/см*)									
		$B_{0,03}$	$B_{0,05}$	$B_{0,1}$	$B_{0,2}$	$B_{0,5}$	$B_{0,7}$	B_1	B_2	B_5	B_{10}
Э47	0,35	—	—	0,35	1,4	4,8	6,1	7,7	9,2	12,1	13,0
Э48.	0,35	—	—	0,45	1,7	5,7	7,1	8,7	10,2	12,5	13,0
Э47	0,20	—	—	0,3	1,0	3,8	5,8	6,6	9,0	11,8	12,9
Э48	0,20	—	—	0,4	1,4	4,8	6,2	7,4	9,2	12,0	12,9
Э370	0,50	0,14	0,4	2,5	8,0	12,0	13,0	14,5	15,5	16,5	17,0
Э380	0,50	0,2	0,55	4,2	10,2	13,8	14,7	15,2	15,8	16,7	17,0
Э370	0,35	0,12	0,25	2,0	7,0	11,0	12,0	13,5	14,5	16,0	17,0
Э380	0,35	0,18	0,45	4,0	10,0	13,5	14,5	15,0	15,5	16,5	17,0
Э370	0,20	0,1	0,2	1,4	5,0	9,0	10,4	11,6	14,2	15,7	16,7
Э380	0,20	0,18	0,45	2,0	7,0	11,0	12,0	13,5	14,5	16,0	17,0

Магнитные характеристики сталей различных марок (рис. 28.69—28.72)

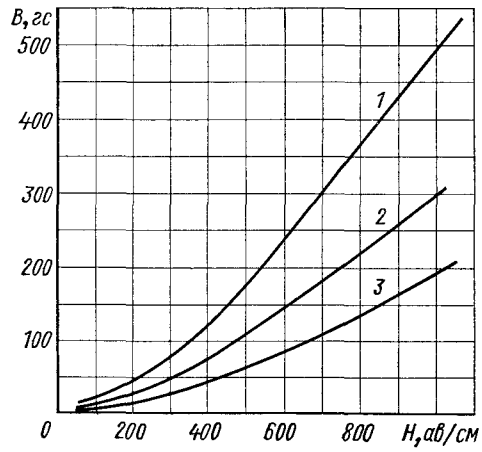


Рис. 28.69. Кривые намагничивания стали некоторых марок при постоянном токе:
1 — Э45 (ВП-2); *2* — Э42(Э4АА); *3* — Э41 (Э4А) [16]

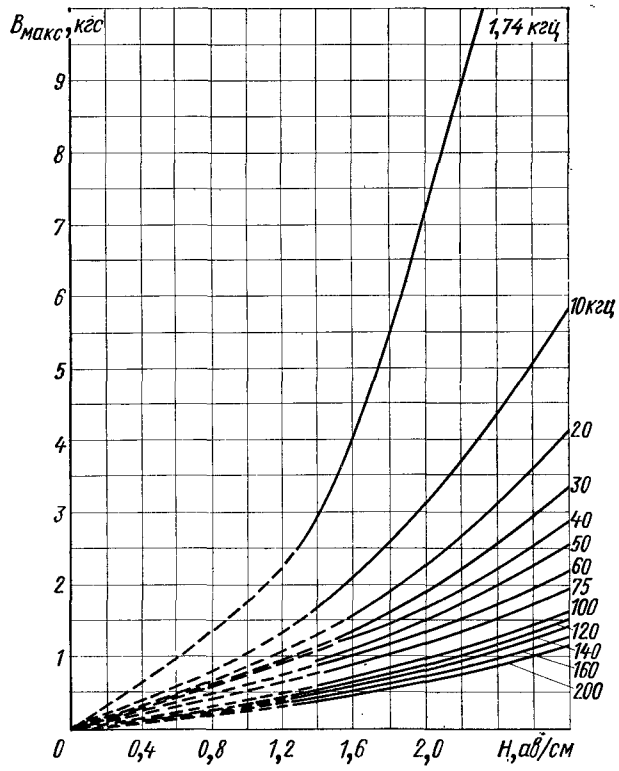
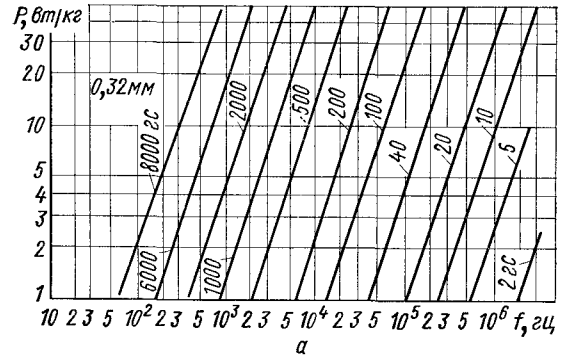


Рис. 28.70. Кривые намагничивания трансформаторной стали с содержанием 4% Si при частотах до 200 *кгц* [16]

Для повышенных и высоких частот разработана и освоена горячекатаная тонколистовая сталь марки ВПТ (высокая проницаемость, тонкая). Эта сталь (не вошедшая в ГОСТ) изготовляется толщиной 0,1—0,2 *мм*. При частоте 50 *гц* сталь ВПТ имеет потери: $P_{10} = 1{,}0$ *вт/кг*, $P_{15} = 2{,}5$ *вт/кг*, а при частоте 400 *гц*: $P_{15} = 6{,}5$ *вт/кг* (рис. 28.73).

Магнитные свойства стали ВПТ в слабых полях показаны на рис. 28.73, 28.74.

На рис. 28.75 показано влияние углерода и кремния на гистерезисные потери электротехнической стали. При содержании в стали 5—6% кремния, углерода в



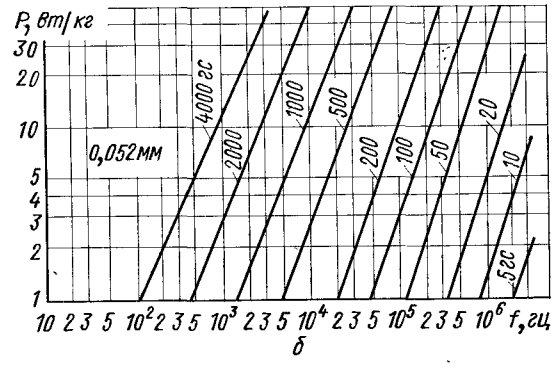


Рис. 28.71. Потери в трансформаторной стали толщиной листа 0,32 (*а*) и 0,052 *мм* (*б*) при различных частотах и индукциях [16]

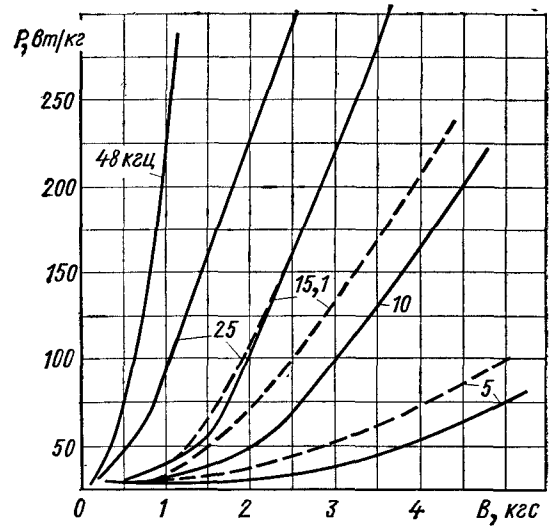


Рис. 28.72. Потери в трансформаторной стали толщиной листа 0,35 *мм* при различных частотах: изменение потерь на гистерезис (пунктирные линии) и вихревые токи (сплошные линии) [16]

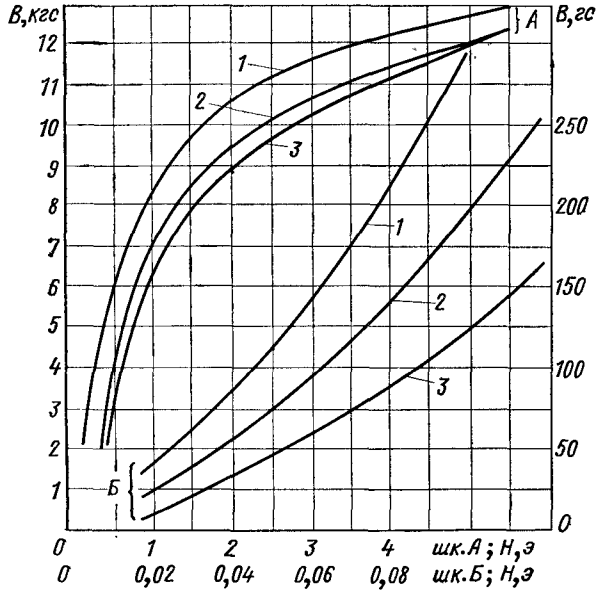


Рис. 28.73. Магнитные свойства стали ВПТ в слабых полях [16]:

1 — толщина 0,2 *мм* после высокотемпературного отжига; *2* — толщина 0,1 *мм* после высокотемпературного отжига; *3* — толщина 0,2 *мм* после обычного отжига. Содержание Si=4,4÷4,0%

виде карбидов остается всего около 0,008% и он уже не оказывает существенного влияния.

Другие примеси в электротехнической стали оказывают меньшее влияние на ее магнитные свойства, чем углерод (рис. 28.76).

Альсиферы Сплавы железа с более высоким содержанием кремния (до 9%) и сплавы, легированные алюминием (до 7%), выпускают в виде литых магнитных

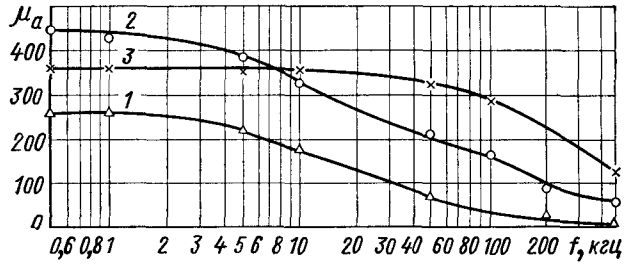


Рис. 28.74. Зависимость начальной магнитной проницаемости стали марок Э41 и ВПТ в поле $H \sim 0{,}01$ *э* от частоты [16]:

1 — Э41 толщиной листа 0,35 *мм*; *2* — ВПТ толщиной листа 0,1 *мм*; *3* — ВПТ толщиной листа 0,35 *мм*

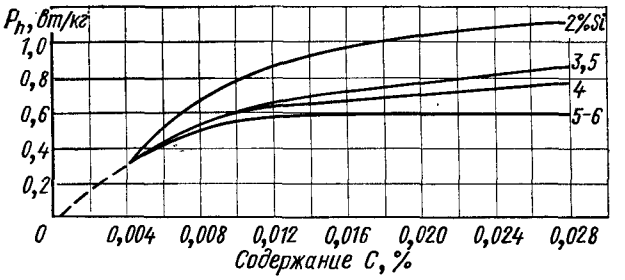


Рис. 28.75. Гистерезисные потери в электротехнической стали в зависимости от содержания углерода и кремния [16]

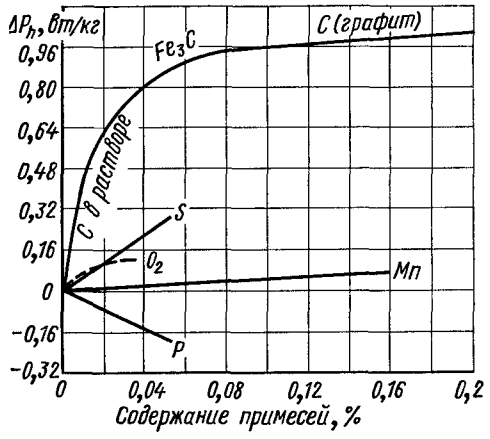


Рис. 28.76. Влияние примесей на гистерезисные потери электротехнической стали с 4% кремния при $B = 10$ *кгс*. По оси ординат отложено приращение потерь по сравнению с потерями в электротехнической стали, содержащей только 4% Si [16]

элементов или в виде порошков. Эти сплавы называют *альсиферами*. Альсиферы представляют собой твердые растворы алюминия, кремния и железа; обладают большой твердостью (твердость по шкале Роквелла 45—50) и большой хрупкостью.

Из приведенной диаграммы на рис. 28.77 видно, что наиболее высокое значение магнитной проницаемости альсифер имеет в очень узком интервале содержания в сплаве кремния и алюминия. Сплав оптимального состава содержит 9,6% кремния и 5,4% алюминия.

Таблица 28.33

Магнитные свойства альсифера оптимального состава [16]

μ_a	$\mu_{макс}$	P_h, *вт/кг*	B_r, *кгс*	H_c, *э*	$4\pi J_s$, *кгс*
35 100	117 000	0,022	3,35	0,022	11

(Магнитострикция и константа анизотропии сплавов железо — кремний — алюминий при оптимальном составе близки к нулю.)

Рис. 28.77. Начальная магнитная проницаемость альсифера в зависимости от содержания Si и Al [16]

Железоникелевые сплавы с высокой магнитной проницаемостью. Химический состав и магнитные свойства железоникелевых сплавов

Таблица 28.34а

Химический состав и точка Кюри железоникелевых сплавов (ГОСТ 10160—62, ГОСТ 10994—74)

Марка сплава	Содержание, % (остальное — железо)							
	Ni	Si	Cr	Mo	Mn	Co	Cu	Θ_f, °C
45Н	45,0—46,5	0,15—0,30	—	—	0,60—1,10	—	—	440
50Н	49,0—50,5	0,15—0,30	—	—	0,30—0,60	—	—	500
50НП	49,0—50,5	0,15—0,30	—	—	0,30—0,60	—	—	500
65НП	64,5—66,0	0,15—0,30	—	—	0,30—0,60	—	—	600
34НКМП	33,5—35,0	0,15—0,30	—	2,80—3,20	0,30—0,60	28,5—30,0	—	—
50НХС	49,5—51,0	1,10—1,40	3,80—4,20	—	0,60—1,10	—	—	360
79НМ	78,5—80,0	0,30—0,50	—	3,8—4,1	0,60—1,10	—	—	450
80НХС	79,0—81,0	1,10—1,50	2,60—3,00	—	0,60—1,10	—	—	330
76НХД	75,0—76,5	0,15—0,30	1,80—2,20	—	0,30—0,60	—	4,80—5,20	430

Таблица 28.34б

Магнитные свойства железоникелевых сплавов с высокой начальной проницаемостью (ГОСТ 10160—62)

Марка сплава	Толщина ленты, *мм*	μ_a (не менее)	$\mu_{макс}$ (не менее)	H_c, *э* (не более)	B_s, *кгс* (не менее)
45Н	0,35—2,50	2 800	25 000	0,20	15
	0,20—0,30	2 500	23 000	0,25	
	0,10—0,18	2 000	20 000	0,30	
	0,05—0,08	1 800	18 000	0,30	
	0,02—0,04	1 700	16 000	0,40	
50Н	1,1—2,5	2800	25 000	0,16	15
	0,55—1,00	3000	30 000	0,15	
	0,35—0,50	3000	35 000	0,12	
	0,20—0,30	2600	30 000	0,15	
	0,10—0,18	2300	25 000	0,20	
	0,05—0,08	2000	20 000	0,25	
	0,02—0,04	1800	20 000	0,30	
50НП*	0,05	500—1000	35 000	0,23	15 $B_r/B_s \geqslant 85\%$ $H = 10$ *э*
	0,02	500—1000	35 000	0,25	

Марка сплава	Толщина ленты, *мм*	μ_a (не менее)	$\mu_{макс}$ (не менее)	H_c, *э* (не более)	B_s, *кгс* (не менее)
65НП*	0,35—0,50	500—2000	300 000	0,03	13 $B_r/B_s \geqslant 90\%$ при $H = 10$ *э*
	0,20—0,30	500—2000	250 000	0,03	
	0,10—0,18	500—2000	200 000	0,035	
	0,05—0,08	500—2000	100 000	0,04	
	0,02—0,04	300—1500	70 000	0,08	
50НХС	0,55—1,0	3000	20 000	0,12	10
	0,35—0,50	3200	30 000	0,10	
	0,20—0,30	3000	28 000	0,12	
	0,10—0,18	2500	25 000	0,16	
	0,05—0,08	2000	20 000	0,20	
	0,02—0,04	1500	15 000	0,25	
79НМ	1,1—2,5	22 000	130 000	0,02	7,5
	0,35—1,00	25 000	150 000	0,02	
	0,20—0,30	22 000	130 000	0,02	
	0,10—0,18	20 000	120 000	0,03	
	0,05—0,08	16 000	90 000	0,04	
	0,02—0,04	16 000	70 000	0,05	
80НХС	1,10—2,50	25 000	150 000	0,015	6,5
	0,55—1,0	30 000	170 000	0,012	
	0,35—0,50	35 000	150 000	0,015	
	0,20—0,30	28 000	130 000	0,02	
	0,10—0,18	22 000	120 000	0,03	
	0,05—0,08	20 000	90 000	0,04	
	0,02—0,04	18 000	70 000	0,05	

* Проницаемость факультативна.

На рис. 28.78 и 28.79 представлены кривые намагничивания для сплавов тех же марок.

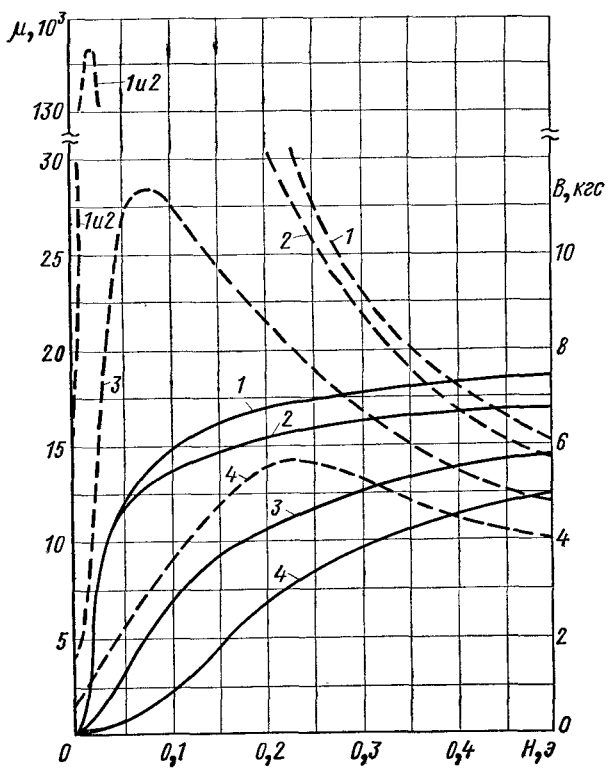


Рис. 28.78. Кривые намагничивания (сплошные) и магнитной проницаемости (пунктирные) в слабых полях для промышленных сплавов Fe — Ni в лентах различной толщины [16]:

1 — сплав 79НМ; *2* — сплав 80НХС; *3* — сплав 50НХС; *1—3* — толщина ленты от 0,35 до 0,1 *мм*; *4* — сплав 50НХС, толщина ленты 0,05 *мм*

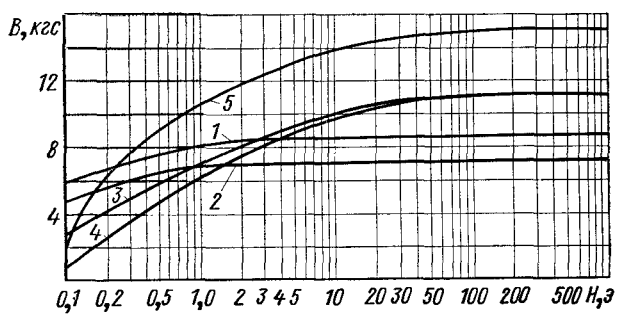


Рис. 28.79. Кривые намагничивания промышленных сплавов Fe — Ni в сильных полях [16]:

1 — сплав 79НМ; *2* — сплав 80НХС; *3* — сплав 50НХС; для *1—3,5* толщина ленты от 0,35 до 0,1 *мм*; *4* — сплав 50НХС, толщина ленты 0,05 *мм*; *5* — сплав 50Н

Свойства промышленных железоникелевых сплавов в переменных полях

Зависимость эффективной проницаемости и тангенса угла потерь на вихревые токи ферромагнитного материала от частоты при напряженности поля H_a, близкой к нулю, обычно учитывается следующими уравнениями:

$$\mu_{f_{эф}} = \frac{\mu_a}{p} \frac{\operatorname{sh} p + \sin p}{\operatorname{ch} p + \cos p} \qquad (28.14)$$

$$\operatorname{tg} \delta = \frac{\operatorname{sh} p - \sin p}{\operatorname{sh} p + \sin p}, \qquad (28.15)$$

где $p = 2\pi d \sqrt{\mu_a f / \rho \cdot 10^9}$; d — толщина пластин сердечника, *см*; μ_a — начальная проницаемость; f — частота, *гц*; ρ — удельное сопротивление материала сердечника, *ом·см*.

Выражения (28.14) и (28.15) относятся к материалу с однородной структурой и не учитывают влияния потерь на последействие. Поэтому $\mu_{fэф}$ и $\operatorname{tg}\delta$, вычисленные по формулам (28.14) и (28.15) при значениях $p > 1$, существенно отличаются от наблюдаемых на практике (рис. 28.80—28.83).

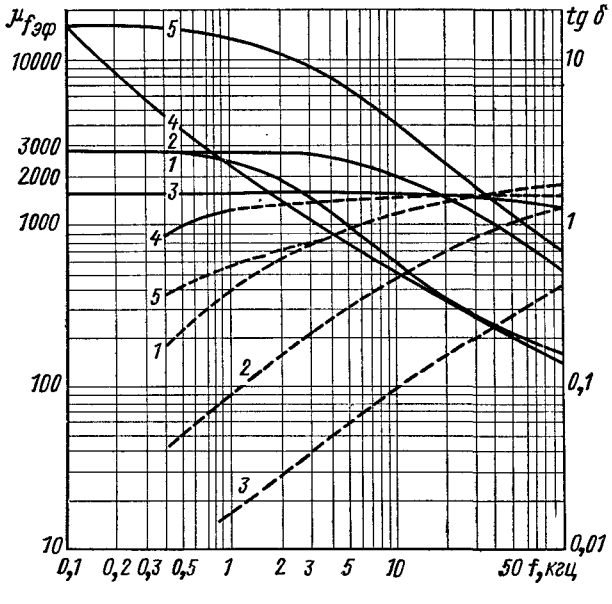


Рис. 28.80. Зависимость эффективной магнитной проницаемости (сплошные линии) и тангенса угла потерь (пунктирные) от частоты при напряженности переменного поля, близкой к нулю [16]:

1 — сплав 50НХС, толщина ленты 0,35 *мм*; *2* — сплав 50НХС, толщина ленты 0,1 *мм*; *3* — сплав 50НХС, толщина ленты 0,05 *мм*; *4* — сплав 79НМ, толщина ленты 0,35 *мм*; *5* — сплав 79НМ, толщина ленты 0,10 *мм*

Наиболее резкое падение обратимой магнитной проницаемости при низкой частоте наблюдается для сплава 79НМ — 0,10 *мм*; при частотах порядка 10 *кгц* и выше размагничивающее действие вихревых токов приводит к менее резкому изменению μ_r при изменении напряженности поля, причем различие между сплавами 79НМ и 50НХС становится незначительным.

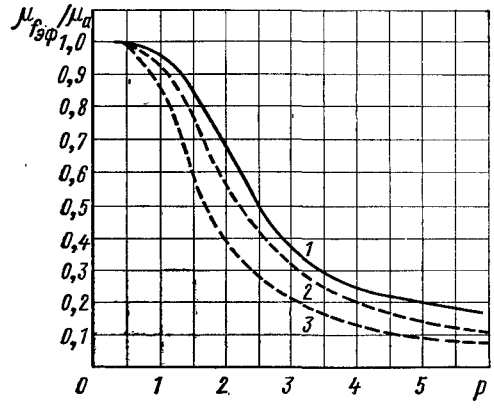


Рис. 28.81. Зависимость относительной магнитной проницаемости $\mu_{f_{эф}}/\mu_a$ от параметра p при напряженности магнитного поля H_a, близкой к нулю [см. формулы (28.14) и (28.15)] [16]:

1 — расчетная кривая. Экспериментальные кривые; *2* — для сплавов 50НХС с толщиной ленты 0,35 *мм* и 79НМ—0,10 *мм*; *3* — для сплавов 50НХС — 0,10 и 0,05 *мм* и 79НМ — 0,35 *мм*

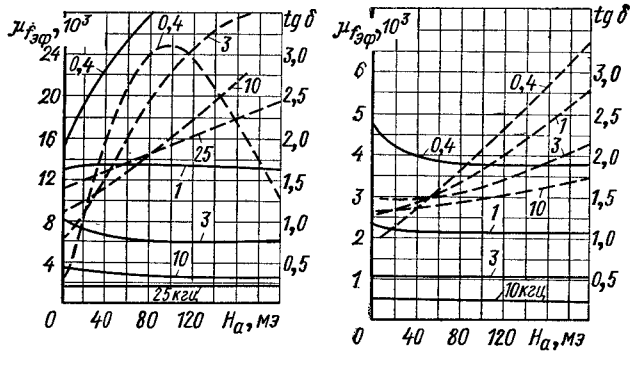


Рис. 28.82. Зависимость эффективной магнитной проницаемости (сплошные линии) и тангенса угла потерь (пунктирные) от напряженности переменного поля для сплава 79НМ в лентах толщиной 0,10 и 0,35 *мм* при различных частотах [16]

Листовые железоникелевые сплавы в большинстве случаев применяются не в виде тороидов, а в виде Ш-образных сердечников. При сборке сердечников из Ш-образных пластин с просечкой среднего языка приблизительно на 0,5—1 *мм* внахлестку и при толщине изоляционного слоя на пластинах порядка 5—7 *мкм* характеристики Ш-образных сердечников на частотах выше 500—1000 *гц* можно считать идентичными приведенным выше характеристикам тороидальных сердечников (см. рис. 28.80, 28.82—28.84).

При сборке Ш-образных сердечников с зазором эффективная магнитная проницаемость их резко падает, одновременно уменьшаются эффективное значение тангенса угла потерь, его зависимость от напряженности поля и влияния подмагничивающего поля на обратимую магнитную проницаемость.

Таблица 28.35

Эффективиая магиитиая проиицаемость и тангеис угла потерь для Ш-образиых сердечиików с зазором, собраиных из пластии сплавов 79НМ и 50НХС [16]

Марка сплава	Толщина пластины, *мм*	Тип пластины	Зазор, *мм*	μ_a	Частота, *кгц*	$\mu_{f_{эф}}$ при H_a, *э*		$\operatorname{tg}\delta_{эф}$ при H_a, *э*		μ_r при H=5 *э*
						0	0,1	0	0,1	
79НМ	0,35	ШП-20	0,5	470	1	470	—	—	—	—
					10	370	380	0,29	0,30	330
					100	180	180	0,59	0,61	170
50НХС	0,35	ШП-20	0,5	450	1	450	—	—	—	—
					10	330	340	0,25	0,26	320
					100	160	160	0,59	0,62	158
50НХС	0,1	ШП-20	0,8	450	1	450	—	—	—	—
					10	440	460	0,07	0,10	420
					100	330	340	0,38	0,39	320

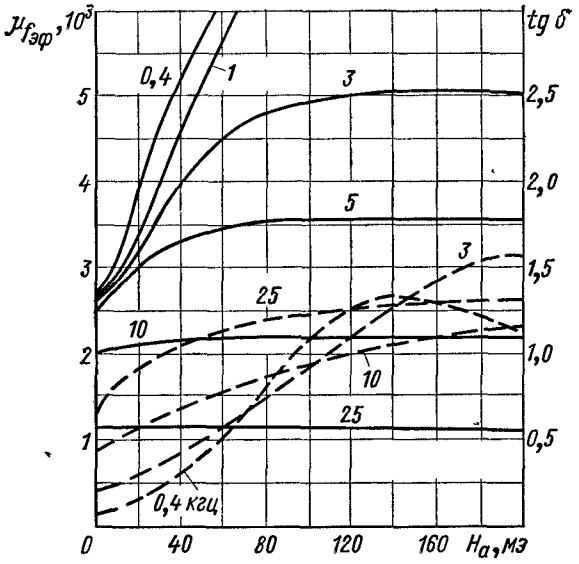


Рис. 28.83. Зависимость эффективной магнитной проницаемости (сплошные линии) и тангенса угла потерь (пунктирные) от напряженности переменного поля для сплава 50НХС в лентах толщиной 0,10 *мм* [16]

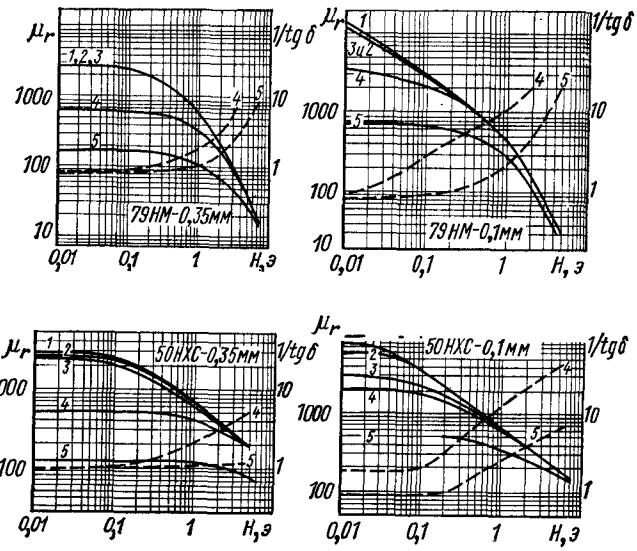


Рис. 28.84. Зависимость обратимой проницаемости (сплошные линии) и 1/tg δ (пунктирные) для сплавов 79НМ и 50НХС в лентах толщиной 0,35 и 0,1 *мм* от напряженности подмагничивающего поля [16]:

1 — f = 1 *кгц*, H_a = 100 *мэ*; *2* — f = 1 *кгц*, H_a = 50 *мэ*; *3* — f = 1 *кгц*, H_a = 5 *мэ*; *4* — f = 10 *кгц*, H_a = 5 *мэ*; *5* — f = 100 *кгц*, H_a = 5 *мэ*

Магнитомягкие металлы и сплавы со специальиыми магнитными свойствами

К магнитомягким металлам и сплавам со специальными магнитными свойствами относят: а) железокобальтовые сплавы, обладающие высокой индукцией насыщения (рис. 28.85, 28.86); б) железоникелькобальтовые сплавы, особенностью которых является постоянство магнитной проницаемости в полях до 1—2 *э*; в) термомагнитные сплавы с резко изменяющейся проницаемостью в зависимости от температуры; г) так называемые магнитострикционные металлы и сплавы.

Сплавы железа с кобальтом с высокой индукцией насыщения.

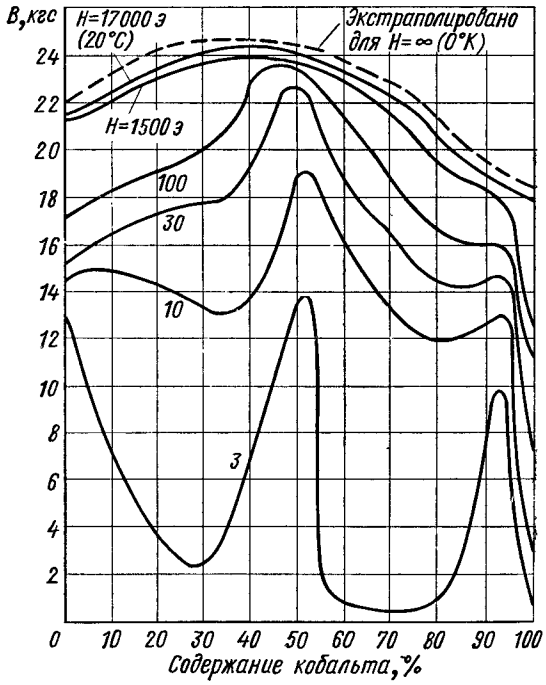


Рис. 28.85. Магнитная индукция сплавов Fe — Co в зависимости от содержания Co и напряженности поля [16]

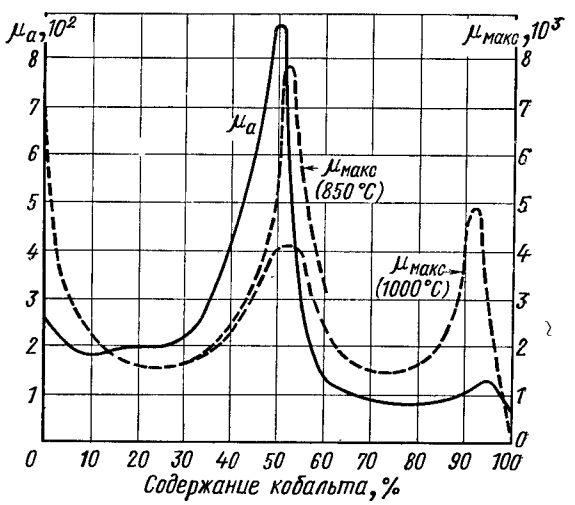


Рис. 28.86. Начальная и максимальная магнитные проницаемости сплавов Fe — Co в зависимости от содержания кобальта и температуры отжига [16]

Пермендюр — железокобальтовый сплав, легированный 2% ванадия (рис. 28.87 и 28.88).

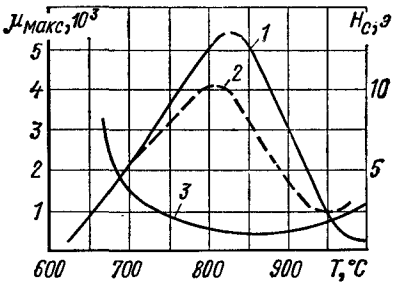


Рис. 28.87. Влияние температуры отжига на магнитные свойства пермендюра с 2% V [16]:

1 — максимальная магнитная проницаемость после быстрого охлаждения; *2* — максимальная магнитная проницаемость после медленного охлаждения; *3* — коэрцитивная сила после быстрого охлаждения

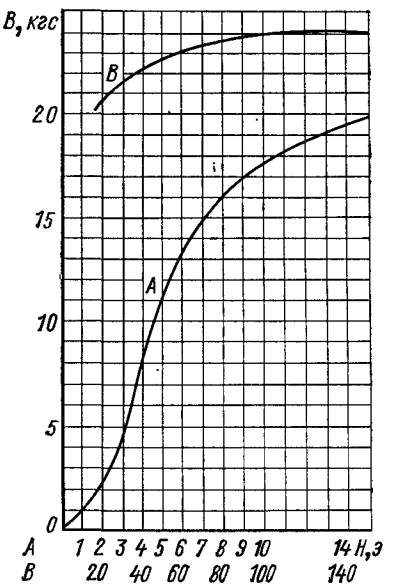


Рис. 28.88. Кривая намагничивания пермендюра с 1,8% V [16]

Сплавы с повышенным постоянством магнитной проницаемости в слабых полях. Сталь электротехническая. На рис. 24.89 представлено изменение начальной магнитной проницаемости электротехнической стали с содержанием 3,25% кремния в зависимости от температуры отжига и напряженности поля.

Высоким постоянством μ_a в слабых полях обладают некоторые сплавы системы железо — никель — кобальт, получившие название *перминвары*. Содержание основных элементов в перминваре может варьироваться в широких пределах, но обычно он содержит 30% Fe, 45% Ni и 25% Co (перминвар 45—25). Данные по магнитным свойствам сплавов типа перминвар приведены на рис. 28.90 — 28.94 и в табл. 28.36. (См. также ГОСТ 10994—74).

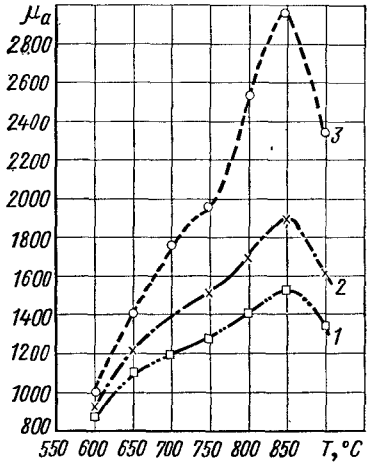


Рис. 28.89. Магнитная проницаемость электротехнической стали с содержанием 3,25% Si в зависимости от температуры отжига [16]:
1 — при напряженности поля 0,01 *мэ*; 2—то же при 20 *мэ*; *3* — то же при 100 *мэ*

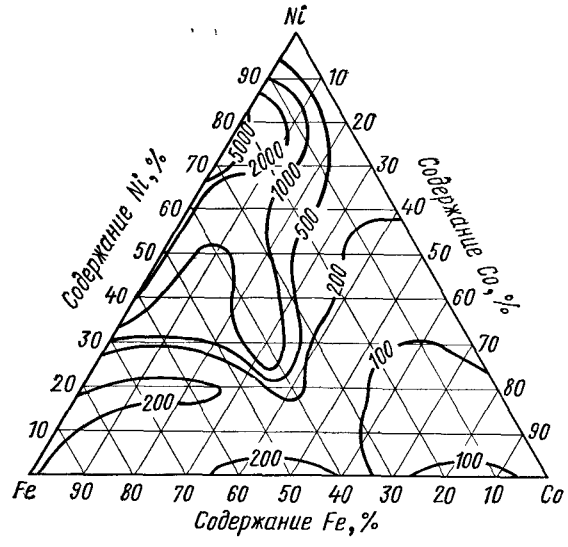


Рис. 28.91. Начальная магнитная проницаемость сплавов Fe — Ni — Co после отжига при 1000° С, охлаждения с печью до 600° С, а затем на воздухе [16]

После низкотемпературного длительного отжига перминвара 45—25 увеличение напряженности поля от 0 до 2 *э* приводит к изменению его магнитной проницаемости примерно на 1%. Потери на гистерезис для индукции 500 *гс* составляют около $8 \cdot 10^{-6}$ *вт/кг* [16].

Чрезвычайно эффективна термическая обработка перминвара в магнитном поле. Она значительно повышает магнитную проницаемость сплава и несколько снижает его коэрцитивную силу (рис. 28.94). Магнитное поле оказывает эффективное действие на перминвар только при охлаждении сплава от 800 до 400°С.

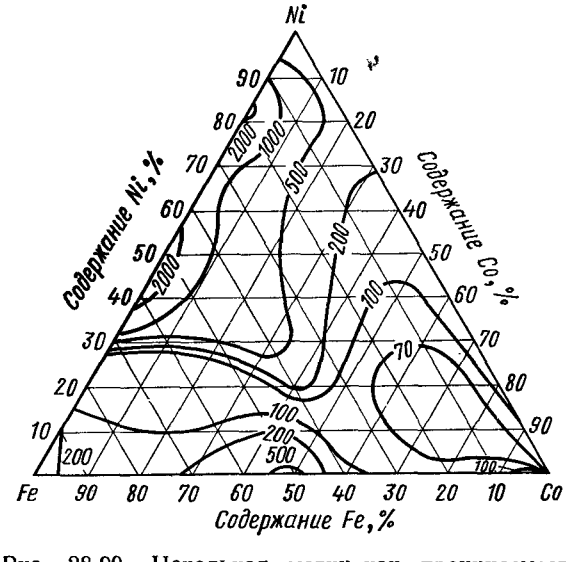


Рис. 28.90. Начальная магнитная проницаемость сплавов Fe — Ni — Co после отжига при 1000° С с медленным охлаждением [16]

Таблица 28.36

Максимальная магнитная проницаемость сплавов типа перминвар [16]

Химический состав, %			$\mu_{макс}$		$T_{зак}$, °С
Fe	Co	Ni	Отжиг при 1000°С, охлаждение с печью	Закалка на воздухе	
30	15	55	2800	12 400	700
30	20	50	2400	19 500	725
25	20	55	2500	18 200	725
30	25	45	2000	25 000	725
35	20	45	4200	22 300	700
35	25	40	2400	25 800	715
35	30	35	2000	13 800	725

Термомагнитные сплавы. Основными критериями практической ценности термомагнитного сплава, считают: 1) магнитную индукцию; 2) обратимость и прямолинейность зависимости магнитных свойств от температуры в диапазоне от +50 до —70° С; 3) стабильность структуры сплава при воздействии отрицательных температур; 4) малую изменяемость магнитных свойств от колебаний химического состава.

К термомагнитным сплавам относятся, например, некоторые марки монель-металла. В табл. 28.37 приведен химический состав монель-металла, изготовляемого в СССР согласно ГОСТ 492—73.

Таблица 28.37

Химический состав монель-металла, % (ГОСТ 492—73*)

Марка сплава	Fe	Mn	Cu	Ni+Co	Si	Mg
НМЖМц 28-2,5-1,5	2—3	1,2—1,8	27—29	Остальное	Не более 0,05	Не более 0,1

Примечание. Общее содержание примесей (C, Sb, Pb, S, P As, Bi.) должно быть не более 0,6%.

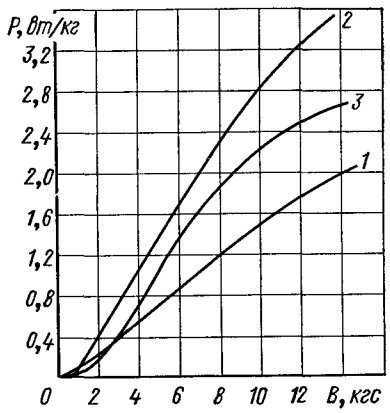


Рис. 28.92. Потерн на гистерезис сплава 45-25 после термической обработки [16]:

1 — 1000° С, медленное охлаждение до 600° С, быстрое с 600° С; *2* — 1000° С, медленное охлаждение до 450° С; *3*— 1000° С, медленное охлаждение до нормальной температуры

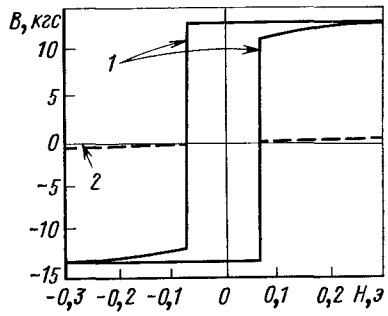


Рис. 28.94. Петлн гистерезиса перминвара 45-25 после термической обработкн в магнитном поле [16]:

1 — поле при измереиии направлено параллельно магнитиому полю при обработке; *2* — поле при измерении направлено перпендикулярно магнитному полю при обработке

Магнитотвердые материалы

Магнитотвердые сплавы мартенситного класса. *Мартенсит* представляет собой нестабнльный твердый раствор углерода в α-железе с тетрагональной объемноцентрированной решеткой.

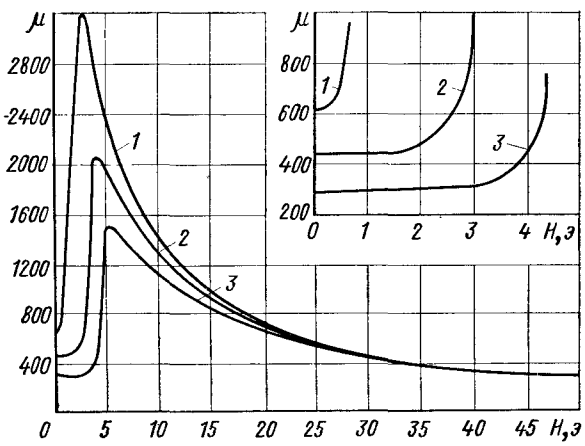


Рис. 28.93. Зависимость магнитной проницаемости перминвара 45-25 от термической обработкн [16]:

1 — закалка на воздухе; *2* — отжиг; *3* — инзкотемпературный (400—425° С) длительный отжиг

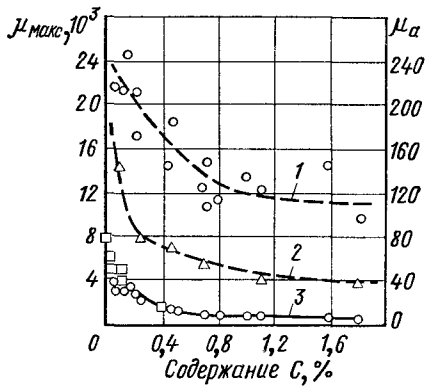


Рис. 28.95. Магнитная проницаемость углероднстой стали в зависнмостн от содержаиия углерода и характера термической обработки [16]:

1 — μ_a после отжига; *2* — μ_a после закалки; *3* — $\mu_{макс}$ после закалки.

К магнитотвердым сплавам мартенситного класса относятся углеродистые стали, а также стали, легированные хромом, вольфрамом, кобальтом и молибденом, подвергающиеся ковке и прокатке при высоких температурах. Коэрцитивная сила этих сплавов составляет от 50 до 280 *э*; остаточная индукция — от 7 до 10 *кгс* и удельная энергия — от 10 000 до 40 000 *эрг/см*^{3} [16].

Углеродистые стали. В настоящее время *углеродистая сталь* в качестве магнитотвердого материала находит ограниченное применение в промышленности. Магнитные свойства углеродистой стали находятся в зависимости от содержания в ней углерода и структурной формы расположения его в твердой фазе (рис. 28.95 и 28.96).

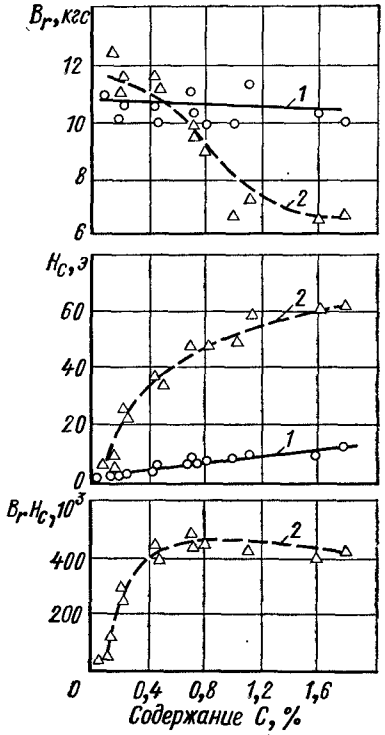


Рис. 28.96. Зависимость остаточной индукции (B_r), коэрцитивной силы (H_c) и $B_r \cdot H_c$ углеродистой стали от содержания углерода и термической обработки [16]:
1 — после отжига; *2* — после закалки.

Легированные стали. Марки легированной стали, применяемые для изготовления постоянных магнитов, определены в табл. 28.38 (см. также рис. 28.97, 28.98).

Вольфрамовая сталь имеет магнитные свойства, несколько лучшие, чем сталь, содержащая хром (рис. 28.99). Магнитные свойства вольфрамовой стали ухудшаются при нагревании в интервале температур 700—750° С и могут быть восстановлены нагреванием ее до 1200—1300° С с последующим ускоренным охлаждением на воздухе.

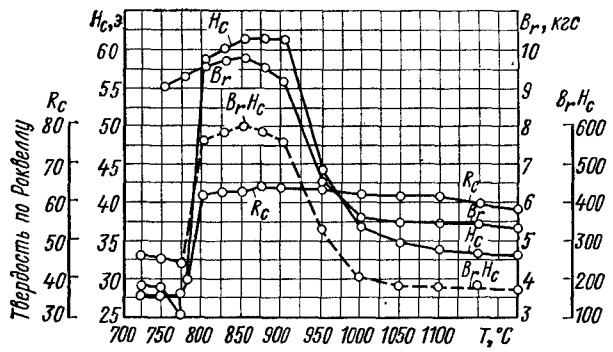


Рис. 28.97. Магнитные свойства и твердость по Роквеллу стали с 1,04% С и 1,58% Cr после прокатки (нагрев под чистовую прокатку при 1100° С) и закалки при различных температурах в масле [16]

Таблица 28.38

Магнитные свойства легированной стали (ГОСТ 6862—71) [17]

Марка стали	Напряженность намагничивающего поля, 10^2 *э*	B_r, 10^2 *гс* (Не ниже)	H_c, *э* (Не ниже)
ЕХ3	5	95	60
ЕВ6	5	100	60
ЕХ5К5	10	85	90
ЕХ9К15М2	10	80	150

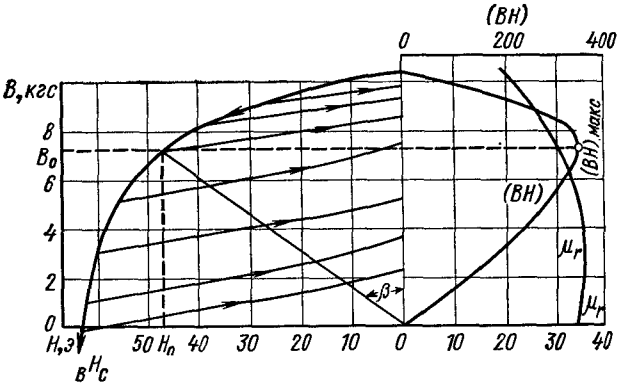


Рис. 28.98. Кривые размагничивания, магнитной энергии и обратимой магнитной проницаемости хромистой стали (1,0% С и 3,0% Cr). Сечение 20 × 20 *мм*. Температурный коэффициент магнитной индукции равен —(2÷3)·10^{-4} *град*$^{-1}$ [16]

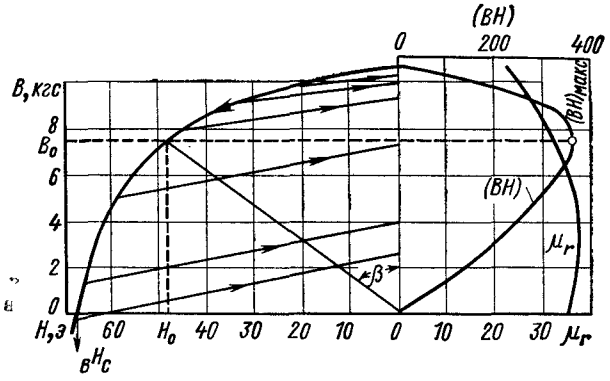


Рис. 28.99. Кривые размагничивания, магнитной энергии и обратимой магнитной проницаемости (возврата) вольфрамовой стали (0,55—0,8% C и 5,0—6,5% W). Сечение 10 × 10 *мм*. Значение температурного коэффициента индукции равно $-(2 \div 4) \cdot 10^{-4}$ *град*$^{-1}$ [16]

Магнитотвердые сплавы дисперсионного твердения. Магнитные свойства *сплавов дисперсионного твердения* зависят не только от химического состава, но в большей мере и от строения их в твердом состоянии. Важнейшим фактором, определяющим строение магнитного сплава дисперсионного твердения, являются процессы растворимости составляющих его элементов, которыми управляют посредством термической обработки.

В практике производства постоянных магнитов находят применение три основные группы сплавов дисперсионного твердения: а) сплавы, деформируемые (ковка и прокатка) в горячем состоянии; б) сплавы, применяемые в виде фасонных отливок; в) сплавы, деформируемые в холодном состоянии.

Сплавы, деформируемые в горячем состоянии Распространены *железокобальтмолибденовые сплавы*. Наибольшую магнитную твердость эти сплавы приобретают после их быстрого охлаждения (закалки) при температуре 650—700° С (рис 28.101, 28.102).

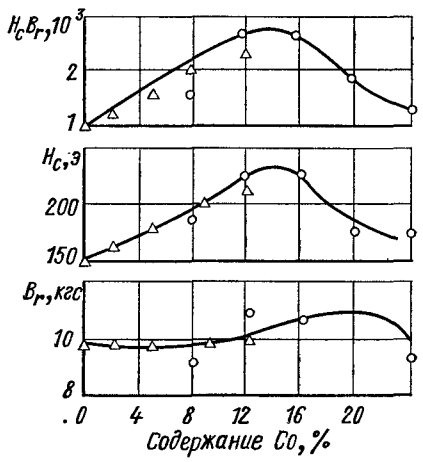


Рис. 28.100. Зависимость H_c, B_r и H_cB_r в сплавах типа ремаллой от содержания Co (кривые относятся к сплавам, содержащим 16% молибдена) [16]

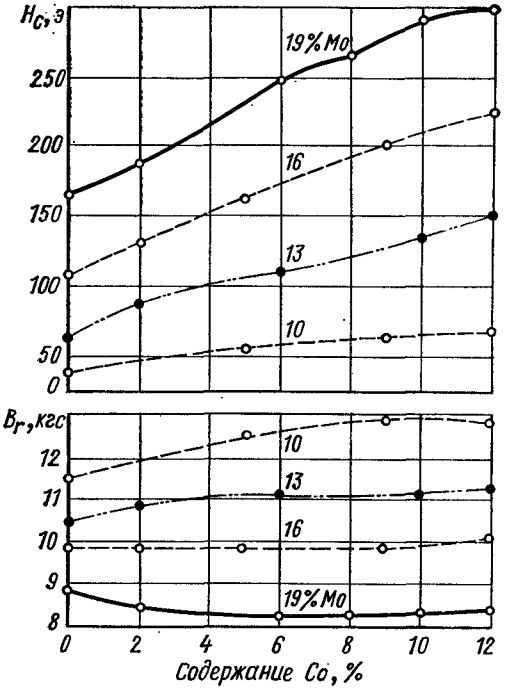


Рис. 28.101. Зависимость H_c и B_r Fe — Co — Mo-сплавов, термически обработанных на максимум этих свойств, от содержания Co (до 12%) и Mo (до 19%) [16]

Таблица 28.39

Зависимость магнитных свойств сплава типа ремаллой (72% Fe, 12% Co и 16% Mo) от температуры закалки и отпуска в течение одного часа [16]

Температура закалки, °С	Температура отпуска, °С	B_r, кгс	H_c, э	$B_r \cdot H_c$, 10^3 гс·э	B_{1700}, кгс
900	—	8,0	7	56	15,7
900	725	6,8	45	306	14,7
1100	—	3,0	7	21	18,5
1100	675	8,5	130	1105	—
1100	725	9,5	240	2280	15,3
1200	675	11,2	250	2800	—
1300	—	3,0	7	21	18,6
1300	610	11,0	40	440	17,3
1300	675	10,9	255	2789	—
1300	725	10,0	260	2600	14,8
1300	825	11,0	100	1100	15,3

Практическое применение получили также сплавы с содержанием 13—15% молибдена и 10—12% кобальта, известные под названием *ремаллой* или *комоль* (рис. 28.100).

Сплавы типа ремаллой подвергаются горячей механической обработке, закалке на воздухе или в масле от

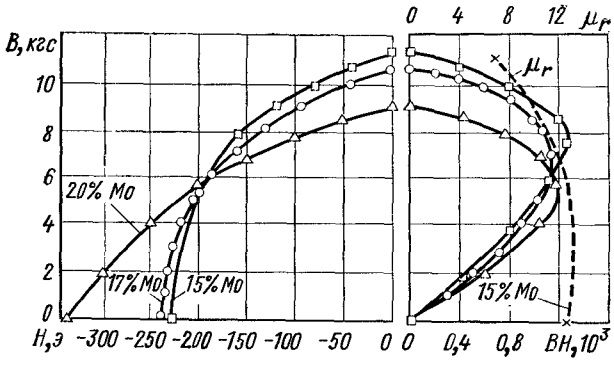


Рис. 28.102. Кривые размагничивания, магнитной энергии и обратнмой магнитной проницаемости сплавов Fe — Co — Mo при содержании 12% Co, 15,17 н 20% Mo [16]

1200—1300° С н последующему отпуску в течение одного часа от 650—700° С (табл. 28.39).

Сплав типа ремаллой мало чувствителен к нарушениям режима термической обработки и содержания основных элементов.

Сплавы, применяемые в литом состоянии. К этой группе магнитотвердых материалов относятся *α-сплавы системы железо — никель — алюминий*, а также их модификации, получаемые за счет введения в них кремния, меди, кобальта и других элементов.

Таблица 28.40

Химический состав и магнитные свойства некоторых сплавов на осиове Fe, Ni, Al (ГОСТ 17809—72)[4]*

Марка*	Состав, %[2]*	B_r, гс	H_c, э	$\frac{(BH)_{макс}}{8\pi}$, $\frac{эрг}{см^3}$	BH[3]*
		не менее			
ЮНД4	13,5Al; 24,5Ni; 3,5 Cu; 0, 25 Ti	5 000	500	36 000	9,6—12,7
ЮНД8	11Al; 28Ni; 8Cu	6 000	550	51 000	10,3—12,7
ЮНДК15	9Al; 19,5Ni; 3,5Cu; 14,5Co; 0,25 Ti	7 500	600	60 000	12,3—14,3
ЮНДК18	9,5Al; 18,5Ni; 3,5Cu; 18,5Co	9 000	700	97 000	12—16
ЮН14ДК24Т2	8,5Al; 14,5Ni; 3,5Cu; 24Co; 2,0Ti	11 000	750	150 000	12,7—15,1
ЮН13ДК25А	8Al; 13Ni; 3,5Cu; 25Co	14 000	550	280 000	22—24

* Ю — алюминий; Н — никель; Д — медь; К — кобальт; Т — титан; А — кристаллическая текстура.
2* Данные по составу усреднены.
3* В точке $(BH)_{макс}$.
4* ГОСТ 17809—72 содержит данные еще девятнадцати марок литых сплавов, предназначенных для постоянных магнитов.

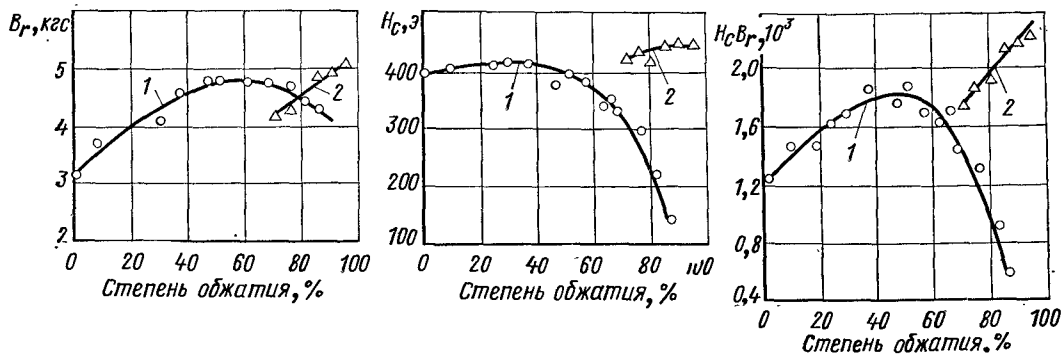


Рис. 28.103. Влияние степени обжатия при прокатке на магнитные свойства сплава, содержащего 60% Cu, 20% Ni, 20% Fe [16]:

1 — после одночасового отпуска при 650 °С и прокатки; *2* — после отпуска, прокатки и повторного отпуска (старения)

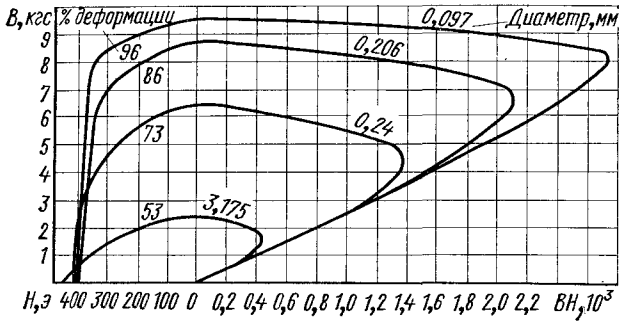


Рис. 28.104. Влияние деформации проволоки из сплава викаллой на размагничивание и магнитную энергию [16]

Все литые магнитотвердые сплавы имеют крупнозернистое строение, высокую твердость и большую хрупкость.

Литые магнитотвердые сплавы обладают высокой устойчивостью на старение. Уменьшение твердости и хрупкости сплавов достигается при помощи отжига их по следующему режиму:

а) медленный нагрев до 950—1050° С в печи с нейтральной или слабоокислительной атмосферой;

б) выдержка в печи после прогрева не менее 5—7 *ч;*

в) охлаждение вместе с печью до 500° С со скоростью не более 50—70° в 1*ч*, дальнейшее охлаждение на воздухе.

Таблица 28.41

Влияние обработки на магнитные свойства сплава 60%Cu, 20% Ni, 20% Fe [16]

Режим обработки	B_r, *кгс*	H_c, *э*	$B_r H_c$, 10^3 *гс·э*	$(BH)_{макс}$, 10^6 *эрг/см³*
Литье, гомогенизация, закалка от 1000°С	2,0	200	400	—
Старение при 650°С	2,2	400	880	—
Последующая холодная прокатка до 95% обжатия и старение при 650°С	5,0	440	2200	—
Литье, гомогенизация, ковка (обжатие на 95%), закалка от 1070°С, холодная вытяжка до окончательного размера, старение при 600°С (кунифе)	5,8	600	3500	2,0
Промышленный материал (кунифе)	5,4	550	3000	1,7

Таблица 28.42

Магнитные свойства викаллоя

Марка сплава*	ТУ 14-1-803-73 Проволока			ТУ 14-1-826-74 Лист		
	H_c, *э*	B_r, *кгс*	$B_r H_c$[2*], *кгс·э*	H_c, *э*	B_r, *кгс*	$B_r H_c$[2*], *кгс·э*
52К13Ф(52КФА)	—	—	—	350	6,0	$2{,}3 \cdot 10^3$
52К12Ф(52КФБ)	350	8,5	$3 \cdot 10^3$	300	7,5	$2{,}4 \cdot 10^3$
52К11Ф(52КФВ)	300	10,0	$3 \cdot 10^3$	220	10,0	$2{,}4 \cdot 10^3$

* Содержание основных компонентов см. в табл. 28.43.

2* Допускается снижение H_c на 10% или B_r на 5% при условии сохранения постоянным произведения $B_r H_c$.

Сплавы, деформируемые в холодном состоянии. К этой группе магнитотвердых материалов относятся сплавы следующих систем: медь — никель—железо, медь— никель — кобальт, железо — марганец, легированные алюминием или титаном, а также сплавы железо — кобальт — ванадий — *викалой* (рис. 28.104, табл. 28.42, 28.43).

В системе медь — никель — железо имеется ряд сплавов, которые после термической обработки и холодной деформации могут приобрести высокие магнитные свойства (B_r = 6 *кгс* при H_c 500 *э*).

Среди сплавов этой системы лучшими свойствами обладает сплав, содержащий 60% меди, 20% никеля и 20% железа, называемый *кунифе* (рис. 28.103, табл. 28.41).

Таблица 28.43

Содержание основных компонентов (массовое содержание, %) в сплавах 52 КФ (ГОСТ 10994-74)

Марка сплава	V	Co
52К13Ф	12,6—13,5	52—54
52К12Ф	11,6—12,5	52—54
52К11Ф	10,0—11,5	52—54

Химический состав, основные технические характеристики и примерное назначение прецизионных сплавов различных марок (включая марки сплавов табл. 28.42, 28,43) содержатся в ГОСТ 10994—74.

Металлокерамические магнитотвердые материалы

Таблица 28.44

Свойства металлокерамических постоянных магнитов (ГОСТ 13596—68)*

Марка	B_r, гс (не менее)	H_c, э (не менее)	$\frac{(BH)_{макс}}{2}$, дж/м³ (не менее)	B_d^{2*}, гс	H_d^{2*}, э
ММК1	6000	300	3 000	3500	200
ММК2	4800	500	3 500	3000	300
ММК3	5200	550	4 000	3000	350
ММК4	5500	500	4 500	3000	350
ММК5	6000	550	4 700	3500	350
ММК6	6500	550	5 000	4000	300
ММК7	9500	550	10 500	6000	450
ММК8	11000	500	14 000	8000	450
ММК9	7500	1000	12 000	4500	650
ММК10	8000	1200	15 000	5300	700
ММК11	7000	1600	16 000	4000	1000

*. Изготовляются методом порошковой металлургии.
2* В точке $(BH)_{макс}$ значения в таблице факультативны.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Вонсовский С. В., Шур Я. С.** Ферромагнетизм. М. — Л., Гостехтеориздат, 1948.
2. **American** Institute of Physics Handbook. New York—Toronto — London, McGrawHill Book Co., Inc., 1963.
3. **Danan H., Herr A., Meyer A. J. P.** "J. Appl. Phys.", 1968, v. 39, N 2, pt 1, p. 669.
4. **Вонсовский С. В.** Магнетизм. М., «Наука», 1971.
5. **Tatsumoto E.** e. a. International Conference on Magnetism. Grenoble, France, September 14—19, 1970. Program and Abstracts, 1970.
6. **Бозорт Р.** Ферромагнетизм. Пер. с англ. Под ред. Е. И. Кондорского и Б. Г. Лившица. М., Изд-во иностр. лит., 1956.
7. **Lin S. T., Ogilvie R. E.** "J. Appl. Phys.", 1963, v. 34, p. 1372.
8. **Landolt-Börnstein.** Zahlenwerte und Funktionen aus Physik, Chemie, Geophysik, Technik. II Bd, 9 Teil. Springer-Verlag, Berlin-Göttingen—Heidelberg, 1962.
9. **Weiss P., Forrer R.** "Ann. Phys.", 1929, v. 12, p. 279.
10. **Potter H. H.** "Proc. Roy. Soc.", 1934, v. 146A, p. 362.
11. **Magnetismus,** Structur und Eigenschaften magnetischer Festkorper, Leipzig, 1967.
12. **Техническая** энциклопедия. Справочник физических, химических и технологических величин. Т. 4. М., «Советская энциклопедия», 1930.
13. **Белов К. П.** и др. Редкоземельные ферромагнетики и антиферромагнетики. М., «Наука», 1965.
14. **Guilland Ch.** "Compt. rend. Acad. sci.", 1946, v. 222, p. 1224.
15. **Белов К. П.** Упругие, тепловые и электрические явления в ферромагнетиках. Изд. 2-е, доп. М., Гостехтеориздат, 1957.
16. **Справочник** по электротехническим материалам. Под ред. К. А. Андрианова, Н. П. Богородицкого, Ю. В. Корицкого, В. В. Пасынкова, Б. М. Тареева. Т. II. М.—Л., Госэнергоиздат, 1960.
17. **Готман П. Е., Березин В. Б., Хайкин А. М.** Электротехнические материалы. Справочник, изд. 2-е, доп. и перераб. М., «Энергия», 1969.

ГЛАВА 29

ФЕРРИТЫ

29.1. ФЕРРИТЫ-ШПИНЕЛИ

Ферриты-шпинели имеют кристаллическую структуру типа минерала шпинели $MgAl_2O_4$ и химическую формулу $Me^{2+}Fe_2^{3+}O_4$, где Me^{2+} — ион двухвалентного металла, а ионы железа Fe^{3+} 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 $MeFe_2O_4$ могут быть полностью или частично замещены другими трехвалентными ионами, например Al^{3+} или Cr^{3+} (смешанные ферриты-алюминаты или ферриты-хромиты).

В структуре типа шпинели ионы кислорода образуют гранецентрированную кубическую решетку с ребром *a*. В промежутках между ионами кислорода находятся ионы металлов, причем эти ионы окружены четырьмя или шестью ионами кислорода. Такие окружения называются соответственно тетраэдрическими (или *A*) и октаэдрическими (или *B*) узлами. Шпинели, в которых Me^{2+} находится в тетраэдрических узлах, а ионы Fe^{3+} — в октаэдрических, называются нормальными. Если ионы Me^{2+} и половина ионов Fe^{3+} находятся в октаэдрических узлах, то шпинель называют обращенной.

Принято ионы, занимающие тетраэдрические узлы, записывать в формуле феррита перед квадратными скобками, а ионы, занимающие октаэдрические узлы — в скобках. Тогда, например, формула феррита цинка, имеющего структуру нормальной шпинели, запишется $Zn^{2+}[Fe^{3+}]O_4$, а никелевого феррита со структурой обращенной шпинели — формулой $Fe^{3+}[Ni^{2+}Fe^{3+}]O_4$. Структура шпинели изображена схематически на рис. 29.1.

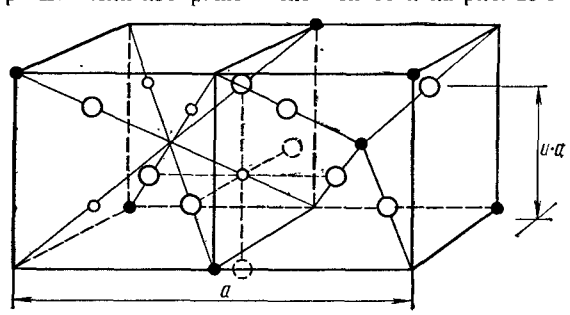


Рис. 29.1. Два октанта шпинельной структуры.
Большими светлыми кружками обозначены ионы кислорода, малыми светлыми и черными кружками — ионы металла в октаэдрических и тетраэдрических узлах соответственно [5]

Ферриты представляют собой нескомпенсированные антиферромагнетики или ферримагнетики. Согласно Неелю [1] кристаллическая решетка ферритов состоит из двух подрешеток: одна образована ионами, занимающими тетраэдрические узлы (подрешетка A), а другая — ионами, расположенными в октаэдрических узлах (подрешетка B). Между магнитными ионами подрешеток преобладает антиферромагнитное обменное взаимодействие, что приводит к антипараллельному расположению магнитных моментов подрешеток. При этом результирующую намагниченность насыщения (на 1 $см^3$ вещества) M_s можно рассматривать как разность намагниченностей подрешеток:

$$M_s = M_b - M_a. \qquad (29.1)$$

Значение величины M_s уменьшается с ростом температуры и стремится к нулю в точке Кюри T_C; при $T > T_C$ вещество становится парамагнитным. Для некоторых ферритов существует температура компенсации $T_{комп}$, при которой намагниченности подрешеток становятся равными, и результирующая намагниченность M_s обращается в нуль. В смешанных ферритах могут иметь место точки компенсации и при изменении состава.

Удобно ввести удельную намагниченность насыщения σ_s, связанную с M_s равенством $\sigma_s = M_s/\rho$, где ρ — плотность. Предел σ_s при температуре, стремящейся к 0°К, обозначим σ_s^0. Связь между σ_s^0 и числом магнетонов Бора на одну формульную единицу $MeFe_2O_4$ n_B дается выражением:

$$n_B = \frac{M}{N\mu_B}\,\sigma_s^0, \qquad (29.2)$$

где μ_B — магнетон Бора; M — молекулярная масса, соответствующая одной «молекуле», точнее, формульной единице $MeFe_2O_4$, а N — число Авогадро.

Как следствие (29.1) и (29.2) магнитный момент на молекулу p_m^0, определенный из намагниченности насыщения при 0° К,

$$p_m^0 = n_B\,\mu_B = (2n_b - n_a)\,\mu_B, \qquad (29.3)$$

где n_a и n_b — числа магнетонов Бора, приходящиеся на атомы, расположенные в A- и B-узлах соответственно. В частности, для обращенной шпинели

$$p_m^0 = \left(n_{Fe^{3+}} + n_{Me^{2+}} - n_{Fe^{3+}}\right)\mu_B = n_{Me^{2+}}\,\mu_B. \qquad (29.3а)$$

Энергию магнитного взаимодействия, зависящую от ориентации намагниченности относительно кристаллографических осей, называют *энергией магнитной кристаллографической анизотропии*. Для кубического кристалла эту энергию E_a обычно записывают в виде [2]

$$E_a = K_1\left(\alpha_1^2\alpha_2^2 + \alpha_1^2\alpha_3^2 + \alpha_2^2\alpha_3^2\right) + K_2\alpha_1^2\alpha_2^2\alpha_3^2 + \cdots, \qquad (29.4)$$

где K_1, K_2, ... — константы анизотропии, а α_1, α_2, α_3 — направляющие косинусы вектора намагниченности относительно осей, совпадающих с ребрами куба.

Благодаря явлению магнитострикции при изменении намагниченности в кристалле происходит деформация кристаллической решетки. В частном случае феррита кубической структуры относительная магнитострикционная деформация может быть представлена в виде

$$\frac{\Delta l}{l} = \lambda_s = \frac{3}{2}\,\lambda_{100}\left(\alpha_1^2\beta_1^2 + \alpha_2^2\beta_2^2 + \alpha_3^2\beta_3^2 - \frac{1}{3}\right) + 3\lambda_{111}\left(\alpha_1\alpha_2\beta_1\beta_2 + \alpha_2\alpha_3\beta_2\beta_3 + \alpha_1\alpha_3\beta_1\beta_3\right), \qquad (29.5)$$

где λ_{100} и λ_{111} — константы магнитострикции насыщения в направлениях [100] и [111] соответственно, а β_1, β_2, β_3 — направляющие косинусы оси, вдоль которой измеряется деформация.

Феррит, помещенный в постоянное магнитное поле H_0 и перпендикулярное к нему переменное СВЧ-магнитное поле, поглощает СВЧ-энергию. Это поглощение носит резонансный характер (ферромагнитный резонанс) и максимально на частоте ω_0, определенным образом связанной с полем H_0. Зависимость резонансной частоты ω_0 от H_0 имеет сложный характер и определяется магнитной кристаллографической анизотропией, анизотропией формы, упруго напряженным состоянием образца и т. п. [3]. В наиболее простом случае изотропной сферы

$$\omega_0 = \gamma H_0. \qquad (29.6)$$

Здесь γ — гиромагнитное отношение, равное

$$\gamma = g\,\frac{e}{2mc}, \qquad (29.7)$$

где e — заряд электрона; m — масса покоя электрона; c — скорость света; g — фактор спектроскопического расщепления. Для ферритов со структурой шпинели при наличии двух подрешеток значение g-фактора дается выражением [4]

$$g = \frac{M_b - M_a}{M_b/g_b - M_a/g_a}, \qquad (29.8)$$

где g_a и g_b — факторы спектроскопического расщепления для ионов в A- и B-узлах соответственно.

Интенсивность и форма резонансной кривой поглощения определяются процессами релаксации. Наличие их приводит к тому, что компоненты тензора магнитной проницаемости становятся комплексными величинами. Ширина резонансной кривой ферромагнитного резонанса ΔH обычно определяется как разность полей, при которых мнимая часть диагональной компоненты тензора проницаемости μ'' составляет половину своего значения $\mu''_{рез}$ в точке резонанса. При отсутствии внешнего магнитного поля магнитная проницаемость скалярна. Зависимости ее вещественной μ' и мнимой μ'' 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 — «естественным» ферромагнитным резонансом в эффективных полях анизотропии и размагничивающих полях.

В таблицах используется система единиц СГСМ.

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 A- и B-узлами, пористость и т. д. Поэтому во всех случаях, когда необходима более подробная информация, следует обращаться к оригинальной литературе.

Основные параметры простых ферритов

Параметр*	Fe_3O_4	Литература	$MgFe_2O_4$	Литература	$MnFe_2O_4$	Литература
Постоянная решетки a, Å	8,39	[5]	8,36	[50]	8,517	[23]
Распределение ионов металлов	$Fe[Fe^{2+}Fe]$	[6]	$Mg_{0,1}Fe_{0,9}$ $[Mg_{0,9}Fe_{1,1}]$	[50, 51]	$Mn_{0,8}Fe_{0,2}$ $[Mn_{0,2}Fe_{1,8}]$	[23]
Кислородный параметр u	0,379	[6]	0,381	[50]	0,385	[23]
Рентгеновская плотность ρ_X, $г/см^3$	5,24	[6]	4,52	[50]	5,0	[23]
Точка Кюри T_C, °C	585	[5]	440	[5]	300	[5]
Магнитный момент на молекулу p_m^0, μ_B	4,1(0°K)	[6]	1,1(25°K)	[52]	4,6(0°K)	[23]
Удельная намагниченность насыщения σ_s, $гс \cdot см^3/г$	98(0°K) 92(300°K)	[5] [5]	31(0°K) 27(300°K)	[5] [5]	112(0°K) 80(300°K)	[5] [5]
Индукция насыщения $4\pi M_S$, $гс$	6400(0°K) 6000(300°K)	[5] [5]	1800(0°K) 1500(300°K)	[5] [5]	7000(0°K) 5000(300°K)	[5] [5]
Первая константа анизотропии K_1, 10^4 $эрг/см^3$	—10,7	[7]	—3,5 —2,5	[53] [54]	—18,7(77°K) —2,8(300°K)	[24] [24]
Вторая константа анизотропии K_2, 10^4 $эрг/см^3$	—2,8	[7]	—	—	—0,3(77°K) —0,2(300°K)	[24] [24]
Константа магнитострикции λ, 10^{-6}	77,6[111] 57,1[110] —19,5[100]	[8] [8] [8]	$-6(\lambda_s)$	[17]	—1[111] —35[100] $-5(\lambda_s)$	[14] [14] [5]
Фактор спектроскопического расщепления g	2,03(123°K) 2,12(294°K)	[9] [9]	2,03—2,06 (поликр.)	[55]	2,019(77°K) 2,004(300°K)	[24] [24]
Ширина линии ферромагнитного резонанса ΔH, $э$	—	—	20	[53]	12(423°K) 13(294°K)	[25] [26]
Начальная магнитная проницаемость μ_0	70 (поликр.)	[8]	36 (поликр.)	[54]	250	[5]
Диэлектрическая проницаемость $\varepsilon = \varepsilon' - i\varepsilon''$	—	—	$\varepsilon' = 9,66^{1*}$ $\varepsilon'' = 0,17$	[42] [42]	—	—
Удельное сопротивление ρ_0, 10^6 $ом \cdot см$	$5 \cdot 10^{-9}$	[10, 43]	$\sim 1^{2*}$	[44]	$2 \cdot 10^{-3\ 3*}$	[27]

* Значения физических величин приведены, если не оговорено специально, для монокристаллов при температуре 20°C.

1* Измерено на частоте 4,55 $Гц$ в поликристаллических образцах.

2* При температуре $T = 100$°C.

3* Для состава $Mn_{1,16}Fe_{1,84}O_4$.

4* Структура медного феррита $CuFe_2O_4$ зависит от термообработки. При медленном охлаждении ниже определенной температуры трансформации $T_{тр}$ происходит переход кубической структуры в тетрагональную. Температура $T_{тр} = 760$°C, согласно [36], 415°C [56] и 390°C [57]. Однако в результате закаливания $T > T_{тр}$ кубическая структура сохраняется и при комнатной температуре.

со структурой шпинели

$CuFe_2O_4$	Литература	$CoFe_2O_4$	Литература	$NiFe_2O_4$	Литература	$Li_{0,5}Fe_{2,5}O_4$	Литература
8,37 (куб)[4]* $c = 8,70$ $a = 8,22$ (тетр.)	[34] [35]	8,38	[17]	8,337	[11, 13]	8,33	[28]
Fe[CuFe]	[36]	Fe[CoFe]	[45]	Fe[NiFe]	[12]	$Fe[Li_{0,5}Fe_{1,5}]$	[28]
0,380	[12]	0,381	[45]	—	—	0,382	[28]
5,35	[12]	5,29	[45]	5,37	[13]	4,75	[28]
455	[5]	520	[5]	585	[13]	670	[5]
2,3[4]* (куб.)(0°K) 1,3 (тетр.)(0°K)	[37] [37]	3,94(0°K)	[46]	2,3 (0°K)	[5]	2,6(0°K)	[5]
30(0°K) 25(300°K)	[5] [5]	90(0°K) 80(300°K)	[5] [5]	56(0°K) 50(300°K)	[5] [5]	69(0°K) 65(300°K)	[5] [5]
2000(0°K) 1700(300°K)	[5] [5]	6000(0°K) 5300(300°K)	[5] [5]	3800(0°K) 3400(300°K)	[5] [5]	4200(0°K) 3900(300°K)	[5] [5]
—20,6(77°K) —6,3(300°K)	[38] [38]	$4,4 \cdot 10^{2}$ [7]*(77°K) $2,9 \cdot 10^{2}$(300°K)	[15] [15]	—8,7(77°K) —6,2(300°K)	[14] [14]	—12,7(77°K) —8,4(300°K)	[29] [29]
—	—	—	—	—3	[16]	—9,7(77°K) —0,2(300°K)	[30] [30]
—15(λ_s)	[39]	120 [111][7]* —590 [100] —110 (λ_s)	[15] [15] [47]	—4[111] —36[100] —26(λ_s)	[14] [14] [17]	—8(λ_s)	[31]
2,20(77°K) 2,04(300°K)	[39] [39]	2,7(363°K) (монокр.) 2,22(373°K) (поликр.)	[48] [49]	2,198(85°K) 2,196(298°K)	[18] [18]	2,012(77°K) 2,003(300°K)	[30] [30]
350 (поликр.)	[41]	—	—	9,5 15	[19] [20]	0,8(134°K) 1,7(300°K)	[32] [32]
70	[40]	25 (поликр.)	[5]	80 (монокр.) 39 (поликр.)	[14] [21]	33 (поликр.)	[5]
$\varepsilon' = 9,24$[5]* $\varepsilon'' = 0,52$	[42] [42]	$\varepsilon' = 10$[8]*	[42]	19 (монокр.) 21 (поликр.)	[14] [14]	—	—
~1[6]*	[44]	0,5[9]*	[44]	2	[22]	$\sim 1 \cdot 10^{-4}$	[33]

[5]* Измерено на частоте 4,55 *Гц* в поликристаллических образцах.

[6]* При температуре $T = 100$°C.

[7]* Состав образца $Co_{0,8}Fe_{2,2}O_4$.

[8]* Измерено на частоте 4,55 *Гц* в поликристаллических образцах.

[9]* При температуре $T = 100$°C.

Таблица 29.2

Результаты экспериментов по дифракции нейтронов в ряде образцов феррита $Mg_xMn_{1-x}Fe_2O_4$ [11]

Обозначения: $T_{зак}$ — температура закаливания; a — постоянная решетки; u — кислородный параметр.

x	$T_{зак}$, °С	a, Å	u	Доля ионов в тетраэдрических узлах	
				Mg^{2+}	Mn^{2+}
0,25	1400	8,485	0,3850	0,12	0,89
0,25	1000	8,479	0,3848	0,09	0,78
0,5	1400	8,455	0,3839	0,18	0,92
0,5	1000	8,450	0,3836	0,14	0,82
0,75	1400	8,424	0,3834	0,24	0,90
0,75	1000	8,421	0,3831	0,21	0,98
0,9	1400	8,406	0,3831	0,25	1,00
0,9	1000	8,403	0,3821	0,21	0,90

Таблица 29.4

Зависимость намагниченности насыщения M_s и фактора спектроскопического расщепления g для поликристаллического феррита $Co_{0,7}Zn_{0,3}Fe_2O_4$ от температуры

Приведены также значения g-фактора и первой константы анизотропии K_1 для монокристалла того же состава. Точка Кюри $Tc = 340$°С. Измерения в интервале температур от — 50°С до +10°С проводились на частоте 23,6 *Гц*, а в интервале от 20 до 280°С — на частоте 9,25 *Гц* [60, 61]

T, °С	Поликристалл		Монокристалл	
	M_s, *гс*	g	g	K_1, 10^5 *эрг/см*^{3}
—50	560	—	1,90	12,03
—25	545	—	1,90	8,41
10	500	—	1,91	4,51
20	506	2,07	1,91	2,36
40	450	2,10	1,92	1,34
60	381	2,11	1,96	0,16
80	338	2,12	2,06	—0,21
120	269	2,15	2,12	—0,41
160	203	2,16	2,12	—0,34
200	134	2,17	2,17	—0,21
240	61	2,18	2,16	—0,07
280	8	2,19	2,15	—0,01

Таблица 29.3

Зависимость некоторых параметров кобальт-цинкового феррита $Co_xZn_{1-x}Fe_2O_4$ от содержания кобальта x [58, 59]

Обозначения: Tc — точка Кюри; p_m^0 — магнитный момент на молекулу; σ_s — удельная намагниченность насыщения

x	T_C, °С	p_m^0, μ_B	σ_s, *гс·см*^{3}*/г*			
			T = =285°К	T = =77°К	T = =20°К	T = 0°К
0,2	25	4,06	18,5	62,0	72,6	95,0
0,3	82	4,90	39,3	91,0	95,5	114,0
0,4	137	5,78	61,0	119,2	126,0	132,0
0,6	275	6,03	87,5	128,5	133,2	143,0
0,8	389	4,87	93,7	110,0	110,0	115,5
0,9	460	4,29	90,0	93,9	94,1	102,0
1,0	515	3,67	83,6	83,0	82,6	87,5

Таблица 29.5

Зависимость некоторых параметров никелевого феррита — алюмината $NiFe_{2-x}Al_xO_4$ от содержания алюминия x [62, 63]

Обозначения: a — постоянная решетки; T_C — точка Кюри; p_m^0 — магнитный момент на молекулу, g — фактор спектроскопического расщепления

x	a, Å	T_C, °С	p_m^0, μ_B		g
			медленное охлаждение	закалка при 1350°С	
0,00	8,3370	580	2,29	2,29	2,3
0,25	8,3062	506	1,30	1,59	2,7
0,45	8,2769	465	0,61	1,19	—
0,50	8,2705	430	0,44	0,99	6,9
0,625	8,2521	360	0—0,045	—	3,8
0,75	8,2329	294	0,38	0,58	1,5
1,00	8,1951	198	0,64	0,42	—

Таблица 29.6

Некоторые свойства смешанных ферритов $NiMn_{0,02}Fe_{2-x}Al_xO_4$ и феррита $Ni_{0,975}Co_{0,025}Mn_{0,02}Fe_{1,7}Al_{0,3}O_4$ [64]

Свойство*	Содержание алюминия x в $NiMn_{0,02}Fe_{2-x}Al_xO_4$								$Ni_{0,975}Co_{0,025}Mn_{0,02}Fe_{1,7}Al_{0,3}O_4$
	0	0,2	0,4	0,5	0,65	0,75	1,20	1,30	
Фактор спектроскопического расщепления g	2,34	2,38	2,65	2,97	4,40	—	1,38	2,47	2,35
Ширина линии ферромагнитного резонанса ΔH, э	460	480	550	660	1180	—	150	530	200
Точка Кюри T_C, °С	585	500	420	375	310	275	80	460	460
Намагниченность насыщения M_s, гс	257	174	119	83	37	20	27	157	158
Поле анизотропии H_a^{2*}, э	260	450	590	800	1500	—	125	480	<170
Резонансная частота для сферического образца[3*] $f_{рез} = 1,4\ g\ H_a$, Мгц	850	1500	2190	3320	9200	—	240	1660	<560
Максимальная резонансная частота для сферы[3*] $f_{макс} = 1,4g\ (H_a + 4\pi M_s)$, Мгц	12000	9000	7000	6500	10000	>10000	1200	7000	7000
Начальная проницаемость μ_0	28	20	10	6	2	—	3	—	—
Положение 1-го пика в спектре[4*] $\mu'' f_1$, Мгц	100	100	230	350	800	—	250	—	—
Положение 2-го пика в спектре[4*] $\mu'' f_2$, Мгц	1700	1800	2300	3000	8000	—	—	2100	—
Плотность ρ, г/см³	5,13	5,08	5,02	4,98	4,90	4,74	4,27	4,98	5,15

* При $T = 300°K$.

2* Для $K_1 < 0$, $H_a = \frac{4}{3}\frac{|K_1|}{M_s}$; для $K_1 > 0$, $H_a = 2\frac{K_1}{M_s}$.

3* При внешнем поле $H = 0$.

4* См. рис. 29.19.

Таблица 29.7

Связь между плотностью и некоторыми СВЧ-параметрами феррита $NiMn_{0,02}Fe_{1,9}O_4$ [64]

Рентгеновская плотность $\rho_X = 5{,}38$ *г/см³*, $K_1 = -5 \cdot 10^4$ *эрг/см³*, $Tc = 585°C$, $4\pi M_s = 3230$ *гс* (обозначения см. в табл. 29.6)

Плотность									
ρ, *г/см³*	ρ, $\%\rho_x$	g_e	ΔH, *э*	H_a^*, *э*	μ_0	$f_{рез}^{2*}$, *Мгц*	$f_{макс}^{3*}$, *Мгц*	f_1, *Мгц*	f_2, *Мгц*
5,13	95,4	2,34	460	260	28	850	12000	100	1700
4,96	92,3	2,36	515	260	20,5	850	12000	170	1600
4,85	90,2	2,35	550	260	17	850	—	330	—
4,59	85,3	2,39	770	260	13	850	12000	350	—
3,81	70,8	2,43	1320	260	6,5	850	12000	650	—

* $H_a = \frac{4}{3}\frac{|K_1|}{M_s}$.

2* $f_{рез} = 1{,}4\,H_a$ при внешнем поле $H = 0$.

3* $f_{макс} = 1{,}4\,g(H_a + 4\pi M_s)$ при внешнем поле $H = 0$.

Таблица 29.8

Значения фактора спектроскопического расщепления g и магнитного момента на молекулу p_m^0 для феррита $LiFe_5O_8$ и его твердых растворов с $CdFe_2O_4$ и $LiAl_5O_8$ [65]

Состав	g ($T = 300°K$)	p_m^0, μ_B
$LiFe_5O_8$	1,96	2,38
$(LiFe_5O_8)_{0,75}(CdFe_2O_4)_{0,25}$	1,97	3,44
$(LiFe_5O_8)_{0,65}(CdFe_2O_4)_{0,35}$	1,96	4,10
$(LiFe_5O_8)_{0,50}(CdFe_2O_4)_{0,50}$	1,97	4,70
$(LiFe_5O_8)_{0,25}(CdFe_2O_4)_{0,75}$	1,99	4,53
$Li(Fe_{0,9}Al_{0,1})_5O_8$	1,97	1,99
$Li(Fe_{0,8}Al_{0,2})_5O_8$	1,99	0,62
$Li(Fe_{0,7}Al_{0,3})_5O_8$	2,01	0,10
$Li(Fe_{0,6}Al_{0,4})_5O_8$	—	0,13

Таблица 29.9

Зависимость параметров литий-хромовых ферритов от содержания хрома [66]

Содержание хрома x	Распределение ионов металлов	a, Å	T_C, °C	$T_{комн}$, °C	p_m^0, μ_B
0	$Fe_{1,00}[Li_{0,50}Fe_{1,50}]O_4$	8,331	680	—	2,47÷2.60
0,50	$Fe_{1,00}[Li_{0,50}Fe_{1,00}Cr_{0,50}]O_4$	8,306	500	—	1,50÷1,62
0,75	$Fe_{0,98}Li_{0,02}[Li_{0,48}Fe_{0,77}Cr_{0,75}]O_4$	8,296	410	—	1,35
1,00	$Fe_{0,94}Li_{0,04}[Li_{0,44}Fe_{0,56}Cr_{1,00}]O_4$	8,292	315	205	0,84
1,25	$Fe_{0,91}Li_{0,09}[Li_{0,41}Fe_{0,34}Cr_{1,25}]O_4$	8,290	214	38	0,61
1,50	$Fe_{0,80}Li_{0,20}[Li_{0,30}Fe_{0,20}Cr_{1,50}]O_4$	8,287	119	—16	0,55
1,60	$Fe_{0,64}Li_{0,36}[Li_{0,14}Fe_{0,26}Cr_{1,60}]O_4$	8,288	167	11	0,42
1,70	$Fe_{0,54}Li_{0,46}[Li_{0,04}Fe_{0,26}Cr_{1,70}]O_4$	8,290	155	20	0,22
2,00	$Fe_{0,50}Li_{0,50}[Cr_{2,00}]O_4$	8,288	80±16	37±15	0,10

Таблица 29.10

Напряженность порогового поля H_0 и константа переключения S_W некоторых ферритов с прямоугольной петлей гистерезиса [67]

Обозначение: H_0 — минимальная напряженность магнитного поля, необходимая для переключения; время переключения $\tau = S_W/(H_m - H_0)$, где S_W — константа переключения; H_m — амплитуда переключающего импульса магнитного поля

Ферриты	H_0, *э*	S_W, *э·мксек*
$Mg_{0,45}Mn_{0,55}^{2+}Mn_{0,23}^{3+}Fe_{1,77}O_4$	0,9	0,9
$Cu_{0,25}Mn_{0,75}Fe_2O_4$	0,85	0,8
$Mg_{0,6}Ni_{0,4}Fe_2O_4$	3,6	2,2
$Li_{0,47}Ni_{0,06}Fe_{2,47}O_4$	2,2	1,0
$Co_{0,1}Fe_{0,9}^{2+}Fe_2O_4$	8,0	105,0
$MnFe_2O_4$	0,5	3,2

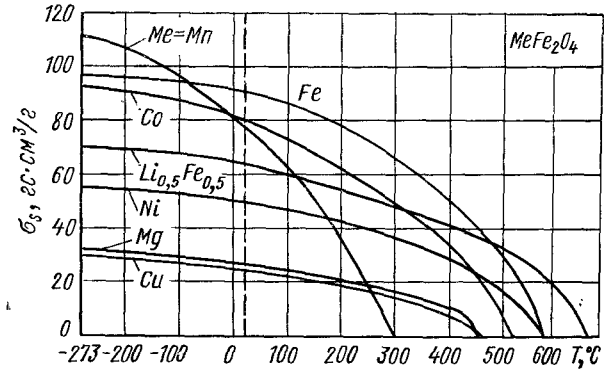


Рис. 29.2. Зависимость удельной намагниченности насыщения σ_s для некоторых простых ферритов-шпинелей от температуры [5]

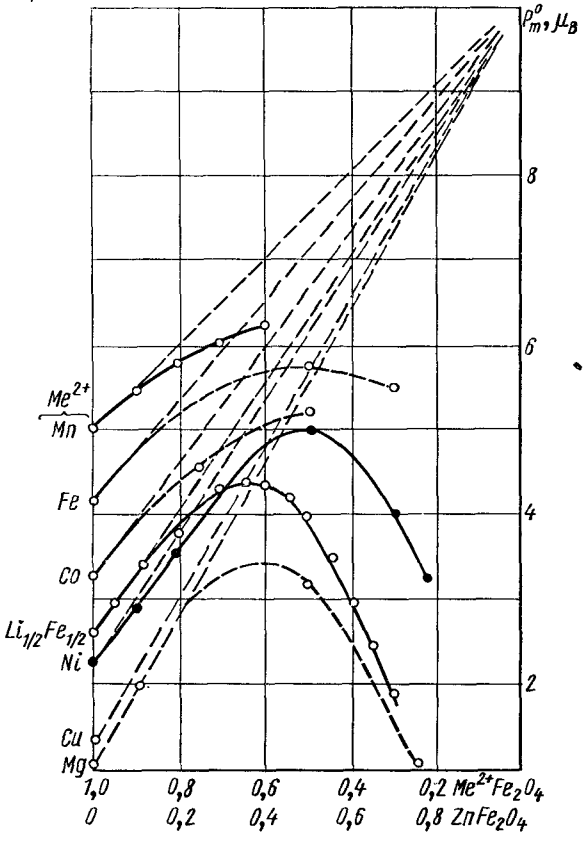


Рис. 29.3. Магнитные моменты насыщения p_m^0 при 0°К некоторых смешанных ферритов, полученных замещением магнитных ионов двухвалентного металла Me^{2+} немагнитными ионами цинка (Me^{2+} — один из ионов Mn, Fe, Co, Ni, Cu, Mg или $Li_{0,5}Fe_{0,5}$) [37]

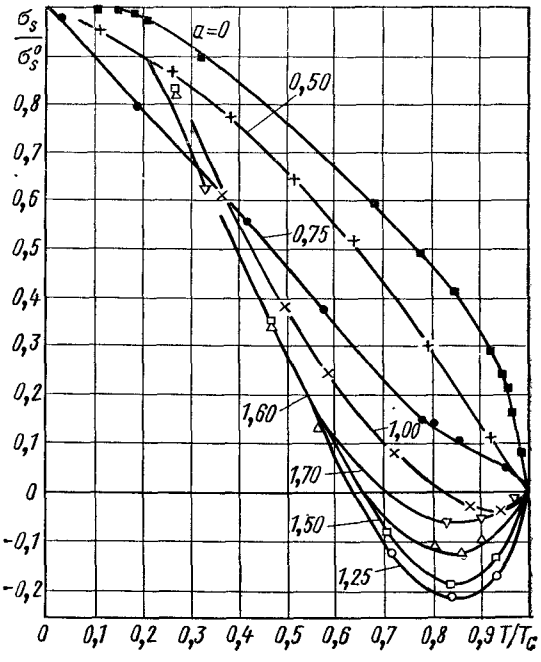


Рис. 29.4. Зависимость относительной намагниченности насыщения σ_s/σ_s^0 от приведенной температуры T/T_C для литиевых ферритов-хромитов $Li_{0,5}Fe_{2,5-a}Cr_aO_4$ [68]

29.2. ФЕРРИТЫ СО СТРУКТУРОЙ ГРАНАТА

Кристаллографическая структура. Ферримагнитные окислы типа граната кристаллизуются в структуре, изоморфной классическому минералу гранату $\{Ca_3\}[Fe_2](Si_3)O_{12}$. Структура граната описывается кубической пространственной группой $Ia3d$ — O_h^{10}. Описание структуры граната можно найти, например, в работах [81—84]. В табл. 29.11 показано окружение ионов в гроссуляре, имеющем формулу $Ca_3Al_2(SiO_4)_3$. Кубическая элементарная ячейка граната содержит восемь формульных единиц. Шестнадцать ионов Al^{3+} занимают октаэдрические узлы, обозначаемые 16*a*, двадцать четыре иона Si^{4+} занимают узлы в центрах тетраэдров, обозначаемые 24*d* и двадцать четыре иона Ca^{2+} находятся в окружении из восьми ионов кислорода и их позиции обозначаются 24*c*.

Интерес к структуре граната значительно возрос после синтеза ферримагнитных гранатов типа $M_3Fe_5O_{12}$, где M — ион редкоземельного металла или иттрия.

Магнитные свойства и намагниченность насыщения. Магнитные свойства ферритов-гранатов $M_3Fe_5O_{12}$, в которых додекаэдрическая подрешетка занята трехвалентными ионами иттрия или редкоземельных элементов,

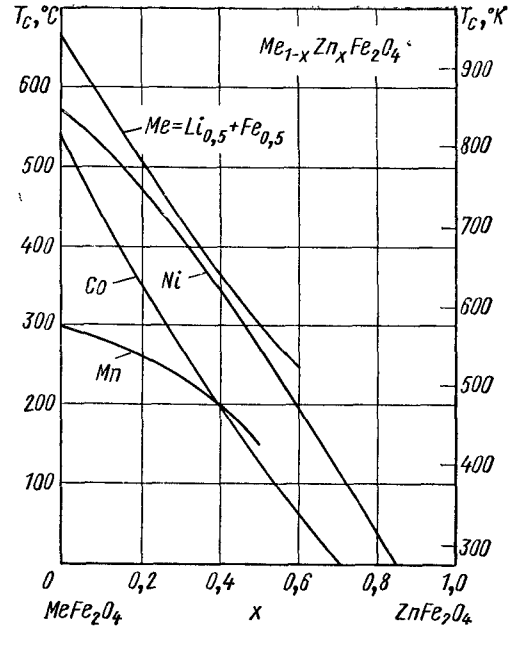


Рис. 29.5. Зависимость точки Кюри T_C некоторых смешанных ферритов типа $Me_{1-x}Zn_xFe_2O_4$ от концентрации цинка [5]

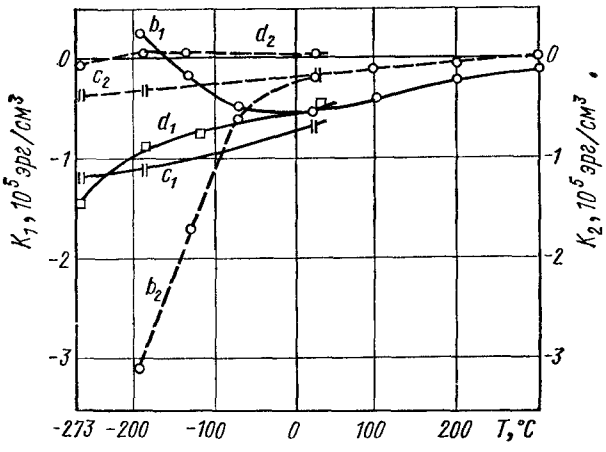


Рис. 29.6. Зависимости первой K_1 (сплошная линия) и второй K_2 (пунктир) констант анизотропии от температуры для следующих ферритов [16]:

$NiFe_2O_4$ — кривые b_1 и b_2; $Ni_{0,95}\ Fe^{2+}_{0,05}\ Fe_2O_4$ — кривые c_1 и c_2; $Ni_{0,75}\ Fe^{2+}_{0,25}\ Fe_2O_4$ — кривые d_1 и d_2

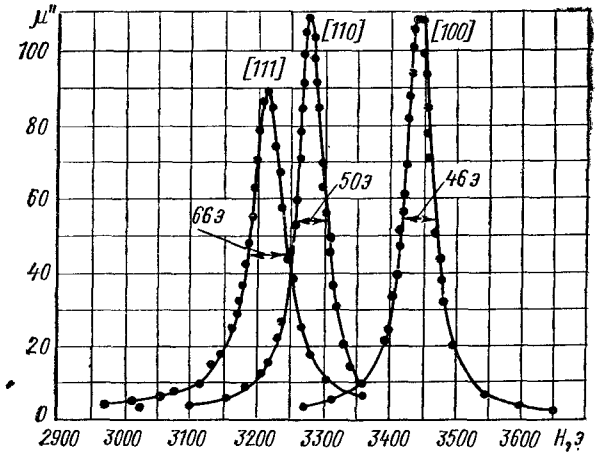


Рис. 29.8. Кривые ферромагнитного резонанса для монокристалла $Mn_{0,89}Fe_{1,86}O_4$ [24]. Образец имел форму сферы диаметром $\sim 0{,}25$ *мм*. Кривые сняты при комнатной температуре на частоте 9300 *Мгц* и соответствуют трем главным кристаллографическим направлениям, по которым направлено постоянное магнитное поле

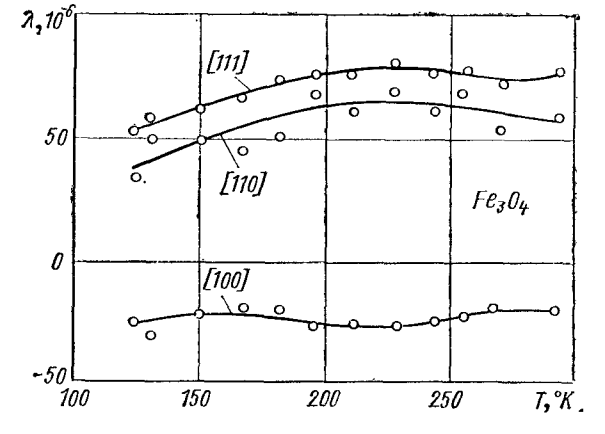


Рис. 29.7. Зависимость констант магнитострикции λ_{100}, λ_{111} и λ_{110} искусственного монокристалла магнетита от температуры [8]

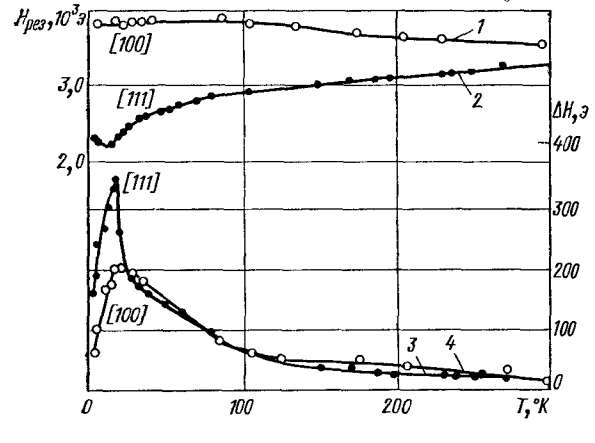


Рис. 29.9. Зависимости резонансного поля $H_{рез}$ (кривые *1*, *2*) и ширины кривой ферромагнитного резонанса ΔH (*3*, *4*) для сферы из монокристалла феррита $Mn_{1,03}Fe_{1,95}O_4$ ($\lambda = 3{,}2$ *см*) от температуры [69]. Наличие максимумов при $T = 20°$ К на кривых ΔH (T), по-видимому, обусловлено ионами Mn^{3+} или ионами Mn еще более высокой валентности

были поняты на основе коллинеарной модели Нееля о подрешеточном строении ферримагнитных соединений [85]. В гранатах, в отличие от ферритов со структурой шпинели, были введены в рассмотрение три магнитные подрешетки. Наиболее сильное антиферромагнитное взаимодействие, определяющее точку Кюри T_C, осуществляется между ионами трехвалентного железа в октаэдрической 16*a*- и тетраэдрической 24*d*-подрешетках. Подрешетка редкоземельных ионов 24*c*-наиболее сильно связана отрицательным обменным взаимодействием с тетраэдрической подрешеткой (в гранатах с легкими редкоземельными ионами от Pr до Sm с октаэдрической подрешеткой), причем эта связь примерно в 10 раз слабее, чем (*a*—*d*)-взаимодействие. Намагниченность насыщения M_s в случае тяжелых редкоземельных гранатов может быть записана следующим образом через намагниченности отдельных подрешеток:

$$M_s = M_{24d} - M_{16a} - M_{24c}.$$

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 линий ферромагнитного резонанса $\Delta H \simeq 0{,}2$ э были получены в иттриевом феррите-гранате, свободном от примесей редкоземельных ионов.

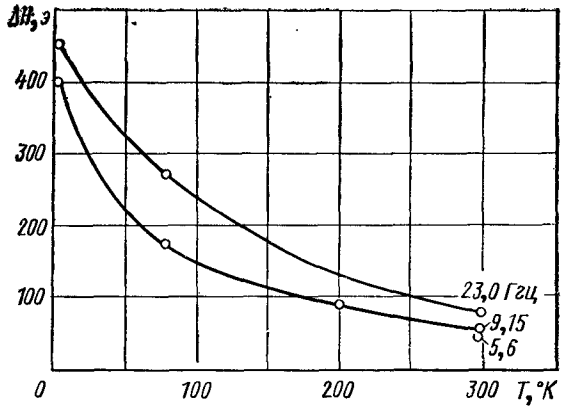


Рис. 29.10. Зависимость ширины резонансной кривой ΔH для марганец-цинкового феррита, содержащего небольшое (неизвестное) количество цинка от температуры [70]

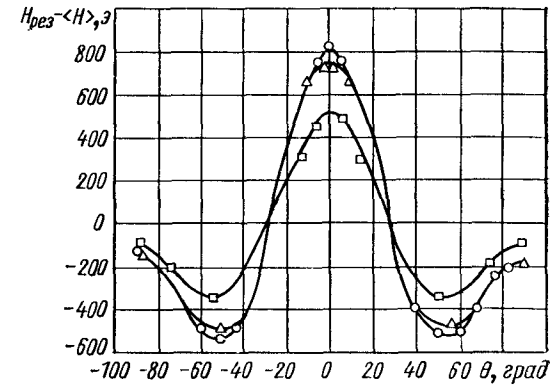


Рис. 29.11. Зависимость резонансного поля $H_{рез}$—$\langle H \rangle$ от угла θ между направлением M и осью [100] в плоскости (110) для монокристалла феррита $(NiO)_{0,95}(FeO)_{0,05}Fe_2O_3$ [18]:

$\langle H \rangle$ — усредненное значение $H_{рез}$ в интервале 0 — 180°; ○ — 4,2° К; △ — 85°К; □ — 300°К

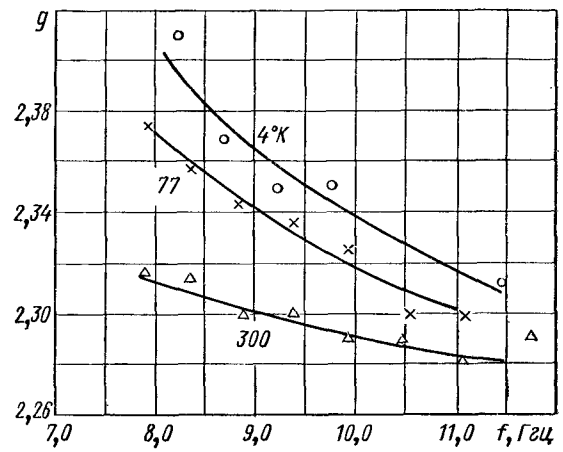


Рис. 29.12. Зависимость фактора спектроскопического расщепления g от частоты для монокристалла $(NiO)_{0,95}(FeO)_{0,05}Fe_2O_3$ [71]

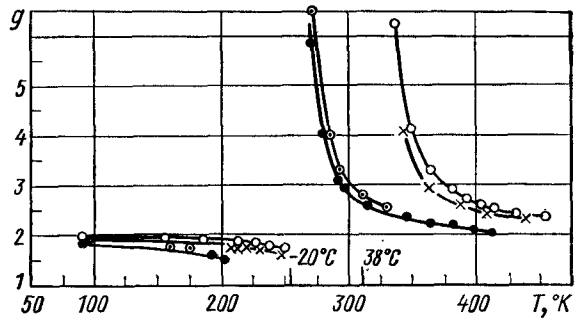


Рис. 29.13. Зависимость g-фактора литиевых ферритов-хромитов от температуры [72]:

$Li_{0,5}Fe_{1,0}Cr_{1,5}O_4$: ⊙ — 9500 *Мгц*; ● — 24000 *Мгц*;
$Li_{0,5}Fe_{1,25}Cr_{1,25}O_4$: ○—9500 *Мгц*; ×—24000 *Мгц*. Точки компенсации $T_{комп}$ лежат около — 20°С и + 38°С

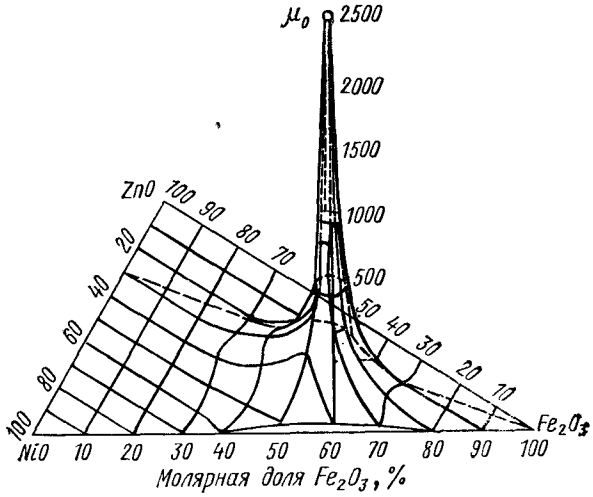


Рис. 29.14. Зависимость начальной магнитной проницаемости μ_0 ферритов в системе NiO — ZnO — Fe_2O_3 от их состава [73]

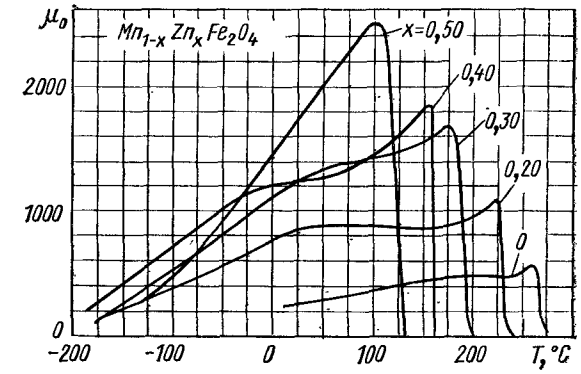


Рис. 29.15. Зависимость начальной магнитной проницаемости μ_0 смешанных марганец-цинковых ферритов от температуры [5]

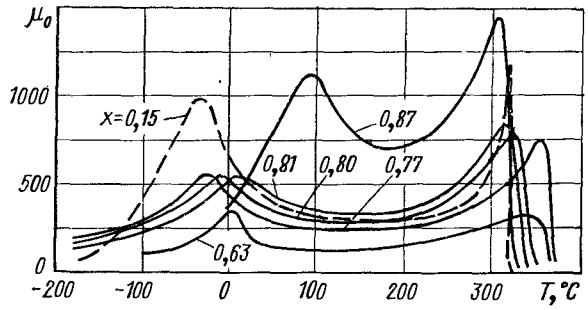


Рис. 29.16. Зависимость начальной магнитной проницаемости μ_0 от температуры для ферритов $Mn_{1-x}Fe_x^{2+}\ Fe_2O_4$ [74]

Сплошные кривые относятся к поликристаллическим образцам — пунктир — к монокристаллу. У некоторых марганец-железистых ферритов температурная зависимость μ_0 имеет два максимума: один около точки Кюри, другой — при более низких температурах (около 0°С). Наличие последнего обусловлено, вероятно, эффектом дезаккомодации

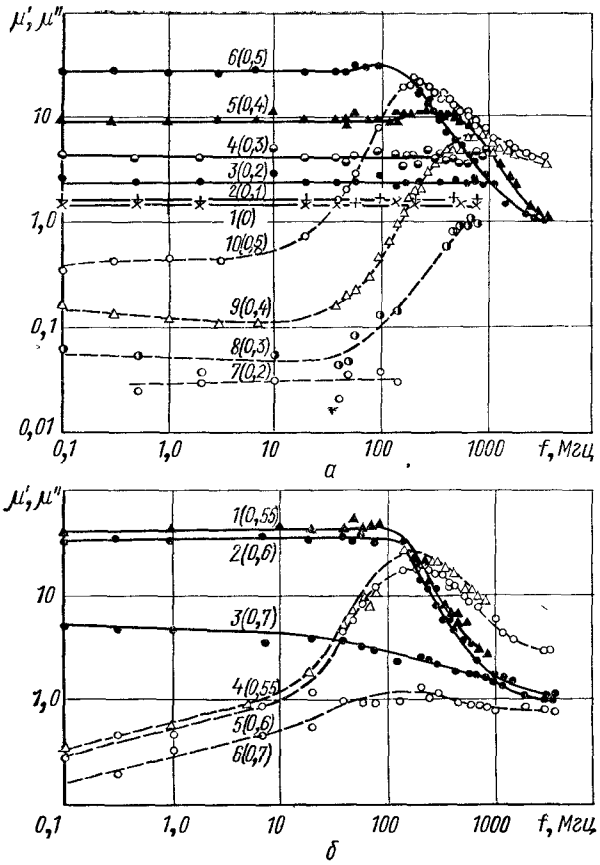


Рис. 29.17. Магнитные спектры кобальт-цинкового феррита $Co_{1-x}Zn_x\ Fe_2O_4$ [75]:

а — $0 \leqslant x \leqslant 0{,}5$. Кривые *1* — *6* — $\mu'(f)$; *7* — *10* — μ'' (f); *б* — $x > 0{,}5$. Кривые *1—3* — $\mu'(f)$; (*4—6*) — $\mu''(f)$. В скобках приведены значения *x* для каждой кривой

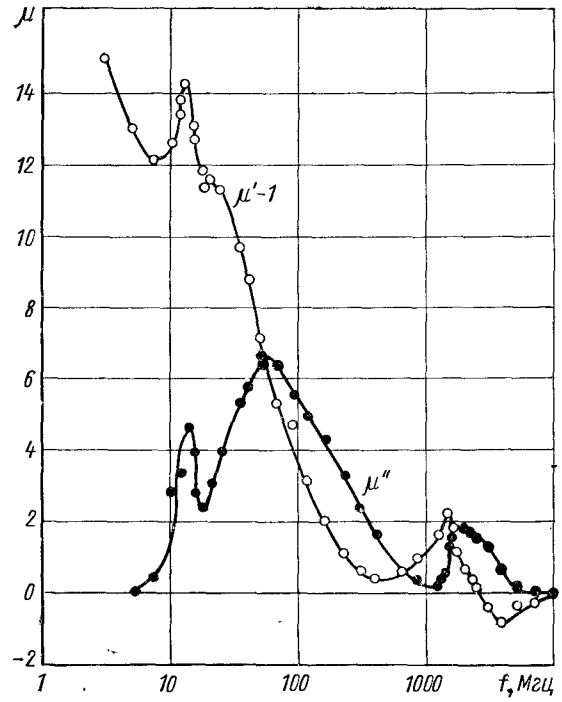


Рис. 29.18. Зависимость вещественной μ' и мнимой μ'' частей начальной магнитной проницаемости от частоты для поликристаллического феррита $(MgO)_{0,81}(FeO)_{0,19}Fe_2O_3$ при комнатной температуре [54] ($\rho = 3{,}68$ *г/см*^{3}; σ_s (26° С) = 26,4 *гс·см*^{3}*/г*)

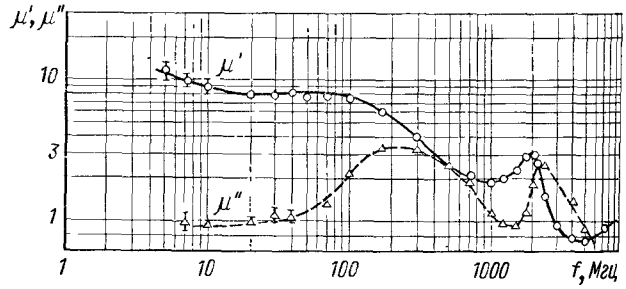


Рис. 29.19. Зависимость вещественной μ' и мнимой μ'' частей начальной магнитной проницаемости для поликристаллического феррита-алюмината $NiMn_{0,02}\ Al_{0,4}\ Fe_{1,6}\ O_4$ при комнатной температуре от частоты [64]

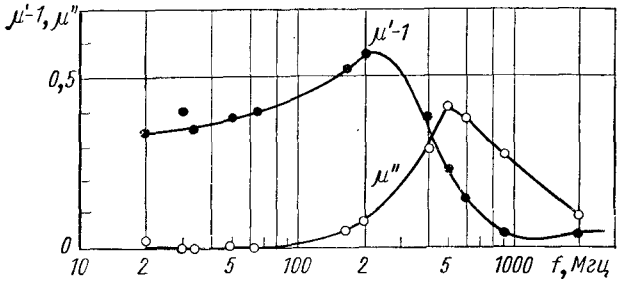


Рис. 29.20. Магнитный спектр поликристаллического литиевого феррита-хромита $Li_{0,5}Fe_{1,0}Cr_{1,5}O_4$ [5] ($\sigma_s = 2{,}2$ гс·см³/г; $\rho = 4{,}0$ г/см³)

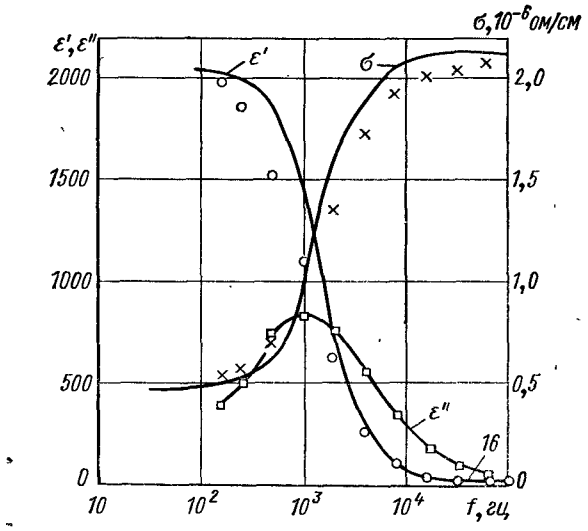


Рис. 29.22. Зависимость комплексной диэлектрической проницаемости $\varepsilon = \varepsilon' - i\varepsilon''$ и удельной проводимости σ феррита $Ni_{0,4}Zn_{0,6}Fe_2O_4$ от частоты [77]

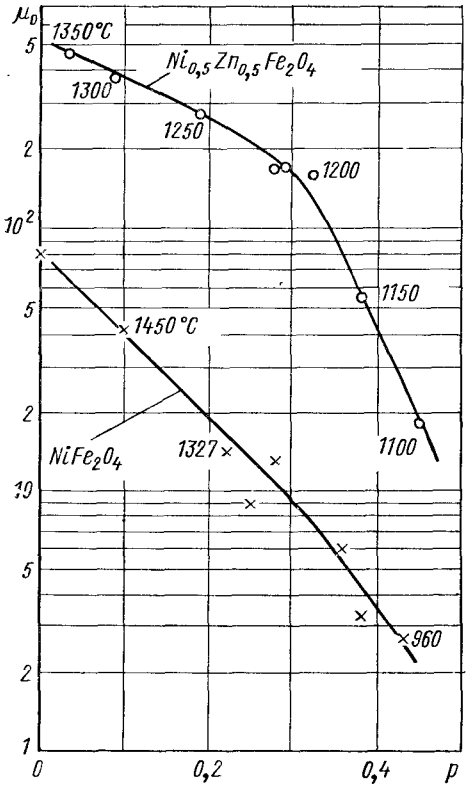


Рис. 29.21. Зависимость начальной проницаемости μ_0 от пористости p для поликристаллических образцов никелевого [79] и никель-цинкового [5] ферритов. Для $p = 0$ приведены результаты измерений на монокристалле никелевого феррита [76]. Пористость изменялась в результате изменения температуры спекания; последняя указана для каждого образца

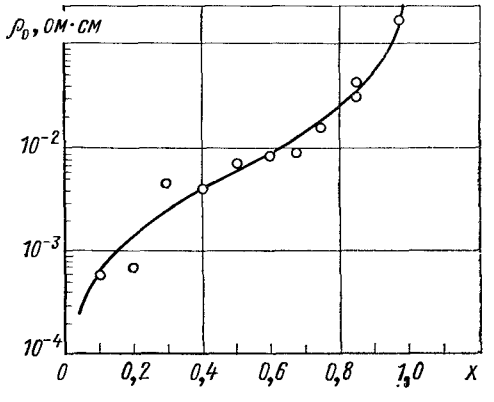


Рис. 29.23. Зависимость удельного сопротивления ρ_0 от состава ферритов типа $Mn_xFe_{3-x}O_4$ [78]:

○ — экспериментальные значения ρ; сплошная линия — $\rho = 6 \cdot 10^{-3}\,[x/(1-x)]$

Для теоретической интерпретации результатов по ферромагнитному резонансу и анизотропии редкоземельных ферритов-гранатов необходим одновременный учет расщепления уровней ионов за счет 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. Магнитострикционная деформация кристалла зависит от направления вектора намагниченности по отношению к кристаллографическим осям [90]. Обозначая направляющие косинусы вектора намагниченности α_i, можно представить относительное изменение длины $\delta l/l$ в кубическом кристалле в направлении, задаваемом косинусами β_i, в виде (29.5).

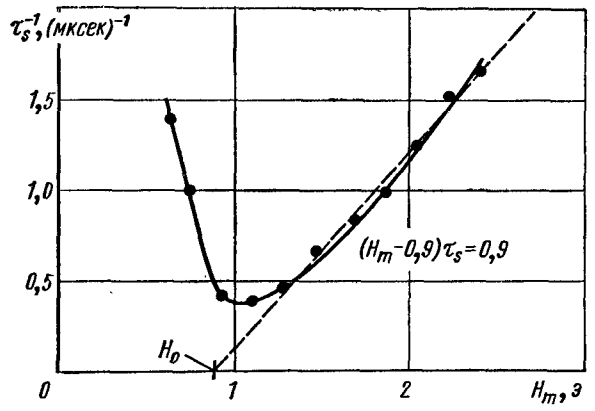


Рис. 29.24. Зависимость обратного времени переключения τ_s^{-1} от амплитуды перемагничивающего импульса H_m для феррита $Mg_{0,45}Mn^{2+}_{0,55}Mn^{3+}_{0,23}Fe_{1,77}O_4$ [67]. Напряженность порогового поля $H_0 = 0{,}9$ э. Константа переключения $s_W = 0{,}9$ э·мксек

Магнитострикция редкоземельных ферритов-гранатов линейно связана с концентрацией редкоземельных ионов и сильно возрастает при понижении температуры. Рекордные значения $\lambda_{111} = 2420 \cdot 10^{-6}$ и $\lambda_{100} = 1200 \cdot 10^{-6}$ в поле $H = 25$ кэ при 4,2° К были получены в тербневом феррите-гранате [91], что сравнимо по порядку величины с магнитострикцией редкоземельных металлов.

Упругие свойства и магнитоупругое взаимодействие. Магнитоакустические эффекты в гранатах возникают в результате взаимодействия между спинами магнитных ионов и упругими колебаниями кристаллической решетки, т. е. в результате тех же взаимодействий, которые определяют магнитострикционные эффекты. Выражение для упругой и магнитоупругой энергии можно записать в виде [93]:

$$E_y + E_{my} = \frac{1}{2} C_{11}\left(e_{xx}^2 + e_{yy}^2 + e_{zz}^2\right) + \frac{1}{4} C_{44}\left(e_{xy}^2 + e_{yz}^2 + e_{zx}^2\right) + C_{12}\left(e_{xx}e_{yy} + e_{yy}e_{zz} + e_{zz}e_{xx}\right) + B_1\left(\alpha_x^2 e_{xx} + \alpha_y^2 e_{yy} + \alpha_z^2 e_{zz}\right) + B_2\left(\alpha_x\alpha_y e_{xy} + \alpha_y\alpha_z e_{yz} + \alpha_z\alpha_x e_{zx}\right),$$

где $C_{11} = c_{1111}$, $C_{12} = c_{1122}$, $C_{44} = c_{2323}$ — упругие константы, $B_1 = b_{1111}$, $B_2 = b_{2323}$ — магнитоупругие константы.

Условия для упругой и магнитоупругой изотропии следующие:

$$C_{11} - C_{12} = 2C_{44}; \quad B_1 = B_2.$$

Первое условие выполняется в иттриевом феррите-гранате с погрешностью до 5%. Значения констант, определяющих упругие и магнитоупругие свойства, приведены на с. 581

Оптические и магнитооптические свойства. Ферриты-гранаты обладают сравнительно высокой прозрачностью в ряде участков ближнего и далекого инфракрасного спектра [94]. Так, в иттриевом феррите-гранате имеются окна прозрачности при длинах волн $1 < \lambda < 0{,}1$ мм и $1 < \lambda < 10$ мкм, между двумя этими областями наблюдается сильное решеточное поглощение. В редкоземельных ферритах-гранатах в первой области прозрачности могут наблюдаться поглощение при ферромагнитном резонансе (при большом поле анизотропии), обменном резонансе редкоземельной подрешетки в поле железных подрешеток, а также электронные переходы между уровнями основного мультиплета редкоземельных ионов [96]. 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 [97, 98]. Ферриты-гранаты в видимой и ближней инфракрасных областях спектра обнаруживают значительный эффект Фарадея [98, 99] при распространении света вдоль вектора намагниченности и примерно такой же по величине эффект Коттона — Мутона (магнитное линейное двупреломление) при распространении света перпендикулярно вектору намагниченности [100, 101].

Кристаллографические и другие характеристики

Таблица 29.11

Кристаллографические позиции в структуре граната [102]

Кристаллографические характеристики	Типичная идеальная формула			
	$\{Ca_3\}$	$[Al_2]$	(Si_3)	O_{12}
Точечная симметрия	222	$\bar{3}$	$\bar{4}$	$\bar{1}$
Позиция пространственной группы	24 *c*	16 *a*	24 *d*	96
Кислородная координация	8	6	4	—
Вид кислородного окружения	Додекаэдр (искаженный куб)	Октаэдр	Тетраэдр	—

Таблица 29.12

Распределение катионов по подрешеткам в структуре граната [102]

(в скобках указан ионный радиус, Å [103])

Период	Октаэдрическая подрешетка (16 *a*)	Тетраэдрическая подрешетка (24 *d*)	Додекаэдрическая подрешетка (24 *c*)
1*A*	—	$Li^+(0{,}68)$	Na^+ (0,98)
1*B*	—	—	Cu^{2+} (0,80)

Периоды	Октаэдрическая подрешетка (16 *a*)	Тетраэдрическая подрешетка (24 *d*)	Додекаэдрическая подрешетка (24 *c*)
IIA	Mg^{2+} (0,74)	—	Mg^{2+}, Ca^{2+} (1,04), Sr^{2+}(1,20), Ba^{2+} (1,38)
IIB	Zn^{2+} (0,83)	—	Zn^{2+}?, Cd^{2+}(0,99)
IIIA	Al^{3+}(0,57), Ga^{3+}(0,62), In^{3+}(0,92)	Al^{3+}, Ga^{3+}	—
IIIB	Sc^{3+} (0,83)	—	Y^{3+} (0,97) и все ионы редкоземельных элементов, кроме Ce^{3+}
IVA	Si^{4+}(0,39), Ge^{4+}(0,44), Sn^{4+}(0,67)	Si^{4+}, Ge^{4+}, Sn^{4+}?	—
IVB	Ti^{4+}(0,64), Zr^{4+}(0,82), Hf^{4+}(0,82)	Ti^{4+}	—
V A	Sb^{5+}(0,62)	P^{5+} (0,35), As^{5+}(0,47)	Bi^{3+} (1,20)
VB	Nb^{5+}(0,66), Ta^{5+}(0,66)	V^{5+}(0,40)	
VIB	Cr^{3+}(0,64)	—	Cr^{2+} (0,83)
VIIB	Mn^{2+} (0,91)	—	Mn^{2+}
VIII	Fe^{3+}(0,67), Co^{2+}(0,78), Ni^{2+}(0,74), Ru^{4+}(0,62)	Fe^{3+}, Ru^{4+}	Fe^{2+}(0,80)

Таблица 29.13

Расстояния между ионами в иттрий-железистом гранате (ИЖГ) $Y_3Fe_5O_{12}$ [104]

Числа в скобках указывают количество связей

Ион	Расстояние между ионами, Å
Y^{3+}(24 *c*)	(4) Fe^{3+} (16 *a*) 3,46 (6) Fe^{3+} (24 *d*):3,09 (2); 3,79 (4) (8) O^{2-}:2,37 (4); 2,43 (4)
Fe^{3+} (16 *a*)	(2) Y^{3+} (24 *c*) 3.46 (6) Fe^{3+} (24 *d*) 3,46 (6) O^{2-} 2,0
Fe^{3+} (24 *d*)	(6) Y^{3+} (24 *c*):3,09(2); 3,79 (4) (4) Fe^{3+} (16 *a*) 3,46 (4) Fe^{3+} (24 *d*) 3,79 (4) O^{2-} 1,88
O^{2-}	(2) Y^{3+} (24 *c*) 2,37; 2,43 (1) Fe^{3+} (16 *a*) 2,00 (1) Fe^{3+} (24 *d*) 1,88 (9) O^{2-}:2,68(2); 2,81; 2,87; 2,96; 2,99 (2); 3,16 (2).

Таблица 29.14

Углы связи катион—анион—катион в ИЖГ [104]

Связь	Угол связи, *град*	Связь	Угол связи, *град*
Fe(*a*)—O—Fe(*d*)	126,6	Fe(*a*)—O—Fe(*a*)	147,2
Fe(*a*)—O—Y(*c*)	102,8	Fe(*d*)—O—Fe(*d*)	86,6
Fe(*a*)—O—Y(*c*)	104,7	Fe(*d*)—O—Fe(*d*)	78,8
Fe(*d*)—O—Y(*c*)	122,2	Fe(*d*)—O—Fe(*d*)	74,7
Fe(*d*)—O—Y(*c*)	92,2	Fe(*d*)—O—Fe(*d*)	74,6
Y(*c*)—O—Y(*c*)	104,7		

Таблица 29.15

Диэлектрические свойства ИЖГ

Параметр	Значение	*f*, *Гц*	Примечание	Литература
ε′	12	0,02	Обжиг при 1350—1450°C в атмосфере O_2	[105]
	10	3,00—9,24	Обжиг при 1380°C	[106]
ε″	0,0015	9,24	Обжиг при 1380°C Концентрация Mn 1—2%	[106]
	0,008	9,24	Обжиг при 1200°C Концентрация Cu 2%	[106]
tg δ	0,002	3,00—9,24	Обжиг при 1380°C	[106]
	0,002	10	Обжиг при 1400°C	[107]
	0,003	0,02	Обжиг при 1300—1500 °C в O_2	[108]

Электронные конфигурации, основные термы, валентности и ионные радиусы редкоземельных элементов, скандия и иттрия

Элемент	Электронная конфигурация атома	Возможные валентности	Электронная конфигурация трехвалентного иона	Основной терм трехвалентного иона	Радиус трехвалентного иона*	
					[109]	[103]
La	$5d^16s^2$	3	$5p^6$	$^1S_0$	—	1,04
Ce	$4f^15d^16s^2$	3 (4)	$4f^1$ (Ce^{3+})	$^2F_{5/2}$	—	1,02
Pr	$4f^36s^2$	3 (4)	$4f^2$ (Pr^{3+})	$^3H_4$	—	1,00
Nd	$4f^46s^2$	3	$4f^3$	$^4I_{9/2}$	1,18	0,99
Pm	$4f^56s^2$	—	$4f^4$	$^5I_4$	—	0,98
Sm	$4f^66s^2$	2 (3)	$4f^5$ (Sm^{3+})	$^6H_{5/2}$	1,136	0,97
Eu	$4f^76s^2$	2 (3)	$4f^6$ (Eu^{3+})	$^7F_0$	1,133	0,97
Gd	$4f^75d^16s^2$	3	$4f^7$	$^8S_{7/2}$	1,11	0,94
Tb	$4f^85d^16s^2$	3 (4)	$4f^8$ (Tb^{3+})	$^7F_6$	1,09	0,89
Dy	$4f^{10}6s^2$	3	$4f^9$	$^6H_{15/2}$	1,07	0,88
Ho	$4f^{11}6s^2$	3	$4f^{10}$	$^5I_8$	1,05	0,86
Er	$4f^{12}6s^2$	3	$4f^{11}$	$^4I_{15/2}$	1,033	0,85
Tm	$4f^{13}6s^2$	3	$4f^{12}$	$^3H_6$	1,02	0,85
Yb	$4f^{14}6s^2$	2 (3)	$4f^{13}$ (Yb^{3+})	$^2F_{7/2}$	1,00	0,81
Lu	$4f^{14}5d^16s^2$	3	$4f^{14}$	$^1S_0$	0,99	0,80
Sc	$3d^14s^2$	3	$3p^6$	$^1S_0$	—	0,83
Y	$4d^15s^2$	3	$4p^6$	$^1S_0$	1,05	0,97

* Рассчитано по отношению к кислороду, радиус которого принят равным 1,36 Å.

Таблица 29.17

Магнитные свойства ИЖГ и редкоземельных ферритов-гранатов

Соединение	T_C, °K	$T_{комп}$, °K	Намагниченность насыщения				Литература
			n_B, μ_B		$4\pi M_S$, гс		
			0°K	300°K	0°K	300°K	
$Y_3Fe_5O_{12}$	545; 560	—	5,0	3,7	2470	1800	[113—115]
$La_{0,4}Y_{2,6}Fe_5O_{12}$	—	—	5,0	—	2400	—	[115]
$PrY_2Fe_5O_{12}$	—	—	6,0	—	2900	1900	[115]
$Nd_{1,5}Y_{1,5}Fe_5O_{12}$	—	—	7,0	—	3050	—	[112]
$Sm_3Fe_5O_{12}$	578	—	5,43	3,7	2600	1770	[114, 115]
$Eu_3Fe_5O_{12}$	566	—	2,78	2,45	1320	1160	[114, 115]
$Gd_3Fe_5O_{12}$	564	286	16,0	—	7250	—	[114, 115]
$Tb_3Fe_5O_{12}$	568	246	18,2	0,7	8800	340	[111, 114]
$Dy_3Fe_5O_{12}$	563	226	16,9	0,9	8200	440	[111, 114]
$Ho_3Fe_5O_{12}$	567	137	15,2	1,5	7400	740	[111, 114]
$Er_3Fe_5O_{12}$	556	83	10,2	2,0	—	1300	[111, 114]
$Tm_3Fe_5O_{12}$	549	—	1,2	2,8	—	—	[111, 114]
$Yb_3Fe_5O_{12}$	548	0	0	3,2	—	1640	[111, 114]
$Lu_3Fe_5O_{12}$	549	—	5,02	3,6	2500	1800	[111, 114]

Таблица 29.18

Константы анизотропии ИЖГ и редкоземельных ферритов-гранатов

Соединение	Константы анизотропии, 10^3 эрг/см^3		Литература
	$-K_1$	$-K_2$	
$Y_3Fe_5O_{12}$	6,2 (300°K); 24,5 (0°K)	—	[116, 117]
$Sm_3Fe_5O_{12}$	19,8 (300°K)	—	[117, 118]
$Eu_3Fe_5O_{12}$	3 (300°K)	—	[119,
$Gd_3Fe_5O_{12}$	250 (0°K)	—	[117]
$Tb_{0,0057}Y_{2,9943}Fe_5O_{12}$	—88 (20°K)	460 (20°K)	[120]
$Tb_3Fe_5O_{12}$	760 (80°K)	7600 (80°K)	[118]
$Dy_3Fe_5O_{12}$	970 (80°K)	—214	[118]
$Ho_3Fe_5O_{12}$	800 (80°K)	270	[118]
$Er_3Fe_5O_{12}$	7 (300°K); 22 (100°K)	—	[117, 118]
$Tm_3Fe_5O_{12}$	11 (300°K); 210 (77°K)	100 (77°K)	[121]
$Yb_3Fe_5O_{12}$	4 (300°K); 170 (77°K)	—	[117]
	6 (300°K); 40 (77°K)		[118]

Таблица 29.19

Параметры элементарной ячейки и плотность ИЖГ и редкоземельных ферритов-гранатов

Гранат	Параметр ячейки, Å	ρ, $г/см^3$	Литература
$Y_3Fe_5O_{12}$	12,376	5,17	[110]
$La_{0,4}Y_{2,6}Fe_5O_{12}$	12,428	5,24	[111]
$PrY_2Fe_5O_{12}$	12,466	5,42	[111]
$Nd_{1,5}Y_{1,5}Fe_5O_{12}$	12,488	5,60	[112]
$Sm_3Fe_5O_{12}$	12,529	6,23	[110]
$Eu_3Fe_5O_{12}$	12,498	6,31	[110]
$Gd_3Fe_5O_{12}$	12,471	6,46	[110]
$Tb_3Fe_5O_{12}$	12,436	6,55	[110]
$Dy_3Fe_5O_{12}$	12,405	6,61	[110]
$Ho_3Fe_5O_{12}$	12,375	6,77	[110]
$Er_3Fe_5O_{12}$	12,347	6,87	[110]
$Tm_3Fe_5O_{12}$	12,323	6,94	[110]
$Yb_3Fe_5O_{12}$	12,302	7,06	[110]
$Lu_3Fe_5O_{12}$	12,283	7,14	[110]

Таблица 29.22

Постоянная элементарной ячейки и плотность редкоземельных галлатов [125] и алюминатов [109] со структурой граната

Соединение	a, Å	ρ, $г/см^3$
$Y_3Ga_5O_{12}$	12,30	5,73
$Pr_3Ga_5O_{12}$	12,57	6,40
$Nd_3Ga_5O_{12}$	12,50	6,57
$Sm_3Ga_5O_{12}$	12,42	6,58
$Gd_3Ga_5O_{12}$	12,39	7,02
$Dy_3Ga_5O_{12}$	12,32	7,25
$Er_3Ga_5O_{12}$	12,25	7,49
$Y_3Al_5O_{12}$	12,02	4,50
$Gd_3Al_5O_{12}$	12,11	5,95
$Dy_3Al_5O_{12}$	12,06	6,15
$Er_3Al_5O_{12}$	11,98	6,37

Таблица 29.20

Расчетные значения момента насыщения (M_0) ионов редкоземельных элементов в структуре граната и соответствующие расчетные $M_{расч}$ и измеренные $M_{эксп}$ в поле 200 *кэ* значения момента на молекулу $5\ Fe_2O_3 \times 3M_2O_3$ [122]

Момент насыщения	Редкоземельный ион					
	Gd	Tb	Dy	Ho	Er	Yb
M_0, μ_B	6,8±0,2	7,92±0,25	6,8±0,2	6,8±0,2	5,1±0,1	1,7±0,04
$M_{расч}$, μ_B	30,8±1,2	37,52±1,5	30,8±1,2	30,8±1,2	20,6±0,6	0,2±0,24
$M_{эксп}$, μ_B	30,3±0,3	31,4±0,3	32,5±0,3	27,5±0,3	23,1±0,3	0±0,3

Таблица 29.21

Ширина линии ферромагнитного резонанса ΔH, *э*, в некоторых редкоземельных ферритах со структурой граната [123]

T, °K	$Sm_3Fe_5O_{12}$		$Gd_3Fe_5O_{12}$		$Er_3Fe_5O_{12}$		$Yb_3Fe_5O_{12}$	
	[100]	[111]	[100]	[111]	[100]	[111]	[100]	[111]
393	—	—	—	—	—	—	198	242
298	2400	2400	—	—	874	1180	203	304
195	3500	5000	96,5	206	1980	4400	261	1400
77	Не наблюдается	—	125	170	Не наблюдается	Не наблюдается	1000	5000

Таблица 29.23

Магнитные свойства гранатов $(5-x)\ Fe_2O_3 \cdot x Me_2O_3 \times \times 3Y_2O_3$ [126, 127]
Me: Ga^{3+}, Al^{3+}, Sc^{3+}, In^{3+} и Cr^{3+}

$x\ Me_2O_3$	$n_{B\text{набл}}$, μ_B	$T_{C\text{набл}}$, °K	$T_{C\text{расч}}$, °K	$f_{\text{тетр}}$
0	9,92	545	545	0
$^1/_4\ Ga_2O_3$	7,95	519	524	0,91
$^3/_4\ Ga_2O_3$	4,35	460	477	0,88
$^1/_3\ Al_2O_3$	7,00	497	518	0,95
$1\ Al_2O_3$	3,25	415	451	0,84
$^1/_4 Sc_2O_3$	11,97	500	504	0,11
$^3/_4 Sc_2O_3$	14,4	365	427	0,21
$^1/_2 In_2O_3$	13,8	444	462	0,11
$^1/_4\ Cr_2O_3$	10,95	515	—	0,00

Таблица 29.24

Положение низкотемпературного максимума ширины линии ферромагнитного резонанса в $Y_3Fe_5O_{12}$ с примесью ионов редкоземельных элементов [124]

Ион	$T_{\Delta H\text{макс}}$, °K			Частота, *Гц*
	[100]	[110]	[111]	
Pr	37	40	42	9,2
Nd	28	50	43	9,2
Pm	—	—	—	—
Sm	42	—	—	23
Eu	—	—	—	—
Gd	—	—	—	—
Tb	90	90	90	20,8
Dy	50	55	52	20,8
Ho	—	—	65	9,2
Er	60	—	—	23,8
Tm	61	—	—	9,2
Yb	90	145	145	20,8

Таблица 29.25

Зависимость намагниченности насыщения и точки Кюри феррита-граната $Gd_3Fe_{5-x}Al_xO_{12}$ от содержания Al [128]

x	n_B, (0°K), μ_B	T_C, °K	x	n_B, (0°K), μ_B	T_C, °K
0,50	17,7	500	2,50	18,2	175
1,00	19,2	430	3,00	16,4	88
1,50	20,1	345	3,50	14,9	30
2,00	19,3	253			

Таблица 29.26

Зависимость намагниченности насыщения, температуры компенсации и точки Кюри феррита-граната $Gd_3[Fe_{2-x}Sc_x]Fe_3O_{12}$ от содержания Sc [128]

x	n_B (0°K), μ_B	$T_{\text{комп}}$, °K	T_C, °K	x	n_B, (0°K), μ_B	$T_{\text{комп}}$, °K	T_C, °K
0,00	16,0	286	546	1,00	11,2	137	300
0,25	14,9	223	223	1,25	8,6	127	216
0,50	13,7	182	182	1,50	6,0	Нет	30
0,75	12,6	157	—				

Таблица 29.27

Зависимость точки Кюри и низкочастотной относительной начальной проницаемости при различных температурах от содержания Sc в гранате $Y_3Sc_xFe_{2-x}Fe_3O_{12}$ [129]

x	T_C, °K	μ_0		
		300°K	195°K	77°K
0,0	560	112	73	48,5
0,4	485	345	184	142
0,6	425	604	290	197
0,7	400	814	372	230
0,8	375	1080	494	272
0,9	340	1934	700	360
1,0	320	1	1114	491
1,5	200	1	1	1

Таблица 29.28

Постоянная решетки a и намагниченность насыщения n_B некоторых гранатов, содержащих ионы Si^{4+}, Ge^{4+} и Sn^{4+} [130]

Состав граната	a, Å	n_B, μ_B (0°K)
$(^1/_3)Ca_3Fe_2Si_3O_{12} - (^2/_3)Y_3Fe_2Fe_3O_{12}$	12,290	0,5
$(^1/_3)Ca_3Fe_2Ge_3O_{12} - (^2/_3)Y_3Fe_2Fe_3O_{12}$	12,370	1,5
$(^1/_3)Ca_3Fe_2Sn_3O_{12} - (^2/_3)Y_3Fe_2Fe_3O_{12}$	12,502	5,2
$(^1/_3)Ca_3Fe_2Si_3O_{12} - (^2/_3)\ Gd_3Fe_2Fe_3O_{12}$	12,36	13,5
$(^1/_5)Ca_3Al_2Si_3O_{12} - (^4/_5)Y_3Fe_2Fe_3O_{12}$	12,35	1,4
$(^1/_5)Ca_3Al_2Si_3O_{12} - (^4/_5)Gd_3Fe_2Fe_3O_{12}$	12,402	14,2
$Ca_3Fe_2Ge_3O_{12}$	12,312	—
$Mn_3Fe_2Ge_3O_{12}$	12,087	—
$Mn_3Fe_2Si_3O_{12}$	11,87	—
$Gd_3Co_2GaGe_2O_{12}$	12,446	—
$Gd_3Ni_2GaGe_2O_{12}$	12,401	—

Таблица 29.29

Магнитные свойства гранатов типа $xCa_3Fe_2Sn_3O_{12} - (1-x)Y_3Fe_2Fe_3O_{12}$ [131]

x	a, Å	n_B, μ_B при 0°K	T_C, °K	x	a, Å	n_B, μ_B при 0°K	T_C, °K
0	12,376	5,0	545	5/12	12,530	2,9	220
1/12	12,407	6,25	498	1/2	12,558	1,2	—
1/6	12,440	7,1	400	2/3	12,620	0,25	—
1/3	12,502	5,2	260	1,0	12,728	—	—

Таблица 29.30

Магнитные свойства феррита-граната $\{Y_{3-x}Ca_x\}[Zr_xFe_{2-x}](Fe_3)O_{12}$ [132]

x	a, Å	n_B набл*, μ_B	n_B расч, μ_B	T_C расч, °K	T_C набл, °K
0	12,376	5,0	5,0	545	545
0,2	12,404	5,9	5,94	—	510
0,4	12,434	6,7	6,59	—	469
0,6	12,463	7,2	6,75	400	421
0,8	12,501	6,8	6,31	—	366
0,9	12,516	—	—	—	—
1,0	12,535	5,3	5,31	—	306
1,2	12,572	3,4	3,87	180	241
1,3	12,583	—	—	—	—
1,4	12,594	2,0	2,22	—	173
1,6	12,630	1,2	0,71	—	105
2,0	12,684	1,7	0,00	—	—

* n_B набл получено при экстраполяции $T \to 0$°K, $H \to \infty$.

Таблица 29.31

Свойства гранатов с титаном и рутением [133, 134]

Соединение	x	a	n_B, μ_B	
			T=0°K	T=300°K
$Y_{3-x}Ca_xTi_xFe_{5-x}O_{12}$	0,20	12,382	—	—
	0,40	12,390	5,64	—
	0,65	12,398	5,89	3,1
$Y_{3-x}Ca_xRu_xFe_{5-x}O_{12}$	0,20	12,383	5,24	—

Таблица 29.32

Магнитные свойства гранатов $\{Bi_xY_{3-x}\}Fe_5O_{12}$ [135]

x	T_C, °K	n_B (1,4°K), μ_B	n_B (300°K), μ_B
0,25	—	4,97	3,67
0,75	—	5,04	3,75
1,00	591	5,02	3,78

Таблица 29.33

Параметр элементарной ячейки и магнитные свойства ферритов-гранатов, содержащих V^{5+}, Sb^{5+}

Феррит-гранат	x	a, Å	T_C, °K	n_B (0°K), μ_B
$\{Y_{3-2x}Ca_x\}[Fe_2](Fe_{3-x}V_x)O_{12}$ [136]	0,00	12,376	557	5,00
	0,40	12 400	563	—
	0,80	12,422	548	1,00
	1,25	12,449	523	—1,23
	1,50	12,465	493	—2,30
$\{Y_{3-2x}Ca_x\}[Fe_{2-x}Sb_x](Fe_3)O_{12}$ [137]	0,50	12,446	—	7,25
	0,60	12,460	—	7,52
	0,70	12,473	—	7,10
	1,00	12,514	—	4,25
	1,50	12,580	—	0,4
$\{Ca_3\}[Sb_xFe_{2-x}](Fe_{1,5-x}V_{1,5+x})O_{12}$ [128]	0,00	12,465	—	—2,30
	0,30	12,487	—	0,51
	0,50	12,502	—	1,65
	0,75	12,523	—	2,5
	1,50	12,580	—	0,4

Таблица 29.34

Константы магнитострикции λ_{100} и λ_{111} ферритов-гранатов [138]

Феррит-гранат	λ_{100}, 10^{-6}			λ_{111}, 10^{-6}		
	78°K	196°K	297° K	78°K	196°K	297°K
$Y_3Fe_5O_{12}$	—1,0	—1,1	—1,4	—3,6	—3,9	—2,4
$Sm_3Fe_5O_{12}$	159	49	21	—183	—28,1	—8,5
$Eu_3Fe_5O_{12}$	86	51	21	9,7	5,3	1,8
$Gd_3Fe_5O_{12}$	4,0	1,7	0	—5,1	—4,5	—3,1
$Tb_3Fe_5O_{12}$	67	—10,3	—3,3	560	65	12
$Dy_3Fe_5O_{12}$	—169	—46,6	—12,5	—145	—21,6	—5,9
$Ho_3Fe_5O_{12}$	—82,2	—10,6	—3,4	—56,3	—7,4	—4,0
$Er_3Fe_5O_{12}$	10,7	4,1	2,0	—19,4	—8,8	—4,9
$Tm_3Fe_5O_{12}$	25	4,9	1,4	—31,2	—11,3	—5,2
$Yb_3Fe_5O_{12}$	18,3	5,0	1,4	—14,4	—7,1	—4,5

Упругие [139] и магнитоупругие [140] константы ИЖГ при комнатной температуре: $C_{11} = 23{,}9 \cdot 10^{11}$ *дин/см²*; $C_{12} = 10{,}77 \cdot 10^{11}$ *дин/см²*; $C_{44} = 7{,}64 \cdot 10^{11}$ *дин/см²*; $b_1 = 3{,}48 \cdot 10^6$ *эрг/см³*; $b_2 = 6{,}96 \cdot 10^6$ *эрг/см³*.

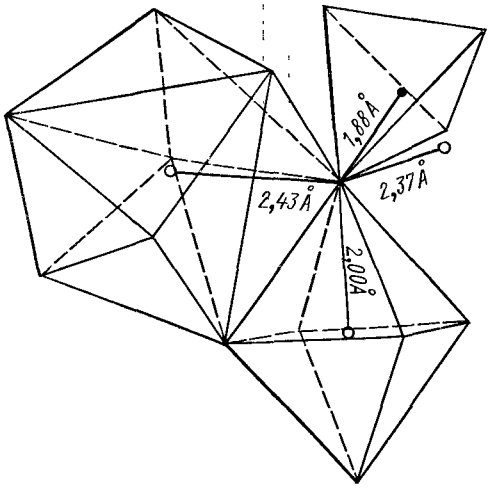


Рис. 29.25. Схема структуры иттриевого феррита-граната [127]. Показаны расстояния металлических ионов каждого типа от общего для всех ближайшего иона кислорода

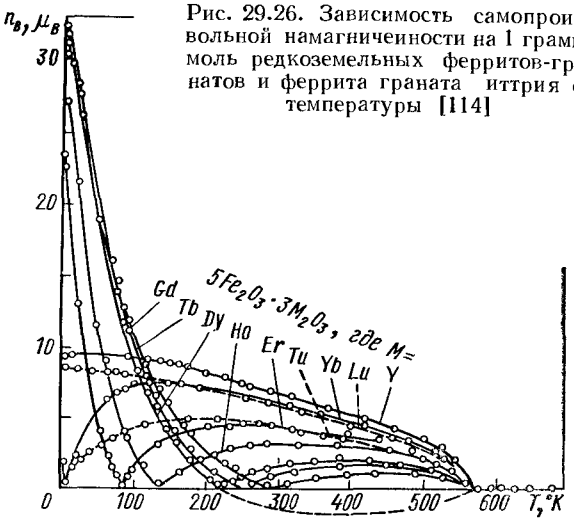


Рис. 29.26. Зависимость самопроизвольной намагниченности на 1 граммоль редкоземельных ферритов-гранатов и феррита граната иттрия от температуры [114]

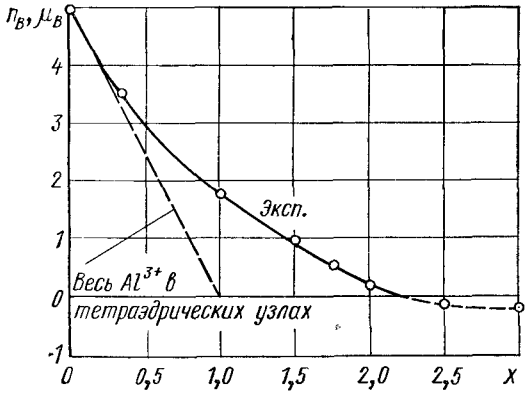


Рис. 29.27. Зависимость спонтанного момента от состава для граната $Y_3Fe_{5-x}Al_xO_{12}$. Намагниченность для граната $Y_3Fe_{5-x}Ga_x\ O_{12}$ почти совпадает с кривой для $Y_3Fe_{5-x}Al_xO_{12}$ вплоть до значения $x = 1{,}6$, до которого было проведено измерение [153] (см. также рис. 29.28)

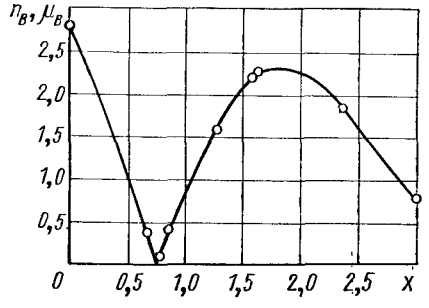


Рис. 29.28. Намагниченность насыщения на формульную единицу граната $Eu_3Fe_{5-x}Ga_xO_{12}$. Намагниченность измерялась на свободной сфере из монокристалла и экстраполирована к $H = 0$ [141]

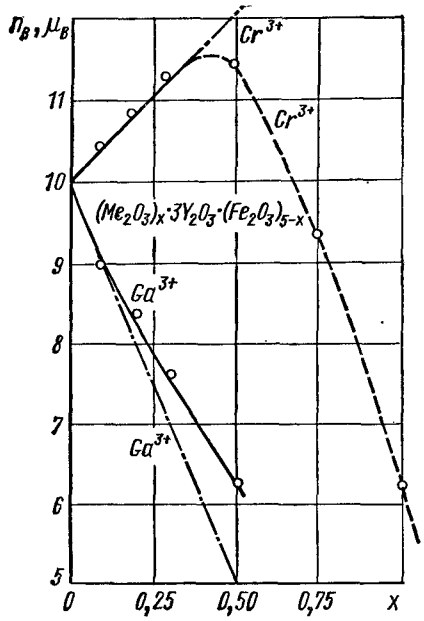


Рис. 29.29. Зависимость намагниченности насыщения n_B (0° K) на молекулу в феррите-гранате иттрия от содержания x ионов Ga^{3+} и Cr^{3+} [127] (— · — · — теория)

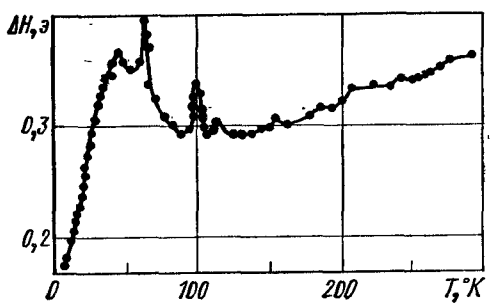
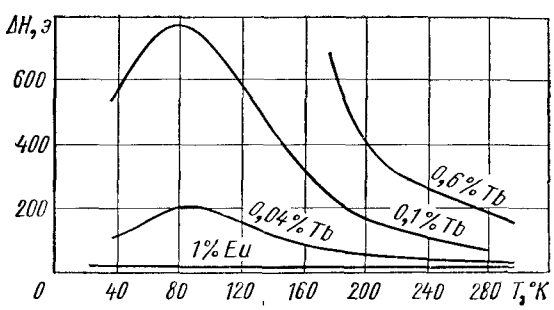


Рис. 29.30. Зависимость ширины резонансной кривой от температуры монокристалла иттриевого граната, выращенного из специальной окиси иттрия, содержащей менее 10^{-4}% остаточных примесей редкоземельных элементов [142]



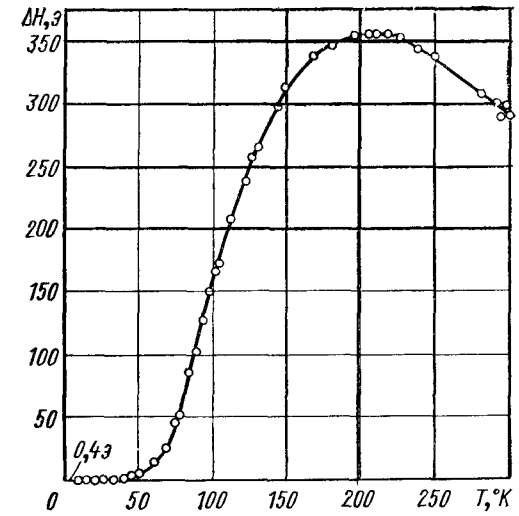


Рис. 29.31. Зависимость ширины резонансной кривой от температуры монокристалла европиевого феррита-граната $Eu_3Fe_5O_{12}$ [143]

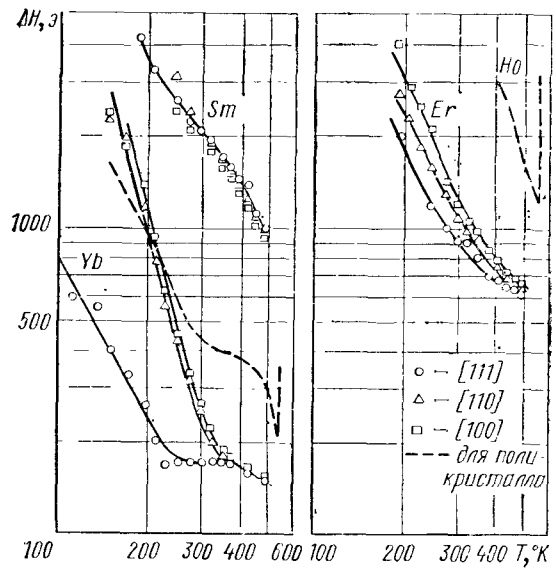


Рис. 29.32. Зависимость ширины резонансной кривой для ферритов-гранатов самария, иттербия, эрбия и гольмия от температуры [123]

Рис. 29.33. Зависимость ширины резонансной кривой от температуры для монокристалла иттриевого граната с примесью тербия и европия [144]

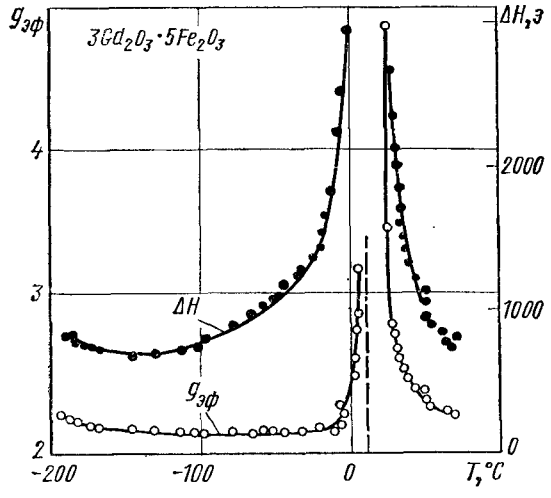


Рис. 29.34. Зависимости эффективного значения g-фактора и ширины резонансной кривой для случая ферромагнитного резонанса в гадолиниевом гранате вблизи $T_{комп}$ от температуры [145]. Данные получены на поликристаллическом сферическом образце при частоте 9479 *Мгц*

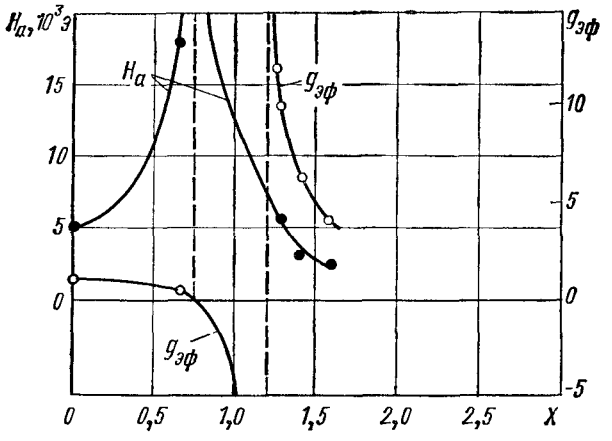


Рис. 29.36. Значения эффективного g-фактора и поля анизотропии H_a при 4,2° К вдоль направления [111] ($H_a \cong 4K_1/3M_s$) в зависимости от содержания галлия в гранате $Eu_3Fe_{5-x}Ga_xO_{12}$ [141]

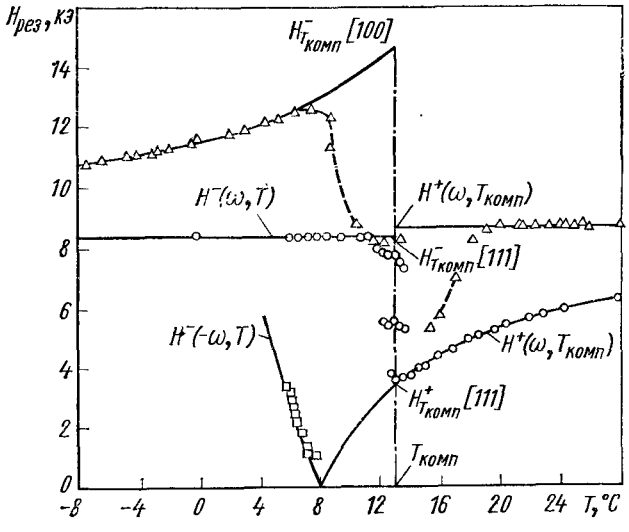


Рис. 29.35. Экспериментальные зависимости резонансного поля для случая обменного резонанса в гадолиниевом гранате вблизи точки магнитной компенсации $T_{комп}$ от температуры [146].

Самая нижняя кривая соответствует случаю, когда магнитное поле направлено вдоль легкой оси. Данные получены на монокристаллических сферических образцах при частоте $24 \cdot 10^3$ *Мгц*. Ориентация: ○ — вдоль [111]; △ — вдоль [100]; □ — противоположно [111]; — — — — область нестабильности для спинов, не направленных по [100]

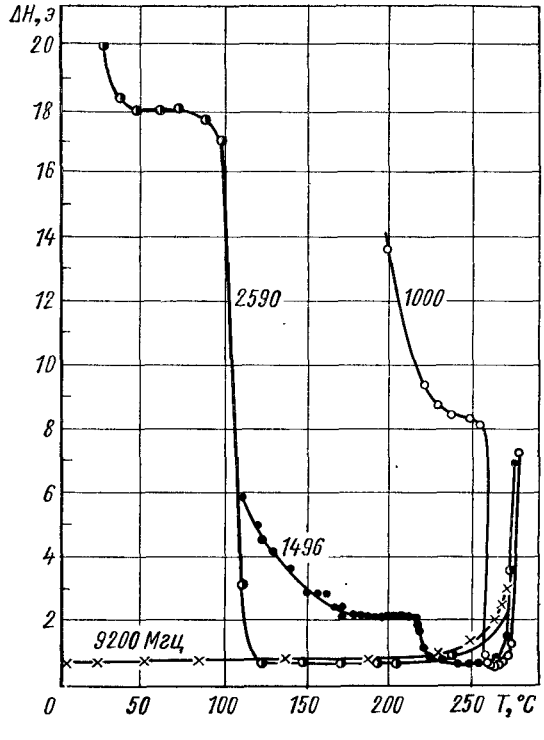


Рис. 29.37. Зависимость ширины линии ферромагнитного резонанса монокристалла иттриевого граната при различных частотах от температуры [154]

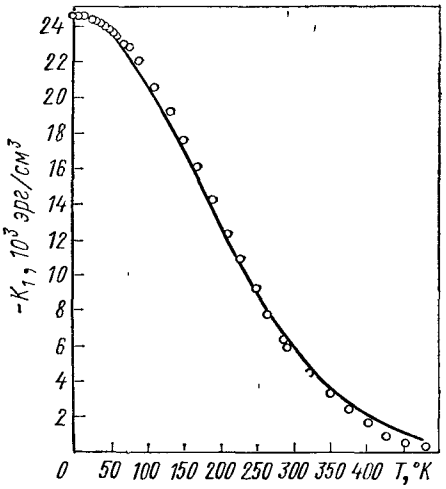


Рис. 29.38. Зависимость первой константы анизотропии K_1 иттриевого феррита-граната от температуры [123]:

○ — экспериментальные данные; ——— — расчет по модели кристаллического поля

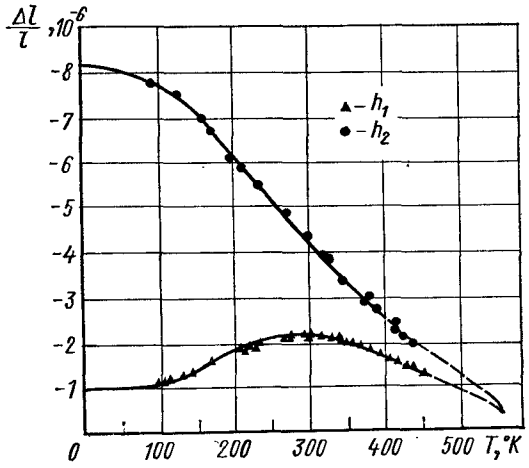
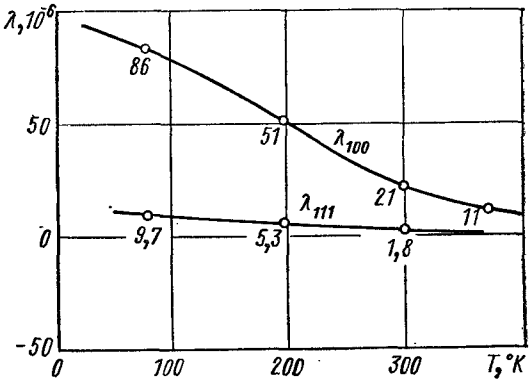


Рис. 29.39. Зависимость констант магнитострикции для иттриевого феррита-граната от температуры [148]



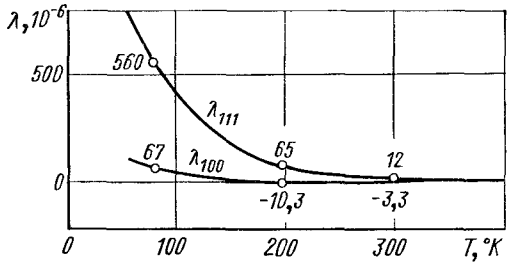


Рис. 29.41. Зависимость констант магнитострикции феррита-граната тербия $Tb_3Fe_5O_{12}$ от температуры [138]

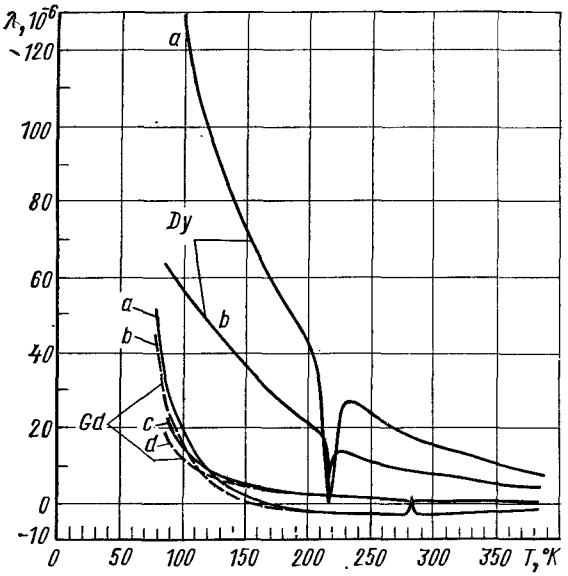


Рис. 29.42. Температурная зависимость магнитострикции ферритов-гранатов $Gd_3Fe_5O_{12}$ и $Dy_3Fe_5O_{12}$ [149]:

Dy: a — λ_{100}; $H = 7{,}6$ *кэ*; b — λ_{111}, $H = 8{,}1$ *кэ*; Gd: a — λ_{100}, $H = 9{,}2$ *кэ*; b — λ_{100}, $H = 5{,}2$ *кэ*; c — λ_{111}, $H = 9{,}2$ *кэ*; d — λ_{111}, $H = 7{,}6$ *кэ*

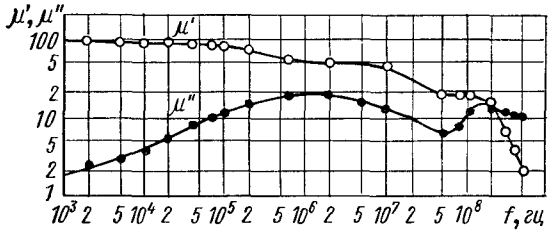


Рис. 29.43. Действительная μ′ и мнимая μ″ части начальной магнитной проницаемости при 20° С образца $Y_3Fe_5O_{12}$ как функция частоты f ($\rho = 4{,}9$ *г/см*^{3}) [150]

Рис. 29.40. Зависимость констант магнитострикции для феррита-граната европия $Eu_3Fe_5O_{12}$ от температуры [138]

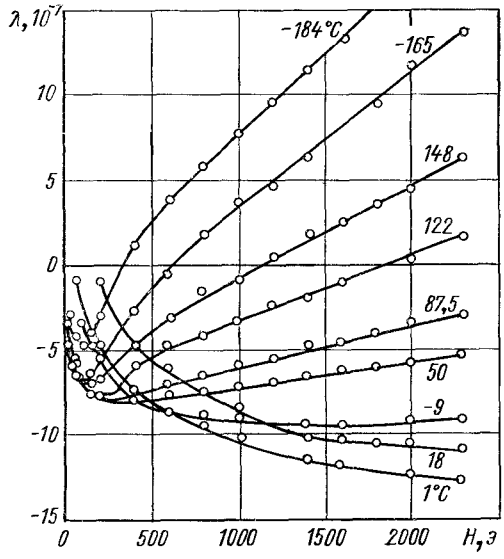


Рис. 29.44. Изотермы магнитострикции для феррита-граната $3Gd_2O_3 \cdot 5Fe_2O_3$ [116]

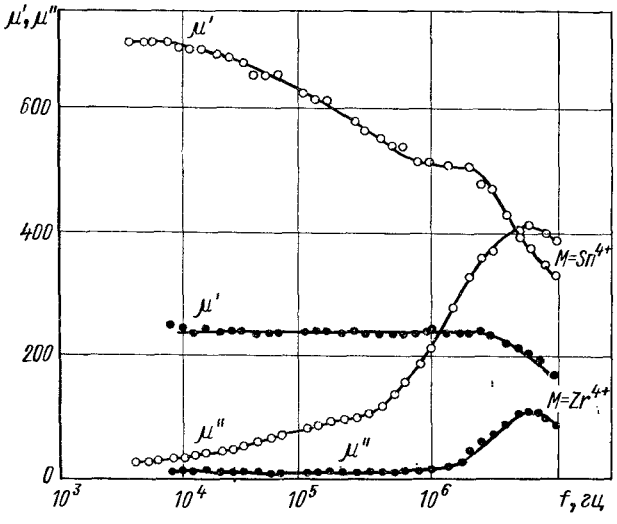


Рис. 29.45. Зависимости μ' и μ'' твердых растворов $\{Y_{2,2}Ca_{0,8}\}[Fe_{1,2}M_{0,8}](Fe_3)O_{12}$ от частоты при 20°С [151]

29.3. ГЕКСАГОНАЛЬНЫЕ ФЕРРИТЫ

Большая группа ферримагнитных окислов обладает гексагональной кристаллической структурой [153—156, 159]. На рис. 29.48 приведена диаграмма, на которой указаны химические составы таких веществ. В углах расположены соединения BaO, MeO и Fe_2O_3. Символ Me означает двухвалентный ион первой переходной группы или ионы Zn^{2+} и Mg^{2+}, а также комбинацию этих ионов (например, Li^+ и Fe^{3+}). На линии диаграммы, соединяющей BaO и Fe_2O_3, отмечена точка, соответствующая антиферромагнитному бариевому ферриту $BaFe_2O_4$. Точка S на линии MeO — Fe_2O_3 соответствует соединению $Me_2Fe_4O_8$ с кубической кристаллической структурой типа шпинели. Точка **M** отвечает окислу, имеющему гексагональную структуру и химический состав $BaFe_{12}O_{19} = BaO \cdot 6Fe_2O_3$. Точка Y на диаграмме соответствует соединению $Ba_2Me_2Fe_{12}O_{22} = 2(BaO \cdot MeO \cdot 3Fe_2O_3)$.

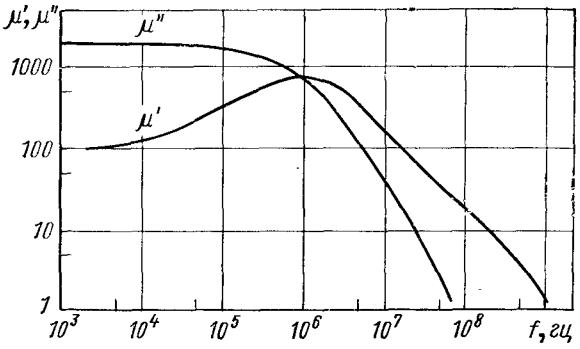


Рис. 29.46. Зависимость μ' и μ'' от частоты для граната $Y_3Sc_{0,9}Fe_{1,1}(Fe_3)O_{12}$ при 24° С [152]

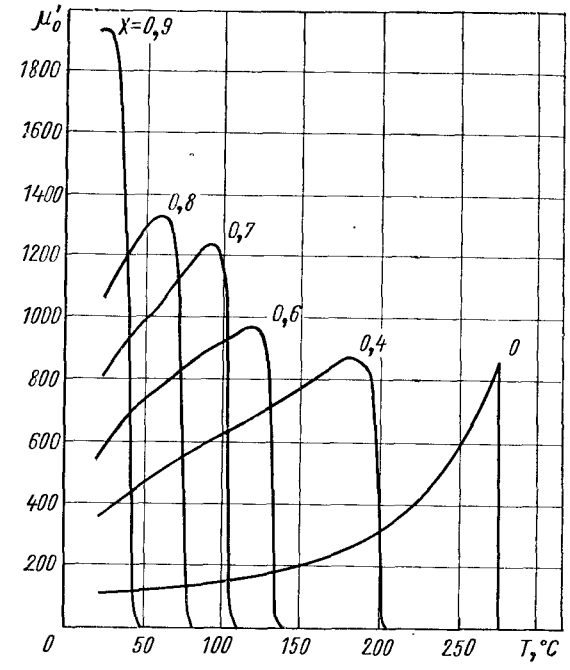


Рис. 29.47. Зависимость μ' от температуры для $Y_3[Sc_xFe_{2-x}]Fe_3O_{12}$ от 20° С до T_C [152]

Известно также большое число соединений с составами, лежащими на линиях **M** — **S** и **M** — **Y**, а элементарная ячейка этих соединений может быть легко построена из ячеек структуры **S**, **M** и **Y**. В большинстве случаев ион Ba^{2+} ($r = 1{,}43$ Å) может быть частично или полностью замещен ионами Ca^{2+} ($r = 1{,}06$ Å), Sr^{2+} ($r = 1{,}27$ Å) или Pb^{2+} ($r = 1{,}32$ Å) или трехвалентными ионами, например La^{3+} ($r = 1{,}22$ Å).

Энергия кристаллографической магнитной анизотропии гексагональных кристаллов описывается формулой

$$E_a = K_1 \sin^2\theta + K_2 \sin^4\theta + K_3' \sin^6\theta + K_3 \sin^6\theta \cos^6(\varphi - \psi),$$

где E_a — энергия анизотропии; K_1, K_2, K_3' и K_3 — константы анизотропии; θ и φ — полярные координаты. Для полей анизотропии:

$$\theta_0 = 0°; \quad H_\theta^A = \frac{2K_1}{M_s};$$

$$\theta = 90°; \quad H_\theta^A = -\frac{2(K_1 + 2K_2)}{M_s};$$

$$\sin\theta_0 = \sqrt{\frac{K_1}{2K_2}}; \quad H_\theta^A = 2\left(\frac{K_1}{K_2}\right)\frac{K_1 + 2K_2}{M_s}.$$

Здесь H_θ^A—напряженность эффективного поля, необходимого для поворота вектора намагниченности в те направления, где меняется только θ, а H_φ^A — поле, вращающее вектор намагниченности на поверхности конуса. Значение H_φ^A определяется формулой:

$$H_\varphi^A = 36 | K_3 | \frac{\sin^4\theta_0}{M_s}.$$

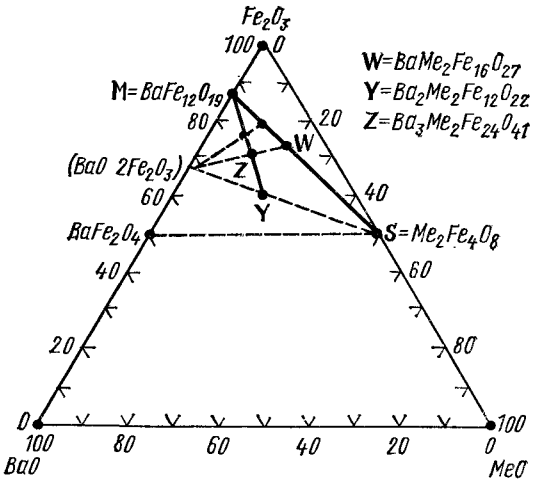


Рис. 29.48. Диаграмма составов ферримагнитных окислов. Символ Me обозначает двухвалентный ион (или комбинацию двухвалентных ионов) [159]

Таблица 29.35

Некоторые характеристики ферромагнитных окислов с гексагональной структурой

Химический состав	Символ	Число слоев в элементарной ячейке	Пространственная группа	Параметр c, Å	Рентгеновская плотность ρ_X, $г/см^3$	Молекулярная масса M, $а.е.м$	Литература
$BaFe_{12}O_{19}$	M	(10)	$P6_3/mmc$	23,2	5,28	1112	[155]
$Ba_2Fe_4O_8$	S	—	—	—	5,24	232	[159]
$BaFe_2Fe_{16}O_{27}$	W	$(14)_1$	$P6_3/mmc$	32,845	5,31	1575	[156]
$Ba_2Fe_2Fe_{28}O_{46}$	X	$(12)_3$	$R\bar{3}m$	84,11	5,29	2686	[156]
$Ba_2Fe_2Fe_{12}O_{22}$	Y	$(6)_3$	$R\bar{3}m$	43,588	5,39	1408	[156]
$Ba_3Fe_2Fe_{24}O_{41}$	Z	$(22)_1$	$P6_3/mmc$	52,3	5,33	2520	[156]
$Ba_3Zn_2Fe_{40}O_{65}$	—	$(17)_2$	$P6_3/mmc$	79,36	—	—	[157, 158]
$Ba_4Zn_2Fe_{36}O_{60}$	M_2Y	$(16)_3$	$R\bar{3}m$	38,1	5,31	3622	[157]
$Ba_4Zn_2Fe_{52}O_{84}$	—	$(22)_3$	$R\bar{3}m$	153,85	—	—	[157, 158]
$Ba_5Zn_2Fe_{64}O_{103}$	—	$(27)_2$	$P6_3/mmc$	125,76	—	—	[157, 158]
$Ba_6Zn_6Fe_{60}O_{104}$	—	$(28)_3$	$R\bar{3}m$	200,40	—	—	[157]
$Ba_{10}Zn_8Fe_{72}O_{126}$	—	$(34)_3$	$R\bar{3}m$	243,98	—	—	[157]
$Ba_{12}Zn_{10}Fe_{84}O_{148}$	—	$(40)_1$	$R\bar{3}m$	95,84	—	—	[157]
$Ba_{14}Zn_{12}Fe_{96}O_{170}$	—	$(46)_3$	$R\bar{3}m$	331,09	—	—	[157]

Таблица 29.36

Состав и структура гексагональных ферритов типа Me_2Y_n, где Me—Mn, Zn [166]

Состав	Последовательность блоков	Количество анионных слоев	Пространственная группа	Параметр c, Å	
				Эксперимент	Расчет
$Ba_{20}(Mn, Zn)_{18}Fe_{132}O_{236}$	$M(Y)_4M(Y)_5$	$(64)_3$	$R\bar{3}m$	462,0	462,0
$Ba_{22}(Mn, Zn)_{20}Fe_{144}O_{258}$	$M(Y)_5M(Y)_5$	$(70)_1$	$P6_3/mmc$	168,6	168,5
$Ba_{24}(Mn, Zn)_{22}Fe_{156}O_{280}$	M ... $M(Y)_{11}$	$(76)_3$	$R\bar{3}m$	549,3	549,2
$Ba_{24}(Mn, Zn)_{22}Fe_{156}O_{280}$	$M(Y)_1M(Y)_{10}$	$(76)_1$	$P\bar{3}m1$	183,1	183,1
$Ba_{24}(Mn, Zn)_{22}Fe_{156}O_{280}$	$M(Y)_4M(Y)_7$	$(76)_1$	$P\bar{3}m1$	183,1	183,1
$Ba_{24}(Mn, Zn)_{22}Fe_{156}O_{280}$	$M(Y)_5M(Y)_6$	$(76)_3$	$R\bar{3}m$	549,3	549,2
$Ba_{28}(Mn, Zn)_{26}Fe_{180}O_{324}$	$M(Y)_6M(Y)_7$	$(88)_3$	$R\bar{3}m$	636,7	636,4

Таблица 29.37

Рентгеновская плотность ρ_X и молекулярная масса M некоторых окислов с гексагональной кристаллической структурой [5]

Металл	W = $BaMe_2Fe_{16}O_{27}$		Y = $Ba_2Me_2Fe_{12}O_{22}$		Z = $Ba_3Me_2Fe_{24}O_{41}$	
	ρ_X, г/см³	M, а.е.м.	ρ_X, г/см³	M, а.е.м.	ρ_X, г/см³	M, 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

Таблица 29.38

Точка Кюри и намагниченность насыщения гексаферритов типа Me_2W [5]

Металл	T_C, °K	σ_s, гс·см³/г		$4\pi M_s$, гс	n_B, μ_B (T=0°K)	
		0°K	293°K	0°K	Эксперимент	Расчет
Mn_2	690	97	59	3900	27,4	29,2
Fe_2^{2+}	730	98	78	5220	27,4	28
$NiFe^{2+}$	790	79	52	3450	22,3	26,4
$ZnFe^{2+}$	700	108	73	4800	30,7	31,6
$Ni_{0,5}Zn_{0,5}Fe^{2+}$	720	104	68	4550	29,5	29,2

Таблица 29.39

Точка Кюри и намагниченность насыщения гексаферритов типа Me_2Y [5]

Металл	T_C, °K	σ_s, гс·см³/г		$4\pi M_s$, гс	n_B, μ_B (T=0°K)	
		0°K	293°K	0°K	Эксперимент	Расчет
Mg	550	20	23	1500	6,9	2,2
Mn	560	42	31	2100	10,6	9,2
Co	610	39	34	2300	9,8	7,4
Ni	660	25	24	1600	6,3	4,6
Cu	—	28	—	—	7,1	2,6
Zn	400	72	42	2850	18,4	20

Таблица 29.40

Точка Кюри и намагниченность насыщения гексаферритов типа Me_2Z [5]

Металл	T_C, °K	σ_s, гс·см³/г		$4\pi M_s$, гс	n_B, μ_B (T=0°K)	
		0°K	293°K	0°K	Эксперимент	Расчет
Mg	—	55	—	—	24	26,9
Co	680	69	50	3350	31,2	29,8
Ni	—	54	—	—	24,6	26,1
Cu	710	60	46	3100	27,2	27,1
Zn	630	—	58	3900	—	—

Таблица 29.41

Магнитные свойства ферритов типа $SrO \cdot nFe_2O_3$ и $PbO \cdot nFe_2O_3$ [160—162]

Соединение	$4\pi M_s$, гс	$4\pi M_r$, гс	H_c, э
$SrFe_8O_{13}(SrO \cdot 4Fe_2O_3)$	3250	2250	3000
$SrFe_{12}O_{19}(SrO \cdot 6Fe_2O_3)$	3100	2300	2900
$SrFe_{18}O_{28}(SrO \cdot 9Fe_2O_3)$	1900	1500	3350
$PbFe_8O_{13}(PbO \cdot 4Fe_2O_3)$	3500	2000	1500
$PbFe_{12}O_{19}(PbO \cdot 6Fe_2O_3)$	2500	1800	2900
$PbFe_{18}O_{28}(PbO \cdot 9Fe_2O_3)$	1700	1000	2400

Таблица 29.42

Констаита аиизотропии K_3 и поле анизотропии H_φ^A для иекоторых гексагональных ферримагнитных окислов [5]

Соединение	t, °C	M_s, гс	K_3, эр/см³	H_φ^A, э
$Ba_2Co_2Fe_{12}O_{22}$	—196	210	2000	340
	20	187	800	155
	170	145	150	37
$Ba_3Co_{1,5}Fe^{2+}_{0,5}Fe_{24}O_{41}$	20	280	55	7
	158	220	~9	~2
$Ba_3Co_{1,92}Fe^{2+}_{0,08}Fe_{24}O_{41}$	20	280	120	16
$Ba_2CoZn_{0,5}\ Fe^{2+}_{0,5}Fe_{24}O_{41}$	20	290	25	3
$Ba_2Zn_{1,5}\ Fe^{2+}_{0,5}Fe_{12}O_{22}$	20	190	<6	<1

Таблица 29.43

Константы анизотропии K_1 или K_1+2K_2, намагниченность насыщения M_s и поле анизотропии H_θ^A некоторых гексагональных окислов при температуре 20°С [5]

Соединение	Символ	K_1, $10^6 \frac{эрг}{см^3}$	K_1+2K_2, $10^6 \frac{эрг}{см^3}$	M_s, гс	H_θ^A, э
$BaFe_{12}O_{19}$*	**M**	+3,3	—	380	17 000
$BaFe_{18}O_{27}$*	Fe_2**W**	+3,0	—	314	19 000
$BaZnFe_{17}O_{27}$	FeZn**W**	+2,4	—	380	12 500
$BaZn_{1,5}Fe_{16,5}O_{27}$	$Fe_{0,5}Zn_{1,5}$ **W**	+2,1	—	380	11 100
$BaMnZnFe_{16}O_{27}$	MnZn**W**	+1,9	—	370	10 200
$BaNi_2Fe_{16}O_{27}$	Ni_2**W**	+2,1	—	330	12 700
$BaNi_{0,5}ZnFe_{16,5}O_{27}$	$ZnFe_{0,5}Ni_{0,5}$ **W**	+1,6	—	350	9 100
$BaCo_{0,75}Zn_{0,75}Fe_{16,5}O_{27}$	$Fe_{0,5}Co_{0,75}Zn_{0,75}$**W**	—	—0,4	360	2 200
$Ba_2Mg_2Fe_{12}O_{22}$	Mg_2**Y**	—	—0,6	119	10 000
$Ba_2Ni_2Fe_{12}O_{22}$	Ni_2**Y**	—	—0,9	127	14 000
$Ba_2Zn_2Fe_{12}O_{22}$	Zn_2**Y**	—	—1,0	227	9 000
$Ba_2Zn_{1,5}Fe_{12,5}O_{22}$*	$Fe_{0,5}Zn_{1,5}$ **Y**	—	—0,9	191	9 500
$Ba_2Co_2Fe_{12}O_{22}$*	Co_2**Y**	—	—2,6	185	28 000
$Ba_3Co_2Fe_{24}O_{41}$*	Co_2**Z**	—	—1,8	270	13 000

* Измерения проводились на монокристаллах.

Таблица 29.44

Магнитные свойства монокристаллов ферроксдюра $BaFe_{12-2x}Ir_x^{4+}Zn_x^{2+}O_{19}$ с большой анизотропией в базисной плоскости [163]

Состав x	H_a, э (T = 300°К) из измерений намагниченности	H_a, э (T = 300°К) из ферромагнитного резонанса	ΔH, э (T = 300°К)	T_C, °К	σ_s, $\frac{гс \cdot см^3}{г}$ (T=300°К)
0	17 000	17 000	53 при 55 *Гц*	720	75
0,16	9 600	—	—	635	—
0,52	15 000	16 000	1050 при 17 *Гц*	560	65
0,56	16 000	—	—	550	60
0,60	20 000	22 000	1175 при 14 *Гц*	520	47

Таблица 29.45

Ширина линии ферромагнитного резонанса для монокристаллов Me_2Y [164]

Монокристалл	Параметр c, Å	ΔH, э (T=300°К)
$BeZn_2Fe_{12}O_{22}$	43,577	8 (9000 *Мгц*)
$Ba(Zn, Mn)Fe_{12}O_{22}$ (3,5 % Mn по весу)	43,564	3,8 (9000 *Мгц*) 4,9 (17 300 *Мгц*)

Таблица 29.46

Свойства некоторых гексагональных ферритов, используемых в волноводах в миллиметровом диапазоне длин волн [165]

Состав	$T_{обж}$, °С	ρ, *г/см³*	Степень ориентации	tg δ (f=9,5 *Гц*)	$\varepsilon'/\varepsilon_0$ (f=9,5 *Гц*)	$4\pi M_s$, *гс*	H_a, э	T_C, °К	$f_{рез}$, *Гц*
Система $BaO \cdot 2NiO \cdot xAl_2O_3 \cdot (8-x)Fe_2O_3$, обозначаемая Ni**W**(*x*Al)									
Ni_2**W**(0,40 Al)	1300	4,58	0,69	—	—	—	15 200	750	49,0
Ni_2**W**(0,60 Al)	1350	4,58	0,88	0,001	15,4	2680	17 100	730	52,0
Ni_2**W**(0,73 Al)	1350	4,60	0,83	0,003	14,9	2440	17 900	720	55,0
Ni_2**W**(0,86 Al)	1350	4,63	0,84	0,004	15,1	2270	19 000	710	58,0
Ni_2**W**(1,00 Al)	1350	4,55	0,86	0,002	14,5	2080	19 700	690	62,0
Система $SrO \cdot xAl_2O_3(6-x)Fe_2O_3$, обозначаемая Sr**M**(*x*Al)									
Sr**M** (0,00 Al)	1350	4,91	0,79	—	—	4180	19 000	750	60,0
Sr**M** (0,20 Al)	1300	4,48	0,87	0,001	18,6	3300	20 000	730	64,0
Sr**M** (0,53 Al)	1300	4,11	0,89	0,001	16,2	2110	25 200	690	74,0
Sr**M** (0,80 Al)	1300	4,00	0,91	—	—	—	31 000	650	86,0
Sr**M** (0,95 Al)	1300	3,95	0,88	—	—	—	34 800	630	93,0

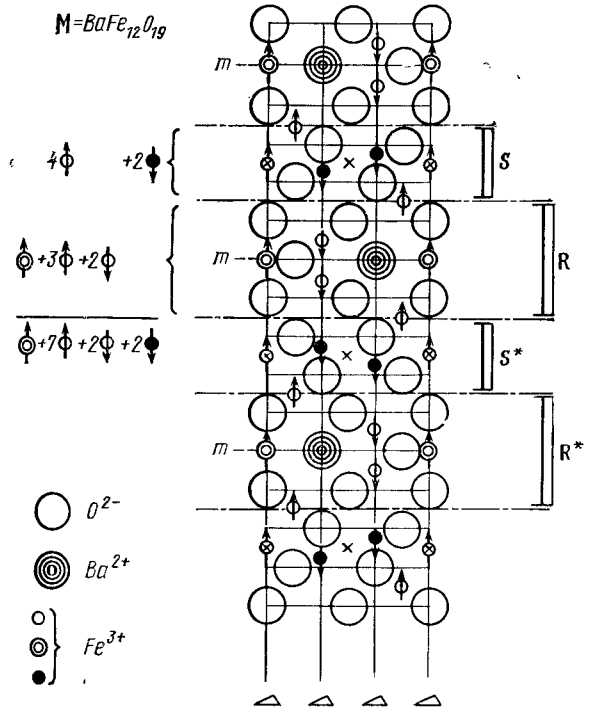


Рис. 29.49. Сечение структуры магнетоплюмбита **M** с осью *c*, направленной вертикально [5]. Стрелки — направление спинов; вертикальные линии — оси симметрии третьего порядка; крестики — положения центров симметрии; через слои, содержащие ионы бария, проходят зеркальные плоскости, обозначенные буквой *m*; изображенная структура состоит из шпинельных блоков **S**, разделенных блоками, содержащими ионы бария; звездочки — поворот данного блока вокруг оси *c* на 180°

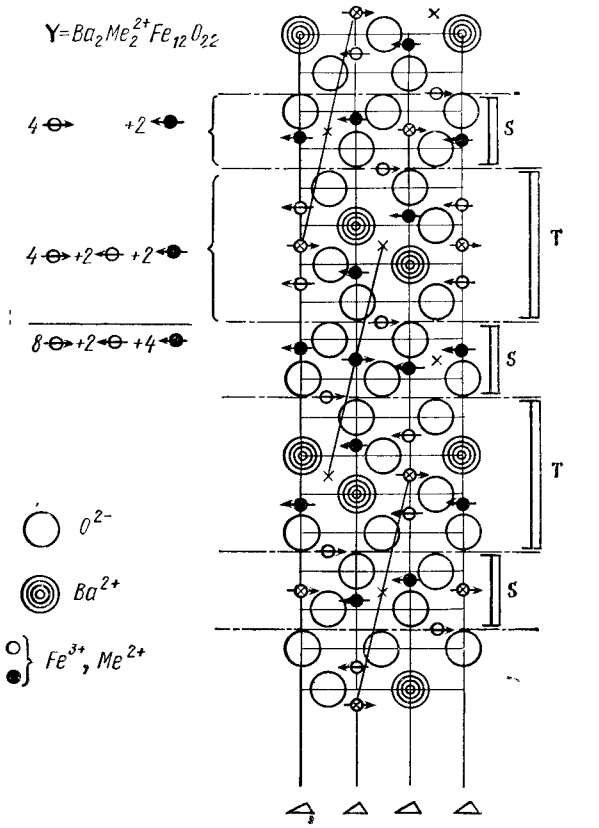


Рис. 29.50. Сечение структуры типа **Y** с осью *c*, направленной вертикально [5]. Стрелки — направления спинов, которые в данном случае ориентированы перпендикулярно осям *c*; вертикальные линии — оси симметрии третьего порядка; крестики — положения центров симметрии; изображенная структура состоит из последовательно расположенных блоков **S** и **T**

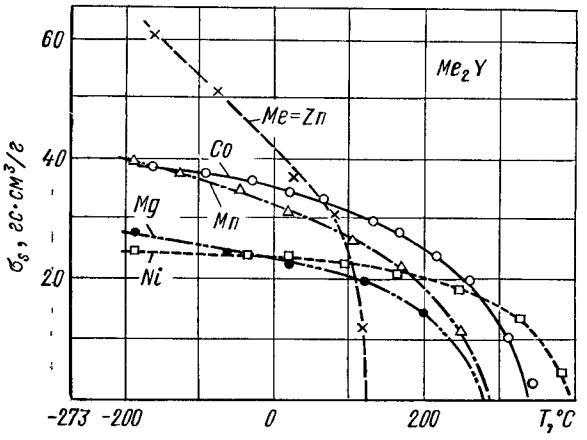


Рис. 29.51. Зависимость намагниченности насыщения σ_s соединений со структурой типа **Y** от температуры [5]. Измерение проводилось на поликристаллических образцах в поле напряженностью 11 000 *э*

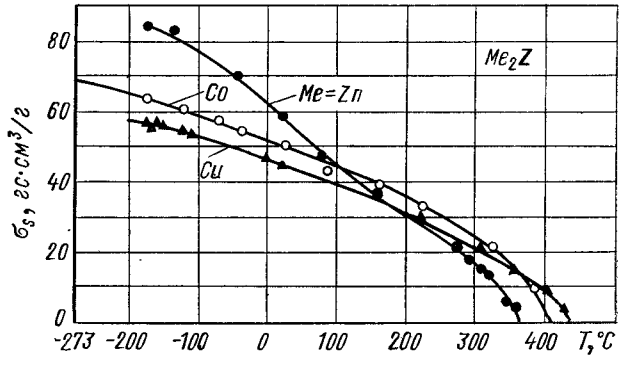


Рис. 29.52. Зависимость намагниченности насыщения σ_s соединений со структурой типа **Z** от температуры. Измерения проводились на поликристаллических образцах в поле напряженностью 11 000 *э* для Co_2Z и Zn_2Z и в поле напряженностью 18 000 *э* для Cu_2Z [5]

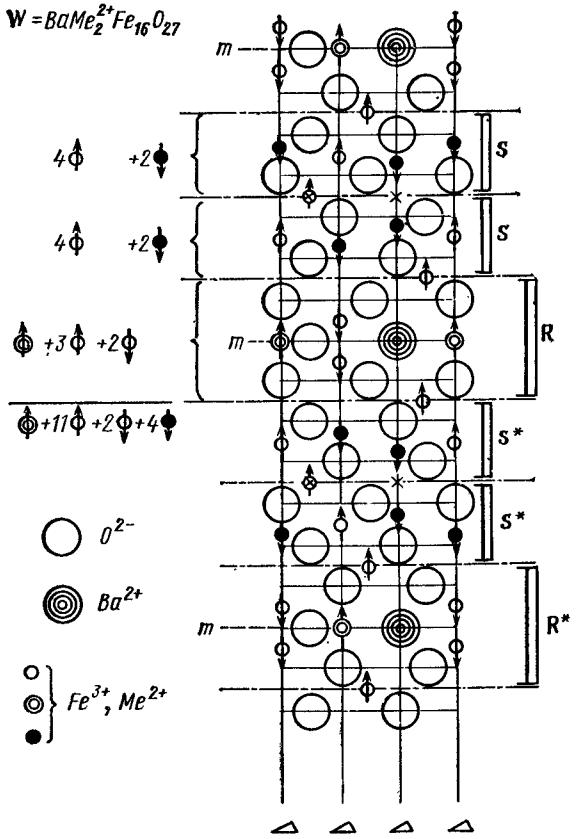


Рис. 29.53. Сечение структуры типа **W** с осью *c*, направленной вертикально [5]. Стрелки — направления спинов; вертикальные линии — оси симметрии третьего порядка; звездочки — поворот данного блока вокруг оси *c* на 180°; структуру можно рассматривать как сумму структур типа **M** и **S**

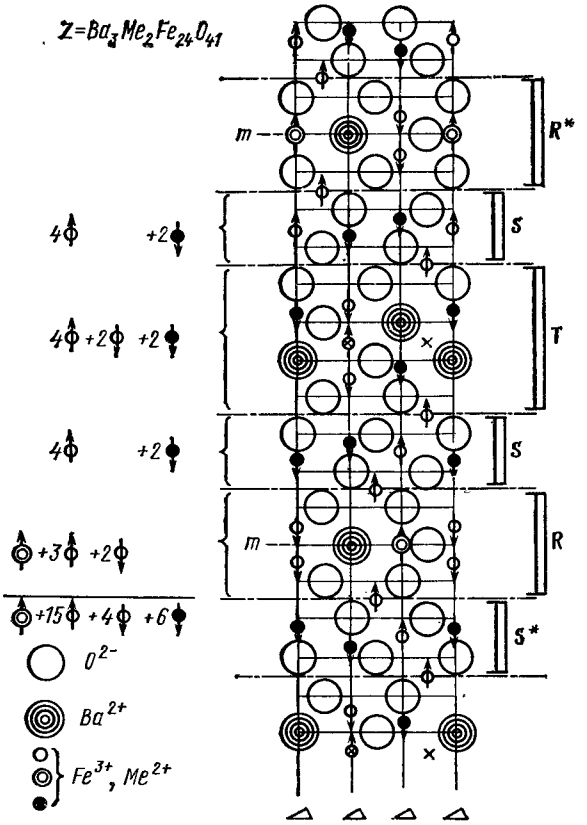


Рис. 29.54. Сечение структуры типа **Z** с осью *c*, направленной вертикально [5]. Стрелки — направления спинов; вертикальные линии — оси симметрии третьего порядка; крестики — положения центра симметрии; звездочки — поворот данного блока вокруг оси *c* на 180°; структуру можно представить как сумму структур типа **M** и **Y**

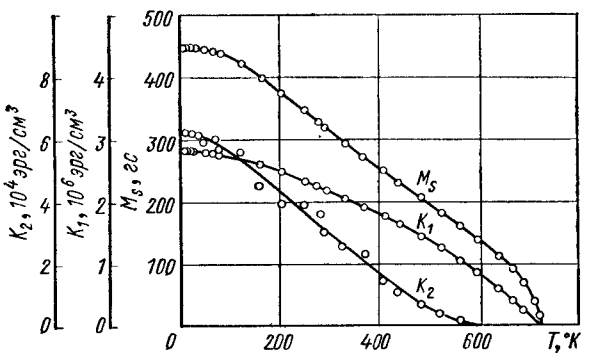


Рис. 29.55. Зависимость намагниченности насыщения M_s и констант анизотропии K_1 и K_2 для $PbO \cdot 6Fe_2O_3$ от температуры [5]

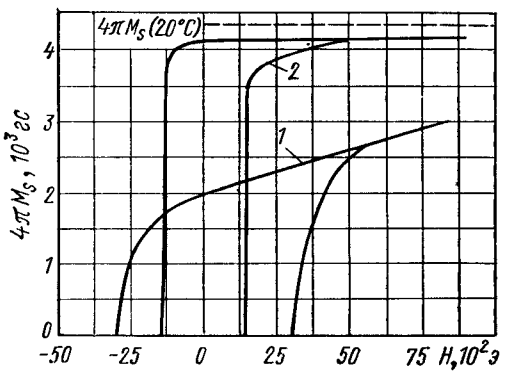


Рис. 29.56. Гистерезисные петли для образца $BaFe_{12}O_{19}$ [5]:

1 — изотропный образец; *2* — кристаллографически текстурированный образец

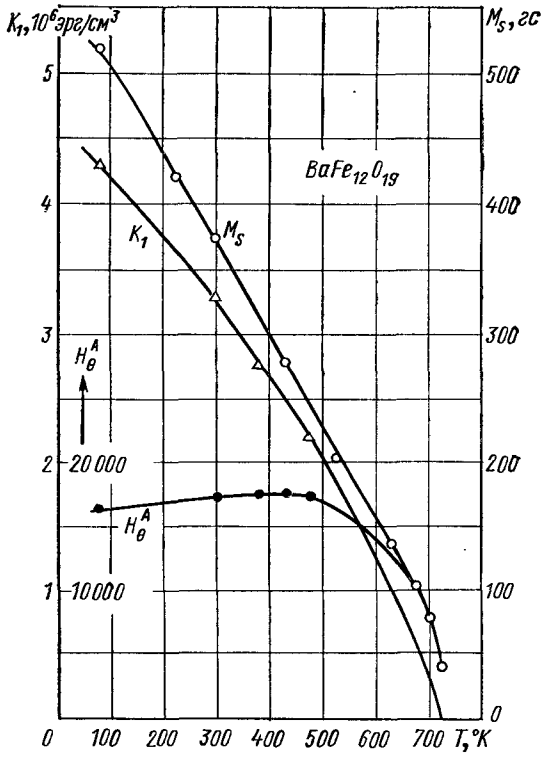


Рис. 29.57. Зависимость намагниченности насыщения M_s, константы анизотропии K_1 и поля анизотропии H_θ^A для $BaFe_{12}O_{19}$ от температуры

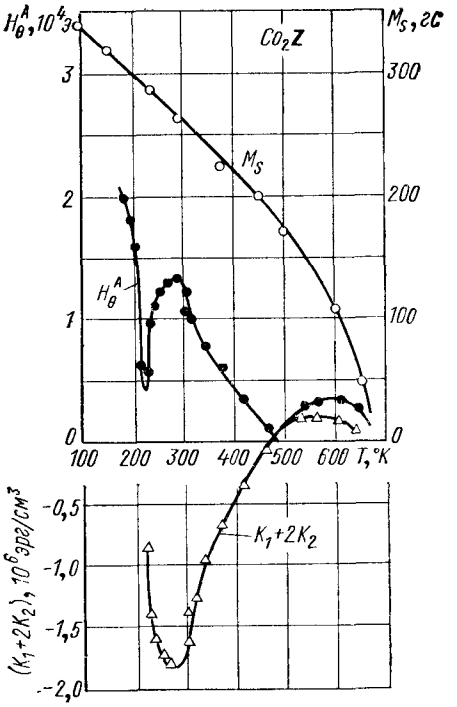
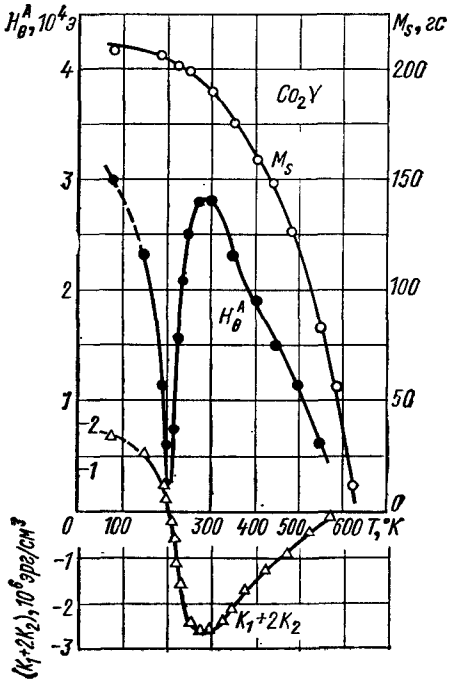


Рис. 29.59. Зависимость намагниченности насыщения M_s, констант анизотропии K_1+2K_2 и поля анизотропии для Co_2Z от температуры [5]



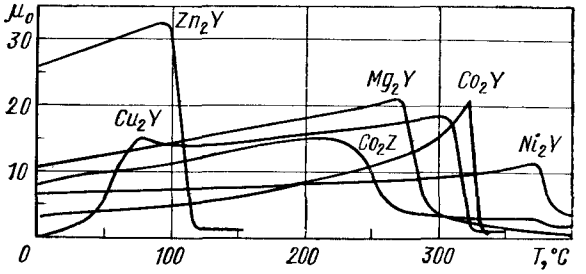


Рис. 29.60. Зависимость начальной магнитной проницаемости некоторых поликристаллических образцов гексагональных окислов от температуры [5]

Рис. 29.58. Зависимость намагниченности насыщения M_s констант анизотропии K_1+2K_2 и поля анизотропии H_θ^A для Co_2Y от температуры [5]

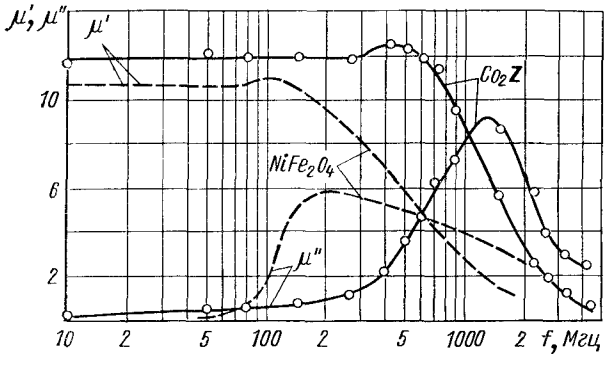


Рис. 29.61. Магнитные спектры поликристаллического образца Co_2Z и шпинели $NiFe_2O_4$, которая имеет примерно то же значение магнитной проницаемости на низких частотах [5]

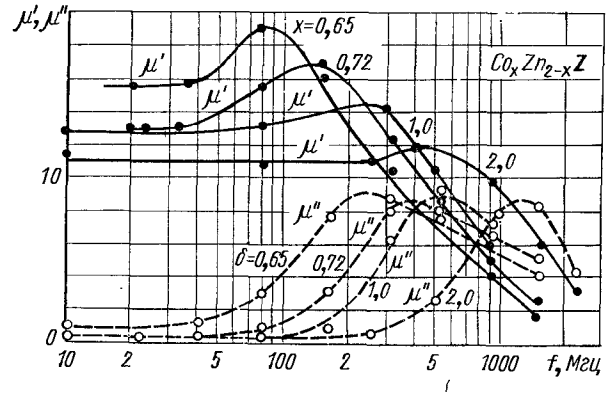


Рис. 29.62. Магнитные спектры некоторых ферритов группы $Co_xZn_{2-x}Z$ [5]

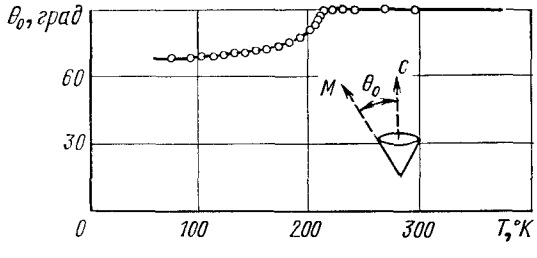


Рис. 29.63. Зависимость равновесного положения вектора намагниченности относительно оси c для Co_2Y от температуры [5]

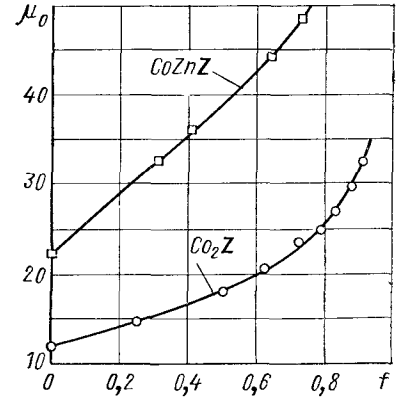


Рис. 29.64. Зависимость μ_0 образцов Co_2Z и CoZnZ от f — различной степени ориентации кристаллитов [5]

29.4. НЕКОТОРЫЕ ФЕРРО- И ФЕРРИМАГНИТНЫЕ ДИЭЛЕКТРИКИ

Таблица 29.47

Магнитные свойства соединений трехвалентного хрома с галогенами [167]

Обозначения: θ_p — парамагнитная точка Кюри; $c_м$ — постоянная закона Кюри — Вейса; $p_{эф}$ — эффективный магнитный момент

Соединение	Структура	T_C, °K	θ_p, °K	n_B, μ_B	$4\pi M_S$, гс	$\frac{2K}{M_S}$, э, T=1,5°K	K_1, $\frac{эрг}{см^3}$, T=1,5 °K	$\frac{c_м, см^{-3}\cdot град}{моль}$	$p_{эф}$, μ_B
CrF_3	D^6_{3d}—$R\bar{3}c$; a=5,2643Å; a=56,563°	69,8	—124	—	—	—	—	1,85	3,85
$CrCl_3$	D^3_3—$P3_112$; D^5_3—P_212; a=6,00 Å; c=17,3 Å	16,8	+31	—	—	—	—	1,7	3,69
$CrBr_3$	C^2_{3i}—$R\bar{3}$; a=6,26 Å; c=18,2 Å	35,7	+47	3,0	3250	6850	$9{,}4\cdot10^5$	1,84	3,85
CrI_3	D^3_3—$P3_112$	68	+70	3,1	2690	28 600	$3{,}1\cdot10^6$	2,07	4,03

Таблица 29.48

Магнитные свойства $CoMnO_3$, $NiMnO_3$, $BiMnO_3$ и $BiCrO_3$

Обозначение: $p_{эф}$ — эффективный магнитный момент.

Соединение	Структура	Параметры ячейки T=300°K	T_C, °K	n_B, μ_B	$p_{эф}$, μ_B	Литература
$CoMnO_3$	$C_{3i}^2 - R\bar{3}$	$a = 5{,}385$ Å $\alpha = 54°31'$	120	0,72 (0°K)	—	[170—172]
$NiMnO_3$	$C_{3i}^2 - R\bar{3}$	$a = 5{,}343$ Å $\alpha = 54°39'$	120—160	0,76 (0°K)	—	[170—172]
$BiMnO_3$	Перовскит	$a = c = 3{,}935$ Å $b = 3{,}989$ Å $\alpha = \gamma = 91°28'$ $\beta = 90°58'$	103 $\theta_p = 130$	2 (77°K) 4 (экстраполяция)	5	[168,169]
$BiCrO_3$	Перовскит	$a = c = 3{,}906$ Å $b = 3{,}870$ Å $\alpha = \gamma = 90°33'$ $\beta = 89°9'$	123	—	—	[168,169]

Таблица 29.49

Кристаллографические и магнитные свойства ферримагнитных фторидов с ионами Fe^{3+}, Cr^{3+} и Co^{3+} [173]

Соединение	Структура		T_C, °K	n_B, μ_B (0°K)	$4\pi M_s$, гс (0°K)
	Высокотемпературная фаза	Низкотемпературная фаза			
$Na_5Fe_3F_{14}$	$a = 7{,}34$ Å; $c = 10{,}38$ Å $\rho = 3{,}26$ г/см³	$a = 73{,}23$ Å; $b = 7{,}46$ Å $c = 12{,}72$ Å; $\beta = 90 \pm 0{,}5°$ $\rho = 3{,}15$ г/см³	80	5	2500
$Na_5Cr_3F_{14}$	—	—	< 20	—	—
$Na_5Co_3F_{14}$	—	—	$77 < T_C < 200$	—	—

Таблица 29.50

Магнитные свойства соединений двухвалентного европия

Соединение	Структура	Параметры ячейки, Å	T_C, °K	θ_p, °K	$C_м$	n_B, μ_B (T=0°K)	Литература
EuF_2	Кубическая	5,85	2	—5	7,79	—	[174]
$EuCl_2$	Орторомбическая	a = 4,48 b = 7,48 c = 8,96	—	0	6,90	—	[174]
$EuBr_2$	»	a = 4,30 b = 9,20 c = 11,42	—	0	—	—	[174]
EuI_2	Моноклинная	a = 7,62 b = 8,23 c = 7,88 β = 98°	5	+5	7,83	7	[174]
EuO	NaCl	5,143	73	+76	7,60	6,80	[174]
EuS		5,96	16,5	+19	7,80	6,87	
EuSe		6,19	7	+ 9	7,33	6,70	
EuTe		6,60	7,8	— 6	7,04	—	
$Eu_2P_2O_7$	Тетраэдрическая	—	—	—3	—	—	[86]
$Eu_3(PO_4)_2$	Ромбоэдрическая	—	—	+5	—	6,7	[86]
$EuSiO_3$	—	—	—	0	7,60	—	[174]
Eu_2SiO_4	Орторомбическая (порошок)	a = 9,71 b = 49,56 c = 5,95	7	+7	6,63	6,0	[174]
Eu_2SiO_4	Орторомбическая (монокрист.)	a = 9,71 b = 49,56 c = 5,65	—	+10	—	6,5	[174]
Eu_3SiO_5	Тетраэдрическая	—	4	+19	7,01	6,71	[174]
$EuAl_2O_4$	—	—	—	0	—	—	[86]
$Eu_3Al_2O_6$	Псевдокубическая	—	—	10	—	6,2	
$Eu_5Al_2O_8$	—	—	—	6	—	5,8	

Таблица 29.51

Параметры элементарной ячейки гексагональной и кубической фаз некоторых фторидов типа ABF_3

Соединение	Синтез при атмосферном давлении	Синтез при высоком давлении
$RbNiF_3$ [87]	$a=5,847\pm0,001$ Å $c=14,319\pm0,003$ Å $c/a=2,449\pm0,001$ $v=424,0\pm0,2$ Å^3	$a=b=c=4,0769\pm0,0004$Å $v=67,76\pm0,02$ Å^3
$TlNiF_3$ [87]	$a=5,878\pm0,001$ Å $c=14,364\pm0,005$ Å $c/a=2,444\pm0,001$ $v=429,8\pm0,4$ Å^3	$a=b=c=4,0998\pm0,0002$Å $v=68,91\pm0,01$ Å^3
$CsMnF_3$ [87]	$a=6,230\pm0,002$ Å $c=15,130\pm0,008$ Å $c/a=2,429\pm0,002$ $v=508,6\pm0,6$ Å^3	$a=b=c=4,3308\pm0,0002$Å $v=81,23\pm0,01$ Å^3
$CsNiF_3$ [88]	Фаза $2L$ $a=6,236$ Å $v=88,0$ Å^3	1) Фаза $9L$ $a=6,12$ Å; $c=22,15$ Å $v=79,8$ Å^3 2) Фаза $6L$ $a=6,05$Å; $c=14,54$ Å $v=76,8$ Å^3

Таблица 29.52

Магнитные свойства ферримагнитных фторидов

Соединение	T_C, °K	σ_s, $\frac{гс\cdot см^3}{г}$	$\frac{dT_c}{d_p}$, $\frac{град}{кбар}$	Литература
$RbNiF_3$	139	21	+0,60	[89, 92,95]
$CsNiF_3$	111	12	+0,53	[88]
$TlNiF_3$	150	11,6 (оценка)	—	[147]

Таблица 29.53

Магнитные свойства ферримагнетика $Ga_{2-x}Fe_xO_3$ [166]

Химический состав		n_B, μ_B ($T=4,2$°K; $H=6537$ э)	T_C, °K
исходного расплава	по анализу		
$Ga_{1,3}Fe_{0,7}O_3$	$Ga_{1,18}Fe_{0,82}O_3$	0,395	129
$Ga_{1,2}Fe_{0,8}O_3$	$Ga_{1,14}Fe_{0,86}O_3$	0,540	166
$Ga_{1,1}Fe_{0,9}O_3$	$Ga_{1,07}Fe_{0,93}O_3$	0,630	196
$Ga_{1,0}Fe_{1,0}O_3$	$Ga_{0,98}Fe_{1,02}O_3$	0,789	243
$Ga_{0,92}Fe_{1,08}O_3$	$Ga_{0,89}Fe_{1,11}O_3$	0,935	295
$Ga_{0,8}Al_{0,2}Fe_{1,0}O_3$	$Ga_{0,81}Al_{0,11}Fe_{1,08}O_3$	0,793	267

29.5. МАРКИ И ОСНОВНЫЕ ПАРАМЕТРЫ НЕКОТОРЫХ ФЕРРИТОВ, ПРИМЕНЯЕМЫХ В СССР

Таблица 29.54

Магнитомягкие ферриты [80]

Обозначения: μ_0—начальная магнитная проницаемость; $\mu_{макс}$ — максимальная магнитная проницаемость; $H_{\mu макс}$ — напряженность магнитного поля, соответствующая $\mu_{макс}$, α_μ — относительный температурный коэффициент μ_0; $f_{гр}$ — граничная частота; $\delta h/\mu_0^2$ — относительный коэффициент потерь на гистерезис

Марка феррита	Состав и структура	T_C, °C	μ_0	$\mu_{макс}$	$H_{\mu макс}$, э	$\alpha_\mu\cdot10^6$*, $\frac{1}{°C}$	$f_{гр}$, Мгц, при которой $tg\delta=0,1$	$f_{гр}$, Мгц, при которой $tg\delta=0,02$	$\frac{\delta h}{\mu_0^2}\cdot10^6$	ρ, $\frac{г}{см^3}$	ρ_0, ом·см
6000 НМ	Mn-Zn-шпинель	110	6000	10000	0,15	0,2—1,5	0,005	—	0,04	5,0	10
4000 НМ	Mn-Zn-шпинель	140	4000	7000	0,20	0,5—1,5	0,08	—	0,07	4,9	50

Марка феррита	Состав и структура	T_C, °С	μ_0	$\mu_{макс}$	$H_{\mu\ макс}$, э	$\alpha_\mu \cdot 10^{6*}$, $\frac{1}{°C}$	$f_{гр}$, Мгц, при которой $tg\delta = 0{,}1$	$f_{гр}$, Мгц, при которой $tg\delta = 0{,}02$	$\frac{\delta h}{\mu_0^2} \cdot 10^6$	ρ, $\frac{г}{см^3}$	ρ_0, ом·см
2000 НМ	Mn-Zn-шпинель	200	2000	3500	0,25	—2÷+4,5	0,35	0,06	0,17	4,6	50
2000НМ1	Mn-Zn-шпинель	200	2000	3500	0,40	—0,1÷+1,0	0,4	0,05	0,17	4,6	$5 \cdot 10^2$
1500 НМ3	Mn-Zn-шпинель	200	1500	3000	0,60	0÷0,7	1,0	0,35	0,08	4,5	$2 \cdot 10^3$
1000 НМ3	Mn-Zn-шпинель	200	1000	2000	1,0	0÷1,0	2,0	0,7	0,11	4,4	$1 \cdot 10^3$
700 НМ	Mn-Zn-шпинель	240	700	2000	1,50	—0,2÷+1,2	4,0	2,1	0,04	4,4	$2 \cdot 10^3$
2000 НН	Ni-Zn-шпинель	2000	70	7000	0,15	3÷9	0,2	0,005	1,10	5,0	$1 \cdot 10^3$
1000 НН	Ni-Zn-шпинель	1000	110	3000	0,40	5÷15	0,4	0,02	1,30	5,0	$2 \cdot 10^3$
200 НН	Ni-Zn-шпинель	200	120	300	2,00	4÷10	3,0	1,0	2,00	4,8	$1 \cdot 10^5$
150 ВЧ	Ni-Zn-шпинель	150	400	350	8,00	±4	25	15	0,30	4,8	$1 \cdot 10^6$
100 ВЧ	Ni-Zn-шпинель	100	400	280	9,00	9	35	25	0,18	4,8	$1 \cdot 10^6$
50 ВЧ2	Ni-Zn-шпинель	50	450	170	10,00	—1,0÷+9,0	70	35	1,30	4,7	$1 \cdot 10^6$
30 ВЧ2	Ni-Zn-шпинель	30	450	120	15,00	±35	200	100	0,30	4,8	$1 \cdot 10^7$

* В интервале температур от +20 до +70°С.

Таблица 29.55

Ферриты с прямоугольной петлей гистерезиса [80]

Обозначения: T_C — точка Кюри; H_c — коэрцитивная сила; B_r — остаточная индукция; $K_{пр}$ — коэффициент прямоугольности; TKH_c — температурный коэффициент коэрцитивной силы; H_0 — напряженность порогового поля; S_W — константа переключения; ρ_0 — удельное электросопротивление

Марка феррита	Состав и структура	T_C, °С	H_c, э	B_r, гс	$K_{пр}$	TKH_c, %, в интервале температур от—60 до +20°С	TKH_c, %, в интервале температур от+20 до+70°С	H_0, э	S_W, э·мксек	ρ_0, ом·см
0,12 ВТ	Mg-Mn-шпинель	115	0,12	2000	0,91	2,0	1,3	0,70	0,35	$6 \cdot 10^6$
0,16 ВТ	Mg-Mn-шпинель	135	0,16	2000	0,93	1,8	1,2	0,70	0,50	$5 \cdot 10^4$
0,27 ВТ	Mg-Mn-шпинель	110	0,27	2000	0,90	1,7	1,3	0,50	0,45	$2 \cdot 10^5$
0,3 ВТ	Mg-Mn-шпинель	150	0,30	2100	0,93	1,3	0,8	1,20	0,60	—
0,37 ВТ	Mg-Mn-шпинель	145	0,37	1400	0,93	1,3	1,0	1,20	0,60	$1 \cdot 10^8$
0,44 ВТ	Mg-Mn-шпинель	180	0,44	1600	0,93	1,1	0,8	1,80	0,55	$2 \cdot 10^4$
0,7 ВТ	Mg-Mn-шпинель	240	0,70	2300	0,93	0,8	0,7	2,00	0,55	$2 \cdot 10^4$
0,9 ВТ	Mg-Mn-шпинель	235	0,90	2500	0,92	0,8	0,6	1,70	0,60	$2 \cdot 10^4$
1,3 ВТ	Mg-Mn-шпинель	250	1,30	2300	0,91	0,8	0,6	2,00	0,65	$25 \cdot 10^4$
1,5 ВТ	Mg-Mn-шпинель	250	1,50	2200	0,91	0,7	0,5	2,20	0,65	$5 \cdot 10^4$
2 ВТ	Mg-Mn-шпинель	260	2,00	1800	0,90	0,7	0,6	2,60	0,55	$5 \cdot 10^6$

Таблица 29.56

Ферриты СВЧ-диапазона [80]

Обозначения: T_C — точка Кюри; M_s — намагниченность насыщения; B_s — индукция насыщения; B_r — остаточная индукция; ε' — вещественная часть диэлектрической проницаемости; μ' — вещественная часть магнитной проницаемости; ΔH — ширина линии ферромагнитного резонанса; $\mathrm{tg}\delta$ — тангенс угла потерь; ρ — плотность; ρ_0 — удельное сопротивление

Марка феррита	Состав и структура	T_C, °C	$4\pi M_s$, *гс*	B_s, *гс*	B_r, *гс*	ε'	μ'	ΔH, *э* на частоте 9200 *Мгц*	ΔH, *э* на частоте 3000 *Мгц*	$\mathrm{tg}\delta$	ρ, $\frac{г}{см^3}$	ρ_0, *ом·см*
2СЧ 1	Mg-Mn-шпинель	370	1880	1520	1040	10,6	24	800	785	$6{,}4\cdot10^{-3}$	3,8	$5{,}0\cdot10^{8}$
2СЧ 4	Ni-Zn-шпинель	450	4180	3900	1400	12,5	47	120	—	$1{,}7\cdot10^{-2}$	4,9	$5{,}3\cdot10^{8}$
5СЧ	Ni-Zn-шпинель	340	2620	2660	640	11,9	94	180	—	$5{,}4\cdot10^{-3}$	4,8	$3{,}0\cdot10^{8}$
8СЧ 1	Mg-Al-шпинель	290	710	690	480	9,8	12	600	400	$1{,}6\cdot10^{-3}$	3,6	$1{,}5\cdot10^{7}$
10СЧ 6	Y-Fe-гранат	280	1700	1680	950	13,8	9,7	70	40	$1{,}6\cdot10^{-3}$	4,9	$1{,}2\cdot10^{12}$
10СЧ 8	Mg-Cr-шпинель	140	620	560	350	9,5	17	250	220	$2{,}8\cdot10^{-3}$	3,5	$5{,}8\cdot10^{7}$
10СЧ 12	Ni-Cr-шпинель	350	1100	890	590	9,0	8	540	400	$8{,}5\cdot10^{-3}$	4,8	$5{,}2\cdot10^{6}$
30СЧ 3	Y-Al-гранат	230	1180	1200	650	13,3	86	80	65	$3{,}4\cdot10^{-3}$	5,0	$3{,}8\cdot10^{11}$
40СЧ 2	Y-Al-гранат	180	750	750	340	14,1	44	80	55	$8{,}1\cdot10^{-4}$	4,8	$5{,}1\cdot10^{13}$
60СЧ	Y-Al-гранат	150	480	500	320	13,2	28	50	40	$4{,}2\cdot10^{-4}$	4,7	$9{,}0\cdot10^{11}$
80СЧ	Y-Al-гранат	120	310	360	90	12,5	23	70	55	$1{,}4\cdot10^{-3}$	4,9	$1{,}6\cdot10^{11}$

Таблица 29.57

Магнитотвердые ферриты [80]

Обозначения: T_C — точка Кюри; B_r — остаточная индукция; $_B H_c$ — коэрцитивная сила по индукции; $_M H_c$ — коэрцитивная сила по намагниченности; $(BH)_{макс}$ — удельная максимальная магнитная энергия; μ_r — обратимая магнитная проницаемость; α_B — температурный коэффициент остаточной индукции; ρ_0 — удельное электросопротивление

Феррит	T_C, °C	B_r, *гс*	$_B H_c$, *э*	$_M H_c$, *э*	$(BH)_{макс}$, 10^6 *гс·э*	μ_r	α_B^*, % на 1°C	ρ_0, *ом·см*	ρ, *г/см³*
Гексаферрит Ba марки									
0,7 БИ	450	1800—2100	1400—1600	1500—3500	0,7—0,8	1,05—1,25	—0,2	10^8	4,5—5,0
1 БИ	450	1900—2200	1600—1800	2200—4000	0,8—1,1	1,05—1,25	—0,2	10^5	4,5—5,0
2БА1	450	2800—3300	2450—3000	>3800	1,8—2,5	1,05—1,25	—0,2	10^5	4,5—5,0
2БА	450	3000—3500	2300—2900	2500—3800	2,0—2,9	1,05—1,25	—0,2	10^5	4,5—5,0
3БА	450	3500—4000	1600—2300	1600—2300	2,9—3,5	1,05—1,25	—0,2	10^5	4,5—5,0
Феррит Co марки 1ФК	550	2400—2700	1600—1900	>1800	1,4—1,7	—	—0,05[2*] —0,08[3*]	10^4	3,3—3,5

* В интервале температур от —70 до +200°C.
[2*] В интервале температур от —70 до +20°C.
[3*] В интервале температур от +20 до +80°C.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Neél L.** "Апп. phys.", 1948, v. 3, p. 137. (См. пер. в сб.: Антиферромагнетизм. Пер. с англ. М., Изд-во иностр. лит., 1956, с. 56).
2. **Боисовский С. В., Шур Я. С.** Ферромагнетизм. М., Гостехиздат, 1948.
3. **Гуревич А. Г.** Ферриты на сверхвысоких частотах. М., Физматгиз, 1960.
4. **Wangsness R. K.** "Phys. Rev.", 1954, v. 93, p. 68.
5. **Смит Я., Вейн Х.** Ферриты. Пер. с англ. М., Изд-во иностр. лит., 1962.
6. **Shull C. G., Wollen E. O., Kohler W. C.** "Phys. Rev.", 1951, v. 84, p. 912.
7. **Bickford L. R., Brownlow J. M., Penoyer R. F.** Proc. Instn Electr. Engrs», 1957, v. 104B, Suppl. 5, p. 238.
8. **Bickford L. R., Pappis J., Stull J. L.** "Phys. Rev.", 1955, v. 99, p. 1210.
9. **Bickford L. R.** "Phys. Rev.", 1950, v. 78, p. 449.
10. **Calhoun B. A.** "Phys. Rev.", 1954, v. 94, p. 1582.

11. Nathans R. e. a. "Proc. Istn Electr. Engrs», 1957, v. 104B, Suppl. 5, p. 217.
12. Verwey J. W., Heilmann E. L. "J. Chem. Phys.", 1947, v. 15, p. 174.
13. Gorter E. W. "Philips. Res.Repts.", 1954, v. 9, p. 295.
14. Galt J. K., Matthias B. T., Remeika J. P. "Phys. Rev.", 1950, v. 79, p. 391.
15. Bozorth R. M., Tilden E. F., Williams A. J. "Phys. Rev.", 1955, v. 99, p. 1788.
16. Dwight K., Menyuk N. "Bull. Amer. Phys. Soc.", 1958, v. 3, Ser. 2, p. 41.
17. Smit J., Wijn H. P. J. "Adv. in Electr. and Electr. Phys.", 1954, v. 6, p. 83.
18. Yager W. A., Galt J. K., Merritt F. R. "Phys. Rev.", 1955, v. 99, p. 1203.
19. Генделев С. Ш., Лаповок Б. Л., Рубинштейн Б. Е. «Физика твердого тела», 1963, т. 5, с. 3037.
20. Sekizawa H., Sekizawa K "J. Phys. Soc Japan", 1962, v. 17, Suppl. B—I, p. 380.
21. Epstein D. J. Conf. on Magn. and Magn. Mater., Boston, Amer. Inst. Electr. Eng., 1957, p. 498.
22. Van Uitert L. G. "J. Chem. Phys.", 1956, v. 24, p. 306.
23. Hastings J. M., Corliss L. M. "Phys. Rev.", 1956, v. 104, p. 328.
24. Dillon J. F., Geschwind S., Jaccarino V. "Phys. Rev.", 1955, v. 100, p. 750.
25. Гуревич А. Г., Гублер И. Е., Титова А. Г. «Физика твердого тела», 1961, т, 8, с. 19.
26. Teale R. W. "J. Appl. Phys.", 1962, v. 33, Suppl. 3, p. 1295.
27. Завета К., Свирина Е., Маликова О. «Физика твердого тела», 1962, т. 4, с. 3593.
28. Braun P. B. "Nature", 1952, v. 170, p. 1123.
29. Folen V J. "J. Appl. Phys.", 1960, Suppl., v. 31, p. 166.
30. Schnitzler A. D., Folen V. J., Rado G. T. "J. Appl. Phys.", 1960, Suppl., v. 31, p. 348.
31. Enz U. Erzeugung von Vetterschaft mit Ferriten, Thesis, Zürich, 1955.
32. Comstock R. L., Remeika J. P. "J. Appl. Phys.", 1964, v. 35, p. 1018.
33. Nielsen J. W. e. a. "J. Appl. Phys.", 1962, v. 33, Suppl., No. 3, p. 1379.
34. Bertaut F. "Compt. rend.", 1950, v. 230, p. 213.
35. Prince E., Trueting R. G. "Acta crystallogr.", 1956, v. 9, p. 1025.
36. Weil L., Bertaut F., Bochirol L. "J. phys. rad.", 1950, v. 11, p. 208.
37. Gorter E. W. "Nature", 1950, v. 165, p. 798.
38. Okamura T., Kojima Y. "Phys. Rev.", 1952, v. 86, p. 1040.
39. Weisz R. S. "Phys. Rev.", 1954, v. 96, p. 800.
40. Snoek J. L. "Philips. Techn. Rev.", 1946, v. 8, p. 353.
41. Okamura T., Torizuka Y. "Nature", 1951, v. 168, p 872.
42. Okamura T., Fujimura T., Date M. "Phys. Rev.", 1952, v. 85, p. 1041.
43. Рабкин Л. И. Высокочастотные ферромагнетики. М.—Л., Физматгиз, 1960.
44. Bochirol L. "Compt. rend.", 1951, v. 233, p. 736.
45. Prince E. "Phys. Rev.", 1956, v. 102, p. 674.
46. Pauthenet R. "Compt. rend." 1950, v. 230, p. 1842.
47. Guillaud C. "Rev. Mod. Phys.", 1953, v. 25, p. 64.
48. Tannenwald P. E. "Phys. Rev.", 1955, v. 99, p. 463.
49. Torizuka Y. "Sci., Repts. Res. Inst. Tôhoku Univ"., 1951, v. A 3, p. 383.
50. Corliss L. M., Hastings J. M., Brockman F. G. "Phys. Rev.", 1953, v. 90, p. 1013.
51. Bacon G. N., Roberts F. F. "Acta crystallogr.", 1953, v. 6, p. 57.
52. Jones G. O., Roberts F. F. "Proc. Phys. Soc. (London)", 1952, v. 65 B, p. 390.
53. Belson H. S., Kriessman C. J. "J. Appl. Phys.", 1959, v. 30, p. 170S.
54. Rado G. T., Folen V. J., Emerson W. H. "Proc. Instn Electr. Engrs", 1957, v. 104B, Suppl. 5, p. 198.
55. Yager W. A., Merrit F. R., Guillaud "Phys. Rev.", 1951, v. 81, p. 477.
56. Торопов Н. А., Борисенко А. И. «Журн. прикл. химии», 1950, т. 88, с. 1243.
57. Inoue T., Iida S. "J. Phys. Japan", 1958, v. 13, p. 656.
58. Guillaud C., Creveaux H. "Compt. rend.", 1950, v. 230, p. 1458.
59. Guillaud C. "J. phys. et radium", 1951, v. 12, p. 239.
60. Okamura T., Kojima Y., Torizuka Y. "Sci. Repts. Inst. Tôhoku Univ.", 1952, v. A4, p. 72.
61. Okamura T. "Phys. Rev.", 1952, v. 85, p. 690.
62. Gorter E. W. "Philips. Res. Repts.", 1954, v. 9, p. 295.
63. McGuire T. R. "Phys. Rev.", 1953, v. 91, p. 206.
64. Pippin J. E., Hogan C. L. Sci. Rep. N1 Gordon McKay Lab. of Appl. Science, Haward Univ., N. Y., 1959.
65. Carter A. E., Miles D. A., Welch A. J. A. "Proc. Instn Electr Engrs", 1957, v. 104 B, Suppl. 5, p. 141.
66. Gorter E. W. "Philips. Res. Repts.", 1954, v. 9, p. 403.
67. van der Heide H., Bruijning H. G., Wijn HPJ. "Phil. Tech. Rev.", 1957, v. 18, p. 336.
68. Gorter E. W. "Philips. Res. Rept.", 1954, v. 9, p. 403.
69. Соловьев В. И. «Физика твердого тела», 1964, т. 6, с. 2524.
70. Tannenwald P. E. 'Phys. Rev.", 1955, v. 100, p. 1713.
71. Healy D. M., Johnson R. A. "Phys. Rev.", 1956, v. 104, p. 635.
72. van Wieringen J. S. "Cahiers phys.", 1955, v. 62, p. 45.
73. Смоленский Г. А. «Изв. АН СССР. Сер. физ.», 1952, т. 16, с. 728.
74. Enz U. "Physica", 1958, v. 24, p. 609.
75. Полтинников С. А., Давыдов Л. Д. «Физика твердого тела», 1964, т. 6, с. 2190.
76. Galt J. K. "Bull. Syst. Techn. J.", 1954, v. 33, p. 1023.
77. Koops C. G. "Phys. Rev.", 1951, v. 83, p. 121.
78. Funatogawa Z., Miyata H., Usami S. "J. Phys. Soc. Japan", 1959, v. 14, p. 854.
79. Brown F., Gravel Ch. L. "Phys. Rev.", 1955, v. 97, p. 55.
80. Горбунов Н. Д., Матвеев Г. А. Ферриты и магнитодиэлектрики. М., «Советское радио», 1968.
81. Menzer G. "Z. Kristallogr.", 1928, Bd 69, S. 300.
82. Gibbs G. V., Smith J. V. "Amer. Mineral.", 1965, v. 50, p. 2023.
83. Prandl W. "Z. Kristallogr.", 1966, Bd 123, S. 81.
84. Abrahams S. C., Geller S. "Acta crystallogr.", 1958, v. 11, p. 437.
85. Neél L. "Апп. Phys.", 1948, v. 3, p. 137.
86. Shafer M. W." J. Appl. Phys.", 1965, v. 36, p. 1145.
87. Syono Y., Akimoto S., Kohn K. "J. Phys. Soc. Japan", 1969, v. 26, p. 993.
88. Longo J. M., Kafalas J. A. "J. Appl. Phys.", 1969, v. 40, p. 1601.
89. Смоленский Г. А. и др. «Физика твердого тела», 1966, т. 8, с. 2965.
90. Callen E. "J. Appl. Phys.", 1968, v. 39, p. 519.
91. Кирюхин В. П., Соколов В. И. «Журн. эксперим. и теор. физ.», 1966, т. 51, с. 428.
92. Shafer M. W. e. a. "Appl. Phys. Lett.", 1967, v. 10, p. 202.
93. Le Craw R. C., Comstock R. L. Physical Acoustics, V III, p B, Lattice Dynamics. Ed. by W. P. Mason. New York — London, Academic Press, 1965.

94. **Wickersheim K. A.** Magnetism. Ed. G. Rado and H. Suhl. Academic Press, 1963.
95. **Kafalas I. A., Longo J. M.** "Mater. Res. Bull.", 1968, v. 3, p. 501.
96. **Tinkham H.** "J. Appl. Phys.", 1962, v. 33, Suppl., p. 1248.
97. **Wood D. L., Remeika J. P.** "J. Appl. Phys.", 1967, v. 38, p. 1038.
98. **Dillon J. F., Jr.** "J. phys. et radium", 1959, v. 20, p 374; "J. Appl. Phys.", 1958, v. 29, p. 539.
99. **Кринчик Г. С., Четкин М. В.** «Журн. эксперим. и теор. физ.», 1961, т. 40, с. 729; 1961, т. 41, с. 673.
100. **Писарев Р. В., Синий И. Г., Смоленский Г. А.** «Письма ЖЭТФ», 1969, т. 9, с. 112, 264; 1969, т. 57, с. 737.
101. **Dillon J. F.** "J. Appl. Phys.", 1969, v. 40, p. 1231.
102. **Geller S.** "Z. Kristallogr.", 1967, Bd 125, S. 1.
103. **Бокий Г. Б.** Кристаллохимия. М., Изд. МГУ, 1960.
104. **Geller S., Gilleo M. A.** "Acta crystallogr.", 1957, v. 10, p. 787.
105. **Anderson E. E.** "J. Appl. Phys.", 1959, v. 303, p. 299.
106. **Гуревич А. Г., Гублер И. Е., Сафантьевский А. П.** «Физика твердого тела», 1959, т. 1, с. 1860.
107. **Sirvetz M. H., Zneimer J. E.** "J. Appl. Phys.", 1958, v. 29, p. 431.
108. **Wolf W. P., Rodrigue G. P.** "J. Appl. Phys.", 1958, v. 29, p. 105.
109. **Bertaut F., Forrat F.** "Compt. rend. Acad. Sci.", 1957, v. 96, p. 244.
110. **Espinosa G. P.** "J. Chem. Phys." ,1962, v. 37, p. 2344.
111. **Geller S.** e. a. "Phys. Rev.", 1965, v. 137 A, p. 1034.
112. **Geller S., Williams H J., Sherwood R. C.** "Phys. Rev.", 1961, v. 123, p. 1692.
113. **Geller S., Gilleo M. A.** "J. Phys. Chem. Solid.", 1957, v. 3, p. 30.
114. **Pauthenet R.** Thesis, University of Grenoble, 1958.
115. **Geller S.** "Phys. Rev.", 1963, v. 131, p. 1080.
116. **Белов К. П., Белов В. Ф., Тимофеева В. А.** «Кристаллография», 1961, т. 5, с. 699.
117. **Rodrigue G. P., Meyer H., Jones R. V.** "J. Appl. Phys.", 1960, v. 31S, p. 376S.
118. **Pearson R. F.** "J. Appl. Phys.", 1962, v. 33S, p. 1236.
119. **Miyadai T.** "J. Phys. Soc. Japan", 1960, v. 15, p. 2205.
120. **Pearson R. F., Cooper R. W.** "J. Appl. Phys.", 1961, v. 325, p. 2655.
121. **Miyadai T.** "J. Phys. Soc. Japan.", 1962, v. 17, p. 1899.
122. **Guillot M., Pauthenet R.** "J. Appl. Phys.", 1965, v. 36, p. 1003.
123. **Jones R. V., Rodrigue G. P., Wolf W. P.** "J. Appl. Phys.", 1958, v. 29, p. 434.
124. **Dillon J. F.** "Phys. Rev.", 1962, v. 127, p. 1495.
125. **Bertaut F., Forrat F.** "Compt. rend. Acad. Sci.", 1956, v. 243, p. 1219.
126. **Gilleo M. A., Geller S.** "J. Appl. Phys.", 1958, v. 29, p. 380.
127. **Gilleo M. A., Geller S.** "Phys. Rev.", 1958, v. 110, p. 73.
128. **Geller S.** e. a. "J. Appl. Phys.", 1965, v. 36, p. 88.
129. **Cunningham J. B., Jr.** "J. Appl. Phys.", 1965, v. 36, p. 2491.
130. **Bozorth R. M., Geller S.** "J. Phys. Chem. Solid.", 1959, v. 11, p. 263.
131. **Geller S.** e. a. "J. Phys. Chem. Solid.", 1959, v. 12, p. 111.
132. **Geller S.** e. a. "J. Phys. Chem. Solid.", 1960, v. 13, p. 28.
133. **Geller S.** e. a. "J. Appl. Phys.", 1965, v. 36, p. 321.
134. **Espinosa G. P.** "Inorg. Chem.", 1964, v. 3, p. 881.
135. **Geller S.** e. a. "Appl. Phys. Lett.", 1963, v. 3, p. 21.
136. **Geller S.** e. a. "J. Appl. Phys.", 1964, v. 35, p. 570.
137. **Geller S.** e. a. "J. Appl. Phys.", 1964, v. 35, p. 542.
138. **Iida S.** "J. Phys. Soc. Japan", 1967, v. 22, p. 1201.
139. **Clark A. E., Strakna R. E.** "J. Appl. Phys.", 1961, v. 32, p. 1172.
140. **Comstock R. L.** "Proc. IEEE", 1965, v. 53, p. 1508.
141. **Le Craw R. C., Remeika J. P., Matthews H.** "J. Appl. Phys.", 1965, v. 36, p. 901.
142. **Spencer E. C., Le Craw R. C., Clogston A.** "Phys. Rev. Lett.", 1959, v. 3, p. 32.
143. **Le Craw R. C.** e. a. "Phys. Rev. Lett.", 1963, v. 11, p. 490.
144. **Dillon J. E., Jr., Nielsen J.** "Phys. Rev. Lett.", 1959, v. 3, p. 30.
145. **Calhoun B. A., Overmeyer J., Smith W. V.** "Phys. Rev.", 1957, v. 107, p. 993.
146. **Geschwind S., Walker L. R.** "J. Appl. Phys.", 1959, v. 30, p. 1635.
147. **Kohn K., Fukuda R., Iida S.** "J. Phys. Soc. Japan", 1967, v. 22, p. 333.
148. **Callen E. R.** e. a. "Phys. Rev.", 1963, v. 130, p. 1735.
149. **Clark A. E., De Savage B. F., Callen E. R.** "J. Appl. Phys.", 1965, v. 35, p. 1028.
150. **Mc Duffie G. E., Cunningham J. R., Jr.** "J. Appl. Phys.", 1960, v. 31, p. 475.
151. **Смоленский Г. А., Чжан-Цзун, Шер Е. С.** «Физика твердого тела», 1961, т. 3, с. 1808.
152. **Cunningham J. R., Jr.** "J. Appl. Phys.", 1965, v. 36, p. 2491.
153. **Geller S. e. a.** «Bull Syst. Techn. J.», 1964, v. 43, p. 565.
154. **Яковлев Ю. М., Лебедь Б. М.** «Физика твердого тела», 1962, т. 4, с. 3654.
155. **Jonker G. H., Wijn H. P. J., Broun P. B.** «Philips Techn. Rev.», 1956/1957, v. 18, p. 145.
156. **Braun P. B.** "Philips Res. Repts.", 1957, v. 12, p. 491.
157. **Kohn J. A., Eckart D. W.** "Z. Kristallogr.", 1964, Bd 119, S. 454.
158. **Kohn J. A., Eckart D. W.** "J. Appl. Phys.", 1964, v. 35, p. 968.
159. **Ситидзе Ю., Само Х.** Ферриты. Пер. с япон. М., «Мир», 1964.
160. **Villers G.** "Compt. rend. Acad. Sci.", 1959, v. 248, p. 1974.
161. **Pauthenet R., Rimet G.** "Compt. rend. Acad. Sci.", 1959, v. 249, p. 565.
162. **Kojima H.** "Sci. Repts. Res. Inst. Tôhoku Univ.", 1955, v. A7, p. 502.
163. **Tauber A.** "J. Appl. Phys.", 1963, v. 34, p. 1265.
164. **Savage R. O., Jr., Dixon S., Jr., Tauber A.** "J. Appl. Phys.", 1965, v. 36, p. 873.
165. **Taft D. R.** "J. Appl. Phys.", 1964, v. 35, p. 776.
166. **Levine B. F., Nowlin C. H., Jones R. V.** "Phys. Rev.", 1968, v. 174, p. 57.
167. **Dillon J. F., Jr., Kamimura H., Remeika J. P.** "J. Phys. Chem. Solid", 1966, v. 27, p. 1531.
168. **Sugawara F.** e. a. "J. Phys. Soc. Japan", 1968, v. 25, p. 1553.
169. **Боков В. А.** и др. «Физика твердого тела», 1965, т. 7, с. 3695.
170. **Bertaut E. F., Forrat F.** "J. Appl. Phys.", 1958, v. 29, p. 247.
171. **Cloud W. H.** "Phys. Rev.", 1958, v. 111, p. 1046.
172. **Bozorth R. M., Walsh D. E.** "J. Phys. Chem. Solid", 1958, v. 5, p. 299.
173. **Knox K., Geller S.** "Phys. Rev.", 1958, v. 110, p. 771.
174. **Shafer M. W., Mc Guire T. R.** "J. Appl. Phys.", 1964, v. 35, p. 984.

ГЛАВА 30

АНТИФЕРРОМАГНЕТИКИ

30.1. ВВЕДЕНИЕ

Обменное взаимодействие, обусловливающее упорядоченную магнитную структуру вещества, может приводить как к параллельной, так и к антипараллельной ориентации магнитных моментов соседних ионов в кристаллах. Вещества, в которых происходит полная (или почти полная) компенсация антипараллельных моментов отдельных ионов, называют *антиферромагнетиками*. Сведения о магнитной структуре и свойствах антиферромагнетнков можно найти в монографиях [1—7]. 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.

30.2. МАГНИТНЫЕ И МАГНИТООПТИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА ЛЕГКООСНЫХ АНТИФЕРРОМАГНЕТИКОВ (НА ПРИМЕРЕ MnF_2)

Простейшим двухподрешеточным антиферромагнетиком, свойства которого в настоящее время изучены наиболее детально, является MnF_2 (рис. 30.1). Нейтронограммы, подтверждающие данную структуру, представлены на рис. 30.2. Температурная зависимость интенсивности разрешенного для магнитного рассеяния пика (100) позволяет определить температуру магнитного упорядочения — температуру Нееля (T_N) (рис. 30.3). Магнитная восприимчивость выше точки Нееля подчиняется закону Кюри — Вейса $\chi = \frac{c}{(T-\theta)}$ ($\theta < 0$); ниже точки Нееля поведение магнитной восприимчивости зависит от направления внешнего магнитного поля относительно осей кристалла. Одноосные кристаллы, т. е. кристаллы, имеющие одно выделенное направление (для MnF_2 это легкая ось, т. е. ось, вдоль которой в положении равновесия ориентируются магнитные моменты подрешеток), обычно характеризуются магнитной восприимчивостью при поле, параллельном оси ($\chi_\parallel$) и при поле, перпендикулярном к оси ($\chi_\perp$). При $T = T_N$ магнитная восприимчивость $\chi_\parallel$ имеет максимум (рис. 30.4). В точке Нееля имеет также место чет-

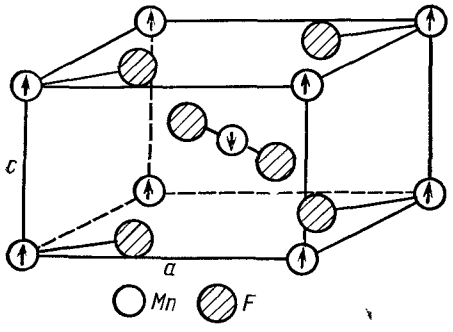


Рис. 30.1. Магнитная структура MnF_2 при $T < T_N$ [6].

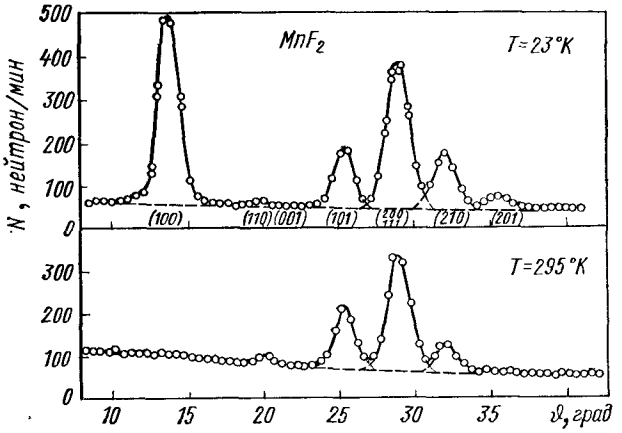


Рис. 30.2. Зависимость числа нейтронов N, рассеянных на угол ϑ, (нейтронограммы) для MnF_2 в парамагнитном ($T = 295°$ K) и антиферромагнитном ($T = 23°$ K) состояниях [14]. Пики (100) и (201), запрещенные при ядерном рассеянии, разрешены при магнитном рассеянии и появляются при переходе в антиферромагнитное состояние.

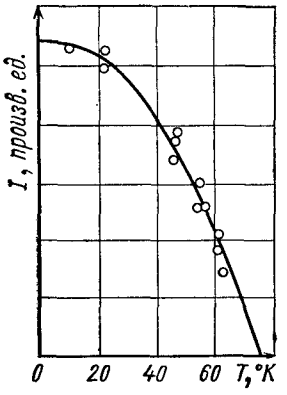


Рис. 30.3. Зависимость интенсивности I пика (100) рассеяния нейтронов для MnF_2 от температуры [14]. (Кружки — экспериментальные данные; сплошная кривая — функция Бриллюэна для $s = 5/2$.)

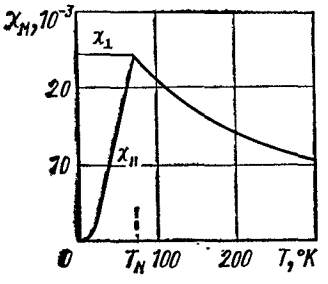


Рис. 30.4. Зависимость восприимчивостей $\chi_\parallel$ и $\chi_\perp$ монокристалла MnF_2 от температуры [16].

кий максимум на кривой удельной теплоемкости (рис. 30.5). Хотя безусловным критерием существования антиферромагнитного порядка могут служить лишь ре-

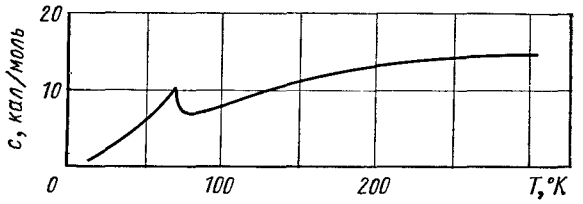


Рис. 30.5. Зависимость удельной теплоемкости MnF_2 от температуры [53].

зультаты экспериментов по дифракции нейтронов, однако наличие аномалий в температурных зависимостях магнитной восприимчивости и теплоемкости позволяет предполагать (с достаточно большой вероятностью) существование в кристалле антиферромагнитного упорядочения.

На рис. 30.6 изображена зависимость намагниченности от напряженности внешнего магнитного поля, па-

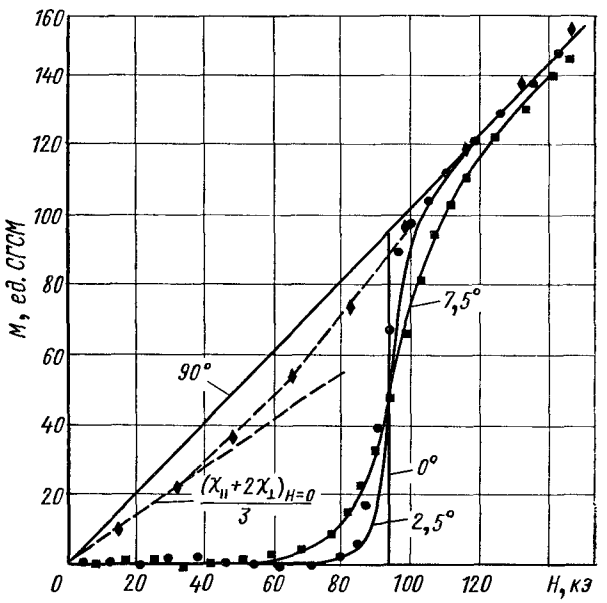


Рис. 30.6. Зависимость намагниченности монокристалла MnF_2 от напряженности магнитного поля, ориентированного вдоль легкой оси ($\theta = 0$) и отклоненного от нее на небольшие углы (θ равно 2,5° и 7,5°); $T = 4{,}2°$ К [30].
Данные для монокристалла: ● — $\theta = 2{,}5°$; ■ — $\theta = 7{,}5°$; ◆ — данные для порошка; сплошные линии — результат расчета в приближении теории молекулярного поля.

раллельного легкой оси. В критическом поле $H_c = 93{,}3$ кэ на кривой наблюдается резкий скачок, соответствующий фазовому переходу первого рода между двумя состояниями магнитной структуры. В этом поле происходит опрокидывание магнитных подрешеток («спин-флоп»*) (рис. 30.7).

* По-английски spin-flop.

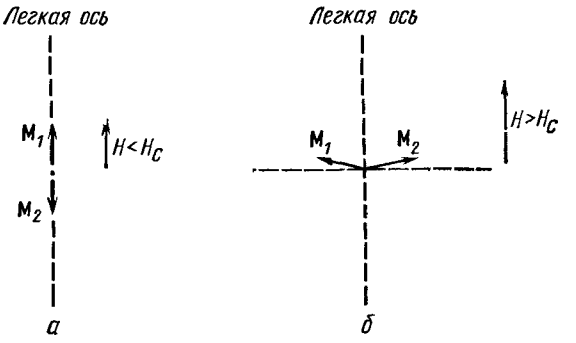


Рис. 30.7. Опрокидывание подрешеток в одноосном антиферромагнетике в магнитном поле, параллельном легкой оси.

На рис. 30.8 представлена магнитная фазовая диаграмма MnF_2 при поле, параллельном легкой оси. Спектр *магнонов* (или, что то же самое, спиновых волн) для двух направлений волнового вектора **q** изображен на

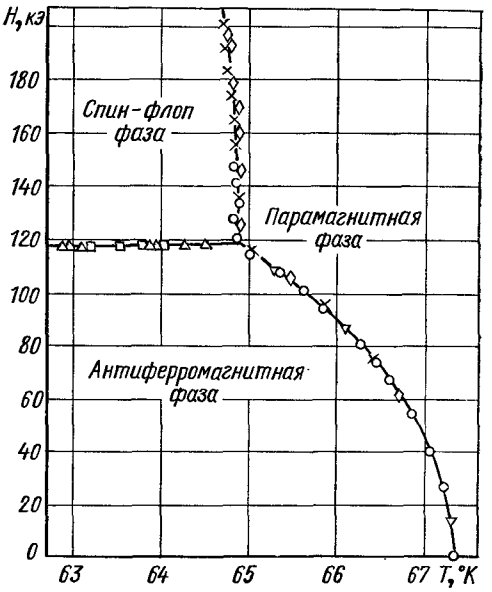


Рис. 30.8. Магнитная фазовая диаграмма MnF_2 в магнитном поле, параллельном легкой оси [25]. Экспериментальные точки получены с помощью измерения поглощения ультразвука в образце; «спин-флоп фаза» — состояние с опрокинутой конфигурацией моментов подрешеток (см. рис. 30.7).

рис. 30.9. Щель в спектре спиновых волн ω_0 (в приближении теории молекулярного поля $\omega_0 = \gamma(\sqrt{H_A H_E} \pm H)$, где H_E и H_A — эффективные поля обмена и анизотропии, H — напряженность внешнего поля, параллельного легкой оси) определяет частоту антиферромагнитного резонанса (АФМР). Зависимость частоты АФМР в нулевом поле от температуры представлена на

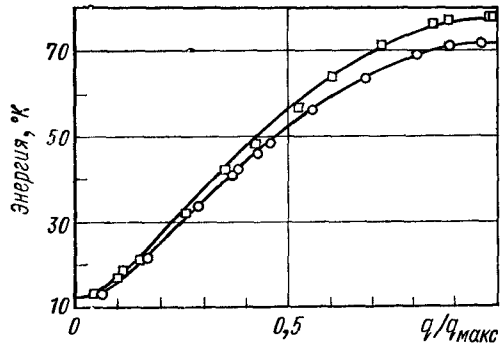


Рис. 30.9 Спектр спиновых волн в MnF_2 при $T = 4{,}2°K$ [31]. Дисперсионные кривые определены из неупругого рассеяния нейтронов для двух направлений волнового вектора q: □ — [001] и ○ —[100].

Рис. 30.10. Температурная зависимость напряженности поля, в котором наблюдается АФМР при экстраполяции к нулевой частоте, изображена на рис. 30.11.

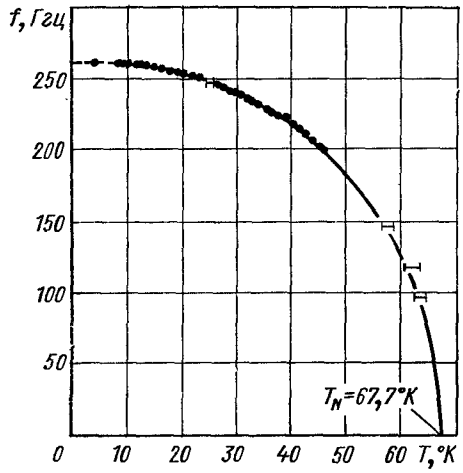


Рис. 30.10. Зависимость частоты АФМР в MnF_2 от температуры [32]. Результаты получены на высоких частотах в малых магнитных полях; горизонтальные черточки указывают погрешность при $H = 0$; сплошная кривая — нормализованная функция Бриллюэна для $s = 5/2$.

В оптических и инфракрасных спектрах антиферромагнетиков имеются особенности, обусловленные магнитным упорядочением и участием магнонов в поглощении (или рассеянии) электромагнитных волн*. Электрически-дипольное поглощение в длинноволновой инфракрасной области, связанное с одновременным

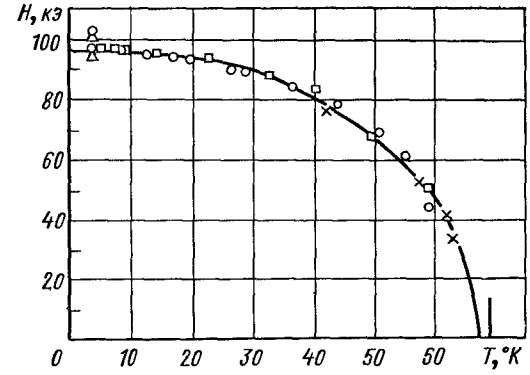


Рис. 30.11. Зависимость напряженности магнитного поля, в котором наблюдается АФМР в MnF_2 на нулевой частоте, от температуры [33]. (Сплошная криван — нормализованная функция Бриллюэна для $s = 5/2$. Вертикальная черточка в малых полях — данные работы [32].)

рождением двух спиновых волн (двухмагнонное поглощение), иллюстрирует рис. 30.12. На рис. 30.13 изобра-

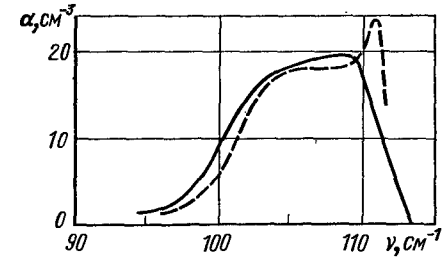


Рис. 30.12. Зависимость коэффициента поглощения α от частоты, характеризующая форму двухмагнонного поглощения, в MnF_2 при $T = 4{,}2°$ K [34]. Электрический вектор электромагнитной волны параллелен легкой оси. Сплошная кривая — эксперимент; пунктир — расчет.

жено спектральное распределение коэффициента поглощения света в области дополнительной полосы поглощения, обусловленной экситон-магнонным переходом. Такие полосы в оптических спектрах антиферромагнетиков называют магнонными спутниками; они отделены от чисто электронных переходов интервалом $\approx kT_N$.

На рис. 30.14 представлены характерные изменения величины эффекта Фарадея в красной и фиолетовой областях спектра при антиферромагнитном упорядочивании. На рис. 30.15 показана зависимость угла вращения плоскости поляризации от напряженности магнитного поля, параллельного легкой оси. Объяснение поведения кривых рис. 30.14 и 30.15 можно найти в обзоре [36].

* Вопросы спектроскопии антиферромагнетиков освещены в работах [4, 26].

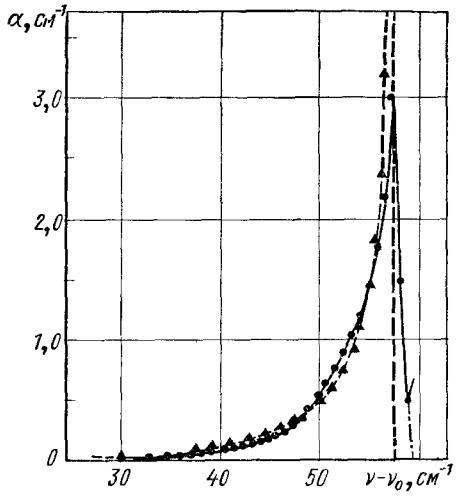


Рис. 30.13. Спектральное распределение иоэффнцнента поглощения света в MnF_2 в области экснтон-магнонной полосы поглощения при $T = 2{,}2°$ К [35].

$\nu_0 = 18\,419{,}6$ см$^{-1}$ — частота магнитной дипольной линии, соответствующей экснтонному возбуждению; максимум спин-волнового спутника (электрически дипольной линии) наблюдается при $\nu = 18477{,}1$ см$^{-1}$. ● — расчет; ▲ — эксперимент.

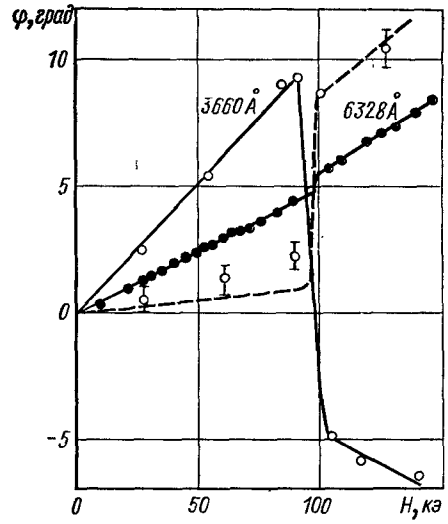


Рис. 30.15. Зависимость величины эффекта Фарадея (угла поворота плоскости поляризации φ) от магнитного поля, параллельного легкой оси [36]. (Пунктнр — магниторезонансное вращение; толщина образца — 2,3 *см*, $T = 20°$К.)

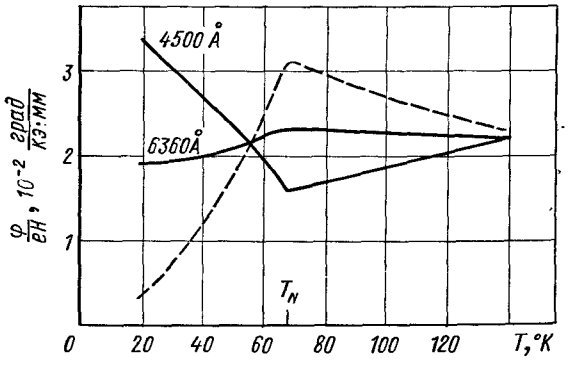
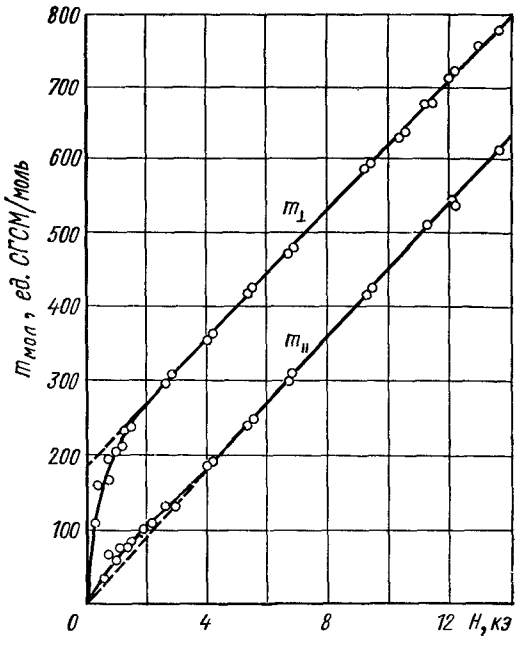


Рис. 30.14. Завнсимость велнчины эффекта Фарадея (φ — угол поворота плоскости полярнзацнн, l — толщнна образца) в MnF_2 прн $H < H_c$ [36, 37] от температуры. Пунктир — магниторезонансное вращение.

30.3. ОСНОВНЫЕ МАГНИТНЫЕ СВОЙСТВА ЛЕГКОПЛОСКОСТНЫХ АНТИФЕРРОМАГНЕТИКОВ (НА ПРИМЕРЕ $MnCO_3$)

Большой интерес с точки зрения физнческнх свойств, а также возможного технического прнменення представляют одноосные антнферромагнетикн с аннзотропией типа «легкая плоскость» (АФЛП). Выделенное направленне в этих крнсталлах является трудной осью для магнитных моментов подрешеток. Магнитная анизотропия в перпенднкулярной к этому направлению плоскости (базисной плоскости) обычно много меньше осевой анизотропии, и ею часто пренебрегают. Кривые на-



Рнс.30.16. Зависимость молярного магнитного момента m от напряженности поля H в типичном АФЛП $MnCO_3$ при $T = 4{,}2°$ К [8], $m_\parallel$ — поле направлено вдоль трудной оси; $m_\perp$ — в базнсной плоскостн. (Наличне в образце спонтанного момента обусловлено взанмодействием Дзялошинского, а не тнпом анизотропии.)

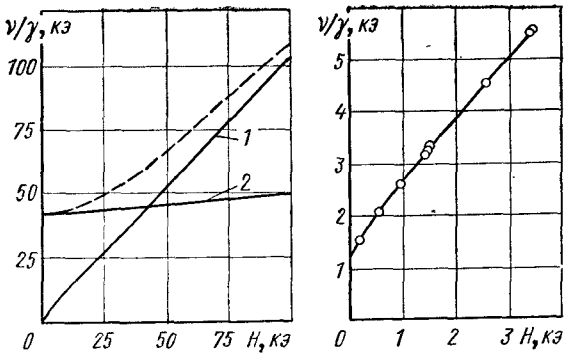


Рис. 30.17. Спектр АФМР в $MnCO_3$ при $T = 4{,}2°$ К [17].

Сплошные кривые — поле приложено в базисной плоскости; пунктир — перпендикулярно к ней; *1* — квазиантиферромагнитная ветвь колебаний; *2* — квазиферромагнитная ветвь. На рисунке справа экспериментальные результаты работы [41] для малых значений поля.

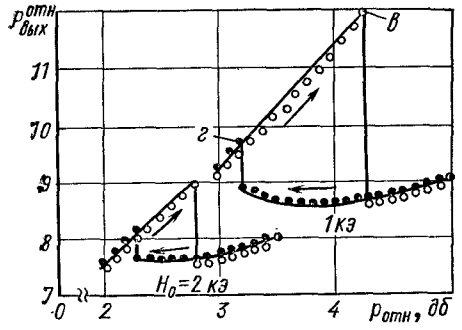


Рис. 30.18. Зависимость прошедшей мощности от мощности на входе резонатора при фиксированных значениях магнитного поля H_0 (поле приложено в базисной плоскости) для $MnCO_3$ при $T = 1{,}7°$ К, $\lambda_{СВЧ} = 8$ *мм* [13]. В точке *в* — скачкообразное возбуждение спин-волновых пар, в точке *г* — их гашение (срыв).

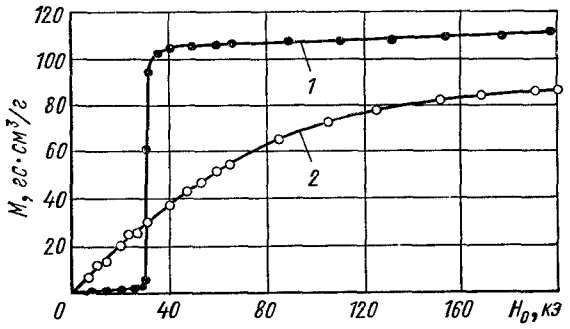


Рис. 30.19. Кривые намагничивания $FeBr_2$ [38]:

1 — метамагнитное состояние, $T = 4{,}2°$К; *2* — парамагнитное состояние, $T = 20{,}4°$К.

магничивания и спектр АФМР в кристаллах, обладающих такого типа анизотропией, существенно отличаются от соответствующих характерностик легкоосных антиферромагнетиков (рис. 30.16 и 30.17).

Две ветви АФМР и АФПЛ различаются прежде всего симметрией участвующих в колебаниях компонент намагниченностей подрешеток [39]. Квазиферромагнитная ветвь (рис. 30.17) имеет щель $\omega_{АФМР}$ $(H = 0)$, определяемую средним геометрическим большого обменного поля и очень малого поля эффективной анизотропии в базисной плоскости. В последнюю, благодаря малости магнитокристаллографической анизотропии в базисной плоскости, могут давать заметный вклад магнитоупругое [40] и (при низких температурах) сверхтонкое [41] взаимодействия. Аналогичным образом большое обменное поле усиливает влияние магнитоупругого взаимодействия на спектр фононов, приводя к сильной зависимости скорости звука в АФЛП от напряженности магнитного поля (точнее, от его компоненты, параллельной легкой плоскости, — см. [10]). Особенности спектра спиновых волн в АФЛП приводят к возможности параметрического (порогового) возбуждения спиновых волн в этих кристаллах [12]. В $MnCO_3$ при параллельной ориентации высокочастотного и статического магнитных полей параметрическое возбуждение спиновых волн квазиферромагнитной ветви происходит с участием вынужденных колебаний квазиантиферромагнитной ветви и может иметь скачкообразный характер — рис. 30.18 [13]. Кроме свойств $MnCO_3$ в настоящее время изучены свойства и других АФЛП: $CoCO_3$, $NiCO_3$, FeF_3, $FeBO_3$, α-Fe_2O_3, $(T^*_M < T < T_N)$, $CsMnF_3$ и др. (табл. 30.1).

30.4. МЕТАМАГНЕТИКИ

Под *метамагнетиками* в настоящее время понимаются антиферромагнетики, у которых эффективное поле магнитной анизотропии больше эффективного поля обменного взаимодействия: $H_A \gg H_E$. Типичное поведение кривых намагничивания метамагнетиков на примере $FeBr_2$ демонстрирует рис. 30.19. При $T < T_N$ и поле $H = H_0$ вещество переходит из антиферромагнитной фазы в ферромагнитную, минуя фазу с опрокинутыми подрешетками (спин-флоп фазу). Ниже приводятся температура упорядочения и значение поля перехода (при $T << T_N$) некоторых типичных метамагнетиков [5]:

	T, °K	H, *кэ*
$FeCl_2$	23,5	10,5
$FeBr_2$[2*]	11	31
$FeCO_3$	38	150

Более подробные сведения о свойствах метамагнетиков можно найти в монографиях [1, 5].

30.5. АНТИФЕРРОМАГНЕТИКИ С ВЗАИМОДЕЙСТВИЕМ ДЗЯЛОШИНСКОГО

Существует целый ряд антиферромагнитных кристаллов, при описании магнитных свойств которых, кроме изотропного обменного взаимодействия, определяю-

* T_M (точка Морина) — температура, при которой α-Fe_2O_3 переходит из легкоосного состояния в легкоплоскостное.

2* Кристалл $FeBr_2$ обладает антиферромагнитной слоистой структурой, характерной для многих метамагнетиков (два соседних слоя металлических ионов имеют антипараллельное направление магнитных моментов).

щего собственно магнитное упорядочение, необходимо учитывать специфическое анизотропное взаимодействие обменно-релятивистского происхождения — взаимодействие Дзялошинского (ВД)*. ВД, как правило, приводит к небольшому наклону магнитных моментов подрешеток друг относительно друга и образованию слабого ферромагнитного момента. Антиферромагнетики, обладающие слабым спонтанным моментом ($MnCO_3$, $CoCO_3$, α-Fe_2O_3 ($T > T_M$), CuF_2, NiF_2, $RFeO_3$, где R редкоземельные элементы $NaNiF_3$, $YCrO_3$ и др.) часто называют слабыми ферромагнетиками[2*]. В случае, когда подрешеток больше двух, их скос может не приводить к появлению спонтанного момента[3*]. В четырехподрешеточных антиферромагнетиках (например, Cr_2O_3 [9], $CoSO_4$, $CuCl_2 \cdot 2H_2O$ [5]) две подрешетки дают слабый суммарный момент $+m$, а две другие $-m$, так что полный момент образца равен нулю. Существует много кристаллов (наиболее характерные примеры: α-Fe_2O_3 при $T < T_M$; CoF_2), в которых при $H = 0$ ВД не приводит к скосу магнитных моментов подрешеток, однако его необходимо учитывать для адекватного описания магнитных свойств таких кристаллов в сильных магнитных полях [15, 78].

30.6. ПЬЕЗОМАГНЕТИКИ И МАГНИТОЭЛЕКТРИКИ[4*]

Пьезомагнетики — вещества, у которых при наложении упругих напряжений возникает спонтанный магнитный момент, пропорциональный первой степени величины напряжений. Пьезомагнитный эффект сравнительно мал и практически легче всего может быть обнаружен именно 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]. Пьезомагнитный момент (m_i) связан с тензором упругих напряжений (σ_{ik}) соотношением $m_i = \Lambda_{ijk}\sigma_{jk}$. Для MnF_2 и CoF_2 в соответствии с требованиями симметрии отличны от нуля только три компоненты пьезомагнитного тензора: $\Lambda_{xyz} = \Lambda_{yxz}$ и Λ_{zxy}. При $T = 20{,}4$°K эти компоненты для CoF_2 имеют значения $\Lambda_{xyz} = 2 \cdot 10^{-3}$ *гс·см²/кГ* и $\Lambda_{zxy} = 0{,}8 \cdot 10^{-3}$ *гс·см²/кГ* [18]. В случае MnF_2 эффект примерно в 100 раз меньше. Пьезомагнитный эффект обнаружен также в $FeCO_3$ [19], α-Fe_2O_3 [20] и др.

Магнитоэлектрики — вещества, у которых при помещении их в электрическое поле возникает магнитный момент, пропорциональный значению поля. Впервые магнитоэлектрический эффект был обнаружен в антиферромагнитном кристалле Cr_2O_3 [21]. Значение эффекта характеризуется тензорным коэффициентом пропорциональности (α_{ik}) между возникающим магнитным моментом и приложенным электрическим полем. Для Cr_2O_3 α_{zz} (250°K) $= 5{,}8 \cdot 10^{-4}$ [22]. Магнитоэлектрический эффект обнаружен также в антиферромагнетиках Fe_2TeO_6, $Nb_2Co_4O_9$, $Nb_2Mn_4O_9$, $Ta_2Mn_4O_9$ [23] и др.[4*]

* Термин ВД появился в литературе по магнетизму после феноменологического объяснения Дзялошинским [9] природы слабого ферромагнетизма в некоторых антиферромагнитных кристаллах. Влияние ВД на основные свойства АФ исследовано в работе [10].

[2*] В зарубежной литературе их называют «скошенными» (canting) антиферромагнетиками.

[3*] В зарубежной литературе — «скрытое скашивание» (hidden canting).

[4*] Подробная классификация материалов по их магнитным, электрическим и упругим свойствам, выполненная на основе кристалломагнитной симметрии, дана в обзоре H. Shmid. «Int. J. Magnetism», 1974, v. 4, p. 337.

30.7. ОРГАНИЧЕСКИЕ АНТИФЕРРОМАГНЕТИКИ

Как правило, в органических парамагнетиках, обладающих значительной величиной обменного взаимодействия, магнитного упорядочения, характерного для неорганических веществ, не наблюдается. Объяснение этого явления можно найти, например, в работе [42]. Однако имеются косвенные свидетельства о существовании антиферромагнитного упорядочения в двух органических кристаллах: иодиде дибензолхрома и α-дифенил-β-пикрилгидразиле (ДФПГ). Антиферромагнитное упорядочение в йодиде дибензолхрома обнаружено при $T < 0{,}75$°K по температурной зависимости сигнала ЯМР на протонах [28]. Переход в антиферромагнитное состояние при $T = 0{,}2 \div 0{,}3$°K обнаружен в ДФПГ по уменьшению интегральной интенсивности электронного парамагнитного резонансного поглощения [27].

30.8. НЕКОТОРЫЕ СВОЙСТВА АНТИФЕРРОМАГНЕТИКОВ

Справочный материал относится в основном к магнитным свойствам диэлектриков, обладающих антиферромагнитным упорядочением. Кроме того, приведены данные о магнитных и электрических свойствах некоторых антиферромагнитных полупроводников и металлических сплавов*.

Условные обозначения к табл. 30.1

T_N, $T_N(R)$ — температура антиферромагнитного упорядочивания, температура упорядочения ионов R

χ_M — молярная магнитная восприимчивость ед. СГСМ/*моль* = *см³/моль*

θ, c_M — постоянные в законе Кюри—Вейса $\chi_M = c_M/(T - \theta)$; $\theta < 0$

p — эффективное число магнетонов Бора в выражении, определяющем c_M ($c_M = Np^2\mu_B^2/3k$)

n_S — число магнетонов Бора на атом в состоянии насыщения

АФ, П, Ф, СФ — антиферро-, пара-, ферро- и слабоферромагнитные состояния вещества. П → АФ — переход между состояниями

* Сведения о магнитной структуре многих антиферромагнетиков, исследованных техникой нейтронной дифракции, содержатся в работе [3].

В статье Г. А. Смоленского и Г. М. Недлина (В сб.: Физика магнитных диэлектриков. М., «Наука», 1974, с. 8) представлены основные классы антиферромагнитных диэлектриков.

Значения T_N многих антиферромагнетиков можно найти в книге Solids State Physics Literature Guides, 1973, v. 5. Bibliography of magnetic materials and tabulation of magnetic transition temperatures. Comp. by T. F. Connoly, E. D. Copenhaver.

$T_п$ — температура переориентации магнитных моментов относительно кристаллических осей

σ — спонтанный магнитный момент, $гс \cdot см^3$ (СГСМ)

$\sigma\,(T)$* — значение спонтанного момента при температуре T°К

μ — магнитный момент иона (атома)

$\mu_A\,(T)$* — магнитный момент иона (атома) A при температуре T°К (в магнетонах Бора μ_B)

H_E^{2*} — эффективное обменное поле

H_A^{2*} — эффективное поле магнитной анизотропии

$H_Д^{2*}$ — эффективное поле, связанное с взаимодействием Дзялошинского [2, 9] (см. разд. 30. 5)

H_c^{2*} — значение внешнего магнитного поля, при котором наблюдается та или иная особенность в зависимости магнитного момента вещества от магнитного поля

$H_{рез}^{2*}$ — значение магнитного поля, при котором наблюдается АФМР

$\Delta H_{рез}$ — ширина линии АФМР по полю при $\nu_{АФМР} = \text{const}$

$\lambda\,(0)$ — длина волны, соответствующая частоте АФМР в нулевом магнитном поле (при $T \ll T_N$)

c — ось наивысшей симметрии в тригональной, гексагональной и тетрагональной сингониях

$[a]$, $[b]$, $[c]$ — кристаллические оси в моноклинной и орторомбической сингониях

ρ — удельное сопротивление

E_g — значение энергетической щели в спектре электронных возбуждений для веществ, обладающих полупроводниковыми свойствами

Индексы в обозначениях отдельных физических величин[3*]

$\parallel$, $\perp$ — данная величина относится к направлению, параллельному выделениой в кристалле оси, или направлению, перпендикулярному к ней

$[ikl]$, $[a]$, $[b]$, $[c]$ — данное значение отиосится к соответствующему кристаллографическому направлению

При числовых значениях магнитной восприимчивости χ:

а — значение восприимчивости в точке Нееля

б — значение восприимчивости при $T \to 0$°К

в — значение восприимчивости при $T = 293$°К

г — значение восприимчивости при $T = 4{,}2$°К

д — значение восприимчивости при $T = 77$°К

Классификация соединений в таблице дана по магнитному атому. Расположение соединений в таблице соответствует порядковому номеру магнитного атома в таблице Менделеева. Соединения с одиим и тем же магнитным атомом расположены в порядке возрастающей сложности (например, соединения, состоящие из трех элементов вида $R_i A_k B_l$ с магнитным атомом R, расположены в порядке возрастания числа $n = 100i + 10_k + j$; при равных числах n соединения расположены в порядке номеров таблицы Менделеева элементов A и B).

---

* $\sigma\,(0°)$, $\mu\,(0°)$ — значения при $T \to 0$.

2* Если не указана конкретная температура измерения, значение поля дается для $T \ll T_N$.

3* Те же индексы, стоящие при числовых значениях, означают, что данное измерение проводилось в соответствующем направлении.

Свойства антиферромагнетиков

Вещество	Структура: кристаллическая	Структура: магнитная	T_N, °К	χ_M, 10^{-3} $\frac{\text{ед.СГСМ}}{\text{моль}}$	$-\theta$, °К	Дополнительные сведения	Литература
KO_2^*	Тетрагональная D_{4h}^{17}	—	7	—	—	—	[207]
TiH_2	Кубическая	—	300	0,22[a]	—	—	[186]
$TiCl_3$	—	—	100	—	—	—	[188]
Ti_2O_3	Тригональная D_{3d}^6	—	248	0,24[a]	2000	—	[187]
α-VS	Гексагональная D_{6h}^1	—	1040; 900[2*]	0,066[a]	3000	—	[274]
α-VSe	Гексагональная D_{6h}^4	—	163	0,62[a]	2570	—	[274]
VO_2	Тетрагональная D_{4h}^{14}	—	343	0,66[в]	1360	$\chi(T_N+0)-\chi(T_N-0)=0{,}58\ \frac{\text{ед.СГСМ}}{\text{моль}}$	[280]
VF_2	Тетрагональная D_{4h}^{14}	—	7	—	80	—	[285]
VCl_3	Тригональная D_{3d}^6	—	30	—	—	—	[29]
V_2O_3	Тригональная D_{3d}^6	$\mu \parallel c$[3*]	150—170	—	—	$\rho(T_N+0)/\rho(T_N-0) \simeq \simeq 10^9$	[3, 32, 283]
α-Cr	Кубическая O_h^9	$\mu \parallel [100]$ Спиральная	311	0,16[б]	—	$\mu\ (78°) = 0{,}59\mu_B$	[2,3]
CrN	Орторомбическая[4*]	$\mu \parallel [110]$ Удвоение периода по двум направлениям	282[5*]; 273	—	—	$\mu_{Cr}\ (77°) = 2{,}4\mu_B$	[3, 286]
CrS	Моноклинная	—	—	—	695	$p = 4{,}22$	[51]
CrSe	Гексагональная D_{6h}^4	Удвоение периода	270—300	—	—	—	[3, 287]
CrSb	Гексагональная D_{6h}^4	$\mu \parallel c$ Слоистая	700—723	1,92[a]	—	$\mu_{Cr} = 2{,}84\mu_B$	[3, 288]

* Магнитные свойства KO_2 обусловлены наличием неспаренного электрона у $2p$ молекулярной орбитали π-типа иона O_2^-.

2* Из тепловых измерений.

3* Предполагается магнитная структура с чередованием магнитных моментов +—+ вдоль оси c [281].

4* Кубическая (O_h^9 при $T > T_N$).

5* При $T = T_N$ — фазовый переход первого рода [246].

Вещество	Структура: кристаллическая	Структура: магнитная	T_N, °K	$\chi_м$, 10^{-6} ед. СГСМ/моль	$-\theta$, °K	Дополнительные сведения	Литература
CrF_2	Моноклинная C_{2h}^5	Магнитные моменты параллельны длинной связи Cr—F	53	—	—	—	[289]
$CrCl_2$	Орторомбическая D_{2h}^{12}	Удвоение периода вдоль [b] и [c]*	20	—	—	—	[289]
CrF_3	Тригональная D_{3d}^6	$\mu \parallel (111)$	80	—	160	$c_м = 2{,}07$ $\sigma(0) = 168$ ед.СГСМ/*моль* $\mu(4{,}2°) = 3\mu_B$	[3, 290]
$CrCl_3$	Тригональная D_3^3 или D_3^5	$\mu \perp c$ Слоистая	17	$6000^a_{\parallel}$		$c_м = 1{,}83$ $H_{c,\parallel} = 5$ *кэ*, $H_{c,\perp} = 2{,}6$ *кэ*[2*]	[291]
$CrBr_3$	Тригональная C_{3i}^2 или D_{3d}^6	$\mu \perp c$ Слоистая	38	—	—	$H_{c,\parallel} = 2$ *кэ*, $H_{c,\perp} = 8$ *кэ*[2*]	[291]
Cr_2As	Тетрагональная D_{4h}^7	—	393	—	2067	$p = 1{,}8$	[48]
Cr_2O_3	Тригональная D_{3d}^3	$\mu \parallel c$	306—308	$3{,}4^б$		$\mu_{Cr}(4{,}2°) = 2{,}8\mu_B$ $H_{c,\parallel} = 59$ *кэ*[3*] $\lambda(0) = 189$ *мкм*	[3, 293]
Cr_2O_5	—	—	100	—	140	—	[50]
Cr_3S_4	Моноклинная C_{2h}^3	—	280	—	547	—	[47]
Cr_3Se_4	Моноклинная C_{2h}^3	—	80	—	60	—	[47]
Cr_5S_6	Гексагональная	—	305 (П→Ф), 158 (Ф→АФ)	—	—	$\Delta\sigma(158°) = 1{,}85$ ед. СГСМ/*г* $\rho(77°) = 5 \cdot 10^4$ *ом·см*	[44]
$KCrF_3$	Тетрагональная	Слоистая	77	—	—	—	[52]
$YCrO_3$	Орторомбическая D_{2h}^{16}	$\sigma \parallel [c]$	141	—	—	$H_{c,[a]} = 33$ *кэ*[4*], $\mu_{Cr}(4{,}2°) = 2{,}96\mu_B$	[24, 227]
$LaCrO_3$	Орторомбическая D_{2h}^{16}	—	295; 282[5*]	$1{,}9^a$	600	$\mu_{Cr}(4{,}2°) = 2{,}45\mu_B$	[45, 227]

* Магнитные моменты ионов параллельны длинной связи Cr—Cl.
[2*] При $T = 1{,}7$°K.
[3*] Значение поля опрокидывания подрешеток при $T = 77$°K.
[4*] Значение поля опрокидывания подрешеток; см. работу [250].
[5*] См. первую сноску на с. 610.

Вещество	Структура: кристаллическая	Структура: магнитная	T_N, °K	$\chi_м$, 10^{-3} ед. СГСМ / моль	$-\theta$, °K	Дополнительные сведения	Литература
$CeCrO_3$	Орторомбическая D_{2h}^{16}	—	257*	—	—	—	[227]
$PrCrO_3$	Орторомбическая D_{2h}^{16}	—	239*	—	—	μ_{Cr} (4,2°) = 2,46μ_B	[227]
$NdCrO_3$	Орторомбическая D_{2h}^{16}	—	224* 10(Nd)	—	—	μ_{Cr} (4,2°) = 2,55μ_B μ_{Nd} (4,2°) = 1,3μ_B	[227]
$SmCrO_3$	Орторомбическая D_{2h}^{16}	—	192*	—	—	—	[227]
$EuCrO_3$	Орторомбическая D_{2h}^{16}	—	181*	—	—	—	[227]
$GdCrO_3$	Орторомбическая D_{2h}^{16}	—	170*	—	—	—	[227]
$TbCrO_3$	Орторомбическая D_{2h}^{16}	—	1,5—4,2(Tb): 158*	—	—	μ_{Cr} (4,2°)= 2,85μ_B	[227]
$DyCrO_3$	Орторомбическая D_{2h}^{16}	—	2(Dy) 146*	—	—	μ_{Dy} (1,5°) = 9,6μ_B μ_{Cr} (1,5°) = 2,76μ_B	[227]
$HoCrO_3$	Орторомбическая D_{2h}^{16}	—	12(Ho)** 140—141*	—	—	μ_{Cr} (4,2°) = 2,94μ_B	[227]
$ErCrO_3$	Орторомбическая D_{2h}^{16}	—	16,8(Er) 133*	—	—	μ_{Cr} (4,2°) =2,90μ_B μ_{Er} (4,2°) = 5,2μ_B	[227]
$TmCrO_3$	Орторомбическая D_{2h}^{16}	—	4 (Tm) 124*	—	—	μ_{Cr} (4,2°) = 2,58μ_B μ_{Tm} (4,2°) = 0,8μ_B	[3]
$YbCrO_3$	Орторомбическая D_{2h}^{16}	—	3(Yb) 118*	—	—	μ_{Cr} (4,2°) = 2,80μ_B	[227]
$LuCrO_3$	Орторомбическая D_{2h}^{16}	—	112*	—	—	μ_{Cr} (4,2°) = 2,51μ_B	[227]
$PbCrO_3$	Кубическая T_d^6	—	210—250	—	—	μ_{Cr} (0°) = 2,2μ_B	[3, 55]
$CrVO_4$	Орторомбическая D_{2h}^{17}	—	50	—	—	μ_{Cr} (4,2°)=2,1±0,2μ_B	[292]

* Температура упорядочивания моментов хрома. Сведения о магнитной структуре ортохромитов (они имеют, как правило, сложную неколлинеарную структуру) можно найти в работе [3].

** При $T < 12$°K магнитная структура системы ионов Ho имеет ферро-[μ (4,2°)= 3,4μ_B] и антиферромагнитную [μ(4,2°)=7,0μ_B] компоненты [3].

Вещество	Структура: кристаллическая	Структура: магнитная	T_N, °К	χ_M, 10^{-3} ед. СГСМ / моль	$-\theta$, °К	Дополнительные сведения	Литература
$UCrO_4$	Орторомбическая D_{2h}^{14}	$\mu \perp [c]$	45	—	—	—	[236]
$MgCr_2O_4$	Кубическая O_h^7	Неколлинеарная $\mu \parallel [100]$ и $\mu \parallel [010]$	14	—	350	μ_{Cr} (4,2°) = 2,63μ_B	[3]
$ZnCr_2O_4$	Кубическая O_h^7	Неколлинеарная	15—16	—	—	—	[3, 46]
$ZnCr_2Se_4$	Кубическая O_h^7	$\mu \parallel (001)$	115; (П→Ф); 22 (Ф→АФ)	340г	115	μ_{Cr} (4,2°) = 3μ_B	[3, 54]
Cr_2TeO_6	Тетрагональная D_{4h}^{14}	$\mu \perp c$	>4,2	—	—	μ (4,2°) = 2,45μ_B	[257]
Cr_2WO_6	Тетрагональная D_{4h}^{14}	$\mu \perp c$	>4,2	—	—	μ (4,2°) = 2,14μ_B	[257]
$CrK(SO_4)_2 \cdot 12H_2O$	Кубическая T_h^6	—	0,004	$2 \cdot 10^{6а}$	—	—	[29]
$Cr(CH_3NH_3) \cdot (SO_4)_2 \times 12H_2O$	—	—	0,02	—	—	—	[49]
α-Mn	Кубическая T_d^3	—	100	—	—	—	[2]
MnO	Кубическая с ромбоэдрическими искажениями ниже T_N	$\mu \parallel (111)$	120	6б	610	$c_M = 4,4$ λ (0) = 362 *мкм* $\mu = 5\mu_B$	[3, 56, 68]
MnP	Орторомбическая D_{2h}^{16}	При $T < 47$°К геликоидальная	291 (П→Ф) 50* (Ф→АФ)	—	—312	$H_{c,[c]} = 2,4$ *кэ*2* $H_{c,[b]} = 6,2$ *кэ* $c_M = 10,4$	[57, 245]
β-MnS	Гексагональная C_{6v}^4	$\mu \parallel [001]$, $\mu \perp (011)$	165; 110	6а	528	μ (4,2°) = 5μ_B	[3, 29]
MnSe	Кубическая O_h^5	$\mu \parallel [001]$	247	19а	740	Полупроводник E_g = = 0,68 *эв*	[29, 212]
MnTe	Гексагональная D_{6h}^4	—	307	4,6а	—	Полупроводник E_g=1 *эв* μ_{Mn} (163°) = 4,6μ_B	[3, 29, 213]
MnNi	Тетрагональная	$\mu \perp c$	1140	0,087б	—	μ_{Mn} (0°) = 4μ_B μ_{Ni} (0°) < 0,6μ_B	[62]
MnCu	Тетрагональная	$\mu \parallel c$	300	—	—	Сплав (69—85%Mn)	[59]

* T (Ф → АФ) = 47° по данным работы [245].
** T = 4,2°К.

Вещество	Структура: кристаллическая	Структура: магнитная	T_N, °K	$\chi_м$, 10^{-3} ед. СГСМ/моль	$-\theta$, °K	Дополнительные сведения	Литература
MnRh	Тетрагональная*	—	170	$0{,}8^б$	260	$c_м = 1{,}35$	[60]
MnAu	Кубическая O_h^1	—	500—520	$4{,}3^а$	337	$c_м = 3{,}72$: $\mu_{Mn} = 4{,}2\ \mu_B$	[3, 61]
MnHg	Кубическая O_h^1	$\mu \parallel [100]$ при $T < 193$°K	460; 198	$9{,}4^а$	—	$\rho(T_N) = 5 \cdot 10^{-5}$ ом·см	[3, 58]
MnO_2	Тетрагональная	$\mu \perp c$	92	$2{,}8^б$	—	—	[63]
MnS_2	Кубическая T_h^6	$\mu \parallel c$	48; 20	$7{,}1^д$	592	$c_м = 4{,}91$: $\mu(4{,}2°) = 5\mu_B$	[3, 64]
$MnSe_2$	Кубическая T_h^6	$\mu \parallel c$	75	$6{,}6^д$	483	$c_м = 4{,}36$; $\mu(4{,}2°) = 5\mu_B$	[64]
$MnTe_2$	Кубическая T_h^6	$\mu \perp c$	75—87	$6{,}8^д$	528	$c_м = 4{,}78$: $\mu(42°) = 5\mu_B$	[3, 64]
MnF_2	Тетрагональная D_{4h}^{14}	$\mu \parallel c$	72	$25^б_\perp$	113	$c_м = 4{,}47$ $H_{c.\parallel} = 93{,}3$ кэ[2*] $\lambda(0) = 1{,}11$ мм $\Delta H_{рез} = 3$э при $\nu = 23$ Гц	[56, 185]
$MnCl_2$	Тригональная D_{3d}^5	Слоистая	1,96	—	3,3	—	[66]
$MnBr_2$	Тригональная D_{3d}^3	$\mu \parallel (011)$ Слоистая	2,16	—	4,66	—	[67]
MnI_2	Тригональная D_{3d}^3	Геликоидальная $\mu \parallel (307)$	3,4	—	—	$\mu(1{,}3°) = 4{,}6\mu_B$	[214]
$MnSn_2$	Тетрагональная D_{4h}^{18}	$\mu \parallel c$[3*]	330	—	—	$\mu(77°) = 2{,}36\mu_B$	[65]
$MnAu_2$	Тетрагональная D_{4h}^{17}	Спиральная	363	—	—	—	[69]
MnF_3	Моноклинная	Слоистая	47	$75^б$	—8	$c_м = 3{,}1$ $\mu(0°) = 2\mu_B$	[70]
$MnAu_3$	—	—	145	$77{,}5^б$	—200	$c_м = 2{,}5$	[61]
Mn_2As	Тетрагональная D_{4h}^7	—	573	—	1947	$p = 2{,}58$	[97]
$TbMn_2$	Кубическая	Спиральная	40	—	—	—	[73]
Mn_2O_3	Кубическая T_h^7	—	80	—	—	—	[71]

* При $T > T_N$ — кубическая (O_h^1).

2* Значение поля опрокидывания подрешеток при $T = 4{,}2$°K.

3* При $T < 7{,}3$°K сложная модулированная спиновая структура.

Вещество	Структура: кристаллическая	Структура: магнитная	T_N, °K	χ_M, 10^{-3} ед. СГСМ/моль	$-\theta$, °K	Дополнительные сведения	Литература
Pd_3Mn_2	—	—	593	0,02[а]	430	—	[72]
Mn_3Ge_2	—	—	283(П→Ф); 164 (Ф→АФ)	—	—300	$c_м = 0,775$ $\Delta\sigma(164°) = 3,5$ ед. СГСМ/г	[74]
$MnCO_3$	Тригональная D^6_{3d}	$\sigma \perp c$	32	43[б]	64,5	$\sigma(0°) = 188$ ед. СГСМ/моль $\lambda(0) = 2,3$ мм $H_Д = 4$ 4 кэ	[75]
$MnSiO_3$	Триклинная	—	—	12,4[в]	45	$p = 5,91$	[77]
$CaMnO_3$	Кубическая (приближенно) O^1_h	Удвоение периода по трем направлениям	130; 95	4,7[а]	425	$\sigma(0°) \neq 0$	[3, 84]
$ScMnO_3$	Гексагональная C^3_{6v}	—	120	—	—	$\mu_{Mn}(4,2°) = 4\mu_B$	[3, 99]
$MnTiO_3$	Тригональная C^2_{3i}	$\mu \parallel [111]$	60—65; 41	—	210	$c_м = 4,15$ $H_{c,\parallel} = 52$ кэ $\mu(4,2°) = 4,55\ \mu_B$	[3, 76]
$MnGeO_3$	Орторомбическая D^{15}_{2h}	$\mu \parallel [b]$	16	—	310; 46	$p = 6,02$	[86, 234]
$MnYO_3$	Гексагональная	—	46	—	—	$\sigma(0°) \neq 0$	[47]
$LaMnO_3$	Кубическая (приближенно)	Слоистая	131; 100	48,4[а]	—40	$\sigma(0°) = 1210$ ед.СГСМ/моль	[3, 85]
$HoMnO_3$	Гексагональная C^3_{6v}	—	76	—	—	$\mu_{Mn}(4,2°) = 3,5\ \mu_B$	[3, 99]
$ErMnO_3$	Гексагональная C^3_{6v}	—	79	—	—	$\mu_{Mn}(4,2°) = 3,5\mu_B$	[3, 99]
$TmMnO_3$	Гексагональная C^3_{6v}	—	86*	—	—	$\mu_{Mn}(4,2°) = 3,8\ \mu_B$	[3, 99]
$LuMnO_3$	Гексагональная C^3_{6v}	—	91	—	—	$\mu_{Mn}(4.2°) = 3,7\ \mu_B$	[3, 99]
$NaMnF_3$	Орторомбическая	$\sigma \parallel [c]$	67	—	—	$H_E = 390$ кэ $H_Д = 4,3$ кэ $H_A = 200$ э	[103]

* Нет уверенности, что наблюдается переход П → АФ.

Вещество	Структура: кристаллическая	Структура: магнитная	T_N, °K	$\chi_м$, 10^{-3} ед. СГСМ/моль	$-\theta$, °K	Дополнительные сведения	Литература
$KMnF_3$	Орторомбическая D_{2h}^{16}	—	88,3	17,7[a]	238	$c_м = 4,73$ $\sigma(4,2°) =$ $=19,3$ ед.СГСМ/*моль**	[80]
$RbMnF_3$	Кубическая	$\mu \parallel [111]$	54	$17,7^a_\perp$	190	$c_м = 4,22$ $H_{c,\parallel} = 2,8$ *кэ* $H_A = 4,5$ *э* $H_E = 890$ *кэ*	[81]
$CsMnF_3$	Гексагональная D_{6h}^4	$\mu \perp c$	64; 53	40[г]	—	$H_{A,\parallel} = 7,5$ *кэ* $H_{A,\perp} = 1,1$ *э* $H_E = 3,5 \cdot 10^5$ *э*	[83]
$TlMnF_3$	Кубическая	—	83; 76	—	125	$H_E = 680$ *кэ* $H_A = 6,7$ *кэ* $\mu(4,2°) = 4,9\ \mu_B$	[224, 225]
$KMnCl_3$	Тетрагональная $[c]/[a]=1,005$	—	100	—	—	—	[82]
$RbMnCl_3$	Кубическая (приближенно)	—	92	—	—	—	[82]
$CsMnCl_3$	Кубическая (приближенно)	—	70	—	—	$\Delta H\ (6°) = 36$ *э*[2*]	[82]
$MnSO_4$	Орторомбическая D_{2h}^{16}	—	11	—	—	—	[78]
$MnUO_4$	Орторомбическая D_{2h}^{28}	слоистая	12	200[a]	8	$c_м = 4,38$	[79]
$Mn(OH)_2$	Тригональная D_{3d}^3	$\mu \parallel c$[3*]	12	—	28	$c_м = 4,26$	[266]
$MnGa_2O_4$	Кубическая O_h^7	$\mu \parallel [111]$	33	—	—	$\mu_{Mn}(4,2°) = 3,6\ \mu_B$	[100]
K_2MnF_4	—	—	45	—	—	—	[222]
α-Cs_2MnCl_4	Орторомбическая	—	0,93[4*]	—	4	—	[240]
$MnNb_2O_6$	Орторомбическая D_{2h}^{14}	$\mu \parallel [100]$[5*]	4,40[6*]	—	—	—	[265]
$Mn_{2-x}Cr_xSb$ $0,025 < x < 0,2$	Тетрагональная D_{4h}^7	—	550[7*] (П→Ф при $x=0$)	—	—	$\sigma_{x=0}=5220$ед. СГСМ/*моль*	[89]

* Спонтанный момент появляется ниже $T=81,5$°K. Изменение магнитной структуры при $T = 81,5$°K является фазовым переходом первого рода.

[2*] Ширина линии АФМР на частоте 9,5 *Гц*.

[3*] В плоскости, перпендикулярной к c, имеет место винтовая структура.

[4*] Из тепловых измерений.

[5*] Моменты почти параллельны оси [100].

[6*] Из измерений магнитоэлектрического эффекта.

[7*] $T_{Ф \to АФ}(x) = 120 \div 385$°K [89].

Вещество	Структура: кристаллическая	Структура: магнитная	T_N, °К	$\chi_м$, 10^{-3} ед. СГСМ/моль	$-\theta$, °К	Дополнительные сведения	Литература
$Mn(C_5H_5)_2$	—	—	134	—	492	$p = 7,18$	[98]
Mn_2SiO_4	Орторомбическая D_{2h}^{16}	$\mu \parallel [a]$*	50	18,8в	163	$c_м = 4,27$	[3, 87]
Mn_3GaC	Кубическая	—	246(П→Ф), 150 (Ф→АФ)	—	—	—	[102]
Mn_3ZnN	Кубическая O_h^1	—	183 (П→Ф); 140 ($АФ_1$→$АФ_2$)	—	—	—	[232]
$CsMn_3Cl_5$	Тетрагональная	—	0,59²*	—	0,9	—	[240]
$Nb_2Mn_4O_9$	Тригональная D_{3d}^4	—	125; 110³*	32б	250	$c_м = 17,2$ Магнитоэлектрик $\mu_{Mn}(4,2°) = 5\mu_B$	[3, 88, 293]
$Ta_2Mn_4O_9$	Тригональная D_{3d}^4	—	103³*	—	—	Магнитоэлектрик	[264; 293]
$Dy_2Mn_4O_9$	Орторомбическая D_{2h}^9		8	—	—	В поле $H=100$ кэ при $T=4$, 2°К максимальный момент вдоль оси $[a]$	[101]
$LiMnPO_4$	Орторомбическая D_{2h}^{16}	$\mu \parallel [100]$	34—42	33а	80	$c_м = 4,65$	[3, 90]
NH_4MnCl_3	Кубическая O_h^1 при $T > T_N$. Орторомбическая D_{2h}^{16} при $T < T_N$	—	105	—	—	—	[263]
$MnCl_2 \cdot 4H_2O$	Моноклинная C_{2h}^5		1,62		1,79	$H_{c,\parallel} = 2,5 \div 5,0$ кэ⁴*	[91, 215]
$MnBr_2 \cdot 4H_2O$	Моноклинная C_{2h}^5	$\mu \parallel [c]$	2,136	—	—	$H_{c,\parallel} = 7,5 \div 10$ кэ⁴*	[92, 215]
$MnSiF_6 \cdot 6H_2O$	Тригональная C_{3i}^2	—	0,1	—	—	—	[104]
$Cs_2MnCl_4 \cdot 2H_2O$	Триклинная	—	1,80²*	—	—	—	[240]

* При $T > T_п = 13$°К; при $T < T_п$ — скошенная спиновая структура [3].
²* Из тепловых измерений.
³* Из измерений магнитоэлектрического эффекта.
⁴* При $T = 1,2$°К.

Вещество	Структура: кристаллическая	Структура: магнитная	T_N, °K	$\chi_м$, 10^{-3} ед. СГСМ/*моль*	$-\theta$, °K	Дополнительные сведения	Литература
$Mn(C_2H_3O_2)\cdot 4H_2O$	Моноклинная		3,2	—	5,2	$c_м = 3{,}19$ $\sigma(0°) = 2790$ ед.СГСМ/*моль*	[94]
$Mn(HCOO)_2\cdot 2H_2O$	Моноклинная C_{2h}^5	$\mu \parallel [100]$*	3,7[2*]	—	—	$c_м = 4{,}37$	[93]
$Mn(NH_4)_2\cdot(SO_4)_2\cdot 6H_2O$	Моноклинная		0,14			$\sigma(0°) = 7{,}82\cdot 10^3$ ед.СГСМ/*моль*	[95]
FeSi	Кубическая T_4	—	443	—	107	$p = 2{,}55$	[135]
FeP	Орторомбическая D_{2h}^{16}	—	—	—	50	$c_м = 1{,}46$	[133]
FeO	Кубическая с ромбоэдрическими искажениями при $T<T_N$	—	198; 186	8[а]	190	$\mu(4,2) = 3{,}3\,\mu_B$ $c_м = 4{,}6$	[3, 68]
FeS	Гексагональная D_{6h}^4	$\mu \parallel c$ при $T<T_п$ $\mu \perp c$ при $T>T_п$ $T_п \approx 400$°K	593—600	2,2[а]	917	—	[3,105]
FeSe	Гексагональная D_{6h}^4	—	847[3*]	—	—	—	[106]
FeTe	—	—	70	—	—	—	[46]
FeRh	Кубическая	—	675 (П→Ф) 350 (Ф→АФ)	15,9[д]	—680	$\Delta\sigma(350°) = 117$ ед. СГСМ/*моль* $\rho(0°) = 5\cdot 10^{-5}$ *ом·см*	[107]
FeF_2	Тетрагональная D_{4h}^{14}	$\mu \parallel c$	78	15,9	117	$c_м = 3{,}88$ $\lambda(0) = 189$ *мкм*	[108]
$FeCl_2$	Тригональная D_{3d}^5	$\mu \parallel c$ Слоистая	23	320[б]	—48	$\mu(4,2°) = 4{,}2\,\mu_B$ $H_{c,\parallel} = 10{,}5$ *кэ*	[3, 67]
$FeBr_2$	Тригоиальная D_{3d}^3	$\mu \parallel c$ Слоистая	11	160[б]	—6	$c_м = 3{,}92$ $H_{c,\parallel} = 31{,}5$ *кэ*	[38]
FeI_2	Тригональная D_{3d}^3	—	10	85[б]	23	$c_м = 4{,}29$	[110]
FeP_2	Орторомбическая D_{2h}^{12}	—	250[4*]	1,18[а]	17	—	[113]
$FeGe_2$	Тетрагональная D_{4h}^{18}	—	77	—	—	—	[137]

* Проявляет свойства, характерные для двумерной модели Изинга [216].

2* При этой температуре упорядочивается только часть магнитных моментов. Остальные моменты обусловливают парамагнитные свойства. При $T = 0.23$°K наблюдается аномалия Шоттки в поведении теплоемкости [216].

3* При $T = 423$°K наблюдается переход АФ → Ф.

4* Нет уверенности, что переход есть П → АФ.

Вещество	Структура: кристаллическая	Структура: магнитная	T_N, °K	$\chi_м$, 10^{-3} ед. СГСМ/моль	$-\theta$, °K	Дополнительные сведения	Литература
$FeSn_2$	Тетрагональная D_{4h}^{18}	—	380	1,95[а]	230	$c_м = 1,4$	[111]
$FeSb_2$	Орторомбическая D_{2h}^{12}	—	773	—	—	—	[112]
$FeTe_2$	—	—	85	—	320	$p = 0,194$	[136]
FeF_3	Тригональная D_{3d}^6	$\mu \parallel (111)$	394; 364	—	—	$\mu(4,2°) = 5\mu_B$	[3, 85]
$FeCl_3$	Гексагональная C_{3i}^2	Спиральная	16; 10	—	115	$p = 5,73$ $\mu(4,2°) = 4,3\ \mu_B$	[3, 134]
$FePt_3$	Кубическая T_d^6	—	120—170	—	—	—	[3, 141]
α-Fe_2O_3	Тригональная D_{3d}^6	$\mu \parallel c$ $0 < T < T_м$* $\mu \perp c$ $T_м < T < T_N$	950	—	—	$H_E = 9000$ кэ $H_Д = 22$ кэ,[2*] $H_{c,\parallel} = 68$ кэ,[2*] $H_{c,\perp} = 160$ кэ, $\sigma(300°) = 70$ ед.СГСМ/моль	[114]
FeOCl	Орторомбическая D_{2h}^{13}	—	92	—	—	—	[252]
$LiFeO_2$	Тетрагональная	Слоистая $\mu \parallel [001]$	315	—	—	—	[119]
β-$FeNaO_2$	Орторомбическая	$\sigma \parallel [b]$ $\mu \parallel [c]$	—	—	—	—	[47]
$CuFeS_2$	Тетрагональная D_{2d}^{12}	$\mu \parallel c$	823	1,1	—	$\mu_{Fe} = 3,85\ \mu_B$ $E_g = 2,5$ эв	[118]
$FeBO_3$	Тригональная D_{3d}^6	$\sigma \perp c$	348	—	—	$H_Д = 62$ кэ[3*] $\mu_{Fe}(77°) = 4,7\ \mu_B$	[3, 254, 255]
$FeCO_3$	Тригональная D_{3d}^6	$\mu \parallel c$	35; 20	17[б]	14	$H_{c,\parallel} = 150$ кэ	[2, 3]
$FeTiO_3$	Тригональная C_{3i}^2	Слоистая $\mu \parallel c$	68; 56	61[б]	—17	$c_м = 3,92$	[3, 116]
$FeVO_3$	Тригоиальиая D_{3d}^6	—	—	—	—	—	[117]
$YFeO_3$	Орторомбическая D_{2h}^{16}	$\sigma \parallel [c]$	643	2,2[г]	—	$\sigma(4,2°) =$ $= 305$ ед. СГСМ/моль $H_c = 72,5$ кэ[4*] $(T = 4,2°K)$	[121]

* При $T = T_м = 262°K$ переход СФ → АФ.

2* При $T = 77°K$ [115].

3* При $T = 293°K$.

4* В поле $H = H_c$ ($H \parallel [a]$) происходит фазовый переход второго рода, заключающийся в изменении магнитной симметрии кристалла [122].

Вещество	Структура: кристаллическая	Структура: магнитная	T_N, °K	$\chi_м$, 10^{-3} ед. СГСМ/*моль*	$-\theta$, °K	Дополнительные сведения	Литература
$LaFeO_3$*	Орторомбическая D_{2h}^{16}	$\sigma \parallel [001]$ Удвоение периода по трем направлениям	738	12[6]	480	σ=243 ед. СГСМ/*моль*[2*]	[124]
$CeFeO_3$	Орторомбическая D_{2h}^{16}	$\sigma \parallel [001]$ $T > T_п$ $T_п = 230°K$	719	—	—	—	[278]
$PrFeO_3$	Орторомбическая D_{2h}^{16}	$\sigma \parallel [001]$	—	—	—	—	[123]
$NdFeO_3$	Орторомбическая D_{2h}^{16}	Удвоение периода по трем направлениям	760	—	—	—	[125]
$SmFeO_3$	Орторомбическая D_{2h}^{16}	$\sigma \parallel [100]$ при $T < T_п$; $\sigma \parallel [001]$ при $T > T_п$ $T_п = 210°C$	675	—	—	$\sigma = 202 \div 210$ ед.СГСМ/*моль*	[125]
$EuFeO_3$	Орторомбическая D_{2h}^{16}	$\sigma \parallel [001]$	666	—	—	$\sigma = 198 \div 204$ ед. СГМС/*моль*	[125]
$GdFeO_3$	Орторомбическая D_{2h}^{16}	—	558(Fe) 2,5(Gd)	—	—	σ=257 ед. СГСМ/*моль*	[125]
$TbFeO_3$	Орторомбическая D_{2h}^{16}	$\sigma \parallel [001]$ при $T > T_п$ $T_п$=8,4°K	651(Fe) 3(Tb)	—	—	$\sigma = 340 \div 356$ ед. СГСМ/*моль*	[126]
$DyFeO_3$	Орторомбическая D_{2h}^{16}	$\sigma \parallel [001]$ при $T > T_п$; σ=0; $T < T_п$ $T_п$=30÷35°K	648(Fe) 3,7(Dy)	—	—	$\sigma = 330$ ед. СГСМ/*моль*	[126]
$HoFeO_3$	Орторомбическая D_{2h}^{16}	$\sigma \parallel [100]$ при $T < T_п$; $\sigma \parallel [001]$ при $T > T_п$ $T_п = 80°K$	647(Fe) 6,5(Ho)	—	—	$\sigma = 236 \div 250$ ед. СГСМ/*моль*	[125]
$ErFeO_3$	Орторомбическая D_{2h}^{16}	$\sigma \parallel [100]$ при $T < T_п$; σ=[001] при $T > T_п$ $T_п = 102°K$	643(Fe) 4,3(Er)	—	—	$\sigma = 228 \div 233$ ед. СГСМ/*моль*	[125]
$TmFeO_3$	Орторомбическая D_{2h}^{16}	$\sigma \parallel [100]$ при $T < T_п$; $\sigma \parallel [001]$ при $T > T_п$ $T_п = 90°K$	630	—	—	$\sigma = 320 \div 324$ ед. СГСМ/*моль* $\Delta H_{рез} = 1$ *кэ* при $\nu_{АФМР} = 57{,}7$ *Гц*	[125, 127]

* Обзор магнитных свойств ортоферритов ($RFeO_3$, где R — ион редкоземельного металла) дан в работе [123].
2* Значения σ в ортоферритах даны для $T \ll T_N$(Fe), но $T > T_N$(R).

Вещество	Структура: кристаллическая	Структура: магнитная	T_N, °К	$\chi_м$, 10^{-3} ед. СГСМ/*моль*	$-\theta$, °К	Дополнительные сведения	Литература
$YbFeO_2$	Орторомбическая D_{2h}^{16}	$\sigma \parallel [001]$ при $T > T_п$, $T_п = 9$ °К	634	—	—	$\sigma = 340 \div 358$ ед. СГСМ/*моль*	[125]
$LuFeO_3$	Орторомбическая D_{2h}^{16}	—	625	—	—	$\sigma = 279$ ед. СГСМ/*моль*	[125]
$BiFeO_3$	Тригональная D_{3d}^6, C_{3v}^6 *	—	643	—	—	—	[142]
$KFeF_3$	Тригональная	—	113	—	—	—	[120]
$RbFeF_3$	Тетрагональная 2*	—	102; 75	—	88	При $T_1 = 40$°К и $T_2 = 87$°К — изменение структуры (фазовые переходы первого рода); $\sigma \neq 0$ при $T < T_2$	[140, 226]
$FePO_4$	Тригональная D_3^4	$\mu \parallel c$	25	—	60	—	[258]
$FeSO_4$	Орторомбическая D_{2h}^{16}	$\mu \parallel [b]$	21—23	78,5а	30,5	$c_м = 3,98$; $\mu(4,2°) = 4,1\ \mu_B$	[3, 42, 78]
$UFeO_4$	Орторомбическая D_{2h}^{14}	$\mu \parallel [b]$ 3*	55 (П→АФ) 42 (АФ → → Ф) 4*	—	—	$\rho = 3,2 \cdot 10^7$ *см·см*	[237]
$BaFeF_4$	Орторомбическая D_{2v}^{12}	Слоистая 5* $\mu \parallel [010]$	54	1г	—	$\mu(0°) = 4,2\ \mu_B$	[229]
$FeSb_2O_4$	Тетрагональная D_{4h}^{13}	$\mu \perp c$	—	—	—	—	[261]
Fe_2SiO_4	Орторомбическая D_{2h}^{16}	$\mu \parallel [b]$ 6*	65	20,4в	150	$c_м = 4,25$	[87]
$ZnFe_2O_4$	Кубическая O_h^7	—	9—16	—	—	$\mu_{Fe}(4,2°) = 4\mu_B$	[3, 46]
Fe_2TeO_6	Тетрагональная D_{4h}^{14}	$\mu \parallel c$	210	—	—	Магнитоэлектрик $\mu(4,2°) = 4,19\ \mu_B$	[257]
$Ca_2Fe_2O_5$	Орторомбическая D_{2v}^{16}	$\mu \parallel [c]$ ($c < a < b$)	730	—	—	$\mu(78°) = 4,5\ \mu_B$	[144]

* Предполагаемые структуры.
2* При $T > T_N$ — кубическая структура; при $T = 40 \div 87$°К — орторомбическая, при $T < 40$°К — моноклинная [226].
3* Для АФ-структуры.
4* В состоянии Ф обладает слабым антиферромагнетизмом.
5* Проявляет свойства двумерного антиферромагнетика.
6* При $T > T_п = 20$—30°К, при $T < T_п$ — скошенная спиновая структура [3].

Вещество	Структура: кристаллическая	Структура: магнитная	T_N, °K	$\chi_м$, 10^{-3} ед. СГСМ / моль	$-\theta$, °K	Дополнительные сведения	Литература
$Sr_2Fe_2O_5$	Орторомбическая D_{2h}^{16}	—	600—700	—	—	$\mu(77°) = 4{,}5\ \mu_B$	[3, 218]
$Na_3Fe_5O_9$	Моноклинная C_{2h}^6	$\mu \parallel [001]$	381	—	—	$H_{эф} = 510$ кэ*	[143]
α-FeOOH	Орторомбическая D_{2h}^{16}	$\mu \parallel [b]$	370	—	—	—	[3, 138]
$LiFePO_4$	Орторомбическая D_{2h}^{16}	—	53	—	—	$H_E = 430$ кэ	[268]
Ca_2FeAlO_5	Орторомбическая D_{2h}^{28}	$\mu \parallel [a]$	60	—	—	—	[270]
$FeCl_2 \cdot 2H_2O$	Моноклинная C_{2h}^3	μ составляет с осью $[a]$ угол 58°	23	—	—	Метамагнетик $H_{c,1} = 39{,}2$ кэ $H_{c,2} = 45{,}6$ кэ	[139]
$FeCl_2 \cdot 4H_2O$	Моноклинная	$\mu \parallel [b]$	1	1050[а]	—	—	[130]
$K_3Fe(CN)_6$	Моноклинная C_{2h}^5	—	0,129	—	—	—	[128]
$FeC_2O_4 \cdot 2H_2O$	—	—	20	—	—	—	[129]
$Fe_3(PO_4)_2 \cdot 4H_2O$	Моноклинная C_{2h}^5	$\sigma \parallel [b]$	20	307[б] $[b]$	—	σ=4460 ед. СГСМ/моль	[131]
$Fe_3(PO_4)_2 \cdot 8H_2O$	Моноклинная	$\mu \parallel (ac)$	4—11	—	—	—	[132]
$Fe(HCOO)_2 \cdot 2H_2O$	Моноклинная C_{2h}^5	—	3,75; 3,68	—	—	$\sigma \neq 0$	[93, 216]
$Fe(NH_4)(SO_4)_2 \cdot 12H_2O$	—	—	0,043	1000[а]	—	—	[29]
CoO	Кубическая с тетрагональными искажениями ниже T_N	$\mu \parallel [117]$	328; 291	5,3[а]	280	$c_м = 305$	[3, 68, 145]
CoS	Гексагональная D_{6h}^4	—	358	—	632	$p = 1{,}7$	[135]
CoF_2	Тетрагональная D_{4h}^{14}	$\mu \parallel [001]$	37,7	50[б]	52,7	$c_м = 3{,}29$ $H_{c,\perp} = 120$ кэ[2*] $H_{c,\parallel} = 190$ кэ $\lambda_1(0) = 351$ мкм[3*] $\lambda_2(0) = 278$ мкм	[146]

* Эффективное поле сверхтонкого взаимодействия (усредненное по трем неэквивалентным позициям ионов Fe).

[2*] Значения $H_{c,\parallel}$ и $H_{c,\perp}$ из данных по АФМР [147]. В поле $H_{c,\perp}$, по-видимому, осуществляется фазовый переход первого рода, связанный с изменением симметрии магнитной структуры [273].

[3*] При $H \parallel [001]$ g-факторы для $\lambda_1(H)$ и $\lambda_2(H)$ соответственно равны $g_1 = 1{,}18$ и $g_2 = 2{,}80$.

Вещество	Структура: кристаллическая	Структура: магнитная	T_N, °K	χ_M, 10^{-3} ед. СГСМ / *моль*	$-\theta$, °K	Дополнительные сведения	Литература
$CoCl_2$	Тригональная D_{3d}^5	Слоистая $\mu \perp c$	24,9	60[б]	—20	$c_м = 3{,}33$ $\mu\,(4{,}2°) = 3{,}1\ \mu_B$	[3,148]
$CoBr_2$	Тригональная D_{3d}^3	Слоистая $\mu \perp c$	19	$147^{б}_{\perp}$, $43^{б}_{\parallel}$		$c_м = 3{,}34$	[148]
α-CoI_2	Тригональная D_{3d}^3	Слоистая $\mu \parallel c$	3	—	—	—	[148]
$CoSe_2$	Кубическая T_h^6	—	93	—	160	Полупроводник p=2,2	[269]
CoF_3	Тригональная D_{3d}^6	$\mu \perp$ (111)	460	—	—	$\mu_{Co}(4{,}2°) = 4{,}4\ \mu_B$	[3,85]
Co_3O_4	Кубическая O_h^7 шпинель	—	40	—	53	$\mu_{Co^{3+}} = 0$ $\mu_{Co^{2+}} = 3{,}26\ \mu_B$	[3, 149]
$CoCO_3$	Тригональная D_{3d}^6	$\sigma \perp c$	18	52	—	$\sigma(0°)$=1400 ед.СГСМ/*моль*	[2]
$CoTiO_3$	Тригональная C_{3i}^2	$\mu \perp$ [111]	37—42	—	15	$c_м = 3{,}3$	[3, 150]
$CoGeO_3$	Моноклинная C_{2h}^6	—	—	8,5	14	$p = 5{,}33$	[77]
$KCoF_3$	Тетрагональная*	—	114; 109	8,5	125	$c_м = 3{,}07$ $\mu_{Co}(4{,}2°) = 3{,}3\ \mu_B$	[3, 120, 167]
$RbCoF_3$	Тетрагональная $[c]/[a]$=0,997 при T=4,2°K	—	98	—	180	$\mu(4{,}2°) = 3\mu_B$ $p = 5{,}53$	[151]
$RbCoBr_3$	Гексагональная D_{6h}^4	$\mu \parallel c$	36	—	—	$\mu_{Co}\,(4{,}4°) = 3{,}4\ \mu_B$	[3, 239]
β-$CoSO_4$	Орторомбическая D_{16}^{2h}	—	12	62[а]	52	$c_м = 3{,}37$ $H_{c,[a]} = 12$ *кэ* $\mu\,(0°) = 3{,}4\ \mu_B$	[42, 78]
$CoUO_4$	Орторомбическая D_{2h}^{28}	Слоистая	12	83[а]	23	$c_м = 3{,}11$ $\mu_{Co}(4{,}2°) = 4\mu_B$	[3, 79]
K_2CoF_4	Тетрагональная	—	130	—	—	—	[99]
$CoRh_2O_4$	То же	—	27	—	30	$c_м = 2{,}58$	[152]
$CoCs_3Cl_5$	»	—	0,52	—	—	—	[158]

* Тетрагональные искажения кубической решетки при $T = 78$°K 0,2% парамет ра решетки [167].

Вещество	Структура		T_N, °K	$\chi_м$, 10^{-3} ед. СГСМ / моль	$-\theta$, °K	Дополнительные сведения	Литература
	кристаллическая	магнитная					
$CoCs_3Br_5$	Тетрагональная	—	—	—	—	—	[159]
Co_2SiO_4	Орторомбическая D_{2h}^{16}	—	—	17[в]	15	$c_м = 2,62$	[87]
$Nb_2Co_4O_9$	Тригональная D_{3d}^4	Магнитные ионы образуют цепи вдоль оси c	30; 27*	133	10	$\mu_{Co}(4,2°) = 3\mu_B$ Магнитоэлектрик $c_м = 12,0$	[3, 88, 293]
$Ta_2Co_4O_9$	Тригональная D_{3d}^4	—	206*	—	—	—	[264]
$LiCoPO_4$	Орторомбическая D_{2h}^{16}	$\mu \parallel [b]$	22	—	—	$H_E = 320$ кэ	[3, 268]
$BaCoWO_6$	Кубическая O_h^5	μ составляет с осью [111] угол 20°	17	—	—	—	[160]
$CoCl_2 \cdot 2H_2O$	Моноклинная C_{2h}^3	$\mu \parallel [b]$	8	210[а]	—	Метамагнетик $H_{c_1}, [b] = 32$ кэ $H_{c_2}, [b] = 46$ кэ	[153]
$CoBr_2 \cdot 2H_2O$	Моноклинная	$\mu \parallel [b]$	9,5	—	0	Метамагнетик $H_{c_1}, [b] = 13,7$ кэ $H_{c_2}, [b] = 29,8$ кэ	[154]
$CoCl_2 \cdot 6H_2O$	То же	—	2,29[2]*	178[а]	20	—	[155]
$CoBr_2 \cdot 6H_2O$	»	—	3,2	220[г]	—	$c_м = 2,65$	[156]
$Co(NC_5H_5)_2Cl_2$	»	—	3,7	2800[а]	—4	—	[153]
$Co(H_2O)_6SiF_6$	Тригональная	$\sigma \perp c$	0,15	—	—	$\sigma = 0,035 \cdot 2M_0$[3]*	[157]
$CoCl_2[(NH_2)_2CS]_4$	Тригональная C_{4h}^4	—	0,92[2]*	—	—	—	[260]
$CoK_2(SO_4)_2$	—	—	0,193	—	—	—	[158]
$Co(HCOO)_2 \cdot 2H_2O$	Моноклинная C_{2h}^5	$\mu \parallel (100)$[4]*	5,12[5]*	—	—	—	[216, 217]
$Co(NH_4)_2(SO_4)_2 \cdot 6H_2O$	Моноклинная	—	0,084	—	—	σ=7070 ед. СГСМ/моль	[95]

* Из измерений магнитоэлектрического эффекта.

2* Из тепловых измерений.

3* $2M_0 = Nng\mu_B s$, где N — число Авогадро; n — число магнитных ионов в молекуле; g — фактор Ланде; μ_B — магнетон Бора; s — спин магнитного иона.

4* Проявляет свойства, характерные для двумерной спиновой системы.

5* При этой температуре упорядочиваются только моменты в плоскости (100). Система магнитных моментов плоскости (200) обусловливает парамагнитные свойства ниже T=5,12°K.

Вещество	Структура: кристаллическая	Структура: магнитная	T_N, °K	$\chi_м$, 10^{-3} ед. СГСМ / моль	$-\theta$, °K	Дополнительные сведения	Литература
NiO	Кубическая с ромбоэдрическими искажениями ниже T_N	$\mu \parallel (111)$	647; 523	—	2470	$\lambda(0) = 274$ *мкм*	[56, 68, 161]
NiS	Гексагональная D_{6h}^4	$\mu \parallel c$	263*	—	—	$\mu_{Ni} = 2{,}1\ \mu_B$	[3, 162]
NiAs	Гексагональная D_{6h}^4	$\mu \parallel c$	150	—	300	—	[163]
NiF_2	Тетрагональная D_{4h}^{14}	$\sigma \parallel [010]$	73,2	20	100	σ_0=350 ед. СГСМ/*моль* $c_м = 1{,}3$ $\lambda_1 = 3000$ *мкм* $\lambda_2 = 320$ *мкм*	[2]
$NiCl_2$	Тригональная D_{3d}^5	Слоистая $\mu \perp c$	52	110	—67	$c_м = 1{,}33$	[164]
$NiBr_2$	Тригональная D_{3d}^5	—	60	—	20	p=3,0	[174]
$NiCO_3$	Тригональная D_{3d}^6	$\sigma \perp c$	25,2	23,8[г]	—	$\sigma(4{,}2°) =$ =2080 ед. СГСМ/*моль*[2*] $H_Д = 90$ *кэ* $H_E = 240$ *кэ*	[220]
$NaTiO_3$	Тригональная C_{3i}^2	Слоистая $\mu \perp [111]$	23	23,4[б]	55; 11	$c_м = 1{,}3$ $\lambda(0) = 1{,}6$ *мм* $\mu_{Ni}(4{,}2°) = 2{,}25\ \mu_B$	[3, 150, 165, 166]
$NaNiF_3$	Орторомбическая D_{2h}^{16}	$\sigma \parallel c$	156	—	—	$\sigma_0 = 335$ ед. СГСМ/*моль* $H_Д = 162$ *кэ* $H_A = 12$ *кэ* $H_E = 2 \cdot 10^6$ *э*[3*]	[43]
$KNiF_3$	Моноклинная C_{2h}^2	—	275	2,05[а]	843	$c_м = 2{,}41$	[120]
$RbNiCl_3$	Гексагональная D_{6h}^4	$\mu \parallel c$	11,5	—	—	$\mu(0°) = 1{,}3\ \mu_B$	[219]
$CsNiCl_3$	Гексагональная D_{6h}^4	$\mu \parallel c$[4*]	4,5	$3{,}5^б_{\parallel}$ $7{,}3^б_{\perp}$	69	$\mu_{Ni}(2°) = 1{,}4\ \mu_B$ $p = 3{,}41$	[3, 239]
$NiSO_4$	Орторомбическая D_{2h}^{16}	$\mu \parallel [b]$	37	15[а]	82	$c_м = 1{,}83$ $\mu_{Ni}(4{,}2°) = 2{,}1\ \mu_B$	[78, 292]

* Переход П → АФ обладает свойствами, характерными для перехода первого рода; в точке перехода изменяются параметры кристаллической ячейки: $\Delta[a]/[a] = 3 \cdot 10^{-3}$; $\Delta[c]/[c] = 10^{-2}$.

2* Результаты измерения намагниченности монокристаллов $NiCO_3$ в трех взаимноперпендикулярных направлениях представлены в [109].

3* Значения эффективных полей получены из экспериментов по АФМР [168] в предположении анизотропного эффективного g-фактора подрешеток: $g_{xx} \approx g_{zz} = 2{,}14$, $g_{xz} \approx g_{zx} = -2{,}5 \cdot 10^{-2}$ (x, y, z направлены соответственно вдоль [a], [b], [c]).

4* Магнитная структура состоит из линейных антиферромагнитных цепей.

Вещество	Структура: кристаллическая	Структура: магнитная	T_N, °K	$\chi_м$, 10^{-3} ед. СГСМ / моль	$-\theta$, °K	Дополнительные сведения	Литература
$BaNiF_4$	Орторомбическая D_{2v}^{12}	—	150	—	—	$\mu_{Ni}(4,2°) = 2\mu_B$	[230]
K_2NiF_4	Тетрагональная D_{4h}^{17}	Слоистая $\mu \parallel c$*	190; 97	—	600	$H_{c,\parallel}(4,2°) = 180$ кэ	[170, 222, 238]
Rb_2NiF_4	Тетрагональная D_{4h}^{17}	$\mu \parallel c$	190	—	—	$H_{c,\parallel}(4,2°) = 350$ кэ	[169, 222]
$NiRh_2O_4$	Тетрагональная	—	18	—	20	$c_м = 1,42$ при $T = 20 — 380$°K; $c_м = 2,06$ при $T = 380 — 900$°K	[152]
Tl_2NiF_4	Тетрагональная D_{4h}^{17}	—	190	—	—	—	[169]
Ni_2SiO_4	Орторомбическая	—	—	8,2	—14	$c_м = 1,14$	[87]
$GeNi_2O_4$	Кубическая O_h^7	$\mu \parallel (111)$	15	—	—	$\mu_{Ni}(4,2°) = 2,2\mu_B$	[3, 47]
Sr_2NiMoO_6	—	—	71,5	—	—	—	[160]
Ba_2NiWO_6	Кубическая O_h^5	$\mu \parallel [111]$ Удвоение периода по трем осям	17	—	—	$\mu_{Ni}(4,2°) = 1,9\ \mu_B$	[160]
$(NH_4)_2NiF_4$	Тетрагональная D_{4h}^{17}	—	—	—	—	—	[169]
$NiCl_2 \cdot 6H_2O$	—	—	5,34[2]*	67,8[б]	7	$c_м = 1,18$	[155]
$NiBr_2 \cdot 6H_2O$	—	—	6,5[2]*	—	—	—	[172]
$Ni_3B_7O_{17}I$	—	—	120	—	—	—	[175]
$Ni(NO_3)_2 \cdot 2H_2O$	Моноклинная	$\mu \parallel [a]$	4,2	1500[б]	—2,5	—	[173]
$Ni(SO_3)_2 \cdot 2H_2O$	—	—	3,08	100[б]	5	$\sigma(0°) = 1,45$ ед. СГМС/моль	[171]
$Ni(NO_3)_2 \cdot 6NH_3$	Кубическая	—	1,35[2]*	—	3,3	—	[272]
$Ni(HCOO)_2 \cdot 2H_2O$	Моноклинная C_{2h}^5	$\mu \parallel (100)$[3]*	15,7[4]*	—	—	—	[93, 216]

* Обладает свойствами, описываемыми двумерной моделью Изинга.
[2]* Из тепловых измерений.
[3]* Проявляет свойства, характерные для двумерной спиновой системы.
[4]* При этой температуре упорядочиваются магнитные моменты только в плоскостях (100). Система моментов плоскостей (200) обусловливает парамагнитные свойства ниже T_N. При $T = 3,1$°K наблюдается аномалия Шоттки в поведении теплоемкости.

Вещество	Структура: кристаллическая	Структура: магнитная	T_N, °K	χ_M, 10^{-3} ед. СГСМ/моль	$-\theta$, °K	Дополнительные сведения	Литература
$Ni(NH_3)_2 \cdot Ni(CN)_4 \times 2C_6H_6$	Тетрагональная C_{4h}^1	$\mu \parallel [c]$	2,37	—	—	$H_{c.\parallel} = 35$ кэ H_A (1,46°) = 22 кэ	[233]
CuO	Моноклинная C_{2h}^6	Слоистая	230	—	—	—	[85]
CuF_2	Кубическая O_h^5	$\sigma \parallel [010]$	70	—	190	$\sigma \ll 1$ ед. СГСМ/моль	[176]
$CuCl_2$	Моноклинная C_{2h}^1	—	70	—	—	—	[46]
$CuBr_2$	Моноклинная C_{2h}^1	—	193	—	—	—	[46]
Cu_2S_6	Тетрагональная	—	373	—	1694	p=43	[48]
$KCuF_3$	Тетрагональная D_{4h}^{18}, D_{4h}^5*	$\mu \parallel (ab)$	38—D_{4h}^{18} 22—D_{4h}^5	—	355	c_M=0,58 μ(4,4°) = 0,49 μ_B	[120, 235]
$CuSO_4$	Орторомбическая D_{2h}^{16}	$\mu \parallel [b]$	34,5	12	77,5	$c_M = 0{,}517$	[78]
$CuSeO_4$	Орторомбическая D_{2h}^{16}	$\mu \parallel [c]$	34	—	—	μ(7,2°) = 0,9 μ_B	[231]
$CuF_2 \cdot 2H_2O$	Моноклинная C_{2h}^3	$\mu \parallel [c]$	26; 11	6[a]	37	c_M=0,46	[3, 70]
$CuCl_2 \cdot 2H_2O$	Орторомбическая	$\mu \parallel [a]$	4,3	25,6[б]	—5	$H_{c.\parallel} = 6{,}5$ кэ	[2]
$CuCl_2 \cdot 2D_2O$[2*]	То же	$\mu \parallel [a]$	—	—	—	—	[184]
$Cu(C_2H_3O_2)_2$	—	—	270	—	—	—	[182]
$Cu(C_{12}H_{23}O)_2$	—	—	230	—	—	—	[183]
$CuSiO_3 \cdot H_2O$	—	—	21[3*]	—	—	—	[177]
$LiCuCl_3 \cdot 2H_2O$	Моноклинная C_{2h}^5	$\mu \parallel (ac)$	5,9; 4,4	30[a]	10	$H_{c.\parallel} = 9 \div 10{,}5$ кэ[4*]	[178, 251]
$CuSO_4 \cdot 5H_2O$	Триклинная C_i^1	—	0,029[3*]	—	—	—	[128]
$CuSeO_4 \cdot 5H_2O$	—	—	0,046[3*]	—	—	—	[128]

* Обе структуры наблюдались одновременно [235].
[2*] Магнитные свойства аналогичны свойствам $CuCl_2 \cdot 2H_2O$ [184].
[3*] Из тепловых измерений.
[4*] Значение поля опрокидывания подрешеток ($H \parallel (ac)$) [251].

Вещество	Структура		T_N, °К	$\chi_M \cdot 10^{-3}$ ед. СГСМ / *моль*	$-\theta$, °К	Дополнительные сведения	Литература
	кристаллическая	магнитная					
$Cu(NO_3)_2 \cdot 2{,}5H_2O$	—	—	3,2*; 0,45	65[а]	—	—	[179, 244]
$Cu_3(CO_3)_2 \cdot (OH)_2$	Моноклинная C_{2h}^5	—	1,86	41,5[б]	10	—	[181]
$Cu(HCO_2)_2 \cdot 4H_2O$ 2*	Моноклинная		17	24,8[б]	175	$\sigma(0°)=150$ ед. СГСМ/*моль* $c_M = 0{,}497$	[180]
$CuK_2(SO_4)_2 \cdot 6H_2O$	—	—	0,05	—	—	—	[29]
$Cu(C_2H_3O_2)_2 \cdot H_2O$	—	—	250—280	—	—	—	[182]
$(C_2H_5NH_3)_3CuCl_4$	—	Ферромагнитные слои, связанные слабым антиферромагнитным взаимодействием	10,2	—	—	$H_{E,\,1} = 800$ *э* (между слоями) $H_{E,\,2} = 500$ *кэ* (внутри слоя)	[267]
$Cu(NH_3)_4SO_4 \cdot H_2O$	—	—	0,37[3]*	40[г]	1,2	—	[128]
$Cu(C_6H_5COO)_2 \cdot 3H_2O$	Моноклинная	Линейные цепи вдоль [*c*] 4*	$<1{,}4$	—	—	—	[279]
MoF_3	Кубическая O_h^1	—	185	—	—	—	[190]
CeSb	Кубическая (тетрагональные искажения при $T<T_N$)	—	16	—	—	—	[243]
CeBi	Кубическая O_h^5	$\mu \parallel [001]$	26	—	—12	—	[252]
$CeCl_3$	Гексагональная	—	0,345	—	—	—	[262]
$Ce_2Zn_3(NO_3)_{12} \cdot 24H_2O$	Тригональная	—	0,0063	—	—	—	[191]
$PrCl_3$	Гексагональная	—	0,7	—	—	—	[262]
PrB_6	Кубическая	—	6,9[3]*	—	—	Металл $\rho\,(300°)=15\times10^{-5}$ *ом·см*	[259]

* Нет уверенности, что наблюдается переход П → АФ.
2* Проявляет свойства, характерные для двумерной модели Гейзенберга.
3* Из тепловых измерений.
4* Проявляет свойства, характерные для одномерной модели антиферромагнетика.

Вещество	Структура: кристаллическая	Структура: магнитная	T_N, °K	χ_M, 10^{-3} ед. СГСМ / моль	$-\theta$, °K	Дополнительные сведения	Литература
$PrAlO_3$	Орторомбическая D_{2h}^{16}	—	—	$10^{д}$	100	—	[209]
NdS	Кубическая O_h^5	—	8	—	24	$p=3,62$	[276]
NdSe	Кубическая O_h^5	—	14	—	9	$p=3,40$	[276]
NdTe	Кубическая O_h^5	—	13	—	14	$p=3,54$	[276]
NdSb	—	—	16	—	3	$p=3,75$; $n_s=2,7$ $H_c=105$ кэ	[203]
NdBi	Кубическая O_h^5	$\mu \parallel [001]$	25	—	1	—	[252]
$NdCl_3$	Гексагоиальная	—	1,035	—	—	—	[262]
$Nd(OH)_3$	Гексагоиальная C_{6h}^2	$\mu \parallel c$	1,7	—	—	—	[271]
$SmCl_3$	Гексагоиальная	—	0,4	—	—	—	[262]
EuSe	Кубическая O_h^5	—	4,7	—	—	Полупроводник Ферромагиетик при $T<2,8$°K	[3,96, 241]
EuTe*	Кубическая O_h^5		11; 9,7	440	7	$H_c=75$ кэ $n_s=7$	[192, 253]
EuF_2	Кубическая O_h^5		19,5²*; 2	—	—	—	[193, 194]
Eu_3O_4	Орторомбическая	$\mu \parallel [c]$ $(a>b>c)$	5,3	—	—	$H_c=2$ кэ	[205]
$EuTiO_3$	Кубическая	—	5,2	—	—3,7	$n_s=6,93$ $H_c=14$ кэ	[206]
$EuGd_2O_4$	Орторомбическая	—	4,5	—	—	—	[205]
GdP	Кубическая	—	15	480б	2	$H_c=75$ кэ	[197]
GdS	»	$\mu \parallel (111)$	50	—	—	—	[242]
GdCu	—	—	41	—	—	—	[189]

* Магнитные свойства образцов EuTe коррелнруют с электрическим сопротивлеинем, которое может изменятьсн в широких пределах (10^6 — 10^{-2} *ом-см* при $T=300$°K) [253].

²* Из измерений АФМР на образцах, содержащих примесн [194].

Вещество	Структура: кристаллическая	Структура: магнитная	T_N, °K	$\chi_м$, 10^{-3} ед. СГСМ / моль	$-\theta$, °K	Дополнительные сведения	Литература
GdAs	Кубическая с тригональными искажениями при $T<T_N$	—	25; 19	—	12	$H_c = 180$ кэ $p = 8,2$; $n_s = 7,2$	[198, 242]
GdSe	Кубическая	$\mu \parallel (111)$	60	—	—	—	[242]
GdAg	Кубическая O_h^1	—	145	40[a]	82	p=8,8	[204]
GdIn	Кубическая O_h^1	—	28	73,5[a]	66	p=8,1	[204]
GdSb	Кубическая	$\mu \parallel (111)$	28	—	42	p=8,1	[203]
GdTe	То же	—	80	—	—	—	[242]
GdBi	»	$\mu \parallel (111)$	32	—	—	—	[242]
$GdCu_2$	Гексагональная	—	41	—	—	$1/\rho \neq 0$; $p = 8,4$	[196]
$GdAlO_3$	Орторомбическая D_{2h}^{16}	$\mu \parallel [b]$	3,87	—	4,81*	$H_{c,\parallel}$ (0,5°) = 11 кэ[2*]	[221]
$GdVO_3$	Орторомбическая	—	7,5	—	—	p=80	[284]
$Gd(OH)_3$	Гексагональная C_{6h}^3	$\mu \parallel c$	2,0	—	—	—	[271]
$SrGd_2O_4$	Орторомбическая	—	2,8	—	6	—	[205]
$GdCl_3 \cdot 6H_2O$	—	—	0,182[3*]	—	—	—	[128]
TbP	Кубическая O_h^5	$\mu \parallel [111]$	8—9	—	1	$p = 9,2$; $n_s = 8$ $H_c = 4,3$ кэ μ (0°) = 6,2 μ_B	[195, 197]
TbAs	То же	$\mu \parallel [111]$	10—12	—	4	$p = 9,7$; $n_s = 7,9$ $H_c = 28$ кэ $\mu = 7,7$ μ_B	[3, 195, 198]
TbSb	»	$\mu \parallel [111]$	14—16	—	14	$p = 9,7$; $n_s = 7,5$ $H_c = 60$ кэ μ (0°) = 8,2 μ_B	[195, 203]
TbBi	»	$\mu \parallel [111]$	18	—	33	—	[252]
$TbCu_2$	Гексагональная	—	54	—	—	$1/\rho \neq 0$; p=9,8	[196]

* Усредненное значение измерений вдоль осей [a], [b], [c].
2* Значение поля опрокидывания подрешеток.
3* Из тепловых измерений.

Вещество	Структура		T_N, °K	$\chi_м$, 10^{-3} ед. СГСМ / моль	$-\theta$, °K	Дополнительные сведения	Литература
	кристаллическая	магнитная					
Tb_2O_3	—	—	2,4	—	—	—	[247]
TbOCl	Тетрагональная D_{4h}^7	—	4	—	—	$c_м = 12{,}05$	[228]
$Tb_3Al_5O_{12}$	Кубическая	—	1,5	—	—	—	[210]
DyP	Кубическая O_h^5	*	—	—	—6	$p = 9{,}9$; $n_s = 7{,}8$ $H_c = 17$ кэ	[197]
DyAs	—	—	8,5	—	—2	$p = 10{,}4$; $n_s = 8{,}1$ $H_c = 32$ кэ	[198]
DySb	—	—	9,5	—	4	$p = 10{,}7$; $n_s = 7{,}7$ $H_c = 19{,}5$ кэ	[203]
DyBi	Кубическая O_h^5	—	13	—	30	—	[252]
$DyCu_2$	Гексагональная	—	24	—	—	$1/\rho \neq 0$, $p = 10{,}75$	[196]
$DyAg_2$	Тетрагональная D_{4h}^{17}	—	9	—	25	$H_{c,\parallel} = 35$ кэ[2*]	[249]
$DyAu_2$	Тетрагональная D_{4h}^{17}	—	31	—	13	Метамагнетик	[249]
DyOCl	Тетрагональная D_{4h}^7	—	9	—	—	$c_м = 13{,}95$ $H_c(4{,}2°) = 14$ кэ	[228]
$DyAlO_3$	Орторомбическая D_{2h}^{16}	—	3,4	—	—	—	[211]
$DyVO_4$[3*]	Тетрагональная D_{4h}^{19}	$\mu \perp c$	3,05	—	—	—	[223]
$Dy_3Al_5O_{12}$	Кубическая O_h^{10}	$\mu \parallel [111]$	2,5	—	—	$\mu_{Dy}(1{,}35°) = 9\mu_B$	[3,208]
HoP	Кубическая O_h^5	—	5,5[4*]	—	—	$p = 10{,}2$; $n_s = 9{,}2$ $H_c = 1{,}8$ кэ	[197]
HoAs	—	—	4,8	—	—1	$p = 10{,}5$; $n_s = 9{,}0$ $H_{c,1} = 1{,}8$ кэ $H_{c,2} = 6$ кэ	[198]
HoSb	Кубическая O_h^5	$\mu \parallel [100]$	9; 5,5	—	2,4	$p = 10{,}8$; $n_s = 8{,}7$ $H_c = 15$ кэ $\mu(0°) = 9{,}3\ \mu_B$	[195, 203]
$HoCu_2$	Гексагональная	—	9	—	—	$1/\rho \neq 0$, $p = 10{,}5$	[196]

* При $T = 1{,}8$°К имеет сложную неколлинеарную магнитную структуру [195].
2* Значение поля опрокидывания подрешеток.
3* В работе [223] сообщается, что антиферромагнитным упорядочением обладают также $GdVO_4$, $TbVO_4$, $ErVO_4$.
4* Ниже этой температуры имеет сложную неколлинеарную магнитную структуру.

Вещество	Структура: кристаллическая	Структура: магнитная	T_N, °K	χ_M, 10^{-3} ед. СГСМ / моль	$-\theta$, °K	Дополнительные сведения	Литература
ErP	Кубическая O_h^5	$\mu \perp [111]$	3—4	—	0	$p = 9{,}3$; $n_s = 8{,}5$ $H_c = 5{,}2$ кэ $\mu(0°) = 5{,}7\ \mu$	[195, 197]
ErAs	—	—	3,5	—	1,5	$p = 9{,}6$; $n_s = 8{,}4$ $H_c = 10{,}5$ кэ	[198]
ErSb	Кубическая O_h^5	$\mu \parallel [111]$	3,5—3,7	—	3	$p = 9{,}8$: $n_s = 7{,}3$ $H_c = 12$ кэ $\mu(0°) = 7\mu_B$	[195, 203]
$ErCu_2$	Гексагональная	—	11	—	—	$1/\rho \neq 0$; $p = 9{,}35$	[196]
Er_2O_3	Кубическая O_h^7	—	4	—	—	—	[290]
Yb_2O_2S	Тригональная D_{3d}^3	$\mu \parallel c$	2,65	—	—	$\mu\ (1{,}5°) = 1{,}6\ \mu_B$	[248]
K_2ReCl_6	Кубическая O_h^5	Слоистая (чередующиеся феррослои)	12	—	—	$n_s = 2{,}6$ $\mu_{Re}\ (4{,}2°) = 2{,}7\ \mu_B$	[3, 202]
K_2IrCl_6	Кубическая O_h^5	—	3,08	—	32	—	[199]
$(NH_4)_2IrCl_6$	Кубическая	—	2,16	—	20	—	[199]
UN	Кубическая O_h^5	—	50	—	—	$\mu\ (4{,}2°) = 0{,}75\ \mu_B$	[3, 256]
UP	Кубическая O_h^5	—	125	—	—49	$p = 3{,}3$ $\mu(4{,}2°) = 1{,}9\ \mu_B$	[3, 256, 275]
UAs	Кубическая O_h^5	—	128	—	—	$\mu = 1{,}9\ \mu_B$	[3, 256]
UO_2	Кубическая O_h^5	$\mu \parallel [111]$	28—31	—	—	$\mu = 1{,}7\ \mu_B$	[3, 200]
UP_2	Тетрагональная	$\mu \parallel c$	199	—	—80	p=2,3	[275]
UTe_2	—	—	78	—	—	—	[277]
UBi_2	Тетрагоиальная	$\mu \parallel c$	183	—	53	—	[275]
UTe_3	—	—	56	—	—	—	[277]
NpC	Кубическая O_h^5	—	310 (П→АФ) 200 (АФ→Ф)	—	—	$p = 3{,}37$ $\mu = 1{,}4\ \mu_B$ *	[201]
NpO_2	Кубическая O_h^5	—	25,3	—	—	—	[201]

* В ферромагнитном состоянии.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Вонсовский С. В.** Магнетизм. М., «Наука», 1971.
2. **Боровик-Романов А. С.** «Итоги науки. Физ.-мат. науки», вып. 4. «Аитиферромагнетизм», Изд-во АН СССР, 1962.
3. **Oleś A.** e. a. Tables of Magnetic Structures determined by Neutron Diffraction, Institute of Nuclear Techniques, Cracow. Part I — cubic systems, report N 1/PS, 1970; Part II — tetragonal systems, report N 4/PS, 1970; Part III — rhombohedral and hexagonal systems, report N 7/PS, 1971; Part IV — orthorhombic systems, report N 11/PS, 1971.
4. **Боровик Е. С., Мильнер А. С., Еременко В. В.** Лекции по магиетизму. Харьков, Изд-во Харьк. ун-та, 1972.
5. **Keffer F.** Handbuch der Physik. Bd. 18/2, S. 1. Springer, Berlin, 1966.
6. **Morrish A. H.** The Physical Principles of Magnetism. John Willey and Sons, Inc., N. Y., 1965.
7. **Изюмов Ю. А., Озеров Р. П.** Магнитная нейтронография. М., «Наука», 1966.
8. **Боровик-Романов А. С.** «Журн. эксперим. и теор. физ.», 1959, т. 36, с. 75.
9. **Дзялошинский И. Е.** «Журн. эксперим. и теор. физ.», 1957, т. 32, с. 1547.
10. **Туров Е. А.** Физические свойства магнитоупорядоченных кристаллов М., Изд-во АН СССР, 1963.
11. **Ozhogin V. I., Maximenkow P. P.** Digests of Intermag. conf. Kyoto, 1972, p. 49.4;
    Seavey M. H. "Solid. State Comm.", 1972, v. 10, p. 219.
12. **Borovik-Romanov A. S., Prozorova L. A.** "J. Physiq.", 1971, v. 32, p. C1-837.
13. **Ожогин В. И., Якубовский А. Ю.** «Журн. эксперим. и теор. физ.», 1972, т. 63, с. 2155.
14. **Erickson R. A.** "Phys. Rev.", 1953, v. 90, p. 779.
15. **Ожогин В. И., Шапиро В. Г.** «Журн. эксперим. и теор. физ.», 1968, т. 54, с. 96.
16. **Bizette H., Tsai B.** "Compt. rend.", 1954, v. 238, p. 1575.
17. **Боровик-Романов А. С., Прозорова Л. А.** «Журн. эксперим. и теор. физ.», 1968, т. 55, с. 1727.
18. **Боровик-Романов А. С.** «Журн. эксперим. и теор. физ.», 1960, т. 38, с. 1088.
19. **Боровик-Романов А. С.** Физический энциклопедический словарь. М., 1965, т. 4, с. 250.
20. **Андрацкий В. П., Боровик-Романов А. С.** «Журн. эксперим. и теор. физ.», 1966, т. 51, с. 1030.
21. **Астров Д. Н.** «Журн. эксперим. и теор. физ.», 1960, т. 38, с. 984.
22. **Астров Д. Н.** «Журн. эксперим. и теор. физ.», 1961, т. 40, с. 1035.
23. **Hornreich R. M.** Digests of the Intermag. Conference, Kyoto, 1972, p. 40, 4.
24. **Judin V. M., Sherman A. B.** "Solid. State Comm.", 1966, v. 4, p. 661.
25. **Shapira Y., Foner S.** "Phys. Rev. B". 1970, v. 1, p. 3083.
26. **Еременко В. В., Беляева А. И.** «Успехи физ. наук», 1969, т. 98, с. 27.
27. **Прохоров А. М., Федоров В. Б.** «Журн. эксперим. и теор. физ.», 1962, т. 43, с. 2104.
28. **Каримов Ю. С., Щеголев И. Ф.** «Журн. эксперим. и теор. физ.», 1964, т. 47, с. 1721.
29. **Labhart H.** "Z. angew. Math. und Phys.", 1953, Bd 4, S. 1.
30. **Jacobs I. S.** "J. Appl. Phys.", 1961, v. 32, p. 61-S.
31. **Low G. G.** e. a. "J. Appl. Phys.", 1964, v. 35, p. 998.
32. **Johnson F. M., Nethercot A. H., Jr.** "Phys. Rev.", 1959, v. 114, p. 705.
33. **Foner S.** "J. Phys. Rad.", 1959, v. 20, p. 336.
34. **Allen S. J., Jr., Loudon R., Richards P. L.** "Phys. Rev. Lett.", 1966, v. 16, p. 463.
35. **Green R. L.** e. a. "Phys. Rev. Lett.", 1965, v. 15, p. 656.
36. **Харченко Н. Ф., Еременко В. В.** Физика конденсированиого состояния. Вып. XIII. ФТИ низкнх температур АН УССР, Харьков, 1971, с. 3.
37. **Харченко Н. Ф., Еременко В. В.** «Физика твердого тела», 1968, т. 10, с. 1402.
38. **Jacobs I. S., Lawrence P. E.** "J. Appl. Phys.", 1964, v. 35, p. 996.
39. **Ожогин В. И.** «Журн. эксперим. и теор. физ.», 1970, т. 58, с. 2079.
40. **Боровик-Романов А. С., Рудашевский Е. Г.** «Журн. эксперим. и теор. физ.», 1964, т. 47, с. 2095.
41. **Боровик-Романов А. С., Крейнес Н. М., Прозорова Л. А.** «Журн. эксперим. и теор. физ.», 1963, т. 45, с. 64.
42. **McConnell H. M., Lynden-Bell R.** "J. Chem. Phys.", 1962, v. 36, p. 2393.
43. **Judin V. M., Sherman A. B.** "Phys. St. Sol.", 1967, v. 20, p. 759.
44. **Dwight K.** e. a. "J. Appl. Phys.", 1962, v. 33, p. 1341.
45. **Koehler W. C., Wollan E. O.** "J. Phys. Chem. Sol.", 1957, v. 2, p. 100.
46. **American** Institute of Physics Handbook (1957), section 5, p. 226.
47. **Bertaut E. F.** e. a. "J. Appl. Phys.", 1964, v. 35, p. 952.
48. **Yuzuri M.** "J. Phys. Soc. Japan", 1960, v. 15, p. 2007.
49. **Motizuki K.** "J. Phys. Soc. Japan", 1959, v. 14, p. 759.
50. **Hirota E., Kubota B.** "J. Phys. Soc. Japan", 1960, v. 15, p. 1715.
51. **Benoit R.** "J. Chem. Phys.", 1955, v. 52, p. 119.
52. **Scatturin V.** e. a. "Acta crystallogr.", 1961, v. 14, p. 19.
53. **Stout J. W., Adams H. E.** "J. Amer. Chem. Soc.", 1942, v. 64, p. 1535.
54. **Plumier R. J.** "J. Appl. Phys.", 1966, v. 37, p. 964.
55. **Roth W. L., De Vries R. C.** "J. Appl. Phys.", 1967, v. 38, p. 951.
56. **Richards P. L.** "J. Appl. Phys.", 1963, v. 34, p. 1237.
57. **Huber E. E., Ridgley D. H.** "J. Appl. Phys.", 1963, v. 34, p. 1099.
58. **Nakagawa Y., Hori T.** "J. Phys. Soc. Japan", 1961, v. 16, p. 1470.
59. **Street R., Smith J.** "J. Phys. Rad.", 1962, v. 20, p. 82.
60. **Kouvel J. S.** e. a. "J. Appl. Phys.", 1963, v. 34, p. 1095.
61. **Meyer A.** "J. Phys. Rad.", 1959, v. 20, p. 432.
62. **Kasper J. S.** e. a. "J. Phys. Chem. Sol.", 1959, v. 11, p. 231.
63. **Bizette H.** "J. Physiq.", 1951, v. 12, p. 161.
64. **Hastings J.** e. a. "Phys. Rev.", 1959, v. 115, p. 13.
65. **Corliss L., Hastings J.** "J. Appl. Phys.", 1963, v. 34, p 1192.
66. **Douglass D., Strandberg M.** "Physika", 1961, v. 27, p. 1.
67. **Koehler W.** e. a. "J. Phys. Rad.", 1959, v. 20, p. 180.
68. **Бейкон Дж.** "Успехи физ. наук», 1963, т. 81, с. 335.
69. **Asch P. G.** "J. Phys. Rad.", 1959, v. 20, p. 349.
70. **Bosort R., Nielsen J.** "Phys. Rev.", 1958, v. 110, p. 879.
71. **Meisenheimer R. C., Cook D. L.** "J. Chem. Phys.", 1959, v. 30, p. 605.
72. **Burger J.** e. a. "J. Phys. Rad.", 1959, v. 20, p. 427.
73. **Corliss L. M., Hastings J. M.** "J. Appl. Phys.", 1964, v. 35, p. 1051.

74. **Flippen R., Darnell F.** "J. Appl. Phys.", 1963, v. 34, p. 1094.
75. **Fink H., Shaltiel D.** "Bull. Amer. Phys. Soc.", 1963, v. 8, p. 214.
76. **Joenk R. J.** "J. Appl. Phys.", 1963, v. 34, p. 1097.
77. **Sawaoka A., Miyahara S.** "J. Phys. Soc. Japan", v. 19, p. 1254.
78. **Крейнес Н. М.** Диссертация. ИФП АН СССР, М., 1963; «Журн. эксперим. и теор. физ.» 1961, т. 40, с. 762.
79. **Bertaut E.** e. a. "J. Phys. Rad.", 1960, v. 23, p. 477.
80. **Heeger A. J., Beckman O., Portis A. M.** "Phys. Rev.", 1961, v. 123, p. 1652.
81. **McGuire T. R.** "Bull. Amer. Phys. Soc.", 1963, v. 8, p. 55.
82. **Kedzie R. W.** e. a. "J. Appl. Phys.", 1965, v. 36, p. 1195.
83. **Lee K., Portis A. M., Witt G. L.** "Phys. Rev.", 1963, v. 132, p. 144.
84. **Jonker G. H.** "Physika", 1956, v. 22, p. 707.
85. **Hirakawa K.** e. a. "J. Phys. Soc. Japan", 1960, v. 15, p. 2063.
86. **Sawaoka A., Miyahara S.** "J. Phys. Soc. Japan", 1964, v. 19, p. 1750.
87. **Kondo H., Miyahara S.** "J. Phys. Soc. Japan", 1963, v. 18, p. 305.
88. **Bertaut E.** e. a. "J. Chem. Phys. Sol.", 1961, v. 21, p. 234.
89. **Swoboda T.** e. a. "Phys. Rev. Lett.", 1960, v. 4, p. 509.
90. **Mays J. M.** "Phys. Rev.", 1963, v. 131, p. 38.
91. **Lasheen M. A.,** e. a. "Physika", 1958, v. 21, p. 1061.
92. **Schelleng J., Friedberg S.** "J. Appl. Phys.", 1963, v. 34, p. 1087.
93. **Pierce R. D., Friedberg S. A.** "J. Appl. Phys.", 1967, v. 38, p. 1462.
94. **Friedberg S., Flippen R.** Proc. VIII Intern. Conf. LTP, Toronto, 1960 (Amsterdam, 1961).
95. **Uryu N.** "J. Phys. Soc. Japan", 1961, v. 16, p. 2140.
96. **Busch G.** "J. Appl. Phys.", 1967, v. 38, p. 1386.
97. **Yuzuri M., Yamada M.** "J. Phys. Soc. Japan", 1960, v. 15, p. 1845.
98. **Wilkinson G.** e. a. "Inorg. Nucl. Chem.", 1956, v. 2, p. 95.
99. **Koehler W. C.** e. a. "Phys. Lett.", 1964, v. 9, p. 93.
100. **Boucher B.** e. a. "J. Appl. Phys.", 1966, v. 37, p. 960.
101. **Nowik I.** e. a. "J. Appl. Phys.", 1966, v. 37, p. 970.
102. **Bouchaud J. P.** e. a. "J. Appl. Phys.", 1966, v. 37, p. 971.
103. **Shane J. R.** e. a. "J. Appl. Phys.", 1967, v. 38, p. 1280.
104. **Ohtsubo A.** e. a. "Physika", 1958, v. 24, p. 161.
105. **Nagamiya T.** "J. Phys. Rad.", 1959, v. 20, p. 70.
106. **Maxim I.** Studii si cercetări fiz Acad. R. P. R, 1959, v. 9, p. 323.
107. **Kouvel J. S. Hartelius C. C.** "J. Appl. Phys.", 1962, v. 33, p. 1343.
108. **Ohlman R., Tinkham M.** "Phys. Rev.", 1961, v. 123, p. 425.
109. **Бажан А. Н.** «Журн. эксперим. и теор. физ.», 1974, т. 66, с. 1086.
110. **Bizette H.** e. a. "Compt. rend. Acad. Sci.", 1957, v. 245, p. 507.
111. **Kanematsu** e. a. "J. Phys. Soc. Japan", 1960, v. 15, p. 2358.
112. **Rosenquist T.** "Acta Met.", 1953, v. 1, p. 761.
113. **Meyer A., Cadeville M.** "J. Phys. Soc. Japan", 1962, v. 17, S. B—1, p. 223.
114. **Воскаиян Р. А., Левитин Р. З., Щуров В. А.** «Журн. эксперим. и теор. физ.», 1967, т. 53, с. 459.
115. **Jacobs I. S.** e. a. "Intern. J. Magnetism," 1971, v. 1, p. 193.
116. **Ishikawa Y., Akimoto S.** "J. Phys. Soc. Japan", 1957, v. 12, p. 1083.
117. **Berry C., Combs C.** "J. Appl. Phys.", 1960, v. 31, p. 1130.
118. **Taranishi T.** "J. Phys. Soc. Japan", 1962, v. 17, S. B—1, p. 263.
119. **Cox D.** e. a. "Phys. Rev.", 1963, v. 132, p. 1547.
120. **Okazaki A., Suemune Y.** "J. Phys. Soc. Japan", 1961, v. 16, p. 671.
121. **Jacobs I. S., Burne H. F., Levinson L. M.** "J. Appl. Phys.", 1971, v. 42, p. 1631.
122. **Ожогин В. И.** и др. «Журн. эксперим. и теор. физ.», 1972, т. 62, с. 2221.
123. **Уайт Р.** «Успехи физ. наук», 1971, т. 103, с. 593.
124. **Treves D.** "J. Appl. Phys.", 1965, v. 36, p. 1033.
125. **Koehler W.** e. a. "Phys. Rev.", 1960, v. 118, p. 58.
126. **Gorodetsky G., Treves D.** "Phys. Rev.", 1964, v. 135A, p. 97.
127. **Hagedorn F. B.** e. a. "Phys. Rev. Lett.", 1968, v. 21, p. 364.
128. **Duffy W. T.** e. a. Proc. VIII Intern. Conf. LTP, London, Butterworths, 1963, p. 245.
129. **Ono K., Ito A.** "J. Phys. Soc. Japan," 1964, v. 19, p. 899.
130. **Friedberg S. A., Schriempf J. T.** "J. Appl. Phys.", 1964, v. 35, p. 1000.
131. **Van Agt T. W.** e. a. Proc. VIII Intern. Conf. LTP, London, Butterworths, 1963, p. 222.
132. **Poulis N., W. v. d. Lugt** "J. Phys. Soc. Japan", 1962, v. 17, S. B—1, p. 505.
133. **Chiba S.** "J. Phys. Soc. Japan", 1960, v. 15, p. 581.
134. **Cable J.** e. a. "Bull. Amer. Phys. Soc.", 1960, v. 5, p. 458.
135. **Benoit R.** "J. Chem. Phys.", 1955, v. 52, p. 119.
136. **Finlayson D.** e. a. "Proc. Phys. Soc. (London)", 1959, v. 74, p. 75.
137. **Kren E., Szabo P.** "Phys. Lett.", 1964, v. 11, p. 215.
138. **Hrynkiewicz A. Z.** e. a. "Phys. Lett.", 1965, v. 17, p. 93.
139. **Narath A., Schirber J. E.** "J. Appl. Phys.", 1966, v. 37, p. 1124.
140. **Wang F. Y., Kestigian M.** "J. Appl. Phys.", 1966, v. 37, p. 975.
141. **Клюшин В. В.** и др. «Физика металлов и металловедение», 1966, т. 21, с. 153.
142. **Юдин В. М.** «Физика твердого тела», 1966, т. 8, с. 267.
143. **Schurer P. J.** "J. Physiq"., 1971, v. 32, CI—278.
144. **Grant R. W.** e. a. "J. Appl. Phys.", 1967, v. 38, p. 1455.
145. **Tachiki M.** "J. Phys. Soc. Japan", 1964, v. 19, p. 454.
146. **Lines M. E.** "Phys. Rev.", 1965, v. 137, p. A 982.
147. **Шапиро В. Г., Ожогин В. И., Гуртовой К. Г.** «Изв. АН СССР. Сер. физ.», 1972, т. 36, с. 1559.
148. **Bizette H.** e. a. "J. Phys. Rad.", 1959, v. 20, p. 421.
149. **Roth W. Z.** "Bull. Amer. Phys. Soc.", 1963, v. 8, p. 213.
150. **Ishikawa Y., Akimoto S.** "J. Phys. Soc. Japan", 1958, v. 13, p. 1298.
151. **Swoboda T.** e. a. "J. Phys. Chem. Sol.", 1958, v. 5, p. 293.
152. **Blasse G., Schipper D.** "Phys. Lett.", 1963, v. 5, p. 300.
153. **Haseda T.** e. a. Proc. VIII Intern. Conf. LTP, London, Butterworths, 1963, p. 232.
154. **Narath A.** "J. Phys. Soc. Japan", 1964, v. 19, p. 2244.
155. **Robinson W. K., Friedberg S. A.** "Phys. Rev.", 1960, v. 117, p. 402.

156. Forstat H. e. a. "Bull. Amer. Phys. Soc.", 1960, S. 11, v. 5, p. 59.
157. Ohtsubo A., Kanda E. "J. Phys. Soc. Japan", 1962, v. 17, S. B—1, p. 497.
158. Miedema A. R. e. a. "Phys. Lett.", 1965, v.17, p. 87.
159. Beljers H. G. e. a. "Phys. Lett.", 1964, v. 12, p. 81.
160. Cox D. E., Shirane G., Frazer B. C. "J. Appl. Phys.", 1967, v. 38, p. 1459.
161. Trombe M. "J. Physiq.", 1951, v. 12, p. 170.
162. Sparks T. J., Komoto T. "J. Appl. Phys.", 1963, v. 34, p. 1033.
163. Adachi K. "J. Phys. Soc. Japan", 1961, v. 16, p. 2187.
164. Bizette H. "Compt. rend. Acad. Sci.", 1956, v. 243, p. 1295.
165. Shirane G. e. a. "J. Phys Soc. Japan", 1959, v. 14, p. 1352.
166. Heller G. e. a. "J. Appl. Phys.", 1963, v. 34, p. 1033.
167. Holden T. M. e. a. "J. Phys. C", 1971, v. 4, p. 2127.
168. Санина В. А. Диссертация. Институт полупроводников АН СССР. Л., 1970.
169. Rudorff W. e. a. "Z. anorgan. und. allgem. Chem.", 1962, Bd 317, S. 261.
170. Plumier R., Legrand E. "J. Phys. Rad.", 1962, v. 23, p. 474.
171. Burgiel J. S. e. a. "Phys. Rev.", 1961, v. 122, p. 429.
172. Spence R. D. e. a. "J. Chem. Phys.", 1959, v. 31, p. 555.
173. Berger L., Friedberg S. "Phys. Rev.", 1964, v. 136A, p. 158.
174. Tzubokawa I. "J. Phys. Soc. Japan", 1960, v. 15, p. 2109.
175. Ascher E. e. a. "J. Appl. Phys.", 1966, v. 37, p. 1404.
176. Joenk R. J., Bozorth R. M. "J. Appl. Phys.", 1965, v. 36, p. 1167.
177. Eisenberg W. R., Forstat H. "J. Phys. Soc. Japan", 1964, v. 19, p. 406.
178. Vossoc P. H. "J. Chem. Phys.", 1960, v. 32, p. 1590.
179. Berger L. e. a. "Phys. Rev.", 1963, v. 132, p. 1057.
180. Kobayashi H., Haseda T. "J. Phys. Soc. Japan", 1963, v. 18, p. 541.
181. Frikee E., Van den Handel J. "Physika", 1962, v. 28, p. 269.
182. Figgis B., Martin R. "J. Chem. Soc. (London)", 1956, v. 10, p. 3837.
183. Gilmour A., Pink R. "J. Chem. Soc. (London)", 1953, v. 8, p. 2198.
184. Date M. "J. Phys. Soc. Japan", 1957, v. 12, p. 1168,
185. Kotthaus J. P., Jaccarino V. В кн.: Труды международной конференции по магнетизму. М., «Наука», 1974, т. III, с. 255.
186. Wohlfarth E. P. "Acta Mett.", 1956, v. 4, p. 225.
187. Альшин Б. И., Астров Д. Н. «Журн. эксперим. и теор. физ.», 1963, т. 44, с. 1195.
188. Киттель Ч. Введение в физику твердого тела. Пер. с англ. М., Гостехиздат, 1963, с. 490.
189. Alfieri G. T. e. a. "J. Appl. Phys.", 1966, v. 37, p. 1254.
190. Wilkinson M. K. e. a. "Phys. Rev.", 1961, v. 121, p. 74.
191. Levi M. W., Sapp R. C., Culvahouse J. W. Proc. VII Intern. Conf. LTP. Toronto, 1960 (Amsterdam, 1961), p. 168.
192. Busch G. e. a. "Phys. Lett.", 1964, v. 9, p. 7.
193. Mc Guire T. R., Shaffer M. W. "J. Appl. Phys.", 1964, v. 35, p. 984.
194. Lee K., Muir H. "J. Appl. Phys.", 1965, v. 36, p. 1043.
195. Child H. R. e. a. "Phys. Rev.", 1963, v. 131, p. 922.
196. Sherwood R. C., Williams H. J., Wernick J. H. "J. Appl. Phys.", 1964, v. 35, p. 1049.
197. Busch G. e. a. "Phys. Lett.', 1964, v. 11, p. 100.
198. Busch G. e. a. "Phys. Lett.", 1965, v. 15, p. 301.
199. Owen J. "J. Phys. Rad.", 1959, v. 20, p. 138.
200. Henshaw D. G., Brockhouse B. N. "Bull. Amer. Phys. Soc.", 1957, v. 2, p. 9.
201. Ross J. S., Lam D. J. "J. Appl. Phys.", 1967, v. 38, p. 1451.
202. Smith H. G., Bacon G. E. "J. Appl. Phys.", 1966, v. 37, p. 979.
203. Busch G. e. a. "Phys. Lett.", 1965, v. 14, p. 262.
204. Sekizawa K. "Phys. Lett.", 1964, v. 11, p. 216.
205. Holmes L., Schieber M. "J. Appl. Phys.", 1966, v. 37, p. 968.
206. Mc Guire T. R. e. a. "J. Appl. Phys.", 1966, v. 37, p. 981.
207. Smith H. G. e. a. "J. Appl. Phys.", 1966, v. 37, p. 1047.
208. Keen B. e. a. "J. Appl. Phys.", 1966, v. 37, p. 1120.
209. Юдин В. М., Гаврилишина А. И. «Физика твердого тела», 1965, т. 7, с. 3435.
210. Wolf W. P. e. a. "J. Phys. Soc. Japan", 1962, v. 17, S. B-1, p. 443.
211. Herpin A. e. a. "Compt. rend. Acad. Sci," 1964, v. 259, p. 2416.
212. Маковецкий Г. И., Сирота И. Н. «Докл. АН БССР», 1965, т. 9, с. 15.
213. Wassher J. D. Intern. Confer. Semicond. Physics, Paris, 1964, p. 1269.
214. Cable J. W. e. a. "Phys. Rev.", 1962, v. 125, p. 1860.
215. Tsujikawa I., Kanda E. "J. Phys. Rad.", 1959, v. 20, p. 22.
216. Takeda K., Kawasaki K. "J. Phys. Soc. Japan", 1971, v. 31, p. 1026.
217. Matsuura M. e. a. "J. Physiq.", 1971, C1-157.
218. Callagher P. K., McChesney J. B., Buchanan D. N. "J. Chem. Phys.", 1964, v. 41, p. 2429.
219. «Yelon W. B., Cox D. E. "Phys. Rev. ", 1972, v. B6, p. 204.
220. Крейнес Н. М., Шальникова Т. А. «Журн. эксперим. и теор. физ.», 1970, т. 58, с. 522.
221. Cashion J. D. "Proc. Roy. Soc. (London)", 1970, v. A 318, p. 473.
222. Miedema A. R., "J. Physiq.", 1971, v. 32, p. C1-305.
223. Cooke A. H., Martin D. M., Wells M. R. "J. Physiq.", 1971, v. 32, p. C1-488.
224. Madhav Rao L., Satya Murthy N. S. "J. Physiq.", 1971, v. 32, p. C1-617.
225. Петров М. П., Смоленский Г. А. «Физика твердого тела», 1965, т. 7, с. 2156.
226. Goodenough J. B., e. a. "J. Physiq.", 1971, v. 32, p. C1-622.
227. Bertaut E. F. e. a. "J. Appl. Phys.", 1966, v. 37, p. 1038.
228. Elmalen D., Fruchärt D., Joubert J. C. "J. Physiq.", 1971, v. 32, p. C1-741.
229. Eibschütz M. e. a. "J. Physiq.", 1971, v. 32, p. C1-759.
230. Cox D. E. e. a. "J. Appl. Phys.", 1970, v. 41, p. 943.
231. Scharenberg W., Will G. "J. Physiq.", 1971, v. 32, p. C1-855.
232. Fruchart D. e. a. "J. Physiq.", 1971, v. 32, p. C1-876.
233. Takayanagi S., Watanabe T. "J. Phys. Soc. Japan", 1970, v. 28, p. 296.
234. Boucher B., Sougi M., Mlle Whuler. A. "J. Physiq.", 1971, v. 32, p. C1-853.
235. Hutchings M. T. e. a. "Phys. Rev.", 1969, v. 188, p. 919.

236. **Wolfers P., Bacmann M., Bertaut E. F.** "J. Physiq." 1971, v. 32, p. C1-859.
237. **Bacmann M.** e. a. "J. Appl. Phys.", 1969, v. 40, p. 1131.
238. **Skalyo J., Shirane Jr. G., Birgeneau R. J.** "J. Physiq.", 1971, v. 32, p. C1-882.
239. **Minkiewicz V. J., Cox D. E., Shirane G.** " J. Physiq." 1971, v. 32, p. C1-892.
240. **Blöte H. W. J., Huiskamp W. J.** "J. Physiq.", 1971, v. 32, p. C1-1005.
241. **Penney T., Kasuya T.** "J. Appl. Phys.", 1971, v. 42, p. 1403.
242. **Mc Guire T.** e. a. "J. Appl. Phys.", 1969, v. 40, p. 1009.
243. **Busch G., Stutius W., Vogt O.** "J. Appl. Phys.", 1971, v. 42, p. 1493.
244. **Van Toll M. W., Matsuura M., Poulis N. J.** "J. Physiq.", 1971, v. 32, p. C1-943.
245. **Nagamiya T., Hiyamizu S.** "J. Physiq.", 1971, v. 32, p. C1-972.
246. **Brown J. D.** e. a. "J. Physiq.", 1971, v. 32, p. C1-974.
247. **Ayant, Y., Belorizky E., Tcheou F.** "J. Physiq.", 1971, v. 32, p. C1-1022.
248. **Rossat-Mignod J.** e. a. "J. Physiq.", 1971, v. 32, p. C1-1031.
249. **Miura S.** e. a. "J. Physiq.", 1971, v. 32, p. C1-1124.
250. **Sanina V. A.** e. a. "J. Physiq.", 1971. v. 32, p. C1-1149.
251. **Forstat H., Bailey P. T., Ricks J. R.** "J. Appl. Phys.", 1971, v. 42, p. 1559.
252. **Nereson N., Arnold G.** "J. Appl. Phys.", 1971, v. 42, p. 1625.
253. **Olivera N. F.** e. a. "J. Appl. Phys.", 1971, v. 42, p. 1783.
254. **Pernet M., Elmaleh D., Joubert J.** "Solid. State Comm.", 1970, v. 8, p. 1583.
255. **Великов Л. В., Рудашевский Е. Г., Селезнев В. Н.** «Изв. АН СССР. Сер. физ.», 1972, т. 36, с. 1531.
256. **Kuznietz M.** "J. Appl. Phys.", 1971, v. 42, p. 1470.
257. **Kunnman W.** e. a. "J. Phys. Chem. Sol.", 1968, v. 29, p. 1359.
258. **Beckmann V.** e. a. "Phys. St. Sol.", 1968, v. 29, p. 781.
259. **Lee K. N.** e. a. "Phys. Rev. B", 1970, v. 2, p. 4580.
260. **Forstat H.** e. a. "Phys. Rev.", 1966, v. 145, p. 406.
261. **Gonzalo J. A., Cox D. E., Shirane G.** "Phys. Rev.", 1966, v. 147, p. 415.
262. **Eisenstein J. C., Hudson R. P., Mangum B. W.** "Phys. Rev.", 1965, v. 137, p. A—1886.
263. **Shachar G., Makovsky J., Shaked H.** "Solid State Comm.", 1971, v. 9, p. 493.
264. **Fischer E., Gorodetsky G., Horneich R. M.** "Solid State Comm.", 1972, v. 10, p. 1127.
265. **Holmes L. M., Ballman A. A., Hecker R. R.** "Solid State Comm.", 1972, v.11, p. 409.
266. **Nørlund Christensen A., Oliver G.** "Solid State Comm." 1972, v. 10, p. 609.
267. **Bloembergen P., Franse J. J. M.** "Solid State Comm." 1972, v. 10, p. 325.
268. **Yee J. H., Chau H. H. M.** "Phys. Lett.", 1970, v. 32A, p. 441.
269. **Adachi K., Sato K., Takeda M.** "J. Appl. Phys.", 1968, v. 39, p. 900.
270. **Grant R. W.** e. a. "J. Appl. Phys.", 1968, v. 39, p. 1122.
271. **Wolf W. P., Meissner H., Catanese C. A.** "J. Appl, Phys.", 1968, v. 39, p. 1134.
272. **Becerra C. C.** e. a. "Phys. Lett.", 1972 v. 40 A, p. 203.
273. **Ожогин В. И.** «Журн. эксперим. и теор. физ.», 1963, т. 45, с. 1687.
274. **Tsubokawa I.** "J Phys. Soc. Japan", 1959, v. 14, p. 196.
275. **Чечерников В. И.** и др. «Журн. эксперим. и теор. физ.», 1968, т. 55, с. 151.
276. **Адамяи В. Е., Логинов Г. М.** «Журн. эксперим. и теор. физ.», 1966, т. 51, с. 1044.
277. **Чечерников В. И.** и др. «Журн. эксперим. и теор. физ.», 1967, т. 52, с. 854.
278. **Robbins M.** e. a. "J. Phys. Chem. Solids", 1969, v. 30, p. 1823.
279. **Date M.** "J. Physiq.", 1971, v. 32, p. C1-837.
280. **Ария С. М., Гроссман Г.** «Физика твердого тела» 1960, т. 2, с. 1283.
281. **Kendrick, Arrot A., Werner S. A.** 'J. Appl. Phys.", 1968, v. 39, p. 585.
282. **Goodman G.** "Phys. Rev. Lett.", 1962, v. 9, p. 305.
283. **Paoletti A., Pickart S. J.,** "J. Chem. Phys.", 1960, v. 32, p. 308.
284. **Bosorth R. M.** e. a. "Phys. Rev.", 1956, v. 103, p. 572.
285. **Stout J. W., Lau H. Y.** "J. Appl. Phys.", 1967, v. 38, p. 1472.
286. **Corliss L. M.** e. a. "Phys. Rev.", 1960, v. 117, p. 929.
287. **Matsumoto K., Hihara T., Kamigaichi T.** "J. Phys. Soc. Japan", 1962, v. 17, p. 1209.
288. **Show A. I.** "Phys. Rev.", 1952 v. 85, p. 365.
289. **Cable J. W.** e. a. "Phys. Rev.", 1960, v. 118, p. 950.
290. **Bosorth R., Kramer V.** "J. Phys. Rad.", 1959, v. 20, p. 393.
291. **Bizette H., Terrier C.** "J. Phys. Rad.", 1962, v. 23, p. 486.
292. **Frazer B. C., Brown P. J.** "Phys. Rev.", 1962, v. 125, p. 1283.
293. **Foner S.** "Phys. Rev.", 1963, v. 130, p. 183.

V. ОПТИКА И РЕНТГЕНОВСКОЕ ИЗЛУЧЕНИЕ

ГЛАВА 31

ОПТИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА ВЕЩЕСТВ

31.1. ПОКАЗАТЕЛИ ПРЕЛОМЛЕНИЯ

Показатель преломления: абсолютный $n_{абс}$ — отношение скорости света в вакууме к фазовой скорости света в данной среде; относительный $n_{отн}$ — отношение скорости света в среде II к скорости света в среде I. Показатель преломления зависит от длины волны света. Принято измерять показатель преломления для определенных спектральных линий. Показателю преломления в этом случае приписывается соответствующий индекс.

Таблица 31.1

Индексы показателей преломления

Показатель преломления	Длина волны, *нм*	Обозначение линии по Фраунгоферу	Элемент, излучающий линию
n_A	766,5	*A*	K
n_b	706,5	*b*	He
n_C	656,3	*C*	H
n_D	589,3	*D*	Na
n_d	587,6	*d*	He
n_e	546,1	*e*	Hg
n_F	486,1	*F*	H
n_g	435,8	*g*	Hg
n_G	434,0	*G*	H
n_h	404,7	*h*	Hg

В табл. 31.2—31.20 приведены значения показателя преломления веществ по отношению к воздуху. Показатель преломления среды относительно воздуха n, показатель преломления воздуха $n_{возд}$ и абсолютный показатель преломления $n_{абс}$ связаны формулой

$$n_{абс} = n_{возд} n.$$

Оптические свойства аиизотропиых сред характеризуются двумя (для одиоосных кристаллов) или тремя (для двуосных) показателями преломления.

В одноосных кристаллах n_0 и n_e — показатели преломления обыкновенного (n_0) и необыкновенного (n_e) лучей. В таблицах приведены главные значеиия n_e, соответствующие направлению в кристалле, перпендикулярному к оптической оси.

В двуосных кристаллах оба луча, возникающих вследствие двойного лучепреломления, необыкновенные. Оптическая индикатриса двуосных кристаллов (векторная диаграмма, изображающая угловые зависимости оптических свойств тела) представляют собой трехосный эллипсоид, полуоси которого равны главным показателям преломления кристалла.

В табл. 31.2—31.20 использованы обозначения: $(n_F - n_C)$ — средняя дисперсия; $(n_D - 1)/(n_F - n_C)$ — коэффициент дисперсии; $\dfrac{n_F - n_D}{n_F - n_C}$; $\dfrac{n_F - n_e}{n_F - n_C}$; $\dfrac{n_G - n_F}{n_F - n_C}$ — относительные (частные) дисперсии; V_C — термооптическая постоянная (средняя для области $t = -60° \div 20°C$), $V_C = \beta_C/(n_C - 1) - \alpha$, где $\beta = dn/dT$ — приращение показателя преломления при повышении температуры на 1°C; α — коэффициент линейного расширения; $\Delta\lambda$ — границы поглощения, ограничивающие спектральную область, для которой пропускание образца толщиной 10 *мм* составляет не менее 50%.

Газы

Показатель преломления сухого воздуха $n_{возд}$ зависит от длины волны света и при давлении $P = 760$ *мм рт. ст.* и температуре $t = 15°C$ [1]

$$n_{возд} = 1 + \frac{1}{10^6}\left[64{,}328 + \frac{29498{,}1}{146 - 10^6/\lambda_0^2} + \frac{255{,}40}{41 - 10^6/\lambda_0^2}\right],$$

где λ_0 — длина волны в вакууме, *нм*.

Для других температур и давлений [1]

$$(n_{t;\ P} - 1) = (n_{15;\ 760} - 1)\,\frac{P\,[1 + (1{,}049 - 0{,}0157t)\cdot 10^{-6}P]}{720{,}883\,(1 + 0{,}003661t)}.$$

Таблица 31.2

Показатель преломления газов (0°С и 760 *мм рт. ст.*)

Газ (пар)	Формула	n_D
Азот	N_2	1,000297
Азота закись	N_2O	1,000515
» окись	NO	1,000297
Аммиак	NH_3	1,000375
Аргон	Ar	1,000284
Ацетилен	C_2H_2	1,000606
Бензол	C_6H_6	1,000788
Бром	Br_2	1,001125
Вода	H_2O	1,000252
Водород	H_2	1,000139
» бромистый	HBr	1,000570
» иодистый	HI	1,000906
» хлористый	HCl	1,000444
Воздух	—	1,000292
Гелий	He	1,000035
Дейтерий	D_2	1,000137
Кислород	O_2	1,000272
Криптон	Kr	1,000427
Ксенон	Xe	1,000702
Метан	CH_4	1,000441
Метанол (метиловый спирт)	CH_3OH	1,000586
Метил фтористый	CH_3F	1,000449
» хлористый	CH_3Cl	1,000865
Мышьяк	As	1,001552
Неон	Ne	1,000067
н-Пентан	$n\text{-}C_5H_{12}$	1,001701
Ртуть	Hg	1,000933
Селеи	Se	1,000895
Сера	S	1,001111
» шестифтористая	SF_6	1,000783
Сернистый газ	SO_2	1,000660
Серный ангидрид	SO_3	1,000737
Сероводород	H_2S	1,000619
Сероуглерод	CS_2	1,001476
Теллур]	Te	1,000991
» четыреххлористый	$TeCl_4$	1,002600
Углекислота	CO_2	1,000450
Углерод четыреххлористый	CCl_4	1,001768
Углерода окись	CO	1,000334
Фосфор	P	1,001212
» треххлористый	PCl_3	1,001730
Фтор	F_2	1,000195
Хлор	Cl_2	1,000768
Хлороформ	$CHCl_2$	1,001455
Цинк	Zn	1,002050
Этилеи	$CH_2{=}CH_2$	1,000696

Таблица 31.3

Показатель преломления воды при 20°С [5]
Для *D*-линии $\beta = -8 \cdot 10^{-5}$ *град*$^{-1}$

Длиа волны, *нм*	*n*	Длина волны, *нм*	*n*
1256,0	1,3210	508,6	1,3360
678,0	1,3308	486,1	1,3371
656,3	1,3311	480,0	1,3374
643,8	1,3314	404,7	1,3428
589,3	1,3330	303,4	1,3581
546,1	1,3345	214,4	1,4032

Жидкости

Таблица 31.4

Показатель преломления жидкостей при 20°С [5]

Жидкость	n_D	Жидкость	n_D
Анилин	1,586	α-Монобромнафталин	1,660
Бензилбензоат	1,568	Паральдегид	1,405
Бензол	1,501	Парафин жидкий	1,480
Вода	1,333	Серонодород	1,885
Глицерин	1,470	Скипидар	1,470
Масла		Толуол	1,497
гвоздичное	1,532	Углерод четыреххлористый	1,460
кедровое	1,516	Фосфор (раствор в сероуглероде)	1,950
коричное	1,601	Хинолин	1,627
парафинновое	1,440	Хлорбензол	1,525
прованское	1,460	Этил коричный	1,559
Метилацетат	1,450	Этилсалицилат	1,523
Метилен иодистый	1,737		
Метилсалицилат	1,538		

Оптические стекла

Таблица 31.5

Показатель преломления оптических стекол [2]

Для обозначения марок стекол приняты сокращения: К — крон; Ф — флинт; БК — баритовый крон; ЛК — легкий крон; ТК — тяжелый крон; БФ — баритовый флинт; ЛФ — легкий флинт; ТФ — тяжелый флинт; ОФ — особый флинт; КФ — крон-флинт

Марка стекла	n_D	$10^5(n_F - n_C)$	$\frac{n_D - 1}{n_F - n_C}$	$10^6 V_C$	$\frac{n_F - n_D}{n_F - n_C}$	$\frac{n_F - n_e}{n_F - n_C}$	$\frac{n_G - n_F}{n_F - n_C}$
БК4	1,5302	877	60,5	—3,8	0,704	0,457	0,564
БК6	1,5399	905	59,7	—4,4	0,704	0,457	0,567
БК8	1,5467	871	62,8	0,6	0,702	0,454	0,560
БК9	1,5646	1012	56,8	—1,3	0,705	0,459	0,572
БК10	1,5688	1015	56,0	0,0	0,706	0,459	0,571
БК11	1,5524	872	63,3	—1,1	0,702	0,454	0,559
БК12	1,5606	961	58,3	—3,0	0,705	0,457	0,568
БК13	1,5594	915	61,1	—1,7	0,703	0,456	0,563
БФ1	1,5247	955	54,9	—0,1	0,706	0,459	0,573
БФ4	1,5480	1016	53,9	—2,1	0,707	0,460	0,576
БФ6	1,5696	1152	49,4	—3,2	0,709	0,463	0,584
БФ7	1,5795	1076	53,9	0,0	0,708	0,461	0,576
БФ8	1,5826	1254	46,5	—3,3	0,710	0,464	0,591
БФ11	1,6222	1171	53,1	0,5	0,708	0,461	0,577
БФ12	1,6259	1601	39,1	—4,0	0,714	0,468	0,603
БФ13	1,6395	1325	48,3	0,7	0,710	0,463	0,586
БФ16	1,6709	1419	47,3	—4,5	0,710	0,464	0,587
БФ18	1,5604	1100	50,9	—1,3	0,708	0,462	0,580
БФ19	1,5895	1153	51,1	—1,1	0,708	0,462	0,580
БФ21	1,6140	1534	40,0	0,3	0,713	0,467	0,601
БФ23	1,5493	1048	52,4	—2,4	0,707	0,461	0,579
БФ24	1,6344	1726	36,8	0,5	0,715	0,469	0,607
БФ25	1,6076	1318	46,1	0,7	0,711	0,464	0,589
БФ26	1,6504	1691	38,5	3,5	0,714	0,468	0,604
БФ27	1,6067	1380	44,0	—1,2	0,712	0,466	0,594
БФ28	1,6641	1874	35,4	6,3	0,716	0,470	0,611

Продолжение табл. 31.5

Марка стекла	n_D	$10^5(n_F-n_C)$	$\frac{n_D-1}{n_F-n_C}$	$10^6 V_C$	$\frac{n_F-n_D}{n_F-n_C}$	$\frac{n_F-n_e}{n_F-n_C}$	$\frac{n_G-n_F}{n_F-n_C}$
К1	1,4982	765	65,1	—2,0	0,700	0,453	0,553
К2	1,5004	758	66,0	0,6	0,700	0,452	0,555
К3	1,5100	805	63,4	—3,3	0,702	0,454	0,560
К5	1,5110	795	64,3	—1,4	0,701	0,454	0,557
К8	1,5163	806	64,1	—2,2	0,701	0,454	0,557
К14	1,5147	849	60,6	1,5	0,703	0,455	0,562
К15	1,5335	962	55,5	—2,6	0,706	0,459	0,572
К18	1,5191	860	60,4	0,4	0,703	0,455	0,564
К19	1,5187	841	61,7	—2,8	0,703	0,455	0,563
К20	1,5263	875	60,1	0,2	0,704	0,456	0,565
КФ1	1,5153	946	54,5	0,1	0,705	0,459	0,574
КФ3	1,5262	1032	51,0	—2,2	0,708	0,461	0,580
КФ4	1,5181	879	58,9	0,6	0,703	0,456	0,565
КФ5	1,4996	805	62,1	0,5	0,702	0,455	0,562
КФ6	1,5005	875	57,2	1,9	0,704	0,458	0,568
КФ8	1,5332	1026	52,0	—1,7	0,707	0,460	0,579
ЛК3	1,4874	696	70,0	—10,7	0,699	0,452	0,553
ЛК4	1,4903	753	65,1	2,8	0,707	0,452	0,553
ЛК5	1,4781	729	65,6	9,7	0,698	0,451	0,553
ЛК6	1,4704	704	66,8	—8,6	0,700	0,452	0,553
ЛФ1	1,5406	1145	47,2	—5,4	0,709	0,462	0,588
ЛФ5	1,5749	1392	41,3	0,6	0,712	0,466	0,598
ЛФ7	1,5783	1407	41,1	—0,4	0,712	0,466	0,599
ЛФ10	1,5480	1195	45,9	—3,0	0,710	0,464	0,592
ЛФ11	1,5608	1199	46,8	—1,2	0,710	0,463	0,588
ОФ1	1,5294	1022	51,8	0,4	0,706	0,459	0,574
ОФ2	1,5538	1140	48,6	—3,0	0,708	0,461	0,582
ОФ3	1,6123	1389	44,1	—0,3	0,708	0,461	0,583
ТК1	1,5638	928	60,8	—0,7	0,703	0,456	0,563
ТК2	1,5724	996	57,5	—1,0	0,705	0,458	0,569
ТК3	1,5891	962	61,2	0,2	0,702	0,455	0,562
ТК4	1,6111	1095	55,8	1,7	0,707	0,459	0,572
ТК7	1,6137	1090	56,3	—2,3	0,705	0,458	0,570
ТК8	1,6140	1114	55,1	0,2	0,707	0,460	0,572
ТК9	1,6171	1142	54,0	—1,4	0,707	0,460	0,575
ТК12	1,5688	904	62,9	—0,9	0,702	0,454	0,559
ТК13	1,6038	996	60,9	—2,3	0,703	0,456	0,565
ТК14	1,6130	1012	60,6	—3,0	0,704	0,456	0,564
ТК16	1,6126	1050	58,3	—3,5	0,704	0,457	0,569
ТК20	1,6220	1097	56,7	—3,4	0,705	0,459	0,571
ТК21	1,6568	1285	51,1	—2,7	0,708	0,462	0,580
ТФ1	1,6475	1912	33,9	—3,8	0,716	0,471	0,613
ТФ2	1,6725	2087	32,2	0,7	0,717	0,472	0,617
ТФ4	1,7398	2628	28,2	1,6	0,719	0,475	0,628
ТФ5	1,7550	2743	27,5	1,6	0,720	0,475	0,630
ТФ7	1,7280	2570	28,3	—3,5	0,719	0,474	0,627
ТФ8	1,6893	1285	31,1	0,6	0,717	0,472	0,619
ТФ10	1,8060	3178	25,4	2,8	0,721	0,477	0,636
Ф1	1,6128	1659	36,9	0,9	0,714	0,468	0,607
Ф2	1,6164	1684	36,6	0,0	0,714	0,468	0,608
Ф4	1,6242	1738	35,9	0,7	0,715	0,469	0,608
Ф6	1,6031	1590	37,9	—1,1	0,714	0,468	0,604
Ф7	1,6232	1689	36,9	0,3	0,714	0,468	0,607
Ф8	1,6248	1757	35,6	—8,4	0,715	0,470	0,610
Ф13	1,6199	1706	36,3	1,0	0,714	0,469	0,608

Кварц

Таблица 31.6

Показатели преломления кристаллического и плавленого кварца при 18°С [3]

Длина волны, *нм*	Элемент, излучающий линию	Кварц		
		Кристаллический		Плавленый
		о-луч	*е*-луч	
185,467	Al	1,67578	1,68997	1,57436
193,583	Al	1,65999	1,67343	1,55999
200,06	Au	1,64927	1,66227	—
202,55	Zn	1,64557	1,65842	1,54727
204,448	Au	1,64288	1,65562	—
211,07	Au	1,63432	1,64671	—
214,439	Cd	1,63039	1,64262	1,53386
219,462	Cd	1,62497	1,63698	1,52907
226,503	Cd	1,61818	1,62992	1,52308
231,288	Cd	1,61401	1,62559	1,51941
242,796	Au	1,60525	1,61650	—
250,329	Au	1,60032	1,61139	1,50745
257,304	Cd	1,59622	1,60714	1,50379
263,155	Al	1,59309	1,60389	—
274,867	Cd	1,58752	1,59813	1,49617
291,358	Au	1,58098	1,59136	—
303,412	Sn	1,576955	1,58720	1,48594
312,279	Au	1,57433	1,584485	—
325,253	Cd	1,570915	1,58095	—
340,365	Cd	1,56747	1,577385	1,47867
358,68	Al	1,563915	1,573705	—
396,848	Ca	1,55813	1,56772	1,47061
404,656	Hg	1,557156	1,56671	1,46968
410,174	H	1,556502	1,566031	—
434,047	H	1,553963	1,563405	1,46690
435,834	Hg	1,553790	1,563225	1,46675
467,815	Cd	1,551027	1,560368	1,46435
479,991	Cd	1,550118	1,559428	1,46355
486,133	H	1,549683	1,558979	1,46318
508,582	Cd	1,548229	1,557475	1,46191
518,362	Mg	1,547651	1,556887	—
533,85	Cd	1,546799	1,555996	1,46067
546,072	Hg	1,546174	1,555350	1,46013
579,066	Hg	1,544667	1,553791	—
587,563	He	1,544316	1,553428	—
589,29	Na	1,544246	1,553355	1,45845
627,82	Au	1,542819	1,551880	—
643,847	Cd	1,542288	1,551332	1,45674
656,278	H	1,541899	1,550929	1,45640
667,815	He	1,541553	1,550573	—
670,786	Li	1,541466	1,550483	—
706,520	He	1,540488	1,549472	1,45517
728,135	He	1,539948	1,548913	—
766,494	K	1,539071	1,548005	—
794,763	Rb	1,538478	1,547392	1,45340
844,67	O	1,537525	1,54640	—
1000,00	—	1,53503	1,54381	—
1014,06	Hg	1,53483	1,54360	—
1083,03	He	1,53387	1,54260	—
1200,00	—	1,53232	1,54098	—
1300,00	—	1,53102	1,53962	—
1400,00	—	1,52972	1,53826	—
1529,61	Hg	1,52800	1,53646	—
1600,0	—	1,52703	1,53545	—
1800,0	—	1,52413	1,53242	—
2058,20	He	1,51998	1,52814	—
2500,0	—	1,51156	1,51950	—
3000,0	—	1,49962	1,50700	—

Таблица 31.7

Показатель преломления одноосных кристаллов для *D*-линии [2]

Вещество	*o*-луч	*e*-луч
Берилл (изумруд)	1,581	1,575
Корунд (сапфир, рубин)	1,769	1,760
Турмалин	1,669	1,638

Таблица 31.8

Три главных значения показателя преломления двуосных кристаллов для *D*-линии [2]

Вещество	n_1	n_2	n_3
Арагонит	1,590	1,681	1,686
Барит	1,637	1,631	1,649
Гипс	1,5205	1,5226	1,5296
Калий азотнокислый	1,335	1,506	1,500
Слюда	1,561	1,590	1,594

Таблица 31.9

Показатель преломления LiF при 20°C [2, 4]

$n_D = 1{,}3920$ (20°C); $\beta_D = -12{,}7 \cdot 10^{-6}$ *град*$^{-1}$; $(n_D - 1)/(n_F - n_C) = 99{,}3$; $\Delta\lambda = 160 \div 6300$ *нм*; $\alpha = 4{,}1 \cdot 10^{-5}$ *град*$^{-1}$; $\rho = 2{,}6$ *г/см*^{3}; влагоустойчив

Длина волны, *нм*	*n*	Длина волны, *нм*	*n*
240,0	1,4220	656,3	1,3909
248,3	1,4194	728,1	1,3898
253,6	1,4179	768,2	1,3893
265,4	1,4150	1083,0	1,3866
280,4	1,4119	1200,0	1,3856
302,2	1,4082	1500,0	1,3832
313,2	1,4067	2000,0	1,3788
366,3	1,4012	2500,0	1,3733
404,7	1,3985	3000,0	1,3666
486,1	1,3948	4000,0	1,3495
546,1	1,3930	5000,0	1,3267
587,6	1,3921	6000,0	1,2975
589,3	1,3920		

Таблица 31.10

Показатель преломления NaF (вниллиолеит) при 20°C [2]

$n_D = 1{,}3255$, $\dfrac{n_D - 1}{n_F - n_C} = 85{,}2$

Длина волны, *нм*	*n*	Длина волны, *нм*	*n*
240,0	1,3579	486,1	1,3282
248,3	1,3550	546,1	1,3264
253,6	1,3533	587,6	1,3255
265,4	1,3500	589,3	1,3255
280,4	1,3465	656,3	1,3244
302,2	1,3423	728,1	1,3235
313,2	1,3406	768,2	1,3232
366,3	1,3348	1083,0	1,3213
404,7	1,3319		

Таблица 31.11

Показатель преломления CaF_2 (флюорит) при 18°C [4, 5]

$n_D = 1{,}4338$; $\beta_D = -1{,}04 \cdot 10^{-5}$ *град*$^{-1}$; $\dfrac{n_D - 1}{n_F - n_C} = 95{,}3$; $\Delta\lambda = 170 - 9000$ *нм*; $\alpha = 2 \cdot 10^{-5}$ *град*$^{-1}$; $\rho = 3{,}2$ *г/см*^{3}, влагоустойчив

Длина волны, *нм*	*n*	Длина волны, *нм*	*n*
185,2	1,5099	670,8	1,4323
214,4	1,4846	1256,0	1,4275
303,4	1,4534	1500,0	1,4263
404,7	1,4415	2000,0	1,4239
480,0	1,4369	2500,0	1,4211
486,1	1,4371	3000,0	1,4179
508,6	1,4362	4000,0	1,4097
546,1	1,4350	5000,0	1,3990
589,3	1,4339	6000,0	1,3856
643,8	1,4327	8000,0	1,3499
656,3	1,4325		

Таблица 31.12

Показатель преломления BaF_2 при 20°C [4]

$n_D = 1{,}4775$; $\beta_D = -1{,}52 \cdot 10^{-5}$ *град*$^{-1}$; $\dfrac{n_D - 1}{n_F - n_C} = 81{,}4$; $\Delta\lambda = 230 - 12\,000$ *нм*; $\alpha = 1{,}8 \cdot 10^{-5}$ *град*$^{-1}$; $\rho = 4{,}8$ *г/см*^{3}, влагоустойчив

Длина волны, *нм*	*n*	Длина волны, *нм*	*n*
1000	1,4686	4 000	1,4570
1200	1,4675	5 000	1,4511
1500	1,4663	6 000	1,4441
2000	1,4647	8 000	1,4259
2500	1,4630	10 000	1,4014
3000	1,4612		

Таблица 31.13

Показатель преломления NaCl при 18°C [4, 5]

$n_D = 1{,}5442$; $\beta_D = -3{,}6 \cdot 10^{-5}$ *град*$^{-1}$;

$\dfrac{n_D - 1}{n_F - n_C} = 42{,}7$; $\Delta\lambda = 200 - 17\,000$ *нм*;

$\alpha = 4{,}2 \cdot 10^{-5}$ *град*$^{-1}$; $\rho = 2{,}2$ *г/см*^{3}, влагоустойчив

Длина волны, *нм*	n	Длина волны, *нм*	n
185,2	1,8933	1 200	1,5302
214,4	1,7322	1 500	1,5284
303,4	1,6085	2 000	1,5268
404,7	1,5665	2 500	1,5255
480,0	1,5541	3 000	1,5244
486,1	1,5534	4 000	1,5220
508,6	1,5509	5 000	1,5190
546,1	1,5475	6 000	1,5155
589,3	1,5443	8 000	1,5066
643,8	1,5412	10 000	1,4949
656,3	1,5407	12 000	1,4801
670,8	1,5400	15 000	1,4515
1000	1,5322		

Таблица 31.14

Показатель преломления KCl (сильвин) при 18°C [4, 5]

$n_D = 1{,}4902$; $\beta_D = -3{,}3 \cdot 10^{-5}$ *град*$^{-1}$;

$\dfrac{n_D - 1}{n_F - n_C} = 43{,}9$; $\Delta\lambda = 200 - 21\,000$ *нм*;

$\alpha = 3{,}7 \cdot 10^{-5}$ *град*$^{-1}$; $\rho = 2{,}0$ *г/см*^{3}, влагоустойчив

Длина волны, *нм*	n	Длина волны, *нм*	n
185,2	1,8270	1 200	1,4779
214,4	1,6618	1 500	1,4769
303,4	1,5440	2 000	1,4754
404,7	1,5097	2 500	1,4745
480,0	1,4990	3 000	1,4736
486,1	1,4983	4 000	1,4721
508,6	1,4961	5 000	1,4704
546,1	1,4931	6 000	1,4684
589,3	1,4904	8 000	1,4633
643,8	1,4877	10 000	1,4570
656,3	1,4872	12 000	1,4480
670,8	1,4866	15 000	1,4320
1000	1,4799	20 000	1,3938

Таблица 31.15

Показатель преломления KBr при 20°C [4]

$n_D = 1{,}5600$; $\beta_D = -4{,}0 \cdot 10^{-5}$ *град*$^{-1}$;

$\dfrac{n_D - 1}{n_F - n_C} = 33{,}5$; $\Delta\lambda = 210 - 28\,000$ *нм*;

$\alpha = 3{,}8 \cdot 10^{-5}$ *град*$^{-1}$; $\rho = 2{,}8$ *г/см*^{3}, влагоустойчив

Длина волны, *нм*	n	Длина волны, *нм*	n
240,0	1,7576	1 000	1,5445
248,3	1,7330	1 200	1,5421
253,6	1,7198	1 500	1,5399
265,4	1,6950	2 000	1,5383
280,4	1,6713	2 500	1,5374
302,2	1,6460	3 000	1,5368
313,2	1,6361	4 000	1,5357
366,3	1,6039	5 000	1,5345
404,7	1,5899	6 000	1,5332
486,1	1,5719	8 000	1,5302
546,1	1,5641	10 000	1,5264
587,6	1,5601	12 000	1,5217
589,3	1,5600	15 000	1,5129
656,3	1,5552	20 000	1,4926
728,1	1,5516	25 000	1,4642
768,2	1,5501		

Таблица 31.16

Показатель преломления KPC-5 (состав: 42% TlBr, 58% TlI) при 20°C [4]

$n_D = 2{,}6150$; $\beta_D = -2{,}5 \cdot 10^{-4}$ *град*$^{-1}$;

$\Delta\lambda = 500 - 36\,000$ *нм*; $\alpha = 7{,}0 \cdot 10^{-5}$ *град*$^{-1}$;

$\rho = 7{,}4$ *г/см*^{3}; влагоустойчив

Длина волны, *нм*	n	Длина волны, *нм*	n
1000	2,4474	8 000	2,3757
1200	2,4258	10 000	2,3719
1500	2,4089	12 000	2,3673
2000	2,3962	15 000	2,3592
2500	2,3903	20 000	2,3417
3000	2,3869	25 000	2,3186
4000	2,3841	30 000	2,2896
5000	2,3810	40 000	2,2113
6000	2,3791		

Таблица 31.17

Показатель преломления CsI при 20°C [4]

$n_D = 1{,}7874$; $\beta_D = -9{,}9 \cdot 10^{-5}$ *град*$^{-1}$,

$\dfrac{n_D - 1}{n_F - n_C} = 24{,}0$; $\Delta\lambda = 290 \div 52\,000$ *нм*;

$\alpha = 4{,}9 \cdot 10^{-5}$ *град*$^{-1}$; $\rho = 4{,}5$ *г/см*^{3}; влагоустойчив

Длина волны, *нм*	n	Длина волны, *нм*	n
1000	1,7576	8 000	1,7409
1200	1,7530	10 000	1,7395
1500	1,7494	12 000	1,7378
2000	1,7465	15 000	1,7347
2500	1,7451	20 000	1,7280
3000	1,7444	25 000	1,7192
4000	1,7434	30 000	1,7077
5000	1,7427	40 000	1,6785
6000	1,7421	50 000	1,6369

Таблица 31.18

Показатель преломления полевого (исландского) шпата [5]

Длина волны, *нм*	*o*-Луч	*e*-Луч	Длина волны, *нм*	*o*-Луч	*e*-Луч
214,4	1,8459	1,5600	589,3	1,6584	1,4864
303,4	1,7196	1,5136	643,8	1,6550	1,4847
404,7	1,6813	1,4969	656,3	1,6544	1,4846
480,0	1,6686	1,4911	670,8	1,6537	1,4843
486,1	1,6678	1,4907	1256	1,6388	1,4782
508,6	1,6653	1,4895	2172	1,6210	1,4746
546,1	1,6616	1,4879			

Таблица 31.19

Показатель преломления KI при 20°C [2]

$$n_D = 1{,}67; \quad \frac{n_D - 1}{n_F - n_C} = 23{,}2$$

Длина волны, *нм*	*n*	Длина волны, *нм*	*n*
248,3	2,0548	486,1	1,6866
253,6	2,0116	546,1	1,6731
265,4	1,9424	587,6	1,6665
280,4	1,8837	589,3	1,6664
302,2	1,8277	656,3	1,6581
313,2	1,8071	728,1	1,6520
366,3	1,7442	768,2	1,6494
404,7	1,7184	1083	1,6381

Таблица 31.20

Оптические постоянные металлов и полупроводников [6]

n — показатель преломления; k — показатель поглощения; $n^* = n(1 + ik)$. Прохождение света через проводящие вещества определяется соотношением $I = I_0 \exp(-4\pi ndk/\lambda)$, где d — толщина поглощающего слоя; n и k — оптические постоянные для длины волны λ

Вещество	λ=500 *нм*		λ=5000 *нм*	
	n	*k*	*n*	*k*
Ag	0,11	26,73	2,4	14,17
Al	0,50	9,18	6,7	5,61
Au	0,50	4,08	3,3	10,67
Co	1,56	2,20	4,3	3,40
Cu	1,06	2,55	3,1	10,58
Fe	1,46	2,17	4,20	2,98
In	—	—	9,8	3,29
Mo	3,15	1,18	4,25	5,62
Na*	0,05	52,2	—	—
Nb	2,13	1,44	8,0	3,46
Ni	1,54	2,01	4,95	3,74
Pb	1,70	1,94	9,0	2,75
Pt	1,76	2,04	7,6	2,66
Si*	4,24	0,114	—	—
Sn	0,78	4,90	8,5	3,35
Ti	2,10	1,34	3,4	2,76
V	2,65	2,56	6,6	2,65
W	3,31	0,89	3,48	6,09
Zn	—	—	3,8	6,89

* Оптические характеристики относятся к λ=589,3 *нм*.

31.2. КОЭФФИЦИЕНТЫ ОТРАЖЕНИЯ. ПРОСВЕТЛЕНИЕ ОПТИЧЕСКИХ ИЗДЕЛИЙ

Коэффициентом отражения называют отношение потока излучения, отраженного данным телом, к падающему потоку.

Таблица 31.21

Коэффициент отражения света (при нормальном падении) от полированных металлических поверхностей [5], %

Длина волны, *нм*	Магналий (Al—69%, Mg—31%)	Медь	Олово	Платина	Родий	Сталь (Fe—99%, C—1%)	Хром	Цинк
188	53	—	—	35	—	22,0	33	—
200	56	—	—	38	—	27,0	36	—
251	67	25,9	—	33,8	—	38,0	32	—
288	—	24,3	—	38,8	—	—	—	—
305	69	25,3	—	39,8	—	44,0	37	—
316	—	—	—	—	—	—	—	—
326	77	24,9	—	41,4	—	—	—	—
357	81	27,3	—	43,4	—	50,0	41	—
385	—	28,6	—	45,4	—	—	—	—
420	83	32,7	—	51,8	—	—	—	—
450	—	37,0	—	54,7	—	55,0	—	54
500	—	43,7	—	58,4	76,0	56,0	55	55
550	83	47,7	—	61,1	—	56,0	—	56
600	—	71,8	—	64,2	—	57,3	—	57,5
650	83	80,0	—	66,5	—	58,0	—	—
700	—	82,4	—	69,0	—	58,0	56	61
800	—	88,6	—	70,3	81,0	—	—	61,5
1 000	84	90,1	54,0	72,9	84,0	63	57	69,0
2 000	—	95,5	60,0	80,6	91,0	77	63	94,0
3 000	—	97,1	68,6	88,8	92,0	83	70	95,5
4 000	89	97,3	71,7	91,5	92,5	88	76	—
5 000	—	97,9	76,7	—	93,0	—	81	97,2
7 000	—	98,3	86,3	—	93,5	—	—	97,2
9 000	—	98,4	87,0	95,4	94,5	93	92	98,1
11 000	—	98,4	—	95,6	—	—	93	—
12 000	—	—	86,9	—	—	—	—	98,3
14 000	92	97,9	—	96,4	—	95	—	—

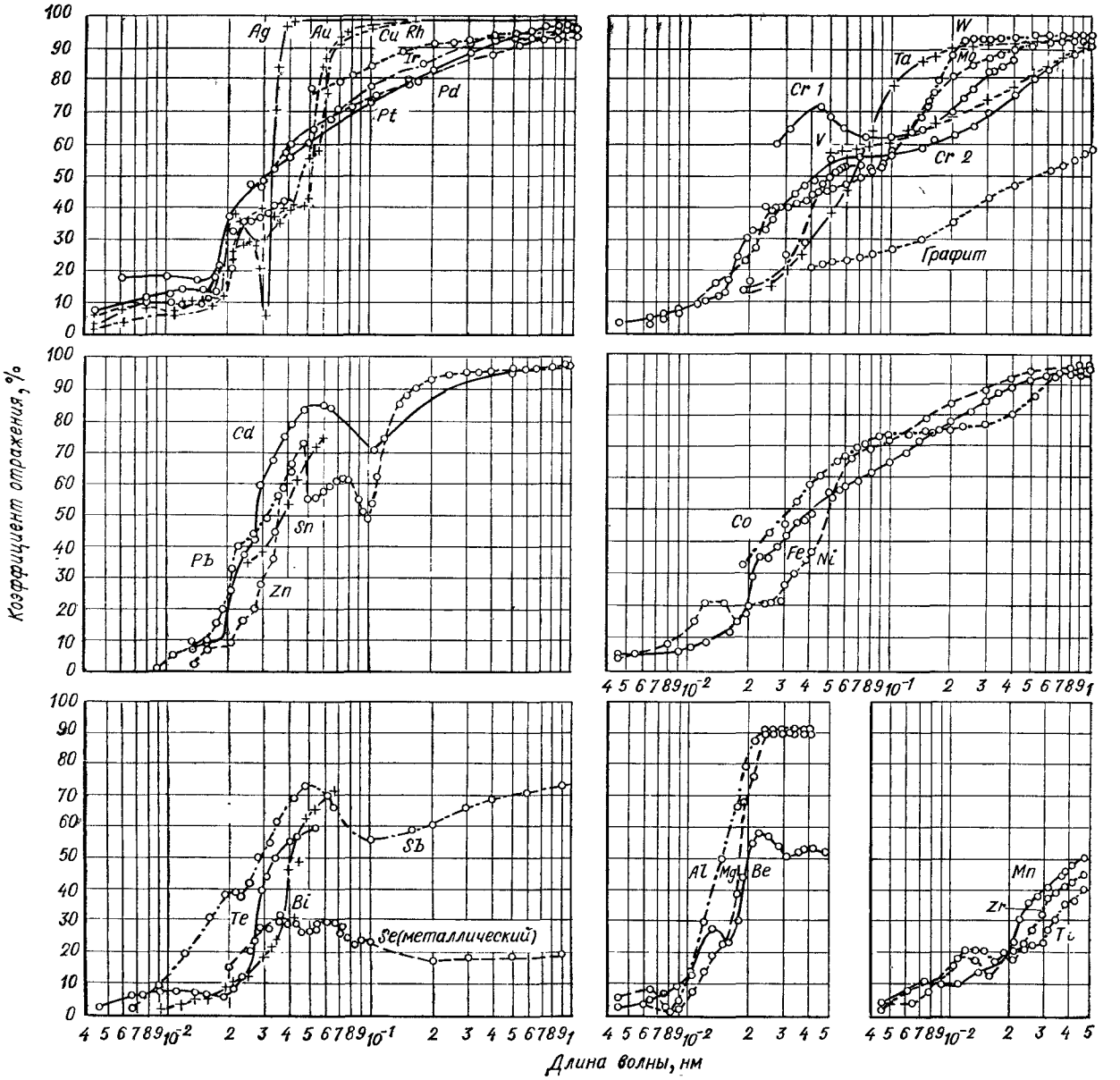


Рис. 31.1. Коэффициент отражения света для металлов и графита [7].

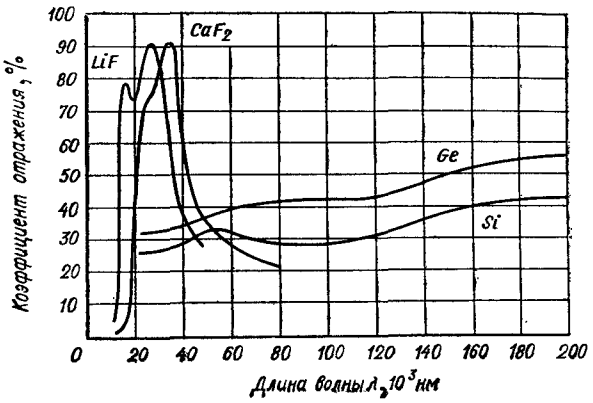


Рис. 31.2. Коэффициент отражения для LiF; CaF_2; Ge и Si [8].

Таблица 31.22

Коэффициент отражения света от тонких стеклянных полированных пластинок [5], %

Учтены обе поверхности и внутренние отражения. Рассчитано для желтых лучей с показателем преломления n_D

Угол падения, *град*	n_D				
	1,50	1,55	1,60	1,65	1,70
0	7,8	8,8	10,2	11,3	12,6
10	7,8	8,8	10,2	11,3	12,6
20	8,0	8,9	10,3	11,4	12,7
30	8,0	9,1	10,4	11,4	12,8
40	8,6	9,8	11,1	12,2	13,4
50	10,4	11,6	12,7	13,9	15,1
60	15,2	16,3	17,4	18,4	19,4
70	27,3	28,1	28,9	29,6	30,2

Отражение света значительно уменьшается, если отражающую поверхность покрыть «неотражающей» пленкой; в этом случае поверхность становится «просветленной». При нормальном падении света оптическая толщина пленки должна равняться четверти его длины волны, а показатель преломления вещества пленки — корню квадратному из показателя преломления стекла, на которое она наносится. Эффективность пленки зависит от того, насколько выполняются данные условия; на практике для одной пленки отражение света обычно уменьшается приблизительно на 1%. Наиболее часто для просветления употребляют фтористый магний ($n_D = 1{,}390$). Можно также увеличить отражение, нанося на поверхность стекла пленку толщиной, равной одной четверти длины волны, из материала с большим коэффициентом отражения, например из сернистого цинка или двуокиси титана. Такой прием обычно используют для расщепления луча, так как поглощение света в пленке очень мало по сравнению с поглощением полупрозрачными слоями металла.

Таблица 31.23

Показатель преломления материалов, используемых для отражающих покрытий

Материал	Показатель преломления	Области длин волн, в которых используется материал, *нм*
Al_2O_3	1,69	200—7000
Ge	4,0	1300—35 000
GeO_2	2,30	400—5000
MgF_2	1,38	200—5000
$NaAlF_2$	1,35	200—10 000
Si	3,40	900—8000
SiO	1,85	800—7000
SiO_2	1,45	200—8000
Si_2O_3	1,55	300—8000
TiO_2	2,30	400—12 000
ZnS	2,30	140—15 000
ZrO_2	2,1	250—7000

31.3. ОБЛАСТИ ПРОЗРАЧНОСТИ И КОЭФФИЦИЕНТЫ ПОГЛОЩЕНИЯ

Коэффициент пропускания есть отношение потока излучения, прошедшего через данное тело, к падающему потоку излучения.

Коэффициент поглощения есть отношение потока излучения, поглощенного телом, к падающему на него потоку.

В области прозрачности проходит не менее 50% светового потока, а область непрозрачности характеризуется поглощением светового потока до 90% и более.

Таблица 31.24

Пропусканне газовых фильтров в вакуумном ультрафнолете [9]

Области относительной прозрачности и относительной непрозрачности газов даны для температуры газа 0°С и давления 760 *мм рт. ст.*

Газ	Толщина фильтра, *см*	Область относительной прозрачности, *нм*	Область относительной непрозрачности, *нм*
CCl_4	0,0025	116—120; >155	122—133; <115
CCl_2F_2	0,0025	120,0—123,0; >137,5	123,5—132,5; < 119,5
CH_4	0,025	140	<137,5
C_2H_4	0,025	185	<175
C_3H_8	0,1	160	<157,5
CH_3—CH	0,1	166	<164
CH_3Br	0,05	152,5—157,5; >180	161—177,5; <152
CH_3Cl	0,1	142,5—146; >185	147,5—161; <142
CO_2	0,5	117,5—125; >165	130—155; <115
Cl_2	0,1	Около 12 полос прозрачности между 117 и 131. Одна полоса прозрачна для лаймановской линии водорода; >145	
CS_2	0,5	Около 10 полос прозрачности между 153 и 178; > 220.	180—210; < 152
H_2S	0,1	160—170; > 230	180—220; <157,5
NH_3	0,1	Около 10 полос прозрачности между 145 и 170; > 215	170—205; <142,5
N_2O	0,025	120—122; > 153	122—135; <119
SO_2	0,1	162,5—175; > 225	180—215; <159

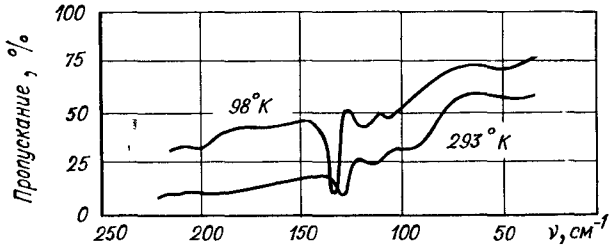


Рис. 31.3. Пропускание кристаллического кварца толщиной 5 *мм* в инфракрасной области [10]

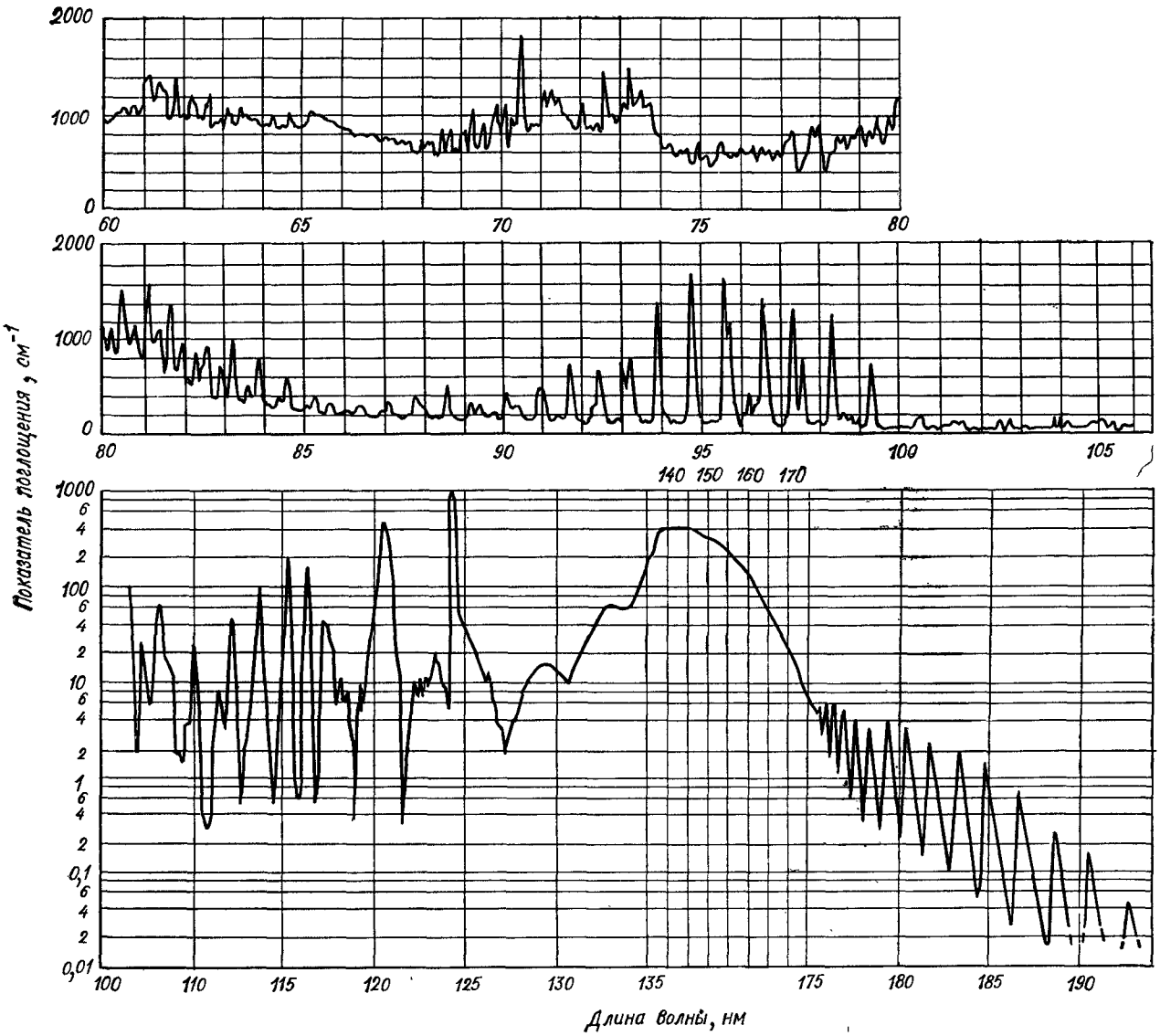


Рис.31.4. Коэффициент поглощения вакуумного ультрафиолета молекулярным кислородом в области 60—190 *нм* [11, 12].

Таблица 31.25

Области прозрачности некоторых веществ

Числа в скобках означают коэффициент пропускания в процентах для соответствующих значений длин волн и толщины слоя материала

Вещество	Толщина, *мм*	Граница, *нм*		Литература
		коротковолновая	длинноволновая	
Бромистый калий KBr	10	210 (50)	28 000 (50)	[4]
» цезий CsBr	5	—	40 800 (50)	[8]
Вода дистиллированная	20	188 (50)	—	[13]
» »	40	192 (50)	—	[13]
» »	80	202 (50)	—	[13]
Викор	2	223 (50)	—	[13]
Германий	2	1800 (20)	15 000 (40)	[8]
Гипс	1	161	—	[9]
Двуокись титана (рутил)	6	420 (40)	6 000 (10)	[14]
Иодистый калий KI	0,83	250	42 000 (50)	[5, 8]
» цезий CsI	10	290 (50)	52 000 (50)	[8]
Исландский шпат	—	200	2 000	[5]
Канадский бальзам	0,1	330	—	[5]
Кварц кристаллический	5	185 (50)	—	[13]
» »	10	193—200(50)	3 600 (50)	[4, 13]
» плавленый	10	194 (50)	—	[13]
Корунд Al_2O_3	1	145 (30)	6 000 (50)	[8, 13]
Кремний кристаллический	0,5	1500 (10)	20 000 (45)	[8]
КРС-5	10	500	36 000 (50)	[4]
КРС-6	—	—	30 000 (45)	[8]
Окись магния-алюминия синтетическая $MgO \cdot 3Al_2O_3$	—	200	6 000	[5]
Оконное стекло	1	316 (50)	—	[13]
» »	3	330 (50)	—	[13]
Полиметилметакрилат	2,5	322 (50)	—	[13]
»	5	338 (50)	—	[13]
»	10	350 (50)	—	[13]
Стекло оптическое БК10	10	330 (50)	2 600 (50)	[4]
» » К 8	10	320 (50)	2 600 (50)	[4]
» » ТК 16	10	350 (50)	2 600 (50)	[4]
» » ТФ 1	10	360 (50)	2 700 (50)	[4]
» » ТФ 5	10	380 (50)	2 700 (50)	[4]
» » Ф 1	10	340 (50)	2 700 (50)	[4]
Слюда	0,01	280	—	[5]
Тефлон	0,006	168	—	[9]
Тефлон $(CF_2—CF_2)_n$	1,81	100 000 (65)	> 600 000(90)	[8]
Титанат строиция $SrTiO_3$	1	—	7 000 (12)	[8]
Топаз	1	153,7	—	[9]
Флюорит CaF_2	5	135 (50)	—	[13]
	10	157—170(50)	9 000 (50)	[4, 13]
Фтористый барий BaF_2	10	230 (50)	12 000 (50)	[4]
» кадмий CdF_2	5	180 (20)	10 000 (60)	[8]
» литий LiF	5	107 (50)	—	[13]
	10	142—160(50)	6 300 (50)	[4, 13]
» натрий NaF (виллиолент)	1	200	16 000 (10)	[8]
Хлористый калий KCl	10	200 (50)	21 000 (50)	[4]
» натрий NaCl	10	200 (50)	17 000 (50)	[4]
» серебро AgCl	5	—	25 000 (35)	[8]

31.4. ИЗЛУЧЕНИЕ

Излучение абсолютно черного тела

Постоянная Стефана—Больцмана

$$\sigma = \frac{2\pi^5 k^4}{15c^2h^3} = \frac{\pi^4 c_1}{15c_2^4} = (5{,}6698 \pm 0{,}0011) \times$$

$$\times 10^{-5}\ эрг \cdot см^{-2} \cdot сек^{-1} \cdot град^{-4}.$$

Энергетическая светимость абсолютно черного тела F равна полному потоку излучения (в сторону внешней нормали) с единицы поверхности при абсолютной температуре T за единицу времени:

$$F = \sigma T^4.$$

Интенсивность излучения абсолютно черного тела

$$B = (\sigma/\pi)\, T^4 = 1{,}8048 \cdot 10^{-5} T^4\ эрг \cdot см^{-2} \cdot сек^{-1} \cdot стер^{-1} \times$$

$$\times\ град^{-4}.$$

Плотность излучения внутри полости при температуре T

$$u = (4\sigma/c)\, T^4 = 7{,}565 \cdot 10^{-15} T^4 \ эрг \cdot см^{-3} \cdot град^{-4}.$$

В среде с показателем преломления n

$$B = n^2 (\sigma/\pi)\, T^4, \quad u = n^3 (4\sigma/c)\, T^4.$$

Такие же поправочные множители вводятся в формулу Планка; n есть функция частоты или длины волны: n_ν, n_λ. Постоянная фотонного потока равна

$$p = 15{,}10611 c/c_2^3 = 1{,}5210 \cdot 10^{11} \ фотон \cdot см^{-2} \cdot сек^{-1} \cdot град^{-3}.$$

Фотонный поток с единицы абсолютно черной поверхности

$$N = pT^3.$$

Поляризация. Излучение абсолютно черного тела неполяризовано, однако интенсивность линейно поляризованного излучения в выбранном направлении составляет половину значения, вычисленного по приведенным выше формулам.

Функция Планка (отнесенная к единичному интервалу длин волн)

$$(c/4)\, u_\lambda = \pi B_\lambda = F_\lambda = 2\pi hc^2 \lambda^{-5} / \left(e^{-hc/k\lambda T} - 1 \right) =$$

$$= c_1 \lambda^{-5} / \left(e^{c_2/\lambda T} - 1 \right);$$

$$c_1 = 2\pi hc^2 = (3{,}7403 \pm 0{,}0002) \cdot 10^{-5} \ эрг \cdot см^2/сек;$$

$$c_2 = hc/k = (1{,}43868 \pm 0{,}00001) \ см \cdot град;$$

$$c_2' = c_2 \lg e = 0{,}62481 \ см \cdot град,$$

где u_λ, B_λ и F_λ — соответственно плотность излучения, интенсивность и энергетическая светимость в единичном интервале длин волн.

Функция Планка (отнесенная к единичному интервалу частот)

$$(c/4)\, u_\nu = \pi B_\nu = F_\nu = 2\pi h\nu^3 c^{-2} / \left(e^{-h\nu/kT} - 1 \right).$$

Закон распределения фотонов

$$N_\lambda = 2\pi c \lambda^{-4} / \left(e^{c_2/\lambda T} - 1 \right);$$

$$N_\nu = 2\pi c^{-2} \nu^2 / \left(e^{h\nu/kT} - 1 \right)$$

[N_λ и N_ν — количество фотонов, испущенных во всех направлениях площадкой 1 $см^2$ за 1 $сек$, в единичном интервале длин волн (частот)].

Закон Вина. Длина волны $\lambda_{макс}$ соответствует максимумам функций F_λ или B_λ:

$$T\lambda_{макс} = 0{,}2014052 c_2 = (0{,}28975 \pm 0{,}00003) \ см \cdot град;$$

$\lambda_{макс}$ — длина волны, соответствующая максимуму фотонного излучения

$$T\lambda_{макс} = 0{,}2550571 c_2 = (0{,}36694 \pm 0{,}00003) \ см \cdot град;$$

$\nu_{макс}$ — частота, соответствующая максимумам функций F_ν или B_ν:

$$Tc/\nu_{макс} = 0{,}3544290 c_2 = 0{,}50990 \pm 0{,}00004 \ см \cdot град.$$

Таблица функции Планка дает:

$F_{0-\lambda} = \int_0^\lambda F_\lambda \, d\lambda$ в долях $F_{0-\infty}$ (обозначенного ранее F);

F_λ » » $F_{\lambda_{макс}}$;

$N_{0-\lambda} = \int_0^\lambda N_\lambda \, d\lambda$ » » $N_{0-\infty}$ (обозначенного ранее N);

N_λ » » $N_{\lambda_{макс}}$;

F_ν » » $F_{\nu_{макс}}$.

Приближенные выражения для больших и малых длин волн даются как функции $x = c_2/\lambda T = h\nu/kT$.

Абсолютные значения можно получить, используя следующие данные:

$$F_{0-\infty} = 6{,}493939 c_1 (T/c_2)^4 =$$

$$= 5{,}6698 \cdot 10^{-5} T^4 \ эрг/(см^2 \cdot сек \cdot град^4);$$

$$F_{\lambda_{макс}} = 21{,}20144 c_1 (T/c_2)^5 =$$

$$= 1{,}287 \cdot 10^{-4} T^5 \ эрг/(см^3 \cdot сек^1 \cdot град^5).$$

Для λ в микронах и $T = 10\,000°K$

$$F_{\lambda_{макс}} = 1{,}287 \cdot 10^{12} \ эрг/(см^2 \cdot сек \cdot мкм)$$

$$N_{0-\infty} = 15{,}10611 c (T/c_2)^3 =$$

$$= 1{,}5210 \cdot 10^{11} T^3 \ фотон/(см^2 \cdot сек \cdot град^3);$$

$$N_{\lambda_{макс}} = 30{,}03263 c (T/c_2)^4 =$$

$$= 2{,}1018 \cdot 10^{11} T^4 \ фотон/(см^3 \cdot сек \cdot град^4);$$

$$F_{\nu_{макс}} = 1{,}421436 (c_1/c) (T/c_2)^3 =$$

$$= 5{,}956 \cdot 10^{-16} T^3 \ эрг/(см^2 \cdot град^3).$$

В единицах волнового числа при $T = 10\,000°K$

$$F_{\nu \ макс} = 1{,}7856 \cdot 10^7 \ эрг/(см \cdot сек).$$

Таблица значений функций Планка [1]

λT, *см·град*	$x = c_2/\lambda T$	$\frac{F_{0-\lambda}}{F_{0-\infty}}$	$\frac{F_\lambda}{F_{\lambda_{макс}}}$	$\frac{N_{0-\lambda}}{N_{0-\infty}}$	$\frac{N_\lambda}{N_{\lambda_{макс}}}$	$\frac{F_\nu}{F_{\nu_{макс}}}$
	Бо́льшие x	$\frac{x^3e^{-x}}{6{,}4939}$	$\frac{x^5e^{-x}}{21{,}201}$	$\frac{x^2e^{-x}}{2{,}404}$	$\frac{x^4e^{-x}}{4{,}780}$	$\frac{x^3e^{-x}}{1{,}4214}$
	↑	↑	↑	↑	↑	↑
0,00						
0,01	143,85	$0{,}0^{56}16$	$0{,}0^{53}98$	$0{,}0^{58}29$	$0{,}0^{54}30$	$0{,}0^{56}70$
0,02	71,925	$0{,}0^{26}35$	$0{,}0^{23}52$	$0{,}0^{27}12$	$0{,}0^{24}33$	$0{,}0^{25}15$
0,03	47,950	$0{,}0^{16}27$	$0{,}0^{13}18$	$0{,}0^{17}14$	$0{,}0^{14}17$	$0{,}0^{15}12$
0,04	35,962	$0{,}0^{11}19$	$0{,}0^{9}683$	$0{,}0^{12}13$	$0{,}0^{10}84$	$0{,}0^{11}79$
0,05	28,770	$0{,}0^{8}130$	$0{,}0^{6}297$	$0{,}0^{9}118$	$0{,}0^{7}458$	$0{,}0^{8}536$
0,06	23,975	$0{,}0^{7}932$	$0{,}0^{4}145$	$0{,}0^{7}100$	$0{,}0^{5}267$	$0{,}0^{6}375$
0,07	20,550	$0{,}0^{5}186$	$0{,}0^{3}206$	$0{,}0^{6}230$	$0{,}0^{4}444$	$0{,}0^{5}726$
0,08	17,981	$0{,}0^{4}165$	0,00138	$0{,}0^{5}223$	$0{,}0^{3}339$	$0{,}0^{4}635$
0,09	15,983	$0{,}0^{4}872$	0,00563	$0{,}0^{4}138$	0,00156	$0{,}0^{3}329$
0,10	14,385	$0{,}0^{3}321$	0,01644	$0{,}0^{4}559$	0,00507	0,00118
0,12	11,988	0,00214	0,07264	$0{,}0^{3}439$	0,02687	0,00754
0,14	10,275	0,00780	0,18627	0,00184	0,08041	0,02631
0,16	8,9906	0,01974	0,34518	0,00522	0,17031	0,06369
0,18	7,9917	0,03938	0,52026	0,01151	0,28877	0,12158
0,20	7,1925	0,06679	0,68344	0,02132	0,42144	0,19659
0,25	5,7540	0,16145	0,94612	0,06155	0,72936	0,42622
0,30	4,7950	0,27336	0,99712	0,11937	0,92241	0,64687
0,35	4,1100	0,38306	0,92271	0,18624	0,99574	0,81474
0,40	3,5962	0,48102	0,80010	0,25511	0,98674	0,92272
0,45	3,1967	0,56444	0,67136	0,32158	0,93161	0,97996
0,50	2,8770	0,63386	0,55467	0,38237	0,85519	0,99952
0,60	2,3975	0,73789	0,37378	0,49020	0,69155	0,96993
0,70	2,0550	0,80812	0,25394	0,57552	0,54815	0,89689
0,80	1,7981	0,85631	0,17598	0,64306	0,43408	0,81177
0,90	1,5983	0,89004	0,12471	0,69669	0,34613	0,72820
1,00	1,4385	0,91418	0,09037	0,73968	0,27870	0,65150
1,20	1,1988	0,94506	0,05040	0,80285	0,18652	0,52330
1,40	1,0275	0,96286	0,03010	0,84605	0,12997	0,42536
1,60	0,8991	0,97377	0,01902	0,87656	0,09379	0,35087
1,80	0,7992	0,98081	0,01257	0,89895	0,06974	0,29353
2,0	0,7192	0,98556	0,00862	0,91585	0,05318	0,24859
3,0	0,4795	0,99524	0,00194	0,95945	0,01798	0,12606
4,0	0,3596	0,99790	$0{,}0^{3}655$	0,97625	0,00808	0,07560
5,0	0,2877	0,99890	$0{,}0^{3}279$	0,98452	0,00430	0,05025
10	0,1438	$0{,}9^{3}848$	$0{,}0^{4}188$	0,99592	$0{,}0^{3}579$	0,01354
20	0,0719	$0{,}9^{4}801$	$0{,}0^{5}122$	0,99893	$0{,}0^{4}751$	0,00351
50	0,0288	$0{,}9^{5}878$	$0{,}0^{7}318$	$0{,}09^{3}828$	$0{,}0^{5}491$	$0{,}0^{3}574$
100	0,0144	$0{,}9^{6}848$	$0{,}0^{8}200$	$0{,}9^{4}570$	$0{,}0^{6}618$	$0{,}0^{3}145$
	↓	↓	↓	↓	↓	↓
	Малые x	$1-0{,}05134\ x^3$	$0{,}04717\ x^4$	$1-0{,}2080\ x^2$	$0{,}2092\ x^3$	$0{,}7035x^2$

Тепловое излучение тел

Излучение поверхности тел характеризуют спектральной степенью черноты $\varepsilon_{\nu,T}$ и интегральной степенью черноты ε_T. Величина $\varepsilon_{\nu,T}$ равна отношению интенсивностей излучения реального тела и абсолютно черного тела при фиксированных значениях λ и T. Интегральная степень черноты определяется как отношение полной интенсивности излучения реального тела к полной интенсивности излучения абсолютно черного тела, взятых при одной и той же температуре T. Для металлов значения ε_T невелики (0,1—0,3) и сильно зависят от качества поверхности металла. У грязных и неполированных поверхностей ε_T значительно выше, чем у очищенных и полированных. Для угля и окислов металлов значения

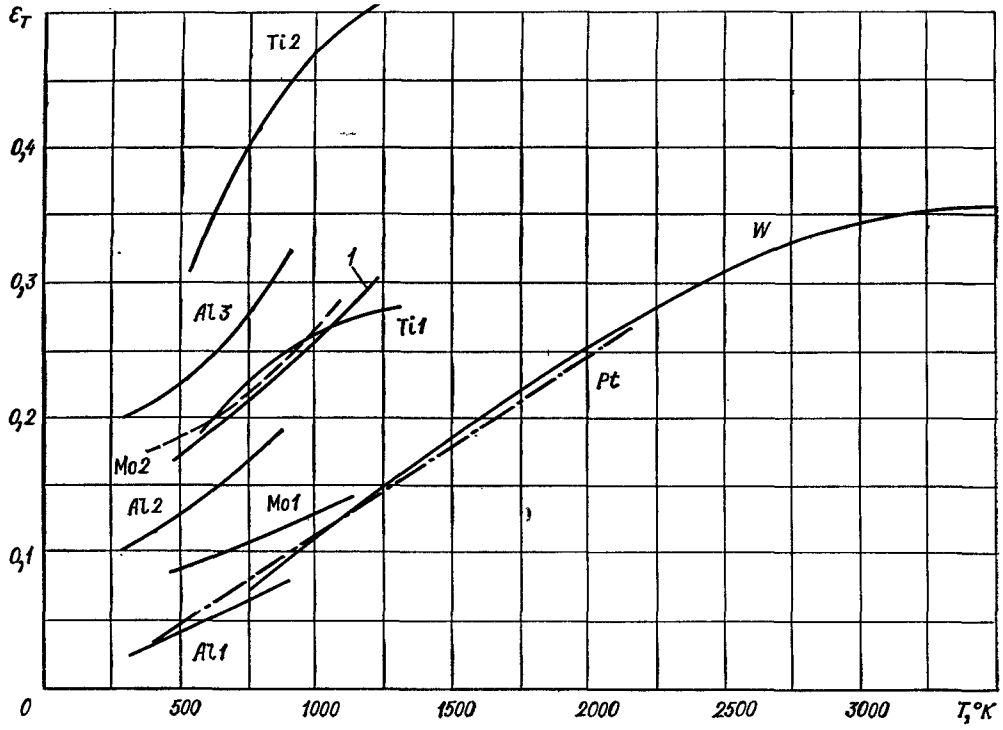


Рис. 31.5. Интегральная степень черноты ε_T для некоторых металлов [15, 16]:

1 — нержавеющая сталь марки 1Х18Н9Т [16] титаи [16]: Ti*1* — полированный очищенный, Ti*2* — неполнрованный неочищенный; молибден: Mo*1* — полнрованиый спеченный, Mo*2* — неполированный литой; алюминий: Al*1* — полированный очищенный, Al*2* — слегка окисленный, Al*3* — сильно окисленный.

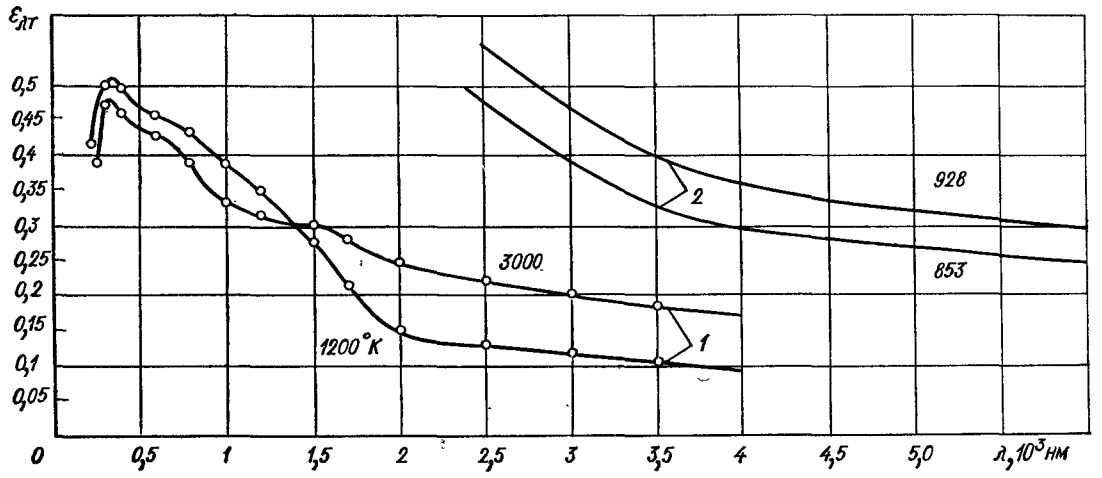


Рис. 31.6. Спектральная степень черноты $\varepsilon_{\lambda T}$ [15—17]:

1 — вольфрам; *2* — нержавеющая сталь марки 1Х18Н9Т.
Температура поверхности указана на кривых.

ε_T доходят до 0,9, у черненой платины ε_T — до 0,93—0,97. Некоторые экспериментальные зависимости $\varepsilon_{\lambda, T}$ и ε_T от длины волны и температуры приведены на рис. 31.3 и 31.4 и в табл. 31.27. Если отсутствуют специальные указания в подписях к рисункам, данные получены для излучения в вакууме чистых, механически полированных поверхиостей металлов.

Радиационной температурой $T_{\text{рад}}$ тела называется такая температура черного тела, при которой совпадают величины их полного излучения. Истинная температура излучающего тела T связана с $T_{\text{рад}}$ [18]:

$$T = T_{\text{рад}} \sqrt[4]{\varepsilon_T}\,.$$

Таблица 31.27

Интегральная степень черноты некоторых тел [18]

Вещество	T, °К	ε_T	Вещество	T, °К	ε_T
Железо	1500	0,11	Окись никеля	1500	0,85
Медь расплавленная	1400	0,15	Платина	1500	0,15
Никель	1500	0,06	Серебро	1300	0,04
Окись железа	1500	0,89	Тантал	2300	0,25
» меди	1400	0,54	Уголь	1500	0,52

Цветовая температура. Если распределение энергии на некотором участке спектра реального тела может быть отождествлено с распределением энергии абсолютно черного тела, имеющего температуру $T_{цв}$, то излучающее тело имеет такой же «цвет», как и черное тело температуры $T_{цв}$, а $T_{цв}$ называют цветовой температурой тела [13]. Для тел, характер излучения которых сильно отличается от излучения черного тела, понятие цветовой температуры теряет смысл.

Яркость некоторых источников света

Таблица 31.28

Яркость и цветовая температура $T_{цв}$ некоторых источников света

Источник	Яркость, *сб*	$T_{цв}$, °К
Ночное безлуиное небо	10^{-6}	—
Полная луна, видимая сквозь атмосферу	0,25	—
Ясное дневное небо	0,15—0,4	$(12 \div 24) \cdot 10^3$
Пламя стеариновой свечи	0,5	1930
Люминесцентные лампы	0,53—0,66	—
Ацетиленовое пламя	10,8	2360
Штифт Нернста (2,3 *вт/св*)	260	—
Солнце у горизонта	600	—
Электрическая лампочка с вольфрамовым волоском газонаполненная		
12,9 *лм/вт*	597	2740
15,2 *лм/вт*	772	2810
18,1 *лм/вт*	1000	2920
21,2 *лм/вт*	1325	3000
Кратер угольной дуги	$17{,}2 \cdot 10^3$	3780
Капиллярная ртутная дуга сверхвысокого давления	$4 \cdot 10^4$	—
Кратер угольной дуги (наибольшая яркость, ток 150 *а*)	$8 \cdot 10^4$	$(5{,}0 \div 5{,}5) \times 10^3$
Шаровая ртутная лампа СВДШ	$12 \cdot 10^4$	—
Солнце в зените	$16{,}5 \cdot 10^4$	5400
Искра разряда		
в ксеноне	$1{,}1 \cdot 10^7$	—
в аргоне	$1{,}5 \cdot 10^7$	—
в воздухе	$2{,}1 \cdot 10^7$	—
в гелии	$1{,}5 \cdot 10^8$	—

31.5. СВЕТОЧУВСТВИТЕЛЬНОСТЬ ФОТОГРАФИЧЕСКИХ МАТЕРИАЛОВ

Светочувствительностью называют обратную освещенности H величину S, которая создает на фотографическом слое определенную плотность почернения D [19]. В системе ГОСТ 2817—15 светочувствительность оценивается по критерию, представляющему собой диффузную оптическую плотность 0,2 сверх плотности вуали D_0:

$$S_{0,2} = 1/H_{D=0,2+D_0},$$

где $[H] = [люкс \cdot сек]$.

В системе ДИН 4512

$$S = -10 \lg (H_{D=0,1+D_0}).$$

Таблица 31.29

Светочувствительность в различных сенситометрических системах

ГОСТ$_{0,2}$	11	16	22	32	45	65	90	130	180	250
X и D_{10}	250	350	500	700	900	1400	2000	3000	4000	6000
ДИН	12	13	15	17	18	20	21	23	24	26
10	10	10	10	10	10	10	10	10	10	10

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Аллен К. У.** Астрофизические величины. Пер. с с англ. М., Изд-во иностр. лит., 1960.
2. **Кругер М. Я.** и др. Справочник конструктора оптико-механических приборов. Л., «Машиностроение», 1968.
3. **Sosman R. B.** The Properties of Silica. N. Y., Chemical Catalog Co., USA, 1927.
4. **Пейсахсон И. В.** Оптика спектральных приборов. Л., «Машиностроение», 1970.
5. **Кэй Дж., Лэби Т.** Таблицы физических и химических постоянных. Пер. с англ. М., Физматгиз, 1962.
6. **Мотулевич Г. П.** Металлооптика.—БСЭ., т. 16, с. 119.
7. **Taschenbuch** für Chemiker und Physiker. Berlin. Springer Verlag, 1943.
8. **Воронкова Е. М.** и др. Оптические материалы для инфракрасной техники. М., «Наука», 1965.

9. **Chubb T. A., Friedman H.** «Rev. Sci. Instrum.», 1955, v. 26, p. 493.
10. **Смит Р., Джонс Ф., Чесмер Р.** Обнаружение и измерение инфракрасного излучения. Пер. с англ. М., Изд-во иностр. лит., 1959.
11. **Huffman R. E.** e. a. «J. Chem. Phys.», 1964, т. 40, p. 356.
12. **Inn E. C. V., Zelikoff M.** «J. Chem. Phys.», 1973, v. 21, p. 1026.
13. **Калверт Дж., Питтс Дж.** Фотохимия. Пер. с англ. М., «Мир», 1968.
14. **Тарасов К. И.** Спектральные приборы. Л., «Машиностроение», 1968.
15. **Gubareff C. G.** e. a. Review of the Termal Radiation Property Values for Metals and Other Materials, 1957.
16. **Садыков Б. С.** Каид. диссертация. Московский энергет. ин-т им. Кржижановского, 1963.
17. **Larrabbee R. D.** «J. Opt. Soc. Amer.», 1959, v. 49, p. 619.
18. **Ландсберг Г. С.** Оптика. М., Гостехиздат, 1952.
19. **Краткий** фотографический справочник. М., Госкиноиздат, 1952.

ГЛАВА 32

СПЕКТРЫ ЭЛЕМЕНТОВ И НЕКОТОРЫЕ ПАРАМЕТРЫ МОЛЕКУЛ

32.1. КЛАССИФИКАЦИЯ СПЕКТРОВ АТОМОВ И МОЛЕКУЛ

Современное состояние теории спектров атомов вещества допускает достаточно строгое рассмотрение только в случае одноэлектронных атомов, т. е. в случае водорода и водородоподобных ионов He^+, Li^{2+}, Be^{3+} и т. п. Теория спектров многоэлектронных атомов осиовывается на приближении центрального самосогласованного поля, при котором состояиие атома как целого определяется совокупностью состояний всех его электронов с учетом их взаимодействия.

В общем случае для атома с Z электроиами уровии эиергии характеризуются набором кваитовых чисел отдельных электронов: главных квантовых чисел n_i, орбитальных (или азимутальиых) кваитовых чисел l_i орбитальных магнитиых кваитовых чисел m_{li} и спиновых магнитных квантовых чисел m_{si} $(i = 1, 2, ..., Z)$. Набор главных квантовых чисел n_i принимает только целочисленные значеиия 1, 2, 3 и т. д.; квантовое число l_i может прииимать целочислеиные значения от 0 до $n_i - 1$; m_{li} при заданном l_i принимает $2l_i + 1$значение: $l_i, (l_i - 1), ..., (-l_i)$, и определяет проекцию орбитального момента электроиа на заданиое направление; m_{si} дает значение проекции на то же иаправление спинового момента электроиа и может равияться только $+1/2$ и $-1/2$. Для последовательных значений l_i обычно используют буквеиные обозначения:

$l =$	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14
	s	p	d	f	g	h	i	k	l	m	n	o	q	r	t

Распределеиие электроиов в атоме при задаиии всех n_i и l_i определяет электроииую конфигурацию. Минимуму эиергии атома соответствует заполиение электронных оболочек с минимальными значениями n_i и соответствующими им минимальиыми l_i. Наибольшее число электроиов, которые в соответствии с принципом Паули могут иметь одииаковые значеиия n_i и l_i, т. е. принадлежать одной оболочке, дает число заполиения оболочки $k = 2(2l_i + 1)$. Для обозначения различных оболочек используют запись nl^k. Таким образом, по мере роста заряда ядра атома при переходе от $Z = 1$ для водорода ко все большим зиачениям Z последовательно измеияется электроииая коифигурация (табл. 32.1). Полностью заполиеиные внутренние оболочки обычно не указываются. Следует также отметить, что для больших значений Z последовательность заполнения, определенная выше, может нарушаться.

При иормальной связи между электронами в атоме, т. е. когда их электростатическое взаимодействие много больше магнитного, орбитальиые моменты отдельных электронов складываются в полный орбитальный момент атома $\mathbf{L} = \sum_i \mathbf{l}_i$, а спиновые момеиты $\mathbf{s}_i$ — в полный спиновой момент $\mathbf{S} = \sum_i \mathbf{s}_i$. Затем сложение $\mathbf{L}$ и $\mathbf{S}$ дает полный момент атома $\mathbf{J} = \mathbf{L} + \mathbf{S}$. Уровни энергии атомов в этом случае обозначают символами $^{2S+1}L_J$ и называют спектральными термами, или просто термами. Для обозначеиия термов используются заглавные буквы латинского алфавита:

$L =$	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14
	S	P	D	F	G	H	I	K	L	M	N	O	Q	R	T

Величина $2S + 1$ носит название мультиплетности терма и указывает число компонент в тонкой структуре уровия энергии, если $S \leqslant L$. В случае $S \geqslant L$ число компонент равно $2L + 1$, одиако и в этом случае название мультиплетности сохраняется за числом $2S + 1$. Если мультиплетность терма равиа 1, терм называется сииглетным, 2 — дублетным, 3 — триплетным, 4 — квартетиым и т. д. Термы основных состояний атомов приведены в табл. 32.1. Электронной конфигурации может соответствовать иесколько термов. Терм с минимальиой энергией (осиовиой) может быть найден по правилу Гунда [1]. Сомнительные случаи в табл. 32.1. помечены знаком вопроса «?». В тех случаях, когда необходимо указывать четиость состояний, относящихся к даниому терму, нечетиые термы отмечаются индексом o (*odd* — иечетный), который ставится справа вверху от L. Отсутствие индекса o указывает на четность терма. Все термы даиной электронной конфигурации имеют одииаковую четность, так как четность определяется знаком выражения $(-1)^{l_1+l_2+\ldots l_Z}$ (+ для четиого и — для иечетиого термов).

В ряде случаев, особеино для атомов тяжелых элемеитов и многозарядиых иоиов, магиитное спии-орбитальиое взаимодействие электронов значительно сильнее электростатического взаимодействия. Этот тип связи иосит название *jj*-связи. Соответственно меияется и систематика уровней эиергии атома [1].

Характерной особеиностью спектров молекул, даже простейших — двухатомиых, является то, что в них наряду с движением электронов существуют еще колебательиые движеиия ядер относительио положения равновесия и вращательиые движения молекулы в пространстве как целого. Это приводит к тому, что спектры молекул оказываются значительио сложнее спектров атомов.

Полная энергия молекулы складывается из трех частей (без учета взаимодействия различных движений)

$$E = E_{эл} + E(v) + E_v(J),$$

где $E_{эл}$, $E(v)$ и $E_v(J)$ — соответственно энергии электроиного, колебательного и вращательного состояний.

В случае простейшей двухатомной молекулы имеем для колебательной энергии (в $см^{-1}$):

$$E(v) = \omega_e(v + {}^1/_2) - \omega_e x_e (v + {}^1/_2)^2 + \cdots,$$

где ω_e и x_e — колебательные константы и v — колебательное квантовое число; v используется также для обозиачения колебательных состояний. Вращательная энергия молекулы (в $см^{-1}$):

$$E_v(J) = B_v J(J+1) - D_v J^2 (J+1)^2 + \cdots,$$

где J — вращательное квантовое число: B_v и D_v — вращательные константы для колебательного состояния молекулы с квантоным числом v; J — также иснользуется для обозначения соответствующего вращательного состояния.

Частота перехода в молекуле определяется разностью энергий верхнего (со штрихом) и нижнего (без штриха) уровней (в $см^{-1}$):

$$\nu = E'_{эл} + E(v') + E_{v'}(J') - E_{эл} - E(v) - E_v(J).$$

Чисто вращательные переходы сопровождаются только изменением J в заданном электронном или колебательном состоянии. Переход из верхнего состояния $J+1$ в нижнее J обозначается $R(J)$. Колебательно-вращательные переходы сопровождаются изменением J и v в заданном электроиом состоянии. В соответствии с правилами отбора переходы из вращательного состояния J верхнего колебательного уровня во вращательиое состояние J нижнего колебательного уровня называют Q-ветвью. Такие переходы с $\Delta J = 0$ обозначают $Q(J)$. P-ветвь соответствует переходам из вращательного состояния $J-1$ верхнего колебательного уровня во вращательное состояние J нижиего колебательного уровня и обозначается $P(J)$ ($\Delta J = -1$). Аналогично для R-ветви — $R(J)$ и $\Delta J = +1$ — имеем переход из состояния $J+1$ в J. P-, Q- и R-ветви, связаиные с верхним колебательным уровнем v' и нижним колебательным уровнем v, называются вращательно-колебательной полосой и обозначаются $v' - v$.

Колебательно-вращательиые полосы, связанные с переходами между двумя электронными уровнями, называются электронными системами и обозначаются символами соответствующих электронных состояний.

Классификация электронных состояний двухатомных молекул определяется, прежде всего, наличием аксиальной симметрии, а не центральной, как в атоме. В результате оказывается более важной проекция полного орбитального момента **L** на ось молекулы L_z. Для модуля L_z вводится квантовое число Λ, которое по аналогии с обозначениями S, P, D, ... принято обозиачать буквами греческого алфавита:

$\Lambda = 0$,	1,	2,	3,	4, ...
Σ	Π	Δ	Φ	Γ...

Молекула, как и атом, характеризуется мультиплетностью электронных состояний. Мультиплетность уровня определяется и обозначается по указаииым выше правилам. По отношению к отражению в плоскости симметрии, проходящей через ось молекулы, электронные состояния разделяются на положительиые (+) и отрицательные (—), что указывается вверху справа у квантового числа Λ. Для линейных молекул, обладающих цеитром симметрии, электронные состояния делятся на четные (g) и нечетные (u), что указывается справа внизу у Λ. В ряде случаев перед символом терма Λ дается дополнительный символ (A, B, C, X, ..., a, b, c, ...), приписываемый каждому коикретному терму и ие связанный однозначно со спектроскопическими характеристиками молекулы.

Электронные состояния многоатомных молекул в целом могут быть классифицированы по их свойствам симметрии. Для линейных многоатомных молекул применима та же классификация, что и для двухатомных. Для нелинейных многоатомных молекул ие имеет определенного значения не только полный орбитальный момент **L**, но и его проекция $\mathbf{L}z$. В связи с этим классификация уровней энергии значительно усложняется [2].

Таблица 32.1

Электронные конфнгурацнн и основные термы атомов [1]

Z	Атом	Электронная конфигурацня	Основиой терм	Z	Атом	Электроиная конфигурация	Основной терм
1	H	$1s$	$^2S_{1/2}$	9	F	$2s^22p^5$	$^2P_{3/2}$
2	He	$1s^2$	$^1S_0$	10	Ne	$2s^22p^6$	$^1S_0$
3	Li	$2s$	$^2S_{1/2}$	11	Na	$3s$	$^3S_{1/2}$
4	Be	$2s^2$	$^2S_0$	12	Mg	$3s^2$	$^1S_0$
5	B	$2s^22p$	$^2P_{1/2}$	13	Al	$3s^23p$	$^2P_{1/2}$
6	C	$2s^22p^2$	$^3P_0$	14	Si	$3s^23p^2$	$^3P_0$
7	N	$2s^22p^3$	$^4S_{3/2}$	15	P	$3s^23p^3$	$^4S_{3/2}$
8	O	$2s^22p^4$	$^3P_2$	16	S	$3s^23p^4$	$^3P_2$

Z	Атом	Электронная конфигурация	Основной терм	Z	Атом	Электронная конфигурация	Основной терм
17	Cl	$3s^23p^5$	$^2P_{3/2}$	55	Cs	$6s$	$^2S_{1/2}$
18	Ar	$3s^23p^6$	$^1S_0$	56	Ba	$6s^2$	$^1S_0$
19	K	$4s$	$^2S_{1/2}$	57	La	$5d6s^2$	$^2D_{3/2}$
20	Ca	$4s^2$	$^2S_0$	58	Ce	$4f^26s^2$	$^3H_4$?
21	Sc	$3d4s^2$	$^2D_{3/2}$	59	Pr	$4f^36s^2$	$^4I^0_{9/2}$?
22	Ti	$3d^24s^2$	$^3F_2$	60	Nd	$4f^46s^2$	$^5I_4$
23	V	$3d^34s^2$	$^4F_{3/2}$	61	Pm	$4f^56s^2$	$^6H_{5/2}$?
24	Cr	$3d^54s$	$^7S_3$	62	Sm	$4f^66s^2$	$^7F_0$
25	Mn	$3d^54s^2$	$^6S_{5/2}$	63	Eu	$4f^76s^2$	$^8S_{7/2}$
26	Fe	$3d^64s^2$	$^5D_4$	64	Gd	$4f^75d6s^2$	$^9D_2$
27	Co	$3d^74s^2$	$^4F_{9/2}$	65	Tb	$4f^96s^2$	$^6H_{17/2}$?
28	Ni	$3d^84s^2$	$^3F_4$	66	Dy	$4f^{10}6s^2$	$^5I_8$?
29	Cu	$3d^{10}4s$	$^2S_{1/2}$	67	Ho	$4f^{11}6s^2$	$^4I_{15/2}$
30	Zn	$3d^{10}4s^2$	$^1S_0$	68	Er	$4f^{12}6s^2$	$^3H_6$
31	Ga	$4s^24p$	$^2P_{1/2}$	69	Tu	$4f^{13}6s^2$	$^2F_{7/2}$
32	Ge	$4s^24p^2$	$^3P_0$	70	Yb	$4f^{14}6s^2$	$^1S_0$
33	As	$4s^24p^3$	$^4S_{3/2}$	71	Lu	$4f^{14}5d6s^2$	$^2D_{1/2}$
34	Se	$4s^24p^4$	$^3P_2$	72	Hf	$5d^26s^2$	$^3F_2$
35	Br	$4s^24p^5$	$^2P_{3/2}$	73	Ta	$5d^36s^2$	$^4F_{3/2}$
36	Kr	$4s^24p^6$	$^1S_0$	74	W	$5d^46s^2$	$^5D_0$
37	Rb	$5s$	$^2S_{1/2}$	75	Re	$5d^56s^2$	$^6S_{5/2}$
38	Sr	$5s^2$	$^1S_0$	76	Os	$5d^66s^2$	$^5D_4$
39	Y	$4d5s^2$	$^2D_{3/2}$	77	Ir	$5d^76s^2$	$^4F_{9/2}$
40	Zr	$4d^25s^2$	$^3F_2$	78	Pt	$5d^96s$	$^3D_3$
41	Nb	$4d^45s$	$^6D_{1/2}$	79	Au	$5d^{10}6s$	$^2S_{1/2}$
42	Mo	$4d^55s$	$^7S_3$	80	Hg	$5d^{10}6s^2$	$^1S_0$
43	Tc	$4d^65s$	$^6S_{5/2}$	81	Tl	$6s^26p$	$^2P_{1/2}$
44	Ru	$4d^75s$	$^5F_5$	82	Pb	$6s^26p^2$	$^3P_0$
45	Rh	$4d^85s$	$^4F_{9/2}$	83	Bi	$6s^26p^3$	$^4S_{3/2}$
46	Pd	$4d^{10}$	$^1S_0$	84	Po	$6s^26p^4$	$^3P_2$
47	Ag	$4d^{10}5s$	$^2S_{1/2}$	85	At	$6s^26p^5$	$^2P_{3/2}$
48	Cd	$4d^{10}5s^2$	$^1S_0$	86	Rn	$6s^26p^6$	$^1S_0$
49	In	$5s^25p$	$^2P_{1/2}$	87	Fr	$7s$	$^2S_{1/2}$
50	Sn	$5s^25p^2$	$^3P_0$	88	Ra	$7s^2$	$^1S_0$
51	Sb	$5s^25p^3$	$^4S_{3/2}$	89	Ac	d^17s^2	$^2D_{3/2}$
52	Te	$5s^25p^4$	$^3P_2$	90	Th	$6d^27s^2$	$^2F_2$
53	I	$5s^25p^5$	$^2P_{3/2}$	91	Pa	$5f^26d^17s^2$	$^4K_{11/2}$
54	Xe	$5s^25p^6$	$^1S_0$	92	U	$5f^36d^17s^2$	$^5L_6$

Z	Атом	Электронная конфигурация	Основной терм	Z	Атом	Электронная конфигурация	Основной терм
93	Np	$5f^4 6d^1 7s^2$	${}^6L_{11/2}$	97	Bk	$5f^9 7s^2$	${}^8H_{17/2}$
94	Pu	$5f^5 6d^1 7s^2$	${}^7F_6$	98	Cf	$5f^{10} 7s^2$	${}^5I_8$
95	Am	$5f^7 7s^2$	${}^8S_{7/2}$	99	Es	$5f^{11} 7s^2$	${}^4I_{15/2}$
96	Cm	$5f^7 6d^1 7s^2$	${}^9D_2$				

32.2. ПЕРЕХОД ОТ ДЛИН ВОЛН, ИЗМЕРЕННЫХ В В ВОЗДУХЕ, К ДЛИНАМ ВОЛН В ВАКУУМЕ

Для перехода к значениям длин волн в вакууме $\lambda_{вак}$ от значений длин волн в воздухе $\lambda_{возд}$ используется формула:

$$\lambda_{вак} = n\lambda_{возд},$$

где n — показатель преломления сухого воздуха при температуре $t = 15°C$ и давлении 760 *мм рт. ст.*

Таблица 32.2

Поправка $\Delta\lambda$, Å, для перехода к длинам волн в вакууме
$\Delta\lambda = \lambda_{вак} - \lambda_{возд}$ **для** $\lambda_{возд} = 200 \div 5000$ ***нм.***

При $\lambda < 200$ *нм* обычно применяют длины волн в вакууме. Таблица перехода составлена для сухого воздуха. Для воздуха с влажностью до 100% поправки в видимой области изменяются приблизительно на 0,01 *нм* [3].

$\lambda_{возд}$, *нм*	00	10	20	30	40	50	60	70	80	90
200	0,651	0,670	0,689	0,710	0,731	0,754	0,776	0,800	0,824	0,848
300	0,872	0,897	0,922	0,947	0,972	0,998	1,023	1,049	1,075	1,101
400	1,127	1,153	1,179	1,205	1,232	1,258	1,285	1,311	1,338	1,364
500	1,391	1,417	1,444	1,471	1,497	1,524	1,551	1,578	1,604	1,631
600	1,658	1,685	1,712	1,739	1,766	1,792	1,819	1,846	1,873	1,900
700	1,927	1,954	1,981	2,008	2,035	2,062	2,089	2,116	2,143	2,170
800	2,197	2,224	2,251	2,278	2,305	2,333	2,360	2,387	2,414	2,441
900	2,468	2,495	2,522	2,549	2,576	2,604	2,631	2,658	2,685	2,712
1000	2,739	2,766	2,793	2,821	2,848	2,875	2,902	2,929	2,956	2,983
1100	3,011	3,038	3,065	3,092	3,119	3,146	3,174	3,201	3,228	3,255
1200	3,282	3,309	3,336	3,364	3,391	3,418	3,445	3,472	3,500	3,527
1300	3,554	3,581	3,608	3,636	3,663	3,690	3,717	3,744	3,772	3,799
1400	3,826	3,853	3,880	3,908	3,935	3,962	3,989	4,016	4,044	4,071
1500	4,098	4,125	4,152	4,180	4,207	4,234	4,261	4,288	4,316	4,343
1600	4,370	4,397	4,425	4,452	4,479	4,506	4,533	4,560	4,588	4,615
1700	4,642	4,669	4,697	4,723	4,751	4,778	4,806	4,832	4,860	4,887
1800	4,915	4,942	4,969	4,996	5,023	5,051	5,078	5,105	5,132	5,159
1900	5,187	5,214	5,241	5,268	5,296	5,323	5,350	5,377	5,405	5,432
$\lambda_{возд}$, *нм*	000	100	200	300	400	500	600	700	800	900
2000	5,459	5,731	6,004	6,276	6,549	6,821	7,093	7,366	7,638	7,911
3000	8,183	8,456	8,728	9,001	9,274	9,546	9,818	10,091	10,363	10,636
4000	10,909	11,181	11,454	11,727	11,999	12,272	12,544	12,817	13,089	13,362
5000	13,635									

32.3. ВЕРОЯТНОСТИ РАДИАЦИОННЫХ ПЕРЕХОДОВ В АТОМЕ ВОДОРОДА

Вероятность спонтанного радиационного перехода A_{ki} (в единицу времени) с уровня k на уровень i в атоме водорода определяется выражением

$$A_{ik} = \frac{2e^2 (E_k - E_i)^2}{mc^3} \frac{n_i^2}{n_k^2} f_{ik},$$

где e, m — заряд и масса электрона; c — скорость света в вакууме; n, E — главное квантовое число и энергия уровня, f_{ik} — сила осциллятора.

Таблица 32.3

Переходы $n_i \to n_k$ в атоме водорода [4]

$n_i \to n_k$	λ, нм	E_i, $см^{-1}$	E_k, $см^{-1}$	A_{ki}, $сек^{-1}$	f_{ik}
1—2 (L_α)	121,567	0	82 259	$4{,}699 \cdot 10^8$	0,4162
1—3 (L_β)	102,572	0	97 492	$5{,}575 \cdot 10^7$	$7{,}910 \cdot 10^{-2}$
1—4 (L_γ)	97,2537	0	102 894	$1{,}278 \cdot 10^7$	$2{,}899 \cdot 10^{-2}$
1—5 (L_δ)	94,9743	0	105 292	$4{,}125 \cdot 10^6$	$1{,}394 \cdot 10^{-2}$
1—6 (L_ε)	93,7803	0	106 632	$1{,}644 \cdot 10^6$	$7{,}799 \cdot 10^{-3}$
1—7	93,0748	0	107 440	$7{,}568 \cdot 10^5$	$4{,}814 \cdot 10^{-3}$
1—8	92,6226	0	107 965	$3{,}869 \cdot 10^5$	$3{,}183 \cdot 10^{-3}$
1—9	92,3150	0	108 325	$2{,}143 \cdot 10^5$	$2{,}216 \cdot 10^{-3}$
1—10	92,0963	0	108 582	$1{,}263 \cdot 10^5$	$1{,}605 \cdot 10^{-3}$
1—11	91,9352	0	108 772	$7{,}834 \cdot 10^4$	$1{,}201 \cdot 10^{-3}$
1—12	91,8129	0	108 917	$5{,}066 \cdot 10^4$	$9{,}214 \cdot 10^{-4}$
1—13	91,7181	0	109 030	$3{,}393 \cdot 10^4$	$7{,}227 \cdot 10^{-4}$
1—14	91,6429	0	109 119	$2{,}341 \cdot 10^4$	$5{,}774 \cdot 10^{-4}$
1—15	91,5824	0	109 191	$1{,}657 \cdot 10^4$	$4{,}686 \cdot 10^{-4}$
1—16	91,5329	0	109 250	$1{,}200 \cdot 10^4$	$3{,}856 \cdot 10^{-4}$
1—17	91,4919	0	109 299	8858	$3{,}211 \cdot 10^{-4}$
1—18	91,4576	0	109 340	6654	$2{,}702 \cdot 10^{-4}$
1—19	91,4286	0	109 375	5077	$2{,}296 \cdot 10^{-4}$
1—20	91,4039	0	109 405	3928	$1{,}967 \cdot 10^{-4}$
1—21	91,3826	0	109 430	3077	$1{,}698 \cdot 10^{-4}$
1—22	91,3641	0	109 452	2438	$1{,}476 \cdot 10^{-4}$
1—23	91,3480	0	109 471	1952	$1{,}291 \cdot 10^{-4}$
1—24	91,3339	0	109 488	1578	$1{,}1136 \cdot 10^{-4}$
1—25	91,3215	0	109 503	1286	$1{,}005 \cdot 10^{-4}$
1—26	91,3104	0	109 517	1057	$8{,}928 \cdot 10^{-5}$
1—27	91,3006	0	109 528	875,3	$7{,}970 \cdot 10^{-5}$
1—28	91,2918	0	109 539	729,7	$7{,}144 \cdot 10^{-5}$
1—29	91,2832	0	109 548	612,2	$6{,}429 \cdot 10^{-5}$
1—30	91,2768	0	109 577	516,7	$5{,}806 \cdot 10^{-5}$
1—31	91,2703	0	109 565	438,6	$5{,}261 \cdot 10^{-5}$
1—32	91,2645	0	109 572	374,2	$4{,}782 \cdot 10^{-5}$
1—33	91,2592	0	109 578	320,8	$4{,}360 \cdot 10^{-5}$
1—34	91,2543	0	109 584	276,3	$3{,}986 \cdot 10^{-5}$
1—35	91,2499	0	109 589	239,0	$3{,}653 \cdot 10^{-5}$
1—36	91,2958	0	109 594	207,6	$3{,}357 \cdot 10^{-5}$
1—37	91,2420	0	109 599	181,0	$3{,}092 \cdot 10^{-5}$
1—38	91,2385	0	109 603	158,4	$2{,}854 \cdot 10^{-5}$
1—39	91,2353	0	109 607	139,1	$2{,}640 \cdot 10^{-5}$
1—40	91,2324	0	109 610	122,6	$2{,}446 \cdot 10^{-5}$
2—3 (H_α)	656,280	82 259	97 492	$4{,}410 \cdot 10^7$	0,6407
2—4 (H_β)	486,132	82 259	102 824	$8{,}419 \cdot 10^6$	0,1193
2—5 (H_γ)	434,046	82 259	105 292	$2{,}530 \cdot 10^6$	$4{,}467 \cdot 10^{-2}$
2—6 (H_δ)	410,173	82 259	106 632	$9{,}732 \cdot 10^5$	$2{,}209 \cdot 10^{-2}$
2—7 (H_ε)	397,007	82 259	107 440	$4{,}389 \cdot 10^5$	$1{,}270 \cdot 10^{-2}$
2—8	388,905	82 259	107 965	$2{,}215 \cdot 10^5$	$8{,}036 \cdot 10^{-3}$
2—9	383,538	82 259	108 325	$1{,}216 \cdot 10^5$	$5{,}429 \cdot 10^{-3}$
2—10	379,790	82 259	108 582	$7{,}122 \cdot 10^4$	$3{,}851 \cdot 10^{-3}$
2—11	377,063	82 259	108 772	$4{,}397 \cdot 10^4$	$2{,}835 \cdot 10^{-3}$
2—12	375,015	82 259	108 917	$2{,}874 \cdot 10^4$	$2{,}151 \cdot 10^{-3}$
2—13	373,437	82 259	109 030	$1{,}893 \cdot 10^4$	$1{,}672 \cdot 10^{-3}$

$n_i \to n_k$	λ, нм	E_i, $см^{-1}$	E_k, $см^{-1}$	A_{ki}, $сек^{-1}$	f_{ik}
2—14	372,194	82 259	109119	$1{,}303 \cdot 10^4$	$1{,}326 \cdot 10^{-3}$
2—15	371,197	82 259	109 191	9210	$1{,}070 \cdot 10^{-3}$
2—16	370,385	82 259	109 250	6658	$8{,}764 \cdot 10^{-4}$
2—17	369,715	82 259	109 299	4910	$7{,}270 \cdot 10^{-4}$
2—18	369,155	82 259	109 340	3685	$6{,}099 \cdot 10^{-4}$
2—19	368,683	82 259	109 375	2809	$5{,}167 \cdot 10^{-4}$
2—20	368,281	82 259	109 405	2172	$4{,}416 \cdot 10^{-4}$
2—21	367,935	82 259	109 430	1700	$3{,}808 \cdot 10^{-4}$
2—22	367,636	82 259	109 452	1347	$3{,}302 \cdot 10^{-4}$
2—23	367,376	82 259	109 471	1078	$2{,}884 \cdot 10^{-4}$
2—24	367,148	82 259	109 488	870,7	$2{,}534 \cdot 10^{-4}$
2—25	366,946	82 259	109 503	709,6	$2{,}238 \cdot 10^{-4}$
2—26	366,768	82 259	109 517	583,0	$1{,}987 \cdot 10^{-4}$
2—27	366,610	82 259	109 528	482,6	$1{,}772 \cdot 10^{-4}$
2—28	366,468	82 259	109 539	402,2	$1{,}587 \cdot 10^{-4}$
2—29	366,340	82 259	109 548	337,4	$1{,}427 \cdot 10^{-4}$
2—30	366,226	82 259	109 557	284,7	$1{,}288 \cdot 10^{-4}$
2—31	366,122	82 259	109 565	241,6	$1{,}167 \cdot 10^{-4}$
2—32	366,028	82 259	109 572	206,1	$1{,}060 \cdot 10^{-4}$
2—33	365,942	82 259	109 578	176,7	$9{,}658 \cdot 10^{-5}$
2—34	365,864	82 259	109 584	152,2	$8{,}825 \cdot 10^{-5}$
2—35	365,792	82 259	109 589	131,6	$8{,}086 \cdot 10^{-5}$
2—36	365,727	82 259	109 594	114,3	$7{,}427 \cdot 10^{-5}$
2—37	365,666	82 259	109 599	99,66	$6{,}837 \cdot 10^{-5}$
2—38	365,611	82 259	109 603	87,20	$6{,}309 \cdot 10^{-5}$
2—39	365,559	82 259	109 607	76,57	$5{,}834 \cdot 10^{-5}$
2—40	365,512	82 259	109 610	67,46	$5{,}405 \cdot 10^{-5}$
3—4 (P_α)	1875,10	97 492	102 824	$8{,}986 \cdot 10^6$	0,8421
3—5 (P_β)	1281,81	97 492	105 292	$2{,}201 \cdot 10^6$	0,1506
3—6 (P_γ)	1093,81	97 492	106 632	$7{,}783 \cdot 10^5$	$5{,}584 \cdot 10^{-2}$
3—7 (P_δ)	1004,94	97 492	107 440	$3{,}358 \cdot 10^5$	$2{,}768 \cdot 10^{-2}$
3—8 (P_ε)	954,598	97 492	107 965	$1{,}651 \cdot 10^5$	$1{,}604 \cdot 10^{-2}$
3—9	922,902	97 492	108 325	$8{,}905 \cdot 10^4$	$1{,}023 \cdot 10^{-2}$
3—10	901,491	97 492	108 582	$5{,}156 \cdot 10^4$	$6{,}980 \cdot 10^{-3}$
3—11	886,279	97 492	108 772	$3{,}156 \cdot 10^4$	$4{,}996 \cdot 10^{-3}$
3—12	875,047	97 492	108 917	$2{,}021 \cdot 10^4$	$3{,}711 \cdot 10^{-3}$
3—13	866,502	97 492	109 030	$1{,}343 \cdot 10^4$	$2{,}839 \cdot 10^{-3}$
3—14	859,839	97 492	109 119	9211	$2{,}224 \cdot 10^{-3}$
3—15	854,539	97 492	109 191	6490	$1{,}776 \cdot 10^{-3}$
3—16	850,249	97 492	109 250	4680	$1{,}443 \cdot 10^{-3}$
3—17	846,726	97 492	109 299	3444	$1{,}188 \cdot 10^{-3}$
3—18	843,796	97 492	109 340	2580	$9{,}916 \cdot 10^{-4}$
3—19	841,332	97 492	109 375	1964	$8{,}361 \cdot 10^{-4}$
3—20	839,240	97 492	109 405	1517	$7{,}118 \cdot 10^{-4}$

32.4. СПЕКТРЫ НЕКОТОРЫХ ЭЛЕМЕНТОВ И БЛАГОРОДНЫХ ГАЗОВ

На рис. 32.1—32.7 — приведены диаграммы энергетических уровней нейтральных атомов Li, H, Na, He, K, Cs и Hg. На диаграммах указаны наиболее интенсивные переходы и соответствующие им длины волн λ, *нм*. В табл. 32.4—32.7 представлены наиболее яркие линии излучения благородных газов Ne, Ar, Kr и Xe и дана их классификация. При составлении диаграмм и таблиц использовались работы [5—7]. Звездочками отмечены линии, рекомендуемые в работе [3] в качестве стандартов длин волн. Символами $E_н$ и $E_в$ обозначены соответственно значения энергии нижнего и верхнего уровней, между которыми происходит переход.

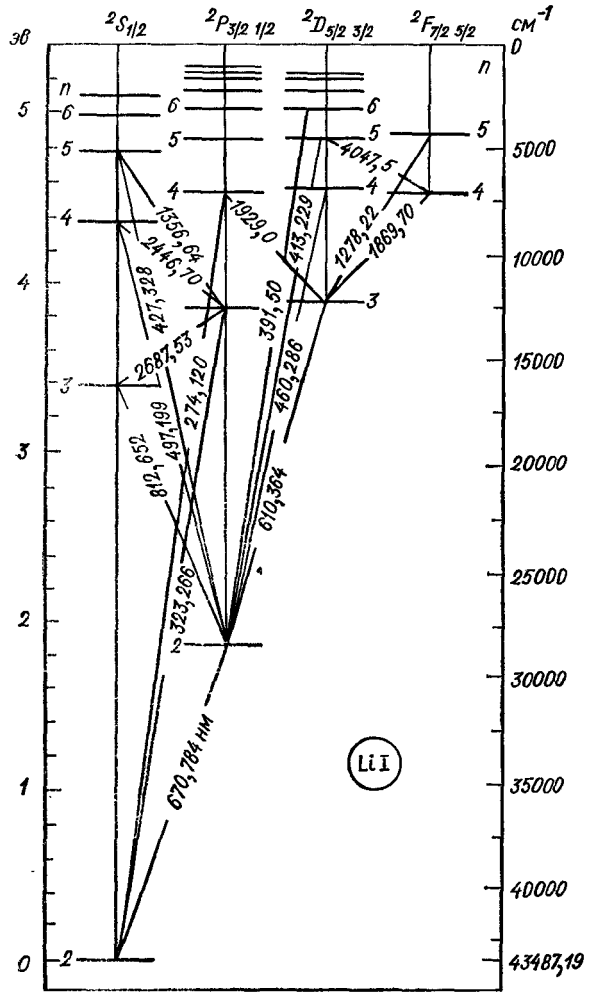


Рис. 32.1. Спектр лития [5].

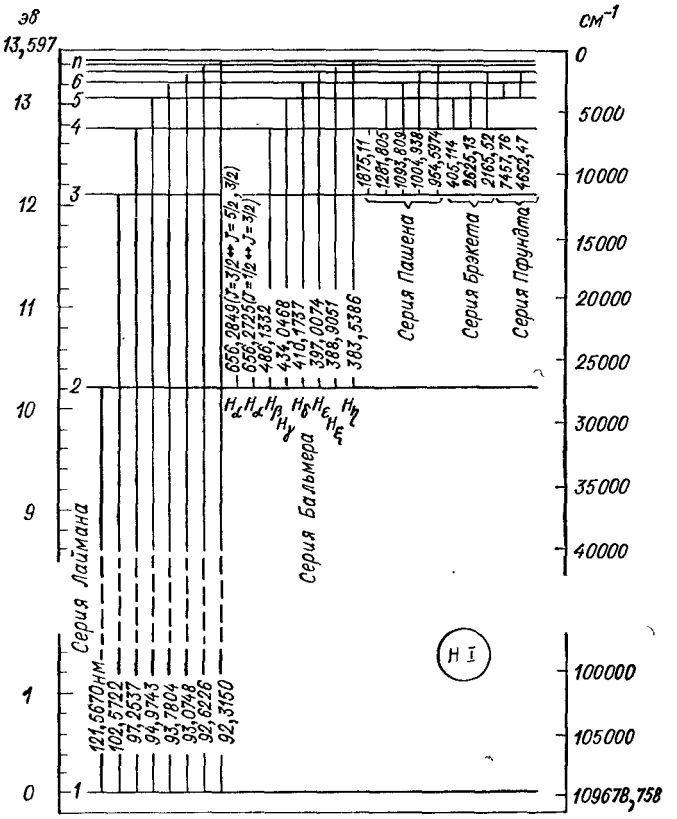


Рис. 32.2. Спектр атомарного водорода [5].

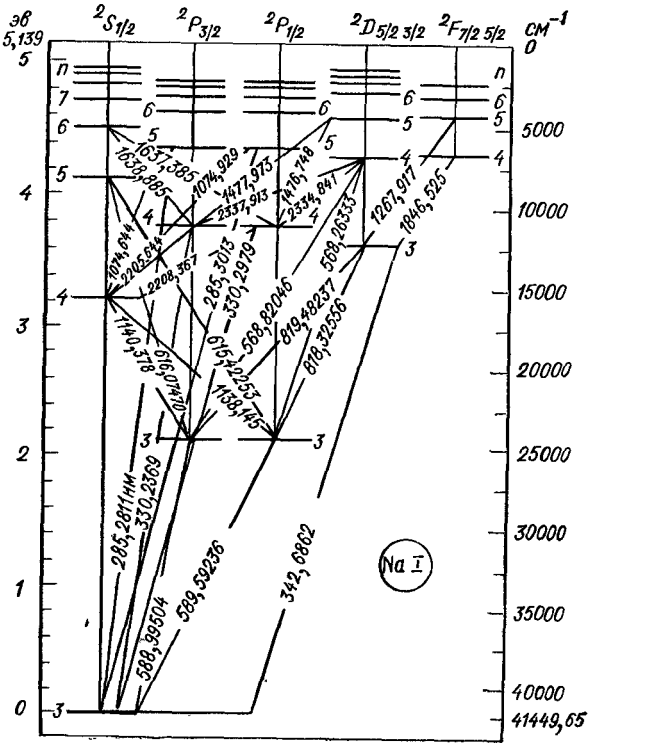
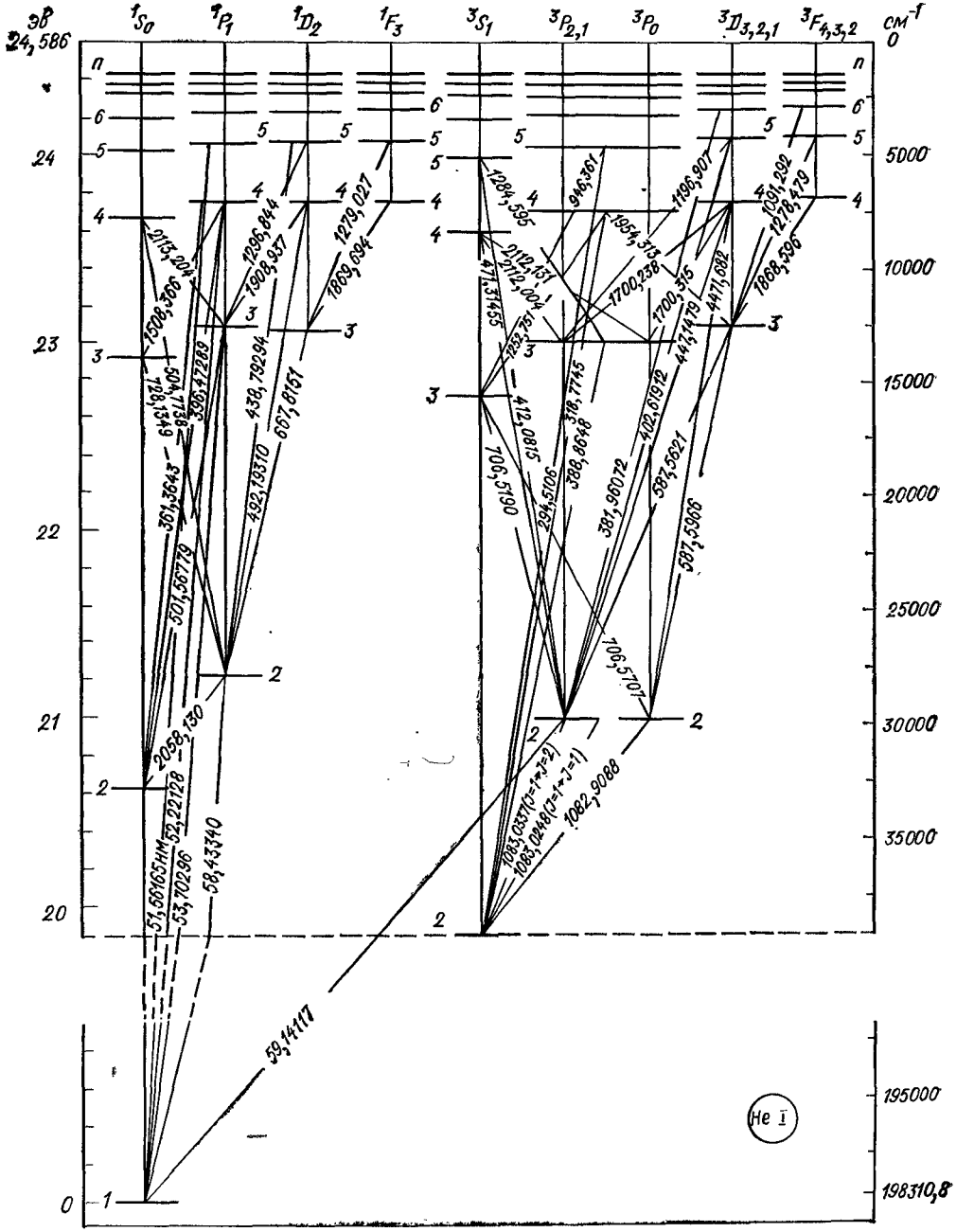


Рис. 32.3. Спектр натрия [5].


эВ
24,586
$^1S_0$
$^1P_1$
$^1D_2$
$^1F_3$
$^3S_1$
$^3P_{2,1}$
$^3P_0$
$^3D_{3,2,1}$
$^3F_{4,3,2}$
см$^{-1}$
0
n
24
23
22
21
20
5000
10000
15000
20000
25000
30000
35000
195000
198310,8
He I
59,14117
58,43340
53,70296
52,22728
51,66465нм
2058,130
1508,386
2113,204
1296,844
1906,937
1279,027
1869,694
1282,751
1700,238
1700,315
1196,907
1868,596
1278,479
1091,292
946,361
1284,595
1082,9088
706,5707
706,5190
667,8151
587,5621
501,56779
438,79294
396,47288
388,97745
381,96072
361,36043
318,7745
294,5106
292,7190
292,7555
292,7514
292,7512
292,7511
292,7510
292,7509
292,7508
292,7507
292,7506
292,7505
292,7504
292,7503
292,7502
292,7501
292,7500
292,7499
292,7498
292,7497
292,7496
292,7495
292,7494
292,7493
292,7492
292,7491
292,7490
292,7489
292,7488
292,7487
292,7486
292,7485
292,7484
292,7483
292,7482
292,7481
292,7480
292,7479
292,7478
292,7477
292,7476
292,7475
292,7474
292,7473

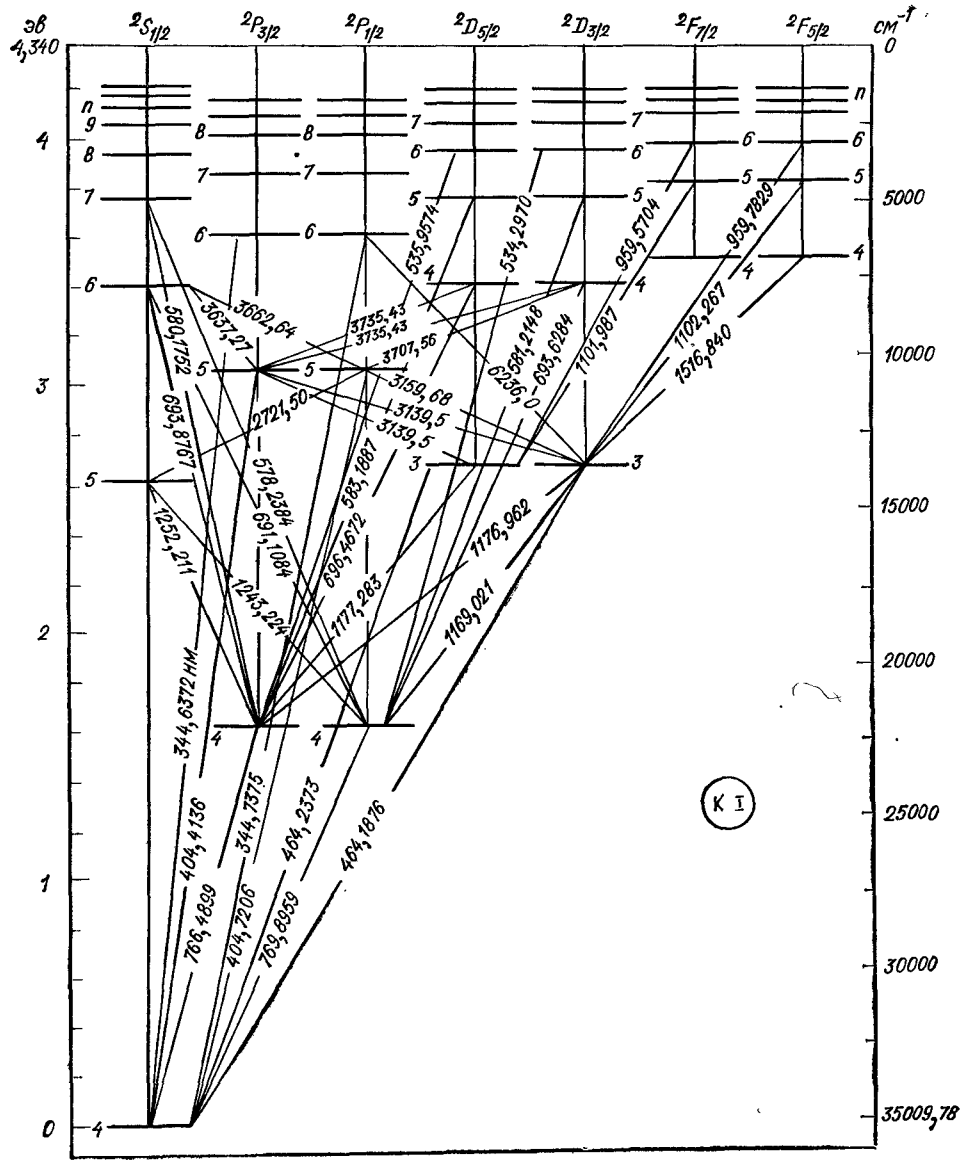


Рис. 32.5. Спектр калия [5].

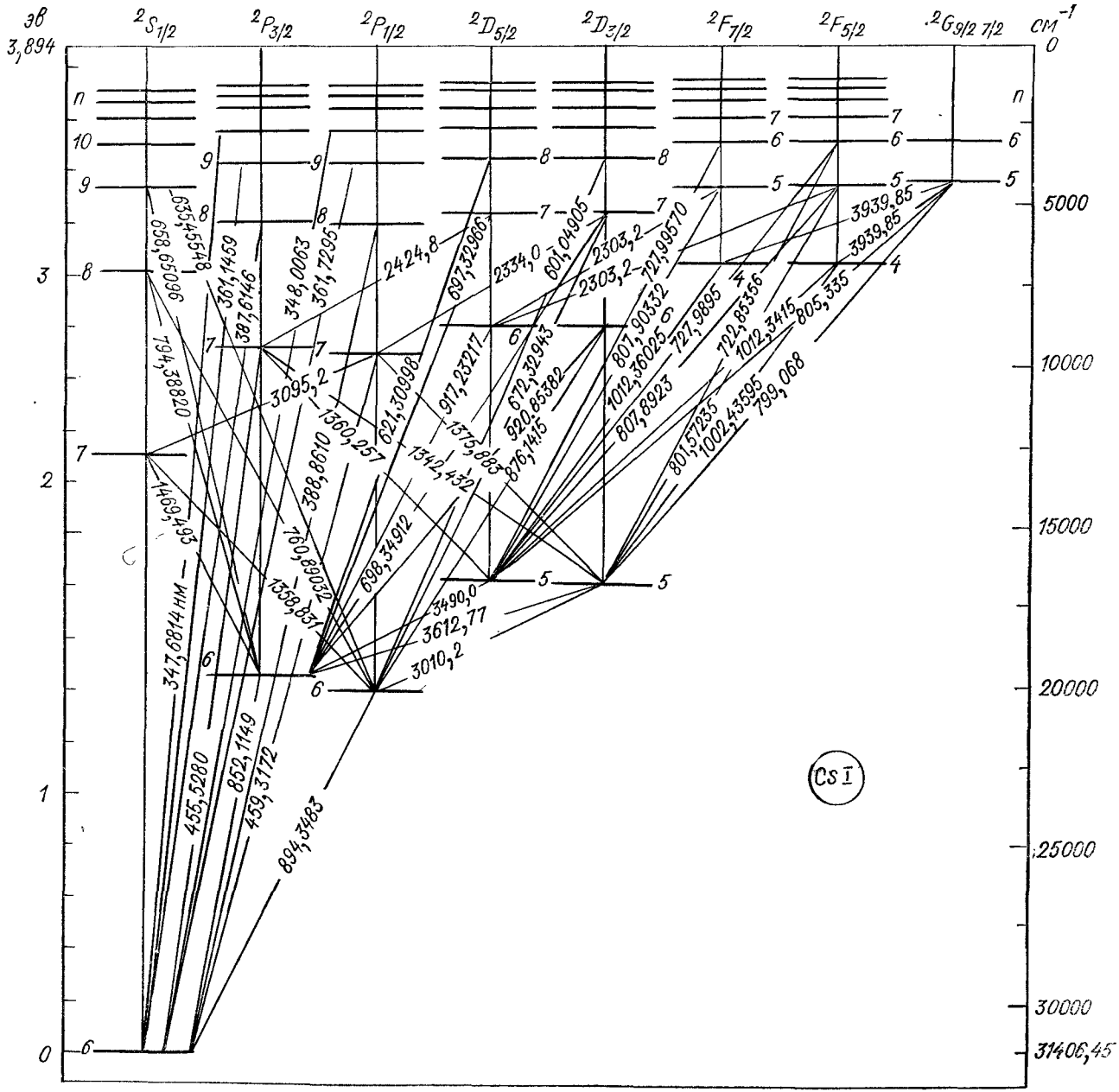


Рис. 32.6. Спектр цезия [5].

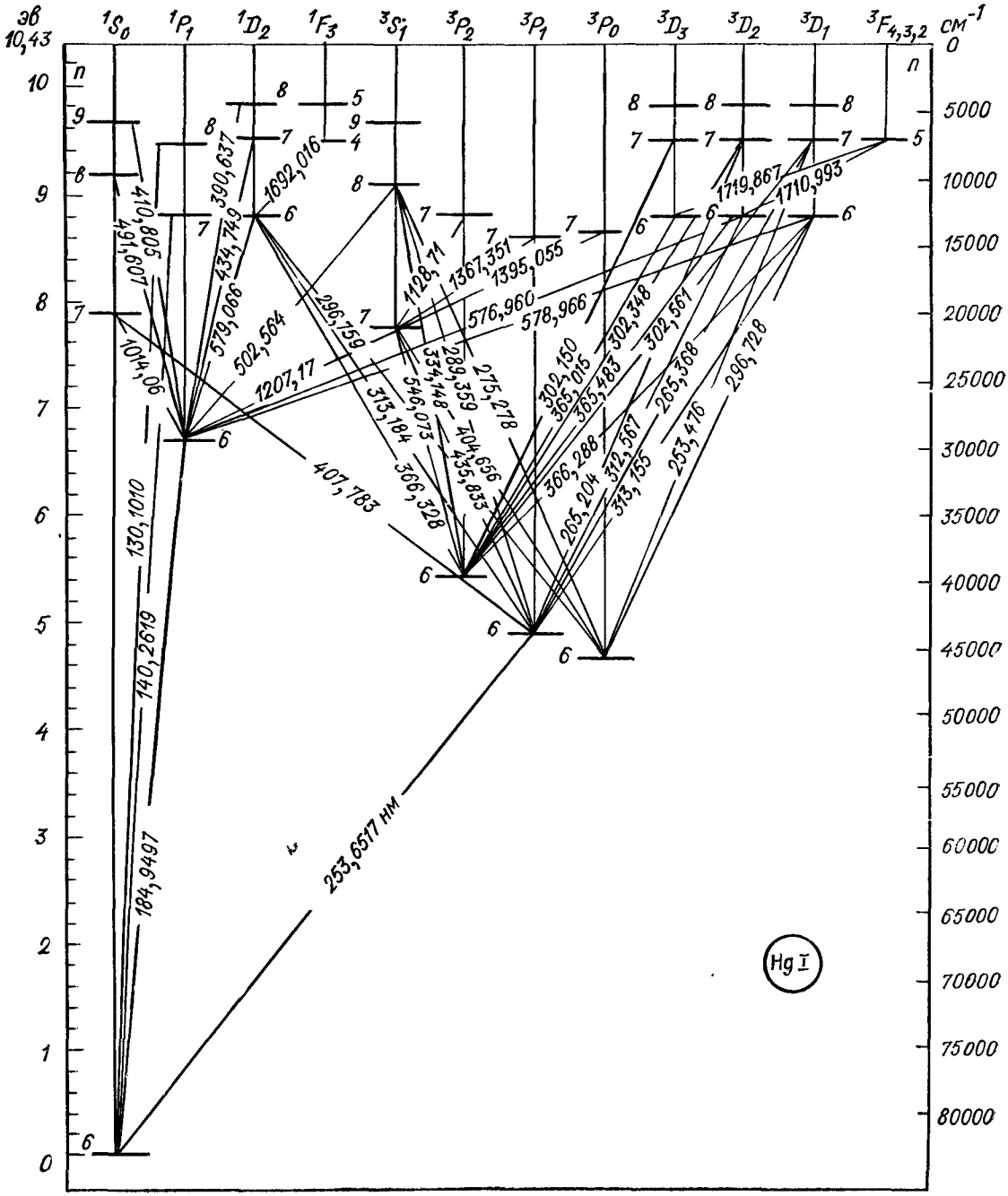


Рис. 32.7. Спектр ртути [5, 6].

Таблица 32.4

Спектральные линии Ne I [5]

λ, *нм*	$E_н$, *эв*	$E_в$, *эв*	Переход
2395,13	19,78	20,30	$4s'[1/2]_1 - 4p'[1/2]_2$
2363,63	19,66	20,19	$4s[1/2]_2 - 4p[2/2]_3$
2252,97	19,66	20,21	$4s[1/2]_2 - 4p[1/2]_2$
1859,730	20,05	20,71	$3d[2/2]_3 - 4f[3/2]_{3,4}$
1842,243	20,14	20,81	$3d'[1/2]_2 - 4f'[2/2]_{2,3}$
1839,010	20 14	20,81	$3d'[2/2]_3 - 4f'[3/2]_{3,4}$
1838,517	20,14	20,81	$3d'[2/2]_2 - 4f'[3/2]_3$
1830,400	20,04	20,71	$3d[1/2]_2 - 4f[2/2]_{2,3}$
1828,258	20,03	20,71	$3d[3/2]_3 - 4f[4/2]_4$
1827,659	20,03	20,71	$3d[3/2]_4 - 4f[4/2]_{4,5}$
1808,271	20,02	20,71	$3d[1/2]_1 - 4f[1/2]_{1,2}$
1152,282	18,70	19,78	$3p'[1/2]_2 - 4s'[1/2]_1$
1140,924	18,69	19,78	$3p'[1/2]_1 - 4s'[1/2]_1$
1139,053	18,57	19,66	$3p[2/2]_2 - 4s[1/2]_2$
1117,759	18,55	19,66	$3p[2/2]_3 - 4s[1/2]_2$
1114,309	18,57	19,69	$3p[2/2]_2 - 4s[1/2]_1$
1084,454	18,63	19,78	$3p[1/2]_2 - 4s'[1/2]_1$
1079,812	18,61	19,76	$3p[1/2]_0 - 4s'[1/2]_1$
1056,243	18,96	20,14	$3p'[1/2]_0 - 3d[1/2]_1$
966,5424	18,38	19,66	$3p[1/2]_1 - 4s[1/2]_2$
932,652	18,71	20,04	$3p[1/2]_1 - 3d[1/2]_1$
920,176	18,69	20,04	$3p'[1/2]_1 - 3d[1/2]_1$
914,868	18,69	20,05	$3p'[1/2]_1 - 3d[2/2]_2$
885,38669	18,63	20,04	$3p[1/2]_2 - 3d[1/2]_2$
878,37539	18,72	20,14	$3p'[1/2]_1 - 3d'[1/2]_2$
878,06223	18,63	20,05	$3p[1/2]_2 - 3d[2/2]_3$
865,43837	18,70	20,14	$3p'[1/2]_2 - 3d[2/2]_3$
863,46472	18,61	20,05	$3p[1/2]_1 - 3d[2/2]_2$
837,76062	18,55	20,03	$3p[2/2]_3 - 3d[3/2]_4$
830,03248	18,55	20,05	$3p[2/2]_3 - 3d[2/2]_3$
808,24576	16,85	18,38	$3s'[1/2]_1 - 3p[1/2]_1$
743,88981	16,71	18,38	$3s'[1/2]_0 - 3p[1/2]_1$
724,51665	16,67	18,38	$3s[1/2]_1 - 3p[1/2]_1$
717,39380	16,85	18,57	$3s'[1/2]_1 - 3p[2/2]_1$
703,24128*	16,62	18,38	$3s[1/2]_2 - 3p[1/2]_1$
702,40500	16,85	18,61	$3s'[1/2]_1 - 3p[1/2]_1$
692,94672	16,85	18,63	$3s'[1/2]_1 - 3p[1/2]_2$
667,82764*	16,85	18,70	$3s'[1/2]_1 - 3p'[1/2]_2$
665,20925	16,85	18,71	$3s'[1/2]_1 - 3p[1/2]_0$
659,89529*	16,85	18,72	$3s'[1/2]_1 - 3p'[1/2]_1$
640,22460	16,62	18,55	$3s[1/2]_2 - 3p[2/2]_3$
638,29914*	16,67	18,61	$3s[1/2]_1 - 3p[1/2]_1$
633,44279*	16,62	18,57	$3s[1/2]_2 - 3p[2/2]_2$
626,64950*	16,71	18,69	$3s'[1/2]_0 - 3p'[1/2]_1$
621,72813*	16,62	18,61	$3s[1/2]_2 - 3p[1/2]_1$
616,35939*	16,71	18,72	$3s'[1/2]_0 - 3p'[1/2]_1$
614,30623*	16,62	18,63	$3s[1/2]_2 - 3p[1/2]_2$
609,61630*	16,67	18,70	$3s[1/2]_1 - 3p'[1/2]_2$
607,43377*	16,67	18,71	$3s[1/2]_1 - 3p[1/2]_0$
602,99971*	16,67	18,72	$3s[1/2]_1 - 3p'[1/2]_1$
597,55340*	16,62	18,69	$3s[1/2]_2 - 3p'[1/2]_1$
588,18950*	16,62	18,72	$3s[1/2]_2 - 3p'[1/2]_1$
585,24878*	16,85	18,96	$3s'[1/2]_1 - 3p'[1/2]_0$
576,44188	18,55	20,70	$3p[2/2]_3 - 4d[1/2]_4$
540,05616	16,67	18,96	$3s[1/2]_1 - 3p'[1/2]_0$
534,32834	18 38	20,70	$3p[1/2]_1 - 4d[1/2]_0$
534,10938	18,38	20,70	$3p[1/2]_1 - 4d[1/2]_1$
533,07775	18,38	20,71	$3p[1/2]_1 - 4d[1/2]_2$
495,70335	18,61	21,11	$3p[1/2]_1 - 5d'[1/2]_2$
488,49170	18,70	21,24	$3p'[1/2]_2 - 7s'[1/2]_1$
	18,57	21,11	$3p[2/2]_2 - 5d'[2/2]_3$

Продолжение табл. 32.4

λ, *нм*	$E_н$, *эв*	$E_в$, *эв*	Переход
482,73444	18,38	21,95	$3p[1/2]_1 - 6s[1/2]_1$
478,89270	18,55	21,14	$3p[2/2]_3 - 7s[1/2]_2$
471,53466	18,55	21,18	$3p[2/2]_3 - 6d[3/2]_4$
471,2066	18,55	21,18	$3p[2/2]_3 - 6d[2/2]_3$
471,00669	18,38	21,01	$3p[1/2]_1 - 5d[1/2]_0$
470,88619	18,38	21,01	$3p[1/2]_1 - 5d[1/2]_1$
470,43949	18,38	21,02	$3p[1/2]_1 - 5d[1/2]_2$
453,77545	18,38	21,11	$3p[1/2]_1 - 5d'[2/2]_2$
442,48096	18,38	21,18	$3p[1/2]_1 - 6d[1/2]_1$
442,25205	18,38	21,18	$3p[1/2]_1 - 6d[1/2]_2$
359,3640	16,85	20,30	$3s'[1/2]_1 - 4p'[1/2]_1$
359,35263	16,85	20,30	$3s'[1/2]_1 - 4p'[1/2]_2$
352,04714	16,85	20,37	$3s'[1/2]_1 - 4p'[1/2]_0$
351,51900	16,67	20,20	$3s[1/2]_1 - 4p[2/2]_2$
350,12154	16,67	20,21	$3s[1/2]_1 - 4p[1/2]_1$
347,25706	16,62	20,19	$3s[1/2]_2 - 4p[2/2]_3$
346,65781	16,71	20,29	$3s'[1/2]_0 - 4p'[1/2]_1$
344,77022	16.62	20,21	$3s[1/2]_2 - 4p[1/2]_2$
341,79031	16,67	20,30	$3s[1/2]_1 - 4p'[1/2]_2$
336,99069	16,62	20,30	$3s[1/2]_2 - 4p'[1/2]_1$
336,98076	16,62	20,30	$3s[1/2]_2 - 4p'[1/2]_2$
335,1744	16,67	20,37	$3s[1/2]_1 - 4p'[1/2]_0$
297,4714	16,62	20,78	$3s[1/2]_2 - 5p[1/2]_2$
264,742	16,62	21,30	$3s[1/2]_2 - 8p[1/2]_{2,1}$
74,3721	0,00	16,67	$2p^6\ {}^1S_0 - 3s[1/2]_1$
73,5892	0,00	16,85	$2p^6\ {}^1S_0 - 3s'[1/2]_1$
62,9729	0,00	19,69	$2p^6\ {}^1S_0 - 4s[1/2]_1$
62,6819	0,00	19,78	$2p^6\ {}^1S_0 - 4s'[1/2]_1$
61,9092	0,00	20,02	$2p^6\ {}^1S_0 - 3d[1/2]_1$
61,8668	0,00	20,04	$2p^6\ {}^1S_0 - 3d[1/2]_1$
61,5623	0,00	20,14	$2p^6\ {}^1S_0 - 3d'[1/2]_1$
60,2712	0,00	20,56	$2p^6\ {}^1S_0 - 5s[1/2]_1$

Таблица 32.5

Спектральные линии Ar I [5]

λ, *нм*	$E_н$, *эв*	$E_в$, *эв*	Переход
2098,610	13,27	13,86	$4p[1/2]_0 - 3d[1/2]_1$
2061,621	13,30	13,90	$4p'[1/2]_1 - 3d[1/2]_2$
1744,493	13,30	14,01	$4p'[1/2]_2 - 3d[3/2]_3$
	13,15	13,86	$4p'[1/2]_1 - 3d[1/2]_1$
1530,226	14,10	14,91	$3d[2/2]_3 - 4f[3/2]_{3,4}$
1409,361	13,27	14,15	$4p[1/2]_0 - 3d[1/2]_1$
1391,083	14,01	14,90	$3d[3/2]_3 - 4f[4/2]_4$
1371,877	13,08	13,98	$4p[2/2]_3 - 3d[3/2]_4$
1367,853	13,33	14,23	$4p'[1/2]_1 - 3d'[1/2]_2$
1362,238	13,15	14,06	$4p[1/2]_1 - 3d[2/2]_2$
1350,399	13,09	14,01	$4p[2/2]_2 - 3d[3/2]_3$
1340,657	13,98	14,90	$3d[3/2]_4 - 4f[4/2]_5$
1336,738	13,17	14,10	$4p[1/2]_2 - 3d[2/2]_3$
1331,339	13,28	14,21	$4p'[1/2]_1 - 3d'[2/2]_2$
1327,305	13,30	14,24	$4p'[1/2]_2 - 3d'[2/2]_3$
1322,849	13,08	14,01	$4p[2/2]_3 - 3d[3/2]_3$
1300,847	13,30	14,25	$4p'[1/2]_2 - 5s'[1/2]_1$
1295,659	12,91	13,86	$4p[1/2]_1 - 3d[1/2]_1$
1280,268	13,09	14,06	$4p[2/2]_2 - 3d[2/2]_2$
1248,763	13,08	14,07	$4p[2/2]_3 - 5s[1/2]_2$
1245,605	13,09	14,09	$4p[2/2]_2 - 5s[1/2]_1$
1243,919	12,91	13,90	$4p[1/2]_1 - 3d[1/2]_2$

Продолжение табл. 32.5

λ, нм	$E_н$, эв	$E_в$, эв	Переход
1240,288	13,15	14,15	$4p[1^1/_2]_1 - 3d[1^1/_2]_1$
1211,220	13,08	14,10	$4p[2^1/_2]_3 - 3d[2^1/_2]_3$
1148,812	11,83	12,91	$4s'[1/_2]_1 - 4p[1/_2]_1$
1107,887	13,09	14,21	$4p[2^1/_2]_2 - 3d'[2^1/_2]_2$
1095,074	13,17	14,30	$4p[1^1/_2]_2 - 3d'[1^1/_2]_1$
1088,096	13,09	14,23	$4p[2^1/_2]_2 - 3d'[1^1/_2]_2$
1068,178	13,08	14,24	$4p[2^1/_2]_3 - 3d'[2^1/_2]_3$
1067,355	12,91	14,07	$4p[1/_2]_1 - 5s[1/_2]_2$
1047,810	12,91	14,09	$4p[1/_2]_1 - 5s[1^1/_2]_1$
1047,0051	11,72	12,91	$4s'[1/_2]_0 - 4p[1/_2]_1$
1005,210	13,98	15,21	$3d[3^1/_2]_4 - 5f[4^1/_2]_{4,5}$
978,45010	11,83	13,09	$4s'[1/_2]_1 - 4p[2^1/_2]_2$
965,77841	11,62	12,91	$4s[1^1/_2]_1 - 4p[1/_2]_1$
935,4218	11,83	13,15	$4s'[1/_2]_1 - 4p[1^1/_2]_1$
922,44955	11,83	13,17	$4s'[1/_2]_1 - 4p[1^1/_2]_2$
912,29660	11,55	12,91	$4s[1^1/_2]_2 - 4p[1/_2]_1$
866,79438	11,72	13,15	$4s'[1/_2]_0 - 2p[1^1/_2]_1$
852,14428	11,83	13,28	$4s[1/_2]_1 - 4p'[1^1/_2]_1$
842,46473	11,62	13,09	$4s[1^1/_2]_1 - 4p[2^1/_2]_2$
840,82094	11,83	13,30	$4s'[1/_2]_1 - 4p'[1^1/_2]_2$
826,45221	11,83	13,33	$4s'[1/_2]_1 - 4p'[1/_2]_1$
811,53108	11,55	13,08	$4s[1^1/_2]_2 - 4p[2^1/_2]_3$
810,36920	11,62	13,15	$4s[1^1/_2]_1 - 4p[1^1/_2]_1$
801,47853	11,55	13,09	$4s[1^1/_2]_2 - 4p[2^1/_2]_2$
800,61566	11,62	13,17	$4s[1^1/_2]_1 - 4p[1^1/_2]_2$
794,81755	11,72	13,28	$4s'[1^1/_2]_0 - 4p'[1^1/_2]_1$
772,42064	11,72	13,33	$4s'[1^1/_2]_0 - 4p'[1^1/_2]_1$
772,37599	11,55	13,15	$4s[1^1/_2]_2 - 4p[1^1/_2]_1$
763,51056	11,55	13,17	$4s[1^1/_2]_2 - 4p[1^1/_2]_2$
751,46514	11,62	13,27	$4s[1^1/_2]_1 - 4p[1/_2]_0$
750,38685	11,83	13,48	$4s'[1/_2]_1 - 4p'[1/_2]_0$
738,39796	11,62	13,30	$4s[1^1/_2]_1 - 4p'[1^1/_2]_2$
706,72175	11,55	13,30	$4s[1^1/_2]_2 - 4p'[1^1/_2]_2$
696,54304	11,55	13,33	$4s[1^1/_2]_2 - 4p'[1/_2]_1$
666,40533	13,09	14,95	$4p[2^1/_2] - 4d'[1^1/_2]_2$
614,54432	13,30	15,32	$4p'[1^1/_2]_2 - 5d'[2^1/_2]_3$
591,20861	12,91	15,00	$4p[1/_2]_1 - 4d'[1^1/_2]_1$
573,95207	13,15	15,31	$4p[1^1/_2]_1 - 5d'[2^1/_2]_2$
565,07054	12,91	15,10	$4p[1/_2]_1 - 5d[1/_2]_0$
549,5876	13,08	15,33	$4p[2^1/_2]_3 - 6d[3^1/_2]_4$
518,77507	12,91	15,30	$4p[1/_2]_1 - 5d'[1^1/_2]_2$
470,23155	11,83	14,46	$4s'[1^1/_2]_1 - 5p[1/_2]_1$
462,84409	11,83	14,51	$4s'[1^1/_2]_1 - 5p[2^1/_2]_2$
459,60964	11,83	14,52	$4s'[1^1/_2]_1 - 5p[1^1/_2]_1$
452,23238	11,72	14,46	$4s'[1^1/_2]_0 - 5p[1^1/_2]_1$
451,07335	11,83	14,58	$4s'[1^1/_2]_1 - 5p[1/_2]_0$
434,5167	11,83	14,66	$4s'[1^1/_2]_1 - 5p'[1^1/_2]_1$
433,53381	11,83	14,69	$4s'[1^1/_2]_1 - 5p'[1/_2]_1$
433,35612	11,83	14,69	$4s'[1^1/_2]_1 - 5p'[1^1/_2]_2$
430,01011	11,62	14,51	$4s[1^1/_2]_1 - 5p[2^1/_2]_2$
427,21690	11,62	14,52	$4s[1^1/_2]_1 - 5p[1^1/_2]_1$
426,62868	11,62	14,53	$4s[1^1/_2]_1 - 5p[1^1/_2]_2$
425,93617	11,83	14,74	$4s'[1^1/_2]_1 - 5p'[1^1/_2]_0$
425,11850	11,55	14,46	$4s[1^1/_2]_2 - 5p[1^1/_2]_1$
420,06746	11,55	14,50	$4s[1^1/_2]_2 - 5p[2^1/_2]_3$
419,83176	11,62	14,58	$4s[1^1/_2]_1 - 5p[1/_2]_0$
419,10288	11,72	14,66	$4s'[1^1/_2]_0 - 5p'[1^1/_2]_1$
418,18837	11,72	14,69	$4s'[1^1/_2]_0 - 5p'[1^1/_2]_1$
416,41795	11,55	14,52	$4s[1^1/_2]_2 - 5p[1^1/_2]_1$
415,85906	11,55	14,53	$4s[1^1/_2]_2 - 5p[1^1/_2]_2$
404,44185	11,62	14,69	$4s[1^1/_2]_1 - 5p'[1^1/_2]_2$
394,89785	11,55	14,69	$4s[1^1/_2]_2 - 5p'[1^1/_2]_1$
394,75048	11,55	14,69	$4s[1^1/_2]_2 - 5p'[1^1/_2]_2$
383,46788	11,83	15,06	$4s'[1^1/_2]_1 - 6p[1^1/_2]_0$
346,98330	11,83	15,22	$4s'[1^1/_2]_1 - 6p'[1^1/_2]_0$

Продолжение табл. 32.5

λ, нм	$E_н$, эв	$E_в$, эв	Переход
360,65224	11,62	15,06	$4s[1^1/_2]_1 - 6p[1^1/_2]_0$
346,10785	11,62	15,20	$4s[1^1/_2]_1 - 6p'[1^1/_2]_2$
337,34823	11,62	15,30	$4s[1^1/_2]_1 - 7p[1^1/_2]_0$
331,93446	11,55	15,28	$4s[1^1/_2]_2 - 7p[1^1/_2]_2$
317,2961	11,55	15,45	$4s[1^1/_2]_2 - 7p'[1^1/_2]_1$
106,6660	0,00	11,62	$3p^6\,{}^1S_0 - 4s[1^1/_2]_1$
104,8218	0,00	11,83	$3p^6\,{}^1S_0 - 4s'[1^1/_2]_1$
89,4310	0,00	13,86	$3p^6\,{}^1S_0 - 3d[1^1/_2]_1$
87,9949	0,00	14,09	$3p^6\,{}^1S_0 - 5s[1^1/_2]_1$
87,6063	0,00	14,15	$3p^6\,{}^1S_0 - 3d[1^1/_2]_1$
86,6805	0,00	14,30	$3p^6\,{}^1S_0 - 3d'[1^1/_2]_1$
83,5003	0,00	14,85	$3p^6\,{}^1S_0 - 6s[1^1/_2]_1$
83,4397	0,00	14,86	$3p^6\,{}^1S_0 - 4d[1^1/_2]_1$
81,6466	0,00	15,18	$3p^6\,{}^1S_0 - 7s[1^1/_2]_1$
81,6233	0,00	15,19	$3p^6\,{}^1S_0 - 5d[1^1/_2]_1$

Таблица 32.6

Спектральные линии Kr I [5]

λ, нм	$E_н$, эв	$E_в$, эв	Переход
2190,051	11,55	12,11	$5p[1^1/_2]_2 - 4d[1^1/_2]_2$
1816,712	11,44	12,12	$5p[2^1/_2]_3 - 4d[3^1/_2]_4$
1693,571	11,53	12,26	$5p[1^1/_2]_1 - 4d[2^1/_2]_2$
1689,658	11,30	12,04	$5p[1/_2]_1 - 4d[1/_2]_1$
1689,040	11,44	12,18	$5p[2^1/_2]_2 - 4d[3^1/_2]_3$
1678,465	11,55	12,28	$5p[1^1/_2]_2 - 4d[2^1/_2]_3$
1533,529	11,30	12,11	$5p[1/_2]_1 - 4d[1^1/_2]_2$
1523,985	11,44	12,26	$5p[2^1/_2]_2 - 4d[2^1/_2]_2$
1473,446	11,44	12,28	$5p[2^1/_2]_3 - 4d[2^1/_2]_3$
1442,693	11,53	12,38	$5p[1^1/_2]_1 - 6s[1^1/_2]_1$
1363,422	11,44	12,35	$5p[2^1/_2]_2 - 6s[1^1/_2]_1$
1362,228	11,44	12,35	$5p[2^1/_2]_2 - 4d[1^1/_2]_1$
1317,738	11,44	12,38	$5p[2^1/_2]_2 - 6s[1^1/_2]_1$
1287,900	12,18	13,14	$4d[3^1/_2]_3 - 4f[4^1/_2]_4$
1220,439	12,12	13,14	$4d[3^1/_2]_4 - 4f[4^1/_2]_5$
1181,943	11,30	12,35	$5p[1^1/_2]_1 - 6s[1^1/_2]_2$
985,624	11,55	12,80	$5p[1^1/_2]_2 - 4d'[1^1/_2]_2$
975,1759	10,03	11,30	$5s[1^1/_2]_1 - 5p[1/_2]_1$
892,86920	9,91	11,30	$5s[1^1/_2]_2 - 5p[1/_2]_1$
877,67490	10,03	11,44	$5s[1^1/_2]_1 - 5p[2^1/_2]_2$
850,88700	10,64	12,10	$5s'[1^1/_2]_1 - 5p'[1^1/_2]_1$
829,81077	10,03	11,53	$5s[1^1/_2]_1 - 5p[1^1/_2]_1$
828,10495	10,64	12,14	$5s'[1^1/_2]_1 - 5p'[1^1/_2]_1$
826,32398	10,64	12,14	$5s'[1^1/_2]_1 - 5p'[1^1/_2]_2$
819,00543	10,03	11,55	$5s[1^1/_2]_1 - 5p[1^1/_2]_2$
811,2900	9 91	11,44	$5s[1^1/_2]_2 - 5p[2^1/_2]_3$
810,43642	9,91	11,44	$5s[1^1/_2]_2 - 5p[2^1/_2]_2$
810,402	11,44	12,97	$5p[2^1/_2]_3 - 5d[3^1/_2]_4$
805,95038	10,56	12,10	$5s'[1^1/_2]_0 - 5p'[1^1/_2]_1$
785,48215	10,56	12,14	$5s'[1^1/_2]_0 - 5p'[1^1/_2]_1$
769,45393	9,91	11,53	$5s[1^1/_2]_2 - 5p[1^1/_2]_1$
760,15443	9,91	11,55	$5s[1^1/_2]_2 - 5p[1^1/_2]_2$
758,74130	10,03	11,67	$5s[1^1/_2]_1 - 5p[1^1/_2]_0$
645,62910	11,44	13,36	$5p[2^1/_2]_3 - 6d[3^1/_2]_4$
642,10283*	11,44	13,37	$5p[2^1/_2]_2 - 6d[3^1/_2]_3$
605,61280	11,30	13,35	$5p[1^1/_2]_1 - 6d[1^1/_2]_1$
599,38506*	10,03	12,10	$5s[1^1/_2]_1 - 5p'[1^1/_2]_1$
587,09153*	10,03	12,14	$5s[1^1/_2]_1 - 5p'[1^1/_2]_2$
583,28600	11,44	13,57	$5p[2^1/_2]_3 - 7d[3^1/_2]_4$
564,95625*	10,56	12,76	$5s'[1^1/_2]_0 - 6p[1^1/_2]_1$
557,02890*	9,91	12,14	$5s[1^1/_2]_2 - 5p'[1^1/_2]_1$
556,22254	9,91	12,14	$5s[1^1/_2]_2 - 5p'[1^1/_2]_2$

Продолжение табл. 32.6

λ, *нм*	$E_н$, *эв*	$E_в$, *эв*	Переход
450,23546*	10,03	12,78	$5s[1^1/_2]_1 - 6p[2^1/_2]_2$
446,36901*	10,03	12,81	$5s\,[1^1/_2]_1 - 6p[1^1/_2]_1$
445,59177*	10,03	12,82	$5s[1^1/_2]_1 - 6p[1^1/_2]_2$
442,31908	10,64	13,44	$5s'[1^1/_2]_1 - 6p'[1^1/_2]_1$
439,99670*	10,64	13,46	$5s'[1^1/_2]_1 - 6p'[1^1/_2]_2$
437,61219*	10,03	12,86	$5s[1^1/_2]_1 - 6p[1^1/_2]_0$
436,26424*	9,91	12,76	$5s[1^1/_2]_2 - 6p[1^1/_2]_1$
435,13602*	10,64	13,49	$5s'[1^1/_2]_1 - 6p'[1^1/_2]_0$
431,95798*	9,91	12,78	$5s[1^1/_2]_2 - 6p[2^1/_2]_3$
431,85523*	9,91	12,78	$5s[1^1/_2]_2 - 6p[2^1/_2]_2$
428,29686	9,91	12,81	$5s[1^1/_2]_2 - 6p[1^1/_2]_1$
427,39700	9,91	12,82	$5s[1^1/_2]_2 - 6p[1^1/_2]_2$
377,34241	10,03	13,32	$5s[1^1/_2]_1 - 7p[1^1/_2]_0$
343,17217	9,91	13,53	$5s[1^1/_2]_2 - 8p[2^1/_2]_3$
123,5839	0,00	10,03	$4p^6\,{}^1S_0 - 5s[1^1/_2]_1$
116,4868	0,00	10,64	$4p^6\,{}^1S_0 - 5s'[1^1/_2]_1$
103,0020	0,00	12,04	$4p^6\,{}^1S_0 - 4d[1^1/_2]_1$
100,3542	0,00	12,35	$4p^6\,{}^1S_0 - 4d[1^1/_2]_1$
100,1048	0,00	12,38	$4p^6\,{}^1S_0 - 6s[1^1/_2]_1$
96,334	0,00	12,87	$4p^6\,{}^1S_0 - 5d[1^1/_2]_1$
95,342	0,00	13,00	$4p^6\,{}^1S_0 - 4d'[1^1/_2]_1$
94,652	0,00	13,10	$4p^6\,{}^1S_0 - 5d[1^1/_2]_1$

Таблица 32.7

Спектральные линии Xe I [5]

λ, *нм*	$E_н$, *эв*	$E_в$, *эв*	Переход
1262,332	9,58	10,56	$6p[1^1/_2]_1 - 7s[1^1/_2]_2$
1108,525	10,16	11,27	$5d[2^1/_2]_2 - 4f[3^1/_2]_3$
1083,834	8,44	9,58	$6s[1^1/_2]_1 - 6p[1^1/_2]_1$
992,3192	8,44	9,69	$6s[1^1/_2]_1 - 6p[2^1/_2]_2$
979,9699	8,31	9,58	$6s[1_1/_2]_2 - 6p[1^1/_2]_1$
916,2654	8,44	9,79	$6s[1^1/_2]_1 - 6p[1^1/_2]_1$
904,5446	8,31	9,69	$6s[1^1/_2]_2 - 6p[2^1/_2]_2$
895,2254	8,44	9,82	$6s[1^1/_2]_2 - 6p[1^1/_2]_2$
886,232	9,58	10,98	$6p[1^1/_2]_1 - 6d[1^1/_2]_1$
881,9412	8,31	9,72	$6s[1^1/_2]_2 - 6p[2^1/_2]_3$
873,939	9,58	11,00	$6p[1^1/_2]_1 - 6d[1^1/_2]_2$
864,854	9,57	11,00	$6s'[1^1/_2]_1 - 7p[1^1/_2]_1$
840,9190	8,31	9,79	$6s[1^1/_2]_2 - 6p[1^1/_2]_1$
834,6823	9,57	11,05	$6s'[1^1/_2]_1 - 6p'[1^1/_2]_2$
828,01163	8,44	9,93	$6s[1^1/_2]_1 - 6p[1^1/_2]_0$
826,6519	9,57	11,07	$6s'[1^1/_2]_1 - 6p'[1^1/_2]_1$
823,16348	8,31	9,82	$6s[1^1/_2]_2 - 6p[1^1/_2]_2$
820,6341	9,45	10,96	$6s'[1^1/_2]_0 - 6p'[1^1/_2]_1$
796,7341	9,45	11,00	$6s'[1^1/_2]_0 - 7p[1^1/_2]_1$
788,7395	9,57	11,14	$6s'[1^1/_2]_1 - 6p'[1^1/_2]_0$
764,2025	9,45	11,07	$6s'[1^1/_2]_0 - 6p'[1^1/_2]_1$
711,9598	9,72	11,46	$6p[2^1/_2]_3 - 7d[3^1/_2]_4$
688,2155	9,69	11,49	$6p[2^1/_2]_2 - 7d[3^1/_2]_3$
646,9705	9,58	11,50	$6p[1^1/_2]_1 - 7d[1^1/_2]_2$
631,8062	9,72	11,68	$6p[2^1/_2]_3 - 8d[3^1/_2]_4$
618,2420	9,69	11,69	$6p[2^1/_2]_2 - 8d[3^1/_2]_3$
582,3890	9,45	11,57	$6s'[1^1/_2]_0 - 5f[1^1/_2]_1$
492,31522	8,44	10,95	$6s[1^1/_2]_1 - 7p[2^1/_2]_2$
491,6508	8,44	10,96	$6s[1^1/_2]_1 - 6p'[1^1/_2]_1$
484,3294	8,44	10,99	$6s[1^1/_2]_1 - 7p[1^1/_2]_1$
482,9709	8,44	11,00	$6s[1^1/_2]_1 - 7p[1^1/_2]_1$
480,7019	8,44	11,01	$6s[1^1/_2]_1 - 7p[1^1/_2]_0$
473,41524	8,44	11,05	$6s[1^1/_2]_1 - 6p'[1^1/_2]_2$
469,7020	8,31	10,95	$6s[1^1/_2]_2 - 7p[2^1/_2]_2$
467,1226	8,31	10,97	$6s[1^1/_2]_2 - 7p[2^1/_2]_3$

Продолжение табл. 32.7

λ, *нм*	$E_н$, *эв*	$E_в$, *эв*	Переход
462,42757	8,31	10,99	$6s[1^1/_2]_2 - 7p[1^1/_2]_2$
458,27474	8,44	11,14	$6s[1^1/_2]_1 - 6p'[1^1/_2]_0$
452,46805	8,31	11,05	$6s[1^1/_2]_2 - 6p'[1^1/_2]_2$
450,09772	8,31	11,07	$6s[1^1/_2]_2 - 6p'[1^1/_2]_1$
438,39092	8,44	11,26	$6s[1^1/_2]_1 - 4f[1^1/_2]_2$
419,35296	8,31	11,27	$6s[1^1{}_2]_2 - 4f[2^1/_2]_3$
407,88207	8,44	11,47	$6s[1^1/_2]_1 - 8p[1^1/_2]_0$
146,9610	0,00	8,44	$5p^6\,{}^1S_0 - 6s[1^1/_2]_1$
129,5587	0,00	9,57	$5p^6\,{}^1S_0 - 6s'[1^1/_2]_1$
125,0203	0,00	9,92	$5p^6\,{}^1S_0 - 5d[1^1/_2]_1$
119,2040	0,00	10,40	$5p^6\,{}^1S_0 - 5d[1^1/_2]_1$

Таблица 32.8

Резонансные линии ионов изоэлектронного ряда водорода [8, 9] и гелия [9, 10]

Атом, ион		λ, *нм*	Атом, ион		λ, *нм*
H	I	121,567	He	I	58,433
He	II	30,378	Li	II	19,928
Li	III	13,500	Be	III	10,025
Be	IV	7,593	B	IV	6,031
B	V	4,859	C	V	4,028
C	VI	3,374	N	VI	2,879
N	VII	2,478	O	VII	2,160
O	VIII	1,897	F	VIII	1,681
F	IX	1,498	Ne	IX	1,344
Ne	X	1,213	Mg	XI	0,9168
Na	XI	1,002	Al	XII	0,7757
Mg	XII	0,8421	S	XV	0,5038
Al	XIII	0,7173	Ca	XIX	0,3177
Si	XIV	0,6182	Fe	XXV	0,1850
S	XVI	0,4729			

32.5 Стандарты длин волн

Решением XI Генеральной конференции по мерам и весам 1960 г. в качестве первичного эталона длины принята длина волны (в вакууме) оранжевой линии чистого изотопа криптона ^{86}Kr, соответствующей переходу $2p_{10}-5d_5$, $\lambda_{Kr} = 605{,}6$ *нм*. В соответствии с этим международная единица длины *метр* определяется как величина, точно равная $1\,650\,763{,}73\ \lambda_{Kr}$. Первичный эталон длин волн идентичен первичному эталону длины и 1 ангстрем точно равен 10^{-10} *м*.

Первичный эталон длин волн в вакууме и воздухе равен соответственно $\lambda_{вак} = 605{,}780211$ *нм*, $\lambda_{возд} = 605{,}612525$ *нм*.

Установлены стандартные условия возбуждения криптона: а) чистота изотопа ^{86}Kr должна быть не ниже 99%; б) температура самой холодной точки лампы должна быть не выше тройной точки азота, т. е. 63°К, и в соответствии с этим давление криптона должно быть 0,03 *мм рт. ст.* или ниже; в) плотность тока в лампе должна быть не выше 4 *ма/мм*^{2}. При этих условиях смещение линии криптона меньше, чем $\pm 0{,}001$ *нм*, по отношению к величине принятого первичного стандарта.

Дальнейшая классификация стандартов длин волн: выделяется сравнительно небольшая группа линий класса *A*, длины волн которых воспроизводятся с высокой точностью. Они могут заменить первичный стандарт и тем облегчить интерферометрические измерения

Стандартные длины волн Fe I ($\lambda_{возд}$) [7, 11]

Интенсивности линий *I* взяты из работы [5]

λ, нм	I	λ, нм	I	λ, нм	I	λ, нм	I
1197,3067	8	710,7462	—	613,7000	—	516,74905	40
1188,4097	—	706,8413	40	613,6621	20	516,62841	4
1188,2861	7	702,4068	10	606,5488	15	515,19143	—
1178,3275	6	701,6062	60	602,7057	—	515,08425	6
1168,9988	8	698,8531	—	595,6697	—	514,29320	6
1163,8279	7	697,8856	100	591,6252	—	514,17424	—
1160,7587	—	694,5208	150	570,93864	10	513,94702	20
1159,3600	5	683,9837	—	570,15511	7	513,92578	10
1143,9129	15	680,6851	10	565,88247	10	513,14734	—
1142,2335	6	675,0155	100	562,45501	10	512,73624	5
1137,4095	—	670,3574	10	561,56521	50	512,37231	6
1111,9809	10	667,7994	600	561,53039	—	511,04139	10
1039,5811	8	666,3444	80	560,29529	10	510,76439	—
1034,0898	—	660,9117	30	558,67634	40	510,74505	6
937,2904	6	659,3875	60	557,28501	30	509,87030	8
936,2371	—	659,2920	300	556,96256	20	508,33413	7
935,9419	—	657,5024	30	550,67824	18	507,97426	—
921,0033	6	657,4231	—	550,14686	12	507,92279	—
914,6138	—	654,6245	200	549,75196	15	506,87730	10
911,8892	25	651,8374	20	545,56131	40	505,16379	10
908,9415	30	649,8943	5	544,69197	40	504,98253	15
908,8324	50	649,4985	1000	543,45268	30	504,17585	10
899,9564	200	648,1877	20	542,96999	40	504,10747	7
897,5410	10	647,5632	12	540,57781	40	502,81331	4
894,3078	—	646,2730	30	539,71311	40	501,20712	12
886,8442	—	643,0852	300	539,31752	10	500,61254	20
883,8434	30	642,1355	200	537,14926	50	500,27998	6
882,4227	250	641,1659	400	536,54062	—	499,41323	8
880,4637	10	640,8028	60	534,10255	20	498,55539	7
875,7192	25	640,0321	—	533,99371	12	496,60968	8
868,8632	1500	640,0013	800	533,29020	—	495,76059	60
867,4753	60	639,3605	400	532,85336	15	495,73054	20
866,1907	600	638,0746	—	532,80418	50	495,01144	—
862,1613	10	635,8696	—	532,41864	30	494,63944	—
861,1807	40	635,5035	—	532,20456	—	493,96896	4
858,2268	15	634,4154	—	530,73633	5	493,88206	10
851,5122	20	633,6833	—	530,23073	10	492,47753	3
851,4079	150	633,5337	10	528,36283	18	492,05096	60
846,8414	300	632,2691	—	528,17970	10	491,90003	30
838,7780	1200	631,8023	10	527,31708	—	491,00253	2
836,5642	25	630,1510	15	527,03602	30	490,33169	12
832,7063	1200	629,7798	—	526,95402	60	489,14989	50
829,3523	20	628,0621	—	526,65626	30	489,07616	25
823,9130	8	626,5140	—	526,33134	8	487,82182	12
809,6881	—	625,6367	—	525,06490	6	487,21444	20
807,5156	—	625,4263	6	524,24955	5	487,13244	25
804,7621	15	625,2561	20	523,29474	40	485,97480	15
791,2867	6	624,6329	15	522,71911	40	485,56812	—
774,8278	125	624,0649	—	522,68686	15	484,40158	—
772,3213	—	623,2650	—	521,73964	5	483,95510	—
766,4301	80	623,0728	25	521,62770	10	478,96537	7
758,3797	50	621,9286	—	521,51871	6	478,87606	—
744,3019	—	621,3435	—	520,86007	7	478,68106	5
741,8673	—	620,0319	—	520,45840	5	477,17008	—
740,1690	—	619,1063	20	520,23395	8	474,15321	—
728,4842	—	617,3341	—	519,87149	—	474,03434	—
722,3668	12	616,5364	—	519,49441	10	473,67807	12
721,9686	—	615,7732	—	519,23509	30	473,35955	—
720,7116	500	615,1623	—	519,14615	20	471,02864	—
713,2990	—	614,1741	—	517,15987	20	470,74908	—
711,2177	—	613,7697	18	516,89003	—	470,72807	8

λ, нм	I	λ, нм	I	λ, нм	I	λ, нм	I
469,14144	6	432,67555	—	412,18050	5	391,36339	4
468,35640	—	432,57647	35	412,02087	—	391,08461	—
468,02983	—	431,50872	10	411,85484	15	390,79371	4
466,81422	6	430,93771	4	411,44485	—	390,64814	8
466,19726	—	430,79048	35	410,98053	9	390,39011	5
465,45020	—	430,54545	—	410,74917	12	390,29484	20
464,74370	6	430,45436	—	410,07389	—	389,97086	30
463,29149	—	430,21882	—	409,59731	—	389,80111	10
463,01248	—	429,92409	18	409,15565	—	389,74515	—
462,50527	3	429,80403	3	407,98411	—	389,56579	25
461,87604	—	429,41271	15	407,83563	—	389,39141	—
460,29446	9	428,81484	—	407,47889	—	389,33935	7
460,20040	—	428,54453	3	407,17399	40	388,85165	20
459,53627	—	428,24057	12	406,72738	—	388,70504	—
459,26547	5	427,17634	35	406,35963	45	388,62839	40
457,47225	—	427,11589	20	406,24440	10	388,55121	5
454,78505	4	426,69675	—	405,87562	—	388,43609	—
454,70206	—	426,04794	35	405,73456	—	387,85745	100
453,11520	8	425,83174	—	405,50376	—	387,80206	60
452,86175	18	425,07896	25	404,58147	60	387,60414	—
451,75289	—	425,01248	25	404,46125	6	387,37624	8
451,41876	—	424,82275	4	403,26294	—	387,25032	60
449,45669	12	424,52594	6	403,01855	—	387,17513	4
449,00872	—	423,59433	25	402,18696	12	386,95615	4
448,97416	3	423,36089	18	401,71524	6	386,72184	7
448,22563	6	422,97561	—	400,97154	10	386,55256	30
448,21720	4	422,64263	—	400,72735	6	385,99132	300
448,01397	—	422,22181	12	400,52440	25	385,92143	10
447,60206	10	421,93641	12	400,16627	—	385,63731	50
446,65542	12	421,61854	8	400,04598	—	385,25752	6
446,47691	—	421,03497	15	399,80554	10	385,08193	12
446,16544	8	420,71298	—	399,73952	15	384,99694	40
445,91213	10	420,66985	3	399,59861	—	384,68023	8
445,63294	—	420,39867	10	399,41166	—	384,51706	5
445,43835	5	420,20320	30	399,03766	—	384,32596	8
444,77212	9	419,90981	20	398,39593	10	384,10499	80
444,31963	7	419,83098	20	398,17743	7	384,04397	80
444,23428	12	419,56205	—	397,77437	12	383,92584	7
443,98849	—	419,14358	15	397,13250	9	383,71370	—
443,69246	—	418,78015	20	396,92595	30	383,42244	100
443,51500	—	418,70436	20	396,74234	8	383,33103	5
443,25729	—	418,48941	10	396,60645	10	383,08638	—
443,06175	6	418,23846	—	396,45173	—	383,07607	—
442,73118	10	418,17571	15	395,66796	12	382,97637	—
442,25703	6	417,75949	4	395,64574	9	382,78256	75
441,51250	20	417,56386	10	395,31548	—	382,75746	—
440,84176	6	417,49137	5	395,26045	8	382,58834	200
440,77130	5	417,39230	—	394,99558	10	382,44455	50
440,47525	30	417,33178	—	394,87778	10	382,40763	—
440,14456	—	417,27454	—	394,48924	—	382,18357	—
439,09542	4	417,09044	—	394,33414	—	382,11807	10
438,92467	—	415,68021	12	394,24418	6	382,04274	250
438,78959	4	415,45021	12	394,08797	5	381,63421	—
438,35473	45	415,21704	—	393,73310	—	381,58430	100
437,59318	9	414,76719	10	393,58143	8	381,45247	—
436,97745	7	414,38703	30	393,02981	25	381,29658	40
436,79059	—	414,34174	15	392,79216	30	380,87306	4
436,75811	5	413,99288	—	392,56460	—	380,75392	7
435,85037	—	413,46798	12	392,29134	25	380,66992	10
435,27371	9	413,29024	8	392,02601	20	380,53450	12
435,15465	—	413,20603	25	391,90681	—	380,16317	—
434,89398	—	412,76113	7	391,83174	—	379,95498	50
434,65571	—	412,58831	—	391,71834	8	379,85134	40
433,70484	10						

λ, нм	I	λ, нм	I	λ, нм	I	λ, нм	I
379,79502	12	360,88609	100	338,39808	8	309,98968	20
379,50045	60	360,66821	20	338,24042	—	309,38063	—
379,00943	12	360,32068	10	338,01117	8	309 15786	20
378,91783	—	358,91063	8	337,90206	6	308,37430	20
378,78825	50	358,69861	30	337,20744	—	307,57214	25
378,66781	8	358,57068	20	337,07852	10	306,81749	8
377,86986	—	358,53206	30	335,94876	—	306,72457	30
377,74521	—	358,46627	8	335,64030	—	306,71196	8
377,64553	6	358,16499	—	335,52287	6	306,09849	—
377,48266	5	357,12265	—	335,17457	—	305,90871	100
376,71939	80	357,00996	100	335,15239	—	305,74471	40
376,55414	20	356,89778	—	334,79271	6	305,52638	12
376,37910	100	356,53807	60	334,22163	—	304,76060	100
376,14103	—	355,85170	30	334,05666	6	304,26667	15
376,05335	6	355,41196	—	333,76664	6	304,20215	15
375,82350	150	354,07111	—	333,57699	4	304,17401	15
375,36134	8	352,64695	—	333,42201	4	304,16386	10
374,94875	200	352,61676	15	333,16133	4	304,04281	15
374,82639	60	352,60415	—	332,88667	5	303,77809	—
374,59013	40	352,42417	—	332,74970	—	303,73901	80
374,55623	100	352,12630	25	332,45385	4	303,01494	15
374,33640	20	351,38196	30	332,37375	7	302,92351	—
373,83078	10	350,65004	—	331,47420	7	302,64637	15
373,71333	150	350,48636	—	330,59719	20	302,58442	50
373,48659	300	350,05675	—	329,81331	6	302,40337	15
373,33191	40	349,78420	40	329,25910	8	302,10743	150
373,13761	—	349,52879	8	329,09899	5	302,06405	200
373,03884	—	349,05749	100	328,67541	20	302,04918	100
372,86696	—	348,53418	7	328,45888	5	301,89848	15
372,76211	50	348,30090	—	328,02613	8	301,76288	15
372,43796	8	347,67036	40	327,64713	4	301,41747	—
372,25642	50	347,54511	70	327,16842	—	300,95707	25
372,20263	—	347,13460	6	327,10014	15	300,90945	—
371,99367	250	347,12672	—	326,56182	15	300,81399	60
371,84092	—	346,88474	—	326,50473	8	300,72832	—
371,59136	—	346,65001	—	326,33697	—	300,71469	8
371,12243	—	346,58621	60	325,75940	8	300,30323	10
370,92484	75	346,33044	—	325,43628	10	300,09489	100
370,79216	8	346,23539	—	325,29160	—	300,04527	8
370,78231	20	345,22760	10	325,06250	—	299,95125	30
370,55674	100	345,19166	10	324,64816	—	299,63864	—
370,44635	10	345,03304	10	324,60054	8	299,45033	—
368,74589	40	344,72797	8	323,62231	8	299,44281	100
368,70982	—	344,51508	20	323,46138	7	299,03933	6
368,41102	15	344,38775	50	322,91221	—	298,84730	—
368,30562	10	344,26709	—	322,67137	—	298,72923	10
367,99152	40	344,09899	75	321,43964	8	298,64569	3
367,88620	3	344,06069	150	320,07854	—	298,35714	125
367,76309	12	342,81948	8	319,32268	10	298,14459	20
367,63135	6	342,71213	20	319,16599	7	297,32368	60
366,95229	10	342,42861	10	318,48955	7	297,31336	60
365,95188	8	342,26583	7	318,29798	4	296,94759	10
365,54671	—	341,78428	12	318,07562	5	296,93606	5
365,14699	20	341,55318	—	316,13728	—	296,68997	125
365,02811	—	341,31339	15	314,84078	—	296,52561	20
364,95090	12	340,74611	20	314,32434	—	295,99929	10
364,93043	—	340,68021	6	314,28908	—	295,73660	30
364,78439	100	340,43557	6	313,41115	10	295,46543	5
364,03918	15	340,15200	6	312,93349	5	295,39411	50
363,82998	12	339,93356	15	312,04364	6	294,78773	60
363,29799	—	339,76403	—	311,94956	6	294,13438	15
363,14646	125	339,69774	4	311,66337	12	293,69049	60
362,31878	8	339,45854	5	310,06667	20	292,96195	—
362,14640	15	339,26540	15	310,03054	20	292,90085	25
361,87694	125	339,23058	8	309,99695	15	292,59012	—

λ, нм	I	λ, нм	I	λ, нм	I	λ, нм	I
292,06915	5	275,73170	10	258,04542	—	229,38482	25
291,43055	—	275,63295	20	258,00662	—	229,25249	30
291,22582	—	275,62677	20	257,66916	—	229,16274	15
291,21589	20	275,44273	—	256,45609	—	228,72505	30
290,13820	5	275,40332	—	256,18562	—	228,40864	40
289,50362	8	275,01415	25	256,05576	—	228,36557	12
289,45055	10	274,75564	—	255,63043	—	228,33045	9
289,38822	—	274,45287	8	255,28318	—	227,60263	12
288,63174	—	274,40691	10	254,96142	10	227,20703	15
288,05806	—	274,24064	30	254,59795	10	227,08628	18
287,73021	8	274,22554	20	254,09734	10	226,90990	18
287,53034	5	274,20164	—	253,93576	7	226,70853	9
287,41733	10	274,15781	—	253,74598	—	226,50546	20
287,23346	7	273,82143	—	253,56086	8	225,95109	15
286,93083	10	273,73108	20	253,28764	—	225,18749	12
286,75632	—	273,54762	8	252,98370	—	225,07911	10
286,66264	7	273,46165	—	252,91361	10	224,56536	15
286,38644	8	273,42691	—	252,74358	15	224,25725	15
286,34311	8	273,40060	—	252,42939	8	223,12138	15
286,24952	—	273,35816	15	252,28505	40	222,90735	55
285,88970	5	273,09822	—	252,19197	7	222,81722	10
285,36855	—	272,89703	—	251,96305	10	221,12364	7
285,17979	15	272,80212	5	251,81029	12	221,06894	9
284,87153	—	272,56021	—	251,65716	—	220,70692	6
284,68312	—	272,49542	10	251,08362	15	219,60427	50
284,55959	8	272,35786	15	250,16946	—	219,12052	10
284,39775	20	272,09035	40	250,11332	20	218,71950	40
284,36314	10	271,84365	6	249,65343	6	218,68933	—
284,09382	—	271,77874	—	249,42525	—	218,08692	—
284,04229	6	271,48697	—	249,11562	20	217,68414	6
283,81205	10	271,16560	4	249,06454	30	217,32146	8
283,59511	—	270,65829	—	248,81437	40	217,25858	6
283,54574	6	269 91075	6	248,73705	—	217,12976	40
283,24364	25	269,70224	—	248,32718	60	216,45495	7
282,88094	7	269,50357	—	247,97774	20	216,38633	6
282,78931	5	269,22496	—	247,94813	6	216,15802	5
282,56888	6	269,00694	—	247,48151	8	215,96583	—
282,55569	20	268,98305	—	247,28962	5	215,89207	—
282,32767	20	268,92130	8	246,88803	—	215,77951	5
282,08039	—	268,04540	—	246,77330	—	215,50203	—
281,75047	6	267,90626	10	246,51500	6	215,30075	5
281,32877	30	267,32142	—	246,26483	10	215,01850	—
280,83281	—	266,79138	—	246,21822	—	214,51901	—
280,72461	—	266,69665	—	245,75980	6	214,17188	—
280,69852	—	266,68133	8	245,34767	—	214,10872	—
280,45212	20	266,63998	—	244,77108	—	213,96987	—
280,31675	—	266,20574	—	244,52134	6	213,85932	—
279,77765	15	265,67933	—	244,38728	20	213,20177	—
279,68721	—	265,17075	—	243,81831	—	212,62108	—
279,55409	—	264,75588	5	238,99732	25	211,51697	20
279,50065	—	264,54230	—	238,18356	—	211,46003	—
279,47033	—	264,39992	—	237,45192	10	211,29696	25
279,17867	—	264,16468	4	237,36250	20	210,89598	30
278,79331	5	263,64794	—	237,14313	15	210,83027	12
278,18368	—	263,58100	8	236,94567	8	210,81371	12
277,82214	20	263,25951	—	232,96413	—	210,63953	25
277,21107	20	263,22382	4	232,03585	40	210,30534	25
277,20748	—	262,33669	—	231,31048	40	210,23542	30
276,96717	—	261,87111	—	230,89999	30	210,07984	30
276,92985	—	261,80191	5	230,35815	20	210,01464	10
276,75232	20	261,44952	—	230,16849	20	209,36853	40
276,69104	—	261,27734	—	229,92209	25	209,03837	30
276,27732	—	260,68280	6	229,81699	10	208,75115	25
276,20275	15	260,56578	6	229,77877	35	208,41218	50
276,17810	18	258,45370	8	229,69279	15		

в различных областях спектра. К классу *A* отнесен ряд линий благородных газов [3, 11] (см. разд. 32.3). Резкие линии ^{198}Hg с успехом могут быть использованы в качестве стандартов длин волн. Рекомендуются [1] следующие яркие линии ^{198}HgI: 365,01569; 404,65715; 407,78379; 435,83376; 546,07532; 576,95984; 579,06627 *нм*.

Стандарты второго типа, или линии класса *B*, получают интерполяцией в спектрах, даваемых призменными или дифракционными спектрографами. Для них достаточна погрешность ±0,01 *нм*, но налагается дополнительное требование, чтобы близлежащие линии не слишком различались по интенсивности. К линиям класса *B* отнесены линии железа, возбуждаемые в дуге в воздухе (табл. 32.9).

В тех областях спектра, где интерферометрические измерения невозможны, пользуются комбинационным принципом Ритца; по линиям, длины волн которых измерены интерферометрически с хорошей точностью, определяют относительные энергии уровней, и комбинации между этими уровнями дают так называемые стандарты Ритца в вакуумной, ультрафиолетовой и инфракрасной областях спектра.

Таблица 32.10

Параметры двухатомных молекул [12]

За единицу массы молекул *M* принята масса протона.

Молекула	*M*	Электронное состояние	$E_{эл}$, $см^{-1}$	$\hbar\omega_e$, $см^{-1}$	$\hbar\omega_e x_e$, $см^{-1}$	B_e, $см^{-1}$	α_e, $см^{-1}$	r_e, *нм*
$Br^{79}Br^{81}$	39,958	$X^1\Sigma_g^+$	0	323,2	1,07	0,0809	$2{,}75\cdot10^{-4}$	0,2284
		$B^2\Pi_{0u}^+$	15891	169,7	1,91	0,0595	$6{,}25\cdot10^{-4}$	0,266
Cl_2	17,489	$X^1\Sigma_g^+$	0	564,9	4,0	0,244	$1{,}7\cdot10^{-3}$	0,1988
		$A^3\Pi_{0u}^+$	18310	239,4	5,42	0,158	$3\cdot10^{-3}$	0,247
CO	6,858	$X\Sigma^+$	0	2170	13,46	1,931	0,0175	0,1128
		$A\Pi$	65075	1516	17,25	1,612	0,0223	0,1235
CO^+	6,858	$X^2\Sigma^+$	0	2214	15,16	1,977	0,0190	0,1115
		$A^2\Pi$	20734	1562	13,53	1,589	0,0194	0,1244
		$B^2\Sigma^+$	45877	1734	27,93	1,800	0,0302	0,1169
H_2	0,5041	$X^1\Sigma_g^+$	0	4395	118	60,81	2,99	0,07417
		$B^3\Sigma_u^+$	91690	1357	19,9	20,02	1,19	0,1293
		$C\Pi_u$	100043	2443	67,0	31,34	1,63	0,1033
		$E\Sigma_g^+$	100062	2589	130	32,68	1,82	0,1012
		$C^3\Pi_u$	95744	2465	61,4	31,07	1,42	0,1038
		$a^3\Sigma_g^+$	95938	2665	71,6	34,22	1,67	0,0989
		$e^3\Sigma_u^+$	107777	2196	65,8	27,30	1,52	0,1107
		$d^3\Pi_u$	112702	2372	66,3	30,36	1,54	0,1050
HBr	0,9956	$X^1\Sigma^+$	0	2650	45,2	8,473	0,226	0,1414
HCl	0,9799	$X^1\Sigma^+$	0	2990	52,05	10,59	0,302	0,1275
HF	0,9574	$X^1\Sigma^+$	0	4138	90,1	20,94	0,770	0,09171
HI	1,0002	$X^1\Sigma^+$	0	2310	39,7	6,551	0,183	0,1604
I_2	63,466	$X^1\Sigma_g^+$	0	214,6	0,613	0,03736	$1{,}17\cdot10^{-4}$	0,2667
		$B^3\Pi_{0u}^+$	15642	128,0	0,834	0,0292	$1{,}7\cdot10^{-4}$	0,3016
K_2	19,488	$X^1\Sigma_g^+$	0	92,64	0,354	0,0562	$2{,}19\cdot10^{-4}$	0,3923
Li_2	3,5091	$X^1\Sigma_g^+$	0	351,4	2,59	0,6727	$7{,}04\cdot10^{-3}$	0,2672
N_2	7,0038	$X^1\Sigma_g^+$	0	2360	14,46	2,010	0,0187	0,1094
		$A^3\Sigma_u^+$	50206	1460	13,9	1,440	0,013	0,1293
		$B^3\Pi_g$	59626	1734	14,5	1,638	0,0184	0,1212
		$a^1\Pi_g$	69290	1692	12,8	1,637	0,022	0,1213

Молекула	M	Электронное состояние	$E_{эл}$, $см^{-1}$	$\hbar\omega_e$, $см^{-1}$	$\hbar\omega_e x_e$, $см^{-1}$	B_e, $см^{-1}$	α_e, $см^{-1}$	r_e, $нм$
		$C^3\Pi_u$	89147	2035	17,1	1,826	0,0197	0,1148
N_2^+	7,0036	$X^2\Sigma_g^+$	0	2207	16,1	1,932	0,020	0,1116
		$B^2\Sigma_g^+$	25461	2420	23,2	2,083	0,0195	0,1075
Na_2	11,498	$X^1\Sigma_g^+$	0	1592	0,726	0,1547	$7,9\cdot10^{-4}$	0,3078
NO	7,4688	$X^2\Pi_{1/2}$	0	1904	13,97	1,705	0,0178	0,1151
		$X^2\Pi_{3/2}$	121,1					
		$A^2\Sigma^+$	43 966	2371	14,5	1,995	0,0164	0,1064
		$B^2\Pi_{1/2}$	45 918	1037	7,6	1,076	0,0116	0,1448
		$B^2\Pi_{3/2}$	45 947	1038	7,6	1,177	0,0189	0,1385
O_2^+	8,000	$X^3\Sigma_g^-$	0	1580	12,1	1,446	0,0158	0,1207
		$a^1\Delta_g$	7 918	1509	12,9	1,426	0,0171	0,1215
		$b^1\Sigma_g^+$	13 195	1432	14,0	1,400	0,0182	0,1227
		$B^3\Sigma_g^-$	49 802	700,4	8,0	0,819	0,11	0,1604
O_2	8,000	$X^2\Pi_g$	0	1876	16,5	1,672	0,0198	0,1123
		$a^4\Pi_u$	—	1036	10,4	1,105	0,0157	0,1381
		$A^2\Pi_u$	38 795	900	13,4	1,062	0,0191	0,1409
OH	0,94838	$X^2\Pi$	0	3735	82,8	18,87	0,714	0,9706
		$A^2\Sigma^+$	32 682	3180	94,9	17,36	0,807	0,1012
SO	10,664	$X^3\Sigma$	0	1124	6,12	0,7089	$5,62\cdot10^{-3}$	0,1439

32.6. ПАРАМЕТРЫ МОЛЕКУЛ

Для учета колебательно-вращательного взаимодействия B_v (см. разд. 32.1) представлено в виде

$$B_v = B_e - \alpha_e (v + {}^1/_2),$$

где $B_e = \hbar^2/(2I) = \hbar^2/\left(2Mr_e^2\right)$ — чисто вращательная константа; α_e — константа колебательно-вращательного взаимодействия; $M = M_1M_2/(M_1 + M_2)$ — приведенная масса двухатомной молекулы; M_1 и M_2 — массы атомов, составляющих молекулу; r_e — равновесное расстояние между ядрами атомов; при котором потенциальная энергия молекулы минимальна; $E_{эл}$ — энергия электронного состояния; ω_e и x_e — колебательные константы молекулы.

Таблица 32.11

Дипольные моменты молекул [13]

Дипольным моментом μ нейтральной молекулы называют произведение числа отрицательных (или положительных) зарядов N_Z, разделенных пространственно на среднее расстояние между их центрами масс $\overline{r}_N$: $\mu = N_Z \times \overline{r}_N$. Величина μ измеряется в дебаях. 1 *дебай* = $= 10^{-18}$ ед. СГСЭ.

Молекула	Формула	μ, *дебай*
Азот	N_2	0
Азота		
» двуокись	NO_2	0,3
» закись	N_2O	0,2
» окись	NO	0,16
Альдегид уксусный	C_2H_4O	2,7
Аммиак	NH_3	1,4
Ангидрид сернистый	SO_2	1,6
Анизол	C_7H_8N	1,2
Ацетил хлористый	C_2H_3OCl	2,5
Ацетон	$(CH_3)_2CO$	3,0
Ацетонитрил	C_2H_3N	3,4
Бензонитрил	C_7H_5N	3,9
Бромбензол	C_6H_5Br	1,5
Бромоформ	$CHBr_3$	1,0

Электронные термы двухатомных молекул

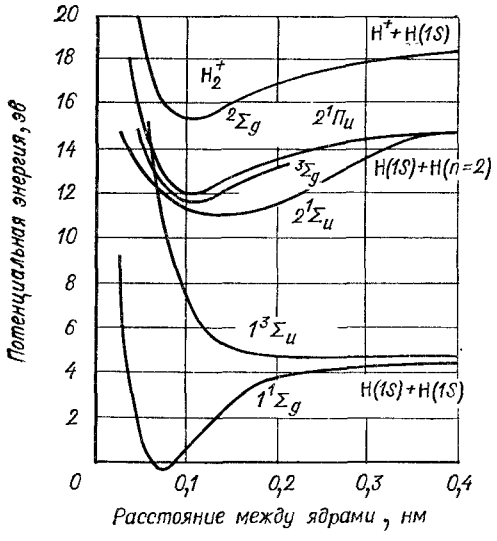


Рис. 32.8 Электронные термы молекулы H_2 [14].

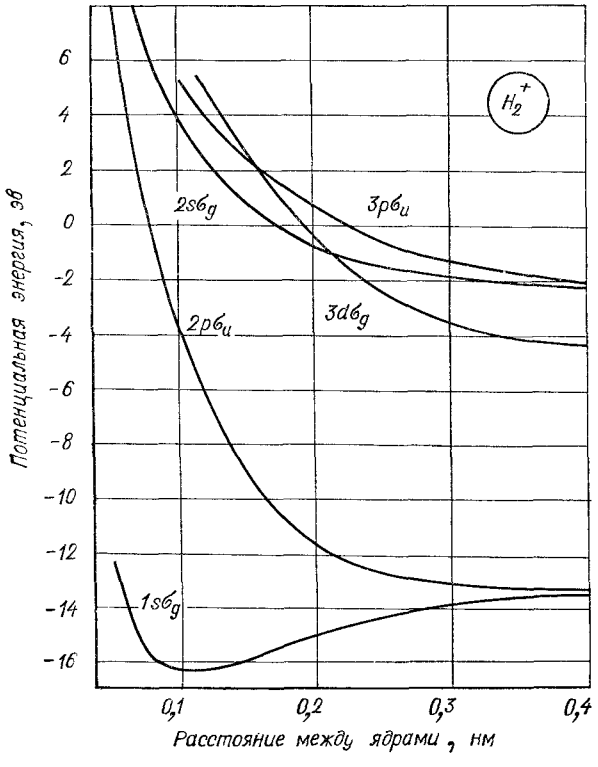


Рис. 32.9. Электронные термы молекулы H_2^+ [15].

Продолжение табл. 32.11

Молекула	Формула	р, дебай
Винил		
» бромистый	C_2H_3Br	1,41
» иодистый	C_2H_3I	1,26
» хлористый	C_2H_3Cl	1,44
Вода	H_2O	1,84
Водород	H_2	0
» бромистый	HBr	0,8
» цианистый	CHN	2,9
» фтористый	HF	1,9
Водород хлористый	HCl	1,1
Диметиланилин	C_8H_4N	1,6
Дифторметан	CH_2F_2	1,96
Дихлорметаи	CH_2Cl_2	1,6
Иодоформ	CHI_3	1,0
Калий		
» бромистый	KBr	9,0
» хлористый	KCl	9,0
Кислород	O_2	0
Кислота уксусная	$C_2H_4O_2$	1,7
Литий бромистый	LiBr	6,2
» иодистый	LiI	6,6
» фтористый	LiF	6,2
Лития гидрид	LiH	6,0
Метил		
» бромистый	CH_3Br	1,8
» иодистый	CH_3I	1,6
» хлористый	CH_3Cl	1,86
Нитробензол	$C_6H_5NO_2$	3,8
Нитрометан	CH_3NO_2	3,1
Нитроэтилен	$C_2H_3NO_2$	3,4
Пиридин	C_5H_5N	2,2
Сероводород	H_2S	1,1
Спирт метиловый	CH_4O	1,65
Трифторметан	CHF_3	1,6
Угарный газ	CO	0,1
Углекислый газ	CO_2	0
Формальдегид	CH_2O	2,2
Хлорбензол	C_6H_5Cl	1,6
Хлороформ	$CHCl_3$	1,2
Цезий		
» иодистый	CsI	11,0
» фтористый	CsF	7,6
» хлористый	CsCl	10,4
Циан		
» бромистый	CNBr	2,9
» иодистый	CNI	3,7
» хлористый	CNCl	2,8
Эфир		
» метиловый	C_2H_6O	1,3
» этиловый	$(C_2H_5)_2O$	1,1

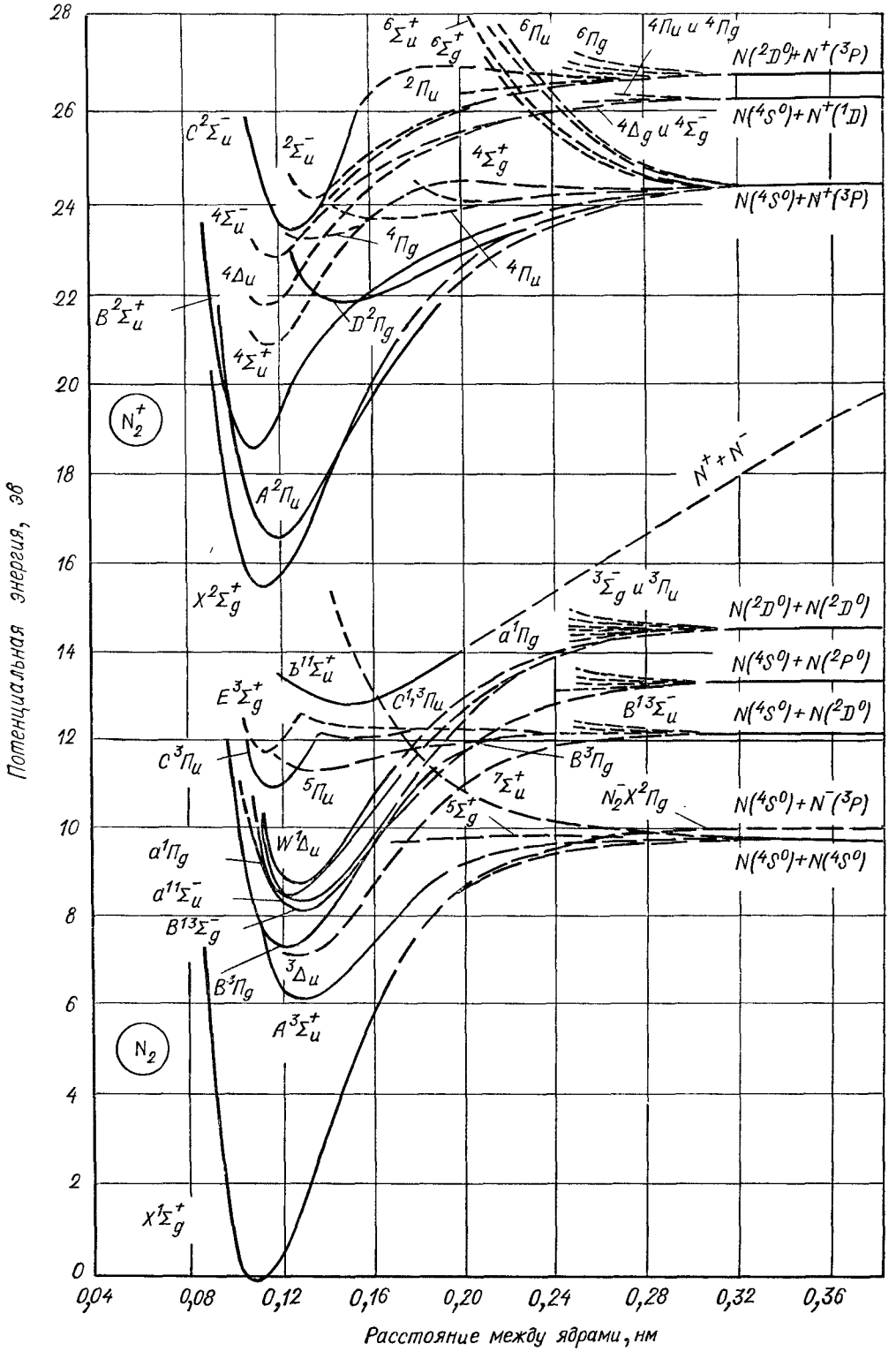


Рис. 32.10. Электронные термы молекул N_2 и N_2^+ [16].

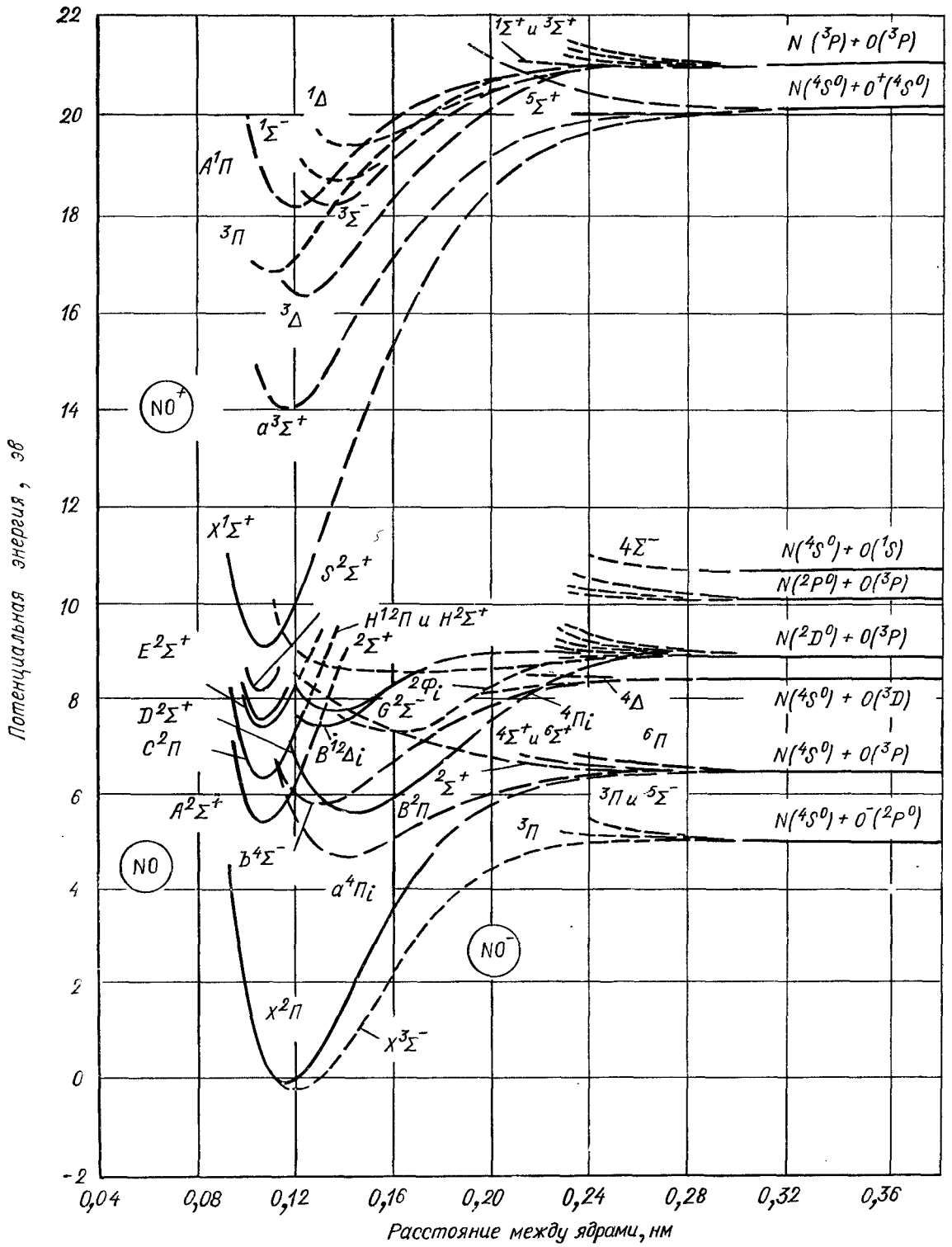


Рис. 32.11. Электронные термы молекул NO NO^+ и NO^- [16].

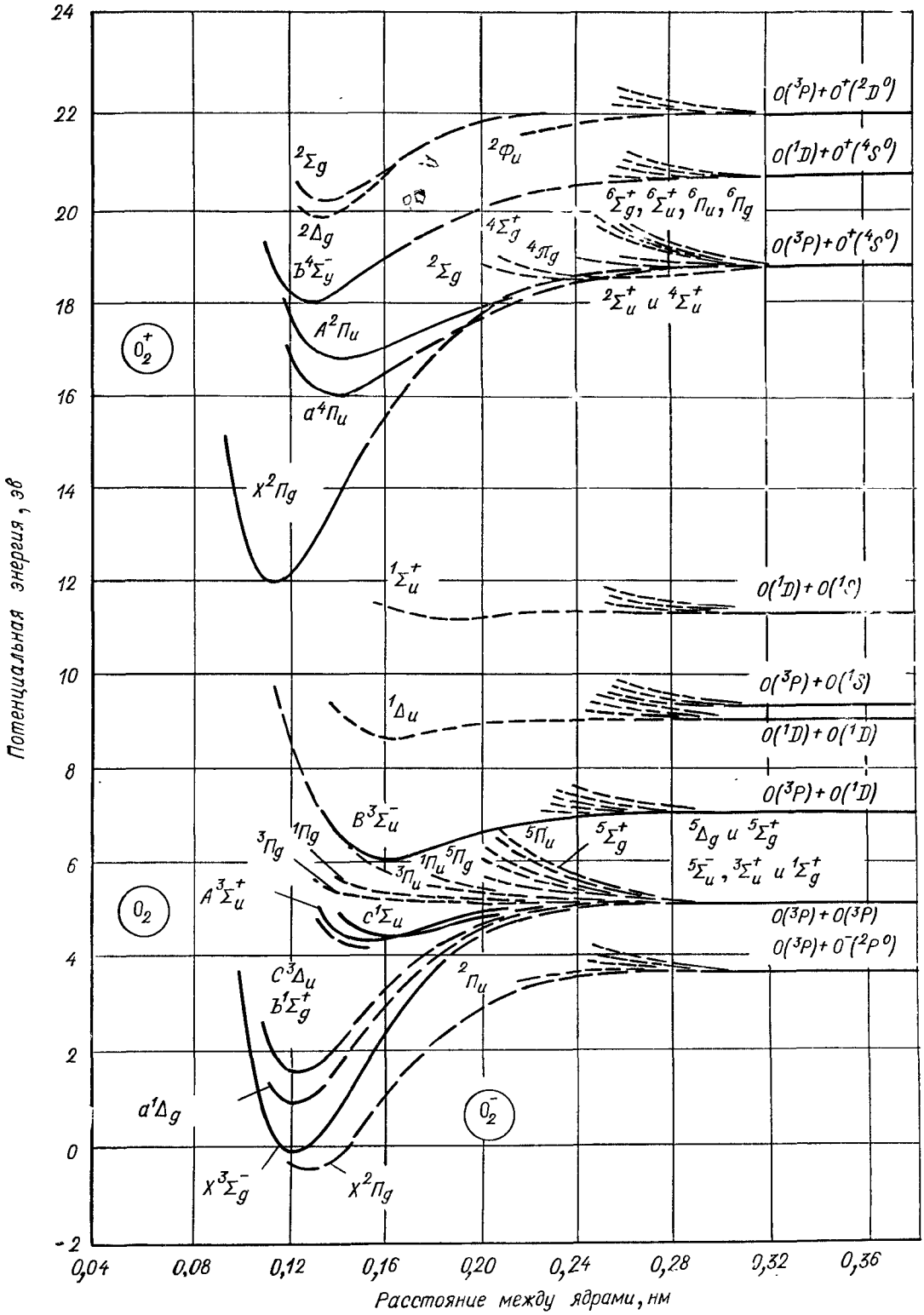


Рис. 32.12. Электронные термы молекул O_2, O_2^+ и O_2^- [16].

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Собельман И. И.** Введение в теорию атомных спектров. М., Физматгиз, 1963.
2. **Ельяшевич М. А.** Атомная и молекулярная спектроскопия М., Физматгиз, 1962.
3. **Аллен К. У.** Астрофизические величины. Пер. с англ. М., Изд-во иностр. лит., 1960.
4. **Wiese W. L. e. a.** Atomic Transition Probabilities, NSRDS-NBS4, Washington, 1966.
5. **Стриганов А. Р., Свентицкий Н. С.** Таблицы спектральных линий нейтральных и ионизованных атомов. М., Атомиздат, 1966.
6. **Taschenbuch** für Chemiker und Physiker. Berlin, Springer Verlag, 1943.
7. **Зайдель А. Н.** и др. Таблицы спектральных линий. М.—Л., Гостехиздат, 1962.
8. **Flemberg H.** «Ark. Mat. Astr. Fys.», 1942, Bd 28A, N 18, S. 1.
9. **Kelly R. L.** Naval Research Laboratory. Report 6648, Washington, 1968.
10. **Вайнштейн Л. А., Сафронова У. И.** «Краткие сообщения по физике», 1972, т. 3, с. 40.
11. «**Trans.** IAU», 1961, v. XI B, p. 215.
12. **Герцберг Г.** Электронные спектры и строение многоатомных молекул. Пер. с англ. М., «Мир», 1969.
13. **Осипов О. А., Минкин В. И.** Справочник по дипольным моментам. М., «Высшая школа», 1965.
14. **Габович М. Д.** Физика и техника плазменных источников ионов. М., Атомиздат, 1972.
15. **Madsen M. M., Peak I. M.** Eigenparameters for the Lowest Twenty Electronics States of the Hydrogen Molecule Ion.— «Atomic Data», 1971, v. 2 (3), p. 171.
16. **Смирнов Б. М.** Физика слабоионизованного газа М., «Наука», 1972.

ГЛАВА 33

ЛАЗЕРЫ

Название «лазер» (по другой терминологии — оптический квантовый генератор — ОКГ) образовано по первым буквам сочетания английских слов: Light Amplification by Stimulated Emission of Radiation — усиление света с помощью вынужденного излучения, что отражает основной физический принцип устройств, генерирующих монохроматическое излучение в оптическом диапазоне частот от вакуумного ультрафиолета до дальней инфракрасной области.

Основными элементами лазера являются: активная среда, источник накачки, возбуждающий вещество активной среды, и резонатор. В обычных условиях отдельные возбужденные атомы вещества переходят на более низкие энергетические уровни спонтанно, т. е. независимо друг от друга. Целью возбуждения активной среды в лазере является такое распределение атомов по возбужденным уровням, при котором между двумя выбранными уровнями достигается инверсия. Состояние с инверсной населенностью отличается от равновесного тем, что на верхнем уровне скапливается существенно больше частиц, чем это диктуется условием равновесия. В результате число переходов с излучением фотонов между данными уровнями оказывается больше числа переходов с поглощением. Такое селективное возбуждение верхних уровней и обеспечивается источником накачки.

Резонатор лазера (система зеркал, между которыми располагается активная среда) обеспечивает обратную связь между световой волной, испущенной какой-либо частью атомов вещества, и атомами, еще находящимися в возбужденном состоянии. В результате этого происходит упорядочение испускания фотонов атомами активного вещества независимо от момента самого акта испускания, т. е. переходы между верхним и нижним лазерными уровнями осуществляются когерентно. Одновременно лазерное излучение оказывается также монохроматическим. Благодаря применению резонатора лазерное излучение обладает и еще одним отличительным свойством: высокой направленностью. Все вместе это приводит к тому, что с помощью лазерных источников света можно создать напряженности электромагнитного поля, близкие к внутриатомным.

С точки зрения единообразия механизмов инверсии и методов накачки лазеры классифицируют по типу фазового состояния активного вещества. Газовые лазеры — на нейтральных и ионизованных атомах, молекулярные газовые лазеры; твердотельные — на основе примесных кристаллов, стекол и полупроводников; жидкостные — на растворах редкоземельных элементов и на основе красителей. Многообразие длин волн, генерируемых лазерами, может быть расширено методами нелинейной оптики.

33.1. ГАЗОВЫЕ ЛАЗЕРЫ НА НЕЙТРАЛЬНЫХ АТОМАХ

Классификация газовых лазеров

В настоящее время инверсная населенность и генерация на нейтральных атомах в газовом разряде получена более чем на 450 переходах, принадлежащих 29 элементам (рис. 33.1 и табл. 33.1). По типу возбуждения газовые лазеры можно разделить на три большие группы:

1) лазеры с возбуждением в слабоионизованном постоянном или высокочастотном разряде;

2) лазеры с возбуждением импульсным разрядом с послесвечением;

3) лазеры с возбуждением импульсным разрядом с малым фронтом нарастания.

Слабоионизованный постоянный высокочастотный разряд. В качестве среды для непрерывно действующих газовых лазеров на нейтральных атомах чаще всего используется положительный столб тлеющего разряда. Плотность тока в таком разряде обычно порядка 100—200 *ма/см*^{2}. Свойства плазмы положительного столба определяются напряженностью электрического поля вдоль разряда. В установившемся, неслоистом, однородном положительном столбе продольное электрическое поле таково, что число возникающих электронов и ионов равно диффузионным потерям заряженных частиц на стенках разрядной трубки. Электронная температура в плазме разряда автоматически устанавливается такой, которая необходима для поддержания потока положительных ионов и потерь электронов на стенках. В большинстве случаев, когда можно пренебречь объемной ионизацией и соударениями между электронами и атомами в метастабильном состоянии, средняя электронная температура определяется главным образом произведением давления газа в трубке P и диаметром трубки D. Чтобы воспроизвести заданные условия разряда в каком-либо чистом газе, необходимо только обеспечить постоянство про-

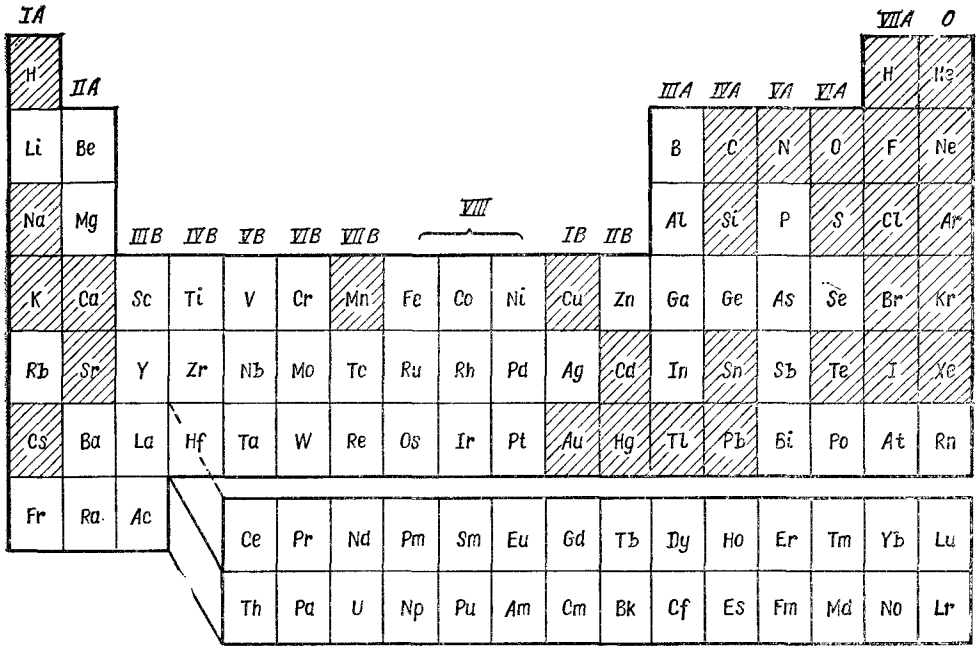


Рис. 33.1. Схематическая периодическая таблица. Заштрихованы элементы, для которых получена генерация в газовом разряде на нейтральных атомах [1].

изведения PD при постоянной электронной концентрации. В слабоионизованной плазме положительного столба электронная концентрация прямо пропорциональна плотности тока через разряд.

Импульсный разряд с послесвечением. Плотность тока в импульсных разрядах, в отличие от случая постоянного разряда, достигает значительно большего значения — до 300 $а/см^2$, в результате чего имеет место сильная ионизация. В послесвечении импульсного разряда преобладают процессы с большими временами диссоциации и рекомбинации. Как в чистых газах, так и смесях, эти процессы приводят к импульсной генерации с большим усилением и большой выходной мощностью, но оптимальные условия в импульсном разряде или в послесвечении не устанавливаются простым произведением PD, а определяются напряжением пробоя газа, видом газа, потерями энергии в разряде, сопротивлением внешней цепи, формой переднего и заднего фронта импульса тока.

Импульсное возбуждение с малым фронтом нарастания. Импульсные разряды короткой длительности используются в основном для возбуждения газовых лазеров на самоограниченных переходах. В таких разрядах время нарастания импульса тока должно быть сравнимо с радиационным временем жизни верхнего лазерного уровня. Только в этом случае возможно достижение инверсной населенности в разряде Плотность тока в максимуме импульса, необходимая для создания инверсии, оказывается порядка сотен и тысяч ампер на квадратный сантиметр. Условия возбуждения в разряде зависят от потерь энергии в единицу времени, давления газа, напряженности пробоя в газе, геометрии электродов и их расположения.

Механизмы селективного возбуждения

Во всех лазерных системах инверсная населенность достигается в результате действия одного или сразу нескольких перечисленных ниже механизмов возбуждения.

Передача возбуждения (атом—атом). В случае столкновений второго рода происходит передача потенциальной энергии от возбужденного атома другому атому в результате неупругого столкновения. Этот процесс можно записать следующим образом:

$$A' + B \rightleftarrows A + B' \pm \Delta E_\infty, \qquad (33.1)$$

где ΔE_∞—разность потенциальных энергий возбужденных состояний A′ и B′ при бесконечном разделении атомов; A и B — чаще всего основные состояния атомов. Если A′ — метастабильное состояние, а B′ может обедняться за счет излучательных переходов, то реакция (33.1) идет в прямом направлении. Сечение такого процесса передачи возбуждения велико, если энергии возбуждения рассматриваемых уровней A′ и B′ достаточно хорошо совпадают, т. е. $\Delta E_\infty \to 0$ (резонансное столкновение). При $\Delta E_\infty \sim 0{,}1$ *эв* сечение передачи возбуждения мало. Передача возбуждения при столкновениях более вероятна в случае сохранения полного спина ($\Delta S=0$). Примером системы, в которой используется селективное возбуждение путем передачи возбуждения, является лазер на смеси гелий—неон (рис. 33.2).

Передача возбуждения при диссоциации (атом—молекула). Такой процесс можно записать в форме

$$M' + AB \begin{cases} \nearrow M + A' + B + T & (33.2а) \\ \searrow M + A + B' + T, & (33.2б) \end{cases}$$

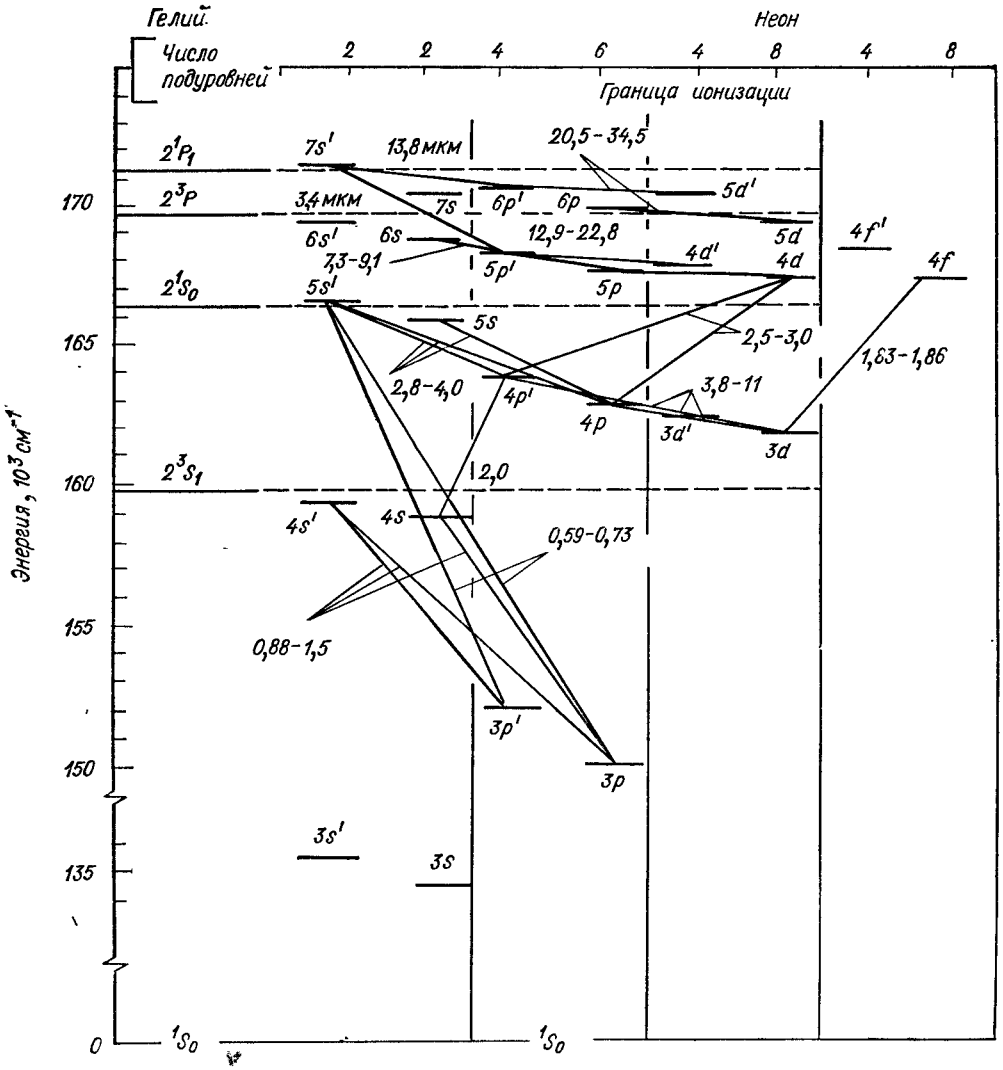


Рис. 33.2. Энергетическая схема уровней неона, показывающая совпадение уровней неона с уровнями гелия $2^3P_{2,1,0}$, 2^3S_1, 2^1S_0 и 2^1P_1 и лазерные переходы, наблюдаемые в смеси He—Ne [1].

где M' — атом в возбужденном (обычно метастабильном) состоянии; T — кинетическая энергия. В таких реакциях атом M' взаимодействует с молекулой AB и вызывает переход молекулы из основного состояния в состояние с силами отталкивания $(AB)^+$ или $(AB)'$ (рис. 33.3). В состоянии с силами отталкивания или преддиссоциативном состоянии у молекулы нет равновесия, и она диссоциирует на $A' + B$ или $A + B'$. Так как несколько преддиссоциативных состояний имеют энергию, приблизительно равную потенциальной энергии M', а в реакции участвуют более двух атомов, то строгого требования на точность совпадения энергий, как это имеет место в передаче возбуждения между двумя атомами, нет. Избыток потенциальной энергии переходит в кинетическую энергию атомов A' и B'. Такой тип селективного возбуждения осуществляется, например, в лазерах на смеси аргона с кислородом и неона с кислородом.

Оптическая накачка. Если длина волны интенсивной линии совпадает с длиной волны резонансного перехода какого-либо атома (в пределах доплеровской ширины), то возможно селективное возбуждение этого резонансного состояния (рис. 33.4). Получение инверсной населенности возможно также и с возбужденного уровня, если он достаточно хорошо заселен. Следует отметить, что для нейтральных атомов случаи совпадения длин волн оптических переходов крайне редки.

Возбуждение электронным ударом. Если возбужденное состояние связано радиационным переходом с основным состоянием, то из приближения Борна без учета электронного обмена следует, что это возбужденное состояние селективно возбуждается в результате неупругих столкновений электронов с атомами. Так, для благородных газов селективное возбуждение из основного состояния осуществляется следующим образом:

$$(np)^6 + e^- + T \begin{cases} \nearrow (np)^5 ms + e^- & (33.3а) \\ \searrow (np)^5 md + e^-, & (33.3б) \end{cases}$$

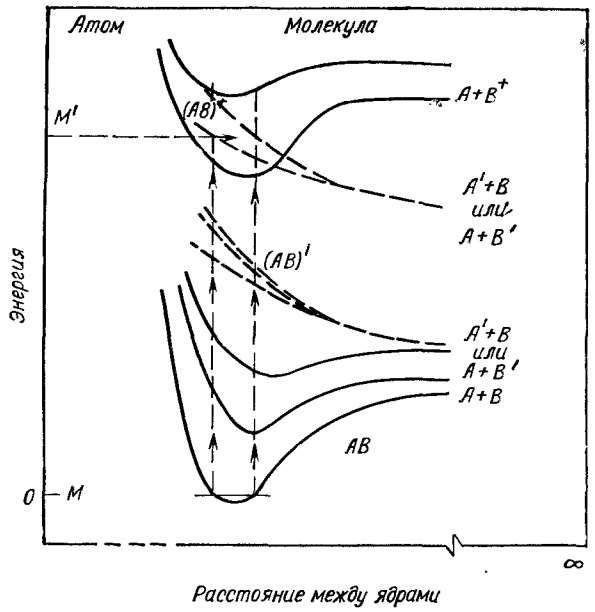


Рис. 33.3. Кривые потенциальной энергии двухатомной молекулы. Передача возбуждения при диссоциации молекулы через состояния с силами отталкивания $(AB)^+$ или $(AB)'$ показана стрелками; пунктирными кривыми показано несколько состояний с силами отталкивания, которые оканчиваются уровнями с одинаковым возбуждением. M' — метастабильное состояние [1].

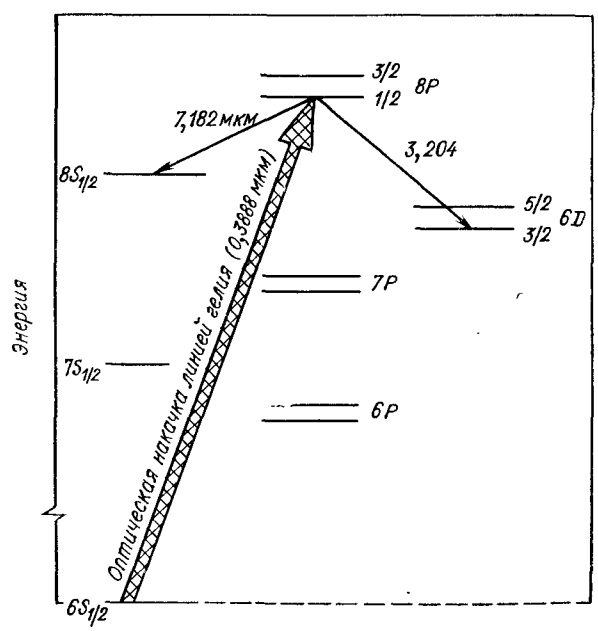


Рис. 33.4. Лазерные переходы в парах цезия (3,204 и 7,182 *мкм*) при оптической накачке [1].

где $(np)^6$, $(np)^5\,ms$ и $(np)^5\,md$ — электронные оболочки; $m = n+1$, $n+2$ и т. д., а $n = 2$ для Ne, 3 для Ar, 4 для Kr и 5 для Xe. Если произведение PD достаточно велико для радиационного захвата резонансной линии но при столкновениях возбуждение еще не передается другим электронным конфигурациям, то радиационный распад может происходить только через переходы, обозначенные на рис. 33.5 словом лазер. Этот тип селективного возбуждения в системе, где радиационный распад нижнего лазерного уровня происходит с достаточной скоростью, может привести к реализации непрерывной генерации. Возбуждение газовых лазеров на самоограниченных переходах осуществля-

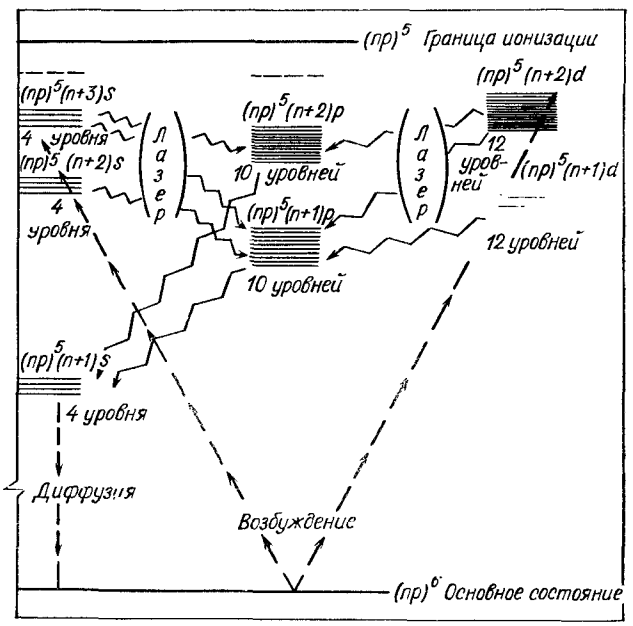


Рис. 33.5. Схематическая диаграмма электронных конфигураций, ответственных за лазерные переходы в чистом неоне, аргоне, криптоне и ксеноне [1]. (Стрелками указаны основные пути возбуждения и генерации.)

ется также селективным возбуждением электронным ударом. Такие лазерные системы, обладающие большим усилением и малой длительностью импульса генерации, уже осуществлены на парах Pb, Cu, Au, Ca, Sr и Mn, а также на благородных газах He, Ne, Ar, Kr и Xe. Расположение энергетических уровней лазера на самоограниченном переходе показано на рис. 33.6. Верхний лазерный уровень *1* возбуждается электронным ударом с основного состояния, а нижний лазерный уровень *2* — метастабилен (или квазиметастабилен). В такой трехуровневой системе при быстром возбуждении уровня *1* инверсная населенность между уровнями *1* и *2* из-за быстрого нарастания населенности нижнего лазерного уровня возможна только на время, меньшее, чем радиационное время жизни верхнего лазерного уровня.

Накачка излучательными каскадными переходами. Интенсивные лазерные переходы могут быть использованы для получения селективного возбуждения верхних уровней других лазерных переходов, которые, вследствие того что их четность совпадает с четностью основного состояния, не могут эффективно возбуждаться прямым электронным ударом. Эта ситуация осуществляется на ряде лазерных переходов в гелий-неоновом лазере.

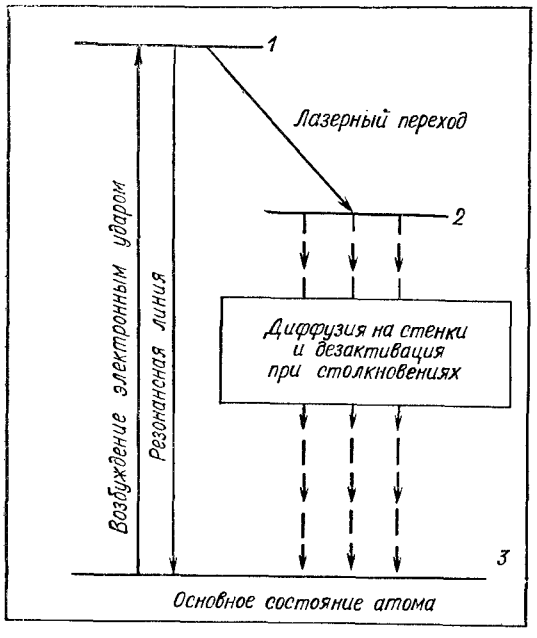


Рис. 33.6. Обобщенная схема процессов возбуждения и генерации в лазерах на самоограниченных переходах [1].

Нейтрализация заряда (ион-ионная рекомбинация). Нейтрализацию заряда можно записать в общем виде таким образом:

$$A^+ + B^- \begin{cases} \nearrow A' + B + T & (33.4а) \\ \searrow A + B' + T. & (33.4б) \end{cases}$$

Избыток энергии, уносимой в виде кинетической энергии T одной из частиц A′ или B′, порядка электронвольта. Частицы A^+ и B^- имеют сильную тенденцию образовывать определенные A′ и B или A и B′, осуществляя тем самым селективное возбуждение одного из состояний A′ или B′. Такой тип получения инверсии имеет место в лазере на смеси натрия и водорода, а также в послесвечении разряда в чистом кислороде и смесях благородных газов при больших давлениях.

Фотодиссоциация молекул. Широкие полосы поглощения молекул позволяют использовать большое количество энергии световой накачки. Излучение атомов, полученных в результате диссоциации, происходит в узких характеристических линиях спонтанного излучения атомов. При фотодиссоциации двухатомных молекул обычно один атом оказывается в возбужденном состоянии, а другой— в основном:

$$AB + h\nu \rightarrow A' + B + T. \qquad (33.5)$$

Энергия кванта должна быть больше 3 *эв* для диссоциации молекулы AB, возбуждения атома и передачи кинетической энергии образовавшимся атомам. Примером возбуждения атома при фотодиссоциации молекулы является фотолиз газообразных CF_3I и CH_3I.

Таблица 33.1

Лазерные переходы в нейтральных газах [1]

Лазерные переходы объединены по атомным группам, показанным на рис. 33.1, в порядке возрастания атомных номеров. Для большинства идентифицированных лазерных переходов значения длин волн линий указаны для измерений в воздухе. Для значений длин волн в вакууме применяется курсив. В соответствии с установившимися традициями сначала пишется верхний уровень, а затем нижний. Возбуждение газа указано сокращенно: непр. — непрерывный слабоионизованный постоянный или высокочастотный разряд; имп. — импульсный разряд; кор. имп. — короткий импульсный разряд с малым фронтом нарастания тока. Иногда при идентификации переходов указаны все возможные уровни. Сомнительные идентификации помечены знаком «?». В ряде случаев указано значение PD или отдельно давление компонент смеси P и диаметр разрядной трубки D.

Группа, элемент	Длина волны, *мкм*	Идентификация	Возбуждение	Примечания
1A				
Водород (рис. 33.7)	1,8751	Первый член серии Пашена $4f^2F^0_{7/2}$—$3d\,^2D_{5/2}$	имп.	Малая добавка водорода (0,01 *мм рт. ст.*) к гелию (3,5 *мм рт. ст.*), D = 7 *мм*
Натрий (рис. 33.8)	1,1382	$4s\,^2S_{1/2}$ —$3p\,^2P_{1/2}$	»	0,001—0,003 *мм рт. ст.* паров натрия в смеси с водородом, гелием или неоном (1—10 *мм рт. ст.*), D=12 *мм*
	1,1404	$4s\,^2S_{1/2}$ —$3p\,^2P_{3/2}$	»	Условия те же

Группа, элемент	Длина волны, *мкм*	Идентификация	Возбуждение	Примечания
Калий (рис. 33.9)	1,2434	$5s\,^2S_{1/2} - 4p\,^2P_{1/2}$	имп.	0,1 *мм рт. ст.* паров калия в смеси с водородом 3—5 *мм рт. ст.*, D=12 *мм*
	1,2523	$5s\,^2S_{1/2} - 4p\,^2P_{3/2}$	»	Условия те же
Цезий	3,2040	$8p^2\,P^0_{1/2} - 6d\,^2D_{3/2}$	непр	Пары цезия при 175°С, D = 10 *мм*
	7,1821	$8p^2\,P^0_{1/2} - 8s\,^2S_{1/2}$	»	Условия те же
IB				
Медь (рис.33.10)	0,510554	$4p\,^2P^0_{3/2} - 4s^2\,^2D_{5/2}$	кор. имп.	0,1 *мм рт. ст.* паров меди в смеси с гелием (1—3 *мм рт. ст.*), D = 10 *мм*
	0,578213	$4p\,^2P^0_{1/2} - 4s^2\,^2D_{3/2}$	»	Условия те же
Золото	0,627818	$6p\,^2P^0_{1/2} - 6s^2\,^2D_{3/2}$	»	Пары золота при 1500°С, D = 10 *мм*
IIA				
Кальций	5,5457	$4p\,^1P^0_1 - 3d\,^1D_2$	»	Пары кальция при 460°С в смеси с гелием или неоном (3 *мм рт. ст.*)
Стронций	6,4567	$5p\,^1P^0_1 - 4d\,^1D_2$	кор. имп.	Давление паров стронция при 46 °С, 3 *мм рт. ст.* гелия или неона
IIB				
Кадмий	0,8390*	—	имп.	0,03—0,05 *мм рт. ст.* паров кадмия, 2—20 *мм рт ст.* гелия, D=12 *мм*
	1,1869*	—	»	0,03—0,05 *мм рт. ст.* паров кадмия, 0,05—1 *мм рт. ст.* гелия или неона, D = 12 *мм*

* Возможно, что это линия Cd II.

Группа, элемент	Длина волны, *мкм*	Идентификация	Возбуждение	Примечание
II *B* Кадмий	1,4330	$6p\ ^3P_1^0 - 6s\ ^3S_1$	имп.	0,03—0,05 *мм рт. ст.* паров кадмия, 2—20 *мм рт. ст.* гелия, $D = 12$ *мм*
	1,6485	$4f\ ^3F_{4,3,2} - 5d\ ^3D_3$	»	Условия те же
Ртуть (рис. 33.11)	0,3545	—	имп.	Смесь паров ртути и аргона $\sim 10^{-3}$ *мм рт. ст.* ртути и аргона, $D = 5$ *мм*
	0,7065*	—	»	
	0,8677	—	»	0,001 *мм рт. ст.* паров ртути, 0,8—1,2 *мм рт. ст.* гелия, D=15 *мм*
	1,11768	$7p\ ^1P_1^0 - 7s\ ^3S_1$	»	0,09—0,12 *мм рт. ст.* паров ртути, 0,005—0,05 *мм рт. ст.* гелия
	1,2222	—	»	0,001 *мм рт. ст.* паров ртути, 0,2 *мм рт. ст.* аргона, D = = 5 *мм*
	1,2246	—	»	Смесь паров ртути и аргона, D = = 5 *мм*
	1,2545	—	»	0,001 *мм рт. ст.* паров ртути, 0,8—1,2 *мм рт. ст.* гелия, $D = 15$ *мм*
	1,2760	—	»	0,001 *мм рт. ст.* паров ртути, 0,2 *мм рт. ст.* аргона, D = = 5 *мм*
	1,2981	—	»	0,001 *мм рт. ст.* паров ртути, 0,8 *мм рт. ст.* аргона или 1,2 *мм рт. ст.* гелия, D = = 15 *мм*
	1,3655	—	»	0,001 *мм рт. ст.* паров ртути, 0,8—1,2 *мм рт. ст.* гелия, $D = 15$ *мм*
	1,36755	$7p\ ^3P_1^0 - 7s\ ^3S_1$	»	0,09—0,12 *мм рт. ст.* паров ртути, 0,005—0,05 *мм рт. ст.* гелия, $D = 6$ *мм*
	1,5295	$6p'\ ^3P_2^0 - 7s\ ^3S_1$	непр.	0,09—0,12 *мм рт. ст.* паров ртути, 0,1—1,0 *мм рт. ст.* гелия, неона, криптона или аргона, $D = 6$ *мм*

* Возможно, что это линия Ar I.

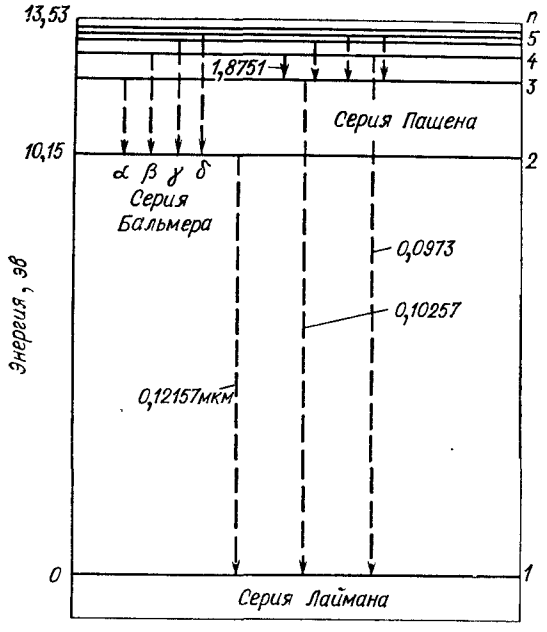


Рис. 33.7. Лазерный переход в водороде (1,875 *мкм* в серии Пашена) [1].

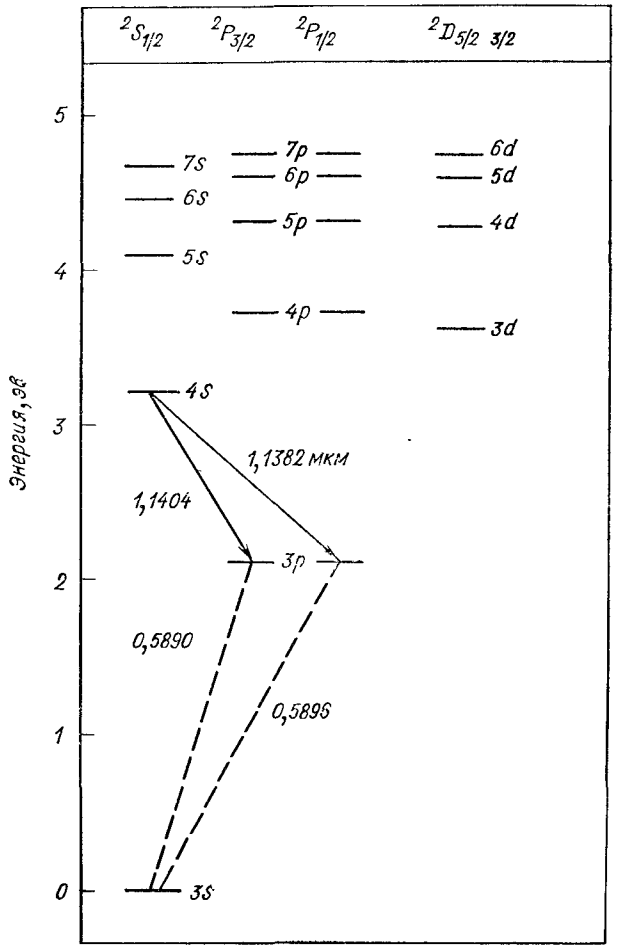


Рис. 33.8. Схема лазерных переходов в натрии [1].

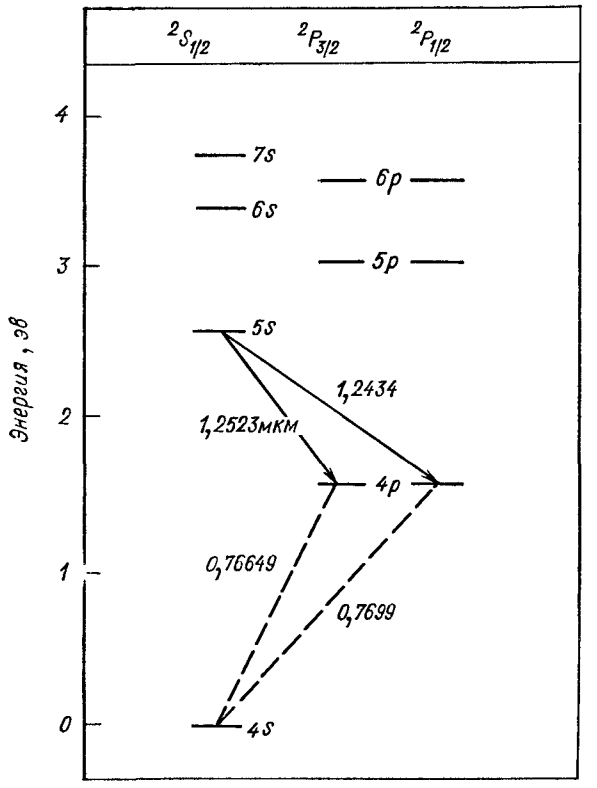


Рис. 33.9. Схема лазерных переходов в калии [1].

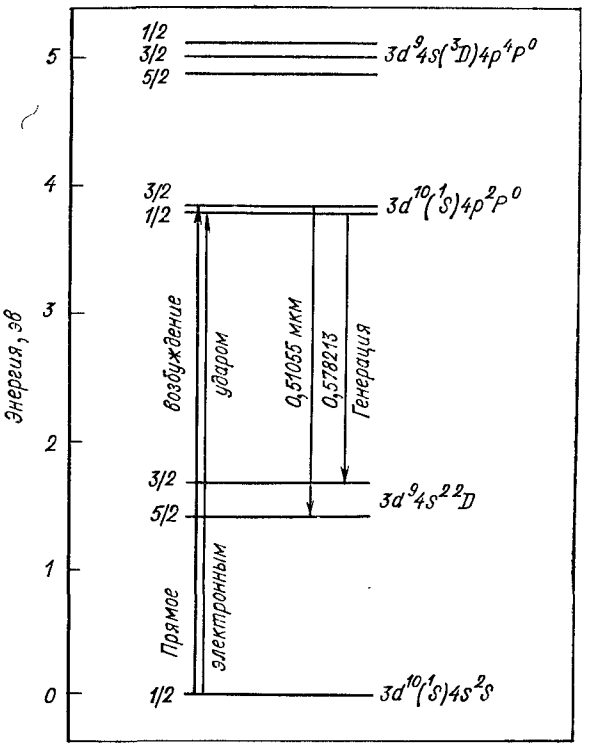


Рис. 33.10. Схема лазерных переходов в парах меди (0,5105 и 0,5782 *мкм*) [1].

Группа, элемент	Длина волны, *мкм*	Идентификация	Возбуждение	Примечания
IIB				
Ртуть	1,69202	$5f\ ^1F_3^0 - 6d\ ^1D_2$	имп.	0,09—0,12 *мм рт. ст.* паров ртути, 0,005—0,05 *мм рт. ст.* гелия, $D = 6$ *мм*
	1,69423	$5f\ ^3F_2^0 - 6d\ ^3D_1$	»	Условия те же
	1,70733	$5f\ ^3F_4^0 - 6d\ ^3D_3$	»	
	1,71098	$5f\ ^3F_3^0 - 6d\ ^3D_2$	»	
	1,73297	$7d\ ^1D_2 - 7p\ ^1P_1^0$	»	0,09—0,3 *мм рт. ст.* паров ртути, 0,005—0,1 *мм рт. ст.* гелия, неона, криптона или воздуха, $D = 6$ *мм*
	1,81296	$6p'\ ^3F_4^0 - 6d\ ^3D_3$	непр.	Условия те же
	3,34*	$6p'\ ^3F_4 - 8s\ ^3S_1$	имп.	0,3 *мм рт. ст.* паров ртути, 0,25 *мм рт. ст.* криптона, $D = 8$ *мм*
	3,930	$6d\ ^3D_3 - 6p'\ ^3P_2^0$ или $5gG - 5fF^0$	»	Условия те же
	5,880	$6p'\ ^1P_1^0 - 7d\ ^3D_2$	»	
	6,490	$9s\ ^1S_0 - 8p\ ^1P_1^0$ или $11p\ ^3P_1^0 - 10s\ ^3S_1$	»	
III				
Таллий	0,5350	$7s\ ^2S_{1/2} - 6p\ ^2P_{3/2}^0$	кор. имп.	Более 0,01 *мм рт. ст.* паров таллия, несколько *мм рт. ст.* неона или гелия, $D = 1{,}3 \div 3{,}0$ *мм*
IV				
Углерод	0,833515	$3p\ ^1S_0 - 3s\ ^1P_1^0$	имп.	4 *мм рт. ст.* смеси углекислого газа и неона, $D = 15$ *мм*
	0,94057	$3p\ ^1D_2 - 3s\ ^1P_1^0$	»	Условия те же или 2—16 *мм рт. ст.* смеси CO и гелия
	1,06831	$3p\ ^3D_2 - 3s\ ^3P_1^0$	»	Условия те же
	1,06853	$3p\ ^3D_1 - 3s\ ^3P_0$	»	0,05 *мм рт. ст.* окиси углерода и 2—16 *мм рт. ст.* гелия
	1,06912	$3p\ ^3D_3 - 3s\ ^3P_2^0$	непр.	0,01 *мм рт. ст.* углекислого газа или окиси углерода, 2 *мм рт. ст.* гелия, $D = 5$ *мм*
	1,45425	$3p\ ^1P_1 - 3s\ ^1P_1^0$	»	Условия те же
	2,0645	$5d\ ^1D_2^0 - 4p\ ^3P_2$	»	0,02 *мм рт. ст* окиси углерода, 1 *мм рт. ст.* гелия, $D = 10$ *мм*

* Возможно, это линия не Hg I, а Kr I.

Группа, элемент	Длина волны, *мкм*	Идентификация	Возбуждение	Примечания
IV				
Углерод	3,4046	$4d\ ^1D_2^0 - 4p\ ^1P_1$	непр.	0,02 *мм рт. ст.* окиси углерода, 1 *мм рт. ст.* гелия, $D=10$ *мм*
	3,5155	$6d\ ^3P_2^0 - 5p\ ^3D_3$	»	
	5,5956	$4p\ ^3S_1 - 3d\ ^3P_1^0$	»	
Кремний	1,198418	$4p\ ^3D_2 - 4s\ ^3P_1^0$	непр.	0,03 *мм рт. ст.* $SiCl_4$ или 0,04 *мм рт. ст.* $SiCl_4$ и 0,5 *мм рт. ст.* неона, $D = 6$ *мм*
	1,203148	$4p\ ^3D_3 - 4s\ ^3P_2^0$	»	Условия те же
	1,588402	$5s\ ^3P_1^0 - 4p\ ^3D_1$	»	0,03—0,05 *мм рт. ст.* $SiCl_4$, 1—5 *мм рт. ст.* неона, $D = 6$ *мм*
Олово	0,657903	$10d\ ^3D_{0,2} - 6p\ ^3P_1$	имп.	Пары $SnCl_4$ при комнатной температуре, $D = 5,6$ *мм*
Свинец (рис. 33.12)	0,363954	$6p\ 7s^3\ P_1^0 - 6p^2\ ^3P_1$	кор имп	Давление паров ^{208}Pb при 800 — 900°С с добавлением гелия, неона или аргона, $D = 2$ *мм*
	0,405779	$6p7s\ ^3P_1^0 - 6p^2\ ^3P_2$	»	
	0,406213	$6p6d\ ^3D_1^0 - 6p^2\ ^1D_2$	»	Условия те же
	0,72290	$7s\ ^3P_1^0 - 6p^2\ ^1D_2$	»	0,2—2,0 *мм рт. ст.* паров свинца, 3 *мм рт. ст.* гелия, $D = 10$ *мм*
V	0,4120*	—	имп.	0,001—0,02 *мм рт. ст.* смеси азота и ртути, $D = 3$ *мм*
Азот	0,4321	—	»	Разряд (θ-пинч) в азоте (1 *мм рт. ст.*), $D = 25$ *мм*
	0,4329	—	»	Условия те же
	0,4525*	—	»	0,001—0,02 *мм рт. ст.* смеси азота и ртути, $D = 3$ *мм*
	0,4750*	—	»	
	0,5440*	—	»	
	0,5500*	—	»	Условия те же
	0,5540*	—	»	
	0,85940	$3p\ ^2P_{1/2}^0 - 3s\ ^2P_{1/2}$	имп	4 *мм рт. ст.* смеси азота и гелия, $D = 15$ *мм*
	0,86284	$3p\ ^2P_{3/2}^0 - 3s\ ^2P_{3/2}$	»	0,2—0,7 *мм рт. ст.* азота, 3 *мм рт. ст.* гелия, $D = 15$ *мм*
	0,91876	$3p'\ ^2D_{5/2}^0 - 3s'\ ^2D_{3/2}$	»	4 *мм рт. ст.* смеси азота и гелия, $D = 15$ *мм*
	0,93868	$3p\ ^2D_{3/2}^0 - 3s\ ^2P_{1/2}$	непр.	0,02—0,2 *мм рт. ст.* азота, 0,01—0,1 *мм рт. ст.* кислорода, водорода, гелия и неона, $D = 3$ *мм*; или 4 *мм рт. ст.* смеси азота и гелия, $D = 15$ *мм*
	0,93928	$3p\ ^2D_{5/2}^0 - 3s\ ^2P_{3/2}$	»	Условия те же
	1,34295	$3p\ ^2S_{1/2}^0 - 3s\ ^2P_{1/2}$	имп.	0,2—0,7 *мм рт. ст.* азота; или 0,15 *мм рт. ст.* азота, 3 *мм рт. ст.* гелия, $D = 15$ *мм*
	1,3585	$3p\ ^2S_{1/2}^0 - 3s\ ^2P_{3/2}$	непр.	0,03 *мм рт. ст.* окиси или закиси азота, 2 *мм рт. ст.* гелия или 1 *мм рт. ст.* неона, $D = 5$ *мм*

* Есть некоторые сомнения относительно точности измерения длины волны этой линии, поэтому ее отождествление с линией азота может оказаться ошибочным.

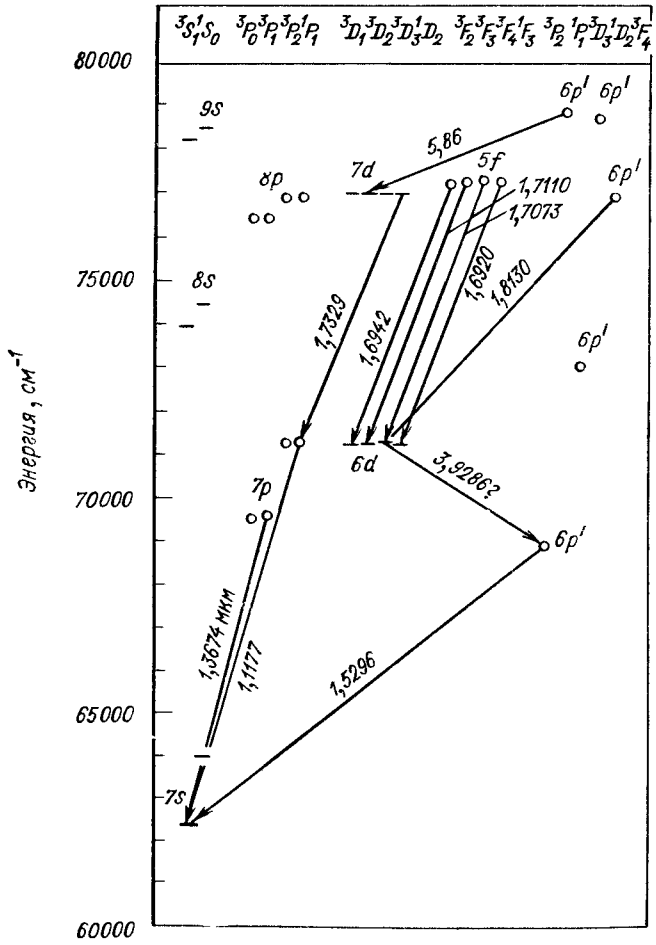


Рис. 33.11. Схема большинства лазерных переходов в парах ртути [1]. (Кружками обозначены нечетные, а горизонтальными линиями — четные уровни атома.)

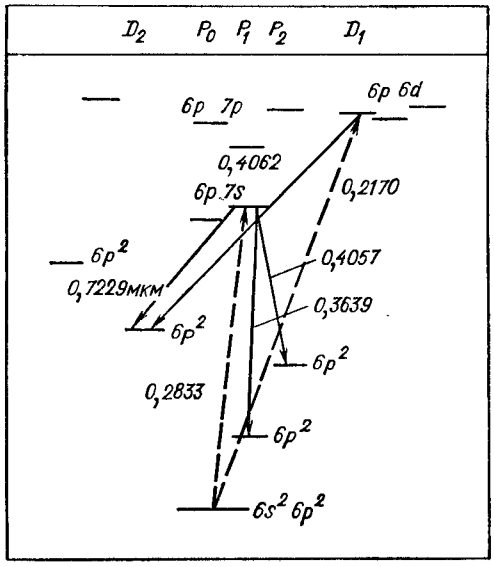


Рис. 33.12. Схема лазерных переходов в парах свинца [1].

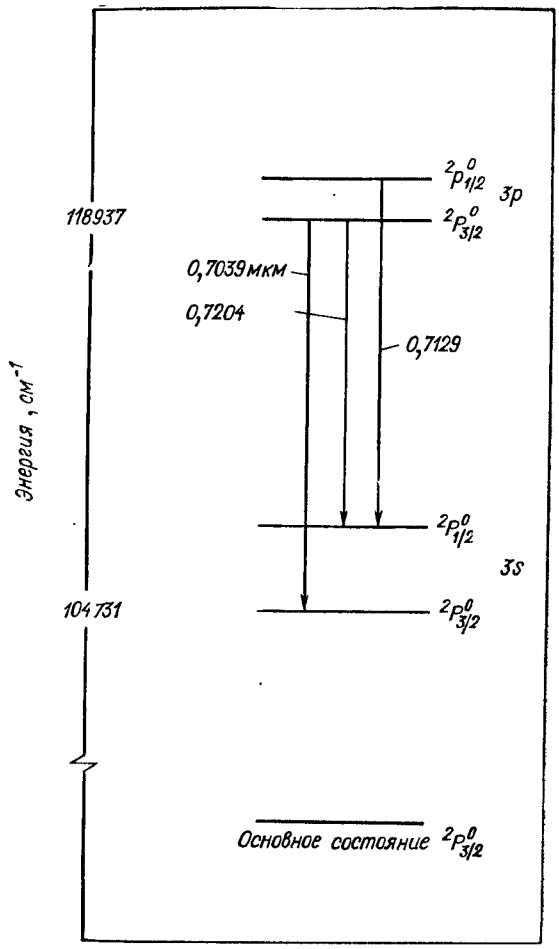


Рис. 33.13. Схема лазерных переходов во фторе. [1].

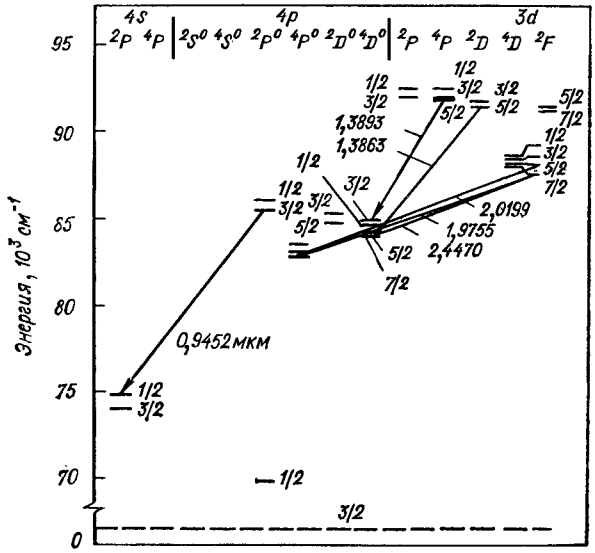


Рис. 33.14. Схема лазерных переходов в хлоре [1].

Группа, элемент	Длина, волны, *мкм*	Идентификация	Возбуждение	Примечания
V Азот	1,45423	—	имп.	0,2—0,7 *мм рт. ст.* азота; или 0,15 *мм рт. ст.* азота, 3 *мм рт. ст.* гелия, $D = 15$ *мм*
	1,4577	$4s\ ^4P_{5/2} - 3p\ ^2D^0_{5/2}$	непр.	0,03 *мм рт. ст.* окиси или закиси азота, 2 *мм рт. ст.* гелия или 1 *мм рт. ст.* неона, $D = 5$ *мм*
	3,7942	—	имп.	0,2—0,7 *мм рт. ст.* азота; или 0,15 *мм рт. ст.* азота, 3 *мм рт. ст.* гелия, $D = 15$ *мм*
	3,8154	—	»	Условия те же
VI Кислород	0,844628 0,844638 0,844672 0,844680 *	$3p\ ^3P_{0,2,1} - 3s\ ^3S^0_1$	непр	0,01—0,04 *мм рт. ст.* кислорода, 0,35 *мм рт. ст.* неона, 1,4 *мм рт. ст.* аргона, окиси углерода, углекислого газа или гелия, $D = 7$ *мм*; или 0,1—2 *мм рт. ст.* кислорода, $D = 10$ *мм*
	0.882045	$3p'\ ^1F_3 - 3s'\ ^1D^0_2$	имп.	В смеси углекислого газа и неона (4 *мм рт. ст.*), $D = 15$ *мм*
	2,890	$4p\ ^3P - 4s\ ^3S^0$	непр.	0,08 *мм рт. ст.* кислорода, 0,5—1,0 *мм рт. ст.* гелия или неона, $D = 5 \div 7$ *мм*
	4,563	$4p\ ^3P - 3d\ ^3D^0$	»	Условия те же
	5,981	$7d\ ^3D^0 - 6p\ ^3P$	»	0,08 *мм рт. ст.* кислорода, 0,5—1,0 *мм рт. ст.* гелия или неона, $D = 5 \div 7$ *мм*
	6,8161	$3s'\ ^3D^0_2 - 4p\ ^3P_{2,1,0}$	имп.	В чистом кислороде, $D = 15$ *мм*
	6,858	$5p\ ^3P - 5s\ ^3S^0$	непр.	0,08 *мм рт. ст.* кислорода, 0,5—1,0 *мм рт. ст.* гелия или неона, $D = 5 \div 7$ *мм*
	6,8731	$3s'\ ^3D^0_3 - 4p\ ^3P_2$	имп.	В чистом кислороде, $D = 15$ *мм*
	10,400	$5p\ ^3P - 4d\ ^3D^0$	непр.	0,08 *мм рт. ст.* кислорода, 0,5—1,0 *мм рт. ст.* гелия или неона, $D = 5 \div 7$ *мм*
Сера	0,516032[2]*	—	имп.	0,015—0,06 *мм рт. ст.* двуокиси серы, $D = 1,5$—6 *мм*
	0,521962[2]*	—	»	Условия те же
	1,0455	$4p\ ^3P_2 - 4s\ ^3S^0_1$	непр.	0,03 *мм рт. ст.* SF_6 или 0,03 SF_6, 2 *мм рт. ст.* гелия. Так же в смеси H_2S с гелием, неоном или аргоном, $D = 5$ *мм*
	1,0636	$4p'\ ^1F_3 - 4s'\ ^1D^0_2$	»	Условия те же
Теллур	0,5454[2]*	—	имп.	Теллур при температуре 125—250°С, 0,1—0,25 *мм рт. ст.* неона, $D = 6$ *мм*
	0,5640[2]*	—		0,001—0,002 *мм рт. ст.* теллура, 0,2 *мм рт. ст.* неона, $D = 3$ *мм*
	0,6350	—	»	Условия те же
VII*A* Фтор (рис. 33.13)	0,7024	$3p\ ^2P^0_{3/2} - 3s^2\ P_{1/2}$	»	0,03—0,1 *мм рт. ст.* CF_4, CF_6 или C_2F_6, 2—10 *мм рт. ст.* гелия, прокачка этой смеси, $D = 25$ *мм*
	0,7009	$3p\ ^2P^0_{3/2} - 3s\ ^2P_{3/2}$	»	Условия те же
	0,7129	$3p\ ^2P^0_{1/2} - 3s\ ^2P_{1/2}$	»	

* Это триплет O I. Четыре линии в генерации возникают из-за большой доплеровской ширины линии (вызвано это возбуждением и диссоциацией молекул кислорода) и радиационного захвата центра линии. Вследствие этого усиление на крыльях линии больше.

[2]* Возможно, это линия иона.

Группа, элемент	Длина волны, *мкм*	Идентификация	Возбуждение	Примечания
VII*A* Хлор (рис. 33.14)	0,945206	$4p\,^2P^0_{3/2} - 4s\,^2P_{1/2}$	непр.	0,01—0,08 *мм рт. ст.* хлора, 0,3—3 *мм рт. ст.* гелия или неона, $D = 6$ *мм*
	1,3863	$3d\,^2D_{3/2} - 4p\,^4D^0_{5/2}$	имп.	0,3 *мм рт. ст.* HCl, 0,1 *мм рт. ст.* гелия или неона, $D = 14$ *мм*
	1,3893	$3d\,^4P_{3/2} - 4p\,^4D^0_{3/2}$	»	Условия те же
	1,58697	$3d\,^4F_{9/2} - 4p\,^4D_{7/2}$	непр.	В смеси фреона и гелия (3,3 *мм рт. ст.*)
	1,9755	$3d\,^4D_{7/2} - 4p\,^4P^0_{5/2}$	»	В HCl или 0,1 *мм рт. ст.* хлора, $D = 6$ *мм*
	2,0199	$3d\,^4D_{5/2} - 4p\,^4P_{3/2}$	»	Условия те же
	2,4470	$3d\,^4D_{7/2} - 4p\,^4D^0_{7/2}$	»	0,09 *мм рт. ст.* хлора, 1,5—7,2 *мм рт. ст.* гелия, $D = 25$ *мм*
	3,0672	$5p\,^2D^0_{5/2} - 5s\,^2P_{3/2}$	»	0,09 *мм рт. ст.* хлора, 2,1 *мм рт. ст.* аргона $D = 25$ *мм*
Бром (рис. 33.15)	2,2866	$4d[3]_{7/2} - 5p[2]^0_{5/2}$	непр	0,3 *мм рт. ст.* бромистого водорода, $D = 12$ *мм*
	2,3513	$4d[3]_{5/2} - 5p[2]^0_{3/2}$	»	Условия те же
	2,8377	$4d[3]_{7/2} - 5p[3]^0_{7/2}$	»	
Иод	0 980*	—	имп.	0,1 *мм рт. ст.* — давления паров иода, несколько *мм рт. ст.* гелия, $D = 5$ *мм*
	1,010*	—	»	Условия те же
	1,030*	—	»	
	1,060*	—	»	
	1,3152	$5p^5\,^2P^0_{1/2} - 5p^5\,^2P_{3/2}$	имп. (фотолиз)	30 *мм рт. ст.* CF_3I или CH_3I, $D = 7$ *мм*
	1,4542	$7p[1]^0_{3/2} - 6d[2]_{3/2}$	»	0,3 *мм рт. ст.* HI, $D = 14$ *мм*
	2,5987	$5d[2]_{3/2} - 6p[1]^0_{3/2}$	непр.	0,3 *мм рт. ст.* HI, 0,3 *мм рт. ст.* неона, $D = 14$ *мм*
	2,7572	$(^1D_2)5d[2]_{5/2} - (^1D_2)6p[1]^0_{3/2}$	»	В HI, $D = 12$ *мм*
	3,036	$5d[2]_{3/2} - 6p[1]^0_{3/2}$	»	В смеси CH_3I и паров иода или CF_3I с гелием, аргоном или ксеноном, $D = 50$ *мм*
	3,236	$(^3P_2)5d[2]_{5/2} - (^3P_2)6p[1]^0_{3/2}$	»	В парах иода или HI, $D = 12$ *мм*
	3,429	$(^3P_2)5d[4]_{7/2} - (^3P_2)6p[3]^0_{5/2}$	»	В парах иода, $D = 12$ *мм*
	4,858	$5d[1]_{3/2} - 6p[2]_{5/2}$	»	В смеси CF_3I, CH_3I или паров иода с гелием, аргоном или ксеноном, $D = 50$ *мм*
	4,862	$5d[4]_{9/2} - 6p[3]_{7/2}$	»	Условия те же
	5,497	$5d[2]_{5/2} - 6p[1]_{3/2}$	»	
	6,720	$6s[2]_{3/2} - 6p[1]_{3/2}$	»	
	6,902	$5d[3]_{7/2} - 6p[2]_{5/2}$	»	
	9,016	$5d[3]_{7/2} - 6p[2]_{5/2}$	»	
VII*B* Марганец (рис. 33.16)	0,5341065[2*]	$y\,^6P^0_{7/2} - a\,^6D_{7/2}$	кор. имп.	0,1—2,0 *мм рт. ст.* паров марганца (температура 1100—1300°C), 1,0—2,0 *мм рт. ст.* гелия, $D = 10$ *мм*

* Возможно, это линия однократно ионизованного иода.

[2*] Генерация наблюдалась на шести компонентах сверхтонкой структуры этой линии.

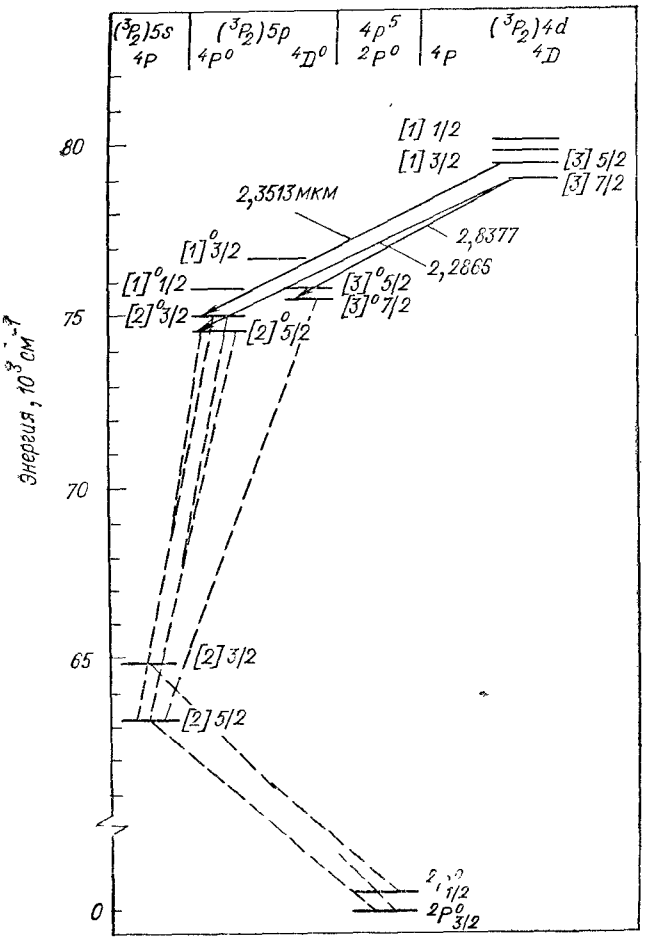


Рис. 33.15. Схема лазерных переходов в атомарном броме [1]. (Штрихами указаны сильные спонтанные переходы.)

Продолжение табл. 33.1

Группа, элемент	Длина волны, *мкм*	Идентификация	Возбуждение	Примечания
VII*B* Марганец (рис. 33.16)	0,5420368	$^6P^0_{5/2} - {}^6D_{7/2}$	кор. имп.	0,1—2,0 *мм рт. ст.* паров марганца (температура 1100—1300°С), 1,0—2,0 *мм. рт. ст.* гелия, $D = 10$ *мм*
	0,5470640	$^6P^0_{5/2} - {}^6D_{5/2}$	» »	
	0,5481345	$^6P^0_{3/2} - {}^6D_{5/2}$	» »	
	0,5516777	$^6P^0_{3/2} - {}^6D_{3/2}$	» »	
	0,5537149	$^6P^0_{3/2} - {}^6D_{1/2}$	» »	
	1,28997	$^6P^0_{7/2} - {}^6D_{9/2}$	» »	
	1,32938	$^6P^0_{7/2} - {}^6D_{7/2}$	» »	
	1,33179	$^6P^0_{5/2} - {}^6D_{7/2}$	» »	
	1,36257	$^6P^0_{5/2} - {}^6D_{1/2}$	» »	
	1,38638	$^6P^0_{3/2} - {}^6D_{3/2}$	» »	
	1,39975	$z^6P^0_{3/2} - a^6D_{1/2}$	» »	
0 Гелий (рис. 33.17)	1,8685	$4f\,^3F - 3d\,^3D$	непр.	0,4 *мм рт. ст.* гелия, $D = 6$ *мм*
	1,9543	$4p\,^3P - 3d\,^3D$	»	Условия те же
	2,05813	$2\,^1P_1 - 2\,^1S_0$	кор. имп.	2,7 *мм рт. ст.* гелия, $D = 1{,}3$ *мм*
	2,0603	$7d\,^3D - 4p\,^3P$	непр.	8,0 *мм рт. ст.* гелия, примесь аргона или азота*, $D = 7$ *мм*
	95,8	$3p\,^1P_1 - 3d\,^1D_1$	»	0,1 *мм рт. ст.* гелия, $D = 60$ *мм*
	216,3	$4p\,^1P - 4d\,^1D$	»	Условия те же

* Незначительное количество аргона или азота опустошает метастабильный уровень He $2\,^3S$, с которого возможно возбуждение на нижний лазерный уровень $4p\,^3P$ электронным ударом.

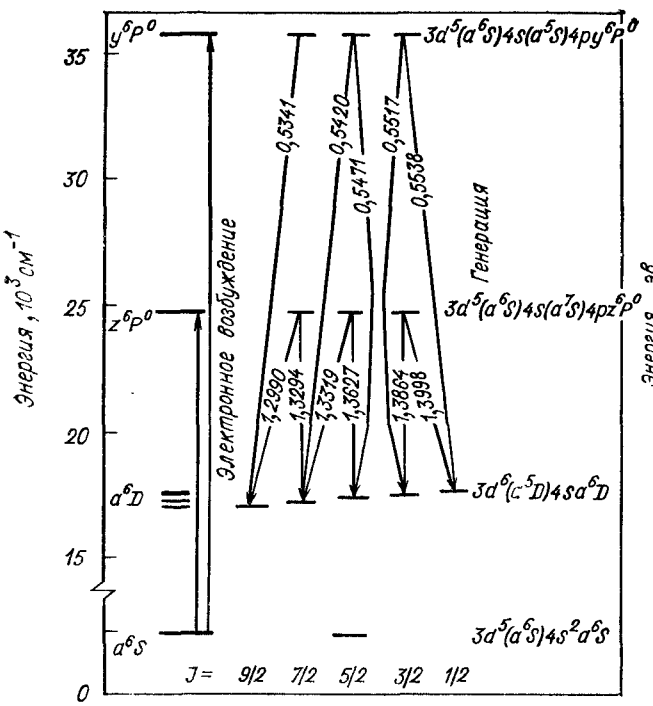


Рис. 33.16. Схема лазерных переходов и электронного возбуждения в парах марганца [1].

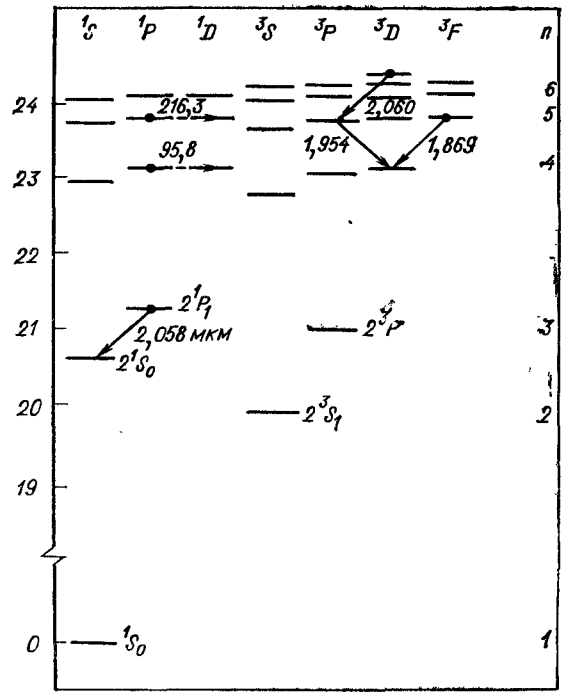


Рис. 33.17. Схема лазерных переходов в гелии [1].

Продолжение табл. 33.1

Группа, элемент	Длина волны, *мкм*	Идентификация: Рака	Идентификация: Пашена	Возбуждение	Примечания
0 Неон (рис. 33.18)	0,540056	$3p'[^1/_2]_0$—$3s[^3/_2]_1^0$	$2p_1$—$1s_4$	кор. имп.	3 *мм рт. ст.* неона, $D = 5$ *мм*. В длинных разрядных трубках
	0,58525	$3p'[^1/_2]_0$—$3s'[^1/_2]_1^0$	$2p_1$—$1s_2$	» »	0,001—0,2 *мм рт. ст.* смеси гелия и неона с примесью аргона*, $D = 3$ *мм*
	0,59293	$5s'[^1/_2]_1^0$—$3p[^5/_2]_2$	$3s_2$—$2p_8$	непр.	В смеси He—Ne (5:1), $PD =$ $= 3{,}6$ *мм рт. ст.·мм* 2*
	0,594483	$3p'[^3/_2]_2$—$3s[^3/_2]_2^0$	$2p_4$—$1s_5$	кор. имп.	0,3 *мм рт. ст.* неона, $D = 5$ *мм*
	0,60461	$5s'[^1/_2]_1^0$—$3p[^3/_2]_1$	$3s_2$—$2p_7$	непр.	В смеси He—Ne (5:1), $PD =$ $= 3{,}6$ *мм рт. ст.·мм* 2*
	0,61180	$5s'[^1/_2]_1^0$—$3p[^3/_2]_2$	$3s_2$—$2p_6$	»	Условия те же
	0,614309	$3p[^3/_2]_2$—$3s[^3/_2]_2^0$	$2p_6$—$1s_5$	кор. имп.	0,3 *мм рт. ст.* неона, $D = 5$ *мм*
	0,62937	$5s'[^1/_2]_1^0$—$3p'[^3/_2]_1$	$3s_2$—$2p_5$	непр.	В смеси He—Ne (5:1) $PD =$ $= 3{,}6$ *мм рт. ст.·мм* 2*
	0,63282	$5s'[^1/_2]_1^0$—$3p'[^3/_2]_2$	$3s_2$—$2p_4$	»	Самая сильная из линий перехода $3s_2$—$2p$. В смеси He — Ne (5:1) $PD =$ $= 3{,}6$ *мм рт. ст.·мм*
	0,63518	$5s'[^1/_2]_1^0$—$3p[^1/_2]_0$	$3s_2$—$2p_3$	»	Как для линии 0,6328 *мкм* 2*
	0,64011	$5s'[^1/_2]_1^0$—$3p'[^1/_2]_1$	$3s_2$—$2p_2$	»	Условия те же
	0,73048	$5s'[^1/_2]_1^0$—$3p[^1/_2]_0$	$3s_2$—$2p_1$	»	Условия те же

* Примесь аргона необходима для обеднения метастабильного уровня неона Ne—1s.
2* Для генерации на этих линиях необходимо подавление генерации на линиях 0,6328 и 3,39 *мкм*.

Группа, элемент	Длина волны, *мкм*	Идентификация: Рака	Идентификация: Пашена	Возбуждение	Примечания
0					
Неон	0,88653	$4s'\,[1/2]_1^0 - 3p[1/2]_1$	$2s_2-2p_{10}$	непр.	Наблюдается в очень длинных разрядных трубках
	0,89886	$4s'\,[1/2]_0^0 - 3p[1/2]_1$	$2s_3-2p_{10}$	»	Условия те же
	0,9486	$4s\,[3/2]_1^0 - 3p[1/2]_1$	$2s_4-2p_{10}$	имп.	В смеси неона с водородом*
	0,9665	$4s\,[3/2]_2^0 - 3p[1/2]_1$	$2s_5-2p_{10}$	»	Условия те же
	1,0295	$4s'\,[1/2]_1^0 - 3p\,[5/2]_2$	$2s_2-2p_8$	непр.	Наблюдается в очень длинных разрядных трубках
	1,0621	$4s'\,[1/2]_1^0 - 3p\,[3/2]_1$	$2s_2-2p_7$	»	2,8 *мм рт. ст.* смеси He—Ne, парциальное давление неона 0,15 *мм рт. ст.*, $D = 5 \div 10$ *мм*[2*]
	1,0798	$4s'\,[1/2]_0^0 - 3p\,[3/2]_1$	$2s_3-2p_7$	»	В смеси He—Ne (10:1), PD = =10 *мм рт. ст.·мм*
	1,0844	$4s'\,[1/2]_1^0 - 3p[3/2]_2$	$2s_2-2p_6$	»	Условия те же
	1,1143	$4s\,[3/2]_1^0 - 3p[5/2]_2$	$2s_4-2p_8$	»	Как для линии 1,0798 *мкм*. Наблюдается также в чистом неоне и смеси неона с водородом
	1,1177	$4s\,[3/2]_2^0 - 3p[5/2]_3$	$2s_5-2p_9$	»	Условия те же
	1,1390	$4s\,[3/2]_2^0 - 3p[5/2]_2$	$2s_5-2p_8$	»	Как для линии 1,0798 *мкм*
	1,1409	$4s'\,[1/2]_1^0 - 3p'[3/2]_1$	$2s_2-2p_5$	»	Как для линии 1,1143 *мкм*
	1,15228	$4s'\,[1/2]_1^0 - 3p'[3/2]_2$	$2s_2-2p_4$	»	Самая сильная из линий $2s-2p$-перехода. В смеси He—Ne (10:1) $PD = 11$ *мм рт. ст.·мм*
	1,15250	$4s\,[3/2]_1^0 - 3p[3/2]_1$	$2s_4-2p_7$	»	Тлеющий разряд в чистом неоне, оптимум PD меньше 0,5 *мм рт. ст.·мм*
	1,1602	$4s'\,[1/2]_1^0 - 3p[1/2]_0$	$2s_2-2p_3$	»	В смеси He—Ne
	1 1614	$4s\,[1/2]_0^0 - 3p'[3/2]_1$	$2s_3-2p_5$	»	Условия те же
	1,1767	$4s'\,[1/2]_1^0 - 3p'[1/2]_1$	$2s_2-2p_2$	»	Как для линии 1,1143 *мкм*
	1,1789	$4s\,[3/2]_1^0 - 3p[3/2]_2$	$2s_4-2p_6$	»	В очень длинных разрядных трубках в смеси неона и водорода
	1,1985	$4s'\,[1/2]_0^0 - 3p'[1/2]_1$	$2s_3-2p_2$	»	В смеси He—Ne
	1,2066	$4s\,[3/2]_0^0 - 3p[3/2]_2$	$2s_5-2p_6$	»	В смеси He—Ne
	1,2460	$4s\,[3/2]_1^0 - 3p'[3/2]_1$	$2s_4-2p_5$	»	В очень длинных разрядных трубках в смеси неона и водорода
	1,2586	$5f\,[9/2]_{4,5} - 3d[7/2]_4^0$	$5V-3d_1'$	имп.[2*]	0,2 *мм. рт. ст.* неона, 3—4 *мм рт. ст.* гелия, $D = 5,2$ *мм*
	1,2594	$4s\,[3/2]_1^0 - 3p'[3/2]_2$	$2s_4-2p_4$	»	В смеси гелия и водорода
	1,2689	$4s\,[3/2]_1^0 - 3p[1/2]_0$	$2s_4-2p_3$	непр.	Как для линии 1,2460 *мкм*
	1,2767	$4s\,[3/2]_2^0 - 3p'[3/2]_1$	$2s_5-2p_5$	»	Условия те же
	1,2887	$4s\,[3/2]_1^0 - 3p'[1/2]_1^0$	$2s_4-2p_2$	»	В очень длинных разрядных трубках в смеси He—Ne
	1,2912	$4s\,[3/2]_2^0 - 3p'[3/2]_2$	$2s_5-2p_4$	»	Как для линии 1,2460 *мкм*
	1,3912	$4s\,[3/2]_2^0 - 3p'[1/2]_1$	$2s_5-2p_2$	имп.	В смеси неона и водорода
	1,5231	$4s'\,[1/2]_1^0 - 3p'[1/2]_0$	$2s_2-2p_1$	непр.	Как для линии 1,0798 *мкм*
	1,6405	$6s\,[3/2]_2^0 - 4p[5/2]_3$	$4s_5-3p_9$	имп.[2*]	0,2 *мм рт. ст.* неона, 3—4 *мм рт. ст.* гелия, D = =5,2 *мм*
	1,7161	$4s\,[3/2]_1^0 - 3p'[1/2]_0$	$2s_4-2p_1$	непр.	Как для линии 1,2887 *мкм*
	1,8210	$4p'[1/2]_1 - 4s[3/2]_1^0$	$3p_1-2s_4$	»	Условия те же

* Для генерации на этой линии необходимо подавление генерации на других линиях перехода $2s-2p$.
[2*] Оптическая накачка гелиевой лампой.

Группа, элемент	Длина волны, *мкм*	Идентификация: Рака	Идентификация: Пашена	Возбуждение	Примечания
6 Неон	*1,8281*	$4f\,[^9/_2]_{4,5} - 3d\,[^7/_2]^0_4$	$4f - 3d'_4$	непр	В смеси He — Ne (10:1) $PD = 8$ *мм рт. ст.·мм*
	1,8287	$4f\,[^9/_2]_4 - 3d\,[^7/_2]^0_3$	$4V - 3d_4$	»	} Условия те же
	1,8309	$4f\,[^5/_2]_{2,3} - 3d\,[^3/_2]^0_2$	$4Y - 3d_3$	»	
	1,8408	$4f\,[^5/_2]_2 - 3d\,[^3/_2]^0_1$	$4Y - 3d_2$	»	В смеси He — Ne (100:1) $PD = 8$ *мм рт. ст.·мм*
	1,8596	$4f\,[^7/_2]_3 - 3d\,[^5/_2]^0_2$	$4Z - 3d'_1$	»	Как для линии 1,8281 *мкм*
	1,8602	$4f\,[^7/_2]_{3,4} - 3d\,[^5/_2]^0_3$	$4Z - 3d'_1$	»	Условия те же
	1,9574	$4p'\,[^3/_2]_2 - 4s'\,[^3/_2]^0_2$	$4p_4 - 2s_5$	»	В смеси He — Ne. Также в чистом неоне, $PD = 0,1 - 0,5$ *мм рт. ст·мм*
	1,9577	$4p'\,[^1/_2]_1 - 4s\,[^3/_2]^0_2$	$3p_2 - 2s_5$	»	В смеси He — Ne
	2,0350	$4p'\,[^3/_2]_2 - 4s\,[^3/_2]^0_1$	$3p_4 - 2s_4$	»	Как для линии 1,9574 *мкм*
	2 0356	$4p'\,[^1/_2]_1 - 4s\,[^3/_2]^0_1$	$3p_2 - 2s_4$	»	В смеси He — Ne
	2 1019	$4d'\,[^5/_2]^0_3 - 4p\,[^3/_2]_2$	$4s'''' - 3p_6$(?)	»	В очень длинных разрядных трубках
	2,1041	$4p'\,[^1/_2]^0_0 - 4s'\,[^1/_2]^0_1$	$3p_1 - 2s_2$	»	Как для линии 1,9577 *мкм*
	2,1708	$4p\,[^1/_2]_0 - 4s\,[^3/_2]^0_1$	$3p_3 - 2s_4$	»	0,05 *мм. рт. ст.* чистого неона
	2,326	$4p\,[^5/_2]_2 - 4s\,[^3/_2]^0_2$	$3p_8 - 2s_5$	»	В длинных разрядных трубках В чистом неоне или смеси He—Ne
	2,3951	$4p'\,[^3/_2]_2 - 4s\,[^1/_2]^0_1$	$3p_4 - 2s_2$	»	В смеси He — Ne или в чистом неоне
	2,3956	$4p'\,[^1/_2]_1 - 4s\,[^1/_2]^0_1$	$3p_2 - 2s_2$	»	0,6 *мм рт. ст.* смеси He — Ne (5:1), $D = 8$ *мм*
	2,42	$5s'\,[^1/_2]^0_1 - 4p\,[^1/_2]_1$	$3s_2 - 3p_{10}$	»	0,86 *мм рт. ст.* смеси He — Ne (13:1), $D = 22$ *мм* В длинной разрядной трубке
	2,4226	$4d\,[^3/_2]^0_1 - 4p\,[^5/_2]_2$	$4d_2 - 3p_8$	»	0,15 *мм рт. ст.* неона, $D =$ = 15 *мм*
	2,4250	$4p'\,[^3/_2]_1 - 4s'\,[^1/_2]^0_1$	$3p_5 - 2s_2$	»	В смеси He — Ne
	2,5400	$4d\,[^1/_2]^0_1 - 4p\,[^3/_2]_2$	$4d_5 - 3p_7$	»	0,01—0,2 *мм рт. ст.* неона, 0,0—1,0 *мм рт. ст.* гелия, $D = 10$ *мм*
	2,5524	$4p\,[^1/_2]_1 - 4s\,[^3/_2]^0_2$	$3p_{10} - 2s_5$	»	В длинной разрядной трубке, в чистом неоне или в смеси He — Ne, $D = 10$ *мм*
	2,7582	$4d\,[^3/_2]^0_1 - 4p\,[^1/_2]_0$	$4d_2 - 3p_3$	»	Как для линии 2,5400 *мкм*
	2,7826	$5s'\,[^1/_2]^0_0 - 4p\,[^5/_2]_1$	$3s_3 - 3p_7$	»	} Условия те же
	2,864	$4d'\,[^3/_2]^0_1 - 4p'\,[^3/_2]_2$	$4s'_1 - 3p_4$	»	
	2,9456	$5s\,[^3/_2]^0_1 - 4p\,[^1/_2]_1$	$3s_4 - 3p_{10}$	»	
	2,9676	$4d\,[^3/_2]^0_1 - 4p'\,[^3/_2]_1$	$4d_5 - 3p_5$	»	
	2,9813	$4d\,[^3/_2]^0_2 - 4p'\,[^3/_2]_1$	$4d_3 - 3p_5$	»	
	3,0268	$4d\,[^3/_2]^0_2 - 4p'\,[^1/_2]_1$	$4d_3 - 3p_2$	»	
	3,0726	$5s'\,[^1/_2]^0_1 - 4p\,[^1/_2]_0$	$3s_2 - 3p_3$	»	0,65 *мм рт. ст.* смеси He — Ne (12:1), $D = 10$ *мм* Необходимо подавление генерации на линии 3,39 *мкм*

Группа, элемент	Длина волны, *мкм*	Идентификация: Рака	Идентификация: Пашена	Возбужденне	Примечания
0					
Неон	*3,3182*	$5s[^3/_2]_1^0 - 4p[^5/_2]_2$	$3s_4 - 3p_8$	непр.	Как для линии 2,5400 *мкм*
	3,3342	$5s'[^1/_2]_1^0 - 4p'[^3/_2]_1$	$3s_2 - 3p_5$	»	Условия те же
	3,3362	$5s[^3/_2]_2^0 - 4p[^5/_2]_3$	$3s_5 - 3p_9$	»	
	3,3813	$7s'[^1/_2]_0^0 - 5p'[^3/_2]_1$	$5s_3 - 4p_5$	»	
	3,3840	$7s'[^1/_2]_0^0 - 5p'[^1/_2]_1$	$5s_3 - 4p_2$	»	
	3,3903	$5s'[^1/_2]_1^0 - 4p'[^1/_2]_1$	$3s_2 - 3p_2$	»	В смеси Не—Ne (5:1) $PD = 3{,}6$ *мм рт. ст.·мм*
	3,3913	$5s'[^1/_2]_1^0 - 4p'[^3/_2]_2$	$3s_2 - 3p_4$	»	В смеси Не—Ne (5:1) $PD = 3{,}6$ *мм рт. ст.·мм* Очень большой коэффициент усиления
	3,4481	$5s[^3/_2]_1^0 - 4p[^3/_2]_1$	$3s_4 - 3p_7$	»	Как для линии 2,5400 *мкм*
	3,5845	$5s[^3/_2]_2^0 - 4p[^3/_2]_2$	$3s_5 - 3p_6$	»	Условия те же
	3,7746	$4p'[^1/_2]_0 - 3d[^3/_2]_1^0$	$3p_1 - 3d_2$	»	
	3,9817	$5s[^3/_2]_1^0 - 4p[^1/_2]_0$	$3s_4 - 3p_3$	»	
	4,2183	$5s'[^1/_2]_1^0 - 4p'[^1/_2]_0$	$3s_2 - 3p_1$	»	Как для линии 3,0720 *мкм*
	5,4048	$4p'[^1/_2]_0 - 3d'[^3/_2]_1^0$	$3p_1 - 3s_1$	»	0,01—0,2 *мм рт. ст.* неона, 0,00—1,0 *мм рт. ст.* гелия, $D = 10$ *мм*
	5,6667	$4p[^1/_2]_0 - 3d[^3/_2]_1^0$	$3p_3 - 3d_2$	»	
	7,3228	$6s[^3/_2]_2^0 - 5p[^5/_2]_3$	$4s_5 - 4p_9$	»	Условия те же
	7,4211	$6s'[^1/_2]_0^0 - 5p'[^1/_2]_1$ или $6s'[^1/_2]_0^0 - 5p'[^3/_2]_1$	$4s_3 - 4p_2$(?) или $4s_3 - 4p_5$	»	
	7,4237	$5p'[^1/_2]_1 - 4d[^3/_2]_2$	$4p_2 - 4d_3$	»	
	7,4799	$4p[^3/_2]_2 - 3d[^5/_2]_2^0$	$3p_6 - 3d_1$	»	
	7,4994	$6s[^3/_2]_2^0 - 5p[^5/_2]_2$	$4s_5 - 4p_8$	»	
	7,5313	$6s[^3/_2]_1^0 - 5p[^3/_2]_1$	$4s_4 - 4p_7$	»	0,15 *мм рт. ст.* неона, 0,3 *мм рт. ст.* гелия, $D = 15$ *мм*
	7,6163	$4p[^3/_2]_1 - 3d[^5/_2]_2^0$	$3p_7 - 3d_1$	»	0,01—0,2 *мм рт. ст.* неона, 0,0—1,0 *мм рт. ст.* гелия, $D = 10$ *мм*
	7,6461	$5p'[^3/_2]_1 - 4d[^5/_2]_2^0$	$4p_5 - 4d_1$	»	
	7,6510	$4p[^5/_2]_2 - 3d[^7/_2]_3^0$	$3p_8 - 3d_4$	»	Условия те же
	7,6925	$4p'[^3/_2]_2 - 3d'[^5/_2]_2^0$	$3p_4 - 3s_1$	»	
	7,7015	$4p'[^3/_2]_2 - 3d'[^5/_2]_3^0$	$3p_4 - 3s_1'''$	»	
	7,7407	$4p[^5/_2]_2 - 3d[^3/_2]_2^0$	$3p_8 - 3d_3$	»	
	7,7655	$4p'[^1/_2]_1 - 3d'[^3/_2]_2^0$	$3p_2 - 3s_4''$	»	
	7,7815	$6s[^3/_2]_2^0 - 5p[^3/_2]_1$	$4s_5 - 4p_7$	»	
	7,8368	$6s[^3/_2]_2^0 - 5p[^3/_2]_2$	$4s_5 - 4p_6$	»	
	8,0088	$4p'[^3/_2]_1 - 3d'[^5/_2]_2^0$	$3p_5 - 3s_1'''$	»	
	8,0621	$4p[^5/_2]_3 - 3d[^7/_2]_4^0$	$3p_9 - 3d_4'$	»	
	8,3370	$4p'[^5/_2]_2 - 3d[^5/_2]_2^0$	$3p^5 - 3d_1''$	»	
	8,8413	$4p[^5/_2]_3 - 3d[^5/_2]_2^0$	$3p_9 - 3d_1''$	»	
	9,0533	$6s[^3/_2]_1^0 - 5p[^1/_2]_0$	$4s_4 - 4p_3$	»	
	или *9,0896*			»	

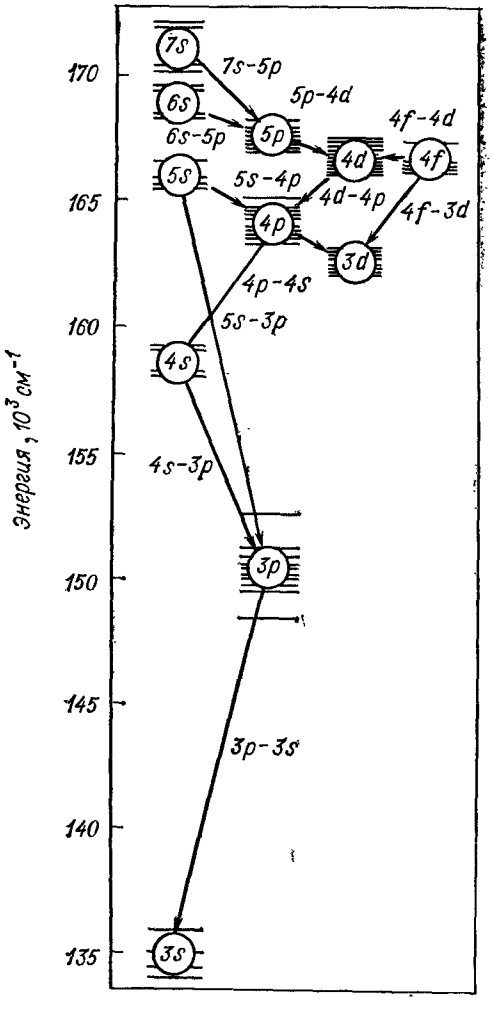


Рис. 33.18. Схема основных групп лазерных переходов в неоне [1].

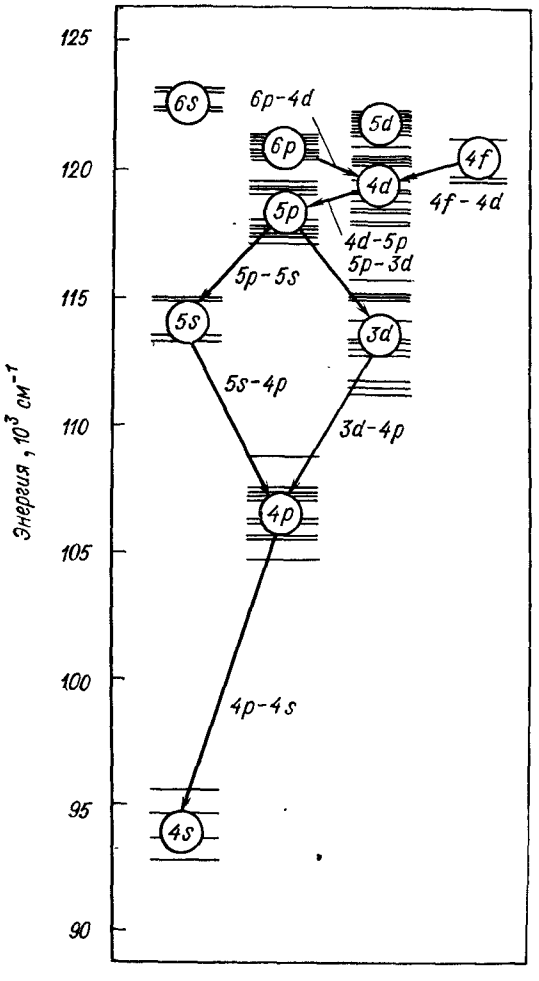


Рис. 33.19. Схема основных групп лазерных переходов в аргоне [1].

Продолжение табл. 33.1

Группа, элемент	Длина волны, *мкм*	Идентификация: Рака	Идентификация: Пашена	Возбуждение	Примечания
0 Неон	*10,0637*	$4p\,[^1/_2]_1 - 3d[^1/_2]_1^0$	$3p_{10}$—$3d_5$	непр.	0,01—0,2 *мм рт. ст.* неона, 0,1—1,0 *мм рт. ст.* гелия, $D = 10$ *мм*
	10,981	$4p[^1/_2]_1 - 3d\,[^3/_2]_2^0$	$3p_{10}$—$3d_3$	»	
	11,861	$5p[^1/_2]_1 - 5s'[^1/_2]_0^0$	$4p_{10}$—$3s_5$	»	
	11,902	$5p[^1/_2]_0 - 4d[^3/_2]_1^0$	$4p_3$—$4d_2$	»	
	12,835	$5p[^1/_2]_0 - 4d'[^3/_2]_1^0$	$4p_1$—$4s_1$	»	
	13,759	$7s'[^1/_2]_1^0 - 6p'[^3/_2]_2$ или $4d'\,[^3/_2]_3^0 - 4f[^5/_2]_3$	$5s_{2'}$—$5p_4$ или $4s_1''$—$4Y$	»	
	14,930	—	—	»	
	16,638	$5p[^3/_2]_2 - 4d[^5/_2]_2^0$	$4p_6$—$4d_1''$	»	

Группа, элемент	Длина волны, *мкм*	Идентификация: Рака	Идентификация: Пашена	Возбужденне	Примечания
0 Неон	*16,668*	$5p[^3/_2]_2 - 4d[^5/_2]^0_3$	$4p_6 - 4d'_1$	непр.	0,01—0,2 *мм рт. ст.* неона, 0,0—1,0 *мм рт. ст.* гелия, $D = 10$ *мм*
	16,893	$5p[^3/_2]_1 - 4d[^5/_2]^0_2$	$4p_7 - 4d''_1$	»	Условия те же
	16,947	$5p[^5/_2]_2 - 4d[^7/_2]^0_3$	$4p_8 - 4d_4$	»	
	17,158	$5p'[^3/_2]_2 - 4d'[^5/_2]^0_3$	$4p_4 - 4s''''_1$	»	
	17,189	$5p'[^3/_2]_2 - 4d'[^3/_2]^0_2$	$4p_4 - 4s''_1$	»	
	17,804	$5p'[^1/_2]_1 - 4d'[^3/_2]^0_2$	$4p_2 - 4s''_1$	»	
	17,841	$5p'[^3/_2]_1 - 4d'[^5/_2]^0_2$	$4p_6 - 4s''''_1$	»	
	17,888	$5p[^5/_2]_3 - 4d[^7/_2]^0_4$	$4p_9 - 4d'_4$	»	
	18,396	$5p[^5/_2]_2 - 4d[^5/_2]^0_2$	$4p_8 - 4d''_1$	»	
	20,480	$6p[^1/_2]_0 - 5d[^1/_2]^0_1$	$5p_3 - 5d_5$	»	
	21,752	$6p[^1/_2]_0 - 5d[^3/_2]^0_1$	$5p_3 - 5d_2$	»	
	22,836	$5p[^1/_2]_1 - 4d[^3/_2]^0_2$	$4p_{10} - 4d_3$	»	
	25,423	$6p'[^1/_2]_0 - 5d'[^3/_2]^0_1$	$5p_1 - 5s'_1$	»	
	28,053	$6p[^3/_2]_1 - 5d[^1/_2]^0_0$	$5p_7 - 5d_6$	»	
	31,553	$6p[^3/_2]_2 - 5d[^5/_2]^0_3$	$5p_5 - 5d'_1$	»	
	31,928	$6p[^3/_2]_1 - 5d[^5/_2]^0_2$	$5p_7 - 5d''_1$	»	В чистом неоне P=0,05 *мм рт. ст.*, D=21 *мм*
	32,016	$6p[^5/_2]_2 - 5d[^7/_2]^0_3$	$5p_8 - 5d_4$	»	0,01—0,2 *мм рт. ст.* неона, 0—1,0 *мм рт. ст* гелия, $D = 10$ *мм*
	32,516	$6p'[^3/_2]_2 - 5d'[^5/_2]^0_3$	$5p_4 - 5s'''_1$	»	Условия те же
	33,824	$6p'[^3/_2]_1 - 5d'[^5/_2]^0_2$	$5p_5 - 5s''''_1$	»	
	или	или	или	»	
	33,837	$6p[^5/_2]_3 - 5d[^7/_2]^0_4$	$5p_9 - 5d'_4$	»	
	34,552	$6p'[^1/_2]_1 - 5d'[^3/_2]^0_2$	$5p_2 - 5s''_1$	»	
	34,679	$6p[^5/_2]_2 - 5d[^5/_2]^0_2$	$5p_8 - 5d''_1$	»	В чистом неоне P=0,05 *мм рт. ст.*, $D = 21$ *мм*
	35,602	$7p[^1/_2]_0 - 6d[^3/_2]^0_1$	$6p_3 - 6d_2$	»	Условия те же
	37,231	$7p'[^1/_2]_0 - 6d'[^3/_2]^0_1$	$6p_1 - 6s'_1$	»	
	41,741	$6p[^1/_2]_1 - 5d[^3/_2]^0_2$	$5p_{10} - 5d_3$	»	
	50,705	$7p[^3/_2]_2 - 6d[^3/_2]^0_2$	$6p_6 - 6d_3$	»	
	52,425	$7p'[^1/_2]_1 - 6d'[^3/_2]^0_2$	$6p_2 - 6s''_1$	»	В чистом неоне P=0,02 *мм рт. ст.*, D=47 *мм*

Группа, элемент	Длина волны, *мкм*	Идентификация: Рака	Идентификация: Пашена	Возбуждение	Примечания
0					
Неон	*53,486*	$7p\,[^3/_2]_2 - 6d\,[^5/_2]^0_3$	$6p_6 - 6d'_1$	непр.	Как для линии 34,679 *мкм*
	54,019	$7p\,[^3/_2]_1 - 6d\,[^5/_2]^0_2$	$6p_7 - 6d''_1$	»	0,05 *мм рт. ст.* неона, 0,1 *мм рт. ст.* гелия, $D = 21$ *мм*
	54,117	$7p\,[^5/_2]_2 - 6d\,[^7/_2]^0_3$	$6p_8 - 6d_4$	»	Условия те же
	55,537	$7p'\,[^3/_2]_1 - 6d'\,[^5/_2]^0_2$	$6p_5 - 6s''''_1$	»	Как для линии 52,425 *мкм*
	57,355	$7p\,[^5/_2]_3 - 6d\,[^7/_2]^0_4$	$6p_9 - 6d'_4$	»	0,03 *мм рт. ст.* неона, 0,07 *мм рт. ст.* гелия, $D = 21$ *мм*
	68,329	$7p\,[^1/_2]_1 - 6d\,[^3/_2]^0_2$	$6p_{10} - 6d_3$	»	В чистом неоне P=0,035*мм рт.ст.*, $D = 21$ *мм*
	72,108	$8p'\,[^1/_2]_0 - 7d'\,[^3/_2]^0_1$	$7p_1 - 7s'_1$	»	Как для линии 52,425 *мкм*
	85,010	$8p\,[^3/_2]_2 - 7d\,[^5/_2]^0_3$	$7p_6 - 7d'_1$	»	В чистом неоне P=0,035*мм рт.ст.*, $D = 21$ *мм*
	86,962	$8p'\,[^3/_2]_2 - 7d\,[^5/_2]^0_2$	$7p_4 - 7s''''_1$	»	Условия те же
	88,471	$8p\,[^3/_2]_1 - 7d\,[^5/_2]^0_2$	$7p_9 - 7d''_1$	»	
	89,859	$8p\,[^5/_2]_3 - 7d\,[^7/_2]^0_3$	$7p_9 - 7d_4$	»	
	93,02	—	—	»	В чистом неоне P=0,01*мм рт.ст.*, $D = 47$ *мм*
	106,07	$10p\,[^1/_2]_0 - 9d\,[^3/_2]^0_1$	$9p_3 - 9d_2$	»	
	124,52	$9p\,[^3/_2]_1 - 8d\,[^5/_2]^0_2$	—	»	
	или	или			
	124,76	$9p\,[^3/_2]_2 - 8d\,[^5/_2]^0_3$	—		Условия те же
	126,1	—	—	»	
	132,8	—	—	»	
Аргон (рис. 33.19)	0,706721	$4p'\,[^3/_2]_2 - 4s\,[^3/_2]^0_2$	$2p_3 - 1s_5$	кор. имп.	
	0,7503	$4p'\,[^1/_2]_0 - 4s'\,[^1/_2]^0_1$	$2p_1 - 1s_2$	»	В смеси аргона с неоном (гелием)
	0,8780	—	—	имп.	(0,001—0,02) *мм рт. ст.* аргона, $D = 3$ *мм*
	1,0935	—	—	»	Условия те же
	1,213962	$3d'\,[^3/_2]^0_1 - 4p'\,[^3/_2]_1$	$3s'_1 - 2p_4$	»	0,03 *мм рт. ст.* аргона, $D = 3$ *мм*
	1,240275	$3d\,[^3/_2]^0_1 - 4p\,[^3/_2]_1$	$3d_2 - 2p_7$	»	Условия те же
	1,270221	$3d'\,[^3/_2]^0_1 - 4p'\,[^1/_2]_1$	$3s'_1 - 2p_2$	»	
	1,3472	$7d\,[^3/_2]^0_2 - 5p\,[^3/_2]_2$	$7d_3 - 3p_6$	непр.	0,25 *мм рт. ст.* аргона, $D = 2{,}2$ *мм*
	1,4093640	$3d\,[^3/_2]^0_1 - 4p\,[^1/_2]_0$	$3d_2 - 2p_5$	имп.	0,04 *мм рт. ст.* аргона, $D = 7$ *мм*
	1,618	$5s\,[^3/_2]^0_2 - 4p'\,[^3/_2]_2$	$2s_5 - 2p_3$	непр.	0,05 *мм рт. ст.* аргона, $D = 7$ *мм*
	1,694058	$3d\,[^3/_2]^0_2 - 4p\,[^3/_2]_2$	$3d_3 - 2p_6$	»	2,5 *мм рт. ст.* аргона, $D = 7$ *мм*
	1,791437	$3d\,[^1/_2]^0_1 - 4p\,[^3/_2]_2$	$3d_5 - 2p_6$	»	0,035 *мм рт. ст.* аргона, $D = 7$ *мм*
		или	или		
		$3d\,[^1/_2]^0_0 - 4p\,[^3/_2]_1$	$3d_6 - 2p_7$	»	

Группа, элемент	Длина волны, *мкм*	Идентификация: Рака	Идентификация: Пашена	Возбуждение	Примечания
0 Аргон					
	1,8167	$3d\,[^7/_2]^0_4 - 4p\,[^5/_2]_3$	$3d'_4 - 2p_9$	непр.	
	2,0616	$3d\,[^3/_2]^0_2 - 4p'\,[^3/_2]_2$	$3d_3 - 2p_3$	»	0,035 *мм рт. ст.* аргона, $D = 7$ *мм*
	2,0986	$3d\,[^1/_2]^0_1 - 4p\,[^1/_2]_0$	$3d_5 - 2p_5$	»	0,012 *мм рт. ст.* аргона
	2,133	$3d\,[^1/_2]^0_1 - 4p'\,[^3/_2]'_1$	$3d_5 - 2p_4$	»	0,01—0,05 *мм рт. ст.* аргона, $D = 10$ *мм*
	2,1534	$3d\,[^3/_2]^0_2 - 4p'\,[^1/_2]_1$	$3d_3 - 2p_2$	»	0,018 *мм рт. ст.* аргона
	2,2044	$3d\,[^1/_2]^0_1 - 4p'\,[^3/_2]_1$	$3d_6 - 2p_4$	»	0,01—0,05 *мм рт. ст.* аргона, $D = 10$ *мм*
	или	или	или		
	2,2083	$3d\,[^1/_2]^0_1 - 4p'\,[^3/_2]_2$	$3d_5 - 2p_3$		
	2,313320	$3d\,[^1/_2]^0_1 - 4p'\,[^1/_2]_1$	$3d_5 - 2p_2$	»	Условия те же
	2,3973	$3d\,[^1/_2]^0_0 - 4p'\,[^1/_2]_1$	$3d_6 - 2p_2$	»	
	2,5014	$6d'\,[^3/_2]^0_2 - 6p\,[^1/_2]_1$	$6s''_1 - 4p_{10}$	»	0,01—0,05 *мм рт. ст.* аргона, $D = 10$ *мм*
	2,5494	$5d\,[^5/_2]_3 - 3d\,[^7/_2]^0_3$	$3p_9 - 3d_4$	»	
	2,5512	$5p\,[^1/_2]_0 - 5s\,[^3/_2]^0_1$	$3p_5 - 2s_4$	»	
	2,5634	$6d'\,[^3/_2]^0_2 - 6p\,[^5/_2]_3$	$6s_1 - 4p_9$	»	
	2,5668	$5p'\,[^1/_2]_0 - 5s'\,[^1/_2]^0_1$	$3p_1 - 2s_2$	»	
	2,6843	$5p\,[^3/_2]_1 - 3d\,[^5/_2]^0_2$	$3p_7 - 3d_1$	»	
	2,7364	$5p'\,[^1/_2]_1 - 3d'\,[^3/_2]^0_2$	$3p_2 - 3s_1$	»	
	2,8202	$5p'\,[^3/_2]_1 - 5s'\,[^1/_2]^0_0$	$3p_4 - 2s_3$	»	
		или	или		
		$5p\,[^3/_2]_2 - 5s\,[^3/_2]^0_1$	$3p_6 - 2s_4$		
	2,8783	$5p\,[^5/_2]_3 - 5s\,[^3/_2]^0_2$	$3p_9 - 2s_5$	»	
	2,8843	$5p\,[^3/_2]_2 - 3d\,[^5/_2]^0_3$	$3p_6 - 3d_1$	»	Условия те же
	2,9280	$5p\,[^1/_2]_0 - 3d\,[^3/_2]^0_1$	$3p_5 - 3d_2$	»	
	2,9796	$5p\,[^5/_2]_2 - 5s\,[^3/_2]^0_1$	$3p_8 - 2s_4$	»	
	3,0462	$5p\,[^5/_2]_2 - 3d\,[^5/_2]^0_3$	$3p_8 - 3d_1$	»	
	3,0996	$5p\,[^5/_2]_3 - 3d\,[^5/_2]^0_3$	$3p_9 - 3d_1$	»	
	3,1333	$5p\,[^1/_2]_1 - 5s\,[^3/_2]^0_2$	$3p_{10} - 2s_5$(?)	»	
	3,1346	$6p'\,[^3/_2]_1 - 4d\,[^5/_2]^0_2$	$4p_3 - 4d_1$	»	
	4,7330	$5p\,[^1/_2]_1 - 3d'\,[^3/_2]^0_1$	$3p_{10} - 3s_1$	»	
	4,9160	$6p'\,[^3/_2]_2 - 4d'\,[^3/_2]^0_2$	$4p_3 - 4s_1$	»	
	4,9213	$5d\,[^5/_2]^0_2 - 4f\,[^7/_2]_3$	$5d''_1 - 4U$	»	
	5,1216	$6p\,[^5/_2]_3 - 4d\,[^7/_2]_3$	$4p_9 - 4d_4$	»	
	5,1218	$5d\,[^7/_2]^0_3 - 4f\,[^9/_2]_4$	$5d_4 - 4V$	»	0,05 *мм рт. ст.* аргона, $D = 15$ *мм*
	5,4680	$5d\,[^7/_2]^0_4 - 4f\,[^9/_2]_5$	$5d'_4 - 4V$	»	
		или	или		
	5,4694	$5d\,[^7/_2]^0_4 - 4f\,[^9/_2]_4$	$5d'_4 - 4V$		Условия те же
	5,8477	$6p\,[^1/_2]_0 - 6s\,[^3/_2]^0_1$	$4p_5 - 3s_4$	»	
	5,8666	$6p\,[^3/_2]_2 - 4d\,[^5/_2]^0_3$	$4p_6 - 4d_1$	»	0,01—0,05 *мм рт. ст.* аргона, $D = 10$ *мм*

Группа, элемент	Длина волны, *мкм*	Идентификация: Рака	Идентификация: Пашена	Возбуждение	Примечания
0					
Аргон					
	6,0531	$4d\,[^1/_2]^0_1 - 5p\,[^5/_2]_2$	$4d_5 - 3p_8$	непр.	Условия те же
	6,9429	$4d\,[^3/_2]^0_1 - 5p'\,[^3/_2]_1$	$4d_2 - 3p_4$	»	Условия те же
	6,9448	$6p'\,[^1/_2]_1 - 6s'\,[^1/_2]^0_1$	$4p_2 - 3s_2$	»	Условия те же
	7,2166	$6p\,[^1/_2]_1 - 6s\,[^3/_2]^0_2$	$4p_{10} - 3s_5$	»	0,05 *мм рт. ст.* аргона
	7,8003 или *7,8023*	$4f\,[^3/_2]_2 - 4d\,[^3/_2]^0_2$ или $4f\,[^3/_2]_1 - 4d\,[^3/_2]^0_2$	$4X_2 - 4d_3$ или $4X_1 - 4d_3$	»	Условия те же
	7,8063	$7s'\,[^1/_2]^0_1 - 4p'\,[^1/_2]_1$	$4s_2 - 2p_2$	»	0,01—0,05 *мм рт. ст.* аргона, $D = 10$ *мм*
	12,141 или *12,146*	$4d'\,[^3/_2]^0_1 - 4f\,[^3/_2]_{1,2}$	$4s'_1 - 4X$	»	Условия те же
	15,037 или *15,042*	$5d'\,[^3/_2]^0_2 - 5f\,[^5/_2]_3$	$5s''_1 - 5Y$	»	0,05 *мм рт. ст.* аргона, $D = 10$ *мм*
	26,944	$4d'\,[^3/_2]^0_2 - 4f\,[^5/_2]_3$	$4s''_1 - 4Y$	»	Условия те же
Криптон (рис. 33.20)	0,3050	—	—	имп.	Криптон при очень малом давлении
	0,8104365	$5p\,[^5/_2]_2 - 5s\,[^3/_2]^0_2$	$2p_8 - 1s_5$	кор. имп.	0,1 *мм рт. ст.* криптона, $D = 3$ *мм*
	0,8589	—	—	имп.	0,001—0,02 *мм рт. ст.* криптона, $D = 3{,}0$ *мм*
	1,1457481	$6s\,[^3/_2]^0_1 - 5p\,[^1/_2]_1$	$2s_4 - 2p_{10}$	»	0,04 *мм рт. ст.* криптона, $D = 7$ *мм*
	1,3177412	$6s\,[^3/_2]^0_1 - 5p\,[^5/_2]_2$	$2s_4 - 2p_8$	»	0,06 *мм рт. ст.* криптона, $D = 7$ *мм*
	1,3622416	$4d\,[^3/_2]^0_1 - 5p\,[^5/_2]_2$	$3d_2 - 2p_8$	»	0,03 *мм рт. ст.* криптона, $D = 7$ *мм*
	1,4426793	$6s\,[^3/_2]^0_1 - 5p\,[^3/_2]_1$	$2s_4 - 2p_7$	»	0,08 *мм рт. ст.* криптона, $D = 7$ *мм*
	1,4765471	$6s\,[^3/_2]^0 - 5p\,[^3/_2]_2$	$2s_4 - 2p_8$	»	0,2 *мм рт. ст.* криптона, $D = 7$ *мм*
	1,6853498	$4d\,[^7/_2]^0_3 - 5p\,[^5/_2]_3$	$3d_4 - 2p_9$	»	0,07 *мм рт. ст.* криптоиа, $D = 7$ *мм*
	1,689677	$4d\,[^1/_2]^0_1 - 5p[^1/_2]_1$	$3d_5 - 2p_{10}$	»	0,08 *мм рт. ст.* криптоиа, $D = 7$ *мм*
	1,694	$4d\,[^5/_2]^0_2 - 5p\,[^3/_2]_1$	$3d''_1 - 2p_7$	непр.	0,05 *мм рт. ст.* криптона, $D = 7$ *мм*
	1,784	$4d\,[^1/_2]^0_0 - 5p\,[^1/_2]_1$	$3d_6 - 2p_{10}$	»	0,07 *мм рт. ст.* криптоиа, $D = 7$ *мм*
	1,819	$4d'\,[^5/_2]^0_2 - 5p'\,[^3/_2]_2$	$3s''''_1 - 2p_2$	»	Условия те же
	1,921	$8s\,[^3/_2]^0_1 - 6p\,[^5/_2]_2$	$4s_5 - 3p_8$	»	0,035 *мм рт. ст.* криптона, $D = 7$ *мм*

Группа, элемент	Длина волны, *мкм*	Идентификация: Рака	Идентификация: Пашена	Возбуждение	Примечания
0 Криптон					
	2,1171	$4d\,[^3/_2]_2^0 - 5p\,[^3/_2]_1$	$3d_3 - 2p_7$	непр.	
	2,1902532	$4d\,[^3/_2]_2^0 - 5p\,[^3/_2]_2$	$3d_3 - 2p_6$	»	Условия те же
	2,42587	$4d\,[^1/_2]_1^0 - 5p\,[^3/_2]_1$	$3d_5 - 2p_7$	»	
	2,523385	$4d\,[^1/_2]_1^0 - 5p\,[^3/_2]_2$	$3d_5 - 2p_6$	»	1,0 *мм рт. ст.* криптона, $D = 7$ *мм*
	2,6267	$4d\,[^1/_2]_0^0 - 5p\,[^3/_2]_1$	$3d_6 - 2p_7$	»	0,02 *мм рт. ст.* криптона, $D = 10$ *мм*
	2,6288	$7p\,[^3/_2]_2 - 4d'\,[^5/_2]_2^0$	$4p_6 - 3s_1''''$ (?)	»	0,03 *мм рт. ст.* криптона, $D = 5$ *мм*
	2,8618	$6p\,[^5/_2]_2 - 6s\,[^3/_2]_2^0$	$3p_8 - 2s_5$	»	0,02 *мм рт. ст.* криптона, $D = 10$ *мм*
	или	или	или		
	2,8655	$6p\,[^5/_2]_3 - 6s\,[^3/_2]_2^0$	$3p_9 - 2s_5$		
	2,9845	$6p'\,[^1/_2]_1 - 5d\,[^5/_2]_2^0$	$3p_3 - 4d_1''$	»	Условия те же
	2,9878	$6p'\,[^3/_2]_1 - 6s'\,[^1/_2]_0^0$	$3p_4 - 2s_3$	»	0,03 *мм рт. ст.* криптоиа, $D = 15$ *мм*
	3,0536	$6p'\,[^3/_2]_1 - 5d\,[^5/_2]_2^0$	$3p_4 - 4d_1''$	»	0,02 *мм рт. ст.* криптона, $D = 10$ *мм*
	3,0672	$6p\,[^1/_2]_1 - 6s\,[^3/_2]_2^0$	$3p_{10} - 2s_5$	»	0,03 *мм рт. ст.* криптона, $D = 15$ *мм*
	3,1515	$6p'\,[^1/_2]_0 - 5d\,[^3/_2]_1^0$	$3p_1 - 4d_2$	»	0,02 *мм рт. ст.* криптона, $D = 10$ *мм*
	3,3409	$6p\,[^1/_2]_1 - 6s\,[^3/_2]_1^0$	$3p_{10} - 2s_4$	»	0,03 *мм рт. ст.* криптона, $D = 15$ *мм*
	3,3419	$4d\,[^1/_2]_1^0 - 5p\,[^1/_2]_0$	$3d_5 - 2p_5$	»	0,02 *мм рт. ст.* криптона, $D = 10$ *мм*
	3,4680	$7s\,[^3/_2]_1^0 - 6p\,[^1/_2]_1$	$3s_4 - 3p_{10}$	»	Условия те же
	3,4883	$7s\,[^3/_2]_2^0 - 6p'\,[^1/_2]_1$	$3s_5 - 3p_3$	»	
	3,4895	$5d\,[^3/_2]_1^0 - 6p'\,[^1/_2]_1$	$4d_2 - 3p_3$	»	0,03 *мм рт. ст.* криптона, $D = 15$ *мм*
	4,3748	$5d\,[^3/_2]_1^0 - 6p\,[^3/_2]_2$	$4d_2 - 3p_6$	»	Условия те же
	4,3767	$7s\,[^3/_2]_2^0 - 6p\,[^3/_2]_2$	$3s_5 - 3p_6$	»	0,02 *мм рт. ст.* криптона, $D = 10$ *мм*
	4,8773	$4d\,[^3/_2]_1^0 - 5p'\,[^3/_2]_1$	$3d_2 - 2p_4$	»	Условия те же
	4,8832	$5d\,[^5/_2]_2^0 - 6p\,[^5/_2]_3$	$4d_1'' - 3p_9$	»	
	5,3000	$5d\,[^3/_2]_1^0 - 6p\,[^1/_2]_0$	$4d_2 - 3p_5$	»	0,02 *мм рт. ст.* криптона, $D = 10$ *мм*
	или	или	или		
	5,3019	$5d\,[^3/_2]_2^0 - 6p\,[^5/_2]_2$	$4d_3 - 3p_8$		
	5,5700	$5d\,[^7/_2]_3^0 - 6p\,[^5/_2]_2$	$4d_4 - 3p_6$	»	Условия те же
	5,5863	$6d\,[^7/_2]_4^0 - 4f\,[^9/_2]_5$	$5d_4' - 4U$	»	0,03 *мм рт. ст.* криптона, $D = 15$ *мм*
	5,6306	$6d\,[^3/_2]_2^0 - 4f\,[^5/_2]_3$	$5d_3 - 4T$	»	Условия те же
	7,0581	$4f\,[^7/_2]_{3,4} - 5d\,[^7/_2]_4^0$	$4W - 4d_4$	»	0,02 *мм рт. ст.* криптона, $D = 10$ *мм*

Группа, элемент	Длина волны, *мкм*	Идентификация: Рака	Идентификация: Пашена	Возбуждение	Примечания
0 Ксенон (рис. 33.21)					
	0,840919	$6p\,[^3/_2]_1 - 6s\,[^3/_2]_2^0$	$2p_7 - 1s_5$	кор. имп.	0,04 *мм рт. ст.* ксенона, $D = 7$ *мм*
	0,904545	$6p\,[^5/_2]_2 - 6s\,[^3/_2]_2^0$	$2p_9 - 1s_5$	»	0,12 *мм рт. ст.* ксенона
	0,97997	$6p\,[^1/_2]_1 - 6s\,[^3/_2]_2^0$	$2p_{10} - 1s_5$	имп.	0,2—0,4 *мм рт. ст.* ксенона
	1,0634	—	—	»	0,001—0,02 *мм рт. ст.* ксенона, $D = 3{,}0$ *мм*
	1,0950	—	—	»	Условия те же
	1,365701	$7s\,[^3/_2]_1^0 - 6p\,[^5/_2]_2$	$2s_4 - 2p_9$	»	0,04 *мм рт. ст.* ксенона, $D = 7$ *мм*
	1,605327	$7s\,[^3/_2]_1^0 - 6p\,[^3/_2]_2$	$2s_4 - 2p_6$	»	0,1 *мм рт. ст.* ксенона, $D = 7$ *мм*
	1,732578	$5d\,[^3/_2]_1^0 - 6p\,[^5/_2]_2$	$3d_2 - 2p_9$	»	0,03—0,1 *мм рт. ст.* ксенона, $D = 5$ *мм*
	2,026229	$5d\,[^3/_2]_1^0 - 6p\,[^3/_2]_1$	$3d_2 - 2p_7$	непр.	10 *мм рт. ст.* смеси He—Xe (100:1), $D = 5$ *мм*

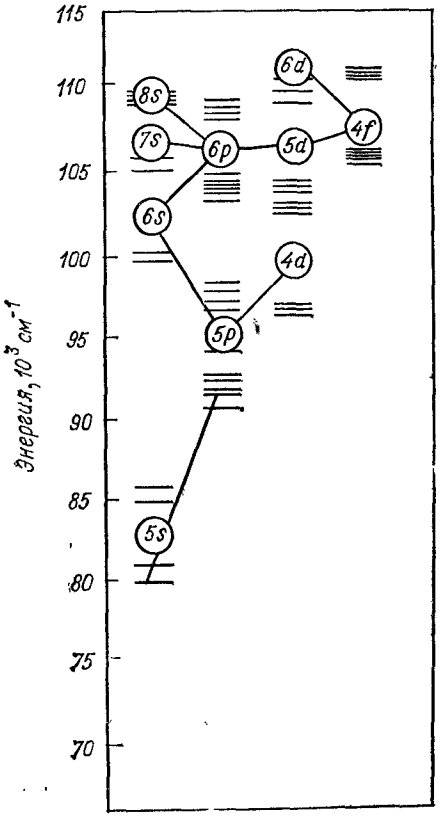


Рис. 33.20. Схема основных групп лазерных переходов в криптоне [1].

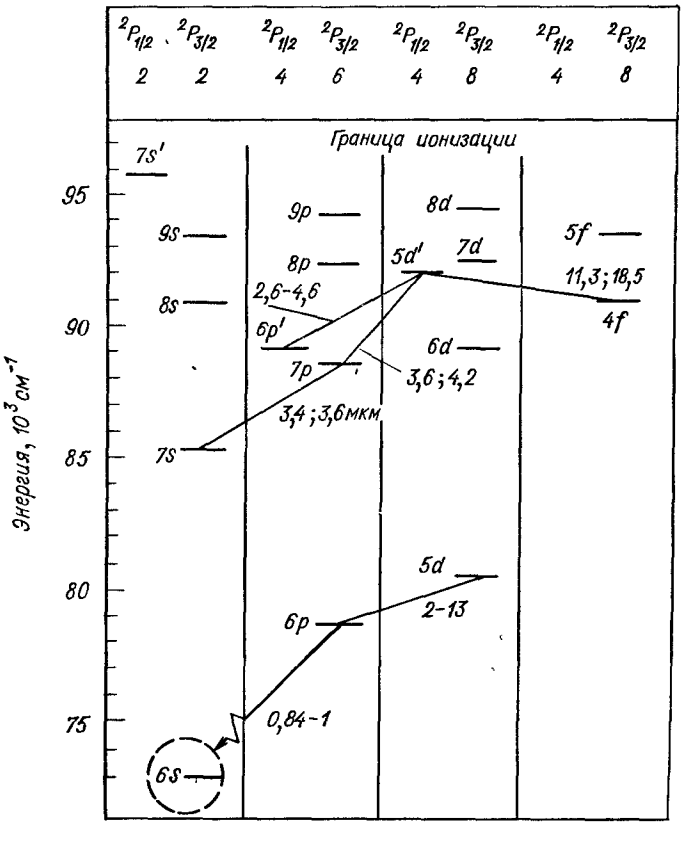


Рис. 33.21. Схема основных групп лазерных переходов в ксеноне [1].

Группа, элемент	Длина волны, *мкм*	Идентификация: Рака	Идентификация: Пашена	Возбуждение	Примечания
0 Ксеион	*2,3200*	$5d\,[^5/_2]^0_3 - 6p\,[^5/_2]_2$	$3d'_1 - 2p_9$	непр.	0,01—0,04 *мм рт. ст.* ксенона, 1 *мм рт. ст.* гелия, $D = 7$ *мм*
	2,4825	$5d\,[^5/_2]^0_3 - 6p\,[^5/_2]_3$	$3d'_1 - 2p_8$	»	0,03—0,1 *мм рт. ст.* ксенона, $D = 5$ *мм*
	2,6276	$5d\,[^5/_2]^0_2 - 6p\,[^5/_2]_2$	$3d''_1 - 2p_9$	»	0,01—0,04 *мм рт. ст.* ксенона, 1 *мм рт. ст.* гелия, $D = 7$ *мм*
	2,651093	$5d\,[^3/_2]^0_1 - 6p\,[^1/_2]_0$	$3d_2 - 2p_5$	»	Условия те же
	2,6608	$5d'\,[^3/_2]^0_1 - 6p'\,[^1/_2]_0$	$3s'_1 - 2p_1$	»	
	3,1078	$5d\,[^5/_2]^0_3 - 6p\,[^3/_2]_2$	$3d'_1 - 2p_6$	»	
	3,27459	$5d\,[^3/_2]^0_2 - 6p\,[^1/_2]_1$	$3d_3 - 2p_{10}$	»	0,4 *мм рт. ст.* смеси He—Xe (250:1), $D = 11$ *мм*
	3,3676	$5d\,[^5/_2]^0_2 - 6p\,[^3/_2]_1$	$3d''_1 - 2p_7$	»	0,01—0,04 *мм рт. ст.* ксеноиа, 1 *мм рт. ст.* гелия, $D = 7$ *мм*
	3,4345	$7p\,[^5/_2]_2 - 7s\,[^3/_2]^0_1$	$3p_9 - 2s_4$	»	
	3,5080	$5d\,[^7/_2]^0_3 - 6p\,[^5/_2]_2$	$3d_4 - 2p_9$	»	0,005—0,05 *мм рт. ст.* ксенона, 10 *мм рт. ст.* гелия, $D = 5$ *мм*
	3,6219	$5d'\,[^3/_2]^0_3 - 7p\,[^3/_2]_2$	$3s''''_1 - 3p_6$	»	0,01—0,04 *мм рт. ст.* ксенона, 1,0 *мм рт. ст.* гелия, $D = 7$ *мм*
	3,6518	$7p\,[^1/_2]_1 - 7s\,[^3/_2]^0_2$	$3p_{10} - 2s_5$	»	0,02 *мм рт. ст.* ксенона, $D = 7$ *мм*
	3,6798	$5d\,[^1/_2]^0_1 - 6p\,[^1/_2]_1$	$3d_5 - 2p_{10}$	»	0,01—0,04 *мм рт. ст.* ксенона, 1,0 *мм рт. ст.* гелия, $D = 7$ *мм*
	3,6859	$5d\,[^5/_2]^0_2 - 6p\,[^3/_2]_2$	$3d''_1 - 2p_6$	»	Условия те же
	3,8697	$5d'\,[^5/_2]^0_3 - 6p'\,[^3/_2]_2$	$3s''_1 - 2p_3$	»	
	3,8950	$5d\,[^7/_2]^0_3 - 6p\,[^5/_2]_3$	$3d_4 - 2p_8$	»	
	3,9966	$5d\,[^1/_2]^0_0 - 6p\,[^1/_2]_1$	$3d_6 - 2p_{10}$	»	
	4,1527	$5d'\,[^5/_2]^0_2 - 7p\,[^3/_2]_1$	$3s''_1 - 3p_7$	»	
	4,5393	$5d\,[^3/_2]^0_2 - 6p\,[^5/_2]_2$	$3d_3 - 2p_9$	»	
	4,6109	$5d'\,[^3/_2]^0_2 - 6p'\,[^1/_2]_1$	$3s''''_1 - 2p_2$	»	
	5,3568	$5d\,[^1/_2]^0_1 - 6p\,[^5/_2]_2$	$3d_5 - 2p_9$	»	0,01 *мм рт. ст.* ксенона, 0,1 *мм рт. ст.* гелия, $D = 10$ *мм* Необходимо подавление генерации на линии 3,508 *мкм*
	5,5754	$5d\,[^7/_2]^0_4 - 6p\,[^5/_2]_3$	$3d'_4 - 2p_8$	»	0,01—0,04 *мм рт. ст.* ксенона, 1,0 *мм рт. ст.* гелия, $D = 7$ *мм*
	6,384	$8p\,[^3/_2]_2 - 8s\,[^3/_2]^0_2$	$4p_6 - 3s_5$	»	0,04 *мм рт. ст.* ксенона, $D = 6$ *мм*
	7,3167	$5d\,[^3/_2]^0_2 - 6p\,[^3/_2]_1$	$3d_3 - 2p_7$	»	Как для линии 5,5754 *мкм*
	8,191	$8p\,[^1/_2]_1 - 8s\,[^3/_2]^0_1$	$4p_{10} - 3s_4$	»	0,04 *мм рт. ст.* ксенона, $D = 6$ *мм*
	9,0065	$5d\,[^3/_2]^0_2 - 6p\,[^3/_2]_2$	$2d_3 - 2p_6$	»	0,01—0,04 *мм рт. ст.* ксенона, 1,0 *мм рт. ст.* гелия, $D = 7$ *мм*
	9,7029	$5d\,[^1/_2]^0_1 - 6p\,[^3/_2]_1$	$3d_5 - 2p_7$	»	Условия те же
	11,299	$8p\,[^3/_2]^0_1 - 5d'\,[^3/_2]_2$ или $5d'\,[^5/_2]^0_3 - 4f\,[^9/_2]_4$	$4p_7 - 3s''''_1$ или $3s''''_1 - 4Z$	»	
	12,266	$5d\,[^1/_2]^0_0 - 6p\,[^3/_2]_1$	$3d_6 - 2p_7$	»	
	12,917	$5d\,[^1/_2]^0_1 - 6p\,[^3/_2]_2$	$3d_5 - 2p_6$	»	
	18,506	$5d'\,[^3/_2]^0_2 - 4f\,[^5/_2]_3$	$3s''''_1 - 4U$	»	
	75,5778	$6p'\,[^3/_2]_1 - 5d\,[^1/_2]^0_1$	$2p_5 - 3d_5$	»	3,5 *мм рт. ст.* смеси He—Xe (100:1), $D = 6$ *мм*

33.2. ИОННЫЕ ЛАЗЕРЫ

Инверсная населенность и генерация на ионизованных атомах в газовом разряде получена на переходах, принадлежащих 29 элементам. Так как для работы лазеров данного типа требуется значительная ионизация, пороговые плотности тока через разряд значительно выше, чем для лазеров на нейтральных атомах. Процесс создания инверсии обычно протекает в две ступени: сначала электронным ударом вызывается ионизация, а затем уже происходит возбуждение ионов в верхнее лазерное состояние. Механизмы возбуждения на второй ступени во многом подобны механизмам, описанным в разд. 33.1.

Лазерные переходы в ионных лазерах приведены в табл. 33.2 и объединены по группам элементов, указанным на рис. 33.22.

В таблице даны: длины волн спонтанных переходов (звездочкой слева помечены сильные или характеристические линии иона), идентификация иона (II — для однократно-, III — для двукратноионизованного атома и т. д.), спектроскопическая идентификация лазерного, перехода, в которой указаны верхний и нижний уровни, а также терм атомного остатка (в скобках) данного перехода (случаи сомнительной идентификации обозначены знаком «?» или прочерком). Возбуждение указано сокращенно: непр. — для данного перехода генерация получена в непрерывном режиме работы, послесв. — генерация наблюдается только в послесвечении разрядного импульса.

Для ряда наиболее важных ионных лазеров в данном разделе приводятся энергетические диаграммы основных переходов. Причем обозначение электронных конфигураций, уровней и термов атомных остатков соответствует таблицам [2]. Все длины волн на рисунках приведены в наиометрах (*нм*). Шкалы энергии даны в обратных сантиметрах (слева) и в электронвольтах (справа). В этих же единицах приведены ионизационные потенциалы лазерных ионов (и. п.). Лазерные переходы, для которых возможны различные идентификации, вместо сплошных линий на рисунках обозначены штрихами.

Таблица 33.2

Лазерные переходы в ионизованных газах [3]

Группа, элемент	Длина волны, *мкм*	Измеренное значение, *мкм*	Ион	Уровни: верхний — нижний	Возбуждение
IIA					
Кальций	0,854209	0,854180±60	Ca II	$(^1S)\,4p\ ^2P^0_{3/2}$ — $(^1S)\,3d\ ^2D_{5/2}$	—
	0,866214	0,866200±60	Ca II	$(^1S)\,4p\ ^2P^0_{1/2}$ — $(^1S)3d\ ^2D_{3/2}$	—
Стронций	1,033014	1,033050±50	Sr II	$(^1S)5p\ ^2P^0_{3/2}$ — $(^1S)\,4d\ ^2D_{5/2}$	послесв.
	1,091797	1,091750±50	Sr II	$(^1S)5p\ ^2P^0_{1/2}$ — $(^1S)\,4d\ ^2D_{3/2}$	»
IIB					
Цинк	0,491160	0,491160	Zn II	$(^1S)\,4f\ ^2F^0_{5/2}$ — $(^1S)\,4d\ ^2D_{3/2}$	—
	0,492404	0,492500	Zn II	$(^1S)\,4f\ ^2F^0_{7/2}$ — $(^1S)\,4d\ ^2D_{5/2}$	непр.
	*0,589442	0,589400	Zn II	$4s^2\ ^2D_{3/2}$ — $(^1S)\,4p\ ^2P^0_{1/2}$	»
	0,610253	0,610280±70	Zn II	$(^1S)5d\ ^2D_{5/2}$ — $(^1S)5p\ ^2P^0_{3/2}$	»
	*0,747879	0,747830±160	Zn II	$4s^2\ ^2D_{5/2}$ — $(^1S)4p\ ^2P^0_{3/2}$	непр.
	0,758848	0,758750±160	Zn II	$(^1S)5p\ ^2P^0_{3/2}$ — $(^1S)\ 5s\ ^2S_{1/2}$	»
	0,761290	0,761118±160	Zn II	$(^1S)6s\ ^2S_{1/2}$ — $(^1S)5p\ ^2P^0_{1/2}$	—
	0,775786	0,775700	Zn II	$(^1S)6s\ ^2S_{1/2}$ — $(^1S)\ 5p\ ^2P^0_{3/2}$	—
Кадмий (рис. 33.23)	*0,325031	0,325000	Cd II	$5s^2\ ^2D_{3/2}$ — $(^1S)\ 5p\ ^2P^0_{1/2}$	непр.
	*0,441563	0,441560±70	Cd II	$5s^2\ ^2D_{5/2}$ — $(^1S)5p\ ^2P^0_{3/2}$	»
	0,488172	0,488200	Cd II	$(^3D)5p\ ^4F^0_{5/2}$ — $(^1S)\ 5d\ ^2D_{3/2}$	»
	0,502548	0,502590	Cd II	$(^3D)5p\ ^4F^0_{7/2}$ — $(^1S)\ 5d\ ^2D_{5/2}$	»
	*0,533749	0,533700	Cd II	$(^1S)4f\ ^2F^0_{5/2}$ — $(^1S)\ 5d\ ^2D_{3/2}$	»
	0,537804	0,537800	Cd II	$(^1S)4f\ ^2F^0_{7/2}$ — $(^1S)\ 5d\ ^2D_{5/2}$	»
	0,635480	0,635480	Cd II	$(^1S)6g\ ^2G_{7/2}$ — $(^1S)\ 4f\ ^2F^0_{5/2}$	»

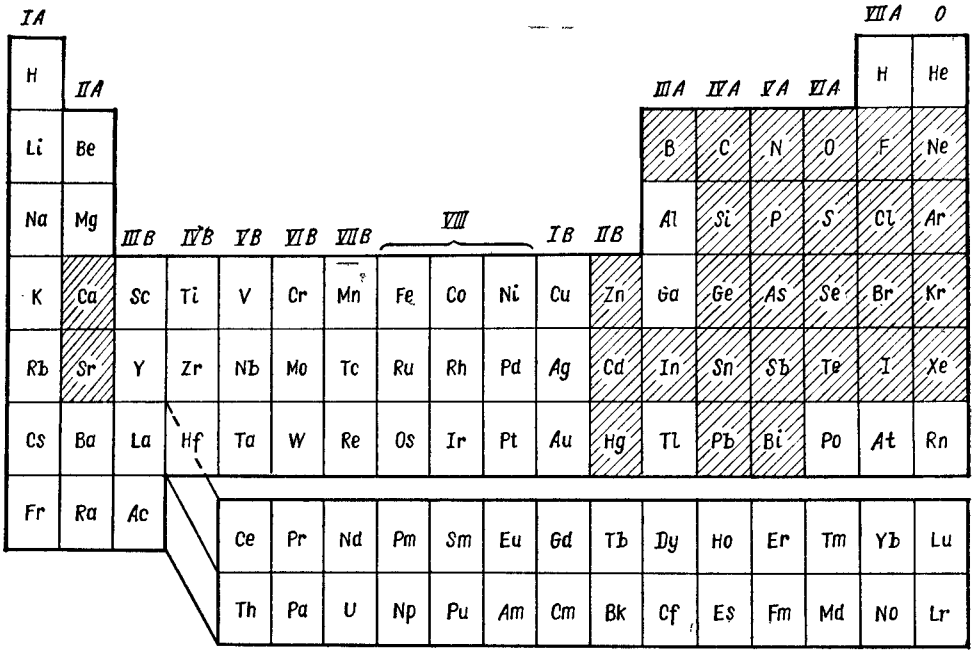


Рис. 33.22. Схематическая периодическая таблица (Заштрихованы элементы, для которых получена генерация в газовом разряде на ионизованных атомах [13].)

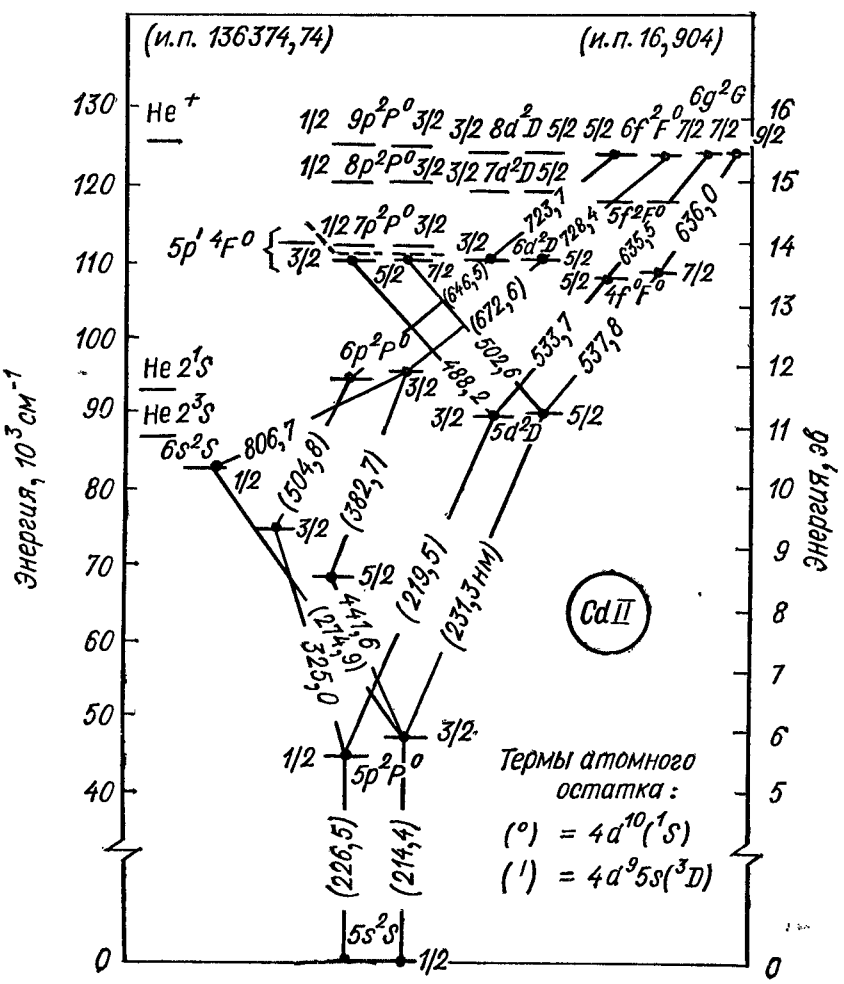


Рис. 33.23. Схема энергетических уровней и лазерных переходов в кадмии Cd II [3]. В скобках указаны переходы, для которых наблюдались только спонтанные переходы.

Группа, элемент	Длина волны, *мкм*	Измереиное значенне, *мкм*	Ион	Уровни: верхний — нижний	Возбужденне
IIB Кадмий (рис. 33.23)	0,636004	0,636010	Cd II	$(^1S)6g\ ^2G_{9/2} - (^1S)\ 4f\ ^2F^0_{7/2}$	непр.
	0,723689	0,723690	Cd II	$(^1S)6f\ ^2F^0_{5/2} - (^1S)\ 6d\ ^2D_{3/2}$	»
	0,728423	0,728430	Cd II	$(^1S)6f\ ^2F^0_{7/2} - (^1S)\ 6d\ ^2D_{5/2}$	»
	0,806687	0,806690	Cd II	$(^1S)6p\ ^2P^0_{3/2} - (^1S)\ 6s\ ^2S_{1/2}$	»
	0,839002	0,839000	Cd II?	$?[(^1S)11p\ ^2P^0_{1/2} - (^1S)\ 8s\ ^2S_{1/2}]$	—
	1,18636	1,186900	Cd II?	$?\ [(^1S)10d\ ^2D_{3/2} - (^3D)\ 5p\ ^2D^0_{5/2}]$	—
Ртуть (рис. 33.24)	0,479701	0,479700±10	Hg III	$5d^8\ 6s^2(J=4) - 5d^9\ (^2D_{5/2})\ 6p_{1/2}\ (J=3)$	—
	*0,56773	0,567800	Hg II	$(^1S)5f\ ^2F^0_{7/2} - (^1S)6d\ ^2D_{5/2}$	—
	*0,614947	0,615000	Hg II	$(^1S)7p^2\ P^0_{3/2} - (^1S)\ 7s\ ^2S_{1/2}$	непр.
	0,73466	0,734600	Hg II	$(^1S)7d\ ^2D_{5/2} - (^1S)7p\ ^2P^0_{3/2}$	—
	0,74181	0,741810	Hg II	$^2P^0_{3/2}$ (109189) — $(^1S)7s\ ^2S_{1/2}$	—
	*0,79447	0,794500	Hg II	$(^1S)7p\ ^2P^0_{1/2} - (^1S)7s\ ^2S_{1/2}$	непр.
	0,85498	0,854700	Hg II	$(^1S)5g\ ^2G_{7/2} - {}^2F^0_{5/2}$ (121960)	—
	0,86220	0,862800	Hg II?	$?(^1S)8p\ ^2P^0_{3/2}$ — 116200 $(J=5/2)$	—

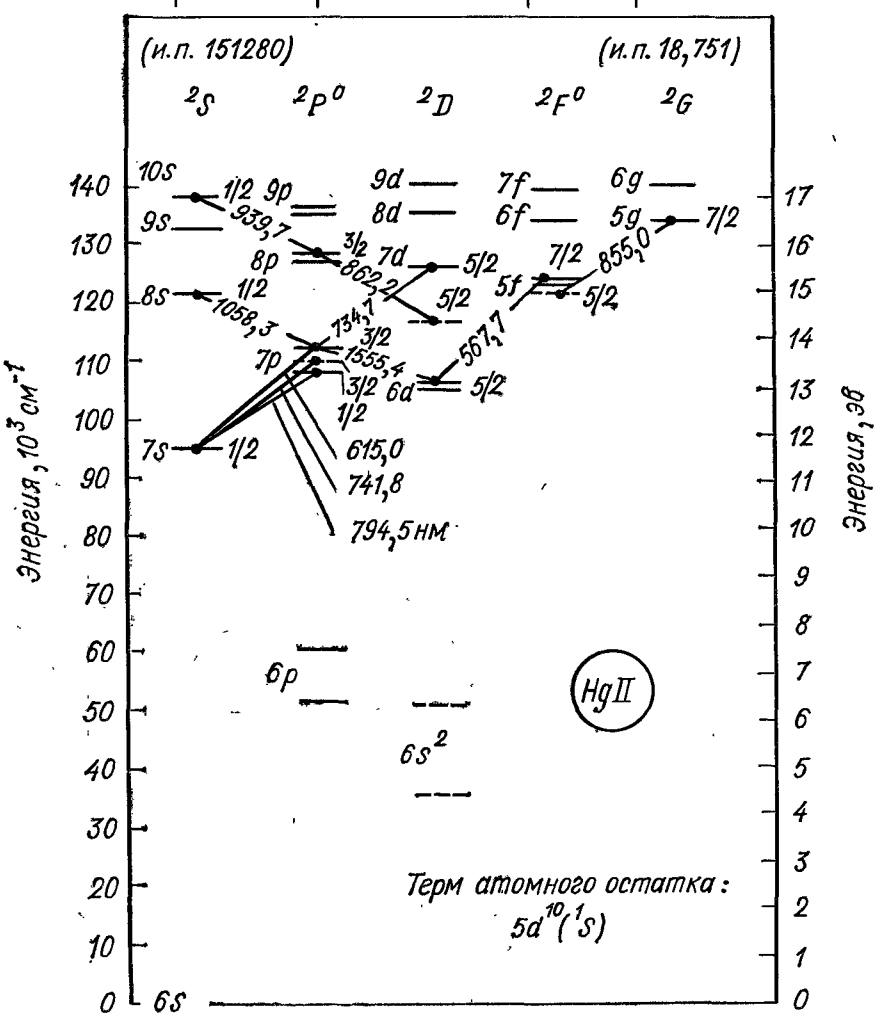


Рис. 33.24. Схема энергетических уровней и лазерных переходов в ртути Hg II [3]. Уровни, соответствующие возбуждениым электронам, обозначены штрихами. J указано только для лазерных уровней.

Группа, элемент	Длина волны, *мкм*	Измеренное значение, *мкм*	Ион	Уровни: верхний — нижний	Возбуждение
IIB Ртуть (рис 33.24)	0,8677	0,867700	Hg II?	—	—
	0,93968	0,939600	Hg II	$(^1S)10s\ ^2S_{1/2} - (^1S)8p\ ^2P^0_{3/2}$	—
	1,0583	1,058600	Hg II	$(^1S)8s\ ^2S_{1/2} - (^1S)7p\ ^2P^0_{3/2}$	—
	1,117686	1,117682±10	Hg I	(Линия нейтрального атома)	—
	1,2545	1,254500	Hg II?	—	—
	1,2981	1,298100	Hg II?	—	—
	1,3655	1,365500	Hg II?	—	—
	1,5554	1,555000	Hg II	$(^1S)7p\ ^2P^0_{3/2} - (^1S)6d\ ^2D_{5/2}$	—
IIIA Бор	0,345134	0,345132	B II	$2p^2\ ^1D_2 - (^2S)\ 2p\ ^1P^0_1$	—
Индий	0.468082	0,468050±70	In II	$(^2S)\ 4f\ ^3F^0_4 - (^2S)5d\ ^3D_3$	—
IVA Углерод	0,464745	0,464740±04	C III	$(^2S)\ 3p\ ^3P^0_2 - (^2S)\ 3s\ ^3S_1$	—
	0,465016	0,465021±04	C III	$(^2S)\ 3p\ ^3P^0_1 - (^2S)3s\ ^3S_1$	—
Кремний	0,408889	0,408890±10	Si IV	$4p\ ^2P^0_{3/2} - 4s\ ^2S_{1/2}$	—
	0,455262	0,455259±06	Si III	$(^2S)4p\ ^3P^0_2 - (^2S)4s\ ^3S_1$	—
	0,456782	0,456784±06	Si III	$(^2S)4p\ ^3P^0_1 - (^2S)4s\ ^3S_1$	—
	0,634710	0,634724±06	Si II	$(^1S)4p\ ^2P^0_{3/2} - (^1S)\ 4s\ ^2S_{1/2}$	послесв.
	0,637136	0,637148±06	Si II	$(^1S)4p\ ^2P^0_{1/2} - (^1S)\ 4s\ ^2S_{1/2}$	—
	0,667188	0,667193±06	Si II	$(^3P^0)4p\ ^4D_{7/2} - (^3P^0)\ 4s\ ^4P^0_{5/2}$	—
Германий	0,513175	0,513150±70	Ge II	$(^1S)\ 4f\ ^2F^0_{5/2} - (^1S)\ 4d\ ^2D_{3/2}$	—
	0,517865	0,517840±70	Ge II	$(^1S)\ 4f\ ^2F^0_{7/2} - (^1S)\ 4d\ ^2D_{5/2}$	—
Олово	0,579918	0,579870±70	Sn II	$(^1S)4f\ ^2F^0_{7/2} - (^1S)\ 5d\ ^2D_{5/2}$	—
	0,645350	0,645300±70	Sn II	$(^1S)6p\ ^2P^0_{3/2} - (^1S)\ 6s\ ^2S_{1/2}$	непр.
	0,657926	0,657903±06	Sn	—	—
	0,684405	0,684400±70	Sn II	$(^1S)6p\ ^2P^0_{1/2} - (^1S)\ 6s\ ^2S_{1/2}$	непр.
Свинец	0,53721	0,537210±70	Pb II	$(^1S)5f\ ^2F^0_{7/2} - 6s6p^2\ ^4P_{5/2}$	—
	0,56089	0,56086±50	Pb II	$(^1S)7p\ ^2P^0_{3/2} - (^1S)\ 7s\ ^2S_{1/2}$	—
	0,66599	0,66601±50	Pb II	$(^1S)7p\ ^2P^0_{1/2} - (^1S)\ 7s\ ^2S_{1/2}$	—
VA Азот	0,336734	0,336732±06	N III	$(^3P^0)3p\ ^4P_{5/2} - (^3P^0)\ 3s\ ^4P^0_{5/2}$	—
	0,347867	0,347876±05	N IV	$(^2S)3p\ ^3P^0_2 - (^2S)3s\ ^3S_1$	—
	0,348296	0,348302±06	N IV	$(^2S)3p\ ^3P^0_1 - (^2S)\ 3s\ ^3S_1$	—
	0,399501	0,399499±02	N II	$(^2P^0)3p\ ^1D_2 - (^2P^0)\ 3s\ ^1P^0_1$	—
	0,409732	0,409729±06	N III	$(^1S)3p\ ^2P^0_{3/2} - (^1S)\ 3s\ ^2S_{1/2}$	—
	0,410338	0,410336±02	N III	$(^1S)3p\ ^2P^0_{1/2} - (^1S)\ 3s\ ^2S_{1/2}$	—

Группа, элемент	Длина волны, *мкм*	Измеренное значение, *мкм*	Ион	Уровни: верхний — нижний	Возбуждение
VA					
Азот	0,451088	0,451045±23	N III	$(^3P^0)3p\ ^4D_{3/2}$ — $(^3P^0)3s\ ^4P^0_{3/2}$	—
	0,451487	0,451486±03	N III	$(3p^0)3p\ ^4D_{7/2}$ — $(^3P^0)3s\ ^4P^0_{5/2}$	—
	0,462140	0,462100±80	N II	$[(^2P^0)3p\ ^3P_0$ — $(^2P^0)3s\ ^3P^0_1]$	—
	0,463055	0,463051±02	N II	$[(^2P^0)\ 3p\ ^3P_2$ — $(^2P^0)3s\ ^3P^0_2]$	—
	0,464310	0,464390±80	N II	$[(^2P^0)3p\ ^3P_1$ — $(^2P^0)3s\ ^3P^0_2]$	—
	0,566663	0,566662±03	N II	$(^2P^0)3p\ ^3D_2$ — $(^2P^0)\ 3s\ ^3P^0_1$	—
	0,567601	0,567603±03	N II	$(^2P^0)\ 3p\ ^3D_1$ — $(^2P^0)\ 3s\ ^3P^0_0$	—
—	*0,567956	0,567953±03	N II	$(^2P^0)\ 3p\ ^3D_3$ — $(^2P^0)\ 3s\ ^3P^0_2$	—
	0,568622	0,568690±80	N II	$[(^2P^0)3p\ ^3D_1$ — $(^2P^0)3s\ ^3P^0_1]$	—
	0,648207	0,648260±60	N II	$(^2P^0)3p\ ^1P_1$ — $(^2P^0)3s\ ^1P_1$	—
Фосфор	0,334769	0,334776±06	P IV	$(^2S)4p\ ^3P^0_2$ — $(^2S)4s\ ^3S_1$	—
	0,422208	0,422225±06	P III	$(^1S)4p\ ^2P^0_{3/2}$ — $(^1S)4s\ ^2S_{1/2}$	—
	*0,602421	0,602427±06	P II	$(^2P^0)4p\ ^3D_2$ — $(^2P^0)\ 4s\ ^3P^0_1$	непр.
	0,603421	0,603419±06	P II	$(^2P^0)4p\ ^3D_1$ — $(^2P^0)4s\ ^3P_0$	—
	*0,604325	0,604322±06	P II	$(^2P^0)4p\ ^3D_3$ — $(^2P^0)\ 4s\ ^3P^0_2$	непр.
	0,608786	0,608804±06	P II	$(^2P^0)4p\ ^3D_1$ — $(^2P^0)\ 4s\ ^3P^0_1$	—
	0,616577	0,616574±06	P II	$(^2P^0)4p\ ^3D_2$ — $(^2P^0)4s\ ^3P_2$	—
	0,784563	0,784600	P II	$(^2P^0)4p\ ^1P_1$ — $(^2P^0)\ 4s\ ^1P^0_1$	—
Мышьяк	0,54980	0,549800±100	As II	$(^2P^0)\ 5p\ ^3D_1$ — $(^2P^0)\ 5s\ ^3P^0_0$	—
	0,55583	0,555900±100	As II	$(^2P^0)\ 5p\ ^3D_2$ — $(^2P^0)\ 5s\ ^3P^0_1$	—
—	0,56516	0,565200±100	As II	$(^2P^0)\ 5p\ ^3D_3$ — $(^2P^0)\ 5s\ ^3P^0_2$	—
	0,61703	0,617100±100	As II	$(^2P^0)\ 5p\ ^1P_1$ — $(^2P^0)\ 5s\ ^3P^0_1$	—
Сурьма	0,61299	0,613000±100	Sb II	$(^2P^0)6p\ ^3D_3$ — $(^2P^0)6s\ ^3P^0_2$	—
Висмут	0,456084	0,456070±10	Bi III	$6s^2(^1S)7p\ ^2P^0_{1/2}$ — $6s^2\ (^1S)7s\ ^2S_{1/2}$	—
	0,571921	0,571920±10	Bi II	$6p_{1/2}7p_{1/2}\ ^3P_0$ — $6p_{1/2}7s\ ^3P^0_1$	—
	0,75990	0,759870±50	Bi III	$6s^2\ (^1S)6f\ ^2F^0_{5/2}$ — $6s^2\ (^1S)7d\ ^2D_{3/2}$	—
	0,80689	0,806920±50	Bi III	$6s^2\ (^1S)6f\ ^2F^0_{7/2}$ — $6s^2\ (^1S)7d\ ^2D_{5/2}$	—
VIA					
Кислород	*0,298378	0,298386±06	O III	$(^2P^0)3p\ ^1D_2$ — $(^2P^0)\ 3s\ ^1P^0_1$	—
	0,304713	0,304715±06	O III	$(^2P^0)3p\ ^3P_2$ — $(^2P^0)\ 3s\ ^3P^0_2$	—
	0,306345	0,306346±06	O IV	$(^1S)\ 3p\ ^2P^0_{3/2}$ — $(^1S)\ 3s\ ^2S_{1/2}$	—
	0,33813	0,338134±06	O IV или O IV	$(^3P^0)\ 3p\ ^4D_{3/2}$ — $(^3P^0)3s\ ^4P^0_{1/2}$ или $(^3P^0)\ 3p\ ^4D_{5/2}$ — $(^3P^0)\ 3s\ ^4P^0_{3/2}$	—
	0,338554	0,338554±06	O IV	$(^3P^0)3p\ ^4D_{1/2}$ — $(^3P^0)\ 3s\ ^4P^0_{5/2}$	—
	0,374949	0,374947±04	O II	$(^3P)3p\ ^4S^0_{3/2}$ — $(^3P)\ 3s\ ^4P_{5/2}$	—
	0,375467	0,375468±04	O III	$(^2P^0)\ 3p\ ^3D_2$ — $(^2P^0)3s\ ^3P^0_1$	—

Группа, элемент	Длина волны, мкм	Измеренное значение, мкм	Ион	Уровни: верхний — нижний	Возбуждение
VI A	0,375988	0,375989±05	O III	$(^2P^0)3p\ ^3D_3$ — $(^2P^0)3s\ ^3P^0_2$	—
Кислород	*0,434738	0,434738±04	O II	$(^1D)3p\ ^2D^0_{3/2}$ — $(^1D)3s\ ^2D_{3/2}$	—
	*0,435128	0,435123±04	O II	$(^1D)3p\ ^3D^0_{5/2}$ — $(^1D)3s\ ^2D_{5/2}$	—
	*0,441488	0,441493±04	O II	$(^3P)3p\ ^2D^0_{5/2}$ — $(^3P)3s\ ^2P_{3/2}$	—
	*0,441697	0,441697±04	O II	$(^3P)3p\ ^2D^0_{3/2}$ — $(^3P)3s\ ^2P_{1/2}$	—
	0,460552	0,460552±09	O	—	—
	0,464914	0,464908±10	O II	$(^3P)3p\ ^4D^0_{1/2}$ — $(^3P)3s\ ^4P_{5/2}$	—
	0,559237	0,559237±06	O III	$(^2P^0)3p\ ^1P_1$ — $(^2P^0)3s\ ^1P^0_1$	—
	0,664099	0,664020±100	O II	$(^3P)3p\ ^2S^0_{1/2}$ — $(^3P)3s\ ^2P_{1/2}$	—
	0,672136	0,672138±04	O II	$(^3P)3p\ ^2S^0_{1/2}$ — $(^3P)3s\ ^2P_{3/2}$	—
Сера	0,263898	0,263898±06	S V	—	—
	0,332486	0,332486±06	S III	$(^2P^0)4p\ ^3P_2$ — $(^2P^0)3d\ ^3P^0_2$	—
	0,349737	0,349737±06	S III	—	—
	0,370937	0,370941±06	S III	$(^2P^0)4p\ ^3D_2$ — $(^2P^0)3d\ ^3P^0_1$	—
	0,492532	0,492560±06	S II	$(^3P)4p\ ^4P^0_{3/2}$ — $(^3P)4s\ ^4P_{1/2}$	—
	0,501401	0,501424±06	S II	$(^3P)4p\ ^2P^0_{3/2}$ — $(^3P)4s\ ^2P_{3/2}$	—
	0,503239	0,503262±06	S II	$(^3P)4p\ ^4P^0_{5/2}$ — $(^3P)4s\ ^4P_{5/2}$	—
	0,516032	0,516032±06	S	—	—
	0,521962	0,521962±06	S	—	—
	*0,532070	0,532088±06	S II	$(^1D)\ 4p\ ^2F^0_{7/2}$ — $(^1D)4s\ ^2D_{5/2}$	непр.
	*0,534567	0,534583±06	S II	$(^1D)\ 4p\ ^2F^0_{5/2}$ — $(^1D)4s\ ^2D_{3/2}$	»
	0,542864	0,542874±06	S II	$(^3P)\ 4p\ ^4D^0_{3/2}$ — $(^3P)4s\ ^4P_{1/2}$	—
	*0,543277	0,543287±06	S II	$(^3P)\ 4p\ ^4D^0_{5/2}$ — $(^3P)4s\ ^4P_{3/2}$	непр.
	*0,545380	0,545388±06	S II	$(^3P)\ 4p\ ^4D^0_{7/2}$ — $(^3P)4s\ ^4P_{5/2}$	»
	0,547360	0,547374±06	S II	$(^3P)\ 4p\ ^4D^0_{1/2}$ — $(^3P)4s\ ^4P_{1/2}$	—
	0,550967	0,550990±06	S II	$(^3P)\ 4p\ ^4D^0_{3/2}$ — $(^3P)4s\ ^4P_{3/2}$	—
	0,556495	0,556511±06	S II	$(^3P)\ 4p\ ^4D^0_{5/2}$ — $(^3P)4s\ ^4P_{5/2}$	—
	*0,563999	0,564012±06	S II	$(^3P)\ 4p\ ^2D^0_{5/2}$ — $(^3P)4s\ ^2P_{3/2}$	непр
	0,564698	0,564716±06	S II	$(^3P)\ 4p\ ^2D^0_{3/2}$ — $(^3P)4s\ ^2P_{1/2}$	—
	0,581919	0,581935±06	S II	$(^3P)\ 4p\ ^2D^0_{3/2}$ — $(^3P)4s\ ^2P_{3/2}$	—
Селен	0,460434	0,460460±50	Se II	$(^3P)\ 5p\ ^2D^0_{5/2}$ — $(^3P)5s\ ^4P_{5/2}$	непр.
	0,464844	0,464860±50	Se II	$(^3P)\ 5p\ ^4P^0_{3/2}$ — $(^3P)5s\ ^4P_{1/2}$	»
	0,476365	0,476410±50	Se II	$(^3P)\ 5p\ ^2D^0_{3/2}$ — $(^3P)5s\ ^4P_{3/2}$	»
	0,484063	0,484060±50	Se II	$(^3P)\ 5p\ ^2S^0_{1/2}$ — $(^3P)5s\ ^4P_{3/2}$	»
	0,484496	0,484500±50	Se II	$(^3P)\ 5p\ ^4S^0_{3/2}$ — $(^3P)5s\ ^4P_{5/2}$	»
	*0,497566	0,497610±50	Se II	$(^3P)\ 5p\ ^2D^0_{5/2}$ — $4s\,4p^4\ ^2P_{3/2}$	»
	*0,499275	0,499290±50	Se II	$(^3P)\ 5p\ ^4P^0_{3/2}$ — $(^3P)5s\ ^4P_{3/2}$	»
	*0,506865	0,506870±50	Se II	$(^3P)\ 5p\ ^4P^0_{5/2}$ — $(^3P)5s\ ^4P_{5/2}$	»
	0,509650	0,509610±50	Se II	$?(^3P)\ 5p\ ^4D^0_{1/2}$ — $(^3P)4d\ ^4F_{3/2}$	»
	0,514214	0,514190±50	Se II	$(^3P)\ 5p\ ^4D^0_{3/2}$ — $(^3P)5s\ ^4P_{1/2}$	»
	*0,517598	0,517600±50	Se II	$(^3P)\ 5p\ ^4D^0_{5/2}$ — $(^3P)5s\ ^4P_{3/2}$	»

Группа, элемент	Длина волны, *мкм*	Измеренное значение, *мкм*	Ион	Уровни: верхний—нижний	Возбуждение
VI*A*					
Селен	*0,522751	0,522760±50	Se II	$(^3P)\,5p\,{}^4D^0_{7/2} - (^3P)\,5s\,{}^4P_{5/2}$	непр.
	0,525307	0,525260±50	Se II	$(^3P)\,5p\,{}^2D^0_{5/2} - (^3P)\,5s\,{}^2P_{3/2}$	»
	0,525363	0,525320±50	Se II	$(^3P)\,5p\,{}^4D^0_{1/2} - (^3P)\,5s\,{}^4P_{1/2}$	»
	0,527111	0,527130±50	Se II	$?\,(^3P)\,5p\,{}^4D^0_{5/2} - (^3P)\,4d\,{}^4F_{7/2}$	»
	*0,530535	0,530550±50	Se II	$(^3P)\,5p\,{}^2D^0_{3/2} - (^3P)\,5s\,{}^2P_{1/2}$	»
	0,552242	0,552280±50	Se II	$(^3P)\,5p\,{}^4P^0_{3/2} - (^3P)\,5s\,{}^4P_{5/2}$ или $(^3P)\,5p\,{}^4P^0_{5/2} - 4s\,4p^4\,{}^2P_{3/2}$	» / »
	0,559116	0,559160±50	Se II	$(^3P)\,5p\,{}^4P^0_{3/2} - (^3P)\,5s\,{}^2P_{1/2}$	»
	0,569788	0,569790±50	Se II	$(^3P)\,5p\,{}^4D^0_{1/2} - (^3P)\,5s\,{}^4P_{3/2}$	»
	0,574762	0,574790±50	Se II	$(^3P)\,5p\,{}^4D^0_{5/2} - (^3P)\,5s\,{}^4P_{5/2}$	»
	0,605596	0,605630±50	Se II	$(^3P)\,5p\,{}^2P^0_{3/2} - **$	»
	0,644425	0,644390±50	Se II	$(^3P)\,5p\,{}^2D^0_{5/2} - **$	»
	0,649048	0,649010±50	Se II	$(^3P)\,5p\,{}^4D^0_{1/2} - (^3P)\,5s\,{}^2P_{1/2}$	»
	0,653495	0,653460±50	Se II	$(^3P)\,5p\,{}^2P^0_{1/2} - **$	»
Теллур	0,54540	0,545400±50	Te II ?	—	—
	0,557634	0,557600±50	Te II	$5s^2\,5p^2\,(^1D)\,6p^0_{7/2} - 94860{,}95\ (J=5/2)$	—
	0,56405	0,564050±50	Te II ?	—	—
	0,570821	0,570850±50	Te II	$103106{,}12\,(^0_{7/2}) - 85592{,}36\,(_{5/2})$	—
	0,593618	0,593650±50	Te II	$99585{,}02\,(^0_{3/2}) - 82743{,}83\,(_{3/2})$	послесв.
	0,624549	0,624550±50	Te II	$99585{,}02\,(^0_{3/2}) - 83577{,}90\,(_{1/2})$	»
	0,703904	0,703950±50	Te II	$97780{,}47\,(^0_{1/2}) - 83577{,}90\,(_{1/2})$	»
VII*A*					
Фтор	0,275958	0,275959±06	F III	$(^1D)\,3p\,{}^2D^0_{5/2} - (^1D)\,3s\,{}^2D_{5/2}$	—
	0,282613	0,282608±06	F IV	$(^2P^0)\,3p\,{}^3D_3 - (^2P^0)\,3s\,{}^3P^0_2$	—
	0,312151	0,312156±06	F III	$(^3P)\,3p\,{}^4D^0_{7/2} - (^3P)\,3s\,{}^4P_{5/2}$	—
	0,317413	0,317418±06	F III	$(^3P)\,3p\,{}^2D^0_{5/2} - (^3P)\,3s\,{}^2P_{3/2}$	—
	0,320275	0,320274±06	F II	$(^2D^0)\,3p\,{}^1D_2 - (^2D^0)\,3s\,{}^1D^0_2$	—
	0,402472	0,402478±06	F II	$(^4S^0)\,3p\,{}^3P_2 - (^4S^0)\,3s\,{}^3S^0_1$	—
Хлор	0,263267	0,263270±06	Cl III	$(^1D)\,4d\,{}^2D_{5/2} - (^1D)\,4p\,{}^2F^0_{7/2}$	—
	0,319146	0,319143±06	Cl III	$(^3P)\,4p\,{}^4S^0_{3/2} - (^3P)\,4s\,{}^4P_{5/2}$	—
	0,339287	0,339287±06	Cl III	$(^1D)\,4p\,{}^2D^0_{3/2} - (^1D)\,4s\,{}^2D_{3/2}$	—
	0,339343	0,339345±06	Cl III	$(^1D)\,4p\,{}^2D^0_{5/2} - (^1D)\,4s\,{}^2D_{5/2}$	—
	0,353004	0,353003±06	Cl III	$(^1D)\,4p\,{}^2F^0_{7/2} - (^1D)\,4s\,{}^2D_{5/2}$	—
	0,356069	0,356069±06	Cl III	$(^1D)\,4p\,{}^2F^0_{5/2} - (^1D)\,4s\,{}^2D_{3/2}$	—
	0,360210	0,360210±06	Cl III	$(^3P)\,4p\,{}^4D^0_{7/2} - (^3P)\,4s\,{}^4P_{5/2}$	—
	0,361283	0,361210±06	Cl III	$(^3P)\,4p\,{}^4D^0_{5/2} - (^3P)\,4s\,{}^4P_{3/2}$	—
	0,362268	0,362269±06	Cl III	$(^3P)\,4p\,{}^4D^0_{3/2} - (^3P)\,4s\,{}^4P_{1/2}$	—
	0,372046	0,372046±06	Cl III	$(^3P)\,4p\,{}^2D^0_{5/2} - (^3P)\,4s\,{}^2P_{3/2}$	—
	0,374882	0,374878±06	Cl III	$(^3P)\,4p\,{}^2D^0_{3/2} - (^3P)\,4s\,{}^2P_{1/2}$	—

** Классификацию нижних уровней см. в [4].

Группа, элемент	Длина волны, *мкм*	Измеренное значение, *мкм*	Ион	Уровни: верхний — нижний	Возбуждение
VIIA Хлор	0,413250	0,413250±10	Cl II	$(^2D^0)\ 4p\ ^1D_2$—$(^2D^0)\ 4s\ ^1D^0_2$	непр.
	0,474042	0,474040±10	Cl II	$(^2P^0)\ 4p\ ^1P_1$—$(^2P^0)\ 3d\ ^1D^0_2$	»
	0,476871	0,476874±06	Cl II	$(^2P^0)\ 4p\ ^3D_2$—$(^2P^0)\ 4s\ ^3P^0_1$	»
	0,478134	0,478134±03	Cl II	$(^2P^0)\ 4p\ ^3D_3$—$(^2P^0)\ 4s\ ^3P^0_2$	»
	0,489685	0,489688±03	Cl II	$(^2D^0)\ 4p\ ^3F_4$—$(^2D^0)\ 4s\ ^3D^0_3$	»
	0,490482	0,490473±03	Cl II	$(^2D^0)\ 4p\ ^3F_3$—$(^2D^0)\ 4s\ ^3D^0_2$	»
	0,491781	0,491766±03	Cl II	$(^2D^0)\ 4p\ ^3F_2$—$(^2D^0)\ 4s\ ^3D^0_1$	»
	0,507828	0,507830±03	Cl II	$(^2D^0)\ 4p\ ^3D_3$—$(^2D^0)\ 4s\ ^3D^0_3$	»
	0,510310	0,510310±10	Cl II	$(^2D^0)\ 4p\ ^3D_2$—$(^2D^0)\ 4s\ ^3D^0_2$	»
	*0,521792	0,521790±03	Cl II	$(^4S^0)\ 4p\ ^3P_2$—$(^4S^0)\ 4s\ ^3S^0_1$	»
	0,522135	0,522130±03	Cl II	$(^4S^0)\ 4p\ ^3P_1$—$(^4S^0)\ 4s\ ^3S^0_1$	»
	0,539216	0,539215±03	Cl II	$(^2D^0)\ 4p\ ^1F_3$—$(^2D^0)\ 4s\ ^1D^0_2$	»
	0,609472	0,609474±03	Cl II	$(^2D^0)\ 4p\ ^1P_1$—$(^2D^0)\ 4s\ ^1D^0_2$	»
Бром	0,474270	0,474266±03	Br II	$(^2P^0)\ 5p\ ^3D_3$—$(^2P^0)\ 5s\ ^3P^0_2$	—
	0,505465	0,505463±05	Br II	$(^2D^0)\ 5p\ ^3F_3$—$(^4S^0)\ 4d\ ^3D^0_2$	—
	0,518227	0,518238±02	Br II	$(^4S^0)\ 5p\ ^3P_2$—$(^4S^0)\ 5s\ ^3S^0_1$	непр.
	0,523823	0,523826±04	Br II	$(^4S^0)\ 5p\ ^3P_1$—$(^4S^0)\ 5s\ ^3S^0_1$	»
	0,533205	0,533203±03	Br II	$(^2D^0)\ 5p\ ^1F_3$—$(^2D^0)\ 5s\ ^1D^0_2$	»
	0,611761	0,611756±06	Br II	$(^4S^0)\ 5p\ ^5P_2$—$(^4S^0)\ 5s\ ^3S^0_1$	—
	0,616870	0,616878±06	Br II	$(^4S^0)\ 5p\ ^5P_1$—$(^4S^0)\ 5s\ ^3S^0_1$	—
Иод	*0,453379	0,453379±03	I, III, IV?	—	—
	0,467440	0,467440±03	I, III, IV?	—	—
	0,493467	0,493467±03	I, III, IV?	—	—
	0,498692	0,498600	I II	$(^2D^0)\ 6p\ ^3D_2$—$(^4S^0)\ 5d\ ^3D^0_1$	послесв.
	0,521627	0,521600	I II	$(^2D^0)\ 6p\ ^3F_2$—$(^4S^0)\ 5d\ ^3D^0_1$	»
	*0,540736	0,540700	I II	$(^2D^0)\ 6p\ ^3D_2$—$(^2D^0)\ 6s\ ^3D^0_2$	»
	0,562569	0,562500	I II	$(^4S^0)\ 6p\ ^3P_2$—$(^4S^0)\ 6s\ ^3S^0_1$	—
	*0,567808	0,567800	I II	$(^2D^0)\ 6p\ ^3F_2$—$(^2D^0)\ 6s\ ^3D^0_2$	послесв
	*0,576072	0,576000	I II	$(^2D^0)\ 6p\ ^3D_2$—$(^2D^0)\ 6s\ ^2D^0_1$	»
	0,606893	0,606890	I II	$(^2D^0)\ 6p\ ^3F_2$—$(^2D^0)\ 6s\ ^3D_1$	—
	*0,612749	0,612700	I II	$(^2D^0)\ 6p\ ^3D_1$—$(^2D^0)\ 6s\ ^3D^0_2$	послесв.
	0,651618	0,651600	I II	$(^2D^0)\ 6p\ ^3F_2$—$5s\ 5p\ ^5P^0_1$	—
	*0,658521	0,658500	I II	$(^2D^0)\ 6p\ ^3D_1$—$(^2D^0)\ 6s\ ^3D^0_1$	послесв.
	0,682523	0,682523	I II	$(^2D^0)\ 6p\ ^3F_2$—$(^2D^0)\ 6s\ ^3D_3$	—
	0,690477	0,690400	I II	$(^2D^0)\ 6p\ ^3D_2$—$(^2D^0)\ 6s\ ^1D^0_2$	послесв.
	*0,703299	0,703200	I II	$(^2D^0)\ 6p\ ^3F_2$—$(^2D^0)\ 5d\ ^3D^0_2$	»
	0,713897	0,713897	I II	$(^2D^0)\ 6p\ ^3D_2$—$(^2D^0)\ 5d\ ^3D_3$	—
	0,825384	0,825000±10⁴	I II	? $(^2D^0)\ 6p\ ^3D_1$—$(^2D^0)\ 5d\ ^3P^0_0$	послесв.
	0,880423	0,880000±10⁴	I II	? $(^2D^0)\ 6p\ ^3F_2$—$(^2D^0)\ 5d\ ^3F^0_3$	»
	1,04172	1,041720±06	I, III, IV?	—	—

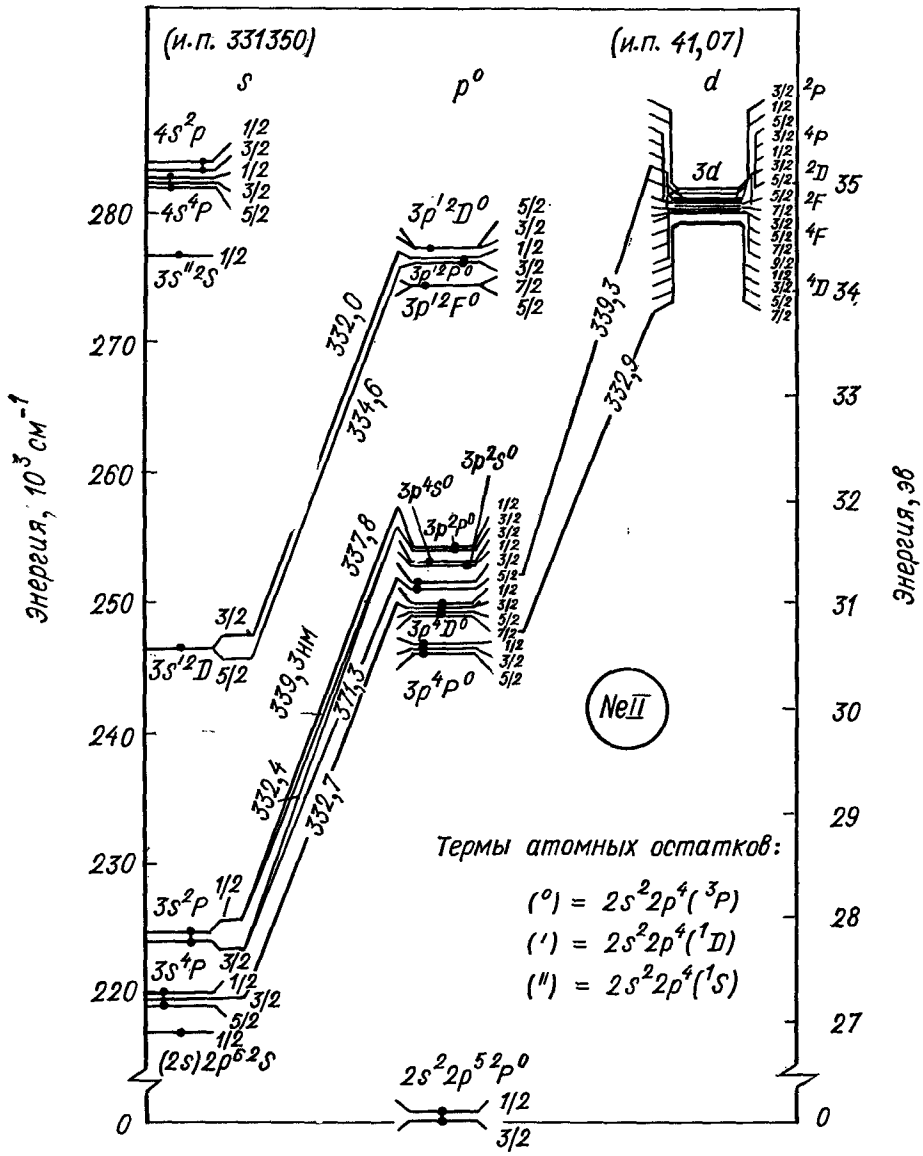


Рис. 33.25. Схема лазерных переходов в NeII [3].

Продолжение табл. 33.2

Группа, элемент	Длина волны, мкм	Измеренное значение, мкм	Ион	Уровни: верхний—нижний	Возбуждение
0	0,235796	0,235800±06	Ne IV	$(^3P)\,3p\,{}^4D^0_{3/2} - (^3P)\,3s\,{}^4P_{5/2}$	—
Неон (рис. 33.25)	0,247340	0,247350±06	Ne III?	—	—
	0,267790	0,267798±06	Ne III	$(^4S^0)\,3p\,{}^3P_{2,0} - (^4S^0)\,3s\,{}^3S^0_1$	—
	0,267864	0,267868±06	Ne III	$(^4S^0)\,3p\,{}^3P_1 - (^4S^0)\,3s\,{}^3S^0_1$	—
	0,277765	0,277750±50	Ne III	$(^2D^0)\,3p\,{}^3D_3 - (^2D^0)\,3s\,{}^3D^0_3$	—
	0,286688	0,286688±06	Ne	—	—
	0,331975	0,331984±06	Ne II	$(^1D)\,3p\,{}^2P^0_{1/2} - (^1D)\,3s\,{}^2D_{3/2}$	—

Группа, элемент	Длина волны, *мкм*	Измеренное значение, *мкм*	Ион	Уровни: верхний—нижний	Возбуждение
0	*0,332377	0,332374±05	Ne II	$(^3P)\,3p\,{}^2P^0_{3/2} - (^3P)\,3s\,{}^2P_{3/2}$	непр.
Неон (рис. 33.25)	0,332437	0,332437±10	Ne	—	—
	0,332717	0,332750±50	Ne II	$(^3P)\,3p\,{}^4D^0_{3/2} - (^3P)\,3s\,{}^4P_{3/2}$	—
	0,332923	0,332902±10	Ne II	$(^3P)\,3d\,{}^4D_{7/2} - (^3P)\,3p\,{}^4D^0_{7/2}$	—
	0,333114	0,333107±10	Ne III	$(^2P^0)\,3p\,{}^3D_2 - (^2P^0)\,3s\,{}^1P^0_1$	—
	*0,334552	0,334550±05	Ne II	$(^1D)\,3p\,{}^2P^0_{3/2} - (^1D)\,3s\,{}^2D_{5/2}$	непр.
	*0,337830	0,337826±05	Ne II	$(^3P)\,3p\,{}^2P^0_{1/2} - (^3P)\,3s\,{}^2P_{1/2}$	»
	*0,339286	0,339286±06	Ne II	$(^3P)\,3p\,{}^2P^0_{3/2} - (^3P)\,3s\,{}^2P_{1/2}$	»
	0,339320	0,339340±10	Ne II	$(^3P)\,3d\,{}^2D_{3/2} - (^3P)\,3p\,{}^2D^0_{5/2}$	—
	*0,371309	0,371300±100	Ne II	$(^3P)\,3p\,{}^2D^0_{5/2} - (^3P)\,3s\,{}^2P_{3/2}$	непр.
Аргон (рис. 33.26 и рис. 33.27)	0,262493	0,262490±06	Ar IV	$(^1D)\,4p\,{}^2D^0_{5/2} - (^1D)\,4s\,{}^2D_{5/2}$	—
	0,275392	0,275391±06	Ar III?	—	—
	0,288416	0,288424±06	Ar III	$(^2D^0)\,4p\,{}^3P_2 - (^2D^0)\,4s\,{}^3D^0_3$	—
	*0,291300	0,291292±06	Ar IV	$(^3P)\,4p\,{}^2D^0_{3/2} - (^3P)\,4s\,{}^2P_{3/2}$	—
	*0,292627	0,292624±06	Ar IV	$(^3P)\,4p\,{}^2D^0_{3/2} - (^3P)\,4s\,{}^2P_{1/2}$	—
	0,300266	0,300264±06	Ar	—	—
	0,302405	0,302400±50	Ar III	$(^2P^0)\,4p\,{}^3D_3 - (^2P^0)\,4s\,{}^3P^0_2$	—
	0,305484	0,305480±50	Ar III	$(^2P^0)\,4p\,{}^3D_2 - (^2P^0)\,4s\,{}^3P^0_1$	—
	*0,333613	0,333621±06	Ar III	$(^2D^0)\,4p\,{}^3F_4 - (^2D^0)\,4s\,{}^3D^0_3$	непр.
	*0,334472	0,334479±06	Ar III	$(^2D^0)\,4p\,{}^3F_3 - (^2D^0)\,4s\,{}^3D^0_2$	»
	*0,335849	0,335852±06	Ar III	$(^2D^0)\,4p\,{}^3F_2 - (^2D^0)\,4s\,{}^3D^0_1$	»
	*0,351112	0,351113±06	Ar III	$(^4S^0)\,4p\,{}^3P_2 - (^4S^0)\,4s\,{}^3S^0_1$	»
	0,351418	0,351415±06	Ar III	$(^4S^0)\,4p\,{}^3P_1 - (^4S^0)\,4s\,{}^3S^0_1$	»
	0,357661	0,357690±50	Ar II	$(^3P)\,4d\,{}^4F_{7/2} - (^3P)\,4p\,{}^4D^0_{5/2}$	—
	*0,363789	0,363786±04	Ar III	$(^2D^0)\,4p\,{}^1F_3 - (^2D^0)\,4s\,{}^1D^0_2$	непр.
	0,37052	0,370520±50	Ar	—	—
	0,379532	0,379528±06	Ar III	$(^2P^0)\,4p\,{}^3D_3 - (^2P^0)\,3d\,{}^3P^0_2$	непр.
	0,385829	0,385826±06	Ar III	$(^2P^0)\,4p\,{}^3D_2 - (^2P^0)\,3d\,{}^3P^0_1$	»
	0,40886	0,408860±20	Ar	—	»
	0,414671	0,414660±04	Ar III	$(^2D^0)\,4p\,{}^3P_2 - (^2P^0)\,4s\,{}^3P^0_2$	»
	*0,418298	0,418292±06	Ar III?	—	»
	0,437075	0,437073±06	Ar II	$(^1D)\,4p\,{}^2D^0_{3/2} - (^3P)\,3d\,{}^2D_{3/2}$	»
	0,438375	0,438360±60	Ar II	$(^3P)\,4p\,{}^4S^0_{3/2} - (^3P)\,4s\,{}^2P_{3/2}$	—
	0,448181	0,448200±100	Ar II	$(^1D)\,4p\,{}^2D^0_{5/2} - (^3P)\,3d\,{}^2D_{5/2}$	—
	0,454505	0,454504±10	Ar II	$(^3P)\,4p\,{}^2P^0_{3/2} - (^3P)\,4s\,{}^2P_{3/2}$	—

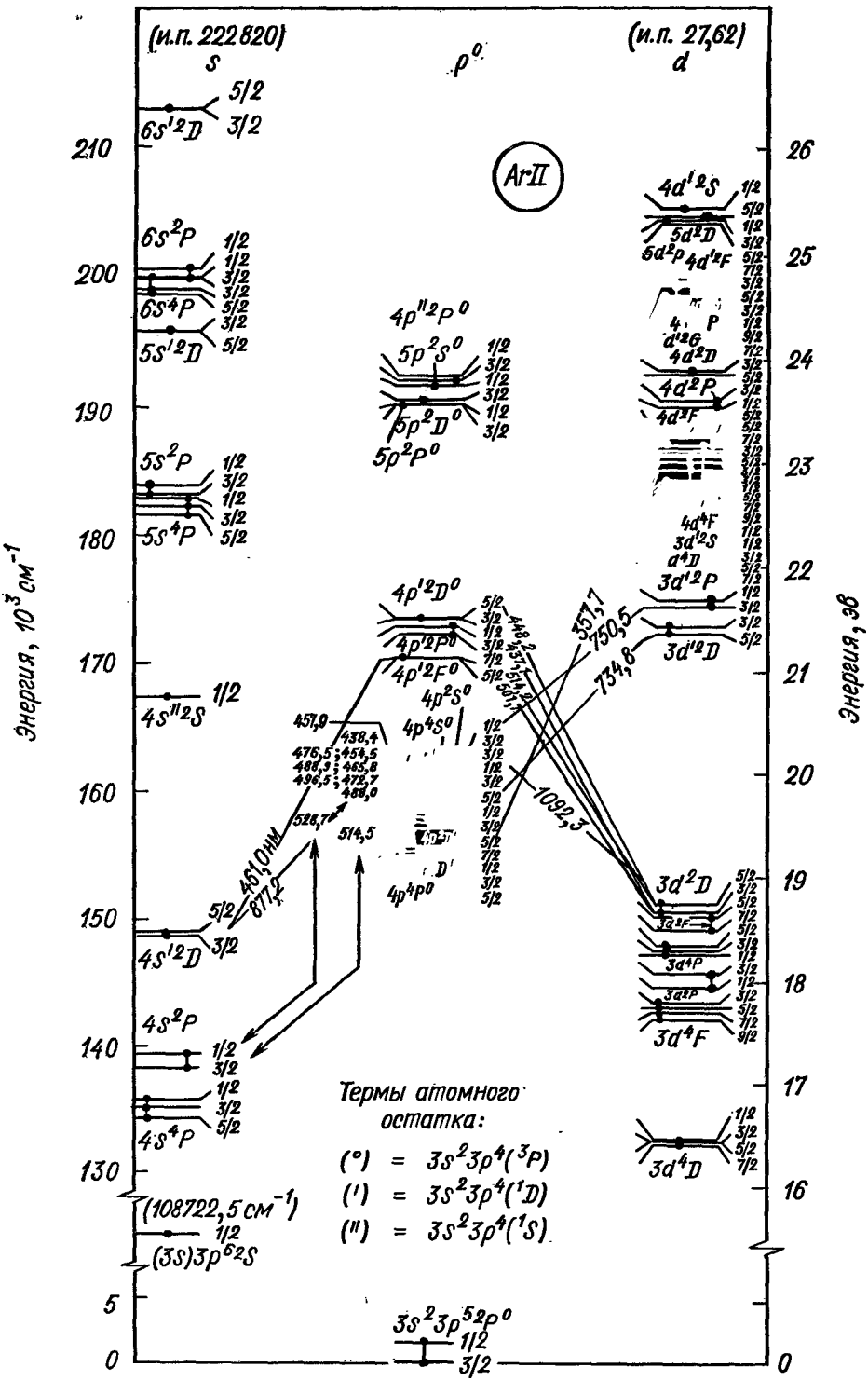


Рис. 33.26. Схема лазерных переходов в Ar II [3].

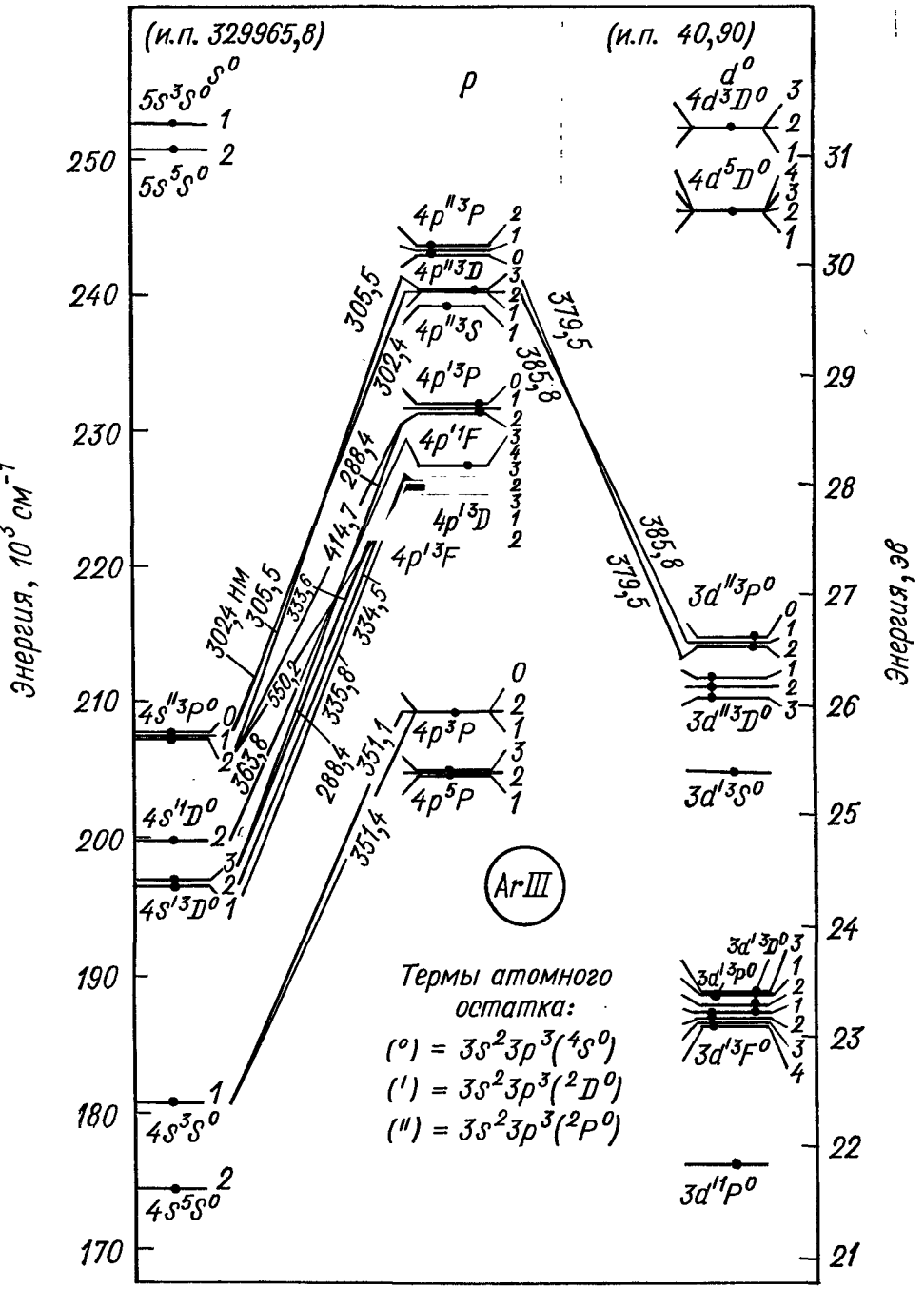


Рис. 33.27. Схема лазерных переходов в Ar III [3].

Группа, элемент	Длина волны, *мкм*	Измеренное значение, *мкм*	Ион	Уровни: верхний—нижний	Возбуждение
0					
Аргон (рис. 33.26 и рис. 33.27)	*0,457935	0,457936±16	Ar II	$(^3P)\,4p\ ^2S^0_{1/2} - (^3P)\,4s\ ^2P_{1/2}$	—
	0,460956	0,460957±10	Ar II	$(^1D)\,4p\ ^2F^0_{7/2} - (^1D)\,4s\ ^2D_{5/2}$	—
	0,465789	0,465795±02	Ar II	$(^3P)\,4p\ ^2P^0_{1/2} - (^3P)\,4s\ ^2P_{3/2}$	непр.
	0,472686	0,472689±04	Ar II	$(^3P)\,4p\ ^2D^0_{3/2} - (^3P)\,4s\ ^2P_{3/2}$	»
	*0,476486	0,476488±04	Ar II	$(^3P)\,4p\ ^2P^0_{3/2} - (^3P)\,4s\ ^2P_{1/2}$	»
	*0,487986	0,487986±04	Ar II	$(^3P)\,4p\ ^2D^0_{5/2} - (^3P)\,4s\ ^2P_{3/2}$	»
	0,488903	0,488906±06	Ar II	$(^3P)\,4p\ ^2P^0_{1/2} - (^3P)\,4s\ ^2P_{1/2}$	»
	*0,496507	0,496509±02	Ar II	$(^3P)\,4p\ ^2D^0_{3/2} - (^3P)\,4s\ ^2P_{1/2}$	»
	0,49928	0,499255±05	Ar	—	—
	*0,501716	0,501717±02	Ar II	$(^1D)\,4p\ ^2F^0_{5/2} - (^3P)\,3d\ ^2D_{3/2}$	непр.
	0,514179	0,514180±05	Ar II	$(^1D)\,4p\ ^2F^0_{7/2} - (^3P)\,3d\ ^2D_{5/2}$	»
	*0,514532	0,514533±02	Ar II	$(^3P)\,4p\ ^4D^0_{5/2} - (^3P)\,4s\ ^2P_{3/2}$	»
	*0,528690	0,528700±100	Ar II	$(^3P)\,4p\ ^4D^0_{3/2} - (^3P)\,4s\ ^2P_{1/2}$	»
	0,550220	0,550220±50	Ar III	$(^2D^0)\,4p\ ^3D_3 - (^2P^0)\,4s\ ^3P^0_2$	—
	0,673000	0,673000±50	Ar	—	—
	0,734805	0,734804±05	Ar II	$(^1D)\,3d\ ^2D_{5/2} - (^3P)\,4p\ ^2D^0_{5/2}$	—
	0,750514	0,750508±05	Ar II	$(^1D)\,3d\ ^2P_{3/2} - (^3P)\,4p\ ^2S^0_{1/2}$	—
	0,877186	0,878000±300	Ar II	$[(^3P)\,4p\ ^2P^0_{3/2} - (^1D)\,4s\ ^2D_{3/2}]$	—
	*1,092344	1,092300±100	Ar II	$(^3P)\,4p\ ^2P^0_{3/2} - (^3P)\,3d\ ^2D_{5/2}$	непр.
Криптон (рис. 33.28 и рис. 33.29)	0,264927	0,264941±06	Kr II?	$?\ [(^3P)\,5f\ ^2D^0_{3/2} - (^3P)\,4d\ ^4P_{3/2}]$	—
	0,266441	0,266450±06	Kr II?	$?\ [(^1D)\,5d\ ^2P_{3/2} - (^3P)\,5p\ ^4D^0_{1/2}]$	—
	0,274139	0,274151±06	Kr	—	—
	0,304970	0,304974±06	Kr	—	—
	0,312438	0,312443±06	Kr III	$(^2D^0)\,5p\ ^1D_2 - (^2D^0)\,5s\ ^1D^0_2$	—
	0,323951	0,323943±06	Kr III	$(^2P^0)\,5p\ ^1D_2 - (^2P^0)\,5s\ ^1P^0_1$	—
	0,337496	0,337500±50	Kr III	$(^2P^0)\,5p\ ^3D_3 - (^2P^0)\,5s\ ^3P^0_2$	непр.
	*0,350742	0,350742±06	Kr III	$(^4S^0)\,5p\ ^3P_2 - (^4S^0)\,5s\ ^3S^0_1$	»
	*0,356423	0,356420±06	Kr III	$(^4S^0)\,5p\ ^3P_1 - (^4S^0)\,5s\ ^3S^0_1$	»
	0,377134	0,377134±05	Kr II	$(^3P)\,5d\ ^4P_{1/2} - (^3P)\,5p\ ^4P^0_{3/2}$	—
	*0,406737	0,406736±06	Kr III	$(^2D^0)\,5p\ ^1F_3 - (^2D^0)\,5s\ ^1D^0_2$	непр.
	*0,413133	0,413138±06	Kr III	$(^4S^0)\,5p\ ^5P_2 - (^4S^0)\,5s\ ^3S^0_1$	»
	0,415444	0,415445±04	Kr III	$(^2D^0)\,5p\ ^3F_3 - (^2D_0)\,5s\ ^1D^0_2$	»
	0,417179	0,417181±10	Kr III	$(^4S^0)\,5p\ ^5P_1 - (^4S^0)\,5s\ ^3S^0_1$	—
	0,422658	0,422651±06	Kr III	$(^2D^0)\,5p\ ^3F_2 - (^2D^0)\,4d\ ^3D^0_1$	—
	0,431781	0,431800±100	Kr II	$(^3P)\,6s\ ^4P_{5/2} - (^3P)\,5p\ ^4P^0_{5/2}$	послесв.
	0,438654	0,438700±100	Kr II	$(^3P)\,6s\ ^4P_{5/2} - (^3P)\,5p\ ^4P^0_{3/2}$	—
	0,444329	0,444328±04	Kr III	$(^2D^0)\,5p\ ^3D_2 - (^2D^0)\,4d\ ^3D^0_1$	—
	0,457720	0,457720±10	Kr II	$(^1D)\,5p\ ^2F^0_{7/2} - (^1D)\,5s\ ^2D_{5/2}$	непр.
	0,458285	0,458300±100	Kr II	$(^3P)\,6s\ ^4P_{3/2} - (^3P)\,5p\ ^4D^0_{5/2}$	послесв.
	0,461528	0,461520±10	Kr II	$(^3P)\,5p\ ^2P^0_{3/2} - (^3P)\,5s\ ^2P_{3/2}$	—
	*0,461915	0,461917±10	Kr II	$(^3P)\,5p\ ^2D^0_{5/2} - (^3P)\,5s\ ^2P_{3/2}$	непр.

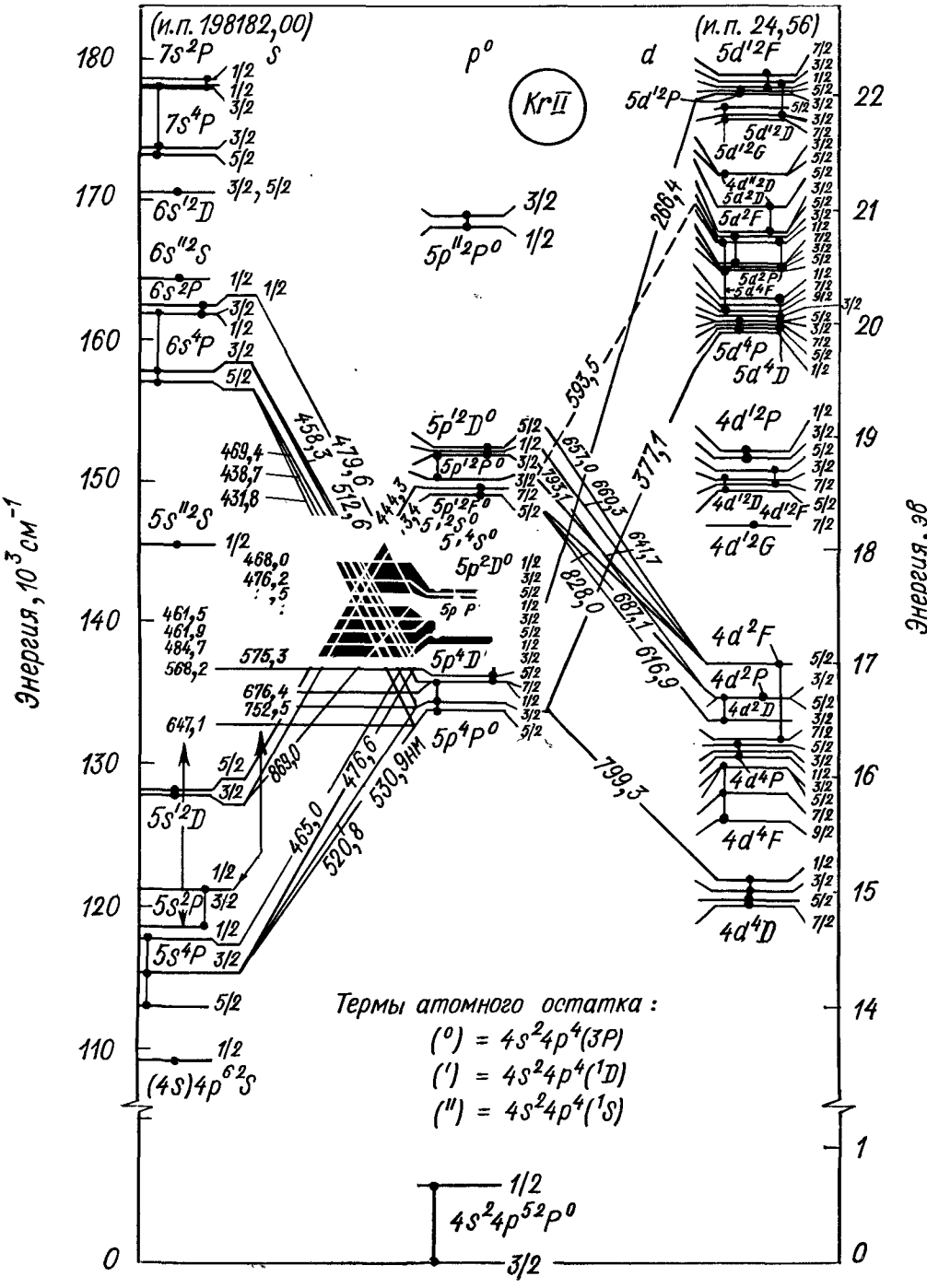


Рис. 33.28. Схема лазерных переходов в Kr II [3].

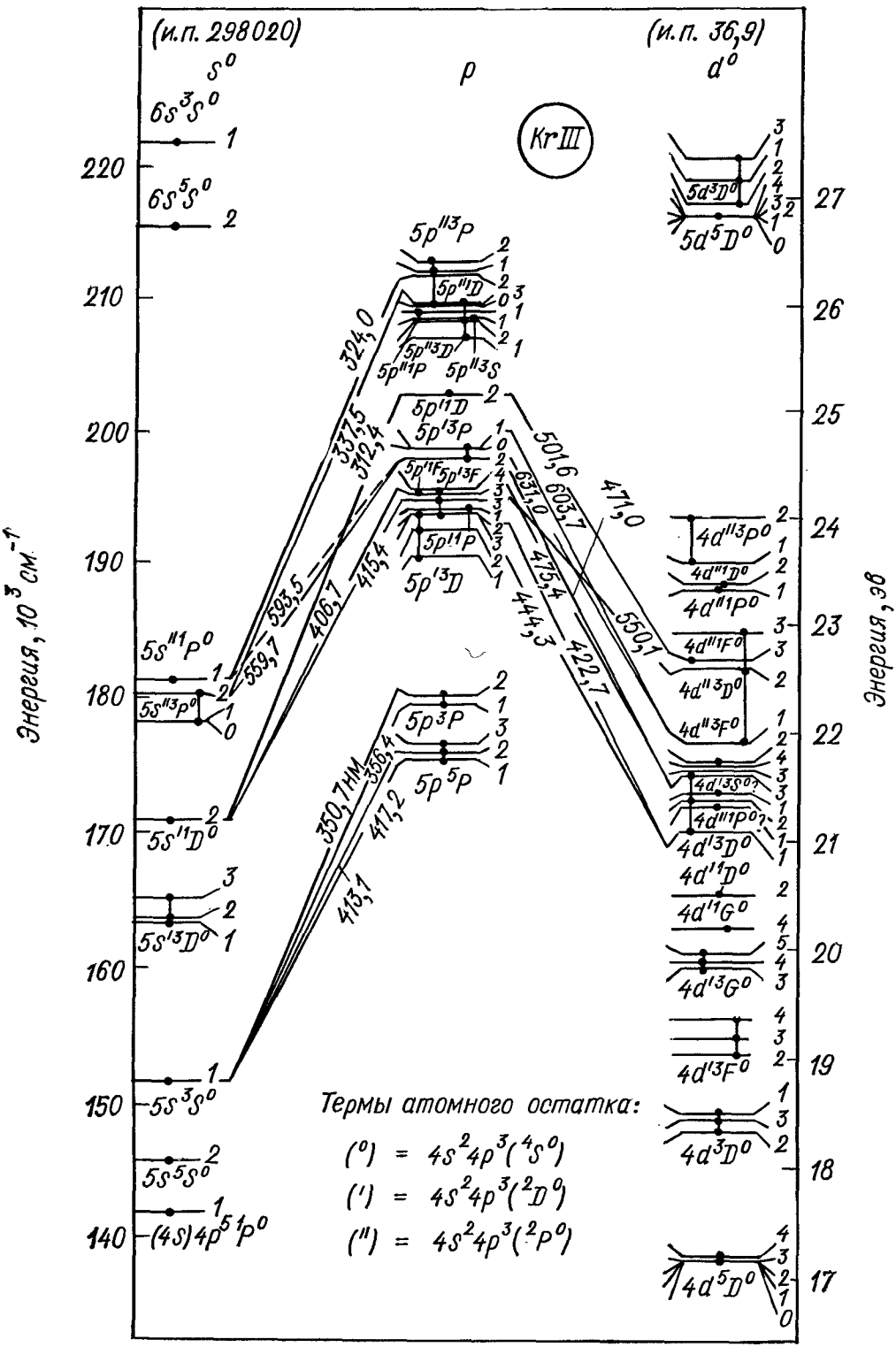


Рис. 33.29. Схема лазерных переходов в Kr III [3].

Группа, элемент	Длина волны, *мкм*	Измеренное значение, *мкм*	Ион	Уровни: верхний—нижний	Возбуждение
0 Криптон (рис. 33.28 и рис. 33.29)	0,463386	0,463392±06	Kr II	$(^1D)\,5p\,{}^2F^0_{5/2} - (^1D)\,5s\,{}^2D_{3/2}$	непр.
	0,465016	0,465016±10	Kr II	$(^3P)\,5p\,{}^2P^0_{1/2} - (^3P)\,5s\,{}^4P_{1/2}$	—
	0,468041	0,468045±06	Kr II	$(^3P)\,5p\,{}^2S^0_{1/2} - (^3P)\,5s\,{}^2P_{1/2}$	непр.
	0,469444	0,469500±100	Kr II	$(^3P)\,6s\,{}^4P_{5/2} - (^3P)\,5p\,{}^4D^0_{7/2}$	послесв.
	0,471048	0,471030±60	Kr III	$(^2D^0)\,5p\,{}^3F_4 - (^2D^0)\,4d\,{}^3D^0_3$	—
	0,475448	0,475450±30	Kr III	$(^2D^0)\,5p\,{}^1F_3 - (^2D^0)\,4d\,{}^3D^0_3$	—
	*0,476243	0,476244±06	Kr II	$(^3P)\,5p\,{}^2D^0_{3/2} - (^3P)\,5s\,{}^2P_{1/2}$	непр.
	0,476573	0,476571±10	Kr II	$(^3P)\,5p\,{}^4D^0_{5/2} - (^3P)\,5s\,{}^4P_{3/2}$	»
	0,479633	0,479630±60	Kr II	$(^3P)\,6s\,{}^2P_{1/2} - (^3P)\,5p\,{}^4S^0_{3/2}$	—
	0,482517	0,482518±06	Kr II	$(^3P)\,5p\,{}^4S^0_{3/2} - (^3P)\,5s\,{}^2P_{1/2}$	непр.
	*0,484659	0,484666±06	Kr II	$(^3P)\,5p\,{}^2P^0_{1/2} - (^3P)\,5s\,{}^2P_{3/2}$	»
	0,501645	0,501640±10	Kr III	$(^2D^0)\,5p\,{}^1D_2 - (^2P^0)\,4d\,{}^1F^0_3$	»
	0,502240	0,502200±100	Kr II	$(^3P)\,5p\,{}^4D^0_{3/2} - (^3P)\,5s\,{}^2P_{3/2}$	»
	0,503747	0,503750±60	Kr II	—	—
	0,512571	0,512600±100	Kr II	$(^3P)\;6s\,{}^4P_{3/2} - (^3P)\,5p\,{}^4D^0_{3/2}$	послесв.
	*0,520831	0,520832±04	Kr II	$(^3P)\,5p\,{}^4P^0_{3/2} - (^3P)\,5s\,{}^4P_{3/2}$	непр.
	0,521792	0,521820±40	Kr II	$(^3P)\,5p\,{}^4D^0_{1/2} - (^3P)\,5s\,{}^2P_{1/2}$	—
	*0,530865	0,530868±04	Kr II	$(^3P)\,5p\,{}^4P^0_{5/2} - (^3P)\,5s\,{}^4P_{3/2}$	непр.
	0,550143	0,550150±50	Kr III	$(^2D^0)\,5p\,{}^3F_3 - (^2P^0)\,4d\,{}^3D^0_2$	—
	0,559732	0,559770±100	Kr III	$(^2D^0)\,5p\,{}^3P_2 - (^2P^0)\,5s\,{}^3P^0_2$	—
	*0,568188	0,568192±04	Kr II	$(^3P)\,5p\,{}^4D^0_{5/2} - (^3P)\,5s\,{}^2P_{3/2}$	непр.
	0,575298	0,575340±50	Kr II	$(^3P)\,5p\,{}^4D^0_{3/2} - (^3P)\,5s\,{}^2P_{1/2}$	»
	0,593503	0,593530±60	Kr III	$(^2D^0)\,5p\,{}^3P_2 - (^2P^0)\,5s\,{}^1P^0_1$	—
				или	
			Kr II	$(^3P)\,5d\,{}^4F_{3/2} - (^1D)\,5p\,{}^2P^0_{3/2}$	
	0,603716	0,603760±80	Kr III	$(^2D^0)\,5p\,{}^3P_1 - (^2P^0)\,4d\,{}^3D^0_1$	—
	0,6072	0,607200±100	Kr	—	—
	0,616880	0,616880±50	Kr II	$(^1D)\,5p\,{}^2F^0_{5/2} - (^3P)\,4d\,{}^2D_{3/2}$	непр.
	0,631022	0,631030±80	Kr III	$(^2D^0)\,5p\,{}^3P_2 - (^2P^0)\,4d\,{}^3D^0_1$	—
	0,631276	0,631260±80	Kr	—	непр.
	0,641661	0,641700±100	Kr II	$(^1D)\,5p\,{}^2P^0_{3/2} - (^3P)\,4d\,{}^2P_{3/2}$	—
	*0,647088	0,647100±50	Kr II	$(^3P)\,5p\,{}^4P^0_{5/2} - (^3P)\,5s\,{}^2P_{3/2}$	непр.
	0,657012	0,657000±50	Kr II	$(^1D)\,5p\,{}^2D^0_{5/2} - (^3P)\,4d\,{}^2F_{5/2}$	»
	0,660293	0,660280±80	Kr III	$(^2D^0)\,5p\,{}^3P_2 - (^2P^0)\,4d\,{}^1F^0_3$	»
	*0,676442	0,676457±10	Kr II	$(^3P)\,5p\,{}^4P^0_{1/2} - (^3P)\,5s\,{}^2P_{1/2}$	»
	0,687084	0,687096±10	Kr II	$(^1D)\,5p\,{}^2F^0_{5/2} - (^3P)\,4d\,{}^2P_{3/2}$	»
	0,743572	0,743560	Kr II	$(^1D)\,4d\,{}^2D_{5/2} - (^3P)\,5p\,{}^4D^0_{5/2}$	—
	0,752546	0,752550±10	Kr II	$(^3P)\,5p\,{}^4P^0_{3/2} - (^3P)\,5s\,{}^2P_{1/2}$	непр.
	0,793145	0,793140	Kr II	$(^1D)\,5p\,{}^2F^0_{7/2} - (^3P)\,4d\,{}^2F_{5/2}$	»
	*0,799322	0,799300±50	Kr II	$(^3P)\,5p\,{}^4P^0_{3/2} - (^3P)\,4d\,{}^4D_{1/2}$	»
	0,828037	0,828030±10	Kr II	$(^1D)\,5p\,{}^2F^0_{5/2} - (^3P)\,4d\,{}^2F_{5/2}$	»
	0,847331	0,847300	Kr II	$(^1D)\,4d\,{}^2D_{3/2} - (^3P)\,5p\,{}^4D^0_{3/2}$	—

Группа, элемент	Длина волны, *мкм*	Измеренное значение, *мкм*	Ион	Уровни: верхний—нижний	Возбуждение
0	0,858778	0,858900±300	Kr III?	—	—
Криптон (рис. 33.28 и рис. 33 29)	0,869011	0,869010	Kr II	$(^3P)\,5p\ ^2P^0_{1/2} - (^1D)\,5s\ ^2D_{3/2}$	непр.
	0,897859	0,897840	Kr II	$(^1D)\,4d\ ^2D_{5/2} - (^3P)\,5p\ ^4D^0_{3/2}$	—
	1,065950	1,065960	Kr II	$(^1D)\,4d\ ^2D_{5/2} - (^3P)\,5p\ ^2P^0_{3/2}$	—
	1,329380	1,329500	Kr II	$(^1D)\,4d\ ^2D_{5/2} - (^3P)\,5p\ ^2D^0_{3/2}$	—
Ксенон (рис.33.30 и рис. 33.31)	0,247739	0,247739±03	Xe	—	—
	0,269184	0,269184±03	Xe	—	—
	0,298385	0,298370±50	Xe III	$(^2P^0)\,6p\ 3_2 - (^2P^0)\,6s\ ^3P^0_0$	—
	0,307976	0,307976±03	Xe	—	—
	0,324684	0,324694±06	Xe III	$(^2P^0)\,6p\ ^3D_3 - (^2D^0)\,5d\ ^3D^0_3$	—
	0,330604	0,330592±06	Xe IV?	—	—
	*0,333090	0,333090±03	Xe IV	—	непр.
	0,334980	0,334980±03	Xe	—	—
	*0,345424	0,345423±06	Xe III	$(^2D^0)\,6p\ ^1D_2 - (^2D^0)\,6s\ ^1D^0_2$	непр.
	0,348331	0,348331±03	Xe	—	—
	0,354233	0,354231±05	Xe III	$(^2D^0)\,6p\ ^3P_2 - (^2D^0)\,6s\ ^3D^0_3$	—
	0,359660	0,359600±100	Xe III	—	непр.
	0,364551	0,364551±03	Xe	—	—
	0,366920	0,366920±03	Xe	—	непр.
	0,374571	0,374573±06	Xe III	$(^2D^0)\,6p\ ^1D_2 - (^2D^0)\,5d\ ^1D^0_2$	»
	0,375994	0,375994±03	Xe	—	—
	*0,378097	0,378099±06	Xe III	$(^4S^0)\,6p\ ^3P_2 - (^4S^0)\,6s\ ^3S^0_1$	непр.
	0,380329	0,380329±03	Xe	—	—
	0,3841	0,384100±100	Xe III или Xe III	$(^2D^0)\,6p\ ^3F_2 - (^2D^0)\,6s\ ^3D^0_2$ или $(^2D^0)\,6p\ ^3P_1 - (^2D^0)\,5d\ ^3D^0_2$	непр.
	0,397301	0,397301±03	Xe	—	—
	0,3993	0,399300±100	Xe III или Xe III	$(^2D^0)\,6p\ ^3P_1 - (^2D^0)\,6s\ ^1D^0_2$ или $[(^4S^0)\,6p\ ^5P_2 - (^4S^0)\,5d\ ^3D^0_1]$	непр.
	0,405005	0,404990±20	Xe III	$(^4S^0)\,6p\ ^3P_1 - (^4S^0)\,6s\ ^3S^0_1$	—
	*0,406041	0,406048±06	Xe III	$(^2P^0)\,6p\ 3_2 - (^2P^0)\,5d\ 25^0_1$	непр.
	0,414572	0,414530±60	Xe III	$(^2D^0)\,6p\ ^3D_2 - (^2D^0)\,5d\ ^3D^0_1$	»
	*0,421401	0,421405±06	Xe III	$(^2D^0)\,6p\ ^3P_2 - (^2D^0)\,5d\ ^3D^0_3$	»
	*0,424024	0,424026±10	Xe III	$(^2D^0)\,6p\ ^1D_2 - (^2P^0)\,5d\ 17^0_3$	»
	*0,427259	0,427260±06	Xe III	$(^2D^0)\,6p\ ^3F_4 - (^2D^0)\,5d\ ^3D^0_3$	»
	0,428588	0,428592±06	Xe III	$(^2D^0)\,6p\ ^3D_3 - (^2D^0)\,6s\ ^1D^0_2$	—
	0,429639	0,429633±05	Xe II	$(^3P)\,7s\ ^3P_{1/2} - (^3P)\,6p\ ^4P^0_{3/2}$	—
	0,430575	0,430575±03	Xe IV	$(^2D^0)\,6p\ ^3D_3 - (^2D^0)\,5d\ ^3D^0_3$	—
	0,441308	0,441300±60	Xe	—	—
	0,443415	0,443422±10	Xe III	$(^2D^0)\,6p\ ^3F_2 - (^2D^0)\,5d\ ^3D^0_1$	непр.
	0,450345	0,450350±60	Xe III	$(^2P^0)\,6p\ 3_2 - (^2P^0)\,5d\ 27^0_2$	—

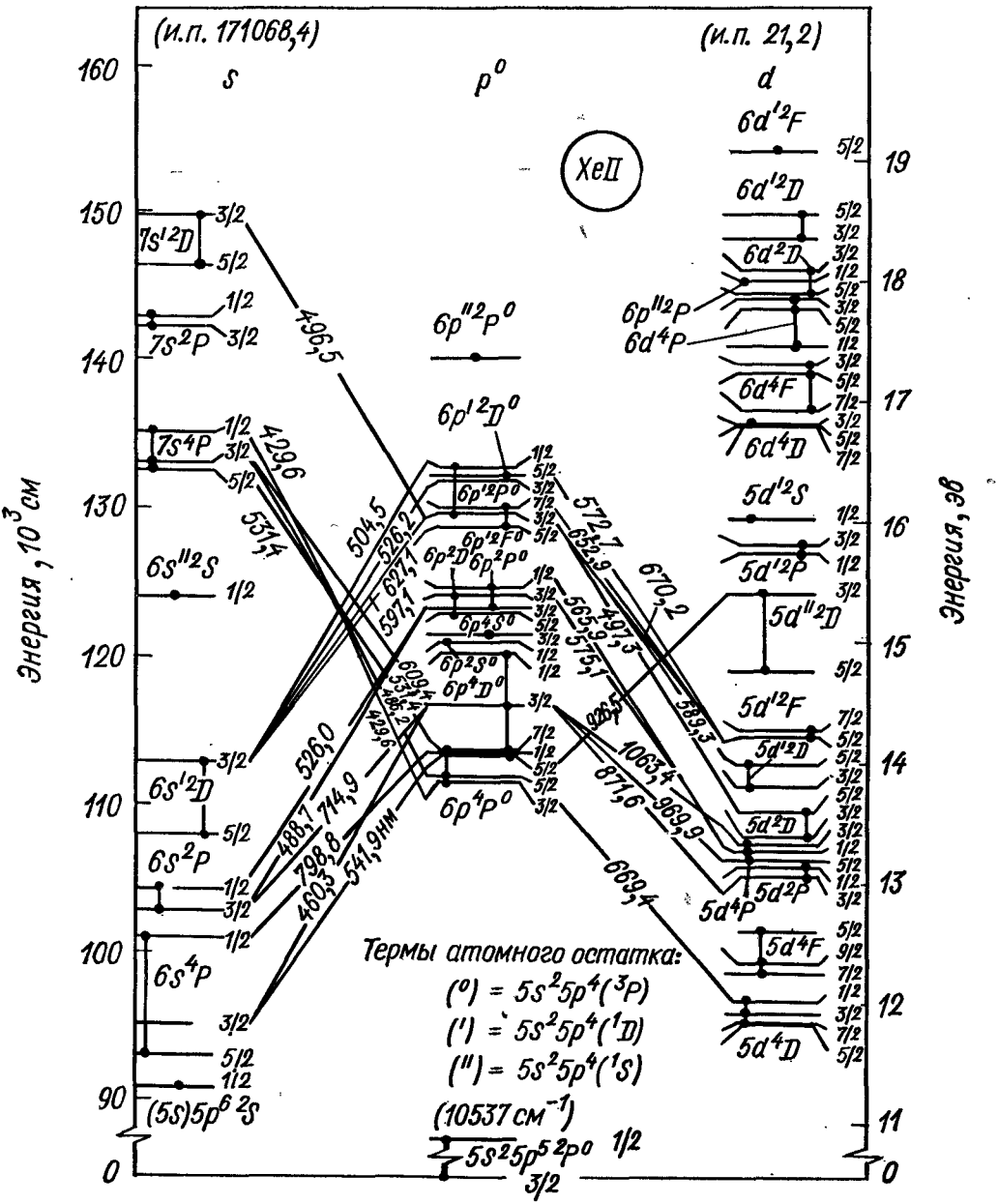


Рис. 33.30. Схема лазерных переходов в Xe II [3].

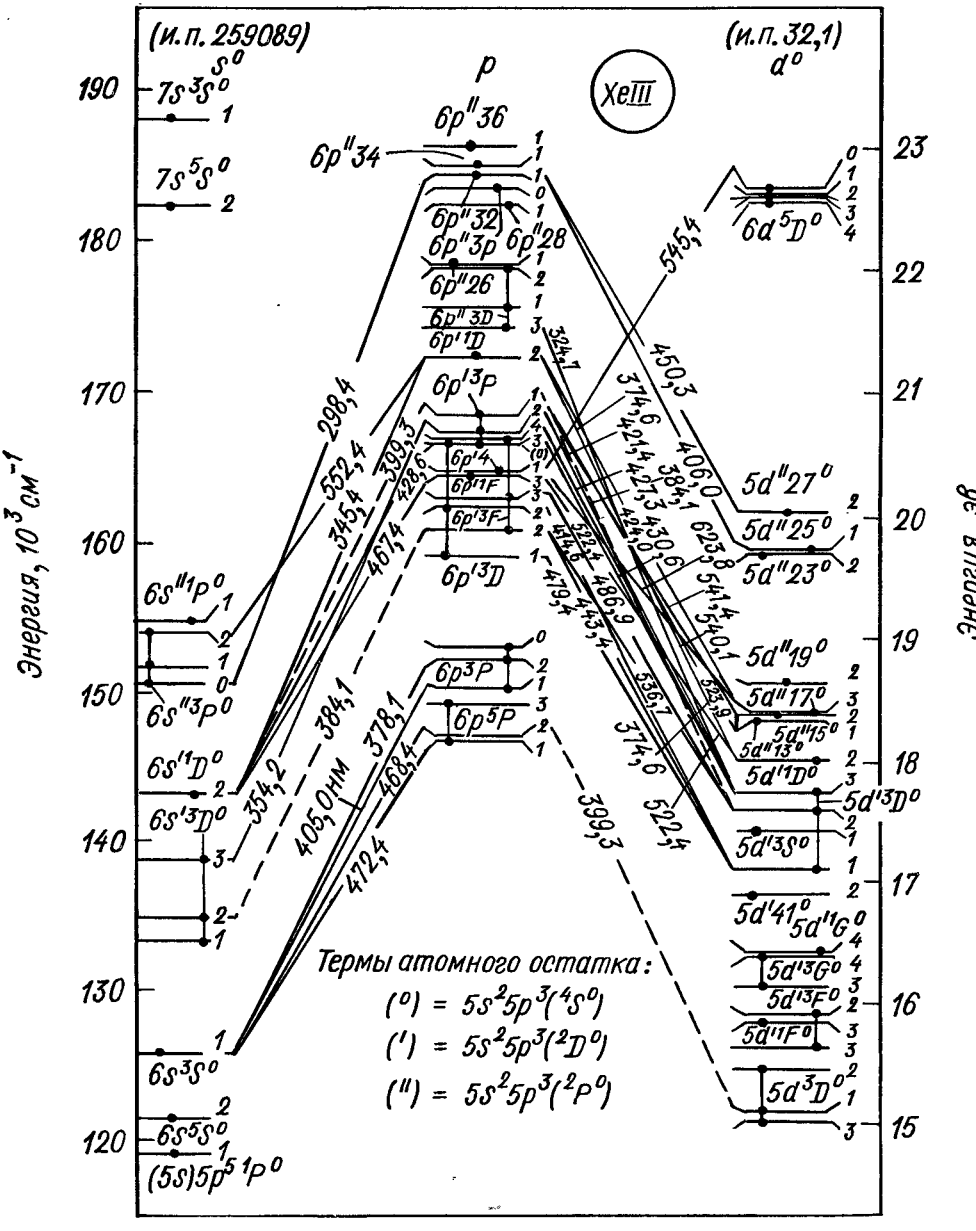


Рис. 33.31. Схема лазерных переходов в Xe III [3].

Группа, элемент	Длина волны, *мкм*	Измеренное значение, *мкм*	Ион	Уровни: верхний—нижний	Возбуждение
0 Ксенон (рис. 33-30 и рис. 33.31)	0,455874	0,455874±06	Xe IV	—	—
	*0,460303	0,460302±04	Xe II	$(^3P)\,6p\ ^4D^0_{3/2} - (^3P)\,6s\ ^4P_{3/2}$	непр.
	0,467368	0,467373±06	Xe III	$(^2D^0)\,6p\ ^1F_3 - (^2D^0)\,6s\ ^1D^0_2$	»
	0,468354	0,468357±06	Xe III	$(^4S^0)\,6p\ ^5P_2 - (^4S^0)\,6s\ ^3S^0_1$	»
	0,472357	0,472310±60	Xe III	$(^4S^0)\,6p\ ^5P_1 - (^4S^0)\,6s\ ^3S^0_1$	—
	0,474894	0,474894±03	Xe III?	—	непр.
	0,479448	0,479450±60	Xe III	$(^2D^0)\,6p\ ^3D_1 - (^2D^0)\,5d\ ^3D^0_1$	—
	0,486249	0,486200±100	Xe II	$(^3P)\,7s\ ^4P_{5/2} - (^3P)6p\ ^4P^0_{5/2}$	непр.
	0,486946	0,486948±06	Xe III	$(^2D^0)\,6p\ ^3F_3 - (^2D^0)\,5d\ ^3D^0_2$	»
	0,488730	0,488700±100	Xe II	$[(^3P)\,6p\ ^2P^0_{3/2} - (^2P)\,6s\ ^2P_{3/2}]$	»
	*0,495418	0,495418±03	Xe IV	—	»
	0,496508	0,496500±06	Xe II	$(^1D)\,7s\ ^2D_{3/2} - (^1D)\,6p\ ^2P^0_{3/2}$	»
	0,497270	0,497271±05	Xe II	$(^1D)\,6p\ ^2P^0_{3/2} - (^3P)\,5d\ ^2D_{5/2}$	—
	*0,500780	0,500780±03	Xe IV	—	непр.
	0,504492	5,504489±06	Xe II	$(^1D)\,6p\ ^2P^0_{1/2} - (^1D)\,6s\ ^2D_{3/2}$	»
	0,515704	0,515704±06	Xe IV V?	—	—
	*0,515908	0,515908±03	Xe IV	—	непр.
	0,522364	0,522340±60	Xe III	$(^2D^0)\,6p\ ^1F_3 - (^2D^0)\,5d\ ^1D^0_2$	—
	*0,523893	0,523889±06	Xe III	$(^2D^0)\,6p\ ^3P_2 - (^2P^0)\,5d\ 13^0_1$	непр.
	0,525630	0,525650±60	Xe	—	—
	*0,526017	0,526017±03	Xe IV	—	непр.
	0,526043	0,526043±03	Xe II	$(^3P)\,6p\ ^2P^0_{3/2} - (^3P)\,6s\ ^2P_{1/2}$	»
	*0,526195	0,526150±100	Xe II	$(^1D)\,6p\ ^2D^0_{3/2} - (^1D)\,6s\ ^2D_{3/2}$	»
	0,531389	0,531400±100	Xe II	$(^3P)\,7s\ ^4P_{5/2} - (^3P)\,6p\ ^4D^0_{7/2}$	послесв.
	0,534334	0,534334±05	Xe IV, V?	—	—
	*0,535290	0,535290±03	Xe IV	—	непр.
	0,536706	0,536700±60	Xe III	$(^2D^0)\,6p\ ^3F_2 - (^2D^0)\,5d\ ^3D^0_2$	—
	*0,539460	0,539460±03	Xe IV	—	непр.
	0,540100	0,540090±30	Xe III	$(^2D^0)\,6p\ ^3P_2 - (^2P^0)\,5d\ 15^0_2$	—
	0,541353	0,541350±60	Xe III	$(^2D^0)\,6p\ ^3P_2 - (^2P^0)\,5d\ 17^0_3$	—
	*0,541915	0,541916±06	Xe II	$(^3P)\,6p\ ^4D^0_{5/2} - (^3P)\,6s\ ^4P_{3/2}$	непр.
	0,545433	0,545460±60	Xe III	$(^4S^0)\,6d\ ^5D^0_0 - (^2D^0)\,6p\ 4_1$	—
	0,549931	0,549931±04	Xe IV, V?	—	—
	0,552437	0,552450±50	Xe III	$(^2D^0)\,6p\ ^1D_2 - (^2P^0)\,6s\ ^3P^0_2$	непр.
	0,559235	0,559235±05	Xe IV, V?	—	—
	0,565937	0,565900±100	Xe II	$(^3P)\,6p\ ^2P^0_{1/2} - (^3P)\,5d\ ^4P_{1/2}$	непр.
	0,572690	0,572700±100	Xe II	$[(^1D)\,6p\ ^2D^0_{5/2} - (^1D)\,5d\ ^2F_{5/2}]$	»
	0,575102	0,575100±100	Xe II	$(^3P)\,6p\ ^2D^0_{3/2} - (^3P)\,5d\ ^4P_{1/2}$	»
	0,589328	0,589330±03	Xe II	$(^1D)\,6p\ ^2P^0_{3/2} - (^1D)\,5d\ ^2D_{5/2}$	—
	*0,595567	0,595567±03	Xe IV	—	—
	*0,597111	0,597112±06	Xe II	$(^1D)\,6p\ ^2P^0_{3/2} - (^1D)\,6s\ ^2D_{3/2}$	непр.
	0,609361	0,609400±100	Xe II	$(^3P)\,7s\ ^4P_{3/2} - (^3P)\,6p\ ^4D^0_{3/2}$	послесв.
	0,617619	0,617619±03	Xe	—	непр.

Группа, элемент	Длина волны, мкм	Измеренное значение, мкм	Ион	Уровни: верхний—нижний	Возбуждение
0 Ксенон (рис. 33.30 и рис. 33.31)	0,623825	0,623890±80	Xe III	$(^2D^0)\,6p\,{}^1F_3 - (^2P^0)\,5d\,17^0_3$	непр.
	*0,627081	0,627090±10	Xe II	$(^1D)\,6p\,{}^2F^0_{5/2} - (^1D)\,6s\,{}^2D_{3/2}$	»
	0,628641	0,628660±60	Xe IV, V?	—	—
	0,634318	0,634318±30	Xe IV, V?	—	—
	0,652865	0,652850±50	Xe II	$(^1D)\,6p\,{}^2F^0_{7/2} - (^1D)\,5d\,{}^2F_{5/2}$	непр.
	0,669431	0,66943	Xe II	$(^3P)\,6p\,{}^4P^0_{3/2} - (^3P)\,5d\,{}^4D_{1/2}$	»
	0,669950	0,669950±30	Xe IV, V?	—	—
	0,670225	0,670200±100	Xe II	$(^1D)\,6p\,{}^2P^0_{3/2} - (^1D)\,5d\,{}^2F_{5/2}$	непр.
	0,707234	0,70723	Xe II	$37^0_{5/2} - (^3P)\,6d\,{}^4D_{5/2}$	—
	0,714903	0,714894±60	Xe II	$(^3P)\,6p\,{}^4D^0_{3/2} - (^3P)\,6s\,{}^2P_{3/2}$	непр.
	*0,782763	0,782800±300	Xe II	$?\ 35^0_{5/2} - 16_{3/2}$	—
	*0,798800	0,798900±300	Xe II	$(^3P)\,6p\,{}^4P^0_{1/2} - (^3P)\,6s\,{}^4P_{1/2}$	—
	0,833271	0,833000±300	Xe II	$?\ 27^0_{5/2} - (^3P)\,6d\,{}^4D_{5/2}$	—
	0,844619	0,844300±300	Xe II	$?\ 27^0_{5/2} - (^3P)\,6d\,{}^4D_{3/2}$	—
	0,856688	0,856688±03	Xe	—	—
	0,858251	0,858200±300	Xe II	$?\ 31^0_{3/2} - 10_{5/2}$	—
	*0,871617	0,871400±300	Xe II	$(^3P)\,6p\,{}^4D^0_{3/2} - (^3P)\,5d\,{}^2P_{3/2}$	—
	*0,905930	0,906300±400	Xe II	$?\ 27^0_{5/2} - 16_{3/2}$	—
	0,926539	0,926500±400	Xe II	$?\ (^1S)\,5d\,{}^2D_{3/2} - (^3P)\,6p\,{}^4D^0_{5/2}$	—
	0,928854	0,928700±400	Xe II	$?\ 13^0_{1/2} - (^1D)\,5d\,{}^2S_{1/2}$	—
	*0,969859	0,969700±200	Xe II	$(^3P)\,6p\,{}^4D^0_{3/2} - (^3P)\,5d\,{}^4P_{5/2}$	—
	1,063385	1,063400±600	Xe II	$(^3P)\,6p\,{}^4D^0_{3/2} - (^3P)\,5d\,{}^4P_{3/2}$	—
	*1,0950	1 095000±600	Xe	—	—

33.3. МОЛЕКУЛЯРНЫЕ ГАЗОВЫЕ ЛАЗЕРЫ

В молекулярных газах в общем случае лазерные переходы осуществляются между различными электронно-колебательно-вращательными уровнями молекул. Это позволяет получить генерацию на значительно большем числе линий, чем в случаях нейтральных и ионизованных атомных газов.

Для накачки молекулярных газовых лазеров используются самые различные методы: электрический разряд, оптическая, химическая и другие виды накачки. Зачастую возбужденная лазерная молекула сама создается в процессе, сопровождающем тот или иной вид накачки. Основные материалы, служащие в качестве исходных для создания лазерного эффекта в различных молекулярных системах, перечислены в табл. 33.3. Список соответствующих лазерных переходов для двухатомных, трехатомных и многоатомных молекул приведен в табл. 33.4—33.6.

Для обозначения уровней молекул используется стандартная система обозначений молекулярной спектроскопии. В таблицах предполагается, если специально не оговорено, $E_{эл} = 0$.

Таблица 33.3

Вещества молекуляриых газовых лазеров [5]

Вещество	Таблица (раздел)	Лазерный переход в молекуле	Вещество	Таблица (раздел)	Лазерный переход в молекуле
BBr_3	33.4(3б)	HBr	D_2	33.4(6)	D_2, HD
BCl_3	33.4(4б)	HCl		33.4(3в)	DBr
BF_3	33.4(5б)	HF		33.4(4в)	DCl
BrCN	33.5(3б)	DCN		33.4(5в)	DF
Br_2	33.4(3а)	HBr		33.5(3в)	DCN
$CBrF_3$	33.4(5а,б)	HF	D_2O	33.5(4в)	D_2O
	33.4(5в)	DF	F_2	33.4(5а)	HF
$CClF_3$	33.4(4б)	HCl	HCN	33.5(3а)	HCN
	33.4(5а,б)	HF		33.5(3в)	$HC^{15}N$
	33.4(5в)	DF	HI	33.4(4а)	HCl
CCl_2F_2	33.4(5а,б)	HF	H_2	33.4(3)	HBr
	33.4(5в)	DF		33.4(4а,б)	HCl
CCl_3F	33.4(5б)	HF		33.4(5а,б)	HF
CD_4	33.5(3б)	DCN		33.4(6а—в)	H_2
CF_4	33.4(5а)	HF	$H_2C{=}CHCl$	33.6(4)	$H_2C{=}CHCl$
	33.4(5в)	DF	H_2O	33.4(3б)	HBr
CH_3Br	33.4(4в)	HCl		33.4(4б)	HCl
CH_3CN	33.4(3а)	HCN		33.4(5б)	HF
CH_3Cl	33.4(4в)	HCl		33.5(4а)	H_2O
	33.4(5а)	HF		33.5(4б)	$H_2{}^{18}O$
CH_3F	33.6(1)	CH_3F	H_2S	33.5(5)	H_2S
CH_4	33.4(5а)	HF	ICN	33.5(3а)	HCN
	33.4(3а)	HCN	ND_3	33.5(3б)	DCN
$(CH_3)_2NH$	33.5(3а)	HCN	NH_3	33.6(3)	NH_3
CH_3OH	33.6(2)	CH_3OH		33.5(3а)	HCN
CN	33.4(1)	CN	NOCl	33.4(7)	NO
C_2N_2	33.4(1)	CN	N_2	33.4(8а—д)	N_2
CO	33.4(2а,б)	CO		33.4(5а)	HF
CO_2	33.5(1а—з)	CO_2	N_2O	33.5(6а,б)	N_2O
CS_2	33.4(2а)	CO	O_2	33.4(2а)	CO
	33.5(2)	CS_2	SO_2	33.5(8)	SO_2
Cl_2	33.4(4а)	HCl	SF_6	33.4(5а)	HF
	33.4(4б)	HCl	UF_6	33.4(5а)	HF
	33.4(4в)	DCl		33.4(5в)	DF

Таблица 33.4

Лазериые переходы в двухатомных молекулярных газах [5]

$\lambda_{вак}$, *мкм*	ν, $см^{-1}$	Переход	Относительная интенсивность
(1) CN-лазер, переходы в $X^2\Sigma$			
Полоса 4—3			
5,1838	1929,08	*P* (9)	0,54
5,1946	1925,09	*P* (10)	0,42
5,2055	1921,05	*P* (11)	0,04
(2а) CO-лазер (рис. 33.32). переходы между $B^1\Sigma - A^1\Pi$			
Полоса 0 — 3			
0,55921	17 882,2	*Q* (11)	0,3
0,55949	17 873,3	*Q* (10)	0,5
0,55975	17 864,9	*Q* (9)	1,0
0,55998	17 857,6	*Q* (8) или *R* (13)	1,0
0,56019	17 850,9	*Q* (7)	1,0
0,56040	17 844,3	*Q* (6)	0,3
0,56053	17 840,1	*Q* (5)	0,02

Продолжение табл. 33.4

$\lambda_{вак}$, мкм	ν, $см^{-1}$	Переход	Относительная интенсивность
	Полоса 0 — 4		
0,60646	16 489,2	Q (9)	0,5
0,60674	16 481,6	Q (8)	0,8
0,60699	16 474,8	Q (7)	1,0
0,60722	16 448,6	Q (6)	0,6
0,60742	16 463,1	Q (5)	0,3
0,60759	16 458,6	Q (4)	0,03
	Полоса 0 — 5		
0,65973	15 157,7	Q (10)	0,06
0,66013	15 148,5	Q (9)	0,3
0,66049	15 140,2	Q (8) или P (13)	0,7
0,66082	15 132,7	Q (7)	1,0
0,66109	15 126,5	Q (6)	0,4
0,66133	15 121,0	Q (5)	0,2
0,66153	15 116,4	Q (4)	0,02

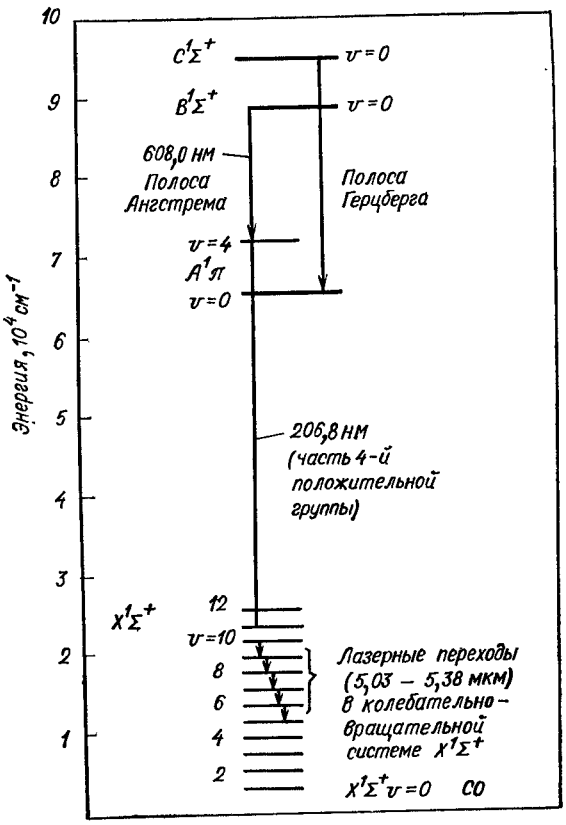


Рис. 33.32. Схема части лазерных переходов на молекулах CO, показывающая электронные переходы в полосе Ангстрема и колебательно-вращательные переходы в основном состоянии молекулы CO $X^1\Sigma^+$ [5].

Продолжение табл. 33.4

$\lambda_{вак}$, мкм	ν, $см^{-1}$	Переход
(2б) CO-лазер, переходы в электронном состоянии $X'\Sigma^+$		
	Полоса 5—4	
5,08691	1965,83	P (18)
5,09806	1961,53	P (19)
5,10937	1957,19	P (20)
5,12079	1952,82	P (21)
5,13237	1948,42	P (22)
5,14405	1943,99	P (23)
5,15597	1939,50	P (24)
5,16794	1935,01	P (25)
5,18009	1930,47	P (26)
5,19236	1925,91	P (27)
	Полоса 6—5	
5,03755	1985,09	P (7)
5,04750	1981,18	P (8)
5,05755	1977,24	P (9)
5,06773	1973,27	P (10)
5,07807	1969,25	P (11)
5,08845	1965,23	P (12)
5,09905	1961,15	P (13)
5,10985	1957,00	P (14)
5,12030	1953,01	P (15)
5,13157	1948,72	P (16)

$\lambda_{вак}$, *мкм*	ν, $см^{-1}$	Переход
5,14268	1944,51	*P* (17)
5,15390	1940,28	*P* (18)
5,16527	1936,00	*P* (19)
5,17681	1931,69	*P* (20)
5,18848	1927,35	*P* (21)
5,20026	1922,98	*P* (22)
5,21218	1918,58	*P* (23)
5,22422	1914,16	*P* (24)
5,23649	1909,68	*P* (25)
5,24882	1905,19	*P* (26)
5,26137	1900,66	*P* (27)
5,27396	1896,11	*P* (28)
	Полоса 7—6	
5,10410	1959,21	*P* (7)
5,11418	1955,35	*P* (8)
5,12445	1951,43	*P* (9)
5,13485	1947,48	*P* (10)
5,14530	1943,52	*P* (11)
5,15595	1939,51	*P* (12)
5,16666	1935,49	*P* (13)
5,17765	1931,38	*P* (14)
5,18865	1927,28	*P* (15)
5,19980	1923,15	*P* (16)
5,21110	1918,98	*P* (17)
5,22256	1914,77	*P* (18)
5,23420	1910,51	*P* (19)
5,24590	1906,25	*P* (20)
5,25776	1901,95	*P* (21)
5,26981	1897,60	*P* (22)
5,28189	1893,26	*P* (23)
5,29423	1888,85	*P* (24)
5,30674	1884,40	*P* (25)
5,31924	1879,97	*P* (26)
5,33204	1875,45	*P* (27)
5,34494	1870,93	*P* (28)
	Полоса 8—7	
5,17220	1933,41	*P* (7)
5,18250	1929,57	*P* (8)
5,19290	1925,71	*P* (9)
5,20345	1921,80	*P* (10)
5,21410	1917,88	*P* (11)
5,22498	1913,88	*P* (12)
5,23600	1909,85	*P* (13)
5,24710	1905,81	*P* (14)
5,25835	1901,74	*P* (15)
5,26966	1897,66	*P* (16)
5,28118	1893,52	*P* (17)
5,29284	1889,34	*P* (18)
5,30467	1885,13	*P* (19)
5,31663	1880,90	*P* (20)
5,32871	1876,63	*P* (21)
5,34095	1872,33	*P* (22)
5,35334	1867,99	*P* (23)
5,36585	1863,64	*P* (24)
5,37860	1859,22	*P* (25)
5,39141	1854,80	*P* (26)
5,40442	1850,34	*P* (27)
5,41751	1854,87	*P* (28)

$\lambda_{вак}$, *мкм*	ν, $см^{-1}$	Переход
	Полоса 9—8	
5,24195	1907,69	*P* (7)
5,25250	1903,85	*P* (8)
5,26310	1900,02	*P* (9)
5,27380	1896,17	*P* (10)
5,28465	1892,27	*P* (11)
5,29570	1888,32	*P* (12)
5,30695	1884,32	*P* (13)
5,31820	1880,33	*P* (14)
5,32964	1876,30	*P* (15)
5,34127	1872,21	*P* (16)
5,35298	1868,12	*P* (17)
5,36485	1863,98	*P* (18)
5,37692	1859,80	*P* (19)
5,38906	1855,61	*P* (20)
5,40138	1851,38	*P* (21)
5,41385	1847,11	*P* (22)
5,42648	1842,82	*P* (23)
5,43926	1838,49	*P* (24)
5,45225	1834,11	*P* (25)
5,46533	1829,72	*P* (26)
5,47852	1825,31	*P* (27)
5,49191	1820,86	*P* (28)
	Полоса 10—9	
5,32415	1878,23	*P* (8)
5,33490	1874,45	*P* (9)
5,34590	1870,59	*P* (10)
5,35695	1866,73	*P* (11)
5,36820	1862,82	*P* (12)
5,37950	1858,91	*P* (13)
5,39110	1854,91	*P* (14)
5,40274	1850,91	*P* (15)
5,41457	1846,87	*P* (16)
5,42651	1842,80	*P* (17)
5,45087	1834,57	*P* (19)
5,46328	1830,40	*P* (20)
5,47582	1826,21	*P* (21)
5,48850	1821,99	*P* (22)
5,50138	1817,73	*P* (23)
5,51442	1813,43	*P* (24)
5,52762	1809,10	*P* (25)
5,54091	1804,76	*P* (26)
5,55438	1800,38	*P* (27)
	Полоса 11—10	
5,4080	1849,11	*P* (9)
5,4196	1845,15	*P* (10)
5,4299	1841,65	*P* (11)
5,4425	1837,40	*P* (12)
5,45402	1833,51	*P* (13)
5,46571	1829,59	*P* (14)
5,47763	1825,61	*P* (15)
5,48968	1821,60	*P* (16)
5,50189	1817,56	*P* (17)
5,51421	1813,50	*P* (18)
5,52667	1809,41	*P* (19)
5,53927	1805,29	*P* (20)
5,55207	1801,13	*P* (21)
5,56503	1796,94	*P* (22)

$\lambda_{вак}$, мкм	ν, $см^{-1}$	Переход
5,59147	1788,44	P (24)
5,60494	1784,14	P (25)
	Полоса 12—11	
5,4842	1823,41	P (9)
5,4946	1819,96	P (10)
5,5072	1815,81	P (11)
5,5187	1812,02	P (12)
5,5299	1808,35	P (13)
5,5424	1804,28	P (14)
5,57904	1792,42	P (17)
5,59158	1788,40	P (18)
5,60436	1784,33	P (19)
5,61725	1780,23	P (20)
5,64350	1771,95	P (22)
5,65687	1767,76	P (23)
5,67044	1763,53	P (24)
5,68414	1759,28	P (25)
	Полоса 13—12	
5,5971	1786,64	P (12)
5,6087	1782,95	P (13)
5,63304	1775,24	P (15)
5,65816	1767,36	P (17)
5,67098	1763,36	P (18)
5,68396	1759,34	P (19)
5,69712	1755,27	P (20)
5,71042	1751,18	P (21)
5,73754	1742,91	P (23)
5,75142	1738,70	P (24)
	Полоса 14—13	
5,6546	1769,18	P (10)
5,6654	1765 10	P (11)
5,6780	1761,18	P (12)
5,71361	1750,21	P (15)
5,72642	1746.29	P (16)
5,73931	1742,37	P (17)
5,75243	1738,40	P (18)
5,77911	1730,37	P (20)
5,79264	1726,33	P (21)
5,80636	1722,25	P (22)
5,82031	1718,12	P (23)
5,83441	1713,97	P (24)
5,84874	1709,77	P (25)
	Полоса 15—14	
5,78346	1729,07	P (14)
5,79633	1725,23	P (15)
5,80927	1721,39	P (16)
5,83581	1713,56	P (18)
5,84935	1709,59	P (19)
5,86300	1705,61	P (20)
5,87689	1701,58	P (21)
5,89088	1697,54	P (22)
5,90507	1693,46	P (23)
5,91951	1689,33	P (24)
	Полоса 16—15	
5,89450	1696,50	P (16)
5,90789	1692,65	P (17)
5,92156	1688,74	P (18)
5,94923	1680,89	P (20)
5,96338	1676,90	P (21)
5,97768	1672,89	P (22)
	Полоса 17—16	
5,98177	1671,75	P (16)
5,99553	1667,91	P (17)
6,00939	1664,06	P (18)
6,02348	1660,17	P (19)
6,03774	1656,25	P (20)
	Полоса 18—17	
6,05755	1650,83	P (15)
6,07145	1647,05	P (16)
6,0856	1643,22	P (17)
6,09961	1639,45	P (18)
6,12845	1631,73	P (20)
	Полоса 19—18	
6,14904	1626,27	P (15)
6,16288	1622,62	P (16)
6,17712	1618,88	P (17)
6,1924	1614,88	P (18)
6,2068	1611,14	P (19)
	Полоса 20—19	
6,24320	1601,74	P (15)
6,25712	1598,18	P (16)
6,27228	1594,32	P (17)
6,2870	1590,58	P (18)
	Полоса 21—20	
6,3260	1580,78	P (14)
6,33936	1577,45	P (15)
6,3552	1573,51	P (16)
6,38476	1566,23	P (17)
	Полоса 22—21	
6,4252	1556,37	P (14)
6,43968	1552,87	P (15)
6,45488	1549,22	P (16)
6,4704	1545,50	P (17)
	Полоса 23—22	
6,5120	1535,63	P (13)
6,5268	1532,14	P (14)
6,5424	1528,49	P (15)
6,5584	1524,76	P (16)
	Полоса 24—23	
6,6476	1504,30	P (15)
6,6632	1500,78	P (16)

$\lambda_{вак}$, *мкм*	ν, $см^{-1}$	Переход $H^{79}Br$ $H^{81}Br$
	(3а) HBr-лазер	
	Полоса 1—0	
4 0170	2489,40	P (4) —
4,0176	2489,05	— P (4)
4,0470	2470,97	P (5) —
4,0475	2470,63	— P (5)
4,0783	2452,03	P (6) —
4,0788	2451,68	— P (6)
4,1107	2432,70	P (7) —
4,1112	2432,36	— P (7)
4,1442	2412,99	P (8) —
4,1448	2412,68	— P (8)
4,1796	2392,56	— P (9)
	Полоса 2—1	
4,1653	2400,78	P (4) —
4,1658	2400,47	— P (4)
4,1970	2382,68	P (5) —
4,1975	2382,35	— P (5)
4,2295	2364,36	P (6) —
4,2633	2345,58	P (7) —
4,2639	2345,26	— P (7)
4,2988	2326,23	P (8) —
4,2994	2325,92	— P (8)
4,3354	2306,60	P (9) —
4,3359	2306,30	— P (9)
	Полоса 3—2	
4,3250	2312,15	P (4) —
4,3255	2311,85	— P (4)
4,3579	2294,68	P (5) —
4,3585	2294,39	— P (5)
4,3925	2276,61	P (6) —
4,3931	2276,32	— P (6)
4,4281	2258,29	P (7) —
4,4307	2258,00	— P (7)
4,4652	2239,52	P (8) —
4,4658	2239,26	— P (8)
4,5041	2220,20	P (9) —
4,5047	2219,92	— P (9)
	Полоса 4—3	
4,5330	2206,07	P (5) —
4,5335	2205,81	— P (5)
4,5691	2188,61	P (6) —
4,5696	2188,35	— P (6)
4,6070	2170,61	P (7) —
4,6076	2170,35	— P (7)
4,6463	2152,27	P (8) —
4,6467	2152,04	— P (8)
	(3б) Чисто вращательные переходы	
	$v = 0$	
19,399	515,49	R (33)
20,360	491,16	R (31) или R (31)
20,896	478,56	R (30)
20,949	477,35	R (30)
21,501	465,09	R (29) или R (29)
22,136	451,75	R (28)
30,948	323,12	R (19) или R (19)
32,469	307,99	R (18) или R (18)
	$v = 1$	
19,988	500,30	R (33) или R (33)
21,546	464,12	R (30)
30,445	328,46	R (20) или R (20)
31,849	313,98	R (19) или R (19)
33,409	299,32	R (18) или R (18)
	$v = 2$	
22,226	449,92	R (30)
22,855	437,54	R (29) или R (29)
31,368	318,80	R (20) или R (20)
32,799	304,89	R (19)
40,526	246,76	R (15) или R (15)
	$v = 3$	
29,786	335,73	R (22)
23,436	426,69	

$\lambda_{вак}$, *мкм*	ν, $см^{-1}$	Переход $D^{79}Br$ $D^{81}Br$
	(3в) DBr-лазер	
	Полоса 2—1	
5,8049	1722,67	P (8) —
	Полоса 3—2	
5,8620	1705,91	P (5) —
5,8626	1705,43	— P (5)
5,8928	1696,98	P (6) —
5,8944	1696,52	— P (6)
5,9246	1687,89	P (7) —
5,9261	1687,45	— P (7)
5,9573	1678,60	P (8) —
5,9590	1678,13	— P (8)
	Полоса 4—3	
6,0209	1660,88	P (5) —
6,0225	1660,45	— P (5)
6,0529	1652,10	P (6) —
6,0544	1651,69	— P (6)
6,0858	1643,18	P (7) —
6,0873	1642,76	— P (7)

$\lambda_{вак}$, *мкм*	ν, $см^{-1}$	Переход $D^{79}Br$	$D^{81}Br$
6,1200	1634,00	*P* (8)	—
6,1216	1633,57	—	*P* (8)
6,1546	1624,80	*P* (9)	—
6,1562	1624,39	—	*P* (9)
6,1903	1615,42	*P* (10)	—
6,1918	1615,03	—	*P* (10)
6,2272	1605,85	*P* (11)	—
6,2289	1605,43	—	*P* (11)
		Полоса 5—4	
6,2237	1606,75	—	*P* (6)
6,2566	1598,32	*P* (7)	—
6,2581	1597,93	—	*P* (7)
6,2916	1589,41	*P* (8)	—
6,2932	1589,01	—	*P* (8)
6,3279	1580,31	*P* (9)	—
6,3294	1579,92	—	*P* (9)

$\lambda_{вак}$, *мкм*	ν, $см^{-1}$	Переход $H^{35}Cl$	$H^{37}Cl$
	(4а) HCl-лазер		
	Полоса 2—1		
3,7071	2697,52	*P* (4)	—
3,7383	2675,01	*P* (5)	—
3,7408	2673,23	—	*P* (5)
3,7710	2651,82	*P* (6)	—
3,7735	2650,08	—	*P* (6)
3,8050	2628,13	*P* (7)	—
3,8074	2626,45	—	*P* (7)
3,8401	2604,09	*P* (8)	—
3,8425	2602,48	—	*P* (8)
3,8768	2579,42	*P* (9)	—
3,9149	2554,34	*P* (10)	—
	Полоса 3—2		
3,8509	2596,79	*P* (4)	—
3,8840	2574,70	*P* (5)	—
3,9181	2552,26	*P* (6)	—
3,9205	2550,70	—	*P* (6)
3,9536	2529,31	*P* (7)	—
3,9560	2527,79	—	*P* (7)
3,9909	2505,68	*P* (8)	—
4,0295	2481,69	*P* (9)	—
	(4б) Чисто вращательные переходы		
	$v = 0$		
13,8720	720,921	*R* (40)	—
14,0994	709,279	*R* (39)	—
14,3434	697,232	*R* (38)	—
16,2125	616,809	*R* (32)	—
16,6085	602,114	*R* (31)	—
16,664	600,10	—	*R* (31)
17,0340	587,070	*R* (30)	—
17,4923	571,686	*R* (29)	—
17,9874	555,969	*R* (28)	—
17,997	555,65	—	*R* (28)
18,522	539,928	*R* (27)	—
19,122	522,96	—	*R* (26)
20,4106	489,949	*R* (24)	—
21,1556	472,701	*R* (23)	—
21,9706	455,175	*R* (22)	—
22,8637	437,380	*R* (21)	—
23,8485	419,326	*R* (20)	—
24,9367	401,023	*R* (19)	—
26,1462	382,483	*R* (18)	—
27,508	363,53	*R* (17)	—
	$v = 1$		
16,765	596,48	—	*R* (32)
17,125	583,94	*R* (31)	—
17,575	568,99	*R* (30)	—
18,035	554,48	*R* (29)	—
18,555	538,94	*R* (28)	—
18,593	537,84	—	*R* (28)
19,145	522,33	—	*R* (27)
19,7002	507,628	*R* (26)	—
20,3455	491,526	*R* (25)	—
21,0470	475,130	*R* (24)	—
21,8127	458,449	*R* (23)	—
22,6514	441,491	*R* (22)	—
23,5705	424,268	*R* (21)	—
24,6177	406,215	—	*R* (20)
24,5833	406,789	*R* (20)	—
25,7040	389,065	*R* (19)	
	$v = 2$		
19,183	521,29	*R* (28)	—
20,9991	476,215	*R* (26)	—
24,3178	411,232	*R* (21)	—
	$v = 3$		
19,783	505,48	*R* (28)?	
19,821	504,52		

$\lambda_{вак}$, *мкм*	ν, $см^{-1}$	Переход $D^{35}Cl$	$D^{37}Cl$
	(4в) DCl-лазер		
	Полоса 2—1		
5,0445	1982,35	*P* (5)	—
5,0514	1979,65	—	*P* (5)
5,0743	1970,72	*P* (6)	—
5,0811	1968,08	—	*P* (6)
5,1049	1958,90	*P* (7)	—
5,1118	1956,25	—	*P* (7)
5,1363	1946,94	*P* (8)	—

$\lambda_{вак}$, *мкм*	ν, *см*$^{-1}$	Переход $D^{35}Cl$	Переход $D^{37}Cl$
5,1431	1944,35	—	*P* (8)
5,1688	1934,67	*P* (9)	—
	Полоса 3—2		
5,1511	1941,35	*P* (4)	—
5,1811	1930,10	*P* (5)	—
5,1879	1927,56	—	*P* (5)
5,2118	1918,73	*P* (6)	—
5,2186	1916,24	—	*P* (6)
5,2435	1907,13	*P* (7)	—
5,2503	1904,67	—	*P* (7)
5,2760	1895,37	*P* (8)	—
5,2829	1892,91	—	*P* (8)
5,3097	1883,35	*P* (9)	—
5,3443	1871,15	*P* (10)	—
5,3799	1858,77	*P* (11)	—
	Полоса 4—3		
5,3244	1878,13	*P* (5)	—
5,3562	1867,01	*P* (6)	—
5,3629	1864,65	—	*P* (6)
5,3889	1855,66	*P* (7)	—
5,3956	1853,36	—	*P* (7)
5,4295	1841,79	—	*P* (8)
5,4577	1832,27	*P* (9)	—
5,4935	1820,34	*P* (10)	—
5,5304	1808,20	*P* (11)	—
	Полоса 5—4		
5,5084	1815,38	*P* (6)	—
5,5423	1804,31	*P* (7)	—
5,5776	1792,89	*P* (8)	—
5,6137	1781,36	*P* (9)	—

$\lambda_{вак}$, *мкм*	ν, *см*$^{-1}$	Переход
	(5а) HF-лазер	
	Полоса 1—0	
2,640	3788	*P* (4)
2,673	3741	*P* (5)
2,7075	3693,50	*P* (6)
2,7441	3644,16	*P* (7)
2,7826	3593,80	*P* (8)
2,8231	3542,20	*P* (9)
2,8657	3489,59	*P* (10)
2,9103	3436,12	*P* (11)
2,9573	3381,50	*P* (12)
3,0064	3326,21	*P* (13)
3,0582	3269,90	*P* (14)
3,1125	3212,80	*P* (15)
	Полоса 2—1	
2,6962	3708,86	*P* (2)
2,7275	3666,38	*P* (3)
2,7604	3622,71	*P* (4)
2,7953	3577,47	*P* (5)
2,8318	3531,31	*P* (6)
2,8706	3483,63	*P* (7)
2,9111	3435,17	*P* (8)
2,9539	3385,34	*P* (9)
2,9989	3334,55	*P* (10)
3,0461	3282,86	*P* (11)
3,0958	3230,18	*P* (12)
3,1480	3176,60	*P* (13)
3,2029	3122,14	*P* (14)
3,2603	3067,22	*P* (15)
	Полоса 3—2	
2,8213	3544,51	*P* (2)
2,8540	3503,80	*P* (3)
2,8889	3461,54	*P* (4)
2,9256	3418,16	*P* (5)
2,9643	3373,46	*P* (6)
3,0051	3327,73	*P* (7)
3,0482	3280,64	*P* (8)
	(5б) Чисто вращательные переходы	
	$v = 0$	
10,1978	980,60	*R* (27)
10,4578	956,23	*R* (26)
10,7439	930,76	*R* (25)
11,0573	904,38	*R* (24)
11,4033	876,94	*R* (23)
11,7854	848,50	*R* (22)
12,2082	819,12	*R* (21)
12,6781	788,76	*R* (20)
13,2009	757,52	*R* (19)
13,7841	725,47	*R* (18)
14,4406	692,49	*R* (17)
16,0215	624,16	*R* (15)
16,975	589,10	*R* (14)
18,085	552,94	*R* (13)
	$v = 1$	
12,2619	815,53	*R* (22)
12,7006	787,37	*R* (21)
13,1877	758,28	*R* (20)
13,7277	728,45	*R* (19)
15,0163	665,94	*R* (17)
16,655	600,42	*R* (16)
17,645	566,73	*R* (15)
18,8010	531,89	*R* (13)
20,1337	496,68	*R* (12)
21,6986	460,86	*R* (11)
	$v = 2$	
10,5819	945,01	*R* (29)
10,8117	924,93	*R* (28)

$\lambda_{вак}$, мкм	ν, $см^{-1}$	Переход
13,2211	756,37	R (21)
14,2881	699,88	R (19)
16,444	608,12	R (16)
17,327	577,13	R (15)
20,9393	477,57	R (12)
	$v = 3$	
11,5408	866,49	R (27)
17,095	584,97	R (16)
19,1129	523,21	R (14)
20,3513	491,37	R (13)
21,7885	458,96	R (12)
	(5в) DF-лазер	
	Полоса 1—0	
3,8298	2611,10	P (12)
3,9572	2527,06	P (15)
4,0032	2498,02	P (16)
	Полоса 2—1	
3,6363	2750,05	P (3)
3,6665	2727,38	P (4)
3,6983	2703,98	P (5)
3,7310	2680,28	P (6)
3,7651	2655,97	P (7)
3,8007	2631,09	P (8)
3,8375	2605,87	P (9)
3,8757	2580,16	P (10)
3,9155	2553,97	P (11)
3,9565	2527,47	P (12)
3,9995	2500,32	P (13)
4,1369	2417,27	P (16)
4,1862	2388,79	P (17)
	Полоса 3—2	
3,7563	2662,17	P (3)
3,7878	2640,04	P (4)
3,8206	2617,41	P (5)
3,8547	2594,23	P (6)
3,8903	2570,51	P (7)
3,9272	2546,37	P (8)
3,9654	2521,81	P (9)
4,0054	2496,61	P (10)
4,0464	2471,34	P (11)
4,0895	2445,29	P (12)
4,1798	2392,46	P (14)
	Полоса 4—3	
3,9487	2532,50	P (5)
3,9843	2509,86	P (6)
4,0212	2486,83	P (7)

$\lambda_{вак}$, мкм	ν, $см^{-1}$	Переход
	(6а) Лазеры на H_2, HD и D_2	
	H_2, переходы в системе $2s\sigma^1\Sigma_g^+ - 2p\sigma^1\Sigma_u^+$	
0,835190	11973,32	(2—1) P (2)
0,887868	11262,93	(1—0) P (4)
0,890128	11234,34	(1—0) P (2)
1,116520	8956,40	(0—0) P (4)
1,122507	8908,63	(0—0) P (2)
1,30613	7656,2	(0—1) P (4)
1,31658	7595,4	(0—1) P (2)
	HD, переходы в системе $2s\sigma^1\Sigma_g^+ - 2p\sigma^1\Sigma_u^+$	
	Полоса 1—0	
0,9163	10914	—
	D_2, переходы в системе $2s\sigma^1\Sigma_g^+ - 2p\sigma^1\Sigma_u^+$	
0,827980	12077,58	(2—0) P (3)
0,953261	10490,31	(1—0) P (3)
	(6б) Лазеры на H_2, параводороде, HD и D_2	
	H_2, переходы в системе $B^1\Sigma_u^+ - X^1\Sigma_g^+$	
0,152325	65649,0	(2—8) P (3)
0,156725	63806,1	(8—14) P (3)
0,157199	63613,8	(2—9) P (1)
0,157739	63395,9	(2—9) P (3)
0,157919	63323,8	(7—13) P (1)
0,157998	63291,98	(7—13) P (2)
0,158074	63261,4	(7—13) P (3)
0,159131	62841,2	(3—10) P (1)
0,159340	62758,9	(3—10) P (2)
0,159606	62654,2	(3—10) P (3)
0,160448	62325,3	(4—11) P (1)
0,160623	62257,4	(4—11) P (2)
0,160750	62208,3	(6—13) P (1)
0,160839	62173,8	(4—11) P (3)
0,160902	62149,4	(6—13) P (3)
0,161033	62099,2	(5—12) P (1)
0,161165	62048,1	(5—12) P (2)
0,161318	61989,2	(5—12) P (3)
	Параводород, переходы в системе $B^1\Sigma_u^+ - X^1\Sigma_g^+$	
0,151994	65792,0	(2—8) P (2)
0,156753	63794,8	(8—14) P (2)
0,157434	63518,8	(2—9) P (2)
0,157771	63383,0	(7—13) R (0)
0,157998	63292,0	(7—13) P (2)
0,158110	63247,0	(2—9) P (4)
0,158140	63235,3	(7—13) P (4)
0,158899	62933,0	(3—10) R (0)
0,159340	62758,9	(3—10) P (2)
0,159925	62529,4	(3—10) P (4)
0,160236	62408,0	(4—11) R (0)

$\lambda_{вак}$, мкм	ν, $см^{-1}$	Переход
0,160594	62269,0	(6—13) R (0)
0,160623	62257,4	(4—11) P (2)
0,160829	62177,7	(6—13) P (2)
0,160961	62126,7	(6—13) P (4)
0,161033	62099,2	(5—12) P (1)
0,161091	62076,7	(4—11) P (4)
0,161165	62048,1	(5—12) P (2)
0,161318	61989,2	(5—12) P (3)
0,161485	61925,1	(5—12) P (4)
	HD, переходы в системе $B^1\Sigma_u^+ - X^1\Sigma_g^+$	
0,157242	63596	(9—16) P (2), P (3)
0,159524	62686	(4—12) P (2)
0,159713	62612	(4—12) P (3)
0,160365	62358	(5—13) P (1)
0,160496	62307	(5—13) P (2)
0,160569	62278	(7—15) P (1)
0,160631	62254	(7—15) P (2)
0,160646	62248	(5—13) P (3)
0,160692	62231	(7—15) P (3)
0,160747	62209	(7—15) P (4)
0,160794	62191	(6—14) P (1)
0,160827	62179	(5—13) P (4)
0,160893	62153	(6—14) P (2)
0,161005	62110	(6—14) P (3)
0,161131	62061	(6—14) P (4)
	D_2, переходы в системе $B^1\Sigma_u^+ - X^1\Sigma_g^+$	
0,158675	63021	(10—19) P (2)
0,158694	63014	(10—19) P (3)
0,158714	63004	(10—19) P (4)
0,159130	62841	(9—18) P (2)
0,159257	62792	(9—18) P (4)
0,160086	62466	(5—15) P (2)
0,160354	62360	(5—15) P (4)
0,160848	62170	(6—16) P (2)
0,161080	62080	(6—16) P (4)
0,161198	62035	(8—18) P (2)
0,161236	60020	(7—17) P (2)
0,161251	62014	(8—18) P (2)
0,161320	61990	(8—18) P (4)
0,161412	61951	(7—17) P (4)
	(6в) H_2-лазер, переходы в системе $(B^1\Sigma_u^+ - X^1\Sigma_u^+)$	
0,158074	63262	(7—13) P (3)
0,159606	62654	(3—10) P (3)
0,160044	62483	—
0,160448	62325	(4—11) P (1)
0,160750	62208	(6—13) P (1)
0,160839	62174	(4—11) P (3)
0,160902	62150	(6—13) P (3)
0,161033	62099	(5—12) P (1)
0,161165	62048	(5—12) P (2)
0,161318	61989	(5—12) P (3)

$\lambda_{вак}$, мкм	ν, $см^{-1}$	Переход
	(7) NO-лазер, переходы в осиовных электроииых состояиниях $^2\Pi_{1/2}$ и $^2\Pi_{3/2}$	
	Полоса 6—5	
5,8462	1710,52	$^2\pi_{3/2}$ P (7)
5,8549	1707,98	$^2\pi_{1/2}$ P (8)
5,8584	1706,95	$^2\pi_{3/2}$ P (8)
5,8706	1703,41	$^2\pi_{3/2}$ P (9)
5,8789	1700,99	$^2\pi_{1/2}$ P (10)
5,9036	1693,88	$^2\pi_{1/2}$ P (12)
5,9083	1692,53	$^2\pi_{3/2}$ P (12)
5,9550	1679,3	$^2\pi_{1/2}$ P (16)
	Полоса 7—6	
5,9423	1682,84	$^2\pi_{3/2}$ P (7)
5,9546	1679,37	$^2\pi_{3/2}$ P (8)
5,9632	1676.96	$^2\pi_{1/2}$ P (9)
5,9673	1675,81	$^2\pi_{3/2}$ P (9)
5,9756	1673,46	$^2\pi_{1/2}$ P (10)
5,9799	1672,27	$^2\pi_{3/2}$ P (10)
5,9882	1669,96	$^2\pi_{1/2}$ P (11)
5,9931	1668,59	$^2\pi_{3/2}$ P (11)
6,0010	1666,39	$^2\pi_{1/2}$ P (12)
6,0054	1665,18	$^2\pi_{3/2}$ P (12)
6,0192	1661,36	$^2\pi_{3/2}$ P (13)
6,0267	1659,29	$^2\pi_{1/2}$ P (14)
6,0324	1657,71	$^2\pi_{3/2}$ P (14)
6,0402	1655,58	$^2\pi_{1/2}$ P (15)
	Полоса 8—7	
6,0386	1656,0	$^2\pi_{1/2}$ P (7)
6,0419	1655,12	$^2\pi_{3/2}$ P (7)
6,0543	1651,72	$^2\pi_{3/2}$ P (8)
6,0628	1649,40	$^2\pi_{1/2}$ P (9)
6,0673	1648,19	$^2\pi_{3/2}$ P (9)
6,0801	1644,71	$^2\pi_{3/2}$ P (10)
6,0884	1642,47	$^2\pi_{1/2}$ P (11)
6,0934	1641,13	$^2\pi_{3/2}$ P (11)
6,1015	1638,95	$^2\pi_{1/2}$ P (12)
6,1204	1633,87	$^2\pi_{3/2}$ P (13)
6,1417	1628,22	$^2\pi_{1/2}$ P (15)
6,1546	1624,8	$^2\pi_{1/2}$ P (16)
6,1973	1613,6	$^2\pi_{1/2}$ P (19)
	Полоса 9—8	
6,1538	1625,02	$^2\pi_{1/2}$ P (8)
6,1576	1624,00	$^2\pi_{3/2}$ P (8)
6,1663	1621,72	$^2\pi_{1/2}$ P (9)
6,1792	1618,34	$^2\pi_{1/2}$ P (10)

$\lambda_{вак}$, *мкм*	ν, *см*$^{-1}$	Переход
6,1838	1617,12	$^2\pi_{3/2}\,P\,(10)$
6,1921	1614,95	$^2\pi_{1/2}\,P\,(11)$
6,1972	1613,63	$^2\pi_{3/2}\,P\,(11)$
6,2055	1611,48	$^2\pi_{1/2}\,P\,(12)$
6,2110	1610,06	$^2\pi_{3/2}\,P\,(12)$
6,2191	1607,94	$^2\pi_{1/2}\,P\,(13)$
6,2249	1606,46	$^2\pi_{3/2}\,P\,(13)$
	Полоса 10—9	
6,2381	1603,06	$^2\pi_{3/2}\,P\,(6)$
6,2511	1599,71	$^2\pi_{3/2}\,P\,(7)$
6,2602	1597,39	$^2\pi_{1/2}\,P\,(8)$
6,2645	1596,30	$^2\pi_{3/2}\,P\,(8)$
6,2778	1592,91	$^2\pi_{3/2}\,P\,(9)$
6,2865	1590,71	$^2\pi_{1/2}\,P\,(10)$
6,2913	1589,50	$^2\pi_{3/2}\,P\,(10)$
6,2998	1587,36	$^2\pi_{1/2}\,P\,(11)$
6,3051	1586,02	$^2\pi_{3/2}\,P\,(11)$
6,3136	1583,88	$^2\pi_{1/2}\,P\,(12)$
6,3191	1582,50	$^2\pi_{3/2}\,P\,(12)$
6,3274	1580,43	$^2\pi_{1/2}\,P\,(13)$
6,3336	1578,89	$^2\pi_{3/2}\,P\,(13)$
	Полоса 11—10	
6,3764	1568,29	$^2\pi_{3/2}\,P\,(8)$
6,3894	1565,09	$^2\pi_{3/2}\,P\,(9)$
6,3980	1562,99	$^2\pi_{1/2}\,P\,(10)$
6,4031	1561,74	$^2\pi_{3/2}\,P\,(10)$
6,4262	1556,14	$^2\pi_{1/2}\,P\,(12)$
6,4321	1554,71	$^2\pi_{3/2}\,P\,(12)$

(8а) N_2-лазер, переходы во второй положительной системе $C^3\,\Pi_u - B^3\Pi_g$

	Полоса 0—0	
0,337141	29 661,22	—
0,337178	29 657,92	—
0,337211	29 655,03	—
0,337240	29 652,46	—
	Полоса 0—1	
0,357661	27 959,42	—
0,357713	27 955,34	—

(8б) Переходы в первой положительной системе $(B^3\Pi_g - A^3\Sigma_u^+)$*

	Полоса 4—2	
0,748480	13 360,41	$Q_1\,(11)$
0,748948	13 352,07	$Q_1\,(9)$
0,749189	13 347,76	$^PQ_{23}\,(7)$
0,749377	13 344,42	$Q_1\,(7)$
0,749775	13 337,34	$Q_1\,(5)$
0,750363	13 326,88	$P_1\,(11)$
	Полоса 3—1	
0,757434	13 202,47	—
0,758313	13 187,16	$Q_3\,(13)$
0,758632	13 181,62	$Q_3\,(11)$
0,758855	13 177,75	$Q_3\,(9)$
0,759199	13 171,78	—
0,759524	13 166,14	$Q_1\,(15)$
0,760079	13 156,52	$Q_1\,(13)$
0,760608	13 147,37	$Q_1\,(11)$
0,761091	13 139,03	$Q_1\,(9)$
0,761195	13 137,24	$^PQ_{23}\,(5)$
0,761535	13 131,37	$Q_1\,(7)$
0,761946	13 124,29	$Q_1\,(5)$
0,762506	13 114,65	$^PQ_{12}\,(11)$
0,762631	13 112,50	$^PQ_{12}\,(9)$
0,762721	13 110,95	$^PQ_{12}\,(7)$
	Полоса 2—0	
0,771418	12 963,14	$Q_3\,(9)$
0,774602	12 909,86	$Q_1\,(5)$
0,775483	12 891,87	$^PR_{13}\,(1)$
	Полоса 2—1	
0,865569	11 553,10	$R_3\,(7)$
0,865730	11 550,95	$Q_3\,(15)$
0,866327	11 542,98	$Q_3\,(13)$
0,866494	11 540,76	$Q_2\,(15)$
0,866583	11 539,57	$Q_3\,(12)$
0,866810	11 536,55	$Q_3\,(11)$
0,86700	11 534,0	$Q_3\,(10)$
0,867161	11 531,88	$Q_3\,(9)$
0,867197	11 531,41	$Q_2\,(13)$
0,867371	11 529,09	$Q_3\,(7)$
0,867793	11 523,48	$Q_2\,(11)$
0,868520	11 513,84	$R_1\,(7)$
0,868613	11 512,61	$Q_1\,(13)$
0,869001	11 507,46	$Q_1\,(12)$
0,869375	11 502,52	$Q_1\,(11)$
0,869729	11 497,84	$Q_1\,(10)$
0,870067	11 493,37	$Q_1\,(9)$
0,870307	11 490,20	$^PQ_{23}\,(5)$
0,870388	11 489,13	$Q_1\,(8)$
0,870494	11 487,73	$^PQ_{23}\,(7)$
0,870570	11 486,73	$^PQ_{23}\,(11)$
0,870696	11 485,06	$Q_1\,(7)$

* Переходы обозначены по K, а не по J. Верхние значки O, P, R обозначают соответственно $\Delta K = -2, -1, +1$. В остальных случаях $\Delta K = 0$. Нижние цифры указывают спиновые уровни.

$\lambda_{вак}$, *мкм*	ν, $см^{-1}$	Переход
0,870986	11 481,24	Q_1 (6)
0,871267	11 477,54	Q_1 (5)
0,871533	11 474,03	Q_1 (4)
0,871690	11 471,97	P_1 (13)
0,871792	11 470,63	Q_1 (3)
0,871884	11 469,41	$^PQ_{12}$ (11)
0,871977	11 468,19	P_1 (11)
0,872106	11 466,50	$^PQ_{12}$ (9)
0,872193	11 465,35	P_1 (9)
0,872266	11 464,40	$^PQ_{12}$ (7)
0,872374	11 462,97	$^PQ_{12}$ (5)
0,872460	11 461,84	$^PQ_{12}$ (3)
	Полоса 1—0	
0,883620	11 317,08	—
0,884372	11 307,46	Q_3 (15)
0,884662	11 303,75	—
0,885001	11 299,42	Q_3 (13)
0,885163	11 297,36	Q_2 (15)
0,885269	11 296,00	Q_3 (12)
0,885504	11 293,01	Q_3 (11)
0,885704	11 290,46	Q_3 (10)
0,885872	11 288,31	Q_3 (9)
0,885893	11 288,04	Q_2 (13)
0,885998	11 286,71	Q_3 (8)
0,886090	11 285,53	Q_3 (7)
0,886093	11 285,50	Q_3 (5), R_1 (9)
0,886397	11 281,63	$^RQ_{21}$ (5)
0,886500	11 280,32	Q_1 (15)
0,886522	11 280,04	Q_2 (11)
0,886941	11 274,71	Q_1 (14)
0,887043	11 273,41	Q_2 (9)
0,887365	11 269,32	Q_1 (13)
0,887775	11 264,12	Q_1 (12)
0,888162	11 259,21	Q_1 (11)
0,888532	11 254,52	Q_1 (10)
0,888884	11 250,06	Q_1 (9)
0,889150	11 246,69	$^P Q_{23}$ (5)
0,889219	11 245,82	Q_1 (8)
0,889358	11 244,06	$^P Q_{23}$ (7)
0,889460	11 242,78	$^P Q_{23}$ (9)
0,889539	11 241,78	Q_1 (7)
0,889846	11 237,90	Q_1 (6)
0,890137	11 234,23	Q_1 (5)
0,890420	11 230,66	Q_1 (4)
0,890617	11 228,17	P_1 (13)
0,890688	11 227,28	Q_1 (3)
0,890811	11 225,72	$^P Q_{12}$ (11)
0,890911	11 224,47	P_1 (11)
0,891038	11 222,87	$^P Q_{12}$ (9)
0,891135	11 221,65	P_1 (9)
0,891199	11 220,84	$^P Q_{12}$ (7)
0,891308	11 219,47	$^PQ_{12}$ (5), P_1 (7)
0,891373	11 218,65	$^P Q_{12}$ (3)
	Полоса 0—0	
1,043874	9579,70	Q_1 (15)
1,044548	9573,52	Q_1 (14)
1,045189	9567,68	Q_1 (13)
1,045806	9562,00	Q_1 (12)
1,046404	9556,54	Q_1 (11)
1,046956	9551,55	Q_1 (10)
1,047482	9546,70	Q_1 (9)
1,047979	9542,18	Q_1 (8)
1,048249	9539,72	$^PQ_{23}$ (7)
1,048464	9537,79	Q_1 (7)
1,048922	9533,60	Q_1 (6)
1,049348	9529,73	Q_1 (5)
1,049766	9525,93	Q_1 (4)
1,050161	9522,35	Q_1 (3)
1,050519	9519,10	$^PQ_{12}$ (9)
1,050800	9516,56	$^PQ_{12}$ (7)
1,051005	9514,70	$^PQ_{12}$ (5)
1,051118	9513,68	$^PQ_{12}$ (3)
1,052548	9500,75	$^OQ_{13}$ (3)
1,052911	9497,48	$^OP_{12}$ (5)
1,053382	9493,23	$^OP_{12}$ (7)
1,053760	9489,83	$^OP_{12}$ (9)
	Полоса 0—1	
1,230598	8126,13	Q_1 (11)
1,231430	8120,64	Q_1 (10)
1,232219	8115,44	Q_1 (9)
1,232962	8110,55	Q_1 (8)
1,233671	8105,89	Q_1 (7)
1,234332	8101,55	Q_1 (6)
1,234969	8097,37	Q_1 (5)
	(8в) Переходы в системе $a^1\Pi_g - a'\ ^1\Sigma_u^-$	
	Полоса 2—1	
3,29463	3035,24	Q (14)
3,30149	3028,94	Q (12)
3,30734	3023,58	Q (10)
3,30989	3021,25	Q (9)
3,31221	3019,13	Q (8)
3,31426	3017,27	Q (7)
3,31607	3015,62	Q (6)
3,31760	3014,23	Q (5)
3,31889	3013,06	Q (4)
3,32069	3011,43	Q (2)
	Полоса 1—0	
3,45184	2897,01	Q (12)
3,45832	2891,56	Q (10)
3,46114	2889,22	Q (9)
3,46368	2887,10	Q (8)
3,46596	2885,20	Q (7)
3,46795	2883,55	Q (6)
3,46967	2882,12	Q (5)
3,47109	2880,94	Q (4)
	Полоса 0—0	
8,1483	1227,25	Q (10)
8,1827	1222,09	Q (8)
8,2102	1217,99	Q (6)

$\lambda_{вак}$, *мкм*	ν, $см^{-1}$	Переход
(8г) Переходы в системе $w^1\Delta_u - a^1\Pi_g$		
Полоса 0—0		
3,62349	2759,767	R (4)
3,62614	2757,752	R (3)
3,62910	2755,505	R (2)
3,64313	2744,891	Q (4)
3,64472	2743,697	Q (5)
3,64662	2742,269	Q (6)
3,64883	2740,605	Q (7)
3,65138	2738,693	Q (8)
3,65424	2736,550	Q (9)
3,65745	2734,148	Q (10)
3,66095	2731,530	Q (11)
3,66483	2728,637	Q (12)
3,66899	2725,549	Q (13)
3,67352	2722,186	Q (14)
3,67834	2718,618	Q (15)

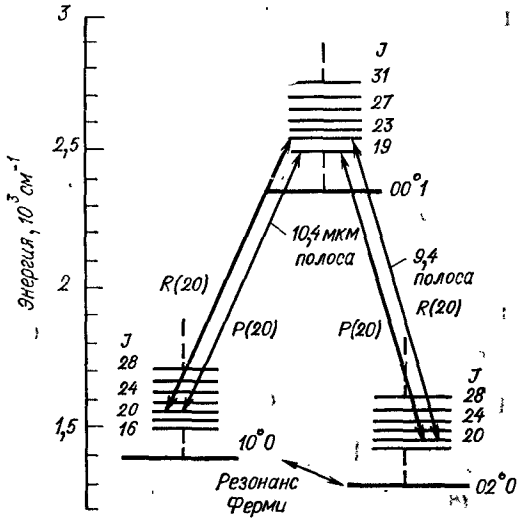


Рис. 33.33. Схема лазерных переходов для полос $(00^01) — (10^00)$ и $(00^01) — (02^00)$ молекулы CO_2 (включая вращательные уровни энергии) [5].

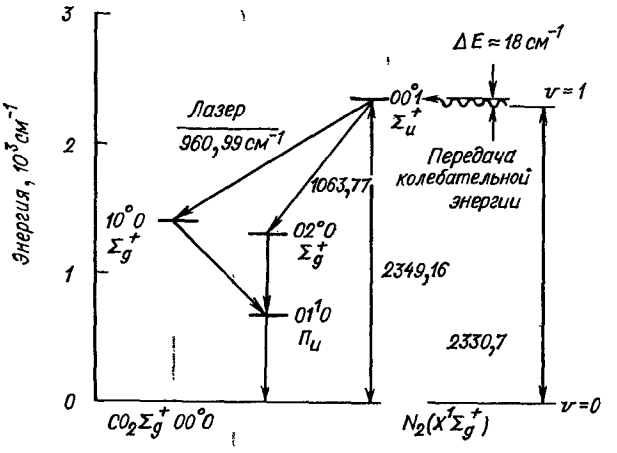


Рис. 33.34. Схема уровней энергии молекул N_2 и CO_2 по отношению к основным состояниям N_2 $\left(X^1\Sigma_g^+,\ v = 0\right)$ и CO_2 (00^00). Молекулы CO_2 селективно возбуждаются в состояние (00^01) при передаче колебательной энергии от молекул N_2^* $(v = 1)$ [5].

Лазерные переходы в трехатомных молекулярных газах [4] Таблица 33.5

$\lambda_{вак}$, *мкм*	ν, $см^{-1}$	Переход
CO_2-лазер (рис. 33.33 и 33.34)		
(1а) *Полоса* $(10^02) — (10^01)$		
4,3203	2314,65	R (17)
4,3249	2312,18	R (13)
4,3276	2310,73	R (11)
4,3549	2296,25	P (7)
4 3580	2294,62	P (9)
4,3612	2292,94	P (11)
4,3644	2291,25	P (13)
4,3677	2289,51	P (15)
4,3711	2287,76	P (17)
4,3745	2286,00	P (19)
4,3779	2284,20	P (21)
4,3814	2282,38	P (23)
4,3849	2280,53	P (25)
(1б) *Полоса* $(00^01) — (02^00)$, *R-ветвь*		
9,126866	1095,6663	R (52)
9,134184	1094,7885	R (50)
9,141719	1093,8862	R (48)
9,149471	1092,9593	R (46)
9,157446	1092,0076	R (44)
9,165645	1091,0307	R (42)
9,174070	1090,0287	R (40)
9,182725	1089,0014	R (38)
9,191612	1087,9485	R (36)
9,200733	1086,8699	R (34)
9,210092	1085,7655	R (32)
9,219690	1084,6352	R (30)
9,229530	1083,4788	R (28)
9,239615	1082,2962	R (26)
9,249946	1081,0874	R (24)

$\lambda_{вак}$, *мкм*	ν, $см^{-1}$	Переход
9,260526	1079,8522	*R* (22)
9,271358	1078,5906	*R* (20)
9,282444	1077,3025	*R* (18)
9,293786	1075,9878	*R* (16)
9,305386	1074,6465	*R* (14)
9,317246	1073,2785	*R* (12)
9,329370	1071,8837	*R* (10)
9,341758	1070,4623	*R* (8)
9,354414	1069,0141	*R* (6)
9,367339	1067,5391	*R* (4)

(1в) *Полоса* $(00^01) - (02^00)$, *P-ветвь*

9,428886	1060,5706	*P* (4)
9,443328	1058,9487	*P* (6)
9,458052	1057,3002	*P* (8)
9,473060	1055,6251	*P* (10)
9,488355	1053,9235	*P* (12)
9,503937	1052,1956	*P* (14)
9,519808	1050,4413	*P* (16)
9,535972	1048,6608	*P* (18)
9,552428	1046,8542	*P* (20)
9,569179	1045,0217	*P* (22)
9,586227	1043,1633	*P* (24)
9,603573	1041,2791	*P* (26)
9,621219	1039,3693	*P* (28)
9,639166	1037,4341	*P* (30)
9,657416	1035,4736	*P* (32)
9,675971	1033,4881	*P* (34)
9,694831	1031,4775	*P* (36)
9,713998	1029,4423	*P* (38)
9,733474	1027,3824	*P* (40)
9,753259	1025,2983	*P* (42)
9,773356	1023,1900	*P* (44)
9,793764	1021,0578	*P* (46)
9,814487	1018,9020	*P* (48)
9,835523	1016,7227	*P* (50)
9,856876	1014,5202	*P* (52)
9,878544	1012,2949	*P* (54)
9,900531	1010,0469	*P* (56)
9,922835	1007,7765	*P* (58)
9,945458	1005,4841	*P* (60)

(1г) *Полоса* $(00^01) - (10^00)$, *R-ветвь*

10,057895	994,2438	*R* (54)
10,066650	993,3792	*R* (52)
10,075698	992,4870	*R* (50)
10,085041	991,5676	*R* (48)
10,094676	990,6211	*R* (46)
10,104605	989,6478	*R* (44)
10,114826	988,6477	*R* (42)
10,125340	987,6211	*R* (40)
10,136146	986,5682	*R* (38)
10,147246	985,4891	*R* (36)
10,158637	984,3840	*R* (34)
10,170323	983,2530	*R* (32)
10,182301	982,0962	*R* (30)
10,194574	980,9139	*R* (28)
10,207142	979,7061	*R* (26)
10,220006	978,4730	*R* (24)
10,233167	977,2146	*R* (22)
10,246625	975,9311	*R* (20)
10,260381	974,6226	*R* (18)
10,274438	973,2892	*R* (16)
10,288797	971,9309	*R* (14)
10,303458	970,5479	*R* (12)
10,318424	969,1402	*R* (10)
10,333696	967,7079	*R* (8)
10,349277	966,2510	*R* (6)
10,365168	964,7697	*R* (4)

(1д) *Полоса* $(00^01) - (10^00)$, *P-ветвь*

10,440579	957,8012	*P* (4)
10,458220	956,1857	*P* (6)
10,476187	954,5458	*P* (8)
10,494484	952,8816	*P* (10)
10,513114	951,1930	*P* (12)
10,532080	949,4800	*P* (14)
10,551387	947,7427	*P* (16)
10,571037	945,9810	*P* (18)
10,591035	944,1948	*P* (20)
10,611385	942,3841	*P* (22)
10,632090	940,5488	*P* (24)
10,653156	938,6890	*P* (26)
10,674586	936,8045	*P* (28)
10,696386	934,8952	*P* (30)
10,718560	932,9611	*P* (32)
10,741113	931,0022	*P* (34)
10,764052	929,0182	*P* (36)
10,787380	927,0091	*P* (38)
10,811105	924,9749	*P* (40)
10,835231	922,9153	*P* (42)
10,859765	920,8302	*P* (44)
10,884713	918,7197	*P* (46)
10,910082	916,5834	*P* (48)
10,935879	914,4212	*P* (50)
10,962110	912,2331	*P* (52)
10,988783	910,0188	*P* (54)
11,015906	907,7783	*P* (56)

(1е) *Полоса* $(01^11) - (11^10)$

10,9730	911,33	*P* (19)
10,9856	910,28	*P* (20)
10,9944	909,55	*P* (21)
11,0078	908,46	*P* (22)
11,0164	907,74	*P* (23)
11,0300	906,62	*P* (24)
11,0385	905,92	*P* (25)
11,0529	904,74	*P* (26)
11,0610	904,08	*P* (27)
11,0762	902,84	*P* (28)
11,0840	902,20	*P* (29)
11,0999	900,91	*P* (30)
11,1073	900,31	*P* (31)

$\lambda_{вак}$, *мкм*	ν, *см*$^{-1}$	Переход
11,1238	898,97	*P* (32)
11,1309	898,40	*P* (33)
11,1483	897,00	*P* (34)
(1ж) *Полоса* $(01^{0}1)-(03^{1}0)$		
10,9735	911,29	*P* (19)
10,9951	909,50	*P* (21)
11,0165	907,73	*P* (23)
11,0300	906,62	*P* (24)
11,0385	905,92	*P* (25)
11,0535	904,69	*P* (26)
11,0610	904,08	*P* (27)
11,0760	902,85	*P* (28)
11,0850	902,12	*P* (29)
11,1000	900,90	*P* (30)
11,1070	900,33	*P* (31)
11,1235	899,00	*P* (32)
11,1315	898,35	*P* (33)
11,1485	896,98	*P* (34)
11,1555	896,42	*P* (35)
11,1736	894,97	*P* (36)
11,1791	894,53	*P* (37)
11,1980	893,02	*P* (38)
11,2035	892,58	*P* (39)
11,2235	890,99	*P* (40)
11,2295	890,51	*P* (41)
11,2495	888,93	*P* (42)
11,2545	888,53	*P* (43)
11,2770	886,76	*P* (44)
11,2804	886,49	*P* (45)

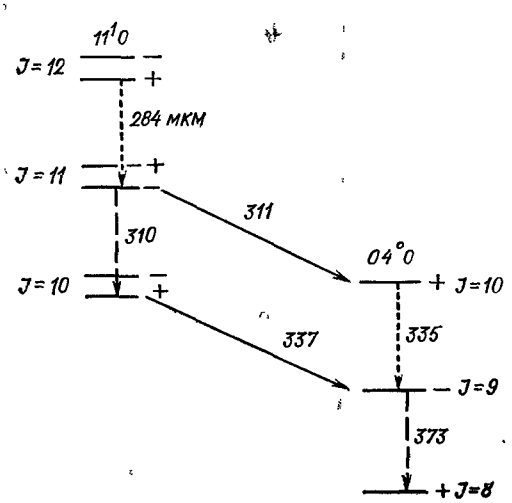


Рис. 33.35. Часть энергетических уровней молекулы HCN и соответствующие лазерные переходы в дальней инфракрасной области спектра [5].

$\lambda_{вак}$, *мкм*	ν, *см*$^{-1}$	Переход
(1з) $C^{18}O_2$**-лазер**		
Полоса $(00^{0}1)-(10^{0}0)$		
9,341	1070,6	*P* (18)
9,355	1069,0	*P* (20)
9,369	1067,4	*P* (22)
9,383	1065,8	*P* (24)
9,397	1064,2	*P* (26)
(2) CS_2**-лазер**		
Полоса $(02^{0}1)-(12^{0}0)$		
11,4823	870,90	*P* (28)
11,4893	870,38	*P* (30)
11,5962	869,85	*P* (32)
11,5031	869,33	*P* (34)
11,5099	868,82	*P* (36)
11,5166	868,31	*P* (38)
11,5237	867,80	*P* (40)
11,5307	867,27	*P* (42)
11,5376	866,73	*P* (44)
11,5446	866,20	*P* (46)

$\lambda_{вак}$, *мкм*	ν, *см*$^{-1}$	Переход	
		колебательный	вращательный
(3а) HCN-лазер (рис. 33.35)			
12,85	778,2	—	—
71,899	139,084	—	—
73,101	136,796	—	—
76,093	131,418	—	—
77,001	129,868	—	—
81,554	122,618	—	—
96,401	103,733	—	—
98,693	101,325	—	—
101,257	98,759	—	—
112,066	89,233	—	—
116,132	86,109	—	—
126,164	79,262	$(12^{2d}0)-(05^{1d}0)$	*R* (26)
128,629	77,743	$(12^{2d}0)-(05^{1d}0)$	*R* (25)
130,838	76,430	$(12^{0}0)-(05^{1c}0)$	*R* (25)
134,932	74,111	$(12^{0}0)-(05^{1c}0)$	*R* (24)
201,059	49,737	—	—
211,001	47,393	—	—
222,949	44,853	—	—
284	35,2	$(11^{1c}0)-(11^{1c}0)$	*R* (11)
309,7140	32,28785	$(11^{1c}0)-(11^{1c}0)$	*R* (10)
310,8870	32,16603	$(11^{1c}0)-(04^{0}0)$	*R* (10)
335,1831	29,8344	$(04^{0}0)-(04^{0}0)$	*R* (9)
336,5578	29,71258	$(11^{1c}0)-(04^{0}0)$	*R* (9)
372,5283	26,84360	$(04^{0}0)-(04^{0}0)$	*R* (8)

$\lambda_{вак}$, *мкм*	ν, *см*$^{-1}$	Переход: колебательный	Переход: вращательный
538,2	18,580	—	—
545,4	18,335	—	—
676	14,79	—	—
773,5	12,928	—	—
	(3б) DCN-лазер		
181,789	55,009	$(22^{0}0)$—$(22^{0}0)$	R (22)
189,9490	52,6457	$(22^{0}0)$—$(09^{1c}0)$	R (21)
190,0080	52,6294	$(22^{0}0)$—$(22^{0}0)$	R (21)
194,7027	51,3604	$(22^{0}0)$—$(09^{1c}0)$	R (20)
194,7644	51,3441	$(09^{1c}0)$—$(09^{1c}0)$	R (20)
204,3872	48,9267	$(09^{1c}0)$—$(09^{1c}0)$	R (19)
	(3в) HCN-лазер		
110,240	90,711	—	—
113,311	88,253	—	—
138,768	72,063	—	—
165,150	60,551	—	—
	(4а) H_2O-лазер (рис. 33.36—33.38)		
2,279	4387,60	—	—
4,77	2096,0	—	—
7,458	1340,70	(020)—(010)	4_{41}—5_{50}
7,596	1316,38	(020)—(010)	5_{50}—6_{61}
7,709	1297,19	(020)—(010)	6_{61}—7_{40}
11,83	845,3	—	—
11,96	836,1	—	—
16,932	590,60	(010)—(010)	$13_{11,2}$—$12_{10,3}$
23,13	432,3	(020)—(020)	9_{63}—8_{54}
23,365	427,99	(100)—(020)	9_{45}—8_{54}
24,966	400,54	(100)—(020)	8_{44}—7_{53}
26,660	375,09	(100)—(020)	7_{43}—6_{52}
27,9707	357,516	(001)—(020)	6_{33}—5_{50}
28,054	356,46	(020)—(020)	6_{61}—5_{50}
28,270	353,73	(100)—(020)	8_{08}—7_{35}
28,356	352,66	(020)—(020)	8_{44}—7_{35}
28,451	351,48	(100)—(020)	6_{42}—5_{51}
32,924	303,73	(020)—(020)	5_{50}—4_{41}
33,029	302,76	(100)—(020)	5_{14}—4_{41}
34,60	289,02	—	—
35,017	285,58	(100)—(100)	7_{34}—6_{25}
35,833	279,07	(100)—(020)	$12_{1,12}$—11_{29}
36,606	273,18	(010)—(010)	$13_{11,2}$—$13_{10,3}$
37,848	264,21	(100)—(020)	$12_{0,12}$—11_{39}
38,086	262,56	—	—
39,695	251,92	(001)—(020)	7_{44}—6_{61}
40,45	247,2	(100)—(020)	$13_{1,13}$—$12_{2,10}$
40,638	246,08	(020)—(020)	4_{41}—3_{30}
42,51	235,24	—	—
45,517	219,70	—	—
45,91	217,82	—	—
47,244	211,67	(020)—(020)	9_{63}—9_{54}
47,39	211,01	—	—
47,468	210,67	(001)—(020)	6_{33}—6_{52}
47,687	209,70	(020)—(020)	6_{61}—6_{52}
48,19	207,5	(100)—(020)	9_{45}—9_{54}
48,676	205,44	—	—
49,06	203,83	(100)—(020)	7_{43}—7_{52}
53,910	185,49	—	—
54,853	182,31	—	—
55,000	181,82	(020)—(020)	6_{52}—6_{43}
55,088	181,53	(020)—(020)	5_{50}—5_{41}
57,659	173,43	(100)—(020)	9_{19}—8_{44}
57,799	173,01	(020)—(020)	9_{54}—9_{45}
66,880	149,52	—	—
66,903	149,45	—	—
67,169	148,88	(020)—(020)	4_{41}—4_{32}
		или	
		(100)—(020)	6_{25}—5_{50}
68,344	146,32	(020)—(020)	5_{41}—5_{32}
72,856	137,26	(100)—(020)	8_{17}—8_{44}
73,401	136,24	(100)—(100)	8_{17}—8_{08}
78,443	127,481	(100)—(020)	8_{08}—8_{35}
79,087	126,44	(020)—(020)	8_{44}—8_{35}
85,564	116,87	(100)—(020)	7_{52}—7_{61}
86,478	115,64	(100)—(100)	9_{54}—9_{45}
87,323	114,52	—	—
87,469	114,32	(100)—(020)	8_{53}—8_{62}
89,772	111,39	(100)—(020)	9_{54}—9_{63}
89,947	111,18	—	—
90,565	110,42	—	—
115,32	86,72	(020)—(020)	8_{35}—8_{26}
118,591	84,323	(001)—(020)	6_{42}—6_{61}
120,08	83,28	(001)—(001)	6_{42}—6_{33}
220,230	45,407	(100)—(020)	5_{23}—5_{50}
	(4б) $H_2{}^{18}O$-лазер		
25,162	397,42	(100)—(020)	8_{45}—7_{52}
26,595	376,01	(100)—(020)	7_{44}—6_{51}
28,295	353,42	(100)—(020)	6_{43}—5_{50}
33,308	300,23	(020)—(020)	5_{50}—4_{41}
35,383	282,62	(100)—(020)	$12_{1,12}$—11_{29}
48,366	206,76	(100)—(020)	6_{43}—6_{52}
48,604	205,74	(020)—(020)	6_{61}—6_{52}
48,765	205,07	(100)—(020)	7_{44}—7_{53}
49,430	202,31	(100)—(020)	8_{45}—8_{54}
56,129	178,16	(020)—(020)	5_{50}—5_{41}
	(4в) D_2O-лазер		
26,36	279,36	—	—
33,896	295,02	(100)—(020)	13_{59}—12_{66}
35,081	285,05	(100)—(020)	12_{58}—11_{65}
36,096	277,04	(100)—(020)	11_{56}—10_{65}
36,324	275,30	(100)—(020)	11_{57}—10_{64}
36,526	273,78	(020)—(020)	11_{75}—10_{64}
37,788	264,63	(100)—(020)	10_{55}—9_{64}
37,860	264,13	(100)—(020)	10_{56}—9_{63}
39,53	252,97	(100)—(020)	9_{55}—8_{64}
40,994	243,94	(020)—(020)	10_{64}—9_{55}
41,79	239,28	(100)—(020)	12_{56}—11_{75}
48,80	204,92	—	—
50,71	197,20	—	—
54,73	182,72	—	—
56,830	175,96	(100)—(020)	$16_{0,16}$—$15_{3,13}$
61,182	163,45	—	—
71,944	138,99	(100)—(020)	11_{57}—11_{66}

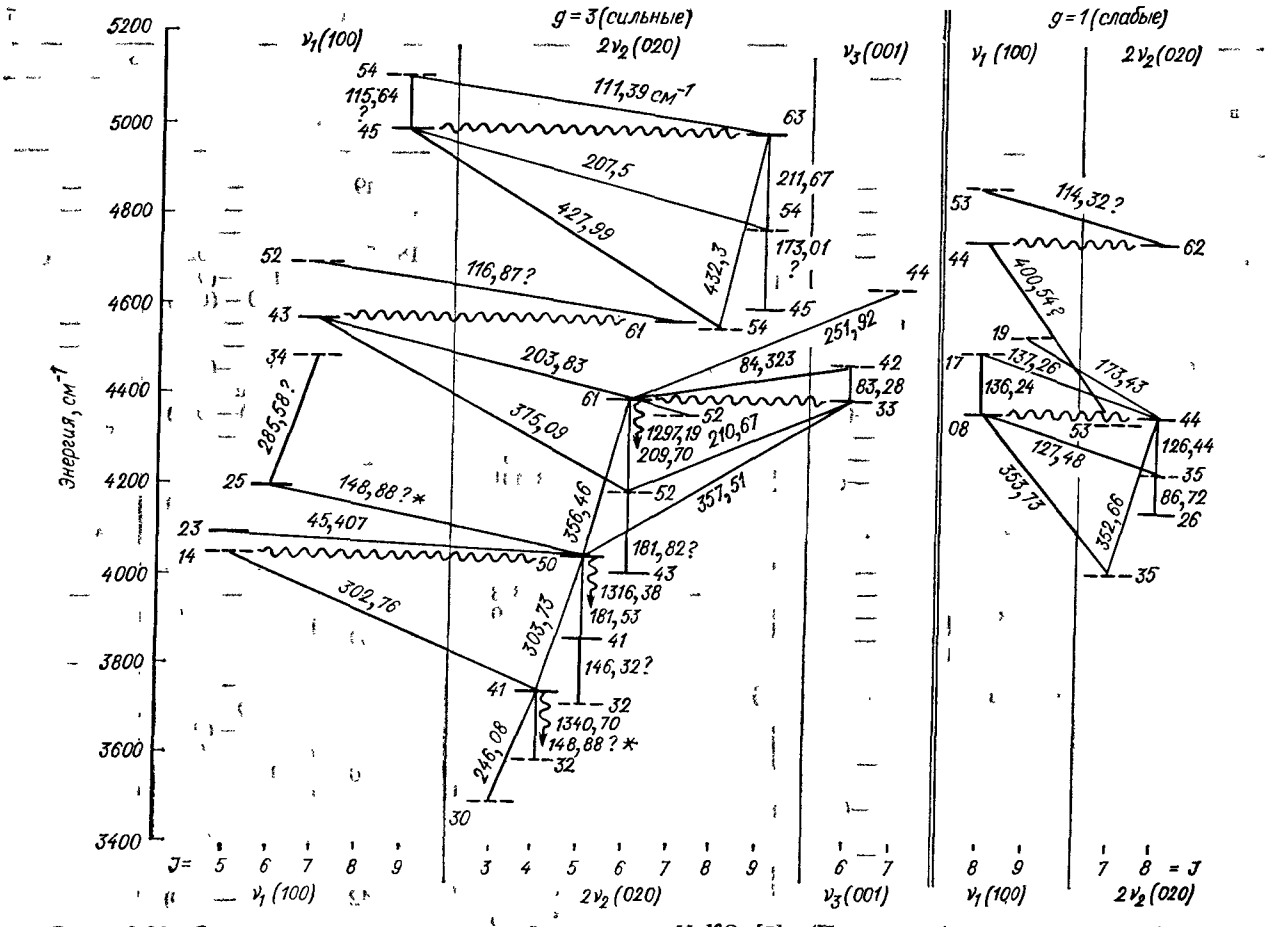


Рис. 33.36. Схема энергетических уровней молекулы $H_2{}^{16}O$ [5]. (Показана большая часть наблюдавшихся лазерных переходов (длины волн указаны в $см^{-1}$). Уровни идентифицированы по квантовым числам K_a, K_c. Уровни классов симметрии ++ и +— изображены сплошными, а классов —+ и —— прерывистыми линиями. Лазерные переходы с сомнительной идентификацией помечены знаком (?), переходы, для которых возможны две идентификации, — знаком (*).)

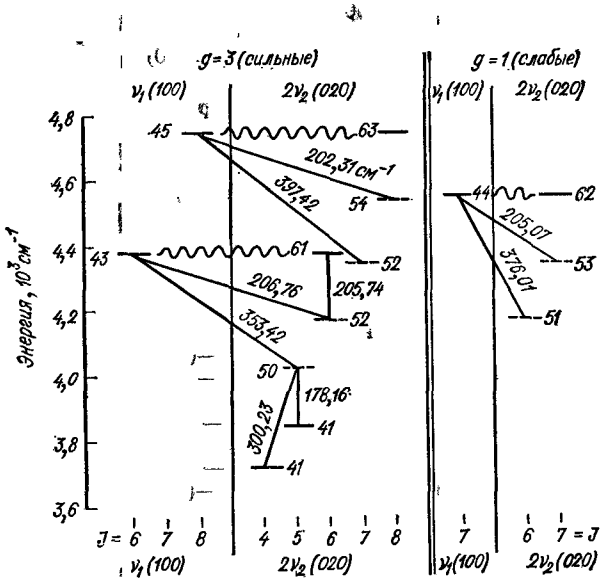


Рис. 33.37. Схема энергетических уровней молекулы $H_2{}^{18}O$ и соответствующие лазерные переходы [5]. Обозначения см. на рис. 33.36.

$\lambda_{вак}$, *мкм*	ν, $см^{-1}$	Переход	
		колебательный	вращательный
72,427	138,07	(020)—(020)	10_{74}—10_{65} или 10_{73}—10_{64}
72,757	137,44	(020)—(020)	11_{75}—11_{66}
73,341	136,35	(100)—(020)	12_{58}—12_{67}
74,526	134,18	(100)—(020)	13_{59}—13_{68}
76,305	131,05	—	—
78,16	127,94	—	—
83,730	119,43	(020)—(020)	10_{65}—10_{56}
84,111	118,89	(020)—(020)	11_{66}—11_{57}
84,284	118,65	(100)—(020)	$12_{1,12}$—11_{47}
99,00	101,01	—	—
103,33	96,78	—	—
107,731	92,823	(100)—(020)	11_{66}—11_{75}
107,91	92,67	(100)—(100)	13_{68}—13_{59}
108,88	91,84	(100)—(020)	11_{65}—11_{74}
110,49	90,51	(100)—(020)	12_{66}—12_{75}
111,74	89,49	(100)—(020)	13_{68}—13_{77}
170,08	58,80	(020)—(020)	11_{47}—11_{38}
171,67	58,25	(100)—(020)	$11_{0,11}$—11_{38}
218,5	45,77	—	—

$\lambda_{вак}$, *мкм*	ν, $см^{-1}$	Относительная интенсивность
	(5) H_2S-лазер	
33,48	298,7	0,6
33,65	297,2	480
49,63	201,5	1
52,41	190,8	60
56,86	175,9	60
60,31	165,8	200
61,52	162,6	1000
73,54	136,0	0,2
80,52	124,2	220
83,45	119,8	1000
92,03	108,7	0,1
96,41	103,7	3
103,3	96,8	125
108,8	91,9	7
116,8	85,6	4
126,2	79,2	2
129,1	77,4	4
130,8	76,4	1
135,5	73,8	2
140,6	71,1	10
162,4	61,6	560
192,9	51,8	20
225,4	44,4	1000
	(6а) N_2O-лазер (рис. 33.39)	
	Полоса (00^01)—(10^00), R-ветвь	
10,3456	966,59	*R* (35)
10,3532	965,88	*R* (34)
10,3609	965,16	*R* (33)
10,3687	964,44	*R* (32)
10,3765	963,72	*R* (31)
10,3843	962,99	*R* (30)
10,3922	962,26	*R* (29)
10,4001	961,53	*R* (28)
10,4081	960,79	*R* (27)
10,4161	960,05	*R* (26)
10,4242	959,31	*R* (25)
10,4323	958,56	*R* (24)
10,4405	957,81	*R* (23)
10,4487	957,06	*R* (22)
10,4570	956,30	*R* (21)
10,4653	955,54	*R* (20)
10,4737	954,77	*R* (19)
10,4821	954,01	*R* (18)
10,4906	953,24	*R* (17)
10,4991	952,46	*R* (16)
10,5077	951,69	*R* (15)
10,5163	950,90	*R* (14)
10,5250	950,12	*R* (13)
10,5337	949,33	*R* (12)
10,5425	948,54	*R* (11)
10,5513	947,75	*R* (10)
10,5602	946,95	*R* (9)
10,5692	946,15	*R* (8)
10,5781	945,35	*R* (7)
10,5872	944,54	*R* (6)
10,5963	943,73	*R* (5)
10,6054	942,91	*R* (4)
10,6146	942,09	*R* (3)
10,6239	941,27	*R* (2)
10,6332	940,45	*R* (1)
10,6426	939,62	*R* (0)
	(6б) *Полоса (00^01)—(10^00), P-ветвь*	
10,6614	937,96	*P* (1)
10,6710	937,11	*P* (2)
10,6806	936,28	*P* (3)
10,6903	935,43	*P* (4)
10,6999	934,58	*P* (5)
10,7097	933,73	*P* (6)
10,7195	932,88	*P* (7)
10,7294	932,02	*P* (8)
10,7393	931,16	*P* (9)
10,7493	930,29	*P* (10)
10,7593	929,43	*P* (11)
10,7694	928,55	*P* (12)
10,7796	927,68	*P* (13)
10,7898	926,80	*P* (14)
10,8000	925,92	*P* (15)
10,8104	925,03	*P* (16)
10,8208	924,15	*P* (17)
10,8312	923,25	*P* (18)
10,8418	922,36	*P* (19)
10,8523	921,46	*P* (20)

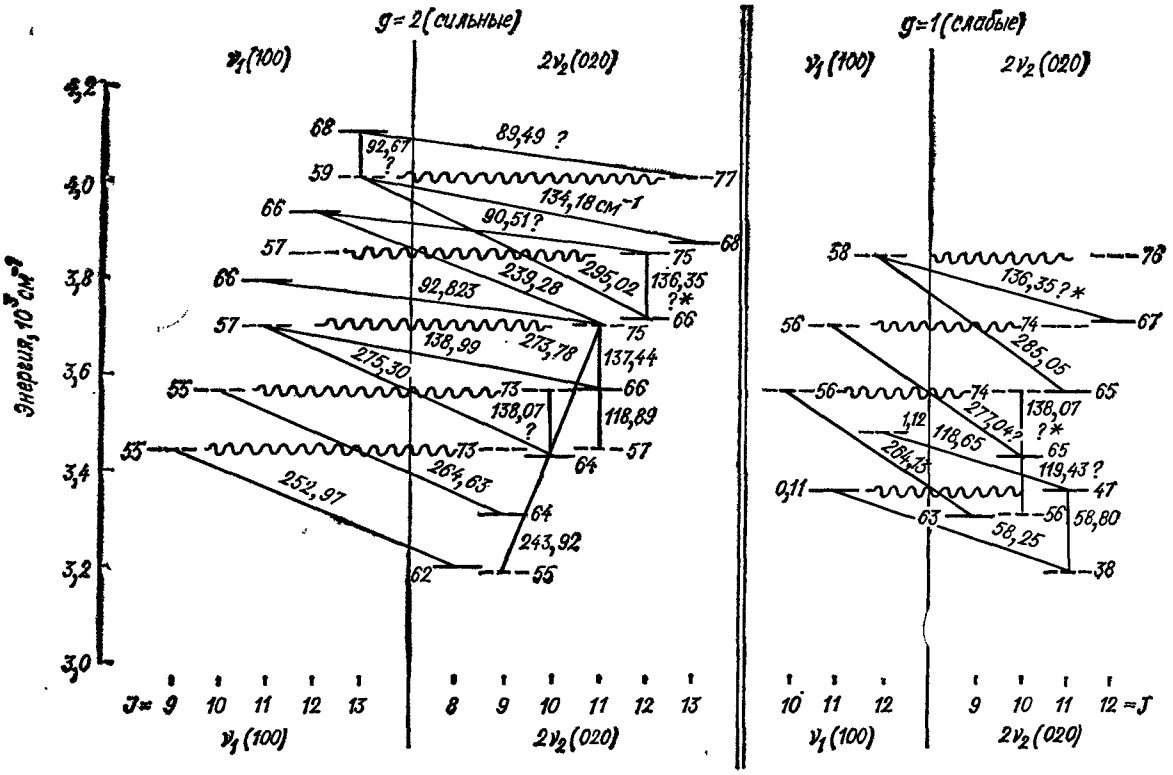


Рис. 33.38. Схема энергетических уровней молекулы $D_2{}^{16}O$ и соответствующие лазерные переходы [5]. Обозначения см. на рис. 33.36.

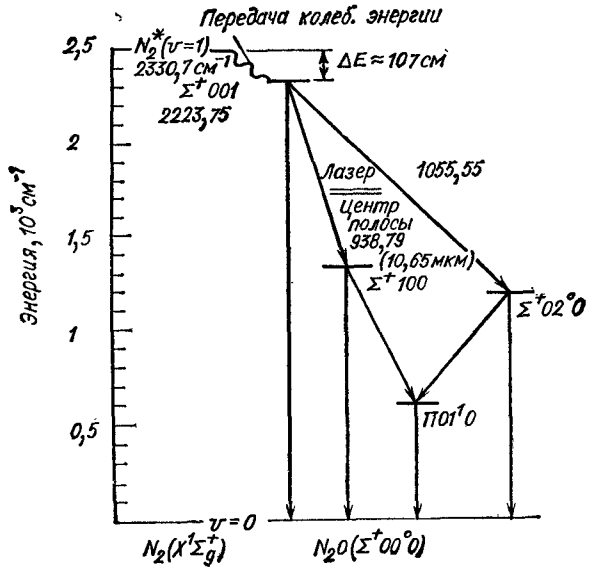


Рис. 33.39. Схема энергетических уровней молекул N_2 и N_2O [5]. Показан процесс передачи колебательной энергии от N_2 к N_2O с последующим лазерным переходом в полосе $(00^01) - (10^00)$ N_2O. $(X^1\Sigma_g^+, v = 0)$ и (Σ^+00^00) — основные состояния соответственно N_2 и N_2O.

$\lambda_{вак}$, *мкм*	ν, *см*$^{-1}$	Переход
10,8629	920,56	P (21)
10,8736	919,65	P (22)
10,8844	918,75	P (23)
10,8952	917,83	P (24)
10,9061	916,92	P (25)
10,9170	916,00	P (26)
10,9280	915,08	P (27)
10,9390	914,16	P (28)
10,9501	913,23	P (29)
10,9613	912,29	P (30)
10,9726	911,36	P (31)
10,9839	910,42	P (32)
10,9953	909,48	P (33)
11,0067	908,53	P (34)
11,0182	907,58	P (35)
11,0298	906,63	P (36)
11,0415	905,68	P (37)
(7a) OCS-лазер *Полоса* $(00^01) - (10^00)$		
8,2388	1213,76	R (26)
8,2416	1213,35	R (25)
8,2439	1213,02	R (24)
8,2518	1211,86	R (21)
8,2543	1211,48	R (20)
8,2571	1211,08	R (19)
8,2595	1210,73	R (18)
8,2623	1210,32	R (17)
8,2645	1209,99	R (16)
8,2673	1209,59	R (15)
8,3625	1195,82	P (18)
8,3654	1195,40	P (19)
8,3685	1194,98	P (20)
8,3715	1194,52	P (21)
8,3746	1194,09	P (22)
8,3779	1193,62	P (23)
8,3809	1193,19	P (24)
8,3839	1192,76	P (25)
8,3870	1192,32	P (26)
8,3900	1191,89	P (27)
8,3930	1191,46	P (28)
8,3962	1191,02	P (29)
8,3999	1190,49	P (30)
8,4024	1190,14	P (31)
8,4055	1189,70	P (32)
8,4085	1189,27	P (33)
8,4117	1188,82	P (34)
8,4146	1188,40	P (35)
8,4178	1187,95	P (36)
8,4213	1187,46	P (37)
8,4243	1187,04	P (38)
(7б) Разные переходы		
123	81,3	?
132	75,8	?
(8) SO_2-лазер		
140,85	70,99	?
151,16	66,16	?
192,67	51,90	?
215,27	46,45	?

Таблица 33.6

Лазерные переходы в некоторых многоатомных молекулярных газах [5]

$\lambda_{вак}$, *мкм*	ν, *см*$^{-1}$	Переход
(1) CH_3F-лазер, чисто вращательные переходы		
		$v = 0$
451,924	22,1276	R (12), $K = 2$
451,903	22,1286	R (12), $K = 1$
		$v = 1$
496,105	20,1570	R (10), $K = 2$
496,072	20,1584	R (10), $K = 1$
541,147	18,4793	R (11), $K = 2$
541,113	18,4804	R (11), $K = 1$
(2) CH_3OH-лазер, чисто вращательные переходы		
70,6	141,6	—
118 8	84,18	—
164,3	60,86	—
170,6	58,62	—
185,5	53,91	—
190,8	52,41	—
193,2	51,76	—
198,8	50,30	—
202,4	49,41	—
223,5	44,74	—
237,6	42,09	—
253,6	39,43	—
254,1	39,35	—
263,7	37,92	—
264,6	37,79	—
278,8	35,87	—
292,2	34,22	—
292,5	34,19	—
369,1	27,09	—
392,3	25,49	—
417,8	23,93	—
570,5	17,53	—
699,5	14,30	—
(3) NH_3-лазер *Полоса* $(03^s0) - (02^a0)$		
14,78	676,6	—
15,04	664,9	—
15,08	663,1	—
15,41	648,9	—
15,47	646,4	—

Продолжение табл. 33.6

$\lambda_{вак}$, мкм	ν, $см^{-1}$	Переход	$\lambda_{вак}$, мкм	ν, $см^{-1}$	Переход
18,21	549,1	—	31,47	317,7	—
21,471	465,74	$P(2)\ 1_0$	31,951	312,97	—
22,542	443,61	$P(3)\ 2_2$	32,13	311,2	—
22,563	443,20	$P(3)\ 2_1$			
22,71	440,3		**(4) H_2C=CHCl-лазер, чисто вращательные переходы**		
23,675	422,38	$P(4)\ 3_0$ или 3_1			
23,86	419,11				
24,918	401,32	$P(5)\ 4_1$	386,0	25,91	—
25,12	398,09		507,7	19,70	—
26,282	380,49	$P(6)\ 5_0\ 5_1$	634,4	15,76	—
30,69	325,8	—			

33.4. ЛАЗЕРЫ НА ПРИМЕСНЫХ КРИСТАЛЛАХ

Лазеры на примесных кристаллах представляют собой системы, в которых в качестве активного вещества используются кристаллические материалы. Генерация и усиление осуществляются в этих системах в результате переходов возбужденных ионов-активаторов, введенных в решетку кристалла, в устойчивое состояние. Возбуждение (накачка) ионов элемента-активатора производится оптически, чаще всего с помощью импульсных или непрерывно действующих газоразрядных ламп.

Энергетические уровни ионов, вводимых в кристаллическую решетку в качестве активаторов, значительно отличаются от уровней энергии свободных ионов. Под действием поля кристаллической решетки происходит расщепление, смещение и уширение уровней ионов. На рис. 33.40 показаны энергетические уровни двухвалентных ионов редкоземельных элементов, актиноидов и элементов группы железа, а на рис. 33.42 и 33.43 уровни трехвалентных ионов редкоземельных элементов. Наи-

Кристаллические вещества

Вещество	Симметрия	Пространственная группа, структура		Симметрия расположения замещаемого иона	Постоянные решетки, Å	ρ, $г/см^3$
Оксиды						
Al_2O_3	Ромбоэдральная	$D_{3d}^5 - R\bar{3}c$,	корунд	$C_{3v}(Al^{3+})$	$a_0 = 4{,}759$ $c_0 = 12{,}989$	3,987
Er_2O_3	Кубическая	$T_h^7 - Ia3$,	биксбайт	$C_2(Er^{3+})$ $C_{3i}(Er^{3+})$	10,547	8,64
Gd_2O_3	Моноклинная	$C_{2h}^3 - C2/m$		$C_s(Gd^{3+})$	$a_0 = 14{,}061$ $b_0 = 3{,}566$ $c_0 = 8{,}760$	7,407
La_2O_3	Гексагональная	$D_{3d}^3 - C\bar{3}m$		$C_{3v}(La^{3+})$	$a_0 = 3{,}937$ $c_0 = 6{,}130$	6,51
Y_2O_3	Кубическая	$T_h^7 - Ia3$,	биксбайт	$C_2(Y^{3+})$ $C_{3i}(Y^{3+})$	10,604	5,06
La_2O_2S	Гексагональная	$D_{3d}^3 - P\bar{3}m$		$C_{3v}(La^{3+})$	$a_0 = 4{,}051$ $c_0 = 6{,}943$	5,73
$Gd_3Ga_5O_{12}$	Кубическая	$O_h^{10} - Ia3d$,	гранат	$D_2(Gd^{3+})$ $C_{3i}(Ga^{3+})$	12,376	—
$Y_3Al_5O_{12}$ (YAG)	»	$O_h^{10} - Ia3d$,	»	$D_2(Y^{3+})$ $C_{3i}(Al^{3+})$	12,01	4,55
$Y_3Ga_5O_{12}$	»	$O_h^{10} - Ia3d$,	»	$D_2(Y^{3+})$ $C_{3i}(Gd^{3+})$	12,277	—
$YAlO_3$	Орторомбическая	$D_{2h}^{16} - Pbnm$,	искаженный перовскит	$C_{1h}(Y^{3+})$ $C_i(Al^{3+})$	$a_0 = 5{,}179$ $b_0 = 5{,}329$ $c_0 = 7{,}370$	5,35
Фториды						
BaF_2	Кубическая	$O_h^5 - Fm3m$,	флюорит	—	6,19	4,83
CaF_2	»	$O_h^5 - Fm3m$,	»	$O_h(Ca^{2+})$ $C_{4v}(Ca^{2+} + F^-)$ $C_{3v}(Ca^{2+} + O^{2-})$	5,464	3,179
SrF_2	»	$O_h^5 - Fm3m$,	»	—	5,78	4,24
MgF_2	Тетрагональная	$D_{4h}^{14} - P4/mnm$,	рутил	$D_{2h}(Mg^{2+})$	$a_0 = 4{,}621$ $c_0 = 3{,}053$	3,177

большее воздействие испытывают уровни, соответствующие внешним электронам ионов, так как внутренние электроны атома экранируются внешними оболочками.

Как правило, кристаллы до введения в них ионов-активаторов являются совершенно бесцветными и оптически прозрачными. Введение в них ионов активатора приводит к появлению областей селективного поглощения и спонтанной люминесценции (центров окраски). Основные характеристики кристаллических материалов, используемых в качестве матриц для различных ионов-активаторов приведены в табл. 33.7.

Одни и те же ионы-активаторы в зависимости от типа кристалла, в который они введены, образуют различные лазерные системы, характеризующиеся и различными генерационными параметрами. Большое влияние при этом оказывает температура активной среды, в зависимости от которой меняются радиационные параметры и спектр поглощения ионов элемента-активатора в кристалле. Одним из возможных методов вариации свойств лазерных кристаллов является концентрация ионов-активаторов.

Основные лазерные системы на кристаллах, активированных различными ионами, режимы их работы, источники накачки и другие параметры приведены в табл. 33.8.

В ряде случаев кроме ионов-активаторов в кристаллы вводятся также другие ионы, роль которых в системе сводится к поглощению энергии накачки и передаче ее лазерному иону. Тем самым повышается эффективность лазера. Этот метод повышения эффективности преобразования энергии накачки в лазерное излучение носит название метода сенсибилизирующей добавки. Механизм сенсибилизации пояснен на рис. 33.44. Ионы-сенсибилизаторы для различных кристаллов и лазерных ионов перечислены в табл. 33.9.

В таблицах данного раздела приняты обозначения:

ρ — плотность, $г/см^3$;
$T_{пл}$ — температура плавления, °С;
H — твердость по Кнупу, $кг \cdot мм^{-2}$; значение твердости (по Моосу) помечено знаком (M);
k — коэффициент теплопроводности, $вт/(см \cdot град)$
α — коэффициент теплового расширения, $10^{-6} \cdot град^{-1}$;
n — показатель преломления;
λ — длина волны лазерного излучения, $мкм$;
E_l — энергия нижнего лазерного уровня, $см^{-1}$;
C — массовая концентрация ионов активатора, %;
τ_F — время жизни верхнего лазерного уровня, $мсек$;
$\delta\nu_F$ — ширина линии люминесценции, $см^{-1}$;
T — рабочая температура, °К.

Режим работы: имп. — импульсный; непр. — непрерывный.

Накачка: Хе — ксеноновая, W — вольфрамовая, Hg — ртутная или Кг — криптоновая лампы.

Примечание. Характеристики кристаллов для лазеров могут слегка варьироваться в зависимости от приготовления и от образца к образцу.

для лазеров [6]

Таблица 33.7

$T_{пл}$, °С	H, $кг/мм^2$	k, $вт/(см \cdot град)$	α, 10^{-6} $град^{-1}$	Область прозрачности, $мкм$	n	Метод роста
2040	2100	0,35 ∥ c-оси 0,33 ⊥ c-оси	5,31 ∥ c-оси 4,78 ⊥ c-оси	0,14—6,5	1,763 (n_0) 1,755 (n_e)	Чохральского — Вернейля
2660	—	—	—	—	—	»
2350	—	—	9,05	—	2,1	»
2307	—	—	—	—	—	»
2410	—	0,27	7	0,23—8	1,91	»
2070	780	0,05	6 ∥ c-оси 3 ⊥ c-оси	0,35—8	2,2	Бриджмена—Стокбергера
~1825	—	0,09	—	—	—	Чохральского
1970	1380	0,13	6,9	0,3—5,5	1,823	»
—	—	0,09			1,93	»
1875	1325	0,11	9,5 ∥ a-оси 4,3 ∥ b-оси 10,8 ∥ c-оси	0,3—5,8	1,97 (n_a) 1,96 (n_b) 1,94 (n_c)	»
1280	82	—	18,4	0,23—12	1,473	Бриджмена—Стокбергера
1360	163	0,097	19,5	0,13—12	1,433	»
1400	4 (M)	—	—	—	1,438	—
1255	—	0,031	8,8 ∥ c-оси 13,1 ⊥ c-оси	до 6	1,38	Зонная плавка

Вещество	Симметрия	Пространственная группа, структура	Симметрия расположения замещаемого иона	Постоянные решетки, Å	ρ, г/см³
MnF_2	Тетрагональная	D_{4h}^{14} — $P4/mnm$, »	D_{2h} (Mn^{2+})	$a_0 = 4{,}715$ $c_0 = 3{,}131$	—
ZnF_2	»	D_{4h}^{14} — $P4/mnm$, »	D_{2h} (Zn^{2+})	$a_0 = 4{,}703$ $c_0 = 3{,}134$	4,84
CeF_3	»	D_{6h}^{3} — $C6/mcm$, тизонит	C_2 (Ce^{3+})	$a_0 = 4{,}115$ $c_0 = 7{,}288$	6,16
HoF_3	Орторомбическая	$Pnma$	C_s (Ho^{3+})	—	—
LaF_3	Гексагональная	D_{6h}^{3} — $C6/mcm$, тизонит	C_2 (La^{3+})	$a_0 = 4{,}148$ $c_0 = 7{,}354$	5,94
$LiYF_4$ (YLF)	Тетрагональная	C_{4h}^{6} — $I4_1/a$, шеелит	— S_4 (Y^{3+})	$a_0 = 5{,}26$ $c_0 = 10{,}94$	—
Вольфраматы					
$CaWO_4$	»	C_{4h}^{6} — $I4_1/a$, »	S_4 (Ca^{2+})	$a_0 = 5{,}242$ $c_0 = 11{,}372$	6,120
$SrWO_4$	»	C_{4h}^{6} — $I4_1/a$, »	S_4 (Sr^{2+})	$a_0 = 5{,}40$ $c_0 = 11{,}90$	6,18
$NaGd(WO_4)_2$	»	C_{4h}^{6} — $I4_1/a$, »	S_4 (Gd^{3+})	—	—
$NaLa(WO_4)_2$	»	C_{4h}^{6} — $I4_1/a$, »	S_4 (La^{3+})	$a_0 = 5{,}357$ $c_0 = 11{,}743$	—
Молибдаты					
$CaMoO_4$	»	C_{4h}^{6} — $I4_1/a$, »	S_4 (Ca^{2+})	$a_0 = 5{,}226$ $c_0 = 11{,}43$	4,256
$LaNa(MoO_4)_2$	Тетрагональная	C_{4h}^{6} — $I4_1/a$, шеелит	S_4 (La^{3+})	$a_0 = 5{,}328$ $c_0 = 11{,}699$	4,79
$PbMoO_4$	»	C_{4h}^{6} — $I4_1/a$, »	(Pb^{2+})	$a_0 = 5{,}435$ $c_0 = 12{,}110$	6,816
$SrMoO_4$	»	C_{4h}^{6} — $I4_1/a$, »	S_4 (Sr^{2+})	$a_0 = 5{,}38$ $c_0 = 11{,}97$	4,15
$Gd_2(MoO_4)_3$	Орторомбическая	$Pba2$, —	(Gd^{3+})	$a_0 = 10{,}3858$ $b_0 = 10{,}4186$ $c_0 = 10{,}7004$	—
$KY(MoO_4)_3$	»	D_{2h}^{14} — $Pbna$, —	S_4 (Y^{3+})	$a_0 = 5{,}07$ $b_0 = 18{,}23$ $c_0 = 7{,}95$	—
Ниобаты					
$Ca(NbO_3)_2$	»	D_{2h}^{14} — $Pbcn$, ферсмит	C_2 (Ca^{2+})	—	4,72
$LiNbO_3$	Ромбоэдральная	C_{3v}^{6} — $R3c$, ильменит	—	$a_0 = 5{,}47$ $b_0 = 5{,}112$ $c_0 = 13{,}816$	4,628
$LaNbO_4$	Моноклинная	C_2, — фергюсонит	(La^{3+})	$a_0 = 5{,}56$ $b_0 = 11{,}54$ $c_0 = 5{,}20$	—
Ванадаты					
$Ca_3(VO_4)_2$	»	C_{2h}^{6} — $C2/c$, —	(Ca^{2+})	$a_0 = 8{,}35$ $b_0 = 10{,}77$ $c_0 = 7{,}00$	3,55
YVO_4	Тетрагональная	P_{4h}^{19} — $14/2md$, циркон	D_{2d} (Y^{3+})	$a_0 = 7{,}133$ $c_0 = 6{,}291$	4,23
Фосфаты, силикаты, германаты					
$Ca_5(PO_4)_3F$, (FAP)	Гексагональная	C_{6h}^{2} — $P6_3/m$, апатит	C_{1h} (Ca^{2+}—I) C_s (Ca^{2+}—II)	$a_0 = 9{,}368$ $c_0 = 6{,}884$	3,189
$CaY_4(SiO_4)_3O$, (SOAP)	»	C_{6h}^{2} — $P6_3/m$, »	—	—	—
$Ba_2MgGe_2O_7$, (BMAG)	Тетрагональная	P_{2d}^{3} — $P42_1m$, акерманит	(Ba^{2+})	$a_0 = 7{,}84$ $c_0 = 5{,}01$	—

$T_{пл}$, °С	H, кг/мм²	k, вт/(см·град)	α, 10^{-6} град$^{-1}$	Область прозрачности, мкм	n	Метод роста
930	—	—	—	—	—	Зонная плавка
872	—	—	—	—	—	»
1325—1425	4,5 (M)	—	—	0,3—9,5	1,62	Бриджмена — Стокбергера
1100	743	—	—	—	1,58	Чохральского
1490	4,5 (M)	0,051	—	—	1,6	»
—	—	—	9,1 ∥ c-оси 8,5 ⊥ c-оси	—	1,634 (n_0) 1,631 (n_e)	»
1570	4,5 (M)	0,33 ∥ c-оси	11,2 ∥ a-оси 18,7 ∥ c-оси	0,3—3,0	1,92	»
1566	—	—	—	—	—	»
1400	—	—	—	—	—	»
—	—	—	—	—	—	»
1430	4,3 (M)	0,04	25,5 ∥ c-оси 19,4 ∥ a-оси	—	1,97	»
—	4,5 (M)	0,022	—	—	—	»
1070	—	—	—	—	—	»
1490	—	0,040 ∥ a-оси 0,041 ∥ c-оси	—	—	1,94	»
—	—	—	—	—	—	»
—	—	—	—	0,33—5,5	—	»
1560	5,5 (M)	—	—	0,3—5,5	2,07 (α) 2,10 (β) 2,18 (γ)	»
1253	5 (M)	0,056	—	0,37—5	2,286 (n_0) 2,200 (n_e)	»
1650	—	—	—	0,3—6	2,187 (n_g) 2,094 (n_m) 2,077 (n_p)	»
1470	4,3 (M)	0,014	55 ∥ c-оси 35 ∥ a-оси	—	1,89	»
1750—1900	5,5 (M)	0,052 ∥ c-оси 0,051 ⊥ c-оси	7,3 ⊥ c-оси	0,45—4,8	1,86 (n_0) 1,88 (n_c)	Бриджмена — Стокбергера
1705	540	0,021 [0001] 0,019 [10$\bar{1}$0]	10 [0001] 9,4 [10$\bar{1}$0]	—	1,63	Чохральского
>2000	—	—	—	—	1,8	»
—	—	—	—	—	—	—

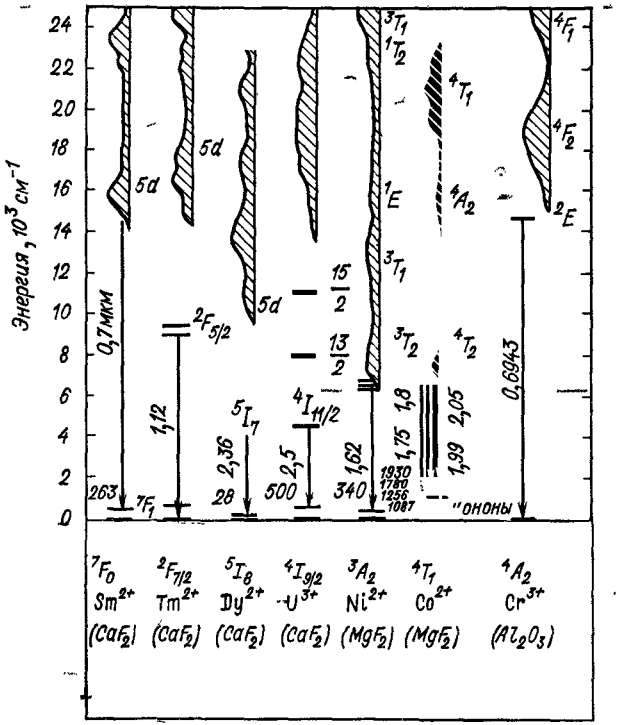


Рис. 33.40. Схемы энергетических уровней ионов двухвалентных редкоземельных элементов, ионов, актиноидов и ионов группы железа в матрицах некоторых кристаллов [6].

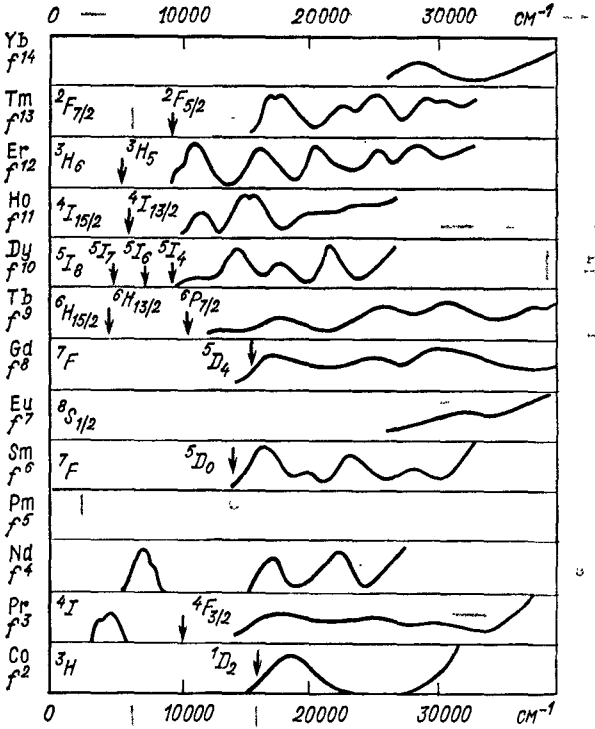


Рис. 33.41. Спектры поглощения ионов двухвалентных редкоземельных элементов в кристалле CaF_2 [6]. Положение переходов $f \rightarrow f$ указано стрелкой.

Твердотельные лазерные системы на кристаллах [6]

Таблица 33.8

Ионы	Кристалл	Лазерный переход	λ, *мкм*	E_l, $см^{-1}$	C, %	τ_F, *мсек*	$\delta\nu_F$, $см^{-1}$	Режим работы	T, °K	Накачка
Группа железа										
Хром										
Cr^{3+}, $3d^3$	Al_2O_3	$^2E(\bar{E}) \rightarrow {}^4A_2$	0,6943(R_1)	0	0,05	3	~10	имп.	300	Xe
								непр.	300	Hg
			0,6934	0	0,05	4,3	—	имп.	77	Xe
								непр.	77	Hg
		$^2E(2\bar{A}) \rightarrow {}^4A_2$	0,6929(R_2)	0	0,05	—	—	имп.	290	Xe
($^{52}Cr^{3+}$)		$^2E(\bar{E}) \rightarrow {}^4A_2$	0,6934089	0	0,05	—	—	»	≈70	Xe
($^{52}Cr^{3+}$)			0,6934255	—	0,05	—	—	»	≈70	Xe
($^{50}Cr^{3+}$)			0,6934382	—	—	—	—	»	≈70	Xe
			0,7009(N^2)	~100	0,5—0,7	1,1	~2	»	77	Xe
		(Cr^{3+}—Cr^{3+})	0,7041(N_1)			1,3	~2	»	77	Xe
Ванадий	MgF_2	$^4T_2 \rightarrow {}^4A_2$	1,1213	1150	—	2,3	—	»	77	Xe
V^{2+}, $3d^3$										
Кобальт	$KMgF_3$	$^4T_2 \rightarrow {}^4T_1$	1,821	1420	—	3,1	—	имп.	77	Xe
Co^{2+}, $3d^7$	MgF_2	$^4T_2 \rightarrow {}^4T_1$	1,750	1087	1	1,3	—	»	77	Xe
			1,8035	1256	—	—	—	»	77	Xe
			1,99	1780	—	—	—	»	77	Xe
			2,05	1930	—	—	—	»	77	Xe
	ZnF_2	$^4T_2 \rightarrow {}^4T_1$	2,165	1895	1	0,4	—	»	77	Xe
	MgF_2	$^3T_2 \rightarrow {}^3A_2$	1,623	340	1,5	11,5	—	»	77	Xe
Никель			1,636	390	—	—	—	»	77—82	Xe
Ni^{2+}, $3d^8$			1,674—1,676	526—533	—	—	—	»	82—100	Xe
					—			непр.	85	W
								имп.	100—192	Xe
			1,731—1,756	723—805	—	—	—	непр.	85	W
			1,785—1,797	898—935	—	—	—	имп	198—240	Xe
	MgO	$^3T_2 \rightarrow {}^3A_2$	1,3144	398	—	—	—	»	77	Xe
	MnF_2	$^3T_2 \rightarrow {}^3A_2$	1,915	580	—	11,1	—	»	77	Xe
			1,865	560	—	11,3	—	»	20	Xe
			1,922	600	—	11,1	—	»	77	Xe
			1,929	620	—	—	—	»	85	Xe
								непр.	85	W
			1,939	650	—	—	—	имп.	85	Xe
Двухвалентные ионы редкоземельных элементов								непр.	85	W
Самарий	CaF_2	$5d \rightarrow {}^7F_1$	0,7085	263	~0,01	0,002	1,6	имп.	20	Xe
Sm^{2+}, $4f^6$			0,708	—	—	—	—	»	65—90	Излучение
			0,720	—	—	—	—	»	>65	рубинового
			0,729	—	—	—	—	»	>65	лазера
	SrF_2	$^5D_0 \rightarrow {}^7F_1$	0,6969	~270	0,1	14	~1	»	4,2	Xe
Диспрозий	CaF_2	$^5I_7 \rightarrow {}^5I_8$	2,36	90	0,03	12	—	»	77	Hg
Dy^{2+}, $4f^{10}$				90	0,02	—	—	непр.	77	Xe
				28,8	—	—	—	»	4,2	W
				—	0,05	10	—	»	27	Излучение Солнца

Продолжение табл. 33.8

Ионы	Кристалл	Лазерный переход	λ, *мкм*	E_l, $см^{-1}$	C, %	τ_F, *мсек*	$\delta\nu_F$, $см^{-1}$	Режим работы	T, °K	Накачка
Dy^{2+}, $4f^{10}$	Поликристалл		2,35867(4,2°K)	29,0	0,01—0,2	50—15	0,25 (77°K)	непр.	4,2—77	W
								имп.	77	Xe
								»	4	Xe
	SrF_2	$^5I_7 \rightarrow {}^5I_8$	2,3659	—	0,03	50	0,5—0,6	»	77	Xe
Тулий	CaF_2	$^2F_{5/2} \rightarrow {}^2F_{7/2}$	1,116	556	0,05	4	0,03	»	4,2	Xe
Tm^{2+}, $4f^{13}$								непр.	27	Hg
								»	4,2	Hg
Трехвалентные ионы редкоземельных элементов										
Празеодим	$Ca(NbO_3)_2$	$^1G_4 \rightarrow {}^3H_4$	1,04	—	—	—	—	имп.	77	Xe
Pr^{3+}, $4f^2$	$CaWO_4$	$^1D_2 \rightarrow {}^3F_4$	1,0468	377	0,5	0,05	~10	»	20—90	Xe
	LaF_3	$^3P_0 \rightarrow {}^3H_6$	0,5985	~4200	1,0	—	~3	»	77	Xe
	$SrMoO_4$	$^1G_4 \rightarrow {}^3H_4$	1,04	—	—	—	—	—	—	—
Неодим	$Ba_{0,75}Ca_{0,25}Nb_2O_6$	$^4F_{3/2} \rightarrow {}^4I_{11/2}$	1,062	~2000	—	—	—	имп.	295	Xe
Nd^{3+}, $4f^3$	BaF_2	$^4F_{3/2} \rightarrow {}^4I_{11/2}$	1,060	~2000	—	—	—	»	77	Xe
	BaF_2-LaF_3	$^4F_{3/2} \rightarrow {}^4I_{11/2}$	1,0540	~2000	0,5—1,0	—	—	»	300	Xe
	$Ba_2MgGe_2O_7$	$^4F_{3/2} \rightarrow {}^4I_{11/2}$	0,0544	~2000	2,0	0,45	~10	»	300	Xe
	$Bi_4Ge_3O_{12}$	$^4F_{3/2} \rightarrow {}^4I_{11/2}$	1,0640	~2000	—	—	—	»	295	Xe
			1,0638	—	—	—	—	»	77	Xe
	CaF_2	$^4F_{3/2} \rightarrow {}^4I_{11/2}$	1,0457	~2000	—	—	—	»	77	Xe
	CaF_2(I)	$^4F_{3/2} \rightarrow {}^4I_{11/2}$	1,0461	~2000	0,41	1,5	—	»	300	Xe
			1,0457	—	0,62	—	—	»	50	Xe
			1,0467	—	—	—	—	»	50	Xe
			1,0448	—	—	—	—	»	50	Xe
			1,0508	—	—	—	—	»	50	Xe
			1,0650	—	—	—	—	»	50	Xe
			1,0481	—	—	—	—	»	50	Xe
		$^4F_{3/2} \rightarrow {}^4I_{11/2}$	1,0448	~2000	4	—	—	»	120	Xe
			1,0661	—	—	—	—	»	120	Xe
	CaF_2(II)	$^4F_{3/2} \rightarrow {}^4I_{11/2}$	1,0885	~2000	0,2—0,5	1,25	25	»	300	Xe
	CaF_2-CeF_3	$^4F_{3/2} \rightarrow {}^4I_{11/2}$	1,0657	~2000	1,0	0,46	~3	»	300	Xe
	CaF_2-CeO_2	$^4F_{3/2} \rightarrow {}^4I_{11/2}$	≈1,0885	~2000	1,0	~1,2	~25	»	300	Xe
	CaF_2-SrF_2	$^4F_{3/2} \rightarrow {}^4I_{11/2}$	1,0369	~2000	0,5	1,4	~20	»	300	Xe
	CaF_2-SrF_2-BaF_2-V-YF_3-La-F_3	$^4F_{3/2} \rightarrow {}^4I_{11/2}$	1,0535	~2000	1	0,4	—	»	300	Xe
	CaF_2-YF_3	$^4F_{3/2} \rightarrow {}^4I_{11/2}$	1,0461	~2000	0,5	~1,0	—	»	300	Xe
			1,0545	—	—	—	—	»	300	Xe
			1,0632	—	—	—	—	»	300	Xe
	$CaMoO_4$	$4F_{3/2} \rightarrow {}^4I_{11/2}$	1,067	~2000	—	0,16	—	»	77	Xe
			1,0673	—	—	—	—	»	295	Xe
	$Ca(NbO_3)_2$	$^4F_{3/2} \rightarrow {}^4I_{11/2}$	1,06	~2000	0,5	0,12	~2	»	77	Xe

Ионы	Кристалл	Лазерный переход	λ, *мкм*	E_l, $см^{-1}$	*C*, %	τ_F, *мсек*	$\delta\tau_F$, $см^{-1}$	Режим работы	*T*, °K	Накачка
			1,0615	1949	2,0	0,125	~7,5	непр.	300	Xe
			1,0612	1952	—	—	~4,5	»	77	Xe
	$Ca_5(PO_4)_3F$	$^4F_{3/2} \rightarrow {}^4I_{11/2}$	1,0629	1904	1,1	0,24	~5,3	имп.	300	Xe
								непр.	300	W
	$Ca_3(VO_4)_2$	$^4F_{3/2} \rightarrow {}^4I_{11/2}$	1,067	~2000	2,0	0,15	160	имп.	300	Xe
	$CaWO_4$	$^4F_{3/2} \rightarrow {}^4I_{11/2}$	1,0584	2016	3,0	0,172	—	»	300	Xe
								непр.	300	Xe
			1,065	2016	0,14	0,13	5,3	имп.	77	Xe
								непр.	85	Hg
			1,0652	—	—	—	15	имп.	295	Xe
			1,0633	—	—	—	—	»	77	Xe
			1,066	—	—	—	—	»	77	Xe
			1,0576	—	—	—	—	»	77	Xe
			1,0582	—	—	—	—	непр.	295	Hg
		$^4F_{3/2} \rightarrow {}^4I_{9/2}$	0,9145	471	—	—	—	имп.	77	Xe
		$^4F_{3/2} \rightarrow {}^4I_{13/2}$	1,3372	3928	—	—	—	»	77	Xe
			1,345	3971	—	—	—	»	77	Xe
			1,387	4196	—	—	—	»	77	Xe
			1,3392	4004	—	—	—	»	295	Xe
	CdF_2–YF_3	$^4F_{3/2} \rightarrow {}^4I_{11/2}$	1,0651	~2000	~2	0,31	270	»	300	Xe
	CeF_3	$^4F_{3/2} \rightarrow {}^4I_{11/2}$	1,0638	2222	0,1	0,225	~9	»	90	Xe
			1,0639	—	4—5	0,27	33	»	300	Xe
			1,0410	—	—	—	20	»	77	Xe
			1,0404	—	—	—	24	»	300	Xe
								»	77	Xe
	$Gd_3Ga_5O_{12}$	$^4F_{3/2} \rightarrow {}^4I_{11/2}$	1,0633	~2000	3,0	0,2	8,0	»	300	Xe
	$Gd_2(MoO_4)_3$	$^4F_{3/2} \rightarrow {}^4I_{11/2}$	~1,06	~2000	3	—	—	»	135	Xe
								»	298	Xe
	Gd_2O_3	$^4F_{3/2} \rightarrow {}^4I_{11/2}$	1,0789	~2000	—	0,12	20—30	»	300	Xe
			1,0741	—	—	—	—	»	300	Xe
			1,0789	—	—	—	8	»	77	Xe
			1,0776					»	77	Xe
	$KY(MoO_4)_2$	$^4F_{3/2} \rightarrow {}^4I_{11/2}$	1,0669	1983	2,5	0,13	12	»	300	Xe
	LaF_3	$^4F_{3/2} \rightarrow {}^4I_{11/2}$	1,0407	1983	1,0	0,67	~2,3	»	300	Xe
			1,0633	2189	—	—	~6	»	300	Xe
			1,0403	1979	—	—	~1	»	77	Xe
		$^4F_{3/2} \rightarrow {}^4I_{11/2}$	1,0407	—	2,0	0,3	—	»	300	Xe
								непр.	300	Xe
			1,0633	—	—	—	—	непр.	400—500	Xe
	LaF_3–SrF_2	$^4F_{3/2} \rightarrow {}^4I_{11/2}$	1,0486	~2000	2	0,26	~9	имп.	300	Xe
			1,0635	—	—	—	~6	»	300	Xe
	$LaNa(MoO_4)_2$	$^4F_{3/2} \rightarrow {}^4I_{11/2}$	1,0597	1953	1—2	0,15	—	»	300	Xe
			1,0653	1989	5—10	~0,1	5	»	300	Xe
			1,0595	—	1	0,19	—	»	300	Xe
	$LaNbO_4$	$^4F_{3/2} \rightarrow {}^4I_{11/2}$	1,0624	~2000	1	0,12	9	»	300	Xe
	La_2O_3	$^4F_{3/2} \rightarrow {}^4I_{11/2}$	1,079	~2000	1,0	0,125	11	»	77	Xe
	La_2O_2S	$^4F_{3/2} \rightarrow {}^4I_{11/2}$	1,075	1909	1,0	0,090	—	»	300	Xe

Продолжение табл. 33.8

Ионы	Кристалл	Лазерный переход	λ, мкм	E_l, $см^{-1}$	C, %	τ_F, мсек	$\delta\nu_F$ $см^{-1}$	Режим работы	T, °K	Накачка
Неодим Nd^{3+}, $4f^3$	$LiNbO_3$	$^4F_{3/2} \rightarrow {}^4I_{11/2}$	1,0842	2033	—	85	—	нмп	295	Xe
			1,0846	—	—	—	—	»	77	Xe
			1,0846	—	—	—	17	»	300	Xe
	$LiYF_4$	$^4F_{3/2} \rightarrow {}^4I_{11/2}$	1,0530	2042	2.2	0,42	12,5	»	300	Xe
			1,0471	2042	—	—	—	»	300	Xe
	α-$NaCaCeF_6$	$^4F_{3/2} \rightarrow {}^4I_{11/2}$	1,0653	—	1,0	0,44	—	»	300	Xe
	α $NaCaYF_6$	$^4F_{3/2} \rightarrow {}^4I_{11/2}$	1,0538	—	0,5	0,36	—	»	300	Xe
			1,0631	—	—	—	—	»	300	Xe
	$5NaF \cdot 9YF_3$	$^4F_{3/2} \rightarrow {}^4I_{11/2}$	1,0506	~2000	~1	0,96		»	300	Xe
			1,0595	—	—	—	—	»	300	Xe
	$Na_{0,5}Gd_{0,5}WO_4$	$^4F_{3/2} \rightarrow {}^4I_{11/2}$	1,06	~2000	2	0,18		»	77	Xe
	$PbMoO_4$	$^4F_{3/2} \rightarrow {}^4I_{11/2}$	1,0586	~2000	—	0,13—0,14	—	»	295	Xe
	SrF_2	$^4F_{3/2} \rightarrow {}^4I_{11/2}$	1,037	2000	—	1,1—1,2	—	»	295	Xe
			1,0437	—	—	—	—	»	77	Xe
			1,044	—	0,2	1,6	—	»	77	Xe
	$SrF_2 \cdot YF_3$(10%)	$^4F_{3/2} \rightarrow {}^4I_{11/2}$	1,0567	—	2,0	0,36	~24	имп.	300	Xe
	$SrMoO_4$	$^4F_{3/2} \rightarrow {}^4I_{11/2}$	1,0643	~2000	—	—	15	»	295	Xe
			1,0576	—	—	—	—	»	295	Xe
			1,0640	—	—	—	3	»	77	Xe
			1,0652	—	—	—	—	»	77	Xe
			1 059	—	—	—	—	»	77	Xe
			1,0627	—	—	—	—	»	77	Xe
			1,0611	—	—	—	—	»	77	Xe
	$YAlO_3$	$^4F_{3/2} \rightarrow {}^4I_{11/2}$	1,0795	2157	3	0.065	12	»	300	Xe
								непр.	300	—
			1,0725	2097	1,5	~0,10	—	имп.	300	Xe
	($0,3\%Cr^{3+}$)		1,0645	2023	0,9	0,16	—	»	295	Xe
								непр.	295	Kr
	$Y_3Al_5O_{12}$	$^4F_{3/2} \rightarrow {}^4I_{11/2}$	1,0612	2001	3,0	~0,2	1,0—1,5	имп.	77	Xe
			1,0642	2110	—	—	6,5	»	300	Xe
								непр.	300	Hg
		$^4F_{3/2} \rightarrow {}^4I_{11/2}$	1,0519	—	—	—		»	300	W
			1,0613	—	—	—	—	»	300	W
			1,0640	—	—	—	—	»	300	W
			1,0736	—	—	—	—	»	300	W
			1,1119	—	—	—	—	»	300	W
			1,1158	—	—	—	—	»	300	W
			1,1225	—	—	—	—	»	300	W
		$^4F_{3/2} \rightarrow {}^4I_{13/2}$	1,319	~4000	—	—	—	»	300	W
			1,318	—	—	0,29	—	нмп.	300	Xe
			1,338	—	—	—	—	»	300	Xe
			1,358	—	—	—	—	»	300	Xe
		$^4F_{3/2} \rightarrow {}^4I_{9/2}$	0,946	848	1,0	—	—	»	230—295	Xe
	+1,0% Cr^{3+}	$^4F_{3/2} \rightarrow {}^4I_{11/2}$	1,0641	2110	1,3	—	—	»	300	Xe
								непр.	300	Hg
								»	300	W

Ионы	Кристалл	Лазерный переход	λ, *мкм*	E_l, *см*$^{-1}$	*C*, %	τ_F, *мсек*	$\delta\nu_F$, *см*$^{-1}$	Режим работы	*T*, °K	Накачка
			1,0612	2001	—	0,24—3,5		непр.	77	Hg
								»	77	W
	$Y_3Ga_5O_{12}$	$^4F_{3/2} \rightarrow {}^4I_{11/2}$	1,0633	~2000	3,0	0,2	6,5	имп.	300	Xe
	Y_2O_3	$^4F_{3/2} \rightarrow {}^4I_{11/2}$	1,073	~2000	1,0	0,26	3,0	»	77	Xe
			1,078	—	—	—	—	»	77	Xe
	YVO_4	$^4F_{3/2} \rightarrow {}^4I_{11/2}$	1,069	~2000	0,1	0,033	—	»	~90	Xe
			1,0641	1964	~2	~0,09	—	»	300	Xe
			1,0664	1985	—	—	—	»	300	Xe
Европий Eu^{3+}, $4f^6$	Y_2O_3	$^5D_0 \rightarrow {}^7F_2$	0,6113	859	5,0	0,87	—	»	220	Xe
	YVO_4	$^5D_0 \rightarrow {}^7F_2$	0,6193	~1000	—	—	—	»	90	Xe
Гольмий Ho^{3+}, $4f^{10}$	CaF_2	$^5I_7 \rightarrow {}^5I_8$	2,092	~ 230	—	—	—	»	77	Xe
		$^5S_2 \rightarrow {}^5I_8$	0,55122	270	0,4—0,8	0,7	~6	»	77	Xe
	3% ErF_3, 3% YbF_3, 3% TmF_3	$^5I_7 \rightarrow {}^5I_8$	2,1	—	1	6	—	имп.	77	Xe
								непр.	77	Xe
	CaF_2–ErF_3	$^5I_7 \rightarrow {}^5I_8$	2,0600	~250	0,5	—	—	имп.	77	Xe
	CaF_2–YF_3	$^5I_7 \rightarrow {}^5I_8$	2,0318	~80	3	—	~90	»	90	Xe
								»	77	Xe
	(+ Er^{3+}, Tm^{3+}, Yb^{3+})	$^5I_7 \rightarrow {}^5I_8$	2,05	—	0,5	—	—	»	100	Xe
			2,06	—	—	—	—	»	298	Xe
	$CaMoO_4$	$^5I_7 \rightarrow {}^5I_7$	2,0740	~250	0,5	1,3	—	»	77	Xe
								»	20	Xe
			2,0707	—	—	—	—	»	77	Xe
			2,0556	—	—	—	—	»	77	Xe
	$Ca(NbO_3)_2$	$^5I_7 \rightarrow {}^5I_8$	2,047	—	0,5	2,2	—	»	77	Xe
	$Ca_5(PO_4)_3F$ (+ Cr^{3+})	$^5I_7 \rightarrow {}^5I_8$	≈2,075	—	—	—	—	»	77	Xe
	$CaWO_4$	$^5I_7 \rightarrow {}^5I_8$	2,046	230	0,5	—	—	имп.	77	Xe
	$CaY_4(SiO_4)_3O$ (22,5% Er^{3+}, 0,5% Tm^{3+})	$^5I_7 \rightarrow {}^5I_8$	2,059	—	—	—	—	»	77	Xe
			—	—	2,5	—	—	»	77	Xe
	Er_2O_3	$^5I_7 \rightarrow {}^5I_8$	2,121	—	—	—	—	»	77	Xe
								»	145	Xe
								непр.	77	W
	$Er_{1,5}Y_{1,5}Al_5O_{12}$	$^5I_7 \rightarrow {}^5I_8$	2,0979	462	—	—	—	имп.	77	Xe
								непр.	77	Hg
								»	77	W
			2,0917	—	—	—	—	имп.	77	Xe
			~2,123	—	—	—	—	»	77	Xe
	HoF_3	$^5I_7 \rightarrow {}^5I_8$	2,090	377	100	2,6	1,5	»	77	Xe
	$LiNbO_3$	$^5I_7 \rightarrow {}^5I_8$	2,0786	310	—	—	—	»	77	Xe
	$LiYF_4$ (5% Er^{3+})	$^5I_7 \rightarrow {}^5I_8$	2,066	—	2,0	20	—	»	77	Xe
	α-$NaCaErF_6$	$^5I_7 \rightarrow {}^5I_8$	2,0345	~120	~1	—	~120	»	150	Xe
			2,0312	—	—	—	~100	»	77	Xe
			2,0377	—	—	—	—	»	77	Xe
	$Y_3Al_5O_{12}$	$^5I_7 \rightarrow {}^5I_8$	2,0914	—	—	~4	—	»	77	Xe

Продолжение табл. 33.8

Ионы	Кристалл	Лазерный переход	λ, *мкм*	E_l, $см^{-1}$	C, %	τ_F, *мсек*	$\delta\nu_F$, $см^{-1}$	Режим работы	T, °K	Накачка
Гольмий Ho^{3+}, $4f^{10}$			2,0975	462	—	—	—	имп.	77	Xe
			2,1223	518	—	—	—	»	77	Xe
	(0,5% Cr^{3+})		2,0975	462	—	—	—	»	77	Xe
								непр.	85	W
			2,1223	518	—	—	—	имп.	77	Xe
								иепр.	85	Hg
								»	85	W
	(50% Er^{3+}	$^5I_7 \rightarrow {}^5I_8$	2,0982	462	5	—	—	имп.	77	Xe
	6,7% Tm^{3+})		2,1227	518	—	—	—	»	77	Xe
								непр.	85	W
			2,1288	532	—	—	—	имп.	295	Xe
			2,13	532	5	3,0	—	»	295	Xe
								»	77	Xe
								непр.	77	W
	$YAlO_3$	$^5I_7 \rightarrow {}^5I_8$	2,119	474	1,67	4,8	9,8	имп.	77	Xe
	(50% Er^{3+}						17	»	300	Xe
	6,7% Tm^{3+})									
	$Y_3Fe_5O_{12}$	$^5I_7 \rightarrow {}^5I_8$	2,086	—	2	—	—	»	77	Xe
	(5% Er^{3+}		2,0905	—	—	—	—	»	77	Xe
	5% Tm^{3+})									
Эрбий Er^{3+}, $4f^{11}$	CaF_2	$^4I_{13/2} \rightarrow {}^4I_{15/2}$	1,617	~400	0,1	20	—	»	77	Xe
		$^4I_{13/2} \rightarrow {}^4I_{15/2}$	1,5298	~30	0,05	0,8—1,3	—	»	4	Xe
			1,5308	—	—	—	—	»	4	Xe
		$^4S_{3/2} \rightarrow {}^4I_{13/2}$	0,8456	~6200	4—8	~1	~10	»	77	Xe
			0,8548	—	—	—	—	»	77	Xe
		$^4S_{3/2} \rightarrow {}^4I_{11/2}$	1,26	~10 000	0,1	0,3	—	»	77	Xe
		$^4S_{3/2} \rightarrow {}^4I_{9/2}$	1,696	12 413	0,1	0,3	—	»	77	Xe
			1,715	—	—	—	—	»	77	Xe
			1,726	—	—	—	—	»	77	Xe
	CaF_2-ErF_3-TmF_3	$^4I_{11/2} \rightarrow {}^4I_{13/2}$	2,69	~6200	12,5	4,5	—	»	298	Xe
	CaF_2 – YF_3	$^4I_{13/2} \rightarrow {}^4I_{15/2}$	1,5448	~180	5	—	~16	»	77	Xe
			1,5558	~260	—	—	~20	»	77	Xe
	$Ca(NbO_3)_2$	$^4I_{13/2} \rightarrow {}^4I_{15/2}$	1,61	~400	—	—	—	»	77	Xe
	$CaWO_4$	$^4I_{13/2} \rightarrow {}^4I_{15/2}$	1,612	375	1,0	—	~10	»	77	Xe
	LaF_3	$^4I_{13/2} \rightarrow {}^4I_{15/2}$	1,6113	400	0,05	—	—	»	77	Xe
	$YAlO_3$	$^4S_{3/2} \rightarrow {}^4I_{9/2}$	1,663	12 400	0,5	0,12	—	»	295	Xe
	$Y_3Al_5O_{12}$	$^4I_{13/2} \rightarrow {}^4I_{15/2}$	1,6602	525	—	—	—	»	77	Xe
			1,6452	525	—	—	—	»	77	Xe
	(5% Yb^{3+})		1,6459	459	1,0	9,1	~20	»	295	Xe
Тулий Tm^{3+}, $4f^{12}$	CaF_2-ErF_3(12,5%)	$^3H_4 \rightarrow {}^3H_6$	1,860	~300	0,5	2,9	—	»	100	Xe
	CaF_2 – ErF_3	$^3H_4 \rightarrow {}^3H_6$	1,894	~350	0,5	—	—	»	77	Xe
		$^3H_4 \rightarrow {}^3H_6$	1,9	—	1,0	6	—	»	77	Xe

Ионы	Кристалл	Лазерный переход	λ, *мкм*	E_l, $см^{-1}$	C, %	τ_F, *мсек*	$\delta\nu_F$, $см^{-1}$	Режим работы	T, °K	Накачка
								непр	77	Xe
	$CaMoO_4$	$^3H_4 \rightarrow {}^3H_6$	1,9115	~325	0,5	⩾0,9	~10	имп.	77	Xe
	(0,75% Er^{3+})		1,9060	—	—	—	—	»	77	Xe
	$Ca(NbO_3)_2$	$^3H_4 \rightarrow {}^3H_6$	1,91	—	—	—	—	»	77	Xe
	$CaWO_4$	$^3H_4 \rightarrow {}^3H_6$	1,911	~325	—	—	~10	»	77	Xe
			1,916	—	—	—	—	»	77	Xe
	Er_2O_3	$^3H_4 \rightarrow {}^3H_6$	1,934	~300	0,5	2,9	—	»	77	Xe
								иепр.	~80	W
	$Er_{1,5}Y_{1,5}Al_5O_{12}$	$^3H_4 \rightarrow {}^3H_6$	1,880	228	—	15	—	имп.	77	Xe
			1,884	240	—	—	—	»	77	Xe
			2,014	582	—	—	—	непр.	85	W
	$LiNbO_3$	$^3H_4 \rightarrow {}^3H_6$	1,8532	271	—	—	—	имп	77	Xe
	α-$NaCaErF_6$	$^3H_4 \rightarrow {}^3H_6$	1,8580	~470	~1,0	—	~70	»	77	Xe
							75	»	150	Xe
			1,8885	~540	—	—	~50	»	77	Xe
	SrF_2	$^3H_4 \rightarrow {}^3H_6$	1,972	—	—	10	—	»	77	Xe
	$Y_3Al_5O_{12}$	$^3H_4 \rightarrow {}^3H_6$	1,8834	240	—	15	—	»	77	Xe
			2,0132	582	—	—	—	»	77	Xe
								непр.	85	W
	(0,5% Cr^{3+})		2,0132	582	—	—	—	имп.	77	Xe
								иепр.	85	Hg
								»	85	W
			2,019	600	—	—	—	имп.	295	Xe
Иттербий Yb^{3+}, $4f^{13}$	CaF_2 (1—2% Nd^{3+})	$^2F_{5/2} \rightarrow {}^2F_{7/2}$	1,0336	—	5—10	—	—	»	~120	Xe
	$Y_3Al_5O_{12}$	$^2F_{5/2} \rightarrow {}^2F_{7/2}$	1,0296	623	—	~1	~10	»	77	Xe
Актиноиды										
Уран U^{3+}, $5f^3$	BaF_2	$^4I_{11/2} \rightarrow {}^4I_{9/2}$	2,556	107	—	0,15	—	»	20	Xe
	CaF_2	$^4I_{11/2} \rightarrow {}^4I_{9/2}$	2,613	609	—	<0,015	—	»	300	Xe
						0,095	—	»	90	Xe
						0,135	—	»	20—77	Xe
								иепр.	77	Hg
			2,57	609	—	—	—	имп.	300	Xe
			2,51	470	—	—	~30	»	77	Xe
			2,44	398	—	—	—	»	77	Xe
			2,24	0	—	—	—	»	77	Xe
	SrF_2	$^4I_{11/2} \rightarrow {}^4I_{9/2}$	2,407	334	0,1	0,06	—	»	90	Xe
						0,08	—	»	77	Xe
						0,11	—	»	20	Xe

Рис. 33.42. Схема наблюдаемых уровней энергии трехвалеитных иоиов редкоземельиых элементов [6]. Ширина уровней показывает полное расстояние между штарковскими компонеитами в безводных трихлоридах. Полукружки под уровнями означают, что наблюдается люминесценция, обусловлениая переходами с данного уровня.

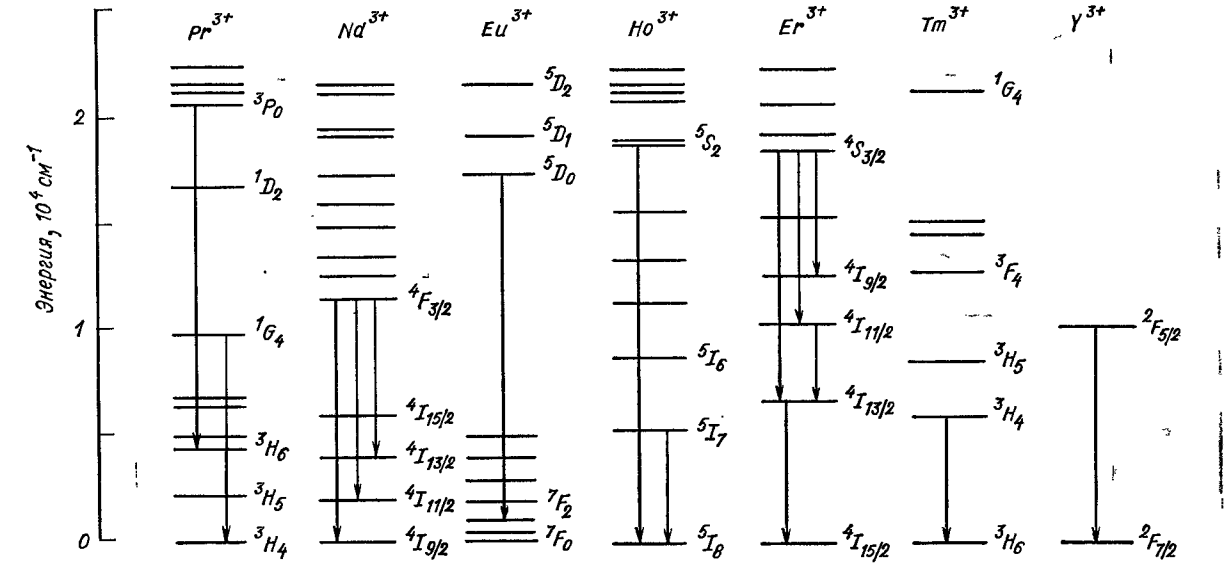


Рис. 33.43. Подробная схема уровией энергии и лазерных переходов (указаны стрелкой) трехвалентных ионов редкоземельных элементов [6].

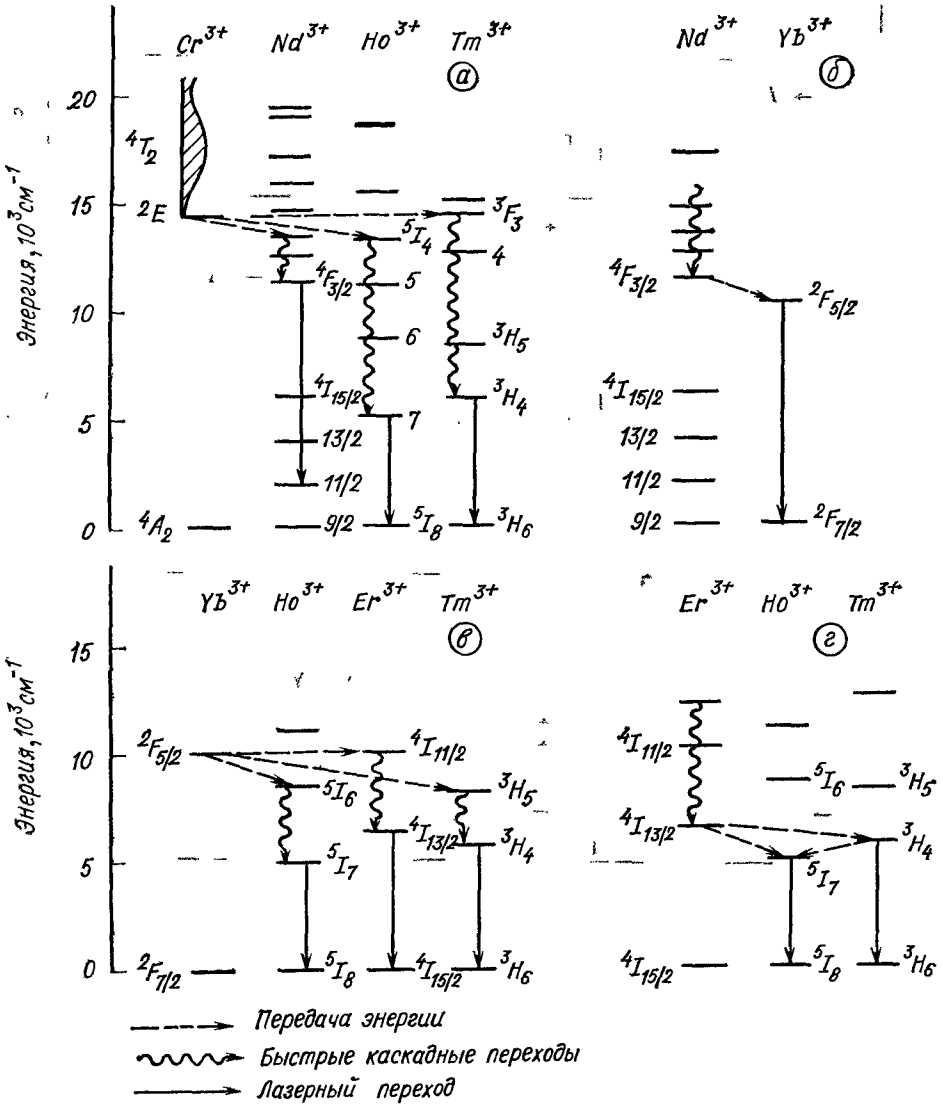


Рис. 33.44. Энергетическая схема процесса сенсибилизации и соответствующие лазерные переходы в кристаллах [6]. Сенсибилизация ионами: *а* — Cr^{3+} кристаллов с ионами Nd^{3+} Ho^{3+} Tm^{3+}; *б* — Nd^{3+} кристаллов с ионами Yb^{3+}; *в* — Yb^{3+} кристаллов с ионами Ho^{3+}, Er^{3+}, Tm^{3+}; *г* — Er^{3+} кристаллов с ионами Ho^{3+} и Tm^{3+}.

Таблица 33.9

Кристаллические лазерные системы с сенсибилизацией [6]

Лазерный ион	Лазерный переход	Ионы-сенсибилизаторы	Кристалл	Рис. 33.44
Nd^{3+}	$^4F_{3/2} \rightarrow {}^4I_{13/2}$	Ce^{3+}	CeF_3	
		Cr^{3+}	$Y_3Al_5O_{12}$	*а*
		Cr^{3+}	$YAlO_3$	*а*
		$(VO_4)^{3-}$	YVO_4	
Ho^{3+}	$^5I_7 \rightarrow {}^5I_8$	Cr^{3+}	$Y_3Al_5O_{12}$	*а*
		Cr^{3+}	$Ca_5(PO_4)_3F$	*а*
		Er^{3+}	CaF_2—ErF_3	*г*
		Er^{3+}	$CaMoO_4$	*г*
		Er^{3+}	Er_2O_3	*г*
		Er^{3+}	$LiYF_4$	*г*
		Er^{3+}	α-$NaCaErF_6$	*г*
		Er^{3+}	$Y_3Al_5O_{12}$	*г*
		Er^{3+}, Tm^{3+}	$Y_3Fe_5O_{12}$	*г*
		Er^{3+}, Tm^{3+}, Yb^{3+}	CaF_2	*в*, *г*
		Er^{3+}, Tm^{3+}, Yb^{3+}	$Y_3Al_5O_{12}$	*в*, *г*
		Er^{3+}, Tm^{3+}	$CaY_4(SiO_4)_3O$	*г*
		Er^{3+}, Tm^{3+}	$YAlO_3$	*г*
Er^{3+}	$^4I_{13/2} \rightarrow {}^4I_{15/2}$	Центр окраски	CaF_2	*в*
		Yb^{3+}	$Y_3Al_5O_{12}$	
Tm^{3+}	$^3H_4 \rightarrow {}^3H_6$	Cr^{3+}	$Y_3Al_5O_{12}$	*а*
		Er^{3+}	CaF_2:ErF_3	*г*
		Er^{3+}	$CaMoO_4$	*г*
		Er^{3+}	Er_2O_3	*г*
		Er^{3+}	$Y_3Al_5O_{12}$	*г*
		Er^{3+}	α-$NaCaErF_6$	*г*
Yb^{3+}	$^2F_{5/2} \rightarrow {}^2F_{7/2}$	Nd^{3+}	CaF_2	*б*

33.5. ЛАЗЕРЫ НА ОСНОВЕ СТЕКОЛ

Активными элементами в лазерах на основе стекол служат стекла, легированные ионами редкоземельных элементов. При переходах в этих ионах с возбужденных на устойчивые уровни осуществляются генерация и усиление излучения. Стекло как основа активного вещества лазера является некристаллической матрицей, поскольку оно не обладает кристаллической структурой дальнего порядка. Ионы элементов-активаторов входят в стекло не как ионы, изоморфно замещающие катионы решетки, а как компоненты стекла.

В качестве активных веществ лазеров используются следующие типы стекол: кроны (состав SiO_2-B_2O_3-BaO), боросиликатные (B_2O_3-BaO), боратные (B_2O_3) лантанборатные (B_2O_3-Ln_2O_3), лантанбариевоборатные (BaO-B_2O_3-Ln_2O_3), фторбериллатные [BeF_2-AlF_3(Al_2F_3)-CaF-MeF(MeF_2), где Me означает Mg, Sr, Ba, Zn, Cd, Pb], свинцовые (PbO-TiO_2 и PbO-GeO_2), фосфатные.

В качестве ионов-активаторов используют трехвалентные ионы Nd, Tb, Yb, Ho и Er. Для повышения эффективности преобразования энергии накачки в лазерное излучение так же, как и в случае кристаллических материалов, используют сенсибилизирующие добавки (табл. 33.10).

Подавляющее большинство лазеров на стеклах, активированных ионами редкоземельных элементов, работает только в импульсном режиме. Для накачки используются импульсные ксеноновые газоразрядные лампы.

Таблица 33.10

Сенсибилизаторы в стекле [7]

Активатор	Сенсибилизатор	Тип стекла (массовое содержание, %)
Nd^{3+}	Ce^{3+}	Li-Mg-алюмосиликатное (SiO_2 — 56,7; Li_2O — 7,4; MgO — 29,6; Al_2O_3 — 5,7)
	Mn^{2+}, Ce^{2+}	Кальциевофосфатное
	UO_2^{2+}	Баритовый крон (SiO_2 — 75,1; K_2O — 12,2; BaO — 12,5; Sb_2O_3 — 0,2)
Tb^{3+}	Dy^{3+}	Боросиликатное
	Gd^{3+}	Кальциевоборатное (BrO_3 — 70,0; Li_2O — 10,0; CaO — 20,0)
	Ce^{3+}, Ce^{2+}	Кальциевофосфатное
Ho^{3+}	Yb^{3+}	Li - Mg-алюмосиликатное (SiO_2 — 56,7; Li_2O — 7,4; MgO — 29,6; Al_2O_3 — 5,7)
Er^{3+}	Yb^{3+}	Na - K - Ba-силикатное (SiO_2 — 73,2; Na_2O — 12,0; K_2O — 12,8; BaO — 2,0)
Yb^{3+}	Nd^{3+}	Кальциевоборатное (BrO_3 — 70,0; Li_2O — 10,0; CaO — 20,0)
	Ce^{3+}	Li-Mg-алюмосиликатное (SiO_2 — 56,7; Li_2O — 7,4; MgO — 29,6; Al_2O_3 — 5,7)
	$Ce^{3+}+Nd^{3+}$	То же
	$UO_2^{2+}+Na^{3+}$	Баритовый крон (SiO_2 — 75,1; K_2O — 12,2; BaO — 12,5; Sb_2O_3 — 0,2)

Таблица 33.11

Характеристики промышленных лазерных стекол некоторых зарубежных фирм
Все стекла содержат активный ион Nd^{3+}

Характеристика	Лазерные стекла фирм											
	American Optical				Owens-Illinois	Schott						Sovirel
	NS-2024	NS-1838	NS-1020	NS-0835	ED-2	LG52	LG54	NG55	LG56	LG57	LG530	915
Концентрация:												
по массе окисла, %	1,0	2,0	3,0	5,0	3,1	2	2	5	3	0,8	3,0	3,0
ионов, $10^{20}/см^3$	0,9	1,8	2,8	4,6	2,83	2,7	3,1	4,6	2,9	0,7	2,8	2,8
Время люминесценции, *мсек*	0,64	0,63	0,62	0,57	0,3	0,15	0,08	0,6	0,65	0,6	0,64	0,7
Длина волны генерации, *мкм*	1,06	1,06	1,06	1,06	1,0623	1,06	1,06	1,06	1,06	1,06	1,06	1,06
Ширина линии люминесценции, *нм*	—	—	—	26	26	36	37	22	22	21	22	—
Потери*, *%/см*	—	—	—	—	0,5	—	—	—	—	—	—	0,07
Показатель преломления:												
для 589,3 *нм*	1,5109	1,5135	1,5143	1,5196	—	1,6769	1,6943	1,5226	1,5199	1,5171	1,5199	1,517
для 1060 *нм*	1,501	1,5034	1,5045	1,5093	1,5559	—	—	1,51	1,5093	1,5065	1,5091	1,5067

Характеристика	Лазерные стекла фирм											
	American Optical				Owens-Illinois	Schott						Sovirel
	NS-2024	NS-1838	NS-1020	NS-0835	ED-2	LG52	LG54	LG55	LG56	LG57	LG530	915
Поглощение[2*], %/*см*	0,2	0,2	0,2	0,2	—	0,51	0,51	0,73	0,51	0,73	0,1—0,2	0,23
Плотность, *г/см*^{3}	2,54	2,56	2,59	2,63	2,547	3,77	4,34	2,62	2,69	2,59	2,59	2,6
Коэффициент теплопроводности, *вт/(м·град)*:	—	—	—	—	—	0,8	0,6	0,93	0,93	1,16	0,99	0,84
при 0°С	—	—	—	0,8	1,21	—	—	—	—	—	—	—
при 100°С	—	—	—	0,91	1,35	—	—	—	—	—	—	—
Удельная теплоемкость, *кал/(г·град)*	—	—	—	0,14	—	—	—	—	—	—	—	0,2
Коэффициент теплового расширения, 10^{-6}/(*град·см*)	10,8	10,2	11,11	10,3	10,3	7,2	8,6	9,1	9,3	9,6	9,7	9,6
Твердость по Кнупу, *кг/мм*^{2}	432	441	468	490	544	671	677	450	475	391	365	404

* Измерения для длины волны генерации при наличии излучения накачки.
** Измерения для длины волны генерации без излучения накачки.

Таблица 33.12

Характеристики лазерных стекол с ионами неодима, изготавливаемых в СССР [9—11]

Характеристика	Тип стекла (основа)				
	КГСС-3 (силикатная)	ГЛС-1 (силикатная)	ГЛС-4 (силикатная)	ЛГС-54 (фосфатная)	ЛГС-55 (борофосфатная)
Массовая концентрация ионов Nd^{3+}, %	1,95	2,0	5,0	1—5	1—4
Плотность, *г/см*^{3}	2,90	2,66	2,66	2,8	2,7
Показатель преломления*	1,534	1,522	1,515	1,57	1,54
Средняя дисперсия, 10^5	—	913	907	1270	870
Время люминесценции, *мкс*	550	360	430	230—260	180—230
Ширина линии люминесценции, *нм*	—	21,4	20,8	21,0	22,0

Характеристика	Тип стекла (основа)				
	КГСС-3 (силикатная)	ГЛС-1 (силикатная)	ГЛС-4 (силикатная)	ЛГС-54 (фосфатная)	ЛГС-55 (фосфатная)
Потери* (без накачки), 10^{-3} *см*$^{-1}$	1—3	1—3	1—3	1—4	1—3
Термооптическая постоянная *, 10^{-7} *град*$^{-1}$	—17	38	34	—31	—2,5
Коэффициент линейного расширения, 10^{-7} *град*$^{-1}$	102	92	100	170	116
Температурный коэффициент показателя преломления*, 10^{-7} *град*$^{-1}$	—38	—13	—18,5	—	—
Оптический коэффициент напряжения [2*], *мкм·см·кг*$^{-1}$		2,4	2,5	—	—
Удельная теплоемкость, *ккал*/(*кг·град*)	0,16	0,165	0,165	—	—
Коэффициент теплопроводности, *ккал*/(*м·град*)	0,76	0,84	0,60	—	—
Модуль Юнга, *кг·мм*$^{-2}$	6500	7500	7500	—	—
Коэффициент Пуассона	0,247	0,229	0,23	—	—

* Для длины волны генерации $\lambda = 1{,}06$ *мкм*.
[2*] Для $\lambda = 0{,}546$ *мкм*.

33.6. ЛАЗЕРЫ НА ПОЛУПРОВОДНИКАХ

Полупроводниковые лазеры используют в качестве активных элементов неорганические вещества (кристаллы), обладающие свойствами полупроводников. В отличие от лазеров на примесных кристаллах генерация излучения в полупроводниках происходит не на переходах между уровнями примесных ионов, а на переходах между зоной проводимости и валентной зоной или между зонами и уровнями, образуемыми примесями в запрещенной зоне, самого полупроводника. Таким образом, активным веществом является сама кристаллическая матрица, а примеси служат источником зарядов (электронов и дырок), рекомбинация которых приводит к возникновению фотонов.

Для создания инверсии в полупроводниках используют четыре типа возбуждения: инжекцию носителей заряда, облучение пучком быстрых электронов, оптическую накачку и ударную ионизацию (лавинный пробой).

Наибольшую эффективность имеют два первых типа накачки, которые и имеют наибольшее распространение. Существующие лазеры на полупроводниках, длины волн генерации и используемые виды возбуждения перечислены в табл. 33.13.

Для работы большинства полупроводниковых лазеров требуются низкие (от 1,7 до 77°К) температуры. При комнатных температурах генерация осуществлена пока только для лазеров на ZnO, CdS, $Al_{1-x}Ga_xAs$, $GaAs_{1-x}P$ и GaAs. Из них благодаря доступности кристаллов хорошего качества и необходимой чистоты наибольшее распространение имеет арсенид галлия. Основные физические свойства арсенида галлия приведены ниже.

Физические свойства арсеиида галлия [7]

Молекулярная масса	144,63
Плотность при 25°С, *г/см*³	5,3161±0,0002
Структура	кубическая
Пространственная группа	$F\bar{4}3\,m$
Тяп решетки	*B*3, сфалерит
Постоянная решетки, Å	5,6534±0,0002
Твердость:	
по Моосу	4,5
по Кнупу, *кг/мм*²	750±42
Температура плавлення; °С	1238
Теплота плавлення, *ккал/моль*	10,5±2,5
Температура Дебая (при 270°К), *град*	355
Коэффицнент теплового расширения, *град*$^{-1}$:	
прн — 233°С	$-0{,}5\cdot10^{-6}$
при — 218°С	0,0
прн — 195 ÷ +17°С	$3{,}64\cdot10^{-6}$
Диэлектрическая постоянная прн 20°С и частоте 0,2—3 *Мгц*	12,53
Подвижность электронов при 15°С, *см*²/(*в·сек*)	$1{,}1\cdot10^{4}$
Подвижность дырок при 25°С, *см*²/(*в·сек*)	$4{,}5\cdot10^{2}$
Эффективная масса электрона	0,043—0,071
Собственное удельное сопротивление, *ом·см*	$3{,}7\cdot10^{8}$

Таблица 33.13

Длиа волны генерации полупроводииковых лазеров [12]*

Вещество	λ, *мкм*	*E*, *эв*	Тип возбуждения			
			Инжекция носителей	Электронный пучок	Оптический	Лавина
ZnS	0,33	3,8		+	+	
ZnO	0,37	3,4		+		
$Zn_{1-x}\,Cd_xS$	0,32—0,49	2,5—3,82			+	
ZnSe	0,46	2,7		+		
CdS	0,49	2,5		+	+	
ZnTe	0,53	2,3		+		
GaSe	0,59	2,1		+		
$CdSe_{1-x}S_x$	0,49—0,68	2,5—1,8		+	+	
$CdSe_{0,95}\,S_{0,05}$	0,675	1,8			+	
CdSe	0,675	1,8		+	+	
$Al_{1-x}Ga_xAs$	0,63—0,90	2,0—1,4	+			
$GaAs_{1-x}P_x$	0,61—0,90	2,0—1,4	+	+		
CdTe	0,785	1,6		+		
GaAs	0,83—0,91	1,50—1,38	+	+	+	+
InP	0,91	1,36	+			+
$GaAs_{1-x}Sb_x$	0,95—1,5	1,4—0,83	(+)			
$CdSnP_2$	1,01	1,25		+		
$InAs_{1-x}P_x$	0,9—3,2	1,4—0,39	(+)			
$InAs_{0,94}\,P_{0,06}$	0,942	1,32	+			
$InAs_{0,51}\,P_{0,49}$	1,6	0,78	+			
GaSb	1,55	0,80	+	+		
$In_{1-x}Ga_xAs$	0,58—3,1	2,14—0,4	+			
$In_{0,65}Ga_{0,35}As$	1,77	0,70	+			
$In_{0,75}Ga_{0,25}As$	2,07	0,60	+			
Cd_3P_2	2,1	0,58			+	
InAs	3,1	0,39	+	+	+	
$InAs_{1-x}Sb_x$	3,1—5,4	0,39—0,23	+			
$InAs_{0,98}Sb_{0,02}$	3,19	0,39	+			
$Cd_{1-x}Hg_xTe$	3—15	0,41—0,08		+	+	
$Cd_{0,32}Hg_{0,68}Te$	3,8	0,33			+	
Te	3,72	0,334		+		
PbS	4,3	0,29	+	+		
InSb	5,2	0,236	+	+	+	+
PbTe	6,5	0,19	+	+		
$PbS_{1-x}Se_x$	3,9÷8,5	0,32÷0,146	+	+		
PbSe	8,5	0,146	+	+		
PbSnTe	28	0,045	+			
PbSnSe	8—31,2	0,155—0,040	+			

* Крестиком помечены осуществленные, а крестиком в скобках — возможные, но еще не осуществленные типы возбуждения

33.7. ЖИДКОСТНЫЕ ЛАЗЕРЫ

Жидкостные лазеры используют в качестве активных элементов растворы, содержащие ионы редкоземельных элементов. Все эти лазеры работают только в импульсном режиме с оптической накачкой излучением ксеноновых газоразрядных ламп.

Лазеры на хелатах редкоземельных элементов

Хелаты составляют класс лазерных материалов, в которых активными элементами являются трехвалентные ионы редких земель (RE), связанные с органическими группами или лигандами. Различают два главных типа лазерных компаундов:

$$(RE)^{3+}\ [\text{лиганд}]_{-4}Q^{+};\quad (RE)^{3+}\ [\text{лиганд}]_{-3},$$

где Q^+ обозначает катион.

Наиболее часто в лазерах на хелатах редкоземельных элементов употребляют следующие лиганды, катионы и растворители.

Лиганды:

Бензоилацетон (B) $C_6H_5—C(=O)—CH_2—C(=O)—CH_3$

Бензоилтрифторацетон (BTF) $CF_3—C(=O)—CH_2—C(=O)—C_6H_5$

Дибензоилметан (DBM) $C_6H_5—C(=O)—CH_2—C(=O)—C_6H_5$

Пентафторпропионат (PFP) CF_3CF_2COO

о-Фенантролин (*о*-Ph) $C_{12}H_8N_2$

Теноилтрифторацетон (TTF) $C_4H_3—S—C(=O)—CH_2—C(=O)—CF_3$

Трифторацетилацетон (TFA) $CF_3—C(=O)—CH_2—C(=O)—CH_3$

Катионы: пиперидин; пиридин; натрий; аммиак и его производные; имидазол.

Растворители: смесь спиртов (этанол—метанол 3 : 1); смесь (спирт—диметилформамид (DMFA); ацетонитрил; диметилсульфоксид.

Во всех лазерах на хелатах лазерный эффект осуществляется на переходах между энергетическими уровнями ионов редкоземельных элементов, а поглощение энергии накачки происходит через полосы поглощения лиганда. На рис. 33.45 показано расположение уровней лазера на ионах европия наиболее хорошо исследованной системы.

Основные генерационные характеристики существующих лазеров на хелатах приведены в табл. 33.14. Хелаты имеют очень большие коэффициенты поглощения ($\sim 100\ см^{-1}$), поэтому лазерный эффект осуществляется только в тонких слоях вещества ($\sim 1\ мм$).

Таблица 33.14

Генерационные характеристики лазеров на хелатах редкоземельных элементов [13]

Ион	Лиганд	Растворитель	Концентрация ионов, $10^{18}\ см^{-3}$	Длина волны лазерного перехода, *мкм*	Рабочая температура, °С	Время флуоресценции, *мсек*	Ширина линии, $см^{-1}$	Лазерный переход	Расщепление основного уровня, $10^2\ см^{-1}$	Полоса поглощения, *мкм*	Поглощение в максимуме полосы, $10^4 л/(моль \cdot см)$
Eu^{3+}	B_4	Смесь спиртов или DMFA	1—15	611,1—613,1	от —150 до —130	0,8	20	$^5D_0—^7F_2$	9	280—380	6,8
Eu^{3+}	$[DBM]_4$	DMFA	9	612,0	—145	—	6	$^5D_0—^7F_2$	9	—	1—10
Eu^{3+}	$[TTF]_4$	Ацетонитрил	3	612,5	—35	—	25	$^5D_0—^7F_2$	9	—	1—10
Eu^{3+}	$[BTF]_4$	Ацетонитрил	6	611,9	+30	0,8	34	$^5D_0—^7F_2$	9	—	1—10
Tb^{3+}	$[TFA]_3$	Ацетонитрил, *п*-диоксан	1,5	547,0	+30	—	—	$^5D_4—^7F_5$	—	—	—
Nd^{3+}	PFP *о*-Ph	Диметилсульфоксид	120	1057,0	—30	0,005	140	$^4F_{3/2}—^4I_{11/2}$	20	Nd^{+3}	—

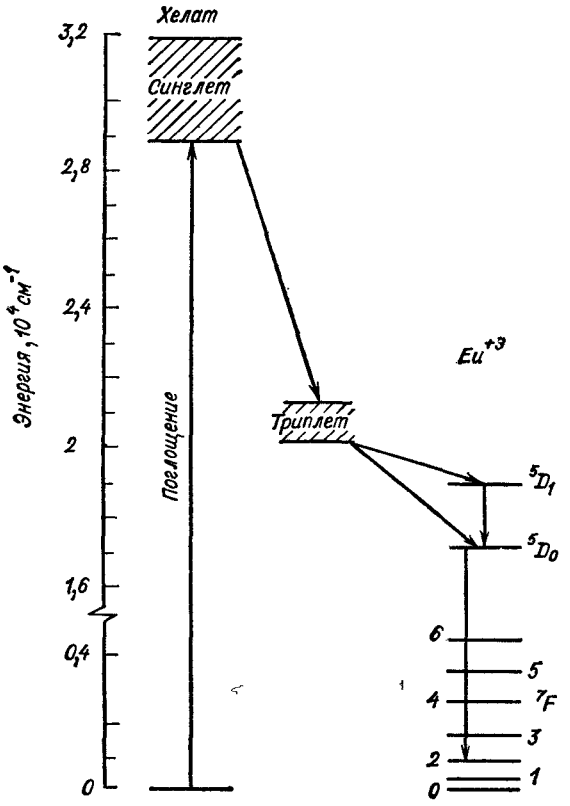


Рис. 33.45. Расположение энергетических уровней в лазере на хелате европия [13]. Поглощение энергии накачки осуществляется между основным и синглетным состоянием лиганда с последующим переходом в триплетное состояние и передачей возбуждения иону Eu^{3+}. Флуоресценция и лазерный эффект происходят при переходах между $^5D_0$- и $^7F_2$-уровнями иона европия.

Апротонные лазеры

Апротонные лазерные жидкие материалы состоят из растворов солей редкоземельных элементов в неорганических растворителях. Лазерный эффект был достигнут пока только для ионов неодима Nd^{3+} в селен- и фосфороксихлоридах. Основные генерационные характеристики этих лазеров приведены в табл. 33.15. Типичные спектры поглощения ионов неодима показаны на рис. 33.46. Значения поглощения в максимумах полос поглощения неодима в зависимости от типа неорганического растворителя указаны в табл. 33.16. Общие характеристики апротонных лазеров на ионах неодима:

Температура раствора, °С . .	+30°С
Концентрация ионов, 10^{20} см$^{-3}$	0,5—3
Лазерный переход	$^4F_{3/2}$—$^4I_{11/2}$
Ширина линии люминесценции, см$^{-1}$	~120
Расщепление основного уровня, см$^{-1}$	~2000

Таблица 33.15

Материалы апротонных лазеров [12]

Растворитель (x)*	Длина волны лазерного перехода, нм	Время флуоресценции, мсек	Сечение излучения, 10^{-20} см^2
$SeOCl_2$+$SnCl_4$(0,5 M)	1055	0,280	8
	1330	—	0,7
$POCl_3$+$SnCl_4$(1,0 M)	1051	0,300	6
$POCl_3$+$ZrCl_4$(0,45 M)	1051	0,330	~6

* Состав растворителей: 1 $л$ оксихлорида плюс x молей тетрахлорида.

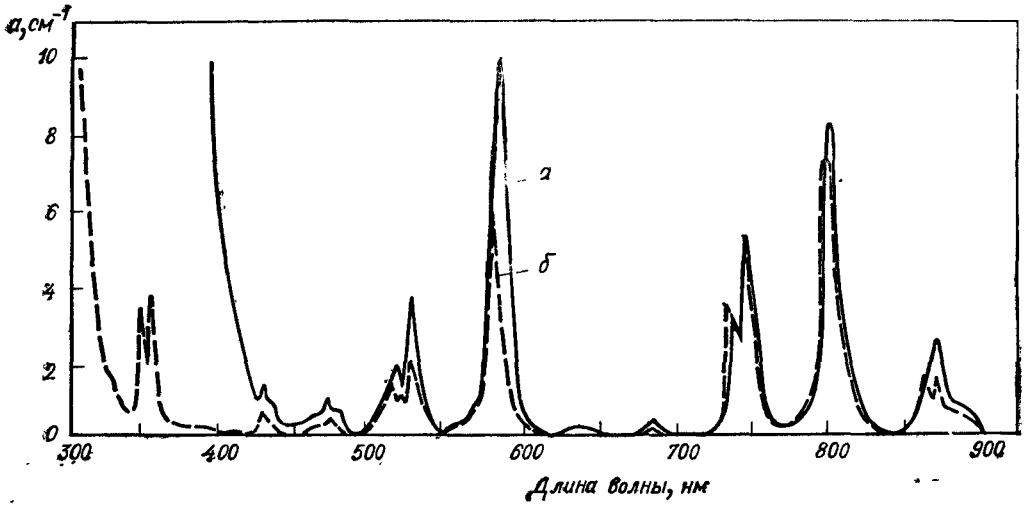


Рис. 33.46. Типичные спектры поглощения ионов Nd^{3+} в апротонных растворителях [13].

Таблица 33.16

Поглощение в максимумах полос поглощения ионов Nd^{3+} в различных неорганических растворителях [12]

Длина волны максимума полосы поглощения, *нм*	Поглощение в максимуме, *л/(моль·см)*	
	$SeOCl_2+SnCl_4$	$POCl_3+SnCl_4$ или $POCl_3+ZrCl_4$
350	—	11,7
520	11,7	6,7
580	33,3	2,0
750	16,7	16,7
800	26,7	26,7
870	10,0	5,0

33.8. ЛАЗЕРЫ НА ХИМИЧЕСКИХ КРАСИТЕЛЯХ

Среди различных химических красителей в настоящее время лазерный эффект получен для шести классов органических красителей: оксазольных, антрацеиовых, кумариновых, акридиновых, ксантеновых и полиметиновых. Большинство красителей этих классов имеют схожие спектральные характеристики:

1. Ширины основных полос поглощения и испускания обычно имеют порядок 1000 $см^{-1}$. Одна или несколько полос поглощения могут находиться в более коротковолновой области спектра по сравнению с основным поглощением.

2. Максимум флуоресценции находится в более длинноволновой области, чем главный максимум поглощения. Величина сдвига между спектрами и ширина спектров флуоресценции и поглощения могут быть такими, что коротковолновый край спектра флуоресценции существенно перекрывает длинноволновый край спектра поглощения.

3. Спектр флуоресценции обычно зеркально отображает спектр основной полосы поглощения.

4. Время флуоресценции обычно составляет $5\cdot10^{-9}$ *сек*.

5. Расположение, величина, структура полос поглощения и флуоресценции, а также время флуоресценции в значительной мере зависят от типа растворителя и концентрации раствора.

В связи с тем что время флуоресценции типичного красителя составляет $5\cdot10^{-9}$ *сек*, источник оптической накачки для лазеров на красителях должен обеспечивать высокие мощности накачки, чтобы превысить потери на спонтанное излучение. Необходимую мощность накачки можно получить, используя разнообразные импульсные лампы или интенсивное излучение другого лазера. Второй способ дает значительно большую мощность накачки и более эффективен. Органические красители, для которых наблюдался лазерный эффект, перечислены в табл. 33.17 [14]. Здесь же приведены длины волн центра линии генерации, полученные как при накачке другим лазером, так и при накачке излучением импульсной газоразрядной лампы.

Лазеры на химических красителях [14]

Таблица 33.17

Органическое соединение	Растворитель	Длина волны генерации при лазерной (ламповой) накачке, *нм*	Органическое соединение	Растворитель	Длина волны генерации при лазерной (ламповой) накачке, *нм*
n-Терфенил	Циклогексан	341 (341)	POPOP, или *p*-бис-[2-(5-фенилоксазолил)] бензол	Этанол, толуол	421 (419)
2,5-Дифенил-1, 3, 4-оксадиазол	Диоксан	(348)	Диметил POPOP, или 1,4-бис-2-(4-метил-5-фенилоксазолил)бензол	Этанол, циклогексан	423 431
2,5-Ди-*n*-метоксифенил-3,4-оксадиазол	Этанол	359 372	Бис-MSB, или *p*-бис-(*o*-метилстирил)бензол	Толуол, бензол	425
Изопропил-2-фенил-5 (4-бифенил)-1,3,4-оксадиазол	»	(369,8)	2′-Метокси-1,4-дистирилбензол	Толуол	425 (424)
2,5-Дифенилфуран	Диоксан	(371)	1,2-Ди-(α-нафтил)этилен	»	426
n-Кватерфенил	DMF	(374)	2,2′-Диметокси-1,4-дистирилбензол	»	430
2,5-Дифенилоксазол	Диоксан	(381)	1-Стирил-4[ω-винил-(*n*-бифенилил)] бензол	»	432
Дифенилбутадиен	Толуол	383	9, 10-Дифенилантрацев	Циклогексан	432,5
4-Метилбеллиферон	*	385—574*	Акридон	Этанол	437 (435)
2-Бифенил-5-стирил-1,3,4-оксадиазол	Толуол	390,5	2,5-Бис-[5-трет-бутилбензоксазолил (2)] тиофен	Бензол	(437)
αNND, или 2,5-ди(α-нафтил)-1,3,4-оксадиазол	»	391	3-Этиламинопирин-5,8,10-трисульфокислота	Вода	441
αNPO, или 2-фенил-5-α-нафтил-1,4-оксазол	»	399,5 (400)	7-Метиламино-4,6-диметилкумарин	Этанол	(443)
2-Гидрокси-4-метил-7-аминохинолин	Этанол	(413)	7-Этиламино-4,6-диметилкумарин	»	(446)
1,2-Ди-4-бифенилэтилен	Толуол	408	Кальцеин голубой	»	(449—490)
BBO, или 2,5-Дибифенилиноксазол	Бензол	408,5	9-Аминоакридин гидрохлорид	»	(458,5) (~460)
p, *p*′-Дифенилстильбен	»	408,5 (409)	4-Метилумбеллиферон, или 4-метил-7-гидроксикумарин	Вода (pH~9)	450
1, 4-Дистирилбензол	Толуол	415	7-Диэтиламино-4-метилкумарии	Этанол	450 (460)
1, 4-Ди[2-(5-фенилоксазолил)]бензол	»	417			
Бис-MSB, или *p*-бис (*o*-метилстирил)бензол	Этанол	419 (420)			
4, 4′-Дихлор-1,4-дистирилбензол	Толуол	420 (419)			

* Зависит от pH-растворителя.

Органическое соединение	Растворитель	Длина волны генерации при лазерной (ламповой) накачке, *нм*
Эскулин	Вода (pH~9)	(460)
7-Гидроксикумарин, или умбеллиферон	»	(~460)
Бензил-β-метилумбеллиферон	Этанол	(460)
2,4,6-Трифенилпирил фторборат	Метанол	485
3-Аминофталимид	Изоамиловый спирт	500
7-Метиламино-4,6-диметилкумарин	Этанол слабо кислый	(484)
	кислый	(487)
1,3-Дифенилизобензофуран	Этанол	(484—518)
Бриллиантовый сульфофлавин	»	(508—573)
Трипафлавин	»	505
Акрифлавин гидрохлорид	»	510 (517 5)
Флуоресцеин	Водный раствор щелочи	518
6-Карбоксифлуоресцеин	Этанол	(539—548)
Na-Флуоресцеин	Вода, этанол	527 (545)
Эозин	Этанол	540
2,7-Дихлорофлуоресцеин	»	(545)
Родамин 6 G	Этанол, полиметилметакрилат	555 (595)
Монобромофлуоресцеин	Глицерин	560
Уранин	Этанол	560
Пина (орто)	»	565
Дибромфлуоресцеин	Глицерин	568
Родамин B	Этанол	577 (620)
Родамин C	Глицерин	570 (620)
Пиронин B	Ацетон, полиметилметакрилат	576
Акридин красный	Этанол	580 (615)
Родамин G	»	585
Родамин S	»	(586)
Пиронин G	Изоамиловый спирт	590 (600)
Люцегенин	Вода и серная кислота	600
Эозин	Этанол	600
Сафранин-T	»	610
Изохинолин красный	Вода	620
Фиолетовый красный	Изоамиловый спирт	620
Родамин 3B	»	620 (615)
3,3'-Диэтилоксадикарбоцианиниодид	Метанол	658
Крезил фиолетовый	Толуол	(646—709)
3,3'-Диэтил-2,2'-тнадикарбоцианин иодид	Ацетон	711
3,3'-Диэтил-10-хлор-2,2'-(5,6,5',6'-дибензо)-тиадикарбоцианин иодид	»	714
3,3'-Диэтил-2,2'-(5,5'-диметил)-тиазолинотрикарбоцианин иодид	Глицерин	717
3,3'-Диэтилокситрикарбоцианин иодид	Этанол	728,5
3,3'-Диэтил-5,5'-диметокси-6,6'-бис (метилмеркапто)-10-метилтиадикарбоцианин бромид	»	733

Органическое соединение	Растворитель	Длина волны генерации при лазерной (ламповой) накачке, *нм*
3,3'-Диэтил-2,2'-оксатрикарбоцианин иодид	Ацетон	744
1,1'-Диметил-11-бром-2,2'-хинодикарбоцианин иодид	Глицерин	745
1,1'-Диэтил-4,4'-хинокарбоцианин иодид или криптоцианин	»	745
1,1'-Диметил-4,4'-хинокарбоцианин иодид	»	749
1,1'-Диэтил-2,2'-дикарбоцианин иодид	»	750
Голубой B	»	753
1,1'-Диэтил-4,4'-хинокарбоцианинбромид	»	754
Дицианин	»	756
Нафталин зеленый	»	756
Родулин голубой 6G	»	758
Фталоцианин магния	Хинолин	759
Бриллиантовый зеленый или малахитовый зеленый G	Изоамиловый спирт	760
1,1'-Диэтил-γ-циано-2,2'-дикарбоцианинтетрафторборат, или DTCDCT	Пиридин	760
Хлороалюминиевый фталоцианин	Диметилсульфоксид	761,5
3-Этил-3'-метилтиазолинотрикарбоцианин иодид	Этанол	770
3,3'-Диэтил-10-хлоро-2,2'-(4,5,4',5'-дибензо)-тиадикарбоцианин иодид	Ацетон	774
3,3'-Диэтил-11-метокситиатрикарбоцианин иодид	Этанол	785,5
1,3,3,1',3',3'-Гексаметилиндотрикарбоцианин иодид	»	793,5
1,1'-Диэтил-γ-ацетокси-2,2'-дикарбоцианинтетрафторборат	Метанол	797
1,1'-Диэтил-γ-нитро-4,4'-дикарбоцианинтетрафторборат, или DTNDCT	Пиридин	800
3,3' Диэтилтиатрикарбоцианин иодид	Этанол	807,5
Виктория голубая	Глицерин	809
Виктория голубая R	»	814
1,1'-Диэтил-11-бром-2,2'-хинодикарбоцианин иодид	»	815
1,3,3,1',3',3'-Гексаметил-2,2'-индотрикарбоцианин иодид	Ацетон	819 (800)
3,3'-Диэтилтнатрикарбоцианин иодид, или DTTC	Диметилсульфоксид	822
Метиленовый зеленый	Серная кислота	823
1,3,3,1',3',3'-Гексаметил-4,5,4',5'-дибензоиндотрикарбоцианин перхлорат	Этанол	824,5
3,3'-Диэтил-2,2'-селенатрикарбоцианин иодид	Ацетон	826
Метиленовый голубой	Серная кислота	829
1,1'-Диэтил-11-бром-4,4'-хинодикарбоцианин иоднд	Метанол	830
3,3'-Диэтилтиатрикарбоцианин бромид	»	835

Органическое соединение	Растворитель	Длина волны генерации при лазерной (ламповой) накачке, *нм*	Органическое соединение	Растворитель	Длина волны генерации при лазерной (ламповой) накачке, *нм*
Метиленовый голубой	Серная кислота	835	*3,3'*-Диэтил-*6,7,6',7'*-дибензо-*11*-метилтиатрикарбоцианин иодид	Этанол	856
3,3'-Диэтил-*6,7,6',7'*-дибензотиатрикарбоцианин иодид	Этанол	838,5	*3,3'*-Диэтил-*2,2'*-(*4,5,4',5'*-дибензо) тиатрикарбоцианин иодид	Ацетон	860
Толуидин голубой	Серная кислота	848	Фталоцианин	Серная кислота	863
Тионин	»	850	*1,1'*-Диэтил-*2-2'*-хинотрикарбоцианин иодид	Ацетон	898
3,3'-Диэтил-*2,2'*-(*5,6,5',6'*-тетраметокси)тиатрикарбоцианин	Ацетон	853	*1,1'*-Диэтил-*4,4'*-хинотрикарбоцианин иодид	»	1000
			Аналоги пентакарбоцианина	Нитробензол	1095—1175

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Willett C. S.** Handbook of Lasers. Ed. by R. J. Pressley, Cleveland, Chemical Rubber Co., 1971, p. 183.
2. **Moore C. E.** Atomic Energy Levels, NBS-467, Washington, v. 1—3.
3. **Bridges W. B., Chester A. N.** См. [1], p. 242.
4. **Silfvast W. T., Klein M. B.** "Appl. Phys. Lett.", 1970, v. 17, p. 400.
5. **Pollack M. A.** См. [1], p. 298.
6. **Weber M. J.** См. [1], p. 371.
7. **Рябцев Н. Г.** Материалы квантовой электроники. М., «Сов. радио», 1972.
8. **Woodcock R. F.** См. [1], p. 360.
9. **Бужинский И. М. и др.** «Докл. АН СССР», 1970, т. 190, с. 558.
10. **Дианов Е. М.** «Приборы и техника эксперим.», 1969, № 4, с. 169.
11. **Атанов И. Г. и др.** «Изв. АН СССР. Сер. неорг. материалы», 1974, т. 50, № 5, с. 921.
12. **Pankove J. I.** См. [1], p. 365.
13. **Lempicki I.** См. [1], p. 355.
14. **Deutsch T. F.** См. [1], p. 350.

ГЛАВА 34

ЭЛЕКТРО-, МАГНИТО- И ПЬЕЗООПТИЧЕСКИЕ ЭФФЕКТЫ

34.1. ЛИНЕЙНЫЙ ЭЛЕКТРООПТИЧЕСКИЙ ЭФФЕКТ (ЭФФЕКТ ПОККЕЛЬСА)

Линейный электрооптический эффект (эффект Поккельса) заключается в изменении преломляющих свойств кристаллов под действием внешнего постоянного или переменного электрического поля (частота переменного электрического поля значительно меньше оптических частот).

Связь между изменениями поляризационных коистант вещества $\Delta B_{ij} = \Delta\,(1/\varepsilon)_{ij}$ (где ε — диэлектрическая проницаемость) и приложенным электрическим полем E_k дается электрооптическими коэффициентами r_{ijk}:

$$\Delta B_{ij} = r_{ijk} E_k,$$

где $i, j, k = 1, 2, 3$. Коэффициенты r_{ijk} образуют полярный тензор третьего ранга, называемый тензором линейного электрооптического эффекта. В сокращенной записи

$$\Delta B_l = r_{lk} E_k$$

$l = (ij)$ и в зависимости от ij индекс l пробегает значения от 1 до 6: 1 = (11), 2 = (22), 3 = (33), 4 = (23), 5 = (13), 6 = (12).

Ниже приведены тензоры электрооптических коэффициентов по сингониям [1] в зависимости от типа точечной симметрии кристаллов.

Триклинная $1 - C_1$:

$$\begin{pmatrix} r_{11} & r_{12} & r_{13} \\ r_{21} & r_{22} & r_{23} \\ r_{31} & r_{32} & r_{33} \\ r_{41} & r_{42} & r_{43} \\ r_{51} & r_{52} & r_{53} \\ r_{41} & r_{62} & r_{63} \end{pmatrix} (18)$$ элементов

Моноклинная:

$2 - C_2$

$$\begin{pmatrix} 0 & r_{21} & 0 \\ 0 & r_{22} & 0 \\ 0 & r_{23} & 0 \\ r_{41} & 0 & r_{43} \\ 0 & r_{52} & 0 \\ r_{51} & 0 & r_{63} \end{pmatrix} (2 \parallel X_2) \quad (8),$$

$m - C_s$

$$\begin{pmatrix} r_{11} & 0 & r_{13} \\ r_{21} & 0 & r_{23} \\ r_{31} & 0 & r_{33} \\ 0 & r_{42} & 0 \\ r_{51} & 0 & r_{53} \\ 0 & r_{62} & 0 \end{pmatrix} (m \perp X_2) \quad (10)$$

Орторомбическая:

$222 - D_2$

$$\begin{pmatrix} 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \\ r_{41} & 0 & 0 \\ 0 & r_{52} & 0 \\ 0 & 0 & r_{63} \end{pmatrix} (3)$$

$mm2 - C_{2v}$

$$\begin{pmatrix} 0 & 0 & r_{13} \\ 0 & 0 & r_{23} \\ 0 & 0 & r_{33} \\ 0 & r_{42} & 0 \\ r_{51} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \end{pmatrix} (5)$$

Тетрагональная:

$4 - C_4$

$$\begin{pmatrix} 0 & 0 & r_{13} \\ 0 & 0 & r_{13} \\ 0 & 0 & r_{33} \\ r_{41} & r_{51} & 0 \\ r_{51} & -r_{41} & 0 \\ 0 & 0 & 0 \end{pmatrix} (4)$$

$\bar{4} - S_4$

$$\begin{pmatrix} 0 & 0 & r_{13} \\ 0 & 0 & -r_{13} \\ 0 & 0 & 0 \\ r_{41} & -r_{51} & 0 \\ r_{51} & r_{41} & 0 \\ 0 & 0 & r_{63} \end{pmatrix} (4)$$

$422 - D_4$

$$\begin{pmatrix} 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \\ r_{41} & 0 & 0 \\ 0 & -r_{41} & 0 \\ 0 & 0 & 0 \end{pmatrix} (1)$$

$4mm - C_{4v}$

$$\begin{pmatrix} 0 & 0 & r_{13} \\ 0 & 0 & r_{13} \\ 0 & 0 & r_{33} \\ 0 & r_{51} & 0 \\ r_{51} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \end{pmatrix} (3)$$

$\bar{4}2m - D_{2d}$

$$\begin{pmatrix} 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \\ r_{41} & 0 & 0 \\ 0 & r_{41} & 0 \\ 0 & 0 & r_{63} \end{pmatrix} (2 \parallel X_1)$$

Триклинная:

$3 - C_3$

$$\begin{pmatrix} r_{11} & -r_{22} & r_{13} \\ -r_{11} & r_{22} & r_{13} \\ 0 & 0 & r_{33} \\ r_{41} & r_{51} & 0 \\ r_{51} & -r_{41} & 0 \\ -r_{22} & -r_{11} & 0 \end{pmatrix} (6)$$

$32 - D_3$

$$\begin{pmatrix} r_{11} & 0 & 0 \\ -r_{11} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \\ r_{41} & 0 & 0 \\ 0 & -r_{41} & 0 \\ 0 & -r_{11} & 0 \end{pmatrix} (2)$$

$3m - C_{3v}$

$$\begin{pmatrix} 0 & -r_{22} & r_{13} \\ 0 & r_{22} & r_{13} \\ 0 & 0 & r_{33} \\ 0 & r_{51} & 0 \\ r_{51} & 0 & 0 \\ -r_{22} & 0 & 0 \end{pmatrix} (4)$$

Гексагональная:

$6 - C_6$

$$\begin{pmatrix} 0 & 0 & r_{13} \\ 0 & 0 & r_{13} \\ 0 & 0 & r_{33} \\ r_{41} & r_{51} & 0 \\ r_{51} & -r_{41} & 0 \\ 0 & 0 & 0 \end{pmatrix} (4)$$

$6 - C_{3h}$

$$\begin{pmatrix} r_{11} & -r_{22} & 0 \\ -r_{11} & r_{22} & 0 \\ 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \\ -r_{22} & -r_{11} & 0 \end{pmatrix} (2)$$

$622 - D_6$

$$\begin{pmatrix} 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \\ r_{41} & 0 & 0 \\ 0 & -r_{41} & 0 \\ 0 & 0 & 0 \end{pmatrix} (1)$$

$6mm - C_{6v}$

$$\begin{pmatrix} 0 & 0 & r_{13} \\ 0 & 0 & r_{13} \\ 0 & 0 & r_{33} \\ 0 & r_{51} & 0 \\ r_{51} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \end{pmatrix} (3)$$

$\bar{6}m2 - D_{3h}$

$$\begin{pmatrix} 0 & -r_{22} & 0 \\ 0 & r_{22} & 0 \\ 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \\ -r_{22} & 0 & 0 \end{pmatrix} (m \perp X_1) \quad (1)$$

Кубическая:

$432 - O$

$$\begin{pmatrix} 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \end{pmatrix} (0)$$

23 и $\bar{4}3m - T$ и Td

$$\begin{pmatrix} 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \\ r_{41} & 0 & 0 \\ 0 & r_{41} & 0 \\ 0 & 0 & r_{41} \end{pmatrix} (1)$$

Значения электрооптических коэффициентов для различных типов кристаллов приведены в табл. 34.1—34.4. Если частоты электрического поля, при которых произведены измерения, намного выше или ниже частоты собственного акустического резонанса, то использованы соответственно обозначения (S) и r_{ijk}^{S} или (T) и r_{ijk}^{T}. Погрешность измеренных значений r_{ijk} составляет $\sim 15\%$. В ферромагнетиках и других материалах, имеющих фазовый переход, наблюдается сильная зависимость электрооптического коэффициента от температуры, если последняя близка к критической температуре T_K. Зависимость r_{ijk} от длины волны света в области прозрачности веществ, как правило, мала.

Одной из важных характеристик электрооптических кристаллов является полуволновое напряжение $U_{\lambda/2}$, т. е. напряжение, соответствующее набегу разности фаз, равной π, между двумя световыми волнами с взаимноперпендикулярными поляризациями. Эта величина может быть найдена из соотношения

$$U_{\lambda/2} = \frac{\lambda}{n_3^3 r_{33} - n_1^3 r_{13}} = \frac{\lambda}{n_3^3 r_c},$$

где $r_c = r_{33} - \left(n_1^3 / n_3^3\right) r_{13}$. В случае одноосных кристаллов ось z (или ось 3) — оптическая и свет распространяется в перпендикулярном к ней направлении.

Таблица 34.1

Электрооптические свойства кристаллоа типа KDP и ADP [1]
Симметрия $\bar{4}2\,m$ при температурах выше критической T_K.

Вещество	T_K, °K	r_{63}, 10^{-12} м/в	r_{41}, 10^{-12} м/в	ε_3	ε_1
KH_2PO_4 (KDP)	123	—			
		(T) 9,37	+8,6	(T) 21	42
		(S) 8,15 $r_{63} < 0$	$r_{41} < 0$	(S) 21	44
KD_2PO_4 (DKDP)	222	(T) 26,4	8,8	(T) 50	
		(S) 24,0 0,93 r_{63}^T		(S) 48	58
KH_2AsO_4 (KDA)	97	(T) 10,9	12,5	(T) 21	54
				(S) 19	53
KD_2AsO_4 (DKDA)	162	(T) 18,2	—	—	—
RbH_2PO_4 (RDP)	147	(T) 15,5	—	—	—
		(S) 0,91 r_{63}^T			
RbH_2AsO_4 (RDA)	110	(T) 13,0	—	(T) 27	41
				(S) 24	39
RbD_2AsO_4 (DRDA)	178	(T) 21,4	—	—	—
CsH_2AsO_4 (CDA)	143	(T) 18,6	—	—	—
CsD_2AsO_4 (DCDA)		(T) 36,6	—	—	—
$NH_4H_2PO_4$ (ADP)	148*	(T) —8,5	23,1	(T) 15	56
		(S) 4,1	$r_{41} < 0$	(S) 14	58
$ND_4D_2PO_4$ (DADP)	242*	(T) 11,9	—	—	—
$NH_4H_2AsO_4$ (ADA)		(T) 9,2		—	—

* Антиферроэлектрический переход.

Таблица 34.2

Электрооптические свойства кристаллов типа ABO_3 [1]

Вещество (T_K, °K)	Симметрия	r_{ij}, 10^{-12} м/в	r_{ik}, 10^{-12} м/в	λ, мкм	ε_i
$LiNbO_3$ (1470)	$3m$	(T) $r_{33} = +32,2$	(T) $r_{22} = 6,8$	0,633	(T) $\varepsilon_1 = \varepsilon_2 = 78$
		(T) $r_{13} = +10$	(T) $r_{51} = 32$	0,633	(T) $\varepsilon_3 = 32$
		(T) $r_c = 18$			(S) $\varepsilon_1 = \varepsilon_2 = 43$
		(T) $r_c = 17$	(T) $r_{22} = 5,7$	1,15	(S) $\varepsilon_3 = 28$
		(T) $r_c = 16$	(T) $r_{22} = 3,1$	3,39	
		(S) $r_{33} = +30,8$	(S) $r_{22} = 3,4$	0,633	
		(S) $r_{13} = +8,6$	(S) $r_{51} = +28$	0,633	
		(S) $r_{33} = 28$	(S) $r_{22} = 3,1$	3,39	
		(S) $r_{13} = 6,5$	(S) $r_{51} = 23$		
$LiTaO_3$ (890)	$3m$	(T) $r_c = 22$		0,633	(T) $\varepsilon_2 = \varepsilon_1 = 51$
		(S) $r_{33} = 30,3$	(S) $r_{51} = 20$	0,633	(T) $\varepsilon_3 = 45$
		(S) $r_{13} = 7$	(S) $r_{22} \approx 1$	0,633	(S) $\varepsilon_2 = \varepsilon_1 = 41$
		(S) $r_{33} = 27$	(S) $r_{51} = 15$	3,39	(S) $\varepsilon_3 = 43$
		(S) $r_{13} = 4,5$	(S) $r_{22} \approx 0,3$	3,39	
$BaTiO_3$ (395)	$4mm$	(T) $r_c = 108$	(T) $r_{51} = 1640$	0,546	(T) $\varepsilon_1 = \varepsilon_3 = 3600$
		(S) $r_c = 23$	(S) $r_{51} = 820$	0,546	(T) $\varepsilon_3 = 135$
		(S) $r_c = 19$		0,633	(S) $\varepsilon_1 = \varepsilon_2 = 2300$
		(S) $r_{33} = 28$		0,633	(S) $\varepsilon_3 = 60$
		(S) $r_{13} = 8$		0,633	
$K_3Li_2Nb_5O_{15}$ (693)	$4mm$	(T) $r_{33} = 78$		0,633	(T) $\varepsilon_1 = \varepsilon_2 = 309$
		(T) $r_{13} = 8,9$		0,633	(T) $\varepsilon_3 = 100$

Вещество (T_K, °K)	Симметрия	r_{ls}, 10^{-12} м/в	$r_{lk}10^{-12}$ м/в	λ, мкм	ε_i
$Sr_{0,75}Ba_{0,25}Nb_2O_6$ (~330)	*4mm*	(*T*) $r_c = 1410$ (*T*) $r_{33} = 1340$ (*T*) $r_{13} = 67$ (*S*) $r_c = 1000$	(*T*) $r_{51} \parallel 42$	0,633 0,633 0,633 0,633	$\varepsilon_3 = 3400$ (15 *Мгц*)
$Sr_{0,5}Ba_{0,5}Nb_2O_6$	*4mm*	(*T*) $r_c = 218$ (15 *Мгц*) $r_c = 96$		0,633 0,633	$\varepsilon_3 = 450$ (15 *Мгц*)
$Sr_{0,25}Ba_{0,75}Nb_2O_6$ (~520)	*4mm*	(15 *Мгц*) $r_c = 45$		0,633	$\varepsilon_3 = 118$ (15 *Мгц*)
$KTa_xNb_{1-x}O_3$ (~330)	*4mm*	(*T*) $r_c = 450$	(*T*) $r_{51} = +50$	0,633	
$PbTiO_3$ (765)	*4mm*	(*S*) $r_{33} = 5,9$ (*S*) $r_{13} = 13,8$		0,633 0,633	(*S*) $\varepsilon_3 = 31$
$KSr_2Nb_5O_{15}$ (433)	*4mm* или *4*	(*T*) $r_c = 130$		0,633	(*T*) $\varepsilon_3 = 1000$ (*T*) $\varepsilon_1 = 1200$
$LiIO_3$ (пироэлектр.)	*6*	(*S*) $r_{33} = +6,4$ (*S*) $r_{13} = +4,1$	(*S*) $r_{41} = 1,4$ (*S*) $r_{51} = +3,3$	0,633 0,633	(*T*) $\varepsilon_3 = 554$ (*T*) $\varepsilon_1 = 65$ (*S*) $\varepsilon_3 = 6,5$ (*S*) $\varepsilon_1 = 8$
$Ba_2NaNb_5O_{15}$ (833)	*m'n2*	(*T*) $r_c = 34$ (*T*) $r_{33} = 48$ (*T*) $r_{13} = 15$ (*T*) $r_{23} = 13$ (*S*) $r_{33} = +29$ (*S*) $r_{23} = 8$ (*S*) $r_{13} = 7$	(*T*) $r_{42} = 92$ (*T*) $r_{51} = 90$ (*S*) $r_{42} = 75$ (*S*) $r_{51} = 88$	0,633 0,633 0,633 0,633 0,633 0,633 0,633	(*T*) $\varepsilon_1 = 235$ (*T*) $\varepsilon_2 = 247$ (*T*) $\varepsilon_3 = 51$ (*S*) $\varepsilon_1 = 222$ (*S*) $\varepsilon_2 = 227$ (*S*) $\varepsilon_3 = 32$

Таблица 34.3

Электрооптические свойства кристаллов типа AB [1]

Вещество	Симметрия	r_{lk}, 10^{-12} м/в	λ, мкм	ε_i
CuCl	$\bar{4}3m$	(*T*) $r_{41} = 3,6$ (*T*) $r_{41} = 3,2$ (*S*) $r_{41} = +2,35$ (*S*) $r_{41} = +2,20$	0,633 10,6 0,633 3,39	(*S*) $\varepsilon = 7,5$
CuBr	$\bar{4}3m$	(*T*) $r_{41} = 0,85$	0,525	
ZnO	*6mm*	(*S*) $r_{33} = +2,6$ (*S*) $r_{13} = -1,4$ (*S*) $r_{33} = +1,9$ (*S*) $r_{13} = +0,96$	0,633 0,633 3,39 3,39	(*S*) $\varepsilon_1 = \varepsilon_2 = 8,15$ $\approx \varepsilon_3$
ZnS	$\bar{4}3m$	(*T*) $r_{41} = 1,2$ (*T*) $r_{41} = 2,1$ (*S*) $r_{41} = 1,6$ (*S*) $r_{41} = 1,4$	0,4 0,65 0,633 3,39	(*T*) $\varepsilon = 16$ (*S*) $\varepsilon = 12,5$ (*T*, *S*) $\varepsilon = 8,3$

Вещество	Симметрия	r_{ik}, 10^{-12} м/в	λ, мкм	ε_i
CdS	*6mm*	(*T*) $r_c = 4$ (*T*) $r_{51} = 3{,}7$ (*T*) $r_c = 5{,}5$ (*S*) $r_{33} = 2{,}4$ (*S*) $r_{13} = 1{,}1$	0,589 0,589 10,6 0,633 0,633	(*T*) $\varepsilon_3 = 10{,}33$ (*T*) $\varepsilon_1 = 9{,}35$ (*S*) $\varepsilon_1 = 9{,}02$ (*S*) $\varepsilon_3 = 9{,}53$
CdSe	*6mm*	(*S*) $r_{33} = 4{,}3$ (*S*) $r_{13} = 1{,}8$	3,39 3,39	(*T*) $\varepsilon_3 = 10{,}65$ (*T*) $\varepsilon_1 = 9{,}70$ (*S*) $\varepsilon_1 = 9{,}33$ (*S*) $\varepsilon_3 = 10{,}20$
CdTe	$\bar{4}3m$	(*T*) $r_{41} = 6{,}8$ (*T*) $r_{41} = 6{,}8$ (*T*) $r_{41} = 5{,}5$ (*T*) $r_{51} = 5{,}0$	3,39 10,6 23,35 27,95	(*S*) $\varepsilon = 9{,}4$
HgS	*32*	(*S*) $r_{11} = 3{,}1$ (*S*) $r_{41} = 1{,}4$ (*S*) $r_{11} = 4{,}2$ (*S*) $r_{41} = 2{,}4$	0,633 0,633 3,39 3,39	
ZnS	*6mm*	(*S*) $r_{33} = 1{,}8$ (*S*) $r_{33} = 1{,}7$ (*S*) $r_{13} = 0{,}9$	0,633 3,39 0,633	(*T*) $\varepsilon_1 = \varepsilon_3 = 8{,}7$ (*S*) $\varepsilon_1 = 8{,}7$
ZnSe	$\bar{4}3\ m$	(*T*) $r_{41} = 2{,}0$ (*S*) $r_{41} = 2{,}0$ (*T*) $r_{41} = 2{,}2$	0,546 0,633 10,6	(*T*) $\varepsilon = 9{,}1$ (*S*) $\varepsilon = 9{,}1$
ZnTe	$\bar{4}3m$	(*T*) $r_{41} = 4{,}45 \div 3{,}95$ (*T*) $r_{41} = 1{,}4$ (*S*) $r_{41} = 4{,}3$ (*S*) $r_{41} = 3{,}2$	0,59; 0,69 10,6 0,633 3,39	(*T*) $\varepsilon = 10{,}1$ (*S*) $\varepsilon = 10{,}1$
GaP	$\bar{4}3m$	(*S*) $r_{41} = -1{,}07 \div (-0{,}97)$	0,56; 3,39	(*S*) $\varepsilon = 12$ (*S*) $\varepsilon = 10$
GaAs	$\bar{4}3m$	(*S*) $r_{41} = 1{,}2$ (*S*) $r_{41} = -1{,}5$ (*S* + *T*) $r_{41} = 1{,}2 \div 1{,}6$ (*T*) $r_{41} = 1{,}0 \div 1{,}2$ (*T*) $r_{41} = 1{,}6$ (*S*) $r_{41} = 1{,}5$	0,9 1,08 3,39 1,0; 3,0 4,0; 12,0 10,6 10,6	(*S*) $\varepsilon = 13{,}2$ (*S*) $\varepsilon = 12{,}3$ (*T*) $\varepsilon = 12{,}5$

Таблица 34.4

Электрооптические свойства кристаллов различных типов [1]

Вещество	Симметрия	r_{ik}, 10^{-12} м/в	λ, мкм	n_i (λ, мкм)
$Bi_4(GeO_4)_3$	$\bar{4}3m$	(T) $r_{41} = 1{,}03$	0,45—0,62	$n_0 = 2{,}07$
$(CH_2)_6N_4$(ГМТ-гексаметилентетрамин)	$\bar{4}3m$	(T) $r_{41} = 0{,}71$—$0{,}8$	0,546	$n_0 = 1{,}591$ (0,589)
		(T) $r_{41} = 0{,}78$	0,633	$n_0 = 1{,}594$ (0,633)
		(S) $r_{41} < 0{,}14$	0,633	
Гайнит (минерал)	$\bar{4}3m$	(T) $r_{41} < 0{,}04$	0,633	$n_0 = 1{,}496$
$K_2Mg_2(SO_4)_3$	23	(T) $r_{41} = 0{,}40$	0,546	$n_0 = 1{,}535$ (0,589)
$(NH_4)_2Cd_2(SO_4)_3$	23	(T) $r_{41} = 0{,}70$	0,546	$n_0 = 1{,}606$ (0,589)
$(NH_4)_2Mn_2(SO_4)_3$	23	(T) $r_{41} = 0{,}53$	0,546	$n_0 = 1{,}57$ (0,589)
$Tl_2Cd_2(SO_4)_3$	23	(T) $r_{41} = 0{,}37$	0,546	$n_0 = 1{,}730$ (0,589)
$K_2Mn_2(SO_4)_3$	23	(T) $r_{41} = 2{,}0$	0,453—0,642	1,62 (0,45—0,65)
$Rb_2Mn_2(SO_4)_3$	23	(T) $r_{41} = 1{,}9$	0,453—0,642	1,60 (0,45—0,65)
$Tl_2Mn_2(SO_4)_3$	23	(T) $r_{41} = 2{,}1$	0,453—0,642	1,80 (0,45—0,65)
$K_2Ni_2(SO_4)_3$	23	(T) $r_{41} = 1{,}0$	0,453—0,642	1,70 (0,45—0,65)
$NaClO_3$	23	(T) $r_{41} = 0{,}4$	0,589	$n_0 = 1{,}515$
$Na_3SbS_4 \cdot 9H_2O$	23	(T) $n_1^3 r_{41} = 5{,}66$	0,42	
		(T) $n_1^3 r_{41} = 5{,}62$	1,08	
Уранилацетат натрия	23	(T) $r_{41} = 0{,}87$	0,546	$n_0 = 1{,}507$ (0,546)
$LiKSO_4$	6	(T) $r_c = 1{,}6$	0,546	$n_3 \approx n_1 = n_2 = 1{,}474$ (0,546)
$LiNaSO_4$	3m	(T) $r_{22} < 0{,}02$	0,546	$n_3 = 1{,}495$; $n_1 = n_2 = 1{,}490$
Турмалин	3m	(T) $r_{22} = 0{,}3$	0,589	$n_3 = 1{,}65$; $n_1 = n_2 = 1{,}63$
		(S) $r_{33} = r_{13} = 1{,}7$	0,633	
$Na_3Li(CrO_4)_2 \cdot 6H_2O$	3m	(T) $r_{22} = 0{,}92$	0,50	$n_1 = n_2 = 1{,}643$ (0,50)
		(T) $r_{22} = 0{,}82$	0,52	$n_1 = n_2 = 1{,}635$ (0,52)
		(T) $r_{22} = 0{,}77$	0,60	$n_1 = n_2 = 1{,}612$ (0,60)
Ag_3AsS_3 (прустит)*	3m	(S) $(n_1^3 r_{13} - n_3^3 r_{33}) = 70$	0,633	$n_1 = 3{,}02$ (0,633)
		(S) $n_1^3 r_{22} = 29$	0,633	$n_3 = 2{,}74$ (0,633)
$K_2S_2O_6$	32	(T) $r_{11} = 0{,}26$	0,546	$n_3 = 1{,}1518$; $n_1 = n_2 = 1{,}456$
$Cs_2C_4H_4O_6$	32	(T) $r_{11} = 1{,}0$	0,546	$n_3 = 1{,}546$; $n_1 = n_2 = 1{,}564$
$SrS_2O_6 \cdot 4H_2O$	32	(T) $r_{11} = 0{,}1$	0,546	$n_3 = 1{,}528$; $n_1 = n_2 = 1{,}532$
Se[2]*	32	(S) $n_1^3 r_{11} = 89$	1,15	$n_1 = 2{,}737$ (1,15); $n_3 = 3{,}573$
		(S) $r_{11} \sim 2{,}5$	10,6	$n_1 = 2{,}64$ (10,6); $n_3 = 3{,}41$
SiO_2 (кварц)[3]*	32	(T) $r_{11} = -0{,}47$	0,409—0,605	$n_3 = 1{,}555$ (0,546)
		(T) $r_{11} = 0{,}20$	0,633	$n_1 = n_2 = 1{,}546$ (0,546)
		(S) $r_{11} = 0{,}23$	0,633	
		(S) $r_{11} = 0{,}29$	0,633	
		(S) $r_{11} = 0{,}174$	0,633	
$(C_6H_{12}O_6)_2 \cdot NaBr \cdot H_2O$	32	(T) $r_{11} = 0{,}1$	0,546	$n_3 = 1{,}560$ (0,546)
$AgGaS_2$[4]*	$\bar{4}2m$	(T) $r_{63} = 3{,}0$	0,633	$n_1 = n_2 = 2{,}55$ (0,633)
		(T) $r_{41} = 4{,}0$	0,633	$n_3 = 2{,}50$
$Gd_2(MoO_4)_3$[5]*	$\bar{4}2m$	(T) $n_1^3 r_{63} = 17$ (450°K)	0,633	$n_1 = n_2 = 1{,}528$; $n_1 \approx n_2 = 1{,}848$ (0,633)
	mm2	(T) $n_1^3 r_{13} - n_3^3 r_{33} = 17{,}5$ (300°K)	0,633	$n_3 = 1{,}901$ (0,633)
$CdGa_2S_4$	$\bar{4}$	(T) $r_{13} = 0{,}37$	0,50	$n_1 = n_2 = 2{,}3$ (0,50)
		$r_{63} = 3{,}5$	0,50	
$(NH_4)_2C_2O_4 \cdot H_2O$	222	(T) $r_{41} = 230$	0,633	$n_1 = 1{,}437$ (0,65)
		(T) $r_{52} = 330$	0,633	$n_2 = 1{,}547$
		(T) $r_{63} = 250$	0,633	$n_3 = 1{,}590$
		(T) $r \ll 250$	0,633	
		(S) $r_{63} \approx 2$	0,633	

Вещество	Симметрия	r_{lk}, 10^{-12} м/в	λ, мкм	n_i (λ, мкм)
$NaNO_2$[6*]	*mm2*	(*T*) $r_{22} - \left(\frac{n_3}{n_2}\right)^3 r_{32} = 4{,}1$	0,546	$n_1 = 1{,}347$ (0,546)
		(*T*) $r_{32} - \left(\frac{n_1}{n_3}\right)^3 r_{12} = 4{,}2$		$n_2 = 1{,}415$
		(*T*) $r_{22} - \left(\frac{n_1}{n_2}\right)^3 r_{12} = 0{,}6$		$n_3 = 1{,}661$
		(*T*) $r_{43} = -1{,}9$		
		(*T*) $r_{61} = -3{,}0$		
$C(CH_2OH)_4$	*2*	(*T*) $r_{52} = 1{,}45$	0,46—0,70	$n_1 = 1{,}528$
		(*T*) $\lvert r_{12} - r_{32} \rvert = 0{,}7$	0,46—0,70	$n_2 \approx n_3 = 1{,}56$
$Ca_2Nb_2O_7$	*2*	(*T*) $\left\lvert r_{22} - \frac{n_1^3}{n_2^3} r_{12} \right\rvert = 12$	0,63	$n_1 = 1{,}97$
		(*T*) $\left\lvert r_{22} - \frac{n_3^3}{n_2^3} r_{32} \right\rvert = 14$	0,63	$n_2 = 2{,}16$
		(*S*) $\left\lvert r_{22} - \frac{n_3^3}{n_2^3} r_{32} \right\rvert = 13$	0,63	$n_3 = 2{,}17$
		(*S*) $r_{12} = 6{,}7$	0,63	
		(*S*) $r_{22} = 25{,}5$		
		(*S*) $r_{32} = 6{,}4$		
		(*S*) $r_{41} = 2{,}7$		
		(*S*) $r_{52} < 0{,}6$		
		(*S*) $r_{63} = 0{,}9$		

* Прозрачен от 0,6 до 13 *мкм*; $\varepsilon_1 \cong \varepsilon_3 = 20$; $\rho = 10^5$ *ом·см*.
[2*] Граница прозрачности ~ 8 *мкм*; $\varepsilon_1 \sim 8$.
[3*] $r_{11} < 0$ и $r_{41} > 0$ в левовращающем кварце.
[4*] (*S*) $\varepsilon_3 = 14$, (*S*) $\varepsilon_1 = 10$.
[5*] $T_K = 432°K$, $\varepsilon_3 = 8$.
[6*] x_2 принято полярной осью, переход в *mmm* при 423°K; (*S*) $\varepsilon_1 = 5$, $\varepsilon_2 = 4$, $\varepsilon_3 = 8$.

34.2 ЛИНЕЙНЫЙ МАГНИТООПТИЧЕСКИЙ ЭФФЕКТ (ЭФФЕКТ ФАРАДЕЯ)

Поворот плоскости поляризации света, распространяющегося в среде, находящейся во внешнем магнитном поле, называется линейным магнитооптическим эффектом или эффектом Фарадея. В пара- и диамагнитных материалах угол поворота плоскости поляризации ϕ_F дается соотношением

$$\phi_F = VHl\cos\gamma, \qquad (1)$$

где V — постоянная Верде, зависящая от природы вещества, частоты света и температуры; H — напряженность приложенного магнитного поля; l — длина пути луча в веществе; γ — угол между направлением приложенного поля и направлением распространения луча.

В ферромагнитных материалах магнитное поле в выражении для ϕ_F заменяется на намагниченность M, а постоянная Верде на постоянную Кундта K. В таблицах обычно приводится характерное для ферромагнетиков значение вращения при насыщенной намагниченности M_s, определяемое как удельное фарадеевское вращение плоскости поляризации для света, распространяющегося вдоль M_s, т. е.

$$F = KM_s \qquad (2)$$

При рассмотрении магнитооптических характеристик веществ необходимо учитывать ослабление излучения при распространении его во вращающей среде. Для характеристики «качества» различных магнитоактивных сред служит величина $2F/\alpha$, где α — коэффициент ослабления или поглощения в законе $I = I_0 \exp(-\alpha l)$.

К соотношениям (1) и (2) применимо обычное правило правой руки. Так, положительные ϕ_F и F соответствуют случаю, когда свет распространяется вдоль направления магнитного поля и плоскость поляризации вращается по часовой стрелке.

В табл. 34.5—34.7 — приняты обозначения:

Температура Кюри	T_K
Температура фазового перехода	T_p
Температура Нееля	T_N
Температура компенсации	T_{co}
Индукция насыщения при 0°K, *гс*	$4\pi M_S$
Удельное фарадеевское вращение, *град/см*	F
Коэффициент поглощения, $см^{-1}$	α
Характеристики качества, *град*	$2F/\alpha$
Длина волны излучения, *нм*	λ
Объемноцентрированный куб	о.ц.к.
Гексагональная плотная упаковка	г.п.у.
Гранецентрированный куб	г.ц.к.

Таблица 34.5

Характеристики ферромагнитных, ферримагнитных и антиферромагнитных веществ [2]

Вещество	Структура или состав	Критическая температура, °K	$4\pi M_S$, *гс*	F, $10^5 \frac{град}{см}$	α, 10^5 $см^{-1}$	$2F/\alpha$, *град*	T, °K	λ, *нм*
Металлы переходной группы								
Fe	о.ц.к.	$T_K = 1043$	21 800	3,5	7,6	0,92	300	546
				5,1	3,2	3,1	300	1000
				4,4	6,5	1,4	300	500
				6,5	5	2,6	300	1000
				7	4,2	3,3	300	1500
				7	3,5	4,0	300	2000
Co	г.п.у.	$T_K = 1390$	18 200	3,6	8,5	0,85	300	546
				2,9	—	—	300	500
				5,5	6,1	1,8	300	1000
				5,5	4,5	2,4	300	1500
				4,8	3,6	2,7	300	2000
Ni	г.ц.к.	$T_K = 683$	6 400	0,99	8,0	0,25	300	546
				7,2	4,2	3,4	300	4000
				0,8	—	—	300	500
				2,6	5,8	0,9	300	1000
				1,5	4,8	0,6	300	1500
				1	4,1	0,25	300	2000
Ni* (монокристалл)				0,79	—	—	300	546
				0,88	—	—	300	546
				0,97	—	—	300	546
Биарные компаунды и сплавы								
Пермаллой	г.ц.к. Ni : Fe % 82 : 18	$T_K = 803$	10 700	1,2	6	0,4	300	500
Cr Te	NiAs	$T_K = 334$	1 015	0,5	2,0	0,5	300	550
				0,4	1,2	0,7	300	900
				0,4	0,6	1,3	300	2500
MnAs	NiAs	$T_K = 313$		0,44	5,0	0,174	300	500
				0,49	4,9	0,200	300	600
				0,59	4,6	0,26	300	700
				0,78	4,5	0,34	300	800
				0,62	4,4	0,28	300	900

* Направление световой волны соответственно вдоль ⟨100⟩, ⟨110⟩ и ⟨111⟩.

Вещество	Структура или состав	Критическая °K	$4\pi M_S$, гс	F, $10^5 \frac{град}{см}$	α, 10^5 $см^{-1}$	$2F/\alpha$, град	T, °K	λ, нм
MnBi	NiAs	$T_K = 639$	7 700	4,2	6,1	1,4	300	450
			(7 500	5,0	5,8	1,7	300	500
			прн	7,0	5,1	2,8	300	600
			300 °K)	7,7	4,5	3,4	300	700
				7,6	4,3	3,5	300	800
				7,5	4,2	3,6	300	900
				7,4	4,1	3,6	300	1000
		$T_K = 453$	(5500	3,2	6,1	1,0	300	450
			прн	3,3	5,8	1,1	300	500
			300 °K)	3,3	5,1	1,3	300	600
				3,3	4,7	1,4	300	700
				3,3	4,5	1,4	300	800
				3,2	4,4	1,4	300	900
				3,2	4,4	1,4	300	1000
FeRh	—	$T_p = 333$	—	0,9	3,3	0,56	348	700
Ni + Fe	100 : 0		6 000	1,2	7,05	0,34	300	632,8
	90 : 10		8 400	1,6	7,14	0,45	300	632,8
	80 : 20		10 800	2,2	7,10	0,62	300	632,8
	70 : 30		12 900	2,7	7,0	0,77	300	632,8
	60 : 40		14 900	2,9	7,54	0,77	300	632,8
	50 : 50		16 000	2,8	8,13	0,69	300	632,8
	40 : 60		14 400	2,2	8,17	0,54	300	632,8
	30 : 70		8 000		8,13	—	300	632,8
	20 : 80		19 400	3,3	8,1	0,81	300	632,8
	10 : 90		20 800	3,6	8,13	0,88	300	632,8
	0 : 100		21 600	3,5	8,13	0,86	300	632,8
	35 : 65		12 400	2,1	7,7	0,55	300	400—700

Вещество	Структура или состав	Критическая температура, °K	$4\pi M_S$, гс	F, $\frac{град}{см}$	α, $см^{-1}$	$2F/\alpha$, град	T, °K	λ, нм
Ферриты								
$Li_{0,5}Fe_{2,5}O_4$	—	—	—	—440	150	6	300	1500
				—190	135	3	300	2000
				+10	85	0,2	300	3000
				+85	60	3	300	4000
				+110	44	5	300	5000
				+125	44	6	300	6000
				+135	80	3	300	7000
$MgFe_2O_4$	—	—	—	—60	100	1	300	2500
				—40	40	2	300	3000
				0	12	0	300	4000
				+30	4	15	300	5000
				+35	6	11	300	6000
				+50	13	8	300	7000
$CoFe_2O_4$	Шпинель	$T_N = 793$	4930	$2{,}75 \cdot 10^4$	$12 \cdot 10^4$	0,5	300	286
				$3{,}8 \cdot 10^4$	$14 \cdot 10^4$	0,5	300	330
				$3{,}6 \cdot 10^4$	$17 \cdot 10^4$	0,4	300	400
				$1{,}3 \cdot 10^4$	$13 \cdot 10^4$	0,2	300	500
				$-2{,}5 \cdot 10^4$	$6 \cdot 10^4$	0,8	300	660
$NiFeO_4$	Шпинель	$T_N = 858$	3350	$2{,}0 \cdot 10^4$	$5{,}9 \cdot 10^4$	0,7	300	286
				$2{,}4 \cdot 10^4$	$7{,}4 \cdot 10^4$	0,7	300	330
				$-0{,}75 \cdot 10^4$	$16 \cdot 10^4$	0,09	300	400
				$-1{,}0 \cdot 10^4$	10^5	0,2	300	500
				$+0{,}12 \cdot 10^4$	10^4	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

Вещество	Структура или состав	Критическая температура, °K	$4\pi M_S$, гс	F, $\frac{град}{см}$	α, $см^{-1}$	$2F/\alpha$, град	T, °K	λ, мк
YIG	Гранат	$T_N = 560$	2500	240	0,069	$7 \cdot 10^3$	300	1200
				2400	1500	3,2	300	555
				1750	1350	2,6	300	588
				1250	1400	1,8	300	625
				800	1150	1,4	300	667
				900	670	2,7	300	715
				750	450	3,3	300	770
				175	$<0,06$	$>3 \cdot 10^3$	300	5000—1500
$BaFe_{12}O_{19}$	Гексагональная	—	—	—50	—38	3	300	2000
				+75	20	7,5	300	3000
				+130	13	20	300	4000
$BaFe_{12}O_{19}$	Гексагональная			+150	20	15	300	5000
				+160	20	16	300	6000
				+165	22	15	300	7000
$Ba_2Zn_2Fe_{12}O_{19}$	Гексагональная	—	—	+90	120	1,5	300	5000
				+80	70	2	300	6000
				+75	65	2	300	7000
				+70	85	2	300	8000
GdIG	Гранат	$T_N = 564$	7300	—2000	6000	0,6	300	500
		$T_{co} = 286$		—1050	900	2,3	300	600
				—450	400	2,3	300	700
				—300	100	6	300	800
				—220	230	1,9	300	900
				—80	70	2,3	300	1000
Фторнды								
FeF_3^*	—	$T_K = 365$	40 (300°K)	670	14	95	300	349
				415	8,2	101	300	404
				180	4,4	82	300	522,5
$Rb\,Ni_{0,75}\,Co_{0,25}\,F_3^*$	Перовскит	$T_N = 109$	—	180	9	40	77	600
$RbFeF_3^*$	Перовскит	$T_p = 102$	—	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
$RbNiF_3^{2*}$	Перовскит	$T_N = 220$	1250	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								
$CrCl_3$	BiI_3	$T_K = 16,8$	3880	2000	200	20	1,5	410
				— 500	300	3	1,5	450
				—1000	70	30	1,5	590

* Имеется сильное естественное двулучепреломление.
** Измерено вдоль оси «с».

Вещество	Структура или состав	Критическая температура, °К	$4\pi M_s$, гс	F, $\frac{град}{см}$	α, $см^{-1}$	$2F/\alpha$, град	T, °К	λ, нм
$CrBr_3$	BiI_3	$T_K = 32,5$	3390	$3 \cdot 10^5$	$3 \cdot 10^3$	200		478
				$1,6 \cdot 10^5$	$1,4 \cdot 10^4$	23	1,5	500
CrI_3	BiI_3	$T_K = 68$	2690	$1,1 \cdot 10^5$	$6,3 \cdot 10^3$	35	1,5	970
				$0,8 \cdot 10^5$	$3 \cdot 10^3$	53	1,5	1000
Бораты								
$FeBO_3^{2+}$	Кальцит	$T_K = 348$	115 (300°К)	3200	140	45	300	500
				2300	40	115	300	525
				1100	100	22	300	600
				450	38	24	300	700
Халькогениды								
EuO	NaCl	$T_c = 69$	23 700	$-1,0 \cdot 10^5$	$0,5 \cdot 10^4$	40	5	1100
				$3,2 \cdot 10^5$	$7,5 \cdot 10^4$	8,5	5	800
				$5 \cdot 10^5$	$9,7 \cdot 10^4$	10	5	700
				$3,6 \cdot 10^5$	$9,7 \cdot 10^4$	7,5	6	600
				$0,5 \cdot 10^5$	$7,8 \cdot 10^4$	1,3	5	500
				$3 \cdot 10^4$	$> 0,5$	$\sim 10^5$	20	2500
				660	$> 1,0$	~ 1300	20	10600
EuS	NaCl	$T_c = 16,3$	—	$-1,6 \cdot 10^5$	~ 0	—	6	825
				$-9,6 \cdot 10^5$	$3,3 \cdot 10^4$	58	6	690
				$5,5 \cdot 10^5$	$1,2 \cdot 10^5$	92	6	563
				$5,1 \cdot 10^5$	$1,0 \cdot 10^5$	10	6	495
EuSe	NaCl	$T_c = 7$	13 200	$1,45 \cdot 10^5$	80	3600	4,2	750
				$1,17 \cdot 10^5$	70	3340	4,2	775
				$0,95 \cdot 10^5$	60	3170	4,2	800

Вещество	$4\pi M_s$, гс		F (град/см) для η (нм)						α, $см^{-1}$ для λ=1250 нм
			600	800	1000	1200	1400	1600	
Ортоферриты*									
$EuFeO_3$	83								~38
$GdFeO_3$	94								~10
$TbFeO_3$	137								~29
$DyFeO_3$	128								~40
$HoFeO_3$	91	‖ «c»	8000	2200	1000	800	700	600	~10
$ErFeO_3$	81								~15
$TmFeO_3$	140								~5
$YbFeO_3$	143								12,5
$LuFeO_3$	119								~5
$SmFeO_3$	84	‖ «a»	3400	700	400	300	200	150	~50
$YFeO_3$	105								~10
$LaFeO_3$	83								~10
$PrFeO_3$	71								~35
$NdFeO_3$	62								~10

* Все ортоферриты обладают сильным естественным двулучепреломлением.

Парамагнитные вещества [2]

Кристалл	Ион	Концентрация, %	T, °К	λ, нм	V, $\frac{мин}{э \cdot см}$	α, $см^{-1}$	V/α
Ионы редких земель в кристаллах							
CaF_2	Eu^{2+}	3	4,2	430	29	11,5	2,5
			4,2	440	22	1,8	12
CaF_2	Nd^{3+}	2,9	4,2	426,4	0,19	5	0,04
EuF_2	Eu^{2+}		300	450	4,5	20	0,2
		—	300	500	2,6	7	0,4
			300	550	1,6	6	0,3
			300	600	1,1	5,5	0,2
			300	650	0,8	5	0,16

Вещество	T, °К	λ, нм	V, $\frac{мин}{э \cdot см}$	λ нм, при, α	
				10^4 $см^{-1}$	1 $см^{-1}$
Перовскиты (оксиды)					
$SrTiO_3$	298	413	0,78	368	413
		496	0,31	—	—
		620	0,14	—	—
		826	0,066	—	—
$BaTaO_3$	403	427	0,95	380	446
		496	0,38	—	—
		620	0,18	—	—
		826	0,072	—	—
$KTaO_3$	296	352	0,44	327	370
		413	0,19	—	—
		496	0,096	—	—
		620	0,051	—	—
		826	0,022	—	—

Вещество	T, °К	V, мин/(э · см), для λ, нм							
		405	450	480	520	546	578	635	670
Редкоземельные гранаты									
TbAlG*	300	—2,226	—1,565	—1,290	—1,039	—0,912	—0,787	— 0,620	— 0,542
	77	—	—	—	—3,425	—3,051	—2,603	— 2,008	— 1,815
	4,2	—	—102,16	— 83,45	— 64,80	—58,35	—53,77	—48,39	—45,15
	1,45	—	—200,95	—172,52	—139,28	—125,07	—111,27	—97,47	—93,42
DyAlG	300	—1,241	—0,942	—0,803	—0,667	—0,592	—0,518	—0,411	—0,359
HoAlG	300	—0,709	—0,320	—0,260	—0,335	—0,304	—0,299	—	—0,206
ErAlG	300	—0,189	—0,240	—0,154	—0,162	—0,157	—0,145	—0 105	—0,089
TmAlG	300	+0,151	+0,103	+0,093	0,076	+0,069	+0,059	+0,048	—
YbAlG	298	0,287	0,215	0,186	0,140	0,133	0,116	0,094	—
	77	0,718	0,540	0,481	0,393	0,342	0,302	0,239	—

* $\alpha \approx 02$, — 0,6 $см^{-1}$ при $T = 300$°К.

Таблица 34.7

Магнитооптические свойства стекол [2]

Стекло	Массовое содержание, %				V, мин/(э·см), при T=300°K для λ, нм									
	Eu^{2+}	EuO	Al_2O_3	B_2O_3	406	435	450	500	550	600	650	700	750	800
Европиевое	12,9	14,4	15,3	70,2	—0,633	—0,341	—0,282	—0,162	—0,104	—0,076	—0,061	—0,049	—0,042	—0,032
	14,7	16,5	11,2	72,0	—0,748	—0,400	—0,327	—0,199	—0,131	—0,090	—0,070	—0,055	—0,046	—0,038
	17,9	20,0	13,4	66,2	—1,18	—0,675	—0,525	—0,298	—0,208	—0,149	—0,113	—0,091	—0,072	—0,060
	26,7	29,9	11,0	60,0	—	—1,27	—0,980	—0,523	—0,367	—0,258	—0,191	—0,158	—0,129	—0,110
	30,5	34,2	14,8	50,7	—	—	—2,55	—1,25	—0,721	—0,478	—0,366	—0,268	—0,225	—0,174

Стекло	Состав*		V, мин/(э·см), при T=300°K для λ, нм									
	R	x	405	436	480	500	520	546	578	600	635	670
Боратное с ионами редкоземельных элементов	La	3,04	0,043	0,036	0,029	0,026	0,023	0,022	0,019	0,018	0,016	0,014
	Pr—La	5,44	—0,380	—0,307	—0,230	—0,220	—0,214	—0,178	—0,153	—0,146	—0,128	—0,110
	Nd—La	5,41	—0,180	—0,147	—0,120	—0,111	—0,096	—0,094	—0,100	—0,059	—0,056	—0,046
	Sm—La	4,97	0,032	0,030	0,025	0,024	0,022	0,019	0,017	0,016	0,014	0,010
	Eu—La	4,69	—0,081	—0,060	—0,038	—0,033	—0,029	—0,024	—0,019	—0,016	—0,014	—0,012
	Gd—La	4,71	0,032	0,026	0,024	0,022	0,021	0,020	0,018	0,017	0,015	0,013
	Tb—La	4,73	—0,512	—0,419	—0,319	—0,288	—0,262	—0,234	—0,205	—0,186	—0,167	—0,142
	Dy—La	4,88	—0,436	—0,361	—0,299	—0,273	—0,246	—0,220	—0,193	—0,177	—0,159	—0,138
	Ho—La	4,36	—0,269	—0,252	—0,123	—0,131	—0,112	—0,128	—0,104	—0,096	—	—0,074
	Er—La	4,50	—0,093	—0,078	—0,068	—0,082	—	—0,045	—0,042	—0,040	—0,035	—0,034
	Tm—La	4,75	0,060	0,046	0,039	0,034	0,031	0,026	0,023	0,021	0,018	0,016
	Yb—La	8,58	0,115	0,094	0,073	0,066	0,060	0,054	0,046	0,043	0,037	0,033
	Tb—Pr	4,99	—0,940	—0,786	—0,560	—0,533	—0,489	—0,436	—0,380	—0,348	—0,306	—0,265
	Dy—Pr	4,63	—0,850	—	—	—0,497	—0,465	—0,413	—0,358	—0,332	—0,290	—0,252
	Pr	2,56	—0,843	—0,646	—0,471	—0,480	—0,432	—0,390	—0,334	—0,317	—0,271	—0,243

* Состав для La и Pr: $R_2O_3 \cdot x\,B_2O_3$;
для Tb—Pr и Dy—Pr: $R'_2O_3 \cdot R''_2O_3 \cdot x\,B_2O_3$;
для других $R_2O_3 \cdot 0{,}85\,La_2O_3 \cdot x\,B_2O_3$.

Продолжение табл. 34.7

Стекло	Состав, массовое содержание, %					V, мин/(э·см) для λ, нм										T, °K
						365	404	546	650	700	800	900	1100	1200	1300	
Алюмосиликат																
Празеодимовый	Pr_6O_{11}	SiO_2	Al_2O_3	MgO	Sb_2O_3	—1,04	—0,760	—0,350	—0,238	—0,198	—0,147	—0,112	—0,067	—0,051	—0,035	295
	58	25	12	4	1	—3,42	—2,51	—1,16	—0,780	—0,655	—0,488	—0,371	—0,232	—0,183	—0,138	77,4
Диспрозиевый	Dy_2O_3	SiO_2	Al_2O_3	MgO	Sb_2O_3	—0,883	—0,676	—0,336	—0,231	—0,189	—	—	—	—	—	295
	58	25	12	4	1	—3,34	—2,58	—1,28	—0,864	—0,724	—	—	—	—	—	77,4
Тербиевый	Tb_4O_7	SiO_2	Al_2O_3	MgO	Sb_2O_3	—1,17	—0,857	—0,390	—0,264	—0,216	—0,159	—0,120	—0,074	—0,059	—0,047	295
	58	25	12	4	1	—4,34	—3,20	—1,42	—0,978	—0,800	—0,592	—0,450	—0,281	—0,225	—0,182	77,4

Стекло	Состав*		V, мин/(э·см), при $T = 300°K$ для λ, нм									
	R	x	405	436	480	500	520	546	578	600	635	670
Фосфатное с ионами редкоземельных элементов (R)*	La		0,037	0,030	0,024	0,022	0,020	0,018	0,015	0,014	0,013	—
	Ce	2,67	—0,672	—0,510	—0,366	—0,326	—0,287	—0,253	—0,217	—0,197	—0,173	—0,150
	Pr	3,09	—0,447	—0,332	—0,283	—0,261	—0,236	—0,208	—0,182	—0,170	—0,150	—0,132
	Nd	2,92	—0,250	—0,209	—0,167	—0,155	—0,136	—0,134	—0,094	—0,080	—0,080	—0,071
	Sm	2,87	0,026	0,024	0,020	0,020	0,017	0,015	0,014	0,012	0,011	0,010
	Eu	2,93	—0,025	—0,017	—0,010	—0,006	—0,006	—0,005	—0,004	—0,003	—0,002	—0,002
	Gd	3,01	0,018	0,015	0,014	0,012	0,012	0,011	0,011	0,010	0,009	0,009
	Tb	2,94	—0,560	—0,458	—0,357	—0,323	—0,295	—0,261	—0,226	—0,206	—0,190	—0,164
	Dy	2,51	—0,540	—0,453	—0,359	—0,331	—0,301	—0,268	—0,237	—0,217	—0,197	—0,173
	Ho	2,94	—0,299	—0,313	—0,156	—0,153	—0,138	—0,138	—0,119	—0,110	—0,098	—0,084
	Er	3,01	—0,139	—0,121	—0,100	—0,111	—0,095	—0,062	—0,060	—0,057	—0,051	—0,044
	Tm	2,79	0,019	0,013	0,012	0,009	0,008	0,006	0,005	0,004	0,004	0,007
	Yb	3,01	0,087	0,072	0,056	0,050	0,045	0,041	0,036	0,032	0,029	0,024

* Состав: $R_2O_3 \cdot x\ P_2O_5$.

Таблица 34.8

Постоянные Верде V для жидкостей [3]

Жидкость	λ, *нм*	T, °C	V, 10^{-2} $\frac{мин}{гс \cdot см}$
H_2O	546	20	1,54
	578	20	1,37
	589	20	1,307
HCl	589	20	2,24
CCl_4	578	205	1,68
N_2	589	—19	0,415
NH_3	578	—40	1,73
N_2O	589	—922	5,54
O_2	589	—18	0,782
PCl_3	578	26	3,05
SO_2	578	—10	1,87
$Ni(CO)_4$	578	17	7,35
Br_2	700	0	5,3
BrH	589	20	3,43
$SiCl_4$	589	16	1,89
HI	589	20	5,13

Таблица 34.9

Постоянные Верде для органических соединений [3]

Вещество	λ, *нм*	T, °C	V, 10^{-2} $\frac{мин}{гс \cdot см}$
C_4H_{10}	578	—10	1,179
C_5H_{12}	589	20	1,1490
C_6H_{12}	589	25	1,240
C_6H_6	578	20	3,10
C_7H_{14}	589	20	1,2946
C_9H_{12}	589	15	2,47
$C_{10}H_{18}$	589	20	1,3785
$C_{12}H_{10}$	589	15	3,82
$C_{13}H_{12}$	589	15	3,22
CH_3I	578	18	3,53
$CHCl_3$	578	18	1,67
CCl_4	578	20	1,68
C_6H_5Cl	589	25	2,891
C_6H_5Br	589	25	3,25
CH_4O	589	26	0,9515
C_3H_6O	589	15,2	1,13
C_4H_5N	589	15,2	2,44
C_6H_7N	589	15	4,14

34.3. КВАДРАТИЧНЫЙ ЭЛЕКТРООПТИЧЕСКИЙ ЭФФЕКТ (ЭФФЕКТ КЕРРА)

Квадратичный электрооптический эффект, или эффект Керра — появление двойного лучепреломления у изотропного вещества в однородном электрическом поле. Внешнее электрическое поле **E** ориентирует молекулы, обладающие электрическим моментом (дипольным, квадрупольным и т. п.), в результате возникает анизотропия и показатели преломления $n_\parallel$ (вдоль поля) и $n_\perp$ (перпендикулярно полю) становятся различными: $n_\parallel - n_\perp = KnE^2$, разность хода необыкновенного и обыкновенного лучей равна $\Delta = KnlE^2$, здесь K — постоянная Керра, n — показатель преломления в отсутствии поля, l — длина оптического пути.

Эффект Керра, вызванный электрическим полем световой волны, называют высокочастотным. Значение постоянной Керра зависит от природы вещества, частоты света и температуры.

Таблица 34.10

Значения постоянной Керра K для газов при давлении $P = 760$ *мм рт. ст.* и длине волны $\lambda = 546$ *нм* [3]

Газ	T, °C	K, 10^{-15} *м/в*^{2}	Газ	T, °C	K, 10^{-15} *м/в*^{2}
H_2	34,6	0,045	C_3H_8	0	0,85
O_2	0	0,45	C_2H_4	0	1,06
N_2	0	0,30	$(CH_3)_2O$	18	—5,0
	22	0,14	$(C_2H_5)O$	62,7	—3,9
Cl_2	24	2,3	CH_3Cl	18	36,5
CO_2	17,5	1,5	C_2H_5Cl	18	55,2
N_2O	56,7	21,6	$CHCl_3$	89,5	—7,7
	26	3,08	$CH_2Cl\times$	108,5	4,7
HCl	18	5,75	$\times CH_2Cl$		
H_2S	18	1,59	$(CH_3)_2CO$	83,1	32,1
NH_3	17,5	3,48	C_2H_6	113,6	5,56
HCN	20	93,0	$C_6H_5CH_3$	137,7	9,0
SO_2	18	—9,4	C_6H_5Cl	153,7	37,2
CH_4	0	0,24	$C_6H_5NO_2$	235,5	146
C_2H_6	0	0,67			

Таблица 34.11

Значения постоянной Керра для жидкостей при длине волны $\lambda = 546$ *нм* [3]

Жидкость	T, °K	K, 10^{-12} *м/в*^{2}	Жидкость	T, °K	K, 10^{-12} *м/в*^{2}
O_2	90	10,1	o-$C_6H_4(CH_3)_2$	293	5,48
N_2	71,4	4,02	$(C_2H_5)_2O$	293	—2,66
CS_2	293	12,1	$CHCl_3$	293	—11,6
C_6H_{12}	293	0,227	C_6H_5Cl	293	40,7
C_6H_6	293	1,46	$C_6H_5NO_2$	293	1410

34.4. ПЬЕЗООПТИЧЕСКИЙ ЭФФЕКТ

Пьезооптический 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 $\Delta (1/n^2)_{ij}$ и тензором механических напряжений S_{kl} определяется упругооптическим тензором p_{ijkl} четвертого ранга. Так как $(1/n^2)_{ij}$ и S_{kl} симметричны и безразмерны, то элементы тензора p_{ijkl} также безразмерны и в силу симметрии по парам индексов (ij) и (kl) можно использовать укороченную запись

$$\Delta \left(\frac{1}{n^2}\right)_i = \sum_{j=1}^{6} p_{ij} S_j; \quad i, j = 1, 2, \ldots 6,$$

применяя для пар индексов (ij) и (kl) стандартные обозначения: 1 вместо (11), 2 место (22), 3 вместо (33) и 4, 5, 6 соответственно вместо (23) и (32), (13) и (31), (12) и (21.).

Фотоупругие свойства различных веществ для материалов различных точечных групп симметрии (рис. 34.1) приведены в табл. 34.12.

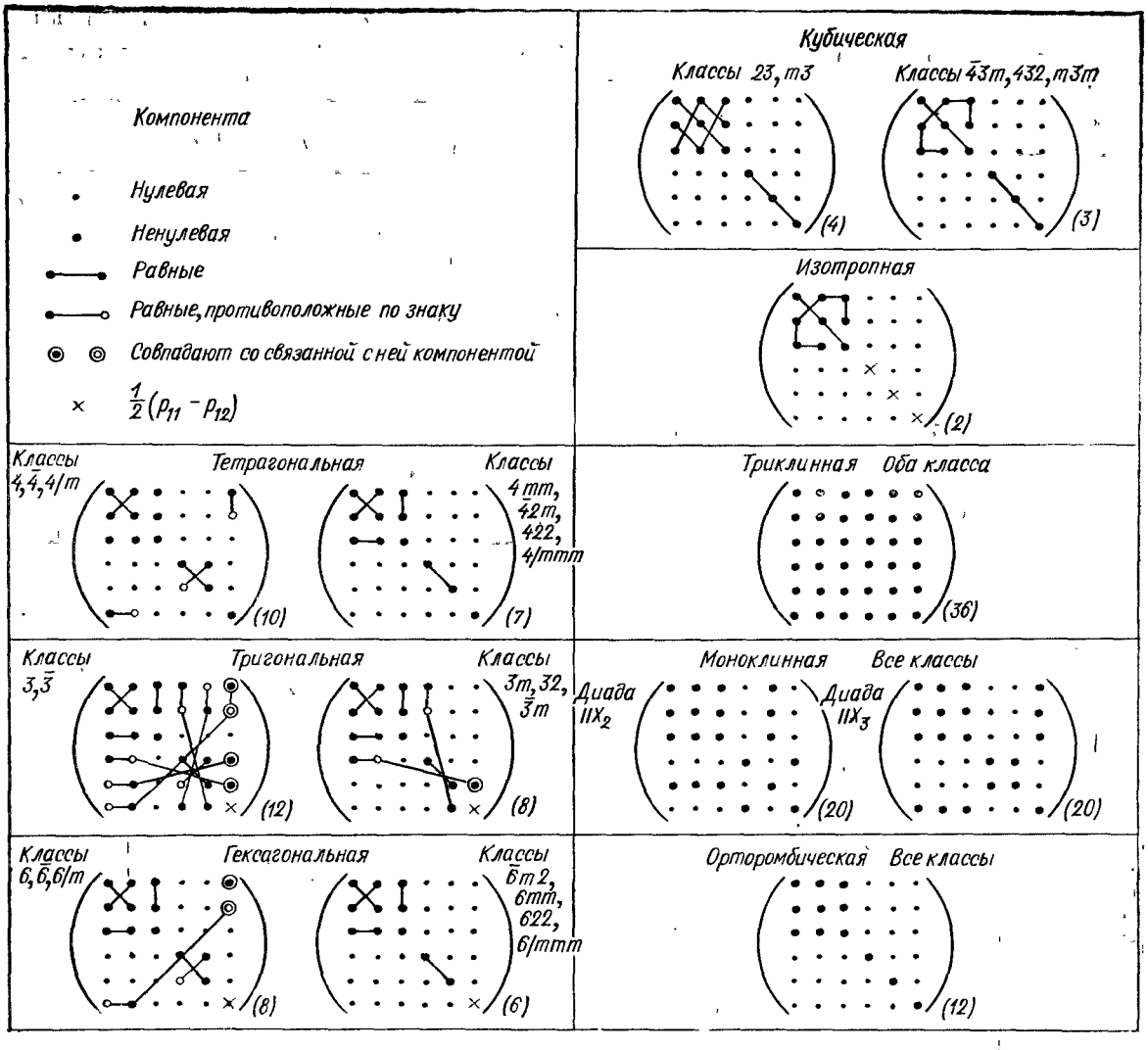


Рис. 34.1. Формы упругооптических тензоров (по сингониям) [4].

Таблица 34.12

Фотоупругие свойства веществ по сингониям [4]

Все измерения выполнены при $T = 300°$ К. Средняя погрешность для P_{ij} ± 5%. Если знак не указан, известен только модуль P_{ij}. Коэффициент качества M_2 нормирован по плавленому кварцу. Для плавленого кварца $M_2 = 1{,}51 \cdot 10^{-18}$ *сек*^{3}/*г*

Сингодия (класс)	Вещество	λ, *мкм*	p_{11}	p_{12}	M_2
Изотропная	Кварц плавленый	0,63	+0,121	0,270	1,0
	As_2S_3 — стекло	1,15	+0,308	0,299	230
	Вода	0,63	0,31	0,31	106
	33% Ge, 55% Se, 12% As	1,06	0,21	0,21	164
	Sb_2O_3	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
	$PbO \cdot 2Sb_2O_3$	0,63	—	—	18,5
	Люцит	0,63	0,30	0,28	33
	Полистирол	0,63	0,30	0,31	84

Сингония (класс)	Вещество	λ, *мкм*	p_{11}	p_{12}	p_{44}	M_2
Кубическая (*$\bar{4}3m$*, *432* и *$m3m$*)	GaP	0,63	—0,151	—0,082	—0,074	29,5
	GaAs	1,15	—0,165	—0,140	—0,072	69
	$Y_3Al_5O_{12}$ (YAG)	0,63	—0,029	+0,009	—0,061	0,048
	$Y_3Fe_5O_{12}$ (YIG)	1,15	0,025	0,073	0,041	0,22
	β-ZnS	0,63	+0,091	—0,01	+0,075	2,3
	Ge	10,6	+0,27	+0,235	+0,125	540,0
	$ZnAl_2O_4$	0,63	< 0,009	0,03	—	0,005
	$SrTiO_3$	0,63	0,15	0,095	0,072	1,1
	$Y_3Ga_5O_{12}$	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÷+0,19	—0,16	—
	LiF	0,59	+0,02	+0,128	—0,064	—
	MgO	0,59	—0,32	—0,08	—	—
	$Bi_4Ge_3O_{12}$	0,63	—	—	—	33
	KBr	0,59	+0,22	+0,171	—0,026	—
	KCl	0,59	+0,17	+0,124	—	—
	KI	0,59	+0,210	+0,169	—	—
	NaCl	0,59	+0,110	+0,153	—0,010	—

Сингония (класс)	Вещество	λ, *мкм*	p_{11}	p_{12}	p_{13}	p_{44}	M_2
Кубическая (*23* и *$m3$*)	$Ba(NO_3)_2$	0,63	0,15	0,35	0,29	0,02	15,0
	$Bi_{12}GeO_{20}$	0,63	—	—	—	—	6,6
	$Bi_{12}SiO_{20}$	0,63	—	—	—	—	6,0
	$Pb(NO_3)_2$	0,63	—	—	—	—	17,0
	$NaBrO_3$	0,59	0,185	0,218	0,213	—0,0139	—
	$NaClO_3$	0,59	0,162	0,24	0,20	—0,198	—

Сингония (класс)	Вещество	λ, *мкм*	p_{11}	p_{12}	p_{13}	p_{14}	p_{31}	p_{33}	p_{41}	p_{44}	M_2
Тригональная (*3m*, *32* и *$\bar{3}m$*)	$LiTaO_3$	0,63	0,08	0,08	0,09	0,03	0,09	0,15	0,02	0,02	0,91
	α-Al_2O_3	0,63	0,20	0,078	~0	—	0	0,252	—	0,09	0,22
	Te	10,6	0,155	0,130	—	—	—	—	—	—	2,92
	$LiNbO_3$ (P^E)	0,63	—0,02	+0,08	+0,13	—0,08	+0,17	+0,07	—0,15	+0,12	9,0
	Рубин (Al_2O_3 + + 0,05% Cr)	0,63	—0,23	—0,03	+0,02	0,00	—0,04	—0,20	+0,01	—0,10	—
	α-Кварц (SiO_2)	0,59	+0,128	+0,25	+0,259	—0,029	+0,258	+0,098	—0,042	—0,0685	—
	$CaCO_3$	—	+0,095	+0,189	+0,215	—0,006	+0,309	+0,178	+0,01	—0,090	—
(*3* и *$\bar{3}$*)	Li_2WO_4	0,63	—	—	—	—	—	—	—	—	2,5
Гексагональная (*$\bar{6}m2$*, *6mm*, *622* и *6/mmm*)	CdS	0,63	0,142	0,066	—	—	0,041	—	—	0,054	8,0
(*6*, *$\bar{6}$* и *6/m*)	$LiIO_3$	0,63	0,32	—	—	0,03	0,41	—	—	—	8,3
Тетрагональная (*4mm*, *$\bar{4}2m$*, *422* и *4/mmm*)	TiO_2 (рутил)	0,63	—0,011	+0,172	—0,168	—	—0,096	—0,058	—	—	2,6
	ADP	0,63	+0,302	+0,246	+0,236	—	+0,195	+0,263	—	0,075	4,2
	KDP	0,63	+0,251	+0,249	+0,246	—	+0,225	+0,221	—	0,058	2,5
	$ZrSiO_4$	0,63	0,06	—	0,13	—	0,07	0,09	—	0,10	2,4
	TeO_2	0,63	0,0074	+0,187	+0,340	—	+0,090	+0,240	—0,17	—0,046	525,0
	$Sr_{0,75}Ba_{0,25}Nb_2O_6$	0,63	0,16	0,10	0,08	—	0,11	0,47	—	—	26,0
	$Sr_{0,5}Ba_{0,5}Nb_2O_6$	0,63	0,06	0,08	0,17	—	0,09	0,23	—	—	5,8
(*4*, *$\bar{4}$* и *4/m*)	$PbMoO_4$	0,63	0,24	0,24	0,255	—	0,15	0,29	—	—	23,7
	$CdMoO_4$	0,63	0,12	0,10	0,13	—	0,11	0,18	—	—	4,5
	$PbWO_4$		—								21,0

Сингония (класс)	Вещество	λ, *мкм*	p_{11}	p_{12}	p_{13}	p_{21}	p_{22}	p_{23}	p_{31}	p_{32}	p_{33}	p_{44}	p_{55}	p_{66}	M_2
Орторомбическая	α-HIO_3	0,63	0,406	0,277	0,304	0,279	0,343	0,305	0,503	0,310	0,334	—	—	0,092	55,0
	$Ca(NbO_3)_2$	0,63	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	1,3
	$PbCO_3$	0,63	0,15	0,12	0,16	0,05	0,06	0,21	0,14	0,16	0,12	—	—	—	15,0
	$Ba_2NaNb_5O_{15}$	—	—	—	—	—	—	—	0,17	—	—	—	—	—	5,0÷ —10,0
	$BaSO_4$	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)	Pb_2MoO_5	0,63	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	27,0

Изменение показателя преломления веществ под действием акустических волн может быть использовано для отклонения у пучков оптических лучей (табл. 34.13).

В табл. 34.12 и 34.13 кроме значений p_{ij} приведены также часто используемые для вычисления свойств материалов коэффициенты «качества» M_1, M_2 и M_3:

$$M_1 = \frac{n^7 p^2}{\rho v^3}; \quad M_2 = \frac{n^6 p^2}{\rho v^3}; \quad M_3 = \frac{n^7 p^2}{\rho v^2},$$

где n — показатель преломления; p — компонента тензора фотоупругости; ρ — плотность вещества и v — скорость звука в нем.

Таблица 34.13

Акустико-оптические свойства веществ [4]

Поляризация определяется параллельно (∥) или перпендикулярно (⊥) к плоскости, проходящей через направление распространения световой и акустической волн. Продольная (поперечная) поляризация помечена знаком ∗ (∗∗). Коэффициенты качества нормированы по плавленому кварцу. Коэффициент перевода: $1{,}51 \cdot 10^{-13}$ *сек³/г*. Ослабление звука нарастает с частотой как f^x, где $x \geqslant 1$. При экстраполяции к f=500 *Мгц* предполагалось, что $x = 2$

Вещество	Область прозрачности, *мкм*	λ, *мкм*	n	Направление акустической волны	$v_{зв}$, 10^5 *см/сек*	Поляризация, направление световой волны	M_1	M_2	M_3	Ослабление звука для f = 500 *МГц* *дб/мксек*
H_2O	0,2—0,9	0,633	1,33	—	1,5	∥ или ⊥	6,1	106	24	75
D_2O	0,2—1,8									
GaP	0,6—10,0	0,633	3,31	∗ [110]	6,32	∥	75	29,5	69	<1,0
				∗∗ [100]	4,13	∥ или ⊥, [010]	17,4	16	25,7	—
Ge	2—20	10,6	4,0	∗ [111]	5,50	∥	1270	540	1380	4,2
				∗∗ [100]	3,51	∥ или ⊥	182	190	308	0,8
Кварц плавленый, SiO_2	0,2—4,5	0,633	1,46	∗	5,96	⊥	1,0	1,0	1,0	1,8
				∗∗	3,76	∥ или ⊥	0,12	0,31	0,2	—
α-HIO_3	0,3—1,8	0,633	1,98	∗ [001]	2,44	⊥, [010]	13,6	55,0	32	0,6
$LiNbO_3$	0,5—4,5	0,633	2,20	∗ [11$\bar{2}$0]	6,57	—	8,3	4,6	7,5	<0,03
$PbMoO_4$	0,4—5,5	0,633	2,39	∗ [001]	3,66	∥ или ⊥, [100]	15,3	23,7	24,9	1,2
As_2S_3-стекло	0,6—11	1,15	2,46	∗	2,6	⊥	78,0	230	182	11,0
$Ge_{33}Se_{55}As_{12}$-стекло	1—14	1,06	2,7	∗	2,52	∥ или ⊥	53,0	164	128	1,8
Te	5—20	10,6	4,8	∗ [11$\bar{2}$0]	2,2	∥, [0001]	1320	2920	3550	—
TeO_2	0,35—5,0	0,633	2,27	∗ [001]	4,26	⊥, [010]	18,5	22,8	25,6	1,0
				∗∗ [110]	0,617	∥ или ⊥, [001]	8,8	525	85,0	3,0
TiO_2	0,45—5,5	0,633	2,58	∗ [11$\bar{2}$0]	7,86	⊥ [0001]	7,9	2,6	6,2	—

34.5. ОПТИЧЕСКАЯ АКТИВНОСТЬ

Способность вещества вращать плоскость поляризации света при прохождении его через вещество называется (естественной) оптической активностью. Оптическую активность веществ характеризуют удельным вращением $[\alpha]_\lambda^t$, т. е. углом поворота α плоскости поляризации света, проходящего через слой вещества толщиной 10 *см* при температуре t, °C, длине волны λ и концентрации оптически-активного вещества, равной 1 *г/см³*. Для чисто активной жидкости $[\alpha] = \alpha/(l\rho)$, для растворов $[\alpha] = 100\alpha/(lP\rho)$, где α — угол вращения, *град*; l — толщина слоя, *дм*; ρ — плотность, *г/см³*; P — концентрация оптически-активного вещества в граммах на 100 *г* раствора.

Молекулярная вращательная способность определяется выражением $[M] = [\alpha]M/100$ *см³·град/дм*, где M — молекулярная масса активного вещества, *г*.

Таблица 34.14

Оптическая активность метиловых эфиров [3, 5]

Эфир	$[\alpha]_D^{20}$, $\frac{град \cdot см^3}{г \cdot дм}$	$[M]_D^{20}$, $\frac{град \cdot см^3}{дм}$
$HCO_2C_{10}H_{19}$	—79,52	—146,3
$CH_3CO_2C_{10}H_{19}$	—79,42	—157,3
$C_2H_5CO_2C_{10}H_{19}$	—75,51	—160,2
$C_3H_7CO_2C_{10}H_{19}$	—69,52	—156,9
$C_4H_9CO_2C_{10}H_{19}$	—65,55	—157,3
$C_5H_{11}CO_2C_{10}H_{19}$	—62,07	—157,7
$C_6H_{13}CO_2C_{10}H_{19}$	—58,85	—155,7
$C_7H_{15}CO_2C_{10}H_{19}$	—55,25	—155,8
$C_8H_{17}CO_2C_{10}H_{19}$	—53,16	—157,3

Таблица 34.15

Оптическая активность этилтартрата в различных растворителях [3, 5]

Растворитель	Дипольный момент растворителя μ, *дебай*	$[M]_{546,1}^{20}$ *нм*, $\frac{град \cdot см^3}{дм}$
s-$C_6H_3(CH_3)_3$	0	0
$C_6H_5OCH_3$	1,16	5
C_4H_6	0,4	7,4
$C_6H_5CH_3$	0	12,5
C_4H_5I	1,25	20,2
C_6H_5Br	1,56	21,8
C_6H_5Cl	1,56	23,0
C_4H_5CN	3,85	67,9
$C_6H_5NO_2$	3,90	80,6
C_4H_5COH	2,75	107,7
Чистый этилтартрат	—	16,25

Таблица 34.16

Удельное вращение кристаллов [3]

Кристалл	Формула	Класс	Длина волны, *нм*	$[\alpha]$, $\frac{град}{мм}$
Лития-калия сульфат	$KLiSO_4$	C_6	589	±3,43
Кварц	SiO_2	D_3	434	41,924[6]
			486,1	32,761[6]
			589,3	21,724[6]
			656,3	17,320[6]
Киноварь	HgS	D_3	687	325
Натрия хлорат	$NaClO_3$	T	556	±1,42
Сахар	$C_{12}H_{22}O_{11}$	C_2	589	1,6—5,4*
Сегнетова соль	$KNaC_4H_4O_6 \cdot 4H_2O$	D_2	589	—1,4

* Для различных направлений.

34.6. НЕЛИНЕЙНЫЕ ОПТИЧЕСКИЕ ЭФФЕКТЫ

При воздействии на материальную среду оптического излучения большой интенсивности в ней возникает наведенная поляризация, которая может быть представлена в виде разложения в ряд по степеням действующего электромагнитного поля E:

$$\mathcal{P} = \varepsilon [\chi^{(1)} E + \chi^{(2)} E^2 + \chi^{(3)} E^3 + \cdots],$$

где $\chi^{(1)}$ $\chi^{(2)}$, $\chi^{(3)}$ и т. д. — нелинейные восприимчивости среды, ответственные за нелинейные эффекты, а ε — диэлектрическая проницаемость среды. В общем случае в разложении поляризации по степеням поля необходимо учитывать также низкочастотные поля и, кроме того, акустические и оптические фононы. В этом общем случае нелинейные восприимчивости среды будут описывать целый ряд явлений: различные электро- и магнитооптические эффекты, генерацию второй и третьей гармоник, многофононное поглощение, параметрическую генерацию, вынужденные рассеяния — комбинационное, мандельштам-бриллюэновское и рэлеевское, акустико-оптические и другие эффекты.

Генерация второй гармоники в кристаллах

Генерация второй гармоники в кристаллах описывается поляризацией среды

$$\mathcal{P}_i^{(2\omega)} = \varepsilon_0 \sum_{j,\,k=1,\,2,\,3} d_{ijk}^{2\omega} E_j^{(\omega)} \cdot E_k^{(\omega)},$$

где коэффициенты $d_{ijk}^{2\omega}$ образуют тензор третьего ранга. Перестановка компонент поля $E_j^{(\omega)}$ и E_k^{ω} не влияет на значение $\mathcal{P}_i^{(2\omega)}$, поэтому члены тензора $d_{ijk}^{2\omega}$ удовлетворяют условиям симметрии $d_{ijk}^{2\omega} = d_{ikj}^{2\omega}$. В силу этого, так же как и для тензора пьезооптического эффекта (см. разд. 34.4), для $d_{ijk}^{2\omega}$ можно воспользоваться сокращенной записью $d_{il}^{2\omega}$, где l в зависимости от j и k пробегает значения от 1 до 6. В сокращенной записи компоненты поляризации среды записываются в матричной форме

$$(P_x,\ P_y,\ P_z) =$$

$$= \begin{pmatrix} d_{11} & d_{12} & d_{13} & d_{14} & d_{15} & d_{16} \\ d_{21} & d_{22} & d_{23} & d_{24} & d_{25} & d_{26} \\ d_{31} & d_{32} & d_{33} & d_{34} & d_{35} & d_{36} \end{pmatrix} \begin{bmatrix} E_x^2 \\ E_y^2 \\ E_z^2 \\ 2E_yE_z \\ 2E_xE_z \\ 2E_xE_y \end{bmatrix}$$

Число ненулевых членов в тензоре $d_{il}^{2\omega}$ зависит от группы точечной симметрии среды. Для различных кристаллических классов вид тензора $d_{il}^{2\omega}$ приведен в табл. 34.17.

Мощность излучения второй гармоники $P^{2\omega}$ определяется соотношением

$$P^{2\omega} \sim \frac{\omega^2 \left(d_{il}^{2\omega}\right)^2 \left(P^{\omega}\right)^2 L^2}{r_0^2 n^{2\omega} \left(n^{\omega}\right)^2} f(\Delta k),$$

где ω и P^{ω} — частота и мощность исходного излучения; n^{ω} и $n^{2\omega}$ — показатели преломления среды для излучения исходной частоты и его второй гармоники; L — длина пути луча в среде; r_0 — радиус луча; $f(\Delta k)$ — функция, описывающая рассогласование волновых векторов исходной световой волны и ее второй гармоники k_{ω} и $k_{2\omega}$. В тех случаях, когда выполняется условие синхронизма, т. е.

$$2k_{\omega} = k_{2\omega} \text{ или } v(\omega) = v(2\omega),$$

$\Delta k = 0$ и $f(\Delta k) = 1$. Это возможно только в средах, необладающих дисперсией. В реальных же средах фазовые скорости $v(\omega)$ и $v(2\omega)$ различны, в силу чего $\Delta k > 0$ и $f(\Delta k) < 1$. Более того, при распространении, световых волн в среде величина Δk постоянно меняется. Поэтому фазовые соотношения между исходной волной и ее гармоникой сохраняются только на некоторой длине, называемой когерентной:

$$l_{\text{ког}} = \frac{\pi}{2\left(k_{2\omega} - 2k_{\omega}\right)}.$$

В кристалле кварца, например, $l_{\text{ког}}$ составляет всего $\sim 10^{-3}$ *см*.

Существенное увеличение $l_{\text{ког}}$ достигается при точном выполнении условий синхронизма в анизотропных кристаллах. Здесь, так как показатель преломления, а следовательно, и фазовая скорость, зависят не только от частоты, но и от поляризации волны, оказывается возможным выполнение условий синхронизма на значительно бо́льших длинах. При этом, в зависимости от выбора поляризации и ориентации кристалла, возможны два типа фазового синхронизма. В отрицательных одноосных кристаллах, где показатель преломления для обыкновенной волны n_o (волны с поляризацией, перпендикулярной к плоскости, проходящей через оптическую ось кристалла и направление луча) больше показателя преломления для необыкновенной волны n_e (волны с поляризацией параллельной указанной плоскости), имеем в некотором направлении θ_1, отсчитываемом от направления оптической оси кристалла:

$$n_e^{2\omega} = n_o^{\omega},$$

и в направлении θ_2

$$n_e^{2\omega} = \frac{1}{2}\left(n_o^{\omega} + n_e^{\omega}\right).$$

Соответственно для положительных одноосных кристаллов

$$n_o^{2\omega} = n_e^{\omega}; \quad n_o^{2\omega} = \frac{1}{2}\left(n_e^{\omega} + n_o^{\omega}\right).$$

Для двуосных 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 $l_{\text{ког}}$ в реальных условиях эксперимента не 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 называется критическим, если направление фазового синхронизма θ отличается от 90°, и некритическим, если $\theta = 90°$. 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 с помощью выбора температуры кристалла.

Коэффициенты генерации второй гармоники (элементы тензора $d_{il}^{2\omega}$) нелинейных кристаллов приведены в табл. 34.18. Элементы тензора $d_{ijk}^{2\omega}$ связаны с линейными оптическими восприимчивостями сред через тензор третьего ранга $\delta_{ijk}^{2\omega}$ (тензор Миллера)*

$$d_{ijk}^{2\omega} = \varepsilon_0 \chi_{ii}^{2\omega} \chi_{jj}^{\omega} \chi_{kk}^{\omega} \delta_{ijk}^{2\omega}.$$

Значения $\delta_{il}^{2\omega}$ также приведены в табл. 34.18. Характерным является то, что вариации элементов тензора $\delta_{il}^{2\omega}$ от вещества к веществу значительно меньше, чем вариации для $d_{il}^{2\omega}$.

Так как абсолютные или относительные знаки коэффициентов второй гармоники определены только для некоторых кристаллов, то они вынесены в отдельную табл. 34.19.

---

* Соотношение справедливо для кристаллов с симметрией, отличной от триклинной и моноклинной.

Таблица 34.17

Форма тензора генерации второй гармоники для различных кристаллографических классов [6]

Сингония	Класс	Форма тензора	Примечание
Триклинная	$1—C_1$	$\begin{pmatrix} d_{11} & d_{12} & d_{13} & d_{14} & d_{15} & d_{16} \\ d_{21} & d_{22} & d_{23} & d_{24} & d_{25} & d_{26} \\ d_{31} & d_{32} & d_{33} & d_{34} & d_{35} & d_{36} \end{pmatrix}$	—
Моноклинная	$m—C_s$	$\begin{pmatrix} d_{11} & d_{12} & d_{13} & 0 & 0 & d_{16} \\ d_{21} & d_{22} & d_{23} & 0 & 0 & d_{26} \\ 0 & 0 & 0 & d_{34} & d_{35} & 0 \end{pmatrix}$	$m \perp Z$
	$m—C_s$	$\begin{pmatrix} d_{11} & d_{12} & d_{13} & 0 & d_{15} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & d_{24} & 0 & d_{26} \\ d_{31} & d_{32} & d_{33} & 0 & d_{35} & 0 \end{pmatrix}$	$m \perp Y$
	$2—C_2$	$\begin{pmatrix} 0 & 0 & 0 & d_{14} & d_{15} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & d_{24} & d_{25} & 0 \\ d_{31} & d_{32} & d_{33} & 0 & 0 & d_{36} \end{pmatrix}$	$2 \parallel Z$
	$2—C_2$	$\begin{pmatrix} 0 & 0 & 0 & d_{14} & 0 & d_{16} \\ d_{21} & d_{22} & d_{23} & 0 & d_{25} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & d_{34} & 0 & d_{36} \end{pmatrix}$	$2 \parallel Y$
Ромбическая	$mm2—C_{2v}$	$\begin{pmatrix} 0 & 0 & 0 & 0 & d_{15} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & d_{24} & 0 & 0 \\ d_{31} & d_{32} & d_{33} & 0 & 0 & 0 \end{pmatrix}$	—
	$222—D_2$	$\begin{pmatrix} 0 & 0 & 0 & d_{14} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & d_{25} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & d_{36} \end{pmatrix}$	—
Тетрагональная	$4—C_4$	$\begin{pmatrix} 0 & 0 & 0 & d_{14} & d_{15} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & d_{15} & -d_{14} & 0 \\ d_{31} & d_{31} & d_{33} & 0 & 0 & 0 \end{pmatrix}$	—
	$\bar{4}—S_4$	$\begin{pmatrix} 0 & 0 & 0 & d_{14} & d_{15} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & -d_{15} & d_{14} & 0 \\ d_{31} & -d_{31} & 0 & 0 & 0 & d_{36} \end{pmatrix}$	—
	$4mm—C_{4v}$	$\begin{pmatrix} 0 & 0 & 0 & 0 & d_{15} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & d_{15} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & d_{36} \end{pmatrix}$	—
	$\bar{4}2m—D_{2d}$	$\begin{pmatrix} 0 & 0 & 0 & d_{14} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & d_{14} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & d_{36} \end{pmatrix}$	—
	$422—D_4$	$\begin{pmatrix} 0 & 0 & 0 & d_{14} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & -d_{14} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \end{pmatrix}$	—
Тригональная	$3—C_3$	$\begin{pmatrix} d_{11} & -d_{11} & 0 & d_{14} & d_{15} & -d_{22} \\ -d_{22} & d_{22} & 0 & d_{15} & -d_{14} & -d_{11} \\ d_{31} & d_{31} & d_{33} & 0 & 0 & 0 \end{pmatrix}$	—
Тригональная	$3m—C_{3v}$	$\begin{pmatrix} 0 & 0 & 0 & 0 & d_{15} & -d_{22} \\ -d_{22} & d_{22} & 0 & d_{15} & 0 & 0 \\ d_{31} & d_{31} & d_{33} & 0 & 0 & 0 \end{pmatrix}$	$m \perp X$
	$3m—C_{3v}$	$\begin{pmatrix} d_{11} & -d_{11} & 0 & 0 & d_{15} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & d_{15} & 0 & -d_{11} \\ d_{31} & d_{31} & d_{33} & 0 & 0 & 0 \end{pmatrix}$	$m \perp Y$
	$32—D_3$	$\begin{pmatrix} d_{11} & -d_{11} & 0 & d_{14} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & -d_{14} & -d_{11} \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \end{pmatrix}$	—
Гексагональная	$\bar{6}—C_{3h}$	$\begin{pmatrix} d_{11} & -d_{11} & 0 & 0 & 0 & -d_{22} \\ -d_{22} & d_{22} & 0 & 0 & 0 & -d_{11} \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \end{pmatrix}$	—
	$6—C_6$	$\begin{pmatrix} 0 & 0 & 0 & d_{14} & d_{15} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & d_{15} & -d_{14} & 0 \\ d_{31} & d_{31} & d_{33} & 0 & 0 & 0 \end{pmatrix}$	Совпадает с классом $4—C_4$
	$\bar{6}m2—D_{3h}$	$\begin{pmatrix} 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & -d_{22} \\ -d_{22} & d_{22} & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \end{pmatrix}$	$m \perp X$
	$\bar{6}m2—D_{3h}$	$\begin{pmatrix} d_{11} & -d_{11} & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & -d_{11} \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \end{pmatrix}$	$m \perp Y$
	$6mm—C_{6v}$	$\begin{pmatrix} 0 & 0 & 0 & 0 & d_{15} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & d_{15} & 0 & 0 \\ d_{31} & d_{31} & d_{33} & 0 & 0 & 0 \end{pmatrix}$	Совпадает с классом $4mm—C_{4v}$
	$622—D_6$	$\begin{pmatrix} 0 & 0 & 0 & d_{14} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & -d_{14} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \end{pmatrix}$	Совпадает с классом $422—D_4$
Кубическая	$23—T$	$\begin{pmatrix} 0 & 0 & 0 & d_{14} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & d_{14} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & d_{14} \end{pmatrix}$	—
	$\bar{4}3m—T_d$	$\begin{pmatrix} 0 & 0 & 0 & d_{14} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & d_{14} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & d_{14} \end{pmatrix}$	—
	$432—O$	Все члены тензора равны нулю	—

Таблица 34.18

Коэффициенты генерации второй гармоники по сингониям [6]

Сингония Вещество	Класс	$d_{il}^{2\omega}$, 10^{-12} м/в	$\delta_{il}^{2\omega}$, 10^{-2} м²/к	λ_1, мкм	n^{ω}	$n^{2\omega}(\theta$, град)
Моноклинная						
Лития сульфата моногидрат $Li_2SO_4 \cdot H_2O$	$2—C_2$	d_{16} = (?)	—	1,0642	1,4636	1,4624
		d_{21} = (?)	—	1,0642	1,4521	1,4868
		$d_{22} = 0{,}46 \pm 0{,}07$	—	1,0642	1,4657	1,4868
		$d_{23} = 0{,}33 \pm 0{,}05$	—	1,0642	1,4752	1,4868
		$d_{34} = 0{,}29 \pm 0{,}04$	—	1,152	1,4704	1,4769 (25)
Калия битартрата гидрат $K_2C_4H_4O_6 \cdot {}^1/_2H_2O$	$2—C_2$	$d_{21} = 0{,}13$	0,68	0,6943	1,4893	1,5693
		$d_{22} = 4{,}26$	19,2	0,6942	1,5194	1,5693
		$d_{23} = 0$	0	0,6942	1,5294	1,5693
		$d_{25} = 0{,}19$	0,93	1,152	1,5043	1,5693(20;40)
Триглицинсульфат (TGS) $(NH_2CH_2COOH)_3 \cdot H_2SO_4$	$2—C_2$	$d_{23} = 0{,}33$	1,09	0,6943	1,567	1,618
Ромбическая						
Аммония биоксалата моногидрат $(NH_4)_2C_2O_4 \cdot H_2O$	$222—D_2$	$d_{14} = 0{,}43$	$\delta_{14} = 2{,}2$	1,06	1,4802	1,5996
		$\frac{1}{2}(d_{25}+d_{36}) = (0{,}78 \pm \pm 0{,}07)$	—	1,06	—	—
Гадолиния молибдат $Gd_2(MoO_4)_3$	$mm2—C_{2v}$	$d_{15} = 2{,}98 \pm 0{,}45$	$\delta_{15} = 2{,}44 \pm 0{,}37$	1,0642	1,8386	1,8549
		$d_{24} = 2{,}93 \pm 0{,}44$	$\delta_{24} = 2{,}4 \pm 0{,}36$	1,0642	1,8384	1,8545
		$d_{31} = 2{,}83 \pm 0{,}42$	$\delta_{31} = 2{,}30 \pm 0{,}34$	1,0642	1,8146	1,9102
		$d_{32} = 2{,}75 \pm 0{,}41$	$\delta_{32} = 2{,}24 \pm 0{,}34$	1,0642	1,8142	1,9102
		$d_{33} = 0{,}05 \pm 0{,}009$	$\delta_{33} = 0{,}04 \pm 0{,}007$	1,0642	1,8637	1,9102
Гиппуровая кислота $C_6H_5CO \cdot NH(CH_2CO_2H)$	$222—D_2$	$d_{36} = 2{,}85$	$\delta_{14} = 7{,}16$	0,6943	1,644	1,61
α-Иодноватая кислота α-HIO_3	$222—D_2$	$d_{14} = 7{,}28 \pm 1{,}8$	$\delta_{14} = 4{,}43 \pm 1{,}09$	1,064	1,9391	1,8547 (24; 41,5)
		$d_{14} = 4{,}83 \pm 0{,}9$	$\delta_{14} = 3{,}02 \pm 0{,}56$	1,1526	1,935	1,845
Калия дигидрофосфат (KDP) KH_2PO_4 при $T < -150°C$	$mm2—C_{2v}$	$d_{15} = 0{,}57 \pm 0{,}05$	$\delta_{15} = 3{,}3 \pm 0{,}3$	0,6943	1,4906	1,540
		$d_{24} = 0{,}38 \pm 0{,}05$	$\delta_{24} = 2{,}2 \pm 0{,}3$	0,6943	1,4906	1,540
		$d_{31} = 0{,}58 \pm 0{,}05$	$\delta_{31} = 3{,}4 \pm 0{,}3$	0,6943	1,5117	1,4917
		$d_{32} = 0{,}39 \pm 0{,}05$	$\delta_{32} = 2{,}3 \pm 0{,}3$	0,6943	1,5117	1,4917
		$d_{33} = 0$	$\delta_{33} = 0$		1,4694	1,4917
Литий метагадолиниевокислый $LiGdO_2$	$mm2—C_{2v}$	$d_{15} = d_{31} = 0{,}08 \pm 0{,}009$	$0{,}1 \pm 0{,}01$	1,0642	1,7433	1,7705
		$d_{24} = d_{32} = 0{,}175 \pm 0{,}019$	$0{,}25 \pm 0{,}027$	1,0642	1,7131	1,7705
		$d_{33} = 0{,}686 \pm 0{,}07$	$\delta_{33} = 0{,}88 \pm 0{,}09$	1,0642	1,7399	1,7705
Лития формиата моногидрат $LiCHO_2 \cdot H_2O$	$mm2—C_{2v}$	$d_{15} = d_{31} = (0{,}11 \pm 0{,}02)$	$\delta_{11} = 1{,}33 \pm 0{,}24$	1,0642	1,3593	1,5229 (81—95)
		$d_{24} = d_{32} = 1{,}27 \pm 0{,}09$	$\delta_{32} = 8{,}19 \pm 0{,}6$	1,0642	1,4673	1,5229 (55,1)
		$d_{33} = 1{,}86 \pm 0{,}11$	$\delta_{33} = 10{,}03 \pm 0{,}6$	1,0642	1,5035	1,5229
Натрия-бария ниобат $Ba_2NaNb_5O_{15}$	$mm2—C_{2v}$	$d_{15} = 14{,}56 \pm 0{,}73$	$\delta_{15} = 2{,}35 \pm 0{,}11$	1,0642	2,2133	2,3655
		$d_{24} = 13{,}83 \pm 0{,}73$	$\delta_{24} = 2{,}23 \pm 0{,}11$	1,0642	2,2140	2,3672
		$d_{31} = 14{,}56 \pm 0{,}73$	$\delta_{31} = 2{,}42 \pm 0{,}12$	1,0642	2,2567	2,2502 (73—75)
		$d_{32} = 14{,}56 \pm 1{,}46$	$\delta_{32} = 2{,}41 \pm 0{,}16$	1,0642	2,2580	2,2502 (75—77)
		$d_{33} = 20 \pm 1{,}46$	$\delta_{33} = 4{,}06 \pm 0{,}30$	1,0642	2,1700	2,2502
Натрия нитрит $NaNO_2$	$mm2—C_{2v}$	$d_{31} = d_{15} = 0{,}2$	0,88	1,153	1,629	1,4124
		$d_{32} = d_{24} = 0{,}87$	15,73	1,153	1,3391	1,4124
Поливинилденфторид $(CH_2CF_2)_n$	$mm2—C_{2v}$	$d_{31} = 0{,}18$	$\delta_{31} = 1{,}9$	1,064	—	$\geq 1{,}43$
		$d_{32} \simeq 0$	$\delta_{32} = 0$	1,064	—	—
		$d_{33} = 0{,}36$	$\delta_{33} \geq 3{,}8$	1,064	—	—
Свинца ниобат $PbNb_4O_{11}$	$mm2—C_{2v}$	$d_{15} = 6{,}7 \pm 1{,}0$	$\delta_{15} = 0{,}84 \pm 0{,}12$	1,0642	2,3115	2,4113
		$d_{24} = 6{,}17 \pm 0{,}93$	$\delta_{24} = 0{,}76 \pm 0{,}11$	1,0642	2,3131	2,4137
		$d_{31} = 7{,}4 \pm 1{,}1$	$\delta_{31} = 0{,}93 \pm 0{,}14$	1,0642	2,2979	2,4396
		$d_{32} = 6{,}68 \pm 1{,}00$	$\delta_{32} = 0{,}83 \pm 0{,}12$	1,0642	2,3010	2,4396
		$d_{33} = 10{,}1 \pm 1{,}5$	$\delta_{33} = 1{,}19 \pm 0{,}18$	1,0642	2,3254	2,4396
d-Треонин	$222—D_2$	$d_{14} = 0{,}45 \pm 0{,}07$	$\delta_{14} = 1{,}72 \pm 0{,}27$	1,0642	1,5821	1,5243
		$d_{25} = 0{,}49 \pm 0{,}07$	$\delta_{25} = 1{,}86 \pm 0{,}27$	1,0642	1,5471	1,5965
		$d_{36} = 0{,}46 \pm 0{,}07$	$\delta_{36} = 1{,}74 \pm 0{,}27$	1,0642	1,5440	1,6043

Сингония Вещество	Класс	$d_{il}^{2\omega}$, 10^{-12} м/в	$\delta_{il}^{2\omega}$, 10^{-2} м²/к	λ_1, мкм	n^{ω}	$n^{2\omega}(\theta$, град)
Тербия молибдат $Tb_2(MoO_4)_3$	$mm2—C_{2v}$	$d_{15}=2{,}87\pm0{,}43$ $d_{24}=2{,}9\pm0{,}4$ $d_{31}=2{,}6\pm0{,}4$ $d_{32}=2{,}52\pm0{,}38$ $d_{33}=0{,}12\pm0{,}03$	$\delta_{15}=2{,}26\pm0{,}34$ $\delta_{24}=2{,}33\pm0{,}32$ $\delta_{31}=2{,}08\pm0{,}32$ $\delta_{32}=1{,}98\pm0{,}30$ $\delta_{33}=0{,}08\pm0{,}02$	1,0642 1,0642 1,0642 1,0642 1,0642	1,8459 1,8458 1,8226 1,8222 1,8704	1,8649 1,8645 1,9185 1,9185 1,9185
Тригональная						
Алюминия фосфат $AlPO_4$	$32—D_3$	$d_{11}=(0{,}41\pm0{,}03)$ $d_{14}\simeq0{,}009$	$\delta_{11}=2{,}07\pm0{,}15$ $\delta_{14}=0{,}046$	1,0582 1,0582	1,5156 1,5198	1,5275 1,5275
Бензил $C_6H_5COCOC_6H_5$	$32—D_3$	$d_{11}=(4{,}08\pm0{,}55)$	$\delta_{11}=9{,}36\pm1{,}26$	1,0642	1,6313	1,669
Калия дитионат $K_2S_2O_4$	$32—D_3$	$d_{11}=0{,}087\pm0{,}015$	$\delta_{11}=0{,}69\pm0{,}12$	0,6943	1,4518	1,4728
α-Кварц α-SiO_2	$32—D_3$	$d_{11}=(0{,}4\pm0{,}02)$ $d_{14}=0{,}009$	$\delta_{11}=1{,}86\pm0{,}09$ $\delta_{14}=0{,}04$	1,0582 1,0582	1,532 1,536	1,542 1,542
Литня ниобат $LiNbO_3$	$3m—C_{3v}$	$d_{11}=0{,}364\pm0{,}04$ $d_{22}=(3{,}07\pm0{,}28)$ $d_{31}=(5{,}82\pm0{,}85)$ $d_{33}=(40{,}68\pm10{,}4)$	$\delta_{11}=1{,}6\pm0{,}2$ $\delta_{22}=0{,}497\pm0{,}045$ $\delta_{31}=1{,}04\pm0{,}15$ $\delta_{33}=8{,}7\pm2{,}2$	1,0642 1,0582 1,0582 1,0582	1,5341 2,2322 2,2322 2,1544	1,5468 2,3241 2,2325 2,2325
Литня танталат $LiTaO_3$	$3m—C_{3v}$	$d_{31}=(5{,}01\pm0{,}47)$ $d_{22}=(2{,}41\pm0{,}95)$ $d_{15}=(6{,}28\pm0{,}63)$ $d_{33}=(30{,}27\pm7{,}57)$ $d_{22}=(2{,}08\pm0{,}24)$ $d_{31}=(1{,}28\pm0{,}24)$ $d_{33}=(19{,}39\pm2{,}36)$	$\delta_{31}=0{,}92\pm0{,}09$ $\delta_{22}=0{,}4\pm0{,}16$ $\delta_{15}=1{,}18\pm0{,}12$ $\delta_{33}=6{,}7\pm1{,}7$ $\delta_{22}=0{,}48\pm0{,}06$ $\delta_{31}=0{,}29\pm0{,}06$ $\delta_{33}=4{,}4\pm0{,}53$	1,152 1,152 0,6328 1,152 1,0582 1,0582 1,0582	2,2-78 2,2278 2,1854 2,1506 2,1366 2,1366 2,1406	2,2153 2,3037 2,2854 2,2153 2,2043 2,2089 2,2089
Пираргирит Ag_3SbS_3	$3m—C_{3v}$	$d_{31}=(12{,}6\pm4)$ $d_{22}=(13{,}4\pm4)$	$\delta_{31}=0{,}58\pm0{,}18$ $\delta_{22}=0{,}55\pm0{,}16$	10,6 10,6	2,7352 2,7352	2,6221 (29±1) 2,758
Пруститт Ag_3AsS_3	$3m—C_{3v}$	$d_{31}=(15{,}08\pm2{,}2)$ $d_{15}+d_{22}=(28{,}38\pm1{,}8)$	$\delta_{31}=0{,}64\pm0{,}09$	1,152 10,6	2 8042 ~2,697	2,5731(90) ~ 2,728 (22,5 ±5)
Ртутн сульфид α-HgS	$32—D_3$	$d_{11}=50{,}3\pm17$	$\delta_{11}=2{,}93\pm1$	10,6	2,596	2,624
Селен Se	$32—D_3$	$d_{11}=79{,}6\pm42$	$\delta_{11}=4{,}2\pm2{,}2$	10,6	2,64	2,645 (10)
Теллур Te	$32—D_3$	$d_{11}=(5319{,}8\pm837{,}7)$	$\delta_{11}=1{,}07\pm0{,}17$	10,5915	6,243	6,305 (14,16)
Турмалин	$3m—C_{3v}$	$d_{15}=0{,}27\pm0{,}04$ $d_{22}=0{,}08\pm0{,}01$ $d_{31}=0{,}16\pm0{,}03$ $d_{33}=0{,}57\pm0{,}07$	$\delta_{15}=0{,}70\pm0{,}1$ $\delta_{22}=0{,}22\pm0{,}03$ $\delta_{31}=0{,}42\pm0{,}08$ $\delta_{33}=1{,}58\pm0{,}19$	— — — —	1,618 1,6274 1,6274 1,6088	1,6433 1,6433 1,6231 1,6231
Тетрагональная						
Аммония дигидрофосфат (ADP) $NH_4H_2PO_4$	$42m—D_{2d}$	$d_{14}=0{,}553\pm0{,}024$ $d_{36}=0{,}558\pm0{,}028$ $d_{14}=0{,}482\pm0{,}024$ $d_{36}=0{,}487\pm0{,}028$	$\delta_{14}=3{,}19\pm0{,}14$ $\delta_{36}=3{,}27\pm0{,}16$ $\delta_{14}=2{,}52\pm0{,}12$ $\delta_{36}=2{,}57\pm0{,}15$	1,0582 1,0582 0,6943 0,6943	1,4874 1,5067 1,4973 1,5193	1,5277 1,4816 (41,9±1) 1,5498 1,5004 (51,9±1)
Аммония дидейтерофосфат (ADDP) $ND_4D_2PO_4$	$\bar{4}2m—D_{2d}$	$d_{36}=0{,}544\pm0{,}14$ $d_{36}=0{,}57\pm0{,}068$ $d_{36}=0{,}66\pm0{,}14$ $d_{36}=0{,}52\pm0{,}08$	$\delta_{36}=3{,}25\pm0{,}84$ $\delta_{36}=2{,}93\pm0{,}35$ $\delta_{36}=3{,}65\pm0{,}77$ $\delta_{36}=2{,}88\pm0{,}44$	1,15 0,6328 0,8250 0,6943	1,50364 1,5217 1,5145 1,5138	1,4794 1,5075 1,4907(42) 1,4926(47)
Барни титанат $BaTiO_3$	$4mm—C_{4v}$	$d_{15}=17{,}2\pm1{,}42$ $d_{31}=17{,}97\pm1{,}42$ $d_{33}=6{,}6\pm0{,}5$ $d_{15}=19{,}33\pm2{,}0$ $d_{31}=17{,}85\pm2{,}0$ $d_{33}=7{,}79\pm1{,}17$	$\delta_{15}=1{,}98\pm0{,}16$ $\delta_{31}=2{,}11\pm0{,}17$ $\delta_{33}=0{,}85\pm0{,}06$ $\delta_{15}=2{,}23\pm0{,}23$ $\delta_{31}=2{,}10\pm0{,}23$ $\delta_{33}=1{,}0\pm0{,}15$	1,058 1,058 1,058 1,0642 1,0642 1,0642	— — — 2,3175 2,3379 2,2970	— — — 2,4760 2,4128 2,4128
Барня-стронция ниобат $Sr_{0,5}Ba_{0,5}Nb_2O_6$		$d_{31}=4{,}9+1{,}5$ $d_{33}=12{,}85\pm3{,}8$ $d_{15}=6{,}8\pm2{,}3$	$0{,}78\pm0{,}24$ $2{,}20\pm0{,}65$ $\delta_{15}=1{,}07\pm0{,}36$	1,0642 1,0642 1,0642	2,2506 2,2138 2,2322	2,3092 2,3092 2,3583
Бериллия сульфата тетрагидрат $BeSO_4\cdot4H_2O$	$\bar{4}2m—D_{2d}$	$d_{36}=0{,}16$	$\delta_{36}=(?)$	0,6328	—	(60±1)
Кадмия-ртутн тиоцианат $Cd[Hg(SCN)_4]$	$\bar{4}—S_4$	$d_{31}=6{,}0\pm2{,}4$ $d_{31}=7{,}57\pm1{,}4$ $d_{36}=1{,}76\pm0{,}53$	$\delta_{31}=4{,}21\pm1{,}69$ $\delta_{31}=5{,}3\pm0{,}98$ $\delta_{36}=1.23\pm0.37$	1,06 1,064 1,064	1,924 1,924 1,924	1,792 1,792 1,792

Сингония Вещество	Класс	$d_{il}^{2\omega}$, 10^{-12} м/в	$\delta_{il}^{2\omega}$, 10^{-2} м²/к	λ_1, мкм	n^{ω}	$n^{2\omega}(\theta$, град)
Калия дидейтерофосфат (KDDP) KD_2PO_4	$\bar{4}2m$ — D_{2d}	$d_{14} = 0{,}5 \pm 0{,}02$	$\delta_{14} = 3{,}23 \pm 0{,}13$	1,0582	1,4789	1,5085
		$d_{36} = 0{,}5 \pm 0{,}02$	$\delta_{36} = 3{,}24 \pm 0{,}13$	1,0582	1,4978	1,4689
		$d_{14} = 0{,}46 \pm 0{,}04$	$\delta_{14} = 2{,}71 \pm 0{,}23$	0,6943	1,4830	1,5285
		$d_{36} = 0{,}5 \pm 0{,}02$	$\delta_{36} = 3{,}04 \pm 0{,}12$	0,6943	1,5022	1,4855 (52)
Калия дигидроарсенат (KDA) KH_2AsO_4	$\bar{4}2m$ — D_{2d}	$d_{14} = 0{,}55 \pm 0{,}02$	$\delta_{14} = 2{,}35 \pm 0{,}08$	1,0582	1,531	1,572
		$d_{36} = 0{,}52 \pm 0{,}03$	$\delta_{36} = 2{,}24 \pm 0{,}13$	1,0582	1,554	1,521
		$d_{14} = 0{,}41 \pm 0{,}05$	$\delta_{14} = 1{,}58 \pm 0{,}19$	0,6943	1,538	1,606
		$d_{36} = 0{,}47 \pm 0{,}05$	$\delta_{36} = 1{,}83 \pm 0{,}19$	0,6943	1,562	1,549
Калия дигидрофосфат (KDP) KH_2PO_4	$\bar{4}2m$ — D_{2d}	$d_{14} = 0{,}49 \pm 0{,}02$	$\delta_{14} = 3{,}10 \pm 0{,}13$	1,0582	1,4751	1,5123
		$d_{36} = 0{,}47$	$\delta_{36} = 3{,}02 \pm 0{,}2$	1,0582	1,4939	1,4706(40,3)
		$d_{14} = 0{,}47 \pm 0{,}03$	$\delta_{14} = 2{,}71 \pm 0{,}17$	0,6943	1,4856	1,5335
		$d_{36} = 0{,}47$	$\delta_{36} = 2{,}73$	0,6943	1,5058	1,4874(50,4)
		$d_{36} = 0{,}46 \pm 0{,}07$	$\delta_{36} = 3{,}01 \pm 0{,}46$	1,15	1,4913	1,4687
		$d_{36} = 0{,}47 \pm 0{,}03$	$\delta_{36} = 3{,}01 \pm 0{,}2$	1,0642	1,4942	1,4708
Калия-лития ниобат $K_3Li_2Nb_5O_{15}$	$4mm$ — C_{4v}	$d_{15} = 6{,}2 \pm 1{,}1$	$\delta_{15} = 1{,}19 \pm 0{,}2$	1,0642	1,585	2,3297
		$d_{31} = 7{,}0 \pm 1{,}5$	$\delta_{31} = 1{,}38 \pm 0{,}3$	1,0642	2,2057	2,1980
		$d_{33} = 12{,}7 \pm 1{,}8$	$\delta_{33} = 3{,}14 \pm 0{,}44$	1,0642	2,1113	2,1980
Калия-натрия-бария ниобат $K_{0,8}Na_{0,2}Ba_2Nb_5O_{15}$	$4mm$ — C_{4v}	$d_{31} = 12{,}77$	$\delta_{31} = 2{,}22$	1,0642	2,2601	2,2007
Рубидия дигидроарсенат (RDA) RbH_2AsO_4	$\bar{4}2m$—D_{2d}	$d_{36} = 0{,}3 \pm 0{,}04$	$\delta_{36} = 1{,}27 \pm 0{,}17$	0,6943	~1.555	~1,542
Рубидия дигидрофосфат (RDP) RbH_2PO_4	$\bar{4}2m$ — D_{2d}	$d_{36} = 0{,}49$	$\delta_{36} = 2{,}83$	0,6943	1,502	1,4969(66)
		$d_{14} = 0{,}56 \pm 0{,}08$	$\delta_{14} = 3{,}47 \pm 0{,}49$	1,0642	1,4813	1,5106
		$d_{36} = 0{,}43 \pm 0{,}05$	$\delta_{36} = 2{,}74 \pm 0{,}32$	1,0642	1,4926	1,4811
Свинца титанат $PbTiO_3$	$4mm$ — C_{4v}	$d_{15} = 37{,}9 \pm 5{,}7$	$\delta_{15} = 2{,}09 \pm 0{,}3$	1,0642	2,5704	2,7398
		$d_{31} = 42{,}8 \pm 6{,}4$	$\delta_{31} = 2{,}39 \pm 0{,}36$	1,0642	2,5712	2,7260
		$d_{33} = 8{,}5 \pm 1{,}4$	$\delta_{33} = 0{,}48 \pm 0{,}08$	1,0642	2,5692	2,7260
Серебра тиогаллат $AgGaS_2$	$\bar{4}2m$ — D_{2d}	$d_{14} = 56{,}5 \pm 19$	$\delta_{14} = 7{,}17 \pm 2{,}4$	10,6	2,316	2,383
Цезия дигидроарсенат CsH_2AsO_4	$\bar{4}2m$ — D_{2d}	$d_{36} = 0{,}25 \pm 0{,}04$	$\delta_{36} = 0{,}93 \pm 0{,}15$	0,6943	1,563	1,572
				1,06	—	— (90)
Цинка-германия фосфид $ZnGeP_2$	$\bar{4}2m$ — D_{2d}	$d_{14} = (111 \pm 33)$	$\delta_{14} = 1{,}96 \pm 0{,}58$	10,6	3,094	3,114
Гексагональная						
Бериллия окись BeO	$6mm$ — C_{6v}	$d_{31} = 0{,}17 \pm 0{,}01$	$\delta_{31} = 0{,}26 \pm 0{,}015$	1,0642	1,7055	1,7376
		$d_{33} = 0{,}23 \pm 0{,}01$	$\delta_{33} = 0{,}34 \pm 0{,}015$	1,0642	1,7204	1,7376
Кадмия селенид CdSe	$6mm$ — C_{6v}	$d_{33} = 79{,}6 \pm 4{,}9$	$\delta_{33} = 3{,}54 \pm 0{,}22$	1,058	2,560	3,036
		$d_{15} = 31 \pm 7{,}5$	$\delta_{15} = 2{,}8 \pm 0{,}67$	10,6	2,453	2,447
		$d_{31} = 28{,}5 \pm 6{,}3$	$\delta_{31} = 2{,}56 \pm 0{,}57$	10,6	2,445	2,465
		$d_{33} = 54{,}5 \pm 12{,}6$	$\delta_{33} = 4{,}73 \pm 1{,}09$	10,6	2,462	2,465
Кадмия сульфид CdS	$6mm$ — C_{6v}	$d_{15} = 17{,}0 \pm 1{,}4$	$\delta_{15} = 1{,}62 \pm 0{,}13$	1,0582	2,336	2,649
		$d_{31} = 15{,}6 \pm 0{,}9$	$\delta_{31} = 1{,}5 \pm 0{,}09$	1,0582	2,327	2,654
		$d_{33} = 30{,}7 \pm 1{,}9$	$\delta_{33} = 2{,}83 \pm 0{,}17$	1,0582	2,345	2,654
		$d_{15} = 28{,}9 \pm 7{,}1$	$\delta_{15} = 4{,}88 \pm 1{,}2$	10,6	2,252	2,244
		$d_{31} = 26{,}4 \pm 6{,}3$	$\delta_{31} = 4{,}45 \pm 1{,}06$	10,6	2,242	2,265
		$d_{33} = 44{,}0 \pm 12{,}6$	$\delta_{33} = 7{,}1 \pm 2{,}0$	10,6	2,263	2,265
Кремния карбид SiC	$6mm$ — C_{6v}	$d_{15} = 9{,}1 \pm 1{,}1$	$\delta_{15} = 0{,}50 \pm 0{,}06$	1,0642	2,6027	2,6689
		$d_{31} = 9{,}83 \pm 1{,}1$	$\delta_{31} = 0{,}54 \pm 0{,}06$	1,0642	2,5830	2,7167
		$d_{33} = 16{,}4 \pm 1{,}8$	$\delta_{33} = 0{,}84 \pm 0{,}09$	1,0642	2,6225	2,7167
Лития иодат $LiIO_3$	6—C_6	$d_{31} = 5{,}2 \pm 0{,}7$	$\delta_{31} = 4{,}8 \pm 0{,}65$	1,0845	1,856	1,746 (28,9)
		$d_{31} = 5{,}6 \pm 0{,}3$	$\delta_{31} = 5{,}05 \pm 0{,}3$	1,0642	1,86	1,750 (30,2)
		$d_{33} = 5{,}86 \pm 0{,}36$	$\delta_{33} = 8{,}37 \pm 0{,}51$	1,0642	1,719	1,750
		$d_{31} = 7{,}5 \pm 1{,}1$	$\delta_{31} = 6{,}79 \pm 1{,}0$	0,5145	1,7876	1,9018
Лития-калия сульфат $LiKSO_4$	6—C_6	$d_{31} = 0{,}38$	$\delta_{31} = (?)$	0,6943	—	—
		$d_{33} = 0{,}71$	$\delta_{33} = (?)$	0,6943	—	—
Цинка окись ZnO	$6mm$ — C_{6v}	$d_{15} = 2{,}32 \pm 0{,}2$	$\delta_{15} = 1{,}08 \pm 0{,}09$	1,0582	1,947	2,031
		$d_{31} = 2{,}1 \pm 0{,}2$	$\delta_{31} = 0{,}98 \pm 0{,}09$	1,0582	1,939	2,048
		$d_{33} = 7{,}0 \pm 0{,}2$	$\delta_{33} = 3{,}16 \pm 0{,}09$	1,0582	1,955	2,048
Цинка сульфид ZnS	$6mm$ — C_{6v}	$d_{33} = 13{,}5 \pm 0{,}8$	$\delta_{33} = 1{,}74 \pm 0{,}1$	1,058	2,299	2,403
		$d_{15} = 21{,}4 \pm 8{,}4$	$\delta_{15} = 3{,}42 \pm 1{,}34$	10,6	2,266	2,265
		$d_{31} = 18{,}85 \pm 6{,}3$	$\delta_{31} = 3{,}01 \pm 1{,}0$	10,6	2,264	2,270
		$d_{33} = 37{,}3 \pm 12{,}6$	$\delta_{33} = 5{,}89 \pm 1{,}99$	10,6	2,269	2,270

Сингония Вещество	Класс	$d_{il}^{2\omega}$, 10^{-12} м/в	$\delta_{il}^{2\omega}$, 10^{-2} м²/к	λ_1, мкм	n^{ω}	$n^{2\omega}$ (θ, град)
Кубическая						
Алюминия антимонид AlSb	$\bar{4}3m - T_d$	$d_{14} = 49 \pm 36$	$\delta_{14} = 0{,}4 \pm 0{,}29$	1,058	3,3	3,87
Висмута германат Bi_4GeO_{12}	$\bar{4}3m - T_d$	$d_{14} = 1{.}46$	$\delta_{14} = 0{,}47$	1,0642	2,0443	2,1152
Галлия антимонид GaSb	$\bar{4}3m - T_d$	$d_{14} = 628 \pm 63$	$\delta_{14} = 2{,}84 \pm 0{,}28$	10,6	3,8	3,82
Галлия арсенид GaAs	$\bar{4}3m - T_d$	$d_{14} = 274 \pm 66$	$\delta_{14} = 1{,}4 \pm 0{,}34$	1,0582	3,479	4,352
		$d_{36} = 249 \pm 15$	$\delta_{36} = 1{,}27 \pm 0{,}08$	1,058	3,479	4,352
		$d_{14} = 188{,}5 \pm 19$	$\delta_{14} = 2{,}26 \pm 0{,}23$	10,6	3,27	3,30
		$d_{14} = 140 \pm 10$	$\delta_{14} = 0{,}72 \pm 0{,}05$	1,06	3,478	4,346
		$d_{14} = 137$	$\delta_{14} = 0{,}31$	0,8435÷ ÷0,8450	3,60	5,90
Галлия фосфид GaP	$\bar{4}3m - T_d$	$d_{14} = 85{,}6 \pm 14{,}2$	$\delta_{14} = 1{,}14 \pm 0{,}19$	1,058	3,10	3,49
		$d_{36} = 41{,}2 \pm 2{,}5$	$\delta_{36} = 0{,}55 \pm 0{,}03$	1,058	3,10	3,49
		$d_{14} = 35{,}0$	$\delta_{14} = 0{,}73$	3,39	3,018	3,04
		$d_{14} = 109$	$\delta_{14} = 1{,}9$	10,6	3,00	3,01
Индия антимонид InSb	$\bar{4}3m - T_d$	$d_{14} = 520 \pm 47$	$\delta_{14} = 1{,}8$	1,058	—	—
Индия арсенид InAs	$\bar{4}3m - T_d$	$d_{14} = 364 \pm 47$	$\delta_{14} = (?)$	1,058	—	—
		$d_{14} = 418{,}9 \pm 12{,}6$	$\delta_{14} = 3{,}27 \pm 0{,}1$	10,6	3,49	3,54
Индия фосфид InP	$\bar{4}3m - T_d$	$d_{14} = 167{,}0$	$\delta_{14} = 0{,}94$	1,058	3,44	4,24
Кадмия теллурид CdTe	$\bar{4}3m - T_d$	$d_{14} = 16{,}7 \pm 6{,}3$	$\delta_{14} = 0{,}76 \pm 0{,}29$	10,6	2,69	2,71
Меди бромид CuBr	$\bar{4}3m - T_d$	$d_{14} = 7{,}96 \pm 2{,}7$	$\delta_{14} = 3{,}73 \pm 1{,}27$	10,6	1,970	1,972
		$d_{14} = 15{,}3 \pm 6{,}9$	$\delta_{14} = 5{,}07 \pm 2{,}28$	1,064	2,011	2,164
Меди хлорид CuCl	$\bar{4}3m - T_d$	$d_{14} = 4{,}19$	$\delta_{14} = 2{,}74$	10,6	1,893	1,895
		$d_{14} = 9{,}1 \pm 4{,}1$	$\delta_{14} = 4{,}64 \pm 2{,}09$	1,064	1,923	2,012
Меди иодид CuI	$\bar{4}3m - T_d$	$d_{14} = 7{,}96 \pm 2{,}6$	$\delta_{14} = 1{,}72 \pm 0{,}56$	10,6	2,176	2,178
		$d_{14} = 30{,}2 \pm 13{,}6$	$\delta_{14} = 4{,}65 \pm 2{,}09$	1,064	2,223	2,392
Натрия бромат $NaBrO_3$	$23 - T$	$d_{14} = 0{,}28$	$\delta_{14} = 0{,}71$	0,6943	1,611	1,661
Натрия хлорат $NaClO_3$	$23 - T$	$d_{14} = 0{,}69$	$\delta_{14} = 3{,}43$	0,6943	1,512	1,540
Уротропин $N_4(CH_2)_6$	$\bar{4}3m - T_d$	$d_{14} = 4{,}73$	$\delta_{14} = 15{,}7$	1,06	1,577	1,593
Цинка селенид ZnSe	$\bar{4}3m - T_d$	$d_{36} = 31{,}7 \pm 1{,}95$	$\delta_{36} = 2{,}21 \pm 0{,}14$	1,058	2,48	2,66
		$d_{14} = 78{,}3 \pm 29{,}3$	$\delta_{14} = 7{,}6 \pm 3$	10,6	2,42	2,43
Цинка сульфид β-ZnS	$\bar{4}3m - T_d$	$d_{36} = 24{,}6 \pm 1{,}5$	$\delta_{36} = 3{,}2 \pm 0{,}19$	1,058	2,289	2,40
		$d_{14} = 30{,}6 \pm 8{,}4$	$\delta_{14} = 5{,}08 \pm 1{,}39$	10,6	2,25	2,26
Цинка теллурид ZnTe	$\bar{4}3m - T_d$	$d_{36} = 106{,}7 \pm 6{,}6$	$\delta_{36} = 2{,}96 \pm 0{,}18$	1,058	2,772	3,182
		$d_{14} = 94{,}6 \pm 9{,}5$	$\delta_{14} = 2{,}62 \pm 0{,}26$	1,058	2,772	3,182
		$d_{14} = 92{,}1 \pm 33{,}5$	$\delta_{14} = 4{,}19 \pm 1{,}5$	10,6	2,69	2,70

Таблица 34.19

Знаки коэффициентов генерации второй гармоники [6]

Вещество	d_{11}	d_{14}	d_{22}	d_{31}	d_{32}	d_{33}	Вещество	d_{11}	d_{14}	d_{22}	d_{31}	d_{32}	d_{33}
Бария-натрия ниобат				—	—	—	Лития формиата моногидрат					—	+
Бария титанат				—		—	Лития галлат						
Бериллия окись				—		—	Лития иодат				—	+	—
Гадолиния молибдат				—	+	—	Лития ниобат				—		—
Галлия антимонид		+					Лития танталат			+	—		—
Галлия арсенид		+					Меди хлорид			+	—		—
Галлия фосфид		+					Натрия нитрит		+				
Индия арсенид		+					Свинца ниобат				∓	±	
Кадмия селенид				±		∓	Свинца титанат				±	±	±
Кадмия сульфид				—		+	Тербия молибдат				∓		±
Кадмия теллурид		—					Цинка окись				—	+	—
Калия дигидрофосфат		+					Цинка селенид				+		—
Кварц	+						Цинка сульфид		+				
Кремния карбид				∓		±	Цинка теллурид		+		—		+
									+				

Показатели преломления нелинейных кристаллов

В табл. 34.20 представлены данные по показателям преломления нелинейных кристаллов [6]. Для двуосных кристаллов принято, что главные показатели преломления соотносятся как

$$n_\gamma > n_\beta > n_\alpha .$$

Буквами *a*, *b*, *c* обозначены кристаллографические, а *X*, *Y*, *Z* — пьезоэлектрические оси кристаллов. В ряде случаев даны дисперсионные соотношения и изменения показателей преломления с температурой. В этих формулах λ, ν и T представляются соответственно в *мкм*, $см^{-1}$ и °К.

Таблица 34.20

Показатели преломления нелинейных кристаллов [6]

Алюминия фосфат $AlPO_4$

λ, *мкм*	n_o	n_e	λ, *мкм*	n_o	n_e
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 дигидрофосфат ADP $NH_4H_2PO_4$

λ, *мкм*	n_o	n_e
0,2138560	1,62598	1,56738
0,2288018	1,60785	1,55138
0,2536519	1,58688	1,53289
0,2967278	1,56462	1,51339
0,3021499	1,56270	1,51163
0,3125663	1,55917	1,50853
0,3131545	1,55897	1,50832
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

$$n_o^2 = 2{,}302484 + 1{,}117089\cdot 10^{-10}\nu^2/(1 - \nu^2/7{,}605372 \times \times 10^9) + 3{,}751806\cdot 10^6/(2{,}5\cdot 10^5 - \nu^2)$$

$$n_e^2 = 2{,}163077 + 9{,}670312\cdot 10^{-11}\,\nu^2/(1 - \nu^2/7{,}785289 \times \times 10^9) + 1{,}451540\cdot 10^6/(2{,}5\cdot 10^5 - \nu^2)$$

$$\Delta n_o = (n_o^2 - 3{,}0297 n_0 + 2{,}3004)\cdot 0{,}713\cdot 10^{-2}\,(298 - T)$$

$$\Delta n_e = n_e^2\,(0{,}675\cdot 10^{-6})\cdot (298 - T)$$

Аммония дидейтерофосфат ADDP $ND_4D_2PO_4$

λ, *мкм*	n_o	n_e	λ, *мкм*	n_o	n_e
0,350	1,5414	1,4923	0,690	1,5142	1,4737
0,530	1,5198	1,4784	1,060	1,5088	1,4712

Аммония биоксалата моногидрат $(NH_4)_2C_2O_4\cdot H_2O$

λ, *мкм*	$n_{\alpha=Z}$	$n_{\beta=Y}$	$n_{\gamma=X}$
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 $BaTiO_3$

λ, *мкм*	n_0	n_e	λ, *мкм*	n_0	n_e
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

$$n_o^2 - 1 = 4{,}239\lambda^2/[\lambda^2 - (0{,}2229)^2]$$

$$n_o^2 - 1 = 4{,}0854\lambda^2/[\lambda^2 - (0{,}2087)^2]$$

Бария-натрия ниобат $Ba_2NaNb_5O_{15}$

λ, *мкм*	$n_{\alpha=c=Z}$	$n_{\beta=a=X}$	$n_{\gamma=b=Y}$
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

$$n_\alpha^2 - 1 = 3{,}6008\lambda^2/[\lambda^2 - (0{,}17944)^2]$$

$$n_\beta^2 - 1 = 3{,}9495\lambda^2/[\lambda^2 - (0{,}20035)^2]$$

$$n_\gamma^2 - 1 = 3{,}9495\lambda^2/[\lambda^2 - (0{,}20097)^2]$$

Бария-калия-натрия ниобат $K_xNa_{1-x}Ba_2Nb_5O_{15}$

$$n_o^2 = 3{,}6680 + 24{,}681/[(4{,}3004)^2 - (1{,}2394/\lambda)^2]$$

$$n_e^2 = 2{,}9198 + 46{,}737/[(5{,}1605)^2 - (1{,}2394/\lambda)^2]$$ при 22°C

Бензил $(C_6H_5)_2 \cdot (CO)_2$

λ, мкм	n_o	n_e	λ, мкм	n_o	n_e
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			

$n_o^2 - 1 = 1{,}08 + 0{,}535\lambda^2/[\lambda^2 - (0{,}24)^2] + 0{,}0150\lambda^2/[\lambda^2 - (0{,}398)^2]$; $n_e^2 - 1 = 1{,}35 + 0{,}370\lambda^2/[\lambda^2 - (0{,}24)^2] + 0{,}0138\lambda^2/[\lambda^2 - (0{,}395)^2]$

Бериллия окись BeO, 22,4°C

λ, мкм	n_o	n_e
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	1,73918
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	

$n_o^2 - 1 = 1{,}919087\lambda^2/(\lambda^2 - 0{,}00727575) + 3{,}972323\lambda^2/(\lambda^2 - 199{,}31087)$; $n_e^2 - 1 = 1{,}972142\lambda^2/(\lambda^2 - 0{,}00748564) + 17{,}5787\lambda^2/(\lambda^2 - 779{,}49122)$

Висмута германат Bi_4GeO_{12}

λ, мкм	n	λ, мкм	n
0,4765	$2{,}142_2$	0,5321	$2{,}115_2$
0,4880	$2{,}135_7$	0,6328	$2{,}086_1$
0,4965	$2{,}131_8$	1,0642	$2{,}044_3$
0,5017	$2{,}128_5$		
0,5145	$2{,}123_7$		

$n^2 - 1 = 3{,}08959\lambda^2/(\lambda^2 - 0{,}01337)$

Гадолиния молибдат $Gd_2(MoO_4)_3$

λ, мкм	$n_{\alpha=b=Y}$	$n_{\beta=a=X}$	$n_{\gamma=c=Z}$
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	1,8637

$n_\alpha^2 - 1 = 2{,}2450\lambda^2/(\lambda^2 - 0{,}022693)$; $n_\beta^2 - 1 = 2{,}24654\lambda^2/(\lambda^2 - 0{,}0226803)$; $n^2 - 1 = 2{,}41957\lambda^2/(\lambda^2 - 0{,}0245458)$

Галлия арсенид GaAs

λ, мкм	n	λ, мкм	n
1,127	3,455	1,550	3,375
1,239	3,425	1,652	3,366
1,377	3,400		

Галлия фосфид GaP

λ, мкм	n	λ, мкм	n
0,5	3,4595	1,8	3,0439
0,6	3,3495	2,0	3,0379
0,7	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

λ, мкм	n_o	n_e
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
1,40	3,1820	3,2244
2,00	3,1490	3,1889

Германия-цинка фосфид ZnGeP

λ, *мкм*	n_o	n_e
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

λ, *мкм*	n	λ, *мкм*	n
7,87	4,0	15,13	3,88
8,00	3,99	15,79	3,87
9,01	3,96	16,96	3,86
10,06	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

λ, *мкм*	n_o	n_e
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

Кадмия сульфид CdS

λ, *мкм*	n_o	n_e
0,5120	—	2,751
0,5130	—	2,743
0,5140	—	2,737

Продолжение табл. 34.20

λ, *мкм*	n_o	n_e
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

λ, *мкм*	n	λ, *мкм*	n
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		

$n^2 - 1 = 4{,}68 + 1{,}53\lambda^2/(\lambda^2 - 0{,}366)$

Кадмия-ртути тиоцианат $Cd[Hg(SCN)_4]$, 27°C

λ, *мкм*	n_o	n_e
0,530	2,003	1,792
0,633	1,970	1,753
1,06	1,924	1,728

Калия битартрат $K_2C_4H_4O_6 \cdot {}^1/_2H_2O$

λ, мкм	n_α	n_β	n_γ
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 KH_2AsO_4

λ, мкм	n_o	n_e	λ, мкм	n_o	n_e
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 KDP KH_2PO_4

λ, мкм	n_o	n_e
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

$n_o^2 = 2{,}259276 + 1{,}008956 \cdot 10^{-10}\nu^2/(1 - \nu^2/7{,}726408 \cdot 10^9) + \frac{3{,}251305 \cdot 10^6}{(2{,}5 \cdot 10^5 - \nu^2)}$; $n_e^2 = 2{,}132668 + 8{,}637494 \cdot 10^{-11}\nu^2/(1 - \nu^2/7{,}142631 \cdot 10^9) + 8{,}069981 \cdot 10^5/(2{,}5 \cdot 10^5 - \nu^2)$; $\Delta n_o = 0{,}402 \cdot 10^{-4} \cdot (n_o^2 - 1{,}432)(298 - T)$; $\Delta n_e = 0{,}221 \cdot 10^{-4} \times (n_e^2 - 1{,}105)(298 - T)$

Калия дидейторофосфат KDDR KD_2PO_4

λ, мкм	n_o	n_e
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

$\Delta n_o = 0{,}228 \cdot 10^{-4} \cdot (n_o^2 - 1{,}047)(298 - T)$

$\Delta n_e = 0{,}955 \cdot 10^{-5} \cdot n_e^2 (298 - T)$

Калия дитионат $K_2S_2O_6$

λ, мкм	n_o	n_e
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 $K_2Li_2Nb_5O_{15}$

λ, мкм	n_o	n_e
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

$n_o^2 - 1 = 3{,}708\lambda^2/(\lambda^2 - 0{,}04601)$

$n_e^2 - 1 = 3{,}349\lambda^2/(\lambda^2 - 0{,}03564)$

α-Кварц α-SiO_2

λ, мкм	n_o	n_e
0,185	1,65751	1,68988
0,198	1,65087	1,66394
0,231	1,61395	1,62555
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 $C_6H_5CO \cdot NH(CH_2CO_2H)$

λ, мкм	n_α	n_β	n_γ
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 α-иодноватая α-HIO_3

λ, мкм	$n_{\alpha=a=X}$	$n_{\beta=c=Z}$	$n_{\gamma=b=Y}$
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	1,9665	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

Кремния карбид SiC

λ, мкм	n_o	n_e	λ, мкм	n_o	n_e
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

$n_o^2 - 1 = 5{,}5515\lambda^2/[\lambda^2 - (0{,}1625)^2]$

$n_e^2 - 1 = 5{,}7382\lambda^2/[\lambda^2 - (0{,}16897)^2]$

Лития галлат $LiGaO_3$

λ, мкм	$n_{\alpha,\ \beta=Y,\ Z}$	$n_{\gamma=X}$	λ, мкм	$n_{\alpha,\ \beta=Y,\ Z}$	$n_{\gamma=X}$
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 $LiIO_3$

λ, мкм	n_o	n_e	λ, мкм	n_o	n_e
0,4579	1,9186	1,7633	0,5145	1,9018	1,7506
0,4765	1,9124	1,7586	0,5321	1,8978	1,7475
0,4880	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			

$n_o^2 - 1 = 2{,}40109\lambda^2/(\lambda^2 - 0{,}021865)$

$n_e^2 - 1 = 1{,}91359\lambda^2/(\lambda^2 - 0{,}01940)$

Лития формиата моногидрат $LiCHO_2 \cdot H_2O$

λ, мкм	$n_{\alpha=X=a}$	$n_{\beta=Y=b}$	$n_{\gamma=Z=c}$
0,4579	1,3708	1,4901	1,5308
0,4765	1,3698	1,4883	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

$n_\alpha^2 - 1 = 0{,}8415\lambda^2/[\lambda^2 - (0{,}0953)^2]$; $n_\beta^2 - 1 = 1{,}14106\lambda^2/[\lambda^2 - (0{,}1183)^2]$; $n_\gamma^2 - 1 = 1{,}2454\lambda^2/[\lambda^2 - (0{,}12496)^2]$

Литии ниобат $LiNbO_3$

λ, мкм	n_o	n_e
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

$$n_o^2 - 1 = 3{,}9130 + \frac{1{,}173 \cdot 10^5 + 1{,}65 \cdot 10^{-2} T^2}{\lambda^2 - (2{,}12 \cdot 10^2 + 2{,}7 \cdot 10^{-5} T^2)^2} - 2{,}78 \cdot 10^{-8} \lambda^2;$$

$$n_e^2 - 1 = 3{,}5567 + 2{,}605 \cdot 10^{-7} T^2 + \frac{0{,}970 \cdot 10^5 + 2{,}70 \cdot 10^{-2} T^2}{\lambda^2 - (2{,}01 \cdot 10^2 + 5{,}4 \cdot 10^{-5} T^2)^2} - 2{,}24 \cdot 10^{-8} \lambda^2$$

Лития сульфата моногидрат $LiSO_4 \cdot H_2O$

λ, мкм	n_α	n_β	n_γ
0,3650	1,4771	1,4926	1,5029
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	1,4882
0,5780	1,4619	1,4772	1,4867
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

Лития танталат $LiTaO_3$

λ, мкм	n_o	n_e
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

λ, мкм	n	λ, мкм	n
0,4358	2,336±0,002	0,5791	2,122±0,002
0,4678	2,229±0,002	0,5896	2,117±0,002
0,4800	2,207±0,002	0,6438	2,096±0,002
0,5086	2,171±0,002	0,7699	2,069±0,004
0,5461	2,141±0,002		

Меди иодид CuI

λ, мкм	n	λ, мкм	n
0,4358	2,562±0,002	0,5791	2,347±0,002
0,4678	2,461±0,002	0,5896	2,342±0,002
0,4800	2,448±0,002	0,6438	2,315±0,002
0,5086	2,411±0,002	0,7699	2,280±0,004
0,5461	2,372±0,002		

Меди хлорид CuCl

λ, мкм	n	λ, мкм	n
0,4047	2,153±0,001	0,5086	2,004±0,001
0,4078	2,141±0,001	0,5461	1,987±0,001
0,4358	2,072±0,001	0,5791	1,976±0,001
0,4678	2,033±0,001	0,5896	1,972±0,001
0,4800	2,023±0,001	0,6438	1,958±0,001
		0,7699	1,941±0,002

Натрия бромат $NaBrO_3$

$$n^2 - 1 = 1{,}3194\lambda^2/[\lambda^2 - (0{,}09)^2] + 0{,}2357\lambda^2/[\lambda^2 - (0{,}2)^2] - 0{,}0174\lambda^2$$

Натрия иитрит $NaNO_2$

λ, мкм	$n_{\alpha=a=X}$	$n_{\beta=b=Y}$	$n_{\gamma=c=Z}$
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 $NaClO_3$

λ, мкм	n	λ, 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		

$n^2 - 1 = 1{,}1825\lambda^2/[\lambda^2 - (0{,}09)^2] + 0{,}07992\lambda^2/[\lambda^2 - (0{,}185)^2] - 0{,}00864\lambda^2$

Пираргирит Ag_3SbS_3

$n_o^2 - 1 = 6{,}585\lambda^2/[\lambda^2 - (0{,}4)^2] + 0{,}1133\lambda^2/[\lambda^2 - (15)^2]$

$n_e^2 - 1 = 5{,}845\lambda^2/[\lambda^2 - (0{,}4)^2] + 0{,}0202\lambda^2/[\lambda^2 - (15)^2]$

Прустит Ag_3AsS_3, 20°C

λ, мкм	n_o	n_e
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

$n_o^2 = 7{,}483 + 0{,}474/(\lambda^2 - 0{,}09) - 0{,}0019\lambda^2$

$n_e^2 = 6{,}346 + 0{,}342/(\lambda^2 - 0{,}09) - 0{,}0011\lambda^2$

Ртути сульфит α-HgS

λ, мкм	n_o	n_e
0,62	2,9028	3,2560
0,65	2,8655	3,2064
0,68	2,8384	3,1703

Продолжение табл. 34.20

λ, мкм	n_o	n_e
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 RbH_2PO_4

λ, мкм	n_o	n_e
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

$n_o^2 - 1 = 1{,}2068\lambda^2/(\lambda^2 - 0{,}01539)$

$n_e^2 - 1 = 1{,}15123\lambda^2/(\lambda^2 - 0{,}010048)$

Свинца ниобат $PbNb_4O_{11}$

λ, мкм	$n_{\alpha=a=X}$	$n_{\beta=b=Y}$	$n_{\gamma=c=Z}$
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
0,5145	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

$n_\alpha^2 - 1 = 4{,}124\lambda^2/[\lambda^2 - (0{,}202)^2]$; $n_\beta^2 - 1 = 4{,}139\lambda^2/[\lambda^2 - (0{,}2011)^2]$ $n_\gamma^2 - 1 = 4{,}246\lambda^2/[\lambda^2 - (0{,}2014)^2]$

Свинца титанат $PbTiO_3$

λ, *мкм*	n_o	n_e
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

$n_o^2 - 1 = 5,359\lambda^2/[\lambda^2-(0,224)^2]$

$n_e^2 - 1 = 5,365\lambda^2/[\lambda^2 - (0,2170)^2]$

Селен Se

λ, *мкм*	n_o	n_e
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 $AgGaS_2$, 20°C

λ, *мкм*	n_o	n_e
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

$n_o^2 = 5,728 + 0,2410/(\lambda^2 - 0,0870) - 0,00210\lambda^2$

$n_e^2 = 5,497 + 0,2026/(\lambda^2 - 0,1307) - 0,00233\lambda^2$

Теллур Te

λ, *мкм*	n_o	n_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 $Tb(MoO_4)_3$

λ, *мкм*	$n_{\alpha=b=Y}$	$n_{\beta=a=X}$	$n_{\gamma=c=Z}$
0,4579	1,8864	1,8867	1,9433
0,4765	1,8797	1,8800	1,9358

λ, *мкм*	$n_{\alpha=b=Y}$	$n_{\beta=a=X}$	$n_{\gamma=c=Z}$
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

$n_\alpha^2 - 1 = 2,27241\lambda^2/(\lambda^2 - 0,023359)$

$n_\beta^2 - 1 = 2,273955\lambda^2/(\lambda^2 - 0,02333)$

$n_\gamma^2 - 1 = 2,443016\lambda^2/(\lambda^2 - 0,025133)$

d-Треонин

λ, *мкм*	$n_{\alpha=X}$	$n_{\beta=Y}$	$n_{\gamma=Z}$
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

$n_\alpha^2 - 1 = 1,273\lambda^2/[\lambda^2-(0,1032)^2]$

$n_\beta^2 - 1 = 1,477\lambda^2/[\lambda^2 - (0,1137)^2]$

$n_\gamma^2 - 1 = 1,497\lambda^2/[\lambda^2 - (0,1169)^2]$

Турмалин

λ, *мкм*	n_o	n_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

$n_o^2 - 1 = 1,6346\lambda^2/(\lambda^2 - 0,010734)$

$n_e^2 - 1 = 1,57256\lambda^2/(\lambda^2 - 0,011346)$

Уротропин $(CH_2)_6N_4$

λ, *мкм*	n	λ, *мкм*	n
0,4861	1,5984	0,5780	1,5899
0,5016	1,5953	0,5876	1,5893
0,5461	1,5917	0,6676	1,5856

Цинка окись ZnO

λ, *мкм*	n_o	n_e
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

Цинка селенид ZnSe

λ, *мкм*	n	λ, *мкм*	n
0,589	2,61	1,5	2,45
1,0	2,48	2,0	2,44

$$n^2 - 1 = 2{,}855 + 2{,}045\lambda^2/(\lambda^2 - 0{,}109)$$

Цинка сульфид ZnS

λ, *мкм*	n_o	n_e	λ, *мкм*	n_o	n_e
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°C

λ, *мкм*	n	λ, *мкм*	n
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

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 ω, возбуждая в среде когерентные акустические или молекулярные колебания с частотой Ω, одновременно дает рассеянную световую волну с частотой

$$\omega' = \omega \pm \Omega.$$

Если возбуждаемые колебания являются акустическими, то рассеяние носит название вынужденного рассеяния Мандельштама — Бриллюена (ВРМБ) и

$$\Omega_{\text{М—Б}} = 2\omega\,(v_{\text{зв}}/c)\sin(\theta/2),$$

где $v_{\text{зв}}$ и c — соответственно скорости звука и света в среде; θ — угол, отсчитываемый от направления распространения световой волны (угол наблюдения). Наибольший сдвиг частоты происходит при рассеянии назад ($\theta = \pi$), при этом $\Omega_{\text{М—Б}} \simeq 10^{10}$ *гц* (~ 1 *см*$^{-1}$).

Если возбуждаются молекулярные колебания, то в зависимости от строения молекул вещества $\Omega \sim (100 \div 1000)$ *см*$^{-1}$ и рассеяние носит название вынужденного комбинационного рассеяния (ВКР). В общем случае в ВКР может наблюдаться целый набор частот*

$$\omega' = \omega \pm m\Omega' \pm n\Omega'' \pm \ldots,$$

где Ω', Ω'' — характерные молекулярные колебания данного вещества, а m и n — целые числа.

Характерные сдвиги частот Ω при ВКР [7]

Жидкости	Ω, *см*$^{-1}$
Бромоформ	222
Тетрахлорэтилен	447
Четыреххлористый углерод	460
Этил иодистый	497
Гексафторбензол	515
Бромоформ	539
Трихлорэтилен	640
Сероуглерод	656
Хлороформ	667
о-Ксилол	730

* Для рассеяния Мандельштама—Бриллюена аналогично (k—целое):

$$\omega' = \omega \pm k\Omega_{\text{М—Б}}.$$

	Ω, $см^{-1}$
α-Диметилфенетиламин	836
Диоксан	836
Морфолин	841
Тиофеиол	916
Нитрометан	927
Бензол дейтерированный	944
Кумол	990
1,3-Дибромбензол	990
Бензол	992
Пиридин	992
Аиилин	997
Стирол	998
м-Толуидин	999
Бромбензол	1000
Хлорбензол	1001
Беизонитрил	1002
трет-Бутилбензол	1002
Этилбензол	1002
Толуол	1004
Фторбензол	1012
γ-Пиколин	1016
м-Крезол	1029
1-Фтор-*2*-хлорбензол	1030
м-Дихлорбензол	1030
Иодбензол	1070
Бензоил хлористый	1086
Бензальдегид	1086
Анизол	1097
Пиррол	1178
Фуран	1180
Стирол	1315
Нитробеизол	1344
1-Бромнафталин	1368
1-Хлорнафталин	1368
2-Этилнафталин	1381
м-Нитротолуол	1389
Хинолин	1427
Бромциклогексан	1438
Фуран	1522
Метиловый эфир салициловой кислоты	1612
Коричный альдегид	1624
Стирол	1629
3-Метилбутадиен	1638
Пентадиен	1655
Изопрен	1792
Гексин-*1*	2116
о-Дихлорбензол	2202
Бензонитрил	2229
Ацетонитрил	2250
1,2-Диметиланилин	2292
Метилциклогексан	2817
Метиловый спирт	2831
цис-, *транс-1,3*-Диметилциклогексан	2844
Тетрагидрофуран	2849
Циклогексан	2852
цис-1,2-Диметилциклогексан	2854
α-Диметилфенетиламин	2856
Диоксан	2856
Циклогексан	2863
Циклогексанон	2863
цис-, *транс-1,3*-Диметилциклогексан	2870
цис-1,4-Диметилциклогексан	2873
Циклогексан	2884
Хлористый метилен	2902
Морфолин	2902
2-Октан	2908
2,3-Диметил-*1,5*-гексадиен	2910
Лимонен	2910
о-Ксилол	2913
Гексин-1	2915
цис-2-Гептан	2920
Мезитилен	2920
2-Бромпропан	2920
Ацетон	2921
Этиловый спирт	2921
Карвои	2922
цис-1,2-Диметилциклогексан	2927
Диметилформамид	2930
2-Хлор-*2*-Метилбутан	2931
2-Октан	2931
цис, транс-1,3-Диметилгексан	2931
м-Ксилол	2933
1,2-Диэтиловый эфир винной кислоты	2933
о-Ксилол	2933
Пиперидин	2933
1,2-Диэтилбеизол	2934
2-Хлор-*2*-Метилбутен	2935
1-Бромпропан	2935
Пиперидин	2936
Тетрагидрофуран	2939
Пиперидин	2940
Циклогексанон	2945
2-Нитропропан	2948
1,2-Диэтилкарбонат	2955
1,2-Дихлорэтан	2956
транс-Дихлорэтилен	2956
1-Бромпропан	2962
2-Хлор-*2*-Метилбутан	2962
α-Диметилфенетиламин	2967
Диоксан	2967
Циклогексанол	2982
Циклопентан	2982
Циклопентанол	2982
Бромциклопентан	2982
о-Дихлорбензол	2982
п-Хлортолуол	2982
α-Пиколин	2982
п-Ксилол	2988
о-Ксилол	2992
Дибутилфталат	2992
1,1,1-Трихлорэтан	3018
Хлоргидрин этилена	3022
Изофорон	3022
Нитрозодиметиламин	3022
Пропиленгликоль	3022
Циклогексан	3038
Стирол	3056
Бензол	3064
трет-Бутилбензол	3064
1-Фтор-*2*-Хлорбензол	3084
Живица	3090
Псевдокумол	3093
Уксусная кислота	3162
Ацетонилацетон	3162
Метилметакрилат	3162
γ-Пиколин	3182
Анилин	3300
Вода	3651

Твердые вещества

Кварц	128
Ниобат лития	152
α-Сера	216
Ниобат лития	248
Кварц	466
α-Сера	470
Ниобат лития	628
Вольфрамат кальция	911
Стильбен	997
Полистирол	1001
Кальцит	1084
Алмаз	1332

	Ω, $см^{-1}$
Нафталин	1380
Стильбен	1591
Триглицинсульфат	2422
Триглицинсульфат	2702
Триглицинсульфат	3022
Полистирол	3054
Газы	
Кислород	1552
Калия пары	2721
Метан	2916
Дейтерий	2991
Водород	4155

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Kaminow I. P., Turner E. H.** Handbook of Lasers. Ed. Pressley R. J. The Chemical Rubber C°, Cleveland, 1971, p. 447.
2. **Chen D.** См. [1], p. 460.
3. **Волькенштейн М. В.** Молекулярная оптика. М.—Л., Гостехиздат, 1951.
4. **Pinnow D. A.** См. [1], p. 478.
5. **Справочник** химика. М.—Л., «Химия», 1965.
6. **Singh S.** См. [1], p. 489.
7. **Johnson F. M.** См. [1], p. 526.

ГЛАВА 35

РЕНТГЕНОВСКОЕ ИЗЛУЧЕНИЕ

35.1. ОСНОВНЫЕ ОПРЕДЕЛЕНИЯ И ОБОЗНАЧЕНИЯ В СПЕКТРОСКОПИИ РЕНТГЕНОВСКОГО ИЗЛУЧЕНИЯ

Рентгеновским излучением называют электромагнитные волны, длины которых лежат в интервале от 80 до 10^{-5} *нм*.

Исторически первый и наиболее распространенный способ получения рентгеновского излучения состоит в бомбардировке твердого вещества заряженными частицами, ускоренными до достаточно больших энергий. При этом могут иметь место два механизма возникновения рентгеновского излучения.

При первом механизме рентгеновское излучение возникает как тормозное излучение заряженных частиц, взаимодействующих с полем атомов вещества. Спектр такого тормозного излучения имеет непрерывный характер, причем граничное значение длины волны не зависит от атомного номера вещества мишени и определяется только энергией заряженных частиц $h\nu_{гр} = E_{кин}$.

Второй механизм состоит в возбуждении электронов внутренних электронных оболочек атомов вещества мишени и последующим излучении этих атомов. Спектр возникающего таким образом рентгеновского излучения имеет линейчатый характер, причем длина волны однозначно определяется атомным номером Z и электронной структурой атомов вещества мишени.

В рентгеновской спектроскопии приняты следующие обозначения. *Термы уровней* атома, для которых главное квантовое число равно 1, 2, 3, 4, 5, 6, обозначаются соответственно буквами K, L, M, N, O, P. Индексы у этих букв соответствуют разным значениям орбитального и полного момента электрона согласно приведенной ниже схеме:

Уровень электрона в атоме	$1s$	$2s$	$2p_{1/2}$	$2p_{3/2}$	$3s$
Терм уровня	K	L_I	L_{II}	L_{III}	M_I
Уровень электрона в атоме	$3p_{1/2}$	$3p_{3/2}$	$3d_{3/2}$	$3d_{5/2}$	и т. д.
Терм уровня	M_{II}	M_{III}	M_{IV}	M_V	и т. д.

Линии, соответствующие переходам электрона в атоме на K-, L-, M-, N-оболочки, образуют K-, L-, M-, N-серии. Линии, возникающие при переходах по такой простой диаграмме уровней называются *диаграммными линиями*. Обозначения диаграммных линий и соответствующие им переходы приведены в табл. 35.1.

Таблица 35.1

Обозначения диаграммных линий рентгеновского излучения [2]

K-серия		L-серия		M-серия	
Переход	Индекс линии	Переход	Индекс линии	Переход	Индекс линии
$K—L_{II}$	α_2	$L_I—M_{II}$	β_4	$M_{III}—N_V$	γ
$K—L_{III}$	α_1	$L_I—M_{III}$	β_3	$M_{IV}—N_{III}$	δ
$K—M_{II}$	β_3	$L_I—M_{IV}$	β_{10}	$M_{IV}—$	β
$K—M_{III}$	β_1	$L_I—M_V$	β_9	$—N_{VI,V\ II}$	
$K—M_{IV}$	β_5^{II}	$L_I—N_{II}$	γ_2	$M_{IV}—$	η
$K—M_V$	β_5^{I}	$L_I—N_{III}$	γ_3	$—O_{II,\ III}$	
$K—M_{IV,V}$	β_5	$L_I—O_{II}$	γ_4'	$M_V—N_{II}$	ξ_1
$K—N_{II}$	β_2^{II}	$L_I—O_{III}$	γ_4	$M_V—N_{III}$	ξ_2
$K—N_{III}$	β_2^{I}	$L_I—P_{II,III}$	γ_{13}	$M_V—$	ξ
$K—N_{II,\ III}$	β_2	$L_{II}—M_I$	η	$—N_{II,\ III}$	
$K—N_{IV}$	β_{4x}	$L_{II}—M_{IV}$	β_1	$M_V—N_{VI}$	α_2
$K—N_V$	β_4	$L_{II}—N_I$	γ_5	$M_V—N_{VII}$	α_1
		$L_{II}—N_{IV}$	γ_1		
		$L_{II}—O_I$	γ_8		
		$L_{II}—O_{IV}$	γ_6		
		$L_{III}—M_I$	l		
		$L_{III}—M_{II}$			
		$L_{III}—M_{III}$	s		
		$L_{III}—M_{IV}$	α_2		
		$L_{III}—M_V$	α_1		
		$L_{III}—N_I$	β_6		
		$L_{III}—N_{IV}$	β_{15}		
		$L_{III}—N_V$	β_2'		
		$L_{III}—$	β_7		
		$—N_{VI,\ VII}$			
		$L_{III}—O_I$	β_7		
		$L_{III}—O_{IV,V}$	β_5		

Переходы, имеющие одинаковое начальное (конечное) состояние и различающиеся значениями полного момента конечного (начального) состояния, дают две диаграммные линии, называемые *спин-дублетом*. Например, K_{α_1}- и K_{α_2}-линии образуют спин-дублет.

Помимо диаграммных линий в характеристическом спектре рентгеновского излучения существуют слабые по интенсивности линии, называемые *недиаграммными* линиями, или *сателлитами диаграммных линий*. Коротковолновые сателлиты могут возникать при дополнительной ионизации излучающего атома, а также при переходах на внутренний уровень с оптических уровней атомов, которые были предварительно возбуждены. Сателлиты, проявляющиеся с длинноволновой стороны от диаграммной линии, могут возникать при перекрестных переходах электронов атомов, образующих химическое соединение. Например, длинноволновой сателлит K-линии хлора проявляется в соединении KCl и может быть объяснен переходом $2p$ электрона иона K^+ на уровень $1s$ иона Cl^- [1, 2].

35.2. ЗАКОН МОЗЛИ И ПРАВИЛО СПИН-ДУБЛЕТОВ ДЛЯ ДИАГРАММНЫХ ЛИНИЙ

Для энергий наинизших уровней атомов можно в первом приближении использовать выражение для уровней энергии водородоподобных атомов, тогда для данной линии зависимость от атомного номера вещества мишени имеет следующий вид (закон Мозли):

$$\sqrt{k/R} = \varkappa (Z - \sigma),$$

где k — волновое число рентгеновской линии; R — постоянная Ридберга; величины $\varkappa$ и σ постоянны для рассматриваемой линии. Например, для K_{α_1}-линии $\sigma = 1{,}13$, $\varkappa = 0{,}874$; для L_{α_1}-линии $\sigma = 7{,}9$, $\varkappa = 0{,}376$.

В этом же приближении можно получить другое простое соотношение для $\Delta\lambda$-разности длин волн двух спин-дублетных рентгеновских линий: $\Delta\lambda$ не зависит от атомного номера [1].

35.3. ТАБЛИЦЫ ДИАГРАММНЫХ ЛИНИЙ И КРАЕВ ПОГЛОЩЕНИЯ ЛИНИЙ РЕНТГЕНОВСКОГО ИЗЛУЧЕНИЯ ДЛЯ РАЗЛИЧНЫХ ЭЛЕМЕНТОВ

Практическое использование рентгеновского излучения часто требует более точного знания характеристического спектра для каждого элемента, чем то, которое следует из закона Мозли. В табл. 35.2—35.5 представлены длины волн и края поглощения для различных элементов.

Длины волн рентгеновского излучения обычно измеряют в единицах «икс» (X) или «килоикс» (kX), которые имеют следующую связь с метрической единицей: $1\ kX = (0{,}100202 \pm 0{,}000003)$ *нм*.

K-серия

Таблица 35.2

Диаграммные линии и края поглощения *K*-серии элементов от Fm до Ne (длины волн в *X*) [1, 2]

Элемент	Конечный уровень (начальный уровень K)											Край поглощения
	L_{II}	L_{III}	M_{II}	M_{III}	M_{IV}	M_V	N_{II}	N_{III}	N_{IV}	N_V	$O_{II,\,III}$	
^{100}Fm	107,661	102,597	—	90,928	—	—	88,302		—		—	87,436
^{99}Es	110,233	105,171	—	93,184	—	—	90,496		—		—	90,616
^{98}Cf	113,451	107,830	—	95,534	—	—	92,761		—		—	91,868
^{97}Bk	115,611	110,576	—	97,917	—	—	95,103		—		—	94,194
^{96}Cm	118,461	113,412	—	100,402	—	—	97,521		—		—	96,598
^{95}Am	121,385	116,342	—	102,968	—	—	100,019		—		—	99,082
^{94}Pu	124,406	119,369	—	105,620	—	—	102,602		—		—	101,651
^{93}Np	127,526	122,499	—	108,363	—	—	105,273		—		—	104,309
^{92}U	130,698	125,686	112,062	111,161	110,46	—	108,15	107,96	107,58	—	107,22	106,58
^{90}Th	137,542	132,538	118,022	117,152	116,43	116,43	114,01	113,80	113,42	—	113,00	112,70
^{83}Bi	165,370	160,453	142,484	141,655	140,82	140,82	137,86	137,67	137,30	—	136,81	136,78
^{82}Pb	169,942	165,031	146,506	145,668	144,82	144,65	141,83	141,62	141,26	—	140,72	140,49
^{81}Tl	174,675	169,788	150,666	149,830	148,86	148,86	145,84	145,65	145,23	—	144,79	144,41
^{80}Hg	179,56	174,69	154,92	154,08	153,13	153,13	150,00	149,79	149,38	—	148,90	148,93
^{79}Au	184,691	179,822	159,477	158,651	157,773	157,551	154,505	154,295	153,90	—	153,374	153,20
^{78}Pt	189,988	185,130	164,157	163,334	162,36	162,20	159,053	158,863	158,48	—	157,92	157,70
^{77}Ir	195,494	190,648	169,016	168,193	167,23	167,02	163,808	163,613	163,18	—	162,68	162,09
^{76}Os	201,220	196,386	174,072	173,257	172,26	172,09	168,75	168,56	168,07	—	167,63	167,55
^{75}Re	207,179	202,359	179,325	178,509	177,46	177,29	173,88	173,69	173,26	173,26	172,72	173,5
^{74}W	213,384	208,573	184,790	183,994	182,882	182,711	179,232	179,05	178,55	178,55	178,07	178,22
^{73}Ta	219,846	215,050	190,492	189,693	188,53	188,36	184,802	184,625	184,12	184,12	183,65	183,60

Элемент	Конечный уровень (начальный уровень K)											Край поглощения
	L_{II}	L_{III}	M_{II}	M_{III}	M_{IV}	M_{V}	N_{II}	N_{III}	N_{IV}	N_{V}	$O_{II,\,III}$	
^{72}Hf	226,56	221,76	195,86	195,18	—	—	190,44	190,44	—	—	—	190,10
^{71}Lu	233,61	228,85	202,55	201,74	—	—	196,52	196,52	—	—	—	195,10
^{70}Yb	241,00	236,27	209,19	208,37	—	—	203,25	203,25	—	—	—	201,6
^{69}Tm	248,64	243,90	215,61	214,90	—	—	—	—	—	—	—	208,5
^{68}Er	256,70	252,00	223,03	222,18	—	—	216,74	216,74	—	—	—	—
^{67}Ho	264,99	260,30	—	—	—	—	—	—	—	—	—	222,64
^{66}Dy	273,68	268,91	237,90	237,13	—	—	231,31	231,31	—	—	—	230,10
^{65}Tb	282,92	278,22	246,32	245,54	—	—	239,15	239,15	—	—	—	237,6
^{64}Gd	292,53	287,80	254,74	254,97	—	—	247,65	247,65	—	—	—	246,2
^{63}Eu	302,69	297,97	263,89	263,10	—	—	256,48	256,48	—	—	—	254,8
^{62}Sm	313,13	308,45	273,95	272,54	—	—	265,78	265,78	—	—	—	264,4
^{61}Pm	323,73	319,06	—	282,04	—	—	275,07	275,07	—	—	—	—
^{60}Nd	335,768	331,153	293,410	292,683	—	—	285,76	285,76	—	—	—	284,58
^{59}Pr	348,025	343,428	304,337	303,625	—	—	296,43	296,17	—	—	—	295,1
^{58}Ce	360,936	356,355	315,857	315,155	312,91	312,77	307,77	307,514	306,72	306,72	306,030	306,23
^{57}La	374,522	369,962	327,999	327,298	324,95	324,78	319,446	319,01	318,64	318,97	317,97	318,14
^{56}Ba	388,861	384,313	340,80	340,102	337,64	337,44	332,074		331,59	331,59	330,57	330,70
^{55}Cs	403,996	399,461	354,32	353,633	—	—	345,386		—	—	—	344,04
^{54}Xe	419,58	415,12	—	367,72	—	—	359,16		—	—	—	357,77
^{53}I	436,922	432,420	383,77	383,110	—	—	374,65		—	—	—	373,44
^{52}Te	454,832	450,353	399,829	399,166	—	—	390,292		—	—	388,93	389,27
^{51}Sb	473,834	469,373	416,87	416,22	413,02	412,92	407,128		406,62	406,18	405,82	406,09
^{50}Sn	494,02	489,57	434,96	434,32	430,96	430,87	425,02		424,43	424,07	423,79	423,82
^{49}In	515,484	511,059	454,23	453,59	450,05	449,93	444,071		443,47	443,01	442,82	442,98
^{48}Cd	538,317	533,904	474,73	474,10	470,38	470,38	464,30		463,33	463,33	—	463,15
^{47}Ag	562,65	558,253	496,65	496,01	499,09	499,09	486,03		484,86	484,86	—	484,84
^{46}Pd	588,62	584,240	520,09	519,47	515,65	515,65	509,18		—	—	—	508,12
^{45}Rh	616,37	612,00	545,09	544,49	540,09	539,92	534,01		533,17	532,94	—	532,88
^{44}Ru	646,058	641,735	571,93	571,31	566,83	566,68	560,51		559,74	559,74	—	559,34
^{43}Tc	667,90	673,57	600,20	600,20	—	—	588,99		588,99	588,99	—	—
^{42}Mo	712,105	707,831	631,543	630,978	625,78	625,62	619,698		618,95	618,73	—	618,48
^{41}Nb	748,887	744,649	664,96	664,376	—	—	652,80		651,86	651,86	—	651,59
^{40}Zr	788,513	784,297	700,83	700,284	694,47	694,47	688,50		687,56	687,56	—	687,38
^{39}Y	831,317	827,122	739,72	739,188	733,01		727,13		726,19		—	726,15
^{38}Sr	877,613	873,447	781,83	781,299	774,80		769,21		768,30		—	768,14
^{37}Rb	927,761	923,636	827,49	826,956	820,17		814,76		813,63		—	813,85
^{36}Kr	982,1	978,1	877,19	876,68	869,04		864,34		863,47		—	863,72
^{35}Br	1041,66	1037,59	931,34	930,86	923,6		918,66		—	—	—	918,09
^{34}Se	1106,52	1102,48	990,62	990,13	982,3		977,90		—	—	—	977,73
^{33}As	1177,43	1173,44	1055,64	1055,12	1046,6		1042,87		—	—	—	1042,63
^{32}Ge	1255,43	1251,48	1127,04	1126,62	1117,11		1114,57		—	—	—	1114,3
^{31}Ga	1341,24	1337,33	1205,87	1205,42	1195,37		1193,54		—	—	—	1193,4
^{30}Zn	1436,04	1432,20	—	1292,55	1282,2		1281,07		—	—	—	1280,7
^{29}Cu	1541,23	1537,396	1389,74	1389,36	1378,4		—		—	—	—	1377,65
^{28}Ni	1658,34	1654,51	1497,05		1485,57		—		—	—	—	1485,02
^{27}Co	1789,17	1785,30	1617,48		1605,58		—		—	—	—	1604,87
^{26}Fe	1935,99	1932,06	1752,99		1740,54		—		—	—	—	1739,83
^{25}Mn	2101,46	2097,51	1906,24		1893,21		—		—	—	—	1892,54
^{24}Cr	2288,89	2285,00	2080,59		2066,62		—		—	—	—	2065,9
^{23}V	2502,24	2498,42	2279,72		2264,85		—		—	—	—	2263,0
^{22}Ti	2746,51	2742,87	2508,74		2493,0		—		—	—	—	2491,2
^{21}Sc	3028,4	3025,0	2773,9		2758,0		—		—	—	—	2751,7
^{20}Ca	3354,81	3351,48	3083,4		3068,0		—	—	—	—	—	3064,3
^{19}K	3737,07	3733,68	—	3446,8	3434,5		—	—	—	—	—	3431,0
^{18}Ar	4186,10	4183,17	—	3877,99	—	—	—	—	—	—	—	3862,88
^{17}Cl	4720,96	4718,07	—	4394,2	—	—	—	—	—	—	—	4388,0
^{16}S	5363,92	5361,10	—	5021,56	—	—	—	—	—	—	—	5008,1
^{15}P	6144,4	6141,7	—	5792,1	—	—	—	—	—	—	—	5774,9
^{14}Si	7113,36	7110,92	6764,0	6764,0	—	—	—	—	—	—	—	6715,2
^{13}Al	8323,30	8321,96	8042	7944	—	—	—	—	—	—	—	7935,2
^{12}Mg	9872	9872	9647	9539	—	—	—	—	—	—	—	9492,5
^{11}Na	11884	11884	11702	11550	—	—	—	—	—	—	—	11516,0
^{10}Ne	14618	14618	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—

Диаграммные линии и края поглощения *L*-серии для элементов от Fm до Na (длины волн в *X*-единицах) [2] Таблица 35.3

Элемент	Конечный уровень (начальный уровень L_I)									Конечный уровень (начальный уровень L_{II})					
	M_{II}	M_{III}	M_{IV}	M_V	N_{II}	N_{III}	O_{II}	O_{III}	$P_{II,III}$	M_I	M_{IV}	N_I	N_{IV}	O_I	O_{IV}
^{100}Fm	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	567,960	—	485,692	—	—
^{99}Es	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	584,57	—	499,758	—	—
^{98}Cf	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	601,741	—	514,342	—	—
^{97}Bk	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	619,548	—	529,439	—	—
^{96}Cm	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	638,014	—	545,090	—	—
^{95}Am	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	657,125	—	561,337	—	—
^{94}Pu	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	676,934	—	578,151	—	—
^{93}Np	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	697,463	—	595,600	—	—
^{92}U	746,4	708,79	686,4	679,5	603,86	597,11	575,3	573,6	568,9	803,5	718,51	634,2	613,59	600,0	593,4
^{91}Pa	768,3	730,7	707,3	700,3	622,6	615,6	592,5		—	827,8	740,7	653,6	632,5	—	612,0
^{90}Th	791,92	753,24	728,6	721,8	640,79	634,13	611,2	609,5	604,6	852,8	763,56	673,4	651,76	637,4	631,13
^{83}Bi	975,01	936,66	903,5	896,0	794,00	789,46	760,5	759,3	755,3	1056,5	950,02	837,7	811,43	—	788,74
^{82}Pb	1005,63	967,21	932,3	925,1	819,17	812,93	784,3		—	1090,0	980,83	864,7	838,01	822,0	815,14
^{81}Tl	1036,99	998,50	961,6	954,5	845,71	839,34	810,1		—	1125,4	1012,99	892,9	865,71	849,0	842,28
^{80}Hg	1069,2	1030,46	993,6	984,2	872,4	866,2	831,6		—	1161,6	1046,52	922,9	894,6	—	872,4
^{79}Au	1104,34	1065,64	1025,60	1018,64	902,44	896,20	866,53	865,34	—	1200,27	1081,26	953,73	924,70	908,25	901,15
^{78}Pt	1139,86	1101,65	1066,0	1052,4	932,33	925,99	895,2		—	1240,3	1117,58	985,7	955,99	938,6	932,3
^{77}Ir	1177,15	1138,47	1094,8	1087,4	963,32	957,13	925,7		—	1281,7	1155,40	1019,5	988,76	971,9	964,9
^{76}Os	1215,0	1177,2	—	—	—	—	—		—	—	1194,90	—	1022,96	—	—
^{75}Re	1256,3	1217,6	1169,8	1162,4	1029,9	1023,6	991,0		—	1370,6	1236,03	1091,2	1058,7	—	1034,4
^{74}W	1299,14	1260,3	1209,77	1202,37	1065,89	1059,80	1025,69	1026,57	—	1418,26	1279,18	1130,09	1096,31	1078,93	1072,26
^{73}Ta	1343,07	1304,09	1251,4	1244,4	1103,0	1097,08	1062,4		—	1467,9	1324,23	1170,8	1135,58	1118,5	1111,5
^{72}Hf	1389,3	1349,7	1296,7	1287,0	1141,3	1135,6	1100,1		—	1519,7	1371,1	1212,1	1176,5	—	—
^{71}Lu	1437,2	1398,2	1339,8	1333,0	1183,2	1177,5	1141,1		—	1573,8	1420,7	1256	1220,3	1202	1196,9
^{70}Yb	1488,2	1449,4	—	—	1225,6	1219,8	1182,0		—	1631	1472,5	1303,0	1264,8	1248,3	1240,5
^{69}Tm	1541,2	1502,3	—	—	1271,2	1265,3	1226,4		—	1692,3	1526,8	1352,3	1312,7	—	—
^{68}Er	1596,4	1557,9	1491,3	1482,3	1318,4	1311,8	1273,2		—	1754,8	1583,4	1403	1362,6	—	—
^{67}Ho	1655,3	1616,0	—	—	1367,7	1361,3	1319,7		—	1822,0	1643,5	1459	1414,2	—	—
^{66}Dy	1716,7	1677,0	—	—	1420,3	1413,9	1371,4		—	1893,5	1706,6	1515,2	1469,7	—	—
^{65}Tb	1781,4	1742,5	1664	—	1473,8	1468,3	1423,9		—	1935	1772,7	1574,2	1526,6	—	—
^{64}Gd	1849,3	1810,9	1728,1	—	1531,0	1525,9	1481,8		—	2045,2	1842,5	1637,6	1588,6	—	—
^{63}Eu	1922,1	1882,7	1796	1788	1593,9	1587,7	1540,7		—	—	1916,3	1705	1654,3	1629	—
^{62}Sm	1996,4	1958,0	1865,7	1858,1	1655,9	1651,7	1603,3		—	2214	1993,6	1775,1	1723,1	—	—
^{61}Pm	—	2037,9	—	—	—	—	—		—	—	2075,4	—	1795,2	—	—
^{60}Nd	2162,2	2122,2	2019,3	2011,7	1797,4	1792,5	1740,8		—	2404,2	2162,2	1931,3	1873,8	1851,4	—
^{59}Pr	2250,1	2212,4	2102,5	2095,8	1875,0	1869,9	1815,3		—	2507	2253,9	2016,1	1956,8	1932,2	—
^{58}Ce	2344,2	2305,9	2191,6	2184,0	1955,9	1950,9	1895,2		—	2614,7	2351,0	2105,6	2044,3	2019	—
^{57}La	2443,8	2405,3	2285	2277	2041,6	2036,6	1978,7		—	2734	2453,3	2200,8	2137,2	—	—
^{56}Ba	2549,7	2510,9	2381,7	2371,3	2134,1	2129,6	2071,9		—	2856,2	2562,2	2302,5	2236,7	2218	—
^{55}Cs	2661,1	2622,9	2486,6	2473,0	2232,4	2228,0	2169,6		—	2986,7	2678,0	2412,2	2343,0	—	—
^{53}I	2906,10	2868,40	2715,4	2707,95	2442,4		2386,3		—	3273,25	2931,41	2651,65	2577,14	—	—
^{52}Te	3040,35	3002,75	2841,00	2833,20	2562,1		2506,1		—	3431,30	3070,46	2784,35	2706,84	—	—
^{51}Sb	3183,60	3146,10	2973,05	2966,50	2689,7		2634,3		—	3600,25	3219,09	2925,85	2845,75	—	—
^{50}Sn	3336,50	3299,10	3115,35	3108,80	2826,8		2771,7		—	3780,95	3377,96	3078,50	2995,01	—	—
^{49}In	3499,75	3462,70	3267,35	3260,95	2973,8		2920,3		—	3975,05	3548,03	3242,45	3155,71	—	—

Продолжение табл. 35.3

Элемент	Конечный уровень (начальный уровень L_I)									Конечный уровень (начальный уровень L_{II})					
	M_{II}	M_{III}	M_{IV}	M_V	N_{II}	N_{III}	O_{II}	O_{III}	$P_{II, III}$	M_I	M_{IV}	N_I	N_{IV}	O_I	O_{IV}
^{48}Cd	3674,35	3637,40	3429,6	3423,10	3131,2		—		—	4184,50	3730,54	3418,50	3328,80	—	—
^{47}Ag	3862,40	3825,45	3604,15	3597,70	3300,0		—		—	4409,2	3926,50	3609,05	3515,45	—	—
^{46}Pd	4062,7	4026,2	3791,0	3784,2	3482,1		—		—	4650,8	4137,60	3814,4	3716,9	—	—
^{45}Rh	4280,0	4243,5	—	—	3678,0		—		—	4911,6	4365,10	4036,6	3935,5	—	—
^{44}Ru	4513,7	4477,5	—	—	3889,4		—		—	5194,4	4611,10	4278,5	4173,6	—	—
^{42}Mo	5038,4	5003,0	—	—	4370,9		—		—	5835,4	5166,35	4827,0	4716,1	—	—
^{41}Nb	5334,5	5299,3	—	—	4644,7		—		—	6198,1	5481,0	5141,1	5025,8	—	—
^{40}Zr	5656,5	5621,4	—	—	4943,4		—		—	6593,3	5824,0	5486,4	5373,2	—	—

Элемент	Конечный уровень (начальный уровень L_{III})											Край поглощения		
	M_I	M_{II}	M_{III}	M_{IV}	M_V	N_I	N_{IV}	N_V	$N_{VI, VII}$	O_I	$O_{IV, V}$	L_I	L_{II}	L_{III}
^{100}Fm	—	—	—	767,889	755,418	—	—	622,416	—	—	—	449,878	465,430	591,670
^{99}Es	—	—	—	784,890	772,444	—	—	636,930	—	—	—	462,905	479,128	605,273
^{98}Cf	—	—	—	802,399	790,052	—	—	651,897	—	—	—	476,416	493,341	620,574
^{97}Bk	—	—	—	820,545	808,217	—	—	667,368	—	—	—	490,408	508,090	635,784
^{96}Cm	—	—	—	839,246	827,017	—	—	683,365	—	—	—	504,959	523,393	651,553
^{95}Am	—	—	—	858,580	846,422	—	—	699,949	—	—	—	520,027	539,270	667,908
^{94}Pu	—	—	—	878,639	866,517	—	—	717,109	—	—	—	535,697	555,790	684,878
^{93}Np	—	—	—	899,331	887,271	—	—	734,870	—	—	—	551,947	572,930	702,452
^{92}U	1064,9	1032,9	961,42	920,62	908,74	786,79	755,14	753,07	739,3	734,6	724,85	568,0	591,3	720,911
^{91}Pa	1088,5	—	—	942,7	930,9	806,2	—	772,1	—	753,0	743,7	—	—	—
^{90}Th	1112,8	1078,5	1009	965,85	954,05	826,46	793,94	791,92	775,2	772,8	763,6	603,9	629,3	760,0
^{88}Ra	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	670	802
^{83}Bi	1313,7	1269,3	1209,1	1153,01	1141,50	991,31	955,08	953,24	933,0	933,0	923,65	755,9	787,8	922,1
^{82}Pb	1347,4	1305,0	1242,0	1184,08	1172,58	1019,06	980,83	980,83	959,5	960,3	950,77	781,2	814,3	949,2
^{81}Tl	1381,9	—	—	1216,26	1204,93	1047,48	1010,0	1008,22	987,0	988,0	978,49	807,2	841,9	977,8
^{80}Hg	1418,41	—	—	1249,51	1238,63	1076,8	—	1037,70	—	1015,5	1006,7	834,2	870,8	1007,5
^{79}Au	1456,67	1410,0	1348,21	1285,02	1273,68	1108,79	1069,80	1068,01	1045,30	1047,79	1038,31	862,2	900,9	1038,2
^{78}Pt	1496,4	1449,0	—	1321,55	1310,33	1141,00	1101,6	1099,74	1076,9	1079,4	1070,21	891,4	932,1	1070,0
^{77}Ir	1530,9	1490,0	1429,5	1359,8	1348,47	1175,45	1134,8	1132,97	1109,1	1112,6	1103,57	922,3	965,4	1103,8
^{76}Os	—	—	—	1398,66	1388,59	1204,8	—	1168,84	—	—	1140	955,8	999,8	1139,0
^{75}Re	1627,3	—	—	1441,0	1429,97	1248,1	1205,7	1204,1	—	1183,3	1174,7	987,3	1035,4	1175,5
^{74}W	1674,75	1621,6	1561,0	1484,42	1473,37	1287,32	1243,80	1242,07	1216,23	1221,51	1213,01	1022,53	1072,15	1212,52
^{73}Ta	1724,9	1671,7	1608,6	1529,78	1518,85	1328,4	1283,8	1281,90	—	1261,3	1253,2	1057	1110,2	1251,7
^{72}Hf	1774,4	—	—	1577,04	1566,07	1371,1	1323,5		—	1303,5	1296,7	1095,3	1151,5	1293,0
^{71}Lu	1831,8	—	—	1626,36	1615,51	1414,3	1367,2		—	1345,9	1339,8	1136,21	1194,0	1337,5
^{70}Yb	1890	—	—	1678,9	1667,8	1462,7	1412,8		—	—	—	1176,4	1239,2	1382,64
^{69}Tm	1951,1	—	—	1733,9	1722,8	1511,5	1460,2		—	—	—	1219,6	1284,9	1429,9
^{68}Er	2015,1	—	—	1791,4	1780,4	1563,6	1510,6		—	1489,2	—	1265,5	1335,60	1479,19
^{67}Ho	2082,1	—	—	1852,1	1841,0	1618,8	1563,7		—	—	—	1314,6	1386,9	1532,2
^{66}Dy	2154,0	—	—	1915,96	1904,90	1677,7	1619,8		—	1595,7	—	1362	1435	1576
^{65}Tb	2229,0	—	—	1982,3	1971,5	1737,5	1679,0		—	1655,8	1656	1418,1	1498,1	1645,3

Элемент	Конечный уровень (начальный уровень L_{III})						Край поглощения		
	M_I	M_{IV}	M_V	N_I	N_V	O_I	L_I	L_{II}	L_{III}
^{64}Gd	2307,1	2052,6	2041,9	1803,1	1741,9	1719,6	1474,0	1558,1	1706,0
^{63}Eu	2390,3	2127,3	2116,3	1870,5	1808,2	1784	1533,3	1622,8	1771,7
^{62}Sm	2477	2205,7	2195,0	1942,2	1878,1	1852,3	1595,4	1699,1	1840,8
^{61}Pm	—	2287,9	2277,5	—	1951,8	—	—	—	—
^{60}Nd	2670,3	2375,6	2365,3	2099,3	2031,4	2004,3	1731,7	1839,1	1990,7
^{59}Pr	2778,1	2467,6	2457,7	2185,9	2114,8	2087,4	1807,1	1920,1	2072,8
^{58}Ce	2885,7	2565,1	2556,0	2276,9	2204,1	2176,3	1885,6	2006,7	2159,5
^{57}La	3000	2668,9	2659,7	2373,9	2298,0	2270	1968,9	2098,9	2253,7
^{56}Ba	3128,7	2779,3	2769,6	2477,3	2399,4	2375,7	2063,5	2200,2	2358,0
^{55}Cs	3260,1	2895,8	2886,2	2587,6	2506,4	2479,6	2162,8	2309,1	2468,9
^{54}Xe	—	—	—	—	—	—	2269,1	2424,1	2587,2
^{53}I	3550,20	3151,43	3142,14	2830,90	2744,89	—	2383,9	2547,5	2713,9
^{52}Te	3709,40	3291,70	3282,46	2964,80	2876,26	—	2505,4	2682,0	2849,6
^{51}Sb	3880,30	3441,33	3432,22	3108,75	3017,24	—	2634,1	2824,0	2993,9
^{50}Sn	4063,25	3601,46	3592,61	3262,90	3168,79	—	2771,5	2976,3	3149,5
^{49}In	4259,95	3772,98	3764,31	3429,00	3331,59	—	2919,8	3140,6	3317,7
^{48}Cd	4470,95	3956,83	3948,30	3607,20	3506,99	—	3078,3	3319,0	3496,7
^{47}Ag	4697,9	4154,30	4145,75	3800,10	3695,60	—	3247,4	3506,7	3690,8
^{46}Pd	4942,3	4366,90	4358,80	4007,9	3900,8	—	3427,8	3716,3	3900,2
^{45}Rh	5206,2	4596,00	4588,00	4233,0	4122,2	—	3618,60	3934,3	4121,3
^{44}Ru	5492,3	4843,65	4835,75	4477,5	4362,7	—	—	4171,1	4360,1
^{42}Mo	6138,1	5403,15	5395,35	5038,4	4913,1	—	4289,7	4708,5	4902,6
^{41}Nb	6504,2	5720,1	5712,5	5350,3	5227,1	—	4571,7	—	5212,1
^{40}Zr	6904,3	6065,3	6058,0	5698,4	5574,8	—	4857,4	5367,0	5571,6

Элемент	Конечный уровень (начальный уровень L_I)			Конечный уровень (начальный уровень L_{II})			Конечный уровень (начальный уровень L_{III})				Край поглощения		
	M_{II}	M_{III}	$N_{II,\,III}$	M_I	M_{IV}	N_I	M_I	M_{IV}	M_V	N_I	L_I	L_{II}	L_{III}
^{39}Y	6006,2	5970,8	5272,2	7026,1	6199,2	5863,3	7341,2	6442,5	6435,5	6081,7	5221,6	5737,3	5944,4
^{38}Sr	6389,7	6354,4	5632,8	7501,6	6610,3	6283,5	7819,9	6855,6	6848,7	6505,7	5571,3	6662,1	6362,0
^{37}Rb	6806,7	6773,6	6033,4	8024,7	7061,4	6741,4	8346,4	7310,1	7303,3	6969,8	5985,4	6630,0	6849,5
^{35}Br	—		—	9235	8109	—	9564	8358		—	—	—	—
^{34}Se	—		—	9939	8718	—	10 272	8972		—	7490,4	8389,7	8628,2
^{33}As	8912		—	10 711	9395	—	11 048	9652		—	8090,8	9106	9348,2
^{32}Ge	—		—	11 587	10 174	—	11 922	10 435		—	—	—	—
^{31}Ga	—		—	12 595	11 023	—	12 950	11 290		—	—	—	—
^{30}Zn	11 163		—	13 692	11 985	—	14 053	12 257		—	—	11837	12 106,4
^{29}Cu	12 070		—	14 870	13 053	—	15 296	13 330		—	—	12 984,4	13 261,9
^{28}Ni	13 120		—	16 280	14 279	—	16 708	14 566		—	—		—
^{27}Co	14 240		—	18 000	15 657	—	18 297	15 968		—	—		—
^{26}Fe	15 710		—	19 730	17 255	—	20 149	17 567		—	—		—

Продолжение табл. 35.3

Элемент	Конечный уровень (начальный уровень L_I)			Конечный уровень (начальный уровень L_{II})			Конечный уровень (начальный уровень L_{III})				Край поглощения		
	M_{II}	M_{III}	$N_{II,\,III}$	M_I	M_{IV}	N_I	M_I	M_{IV}	M_V	N_I	L	L_{II}	L_{III}
^{25}Mn	17 540		—	21 820	19 120	—	22 270	19 450		—	—	—	
^{24}Cr	—		—	24 290	21 280	—	24 790	21 670		—	—	—	
^{23}V	—		—	27 320	23 850	—	27 770	24 260		—	—	—	
^{22}Ti	—		—	30 880	27 020	—	31 360	27 390		—	—	26 290	
^{21}Sc	—		—	35 130	31 010	—	35 600	31 330		—	—	—	
^{20}Ca	—		—	40 460	35 950	—	40 960	36 320		—	—	35 630	
^{19}K	—		—	47 230	—	—	47 740	—		—	—	—	
^{18}Ar	—		—	—	—	—	—	—		—	—	50 100	
^{17}Cl	—		—	67 250	—	—	67 840	—		—	—	60 900	
^{16}S	—		—	79 290	—	—	79 980	—		—	—	75 700	
^{15}P	—	—	—	—	103 800	—	—	—	103 800	—	—	—	—
^{14}Si	—	—	—	—	135 500	—	—	—	135 500	—	—	—	125 500
^{13}Al	—	—	—	—	169 620	—	—	—	170 560	—	—	169 600	170 560
^{12}Mg	—	—	—	—	249 080	—	—	—	250 450	—	~200 000	249 000	250 250
^{11}Na	—	—	—	—	405 450	—	—	—	405 450	—	—	—	—

Таблица 35.4

Диаграммные линии и края поглощения *M*-серии для элементов от U до Ni (длины волн даны в *kX*-единицах) [2]

Элемент	Конечный уровень (начальный уровень M_I)	Конечный уровень (начальный уровень M_{II})			Конечный уровень (начальный уровень M_{III})				
	$N_{II, III}$	N_I	N_{IV}	O_{IV}	N_I	N_{IV}	N_V	O_I	$O_{IV, V}$
^{92}U	2,745	3,322	2,813	2,440	4,322	3,514	3,473	3,114	2,941
^{90}Th	2,938	—	3,006	2,613	4,554	3,710	3,672	—	3,124
^{83}Bi	3,732	—	3,829	—	5,526	4,560	4,522	4,096	3,926
^{82}Pb	3,864	—	3,964	—	5,694	4,705	4,665	4,235	4,063
^{81}Tl	4,005	—	4,110	—	5,870	4,855	4,815	—	4,207
^{79}Au	4,291	—	4,424	—	6,241	5,175	5,135	4,693	4,514
^{78}Pt	4,451	—	4,590	—	6,442	5,346	5,309	4,866	4,682
^{77}Ir	—	—	4,770	—	6,653	5,529	5,490	—	4,859
^{76}Os	—	—	4,944	—	—	5,712	5,670	—	—
^{75}Re	—	—	—	—	—	5,919	5,875	—	—
^{74}W	5,163	—	5,342	—	7,346	6,121	6,076	5,620	—
^{73}Ta	—	—	5,558	—	7,596	6,340	6,299	—	—
^{72}Hf	—	—	—	—	7,871	—	6,530	—	—
^{71}Lu	—	—	—	—	—	—	6,748	—	—
^{70}Yb	—	—	—	—	—	—	7,009	—	—
^{68}Er	—	—	—	—	—	—	7,530	—	—
^{67}Ho	—	—	—	—	—	—	7,849	—	—
^{66}Dy	—	—	—	—	—	—	8,127	—	—
^{65}Tb	—	—	—	—	—	—	8,468	—	—

Элемент	Конечный уровень (начальный уровень M_I)		Конечный уровень (начальный уровень M_{II})			Конечный уровень (начальный уровень M_{III})			
	M_{II}	M_{III}	$N_{II, III}$	M_{IV}	N_I	N_{IV}	M_{IV}	M_V	N_I	N_V
^{64}Gd	—	—	—	—	—	—	—	—	—	8,826
^{63}Eu	—	—	—	—	—	—	—	—	—	9,192
^{62}Sm	—	—	—	—	—	—	—	—	—	9,580
^{60}Nd	—	—	—	—	—	—	—	—	—	10,483
^{59}Pr	—	—	—	—	—	—	—	—	—	10,975
^{58}Ce	—	—	—	—	—	—	—	—	—	11,511
^{50}Sn	—	—	—	47,3	—	—	54,15		—	—
^{47}Ag	—	—	18,80	54,00	24,35	20,65	—	60,63	25,95	21,80
^{46}Pd	—	—	20,1	56,64	26,2	22,1	—	63,00	28,0	—
^{45}Rh	—	—	—	59,54	27,95	—	—	65,45	29,79	25,00
^{44}Ru	—	—	—	62,18	32,30	25,50	—	68,35	—	26,85
^{42}Mo	—	—	—	68,90	—	—	—	74,90	37,60	—
^{41}Nb	—	—	—	72,13	—	33,0	—	78,45	40,70	34,85
^{40}Zr	—	—	—	76,60	—	—	81,71		—	—
^{39}Y	—	—	—	81,50	—	—	86,50		48,50	—
^{38}Sr	—	—	—	85,93	51,32	—	91,38		53,61	—
^{37}Rb	—	—	—	91,51	57,04	—	96,69		59,48	—
^{35}Br	156,1	144,41	—	109,41	76,86	—	113,8		79,76	—

Элемент	Конечный уровень (начальный уровень M_{IV})				Конечный уровень (начальный уровень M_V)				Край поглощения				
	N_{II}	N_{III}	$N_{VI, VII}$	$O_{II, III}$	N_{II}	N_{III}	N_{VI}	N_{VII}	O_{III}	M_I	M_{II}	M_{III}	M_{IV}	M_V
^{92}U	5,040	4,615	3,708	3,570	4,937		3,914	3,902	—	2,228	2,385	2,877	2,327	3,491
^{90}Th	5,329	4,901	3,934	3,804	5,229		4,143	4,130	—	2,388	2,571	3,062	3,550	3,722
^{83}Bi	6,571	6,149	4,899	4,813	6,508		5,119	5,108	—	—	—	3,893	4,568	4,762
^{82}Pb	6,788	6,371	5,065	—	6,729		5,288	5,274	5,157	3,219	3,469	4,034	4,747	4,945
^{81}Tl	7,017	—	5,239	—	6,960		5,461	5,450	—	—	—	4,184	4,936	5,136
^{80}Hg	—	—	—	—	—		—	—	—	—	—	4,340	5,139	5,331
^{79}Au	7,507	7,086	5,612	—	7,451		5,842	5,828	5,755	3,742	4,085	4,508	5,330	5,529
^{78}Pt	7,774	7,356	5,816	—	7,722		6,045	6,043	5,975	3,603	3,738	4,676	5,544	5,746
^{77}Ir	8,048	7,629	6,025	—	8,002		6,262	6,249	—	—	4,270	4,851	5,754	5,961

Элемент	Конечный уровень (начальный уровень M_{IV})				Конечный уровень (начальный уровень M_V)					Край поглощения				
	N_{II}	N_{III}	$N_{VI, VII}$	$O_{II, III}$	N_{II}	N_{III}	N_{VI}	N_{VII}	O_{III}	M_I	M_{II}	M_{III}	M_{IV}	M_V
^{76}Os	8,342	—	6,254	—	8,293	—	6,477	—		4,037	4,412	5,027	5,975	6,194
^{75}Re	8,646	8,222	6,491	—	8,611	—	6,715	—		—	—	—	—	—
^{74}W	8,977	8,559	6,743	6,794	8,943	8,972	6,978	6,969	—	4,365	4,800	5,427	6,487	6,702
^{73}Ta	9,311	—	7,008	7,083	9,297	—		7,237	—	—	—	—	6,764	6,991
^{72}Hf	9,666	—	7,289	—	9,666	—		7,524	—	—	—	—	—	—
^{71}Lu	—	—	7,583	—	10,047		7,824		—	—	—	—	—	—
^{70}Yb	—	—	7,893	—	10,458		8,122		—	—	—	—	—	—
^{68}Er	—	—	8,576	—	11,348		8,783		—	—	—	—	—	—
^{67}Ho	—	—	8,947	—	11,839		9,143		—	—	—	—	—	—
^{66}Dy	—	—	9,345	—	12,401		9,524		—	—	—	—	—	—
^{65}Tb	—	—	9,772	—	12,949		9,917		—	—	—	—	—	—

Элемент	Конечный уровень (начальный уровень M_{IV})			Конечный уровень (начальный уровень M_V)		Край поглощения			
	N_{II}	N_{III}	$N_{VI, VII}$	$N_{II, III}$	$N_{VI, VII}$	M_I	$M_{II, III}$	M_{IV}	M_V
^{64}Gd	—	—	10,233	13,541	10,394	—	—	—	—
^{63}Eu	—	—	10,723	14,191	10,932	—	—	—	—
^{62}Sm	—	—	11,238	—	11,406	—	—	—	—
^{60}Nd	—	—	12,375	—	12,650	—	—	—	—
^{58}Ce	—	—	13,755	—	14,030	—	—	—	—
^{56}Ba	—	—	—	20,59	—	—	—	15,56	15,89
^{53}I	—	—	—	—	—	—	—	19,66	
^{51}Sb	28,76		—	28,76	—	—	—	—	
^{50}Sn	31,23		—	31,23	—	—	—	24,28	
^{48}Cd	36,75		—	36,75	—	—	—	28,13	
^{47}Ag	39,71		—	39,71	—	—	—	30,82	31,14
^{46}Pd	43,36		—	43,36	—	—	—	—	—
^{45}Rh	47,67		—	47,67	—	—	—	—	—
^{44}Ru	52,34		—	52,34	—	—	—	—	—
^{42}Mo	64,36		—	64,36	—	—	—	—	—
^{41}Nb	72,20		—	72,20	—	—	—	—	—
^{40}Zr	81,71		—	—	—	—	—	—	—
^{39}Y	93,60		—	93,60	—	—	—	—	—
^{37}Rb	127,84	126,71	—	128,66	—	—	—	—	—
^{35}Br	191,04	186,97	—	192,57	—	—	—	—	—
^{34}Se	—	—	—	—	—	—	—	—	227,76
^{29}Cu	—	—	—	—	—	110,7	165,8	—	—
^{28}Ni	—	—	—	—	—	—	188,4	—	—

N-серия

Таблица 35.5

Диаграммные линии *N*-серии для элементов от U до Cs (длины волн даны в Å) [2]

Элемент	Конечный уровень (начальный уровень N_{IV})			Конечный уровень (начальный уровень N_V)			Конечный уровень (начальный уровень N_{VI})		Конечный уровень (начальный уровень N_{VII})
	N_{VI}	O_{II}	$O_{II)}$	$N_{VI, VII}$	O_{II}	O_{III}	O_{IV}	O_V	O_V
^{92}U	31,78	—	—	34,81	—	—	42,08	—	42,08
^{90}Th	33,57	—	—	36,32	—	—	49,53	48,18	50,00
^{83}Bi	—	—	—	—	—	—	91,59		93,09
^{82}Pb	42,25	—	—	44,95	—	—	102,38	100,21	104,30
^{81}Tl	—	—	—	46,35	—	—	115,34	113,03	117,74
^{80}Hg	43,6	—	—	46,4	—	—	—	—	—
^{79}Au	46,9	—	—	49,4	—	—	—	—	—
^{78}Pt	48,0	—	—	50,9	—	—	—	—	—
^{77}Ir	50,1	—	—	52,8	—	—	—	—	—
^{76}Os	51,8	—	—	54,6	—	—	—	—	—
^{74}W	55,8	—	—	58,5	—	—	—	—	—
^{73}Ta	58,1	—	—	61,0	—	—	—	—	—

Элемент	Конечный уровень (начальный уровень N_{IV})			Конечный уровень (начальный уровень N_V)			Конечный уровень (начальный уровень N_{VI})		Конечный уровень (начальный уровень N_{VII})
	N_{VI}	O_{II}	O_{III}	$N_{VI,\ VII}$	O_{II}	O_{III}	O_{IV}	O_V	O_V
^{71}Lu	62,99	—	—	65,7	—	—	—	—	—
^{70}Yb	65,1	—	—	69,4	—	—	—	—	—
^{68}Er	72,7	—	—	76,3	—	—	—	—	—
^{66}Dy	—	97,2		83,37	—	—	—	—	—
^{65}Tb	—	102,23		86,76	—	—	—	—	—
^{63}Eu	—	112,0		—	—	—	—	—	—
^{62}Sm	—	118,12		—	—	—	—	—	—
^{60}Nd	—	129,0		—	—	—	—	—	—
^{59}Pr	—	136,5		—	—	—	—	—	—
^{58}Ce	—	144,4		—	144,4		—	—	—
^{57}La	—	152,62		—	152,62		—	—	—
^{56}Ba	—	163,25	159,06	—	—	164,60	—	—	—
^{55}Cs	—	188,60	183,8	—	—	190,3	—	—	—

35.4. ОТНОСИТЕЛЬНЫЕ ИНТЕНСИВНОСТИ ЛИНИЙ

Интенсивности линий рентгеновского излучения определяются силами осцилляторов и частотами соответствующих переходов, а также статистическими весами уровней атомов. Вычисление сил осцилляторов представляет собой очень трудоемкую задачу. Однако для относительных интенсивностей линий внутри одного мультиплета можно получить простые соотношения, воспользовавшись следующим правилом Бургера—Доргело: если расщеплением начальных (конечных) уровней пренебречь, то суммы интенсивностей тех линий, частоты которых окажутся одинаковыми, пропорциональны статистическим весам конечных (начальных) состояний. Отсюда, в частности, следует для отношения интенсивностей дублета $K_{\alpha_1}K_{\alpha_2}$:

$$I_{K_{\alpha_1}} : I_{K_{\alpha_2}} = 2 : 1,$$

что хорошо подтверждается экспериментом. Для линий триплета

$$L_{\beta_1;\ \alpha_1;\ \alpha_2}: \quad I_{L_{\alpha_1}} : I_{L_{\alpha_2}} : I_{L_{\beta_1}} = 9 : 1 : 5,$$

что также довольно близко к экспериментальным данным.

Таблица 35.6

Относительные интенсивности линий [2]

Элемент	*K*-серия: Конечный уровень					*L*-серия: Конечный уровень (начальный уровень L_I)						
	L_{III}	L_{II}	M_{III}	$N_{II,\ III}$	$M_{IV,\ V}$	M_{II}	M_{III}	M_{IV}	M_V	N_{II}	N_{III}	O_{III}
^{23}V	100	52,1	20,5	—	0,48	^{42}Mo	9,9	14,2	—	—	—	—	—
^{24}Cr	100	51,5	17,9	—	0,66	^{45}Rh	7,9	12,1	—	—	—	—	—
^{25}Mn	100	54,9	22,4	—	0,34	^{46}Pd	6,4	10,0	—	—	—	—	—
^{26}Fe	100	50,0	16,7	—	0,26	^{47}Ag	5,8	9,4	—	—	—	—	—
^{27}Co	100	49,7	16,0	—	0,23	^{73}Ta	6,4	7,4	—	0,4	2,0	2,7	0,8
^{28}Ni	100	49,5	18,7	—	0,20	^{74}W	5,2	8,2	0,5	0,5	1,5	2,0	0,6
^{29}Cu	100	49,7	20,0	—	0,15	^{78}Pt	5,2	8,2	—	—	—	—	—
^{30}Zn	100	50,3	20,7	0,36	—	^{90}Th	—	3,3	—	—	1,5	—	0
^{31}Ga	100	50,6	21,6	—	—	^{92}U	4,1	4,2	—	—	1,5	1,4	0
^{32}Ge	100	49,9	24,0	1,32	—								
^{33}As	100	49,2	21,7	0,69	—								
^{34}Se	100	50,3	28,0	1,07	—								
^{35}Br	100	50,9	22,2	1,73	—								
^{37}Rb	100	49,3	23,0	2,62	—								
^{38}Sr	100	50,3	27,4	4,16	—								
^{39}Y	100	50,0	23,3	3,19	—								
^{40}Zr	100	50,2	27,4	4,50	—								
^{41}Nb	100	49,8	27,9	4,90	—								
^{42}Mo	100	49,9	27,9	5,17	—								
^{44}Ru	100	50,1	29,3	5,63	—								
^{45}Rh	100	50,3	27,9	5,78	—								
^{46}Pd	100	50,0	29,0	6,13	—								
^{47}Ag	100	49,9	29,0	6,17	—								
^{48}Cd	100	49,9	29,7	6,42	—								
^{49}In	100	49,9	29,6	6,47	—								
^{50}Sn	100	49,8	29,6	7,02	—								
^{51}Sb	100	50,3	31,0	7,08	—								
^{52}Te	100	49,7	30,6	7,35	—								
^{74}W	100	47,0	18,1	4,8	0,25								
^{78}Pt	100	52,0	20,0	7,8	0,38								

L-серия: Конечный уровень (начальный уровень L_{II})

Элемент	M_I	M_{IV}	N_I	N_{IV}	O_{IV}
^{42}Mo	—	62	—	6,8	—
^{45}Rh	—	61	—	7,7	—
^{46}Pd	—	59	—	8,5	—
^{47}Ag	—	59	—	12	—
^{73}Ta	1,2	57	0,6	11	0,2
^{74}W	1,3	52	0,4	9	0,3
^{78}Pt	1,5	51	—	11	—
^{90}Th	1,8	52	0	14	3,9
^{92}U	1,0	49,4	0	12	2,2

Продолжение табл. 35.6

Элемент	Конечный уровень (начальный уровень L_{III})						
	M_I	M_{IV}	M_V	N_I	N_V	O_I	$O_{IV,\,V}$
^{42}Mo	—	13	100	—	8	—	—
^{45}Rh	—	13	100	—	13	—	—
^{46}Pd	—	12	100	—	13	—	—
^{47}Ag	—	12	100	—	21	—	—
^{73}Ta	3,6	11	100	—	20	0,4	—
^{74}W	3,2	11,5	100	1,0	20	—	0,2
^{78}Pt	3,4	11,4	100	1,5	23	—	—
^{90}Th	3,6	12	100	1,4	26	0,5	—
^{92}U	2,4	11	100	1,6	28	—	—

35.5. ШИРИНА И ФОРМА ЛИНИЙ РЕНТГЕНОВСКОГО ИЗЛУЧЕНИЯ

Ширина лиинии характеристического спектра рентгеновского излучения равиа сумме тирии верхнего и нижиего уровней атома. Полная ширииа уровия определяется радиационными и безрадиациоиными (эффект Оже) переходами. Оже-переходы какого-либо определенного типа возможны только в том случае, если энергия перехода превышает энергию связи конвертируемого электрона. Поэтому на кривой зависимости ширины данной линии от Z появляются изломы.

Теоретическая форма линии имеет симметричный вид относительно максимума интенсивности. Однако для ряда элементов форма линии несимметрична. Особенно сильна асимметрия у элементов переходной группы железа. Такая асимметрия линии объясняется спин-спиновым взаимодействием $2p$-электронов с электронами незаполненной $3d$-оболочки [3]. Это взаимодействие приводит к расщеплеиию $2p$-уровня, несимметричному относительно начального положения $2p$-уровня. Так как расщепление меньше полной ширины каждого из подуровней, то форма результирующей линии становится асимметричной. Аналогичная картина асимметрии линий рентгеновского излучения наблюдается в некоторых химических соединениях и сплавах и связана с характером химических связей [3].

Количественно асимметрию линий характеризуют индексом асимметрии a, равным отношению длинноволиового отрезка α ширины линии к коротковолновому отрезку β (рис. 35.1):

$$a = \alpha/\beta.$$

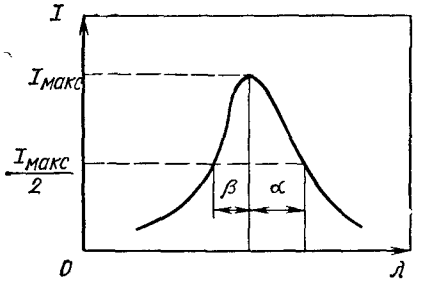


Рис. 35.1. Схема, поясняющая индексы асимметрии рентгеновской линии.

Таблица 35.7

Ширииа линий K-серии на середине ординаты максимума иитенсивиости [2]

Элемент	Переход				Элемент	Переход			
	$K—L_{III}$		$K—L_{II}$			$K—L_{III}$		$K—L_{II}$	
	Δλ, X	ΔE, эв	Δλ, X	ΔE, эв		Δλ, X	ΔE, эв	Δλ, X	Δ E, эв
^{20}Ca	1,60	1,76	1,50	1,69	^{32}Ge	0,43	3,4	0,46	3,7
^{22}Ti	1,22	2,00	1,43	2,33	^{38}Sr	0,35	5,7	0,36	5,8
^{23}V	1,15	2,26	1,35	2,67	^{40}Zr	0,33	6,6	0,35	6,9
^{24}Cr	1,03	2,22	1,23	2,89	^{41}Nb	0,33	7,4	0,31	6,9
^{25}Mn	1,10	3,09	1,22	3,43	^{42}Mo	0,29	7,2	0,32	7,7
^{26}Fe	1,01	3,34	1,12	3,60	^{44}Ru	0,29	8,7	0,29	8,6
^{27}Co	0,81	3,1	0,95	3,7	^{45}Rh	0,29	9,5	0,29	9,4
^{28}Ni	0,68	3,07	0,85	3,78	^{46}Pd	0,28	10,1	0,29	10,3
^{29}Cu	0,58	3,0	0,77	4,0	^{47}Ag	0,28	11,1	0,29	11,3
^{30}Zn	0,51	3,1	0,58	3,5	^{74}W	0,152	43,0	0,153	43,3

Ширина линий *L*-серии

Элемент	Переход											
	$L_I - M_{II}$		$L_I - M_{III}$		$L_I - N_{II}$		$L_I - N_{III}$		$L_I - O_{III}$		$L_{II} - M_{IV}$	
	Δλ, X	ΔE, эв	Δλ, X	ΔE, эв	Δλ, X	ΔE, эв	Δλ, X	ΔE, эв	Δλ, X	ΔE, эв	Δλ, X	ΔE, эв
^{47}Ag	7,1	5,9	7,9	6,6	9,7	11,0	9,0	10,2	—	—	3,0	2,4
^{73}Ta	2,25	14,1	1,61	11,7	1,15	11,6	0,99	10,0	—	—	0,94	6,6
^{74}W	2,22	15,1	1,59	12,3	1,12	12,1	1,00	11,0	1,40	16,2	0,85	6,5
^{75}Re	2,10	16,4	1,63	13,6	1,14	13,2	1,02	12,0	—	—	0,81	6,5
^{76}Os	2,05	17,1	1,65	14,7	1,13	14,0	1,00	12,6	—	—	0,76	6,6
^{77}Ir	1,98	17,7	1,56	14,9	1,10	14,6	0,99	13,3	—	—	0,73	6,8
^{78}Pt	2,05	19,4	1,70	17,2	—	—	1,09	15,6	—	—	0,84	8,3
^{79}Au	2,05	20,7	1,70	18,4	1,20	18,1	1,07	16,4	—	—	0,81	8,5
^{81}Tl	1,89	21,6	1,60	19,7	1,12	19,3	1,02	17,8	—	—	0,75	9,0
^{82}Pb	1,83	22,2	1,39	18,3	1,08	19,9	1,04	19,4	—	—	0,66	8,4
^{83}Bi	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	0,70	9,6
^{92}U	1,46	32,2	0,77	18,8	1,17	39,4	0,94	32,4	—	—	0,60	14,3

Элемент	Переход											
	$L_{II} - N_{IV}$		$L_{II} - O_{IV}$		$L_{III} - M_{IV}$		$L_{III} - M_V$		$L_{III} - N_I$		$L_{III} - N_V$		$L_{III} - O_{IV,V}$	
	Δλ, X	ΔE, эв	Δλ, X	ΔE, эв	Δλ, X	ΔE, эв	Δλ, X	ΔE, эв	Δλ, X	ΔE, эв	Δλ, X	ΔE, эв	Δλ, X	ΔE, эв
^{47}Ag	2,88	3,95	—	—	—	—	4,5	3,2	—	—	3,00	3,72	—	—
^{73}Ta	0,99	9,5	—	—	—	—	—	—	—	—	1,31	9,8	—	—
^{74}W	0,91	9,3	0,62	7,0	—	—	1,26	7,2	—	—	1,23	9,8	0,65	6,5
^{75}Re	0,87	9,5	—	—	—	—	—	—	—	—	1,23	9,8	—	—
^{76}Os	0,80	9,4	—	—	—	—	—	—	—	—	1,10	9,9	—	—
^{77}Ir	1,12	9,6	—	—	—	—	1,19	8,1	—	—	1,01	9,7	—	—
^{78}Pt	0,85	11,4	—	—	—	—	1,17	8,4	—	—	1,09	11,1	—	—
^{79}Au	0,80	11,5	—	—	—	—	1,13	8,6	—	—	1,04	11,2	—	—
^{81}Tl	0,71	11,7	—	—	—	—	1,11	9,4	—	—	0,95	11,5	—	—
^{82}Pb	0,65	11,4	—	—	—	—	1,05	9,5	—	—	0,92	11,8	—	—
^{83}Bi	0,67	12,5	—	—	—	—	1,03	9,8	—	—	0,90	12,1	—	—
^{92}U	0,49	15,9	0,47	16,4	0,99	14,4	0,88	13,1	0,97	19,4	0,74	16,1	0,50	11,9

Ширина линий *M*-серии

Элемент	Переход	Δλ, X	ΔE, эв	Элемент	Переход	Δλ, X	ΔE, эв
^{38}Sr	$M_V - N_{II, III}$	2,02	1,99	^{47}Ag	$M_{II} - M_{IV}$	0,9	3,8
^{40}Zr	$M_V - N_{II, III}$	1,17	2,06	^{47}Ag	$M_{III} - M_V$	1,1	3,7
^{41}Nb	$M_V - N_{II, III}$	1,45	3,44	^{47}Ag	$M_{II} - N_{IV}$	0,26	7,5
^{42}Mo	$M_V - N_{II, III}$	1,02	3,05	^{48}Cd	$M_V - N_{II, III}$	1,65	14,8
^{44}Ru	$M_V - N_{II, III}$	0,85	3,79	^{50}Sn	$M_V - N_{II, III}$	1,32	16,4
^{45}Rh	$M_V - N_{II, III}$	0,84	4,57	^{51}Sb	$M_V - N_{II, III}$	1,26	18,5
^{46}Pd	$M_V - N_{II, III}$	1,03	6,74	^{52}Te	$M_V - N_{II, III}$	1,07	18,5
^{47}Ag	$M_{III} - N_V$	0,33	8,6	^{56}Ba	$M_V - N_{II, III}$	0,24	7,0
^{47}Ag	$M_V - N_{II, III}$	1,45	13,6	^{57}La	$M_V - N_{II, III}$	0,27	9,1
				^{58}Ce	$M_V - N_{II, III}$	0,28	10,6

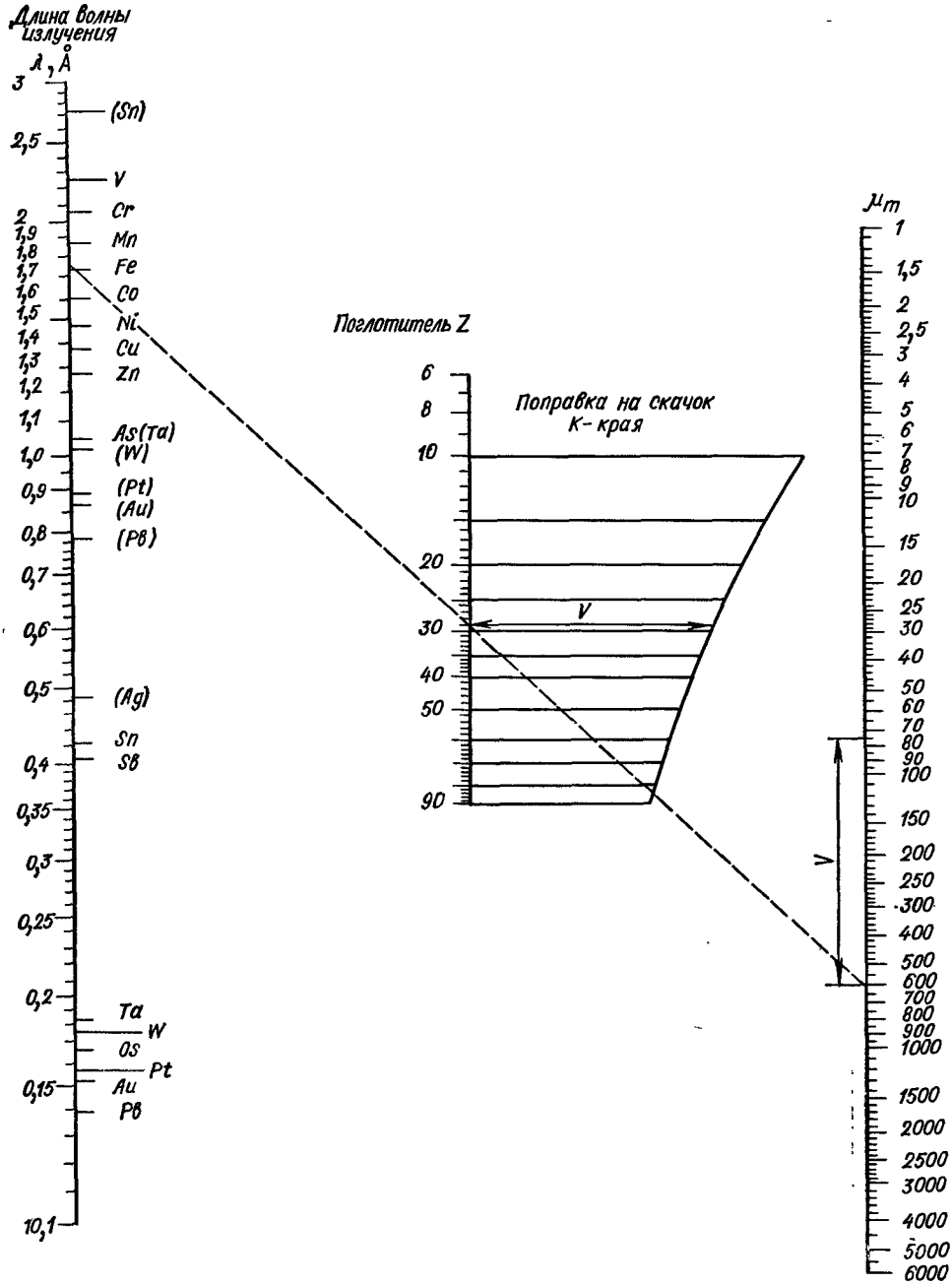


Рис. 35.2. Номограмма для определения массового коэффициента ослабления μ_m [2].

Элемент	$M_V - N_{VII}$		$M_V - N_{VI}$		$M_{IV} - N_{VI, VII}$		$M_{III} - N_V$		$M_{IV} - N_{III}$		$M_{IV} - O_{II, III}$		$M_V - N_{II}$		$M_V - N_{III}$		$M_{III} - N_I$	
	Δλ, X	ΔE, эв	Δλ, X	ΔE, эв	Δλ, X	ΔE, эв	Δλ, X	ΔE, эв	Δλ, X	ΔE, эв	Δλ, X	ΔE, эв	Δλ, X	ΔE, эв	Δλ, X	ΔE, эв	Δλ, X	ΔE, эв
^{74}W	6,6	1,68	1,2	0,31	7,85	2,14	18,0	6,0	4,97	0,84	10,9	3,01	80,5	12,5	13,3	2,3	—	—
^{77}Ir	7,7	2,5	—	—	6,5	2,2	23,0	9,5	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
^{78}Pt	5,8	2,0	—	—	5,3	1,9	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
^{79}Au	6,8	2,5	6,4	2,5	18.0	8,5	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	32	10,0

Таблица 35.8

Индексы асимметрии [2]

Элемент	K_{α_1}	K_{α_2}	Элемент	K_{α_1}	K_{α_2}	Элемент	K_{α_1}	K_{α_2}
^{17}Cl	0,9	1,0	^{25}Mn	1,5	1,3	^{31}Ga	1,0	1,2
^{19}K	1,0	1,0	^{26}Fe	1,6	1,3	^{32}Ge	1,0	1,1
^{21}Sc	1,0	1,0	^{27}Co	1,4	1,3	^{35}Br	1,0	1,1
^{22}Ti	1,2	1,0	^{28}Ni	1,2	1,3	^{38}Sr	1,0	1,1
^{23}V	1,2	1,1	^{29}Cu	1,2	1,3	^{40}Zr	1,0	1,1
^{24}Cr	1,4	1,0	^{30}Zn	1,1	1,3	^{42}Mo	1,0	1,0

35.6. ПОГЛОЩЕНИЕ РЕНТГЕНОВСКОГО ИЗЛУЧЕНИЯ ПРИ ПРОХОЖДЕНИИ ЧЕРЕЗ ВЕЩЕСТВО

Поглощение рентгеновского излучения в веществе сопровождается образованием фотоэлектронов, оже-электронов и испусканием атомами вещества вторичных фотонов. Ослабление интенсивности рентгеновского излучения происходит по экспоненциальному закону:

$$I(x) = I_0 \exp(-\mu x).$$

Здесь $I(x)$ — интенсивность рентгеновского излучения на расстоянии x от поверхности вещества; I_0 — интенсивность на поверхности; μ, $см^{-1}$ — линейный коэффициент ослабления.

Так как энергия рентгеновского излучения намного превосходит энергию химической связи, то поглощение рентгеновского излучения атомами вещества происходит независимо. Если вещество состоит из атомов одного сорта, то полезно ввести массовый коэффициент ослабления $\mu_m = \mu/\rho$, где ρ — плотность, $г/см^3$.

На рис. 35.2 приведена построенная по экспериментальным данным номограмма, позволяющая определять μ_m в зависимости от Z — атомного номера поглощающих атомов и λ — длины волны излучения. Следует иметь в виду, что коэффициент поглощения как функция длины волны λ испытывает скачки при λ, равной λ_K, λ_{L_I} и т. д., где λ_K, λ_{L_I} ... — длины волн краев поглощения K-, L-серий. Край поглощения определяется переходом из данного уровня на первый из незаполненных уровней, для которого выполняется условие дипольного поглощения. Значения краев поглощения для различных элементов приведены в табл. 35.2—35.4. Физически эти скачки в μ_m связаны с тем, что при $\lambda < \lambda_K$ фотоэффект может происходить на всех электронах атома, при $\lambda > \lambda_K$ из игры исключаются электроны K-оболочки. Аналогичная картина имеет место при $\lambda = \lambda_L$. Поправки на эти скачки также приведены на диаграмме рис. 35.2, штриховая линия на которой иллюстрирует нахождение μ_m для поглощения $K\beta_1$ линии железа с длиной волны 1,753 Å в медн ($Z = 29$). Через точки $\lambda = 1{,}753$ Å и $Z = 29$ проводнм лннию до пересечения с осью μ_m. Это дает значение для μ_m, равное 600. По табл. 35.2 и 35.3 определяем, что рассматриваемая длнна волны лежит между краями поглощения K- и L_I -серий в меди. Поправка на скачок K-края, измеряемая горизонтальным отрезком V, против значения $Z = 29$, откладывается вверх от цифры 600; получающаяся точка 75 дает истнное значение μ_m.

Для сложного химического вещества лннейный коэффициент поглощенння может быть выражен через весовые концентрации C_i и массовые коэффициенты ослабленння $(\mu_m)_i$ элементов, образующих данное соединение:

$$\mu = \rho \sum_i C_i (\mu_m)_i. \qquad (7)$$

Здесь ρ — плотность сложного вещества, $г/см^3$. Суммирование пронзводится по всем элементам, входящим в сложную молекулу.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Рентгеновские** лучн. Пер. с нем. и англ. Под ред. М. А. Блохина. М., Изд-во иностр. лит., 1960.
2. **Блохин М. А.** Фнзика рентгеновских лучей. М., Гостехтеориздат, 1953.
3. **Вайнштейн Э. Е.** Рентгеновские спектры атомов в молекулах химических соединений и в сплавах. М.—Л., Изд-во АН СССР, 1950.

VI. ЯДЕРНАЯ ФИЗИКА

ГЛАВА 36

ЭЛЕМЕНТАРНЫЕ ЧАСТИЦЫ

36.1. ВВЕДЕНИЕ

Элементарными в традиционном смысле этого слова следовало бы называть самые простые, неделимые частицы материи. Однако подавляющее большинство частиц, которые относят к разряду элементарных, не удовлетворяют этому критерию, так как они нестабильны и в результате распада превращаются в другие элементарные частицы. Такая нестабильность не означает, что распадающиеся элементарные частицы состоят из конечных продуктов своего распада, которые можно было бы тогда считать истинно элементарными частицами. Это видно уже из того факта, что схемы распада многих элементарных частиц, а следовательно и конечные продукты распада, могут быть разными. Как известно, традиционное понятие элементарности не применимо к тому, что принято называть элементарными частицами, поэтому в настоящее время существует скорее не определение того, что такое элементарные частицы, а правило, по которому в разряд элементарных частиц относят все мельчайшие частицы материи, за исключением атомных ядер с массовым числом больше единицы.

36.2. ОСНОВНЫЕ ГРУППЫ И ХАРАКТЕРИСТИКИ ЭЛЕМЕНТАРНЫХ ЧАСТИЦ

В зависимости от того, в каких взаимодействиях участвуют элементарные частицы, их разбивают [1] на три основные группы. Самая большая группа — *адроны* — элементарные частицы, участвующие в сильных взаимодействиях. Адроны разделяются на мезоны, частицы с целочисленным значением спина, и барионы, частицы с полуцелым значением спина. Вторую группу — группу *лептонов* образуют частицы, участвующие только в слабом и электромагнитном взаимодействиях. Третья группа состоит из одного *фотона*, участвующего только в электромагнитном взаимодействии.

Строгие кваитовые числа элементарных частиц сохраняются во всех взаимодействиях. К их числу относятся:

электрический заряд — величина, кратная для всех частиц заряду электрона;

электронный лептонный заряд $l_e = 1$ для электрона e^- и электронного нейтрино ν_e и $l_e = -1$ для позитрона e^+ и электронного антинейтрино $\bar{\nu}_e$. Для остальных частиц $l_e = 0$;

мюонный лептонный заряд $l_\mu = 1$ для μ^- и ν_μ и $l_\mu = -1$ для μ^+ и $\bar{\nu}_\mu$. Для остальных частиц $l_\mu = 0$. Различие электронного и мюонного лептонных зарядов определяет два типа нейтрино (ν_e и ν_μ);

барионный заряд B, равный 1 для барионов и —1 для антибарионов. Для остальных элементарных частиц $B = 0$. Сохранение барионного заряда означает, что во всех ядерных реакциях любое изменение полного числа барионов должно сопровождаться точно таким же изменением полного числа антибарионов;

спин J — величина, характеризующая внутренний момент количества движения. Сохранение спина связано со свойством изотропности пространства по всем направлениям.

Нестрогие квантовые числа элементарных частиц сохраняются только при определенных взаимодействиях. К их числу относятся: изотопический спин, гиперзаряд, пространственная и зарядовая четности, G-четность и квантовое число A.

Изотопический спин I определяет число частиц в одном зарядовом мультиплете. Сильные взаимодействия элементарных частиц обладают свойством инвариантности относительно величины изотопического спина. Слабое и электромагнитное взаимодействия нарушают симметрию в изотопическом пространстве, поэтому изотопический спин перестает быть строгим квантовым числом.

Странность S была введена для объяснения экспериментально наблюдаемого множественного (ассоциативного) рождения гиперонов и K-мезонов. В сильных взаимодействиях имеет место закон сохранения странности [1, 2]. Это в частности приводит к тому, что гипероны и K-мезоны стабильны по отношению к сильным распадам и могут распадаться только в результате слабых взаимодействий, нарушающих закон сохранения странности. Максимальное значение $|S|$ для известных в настоящее время элементарных частиц равно трем.

Гиперзаряд Y определяется как сумма $B + S$, он связан с зарядом Q и величиной I_3 соотношением Гелл-Мана—Нишиджимы: $Q = I_3 + Y/2$.

Пространственная четность P определяется характером преобразования волновой функции элементарных частиц при зеркальном отражении. Собственные значения оператора отражения P определяют обычно, исходя из того, что двойное отражение есть тождественное преобразование, т. е. $P^2 = 1$.

Зарядовая четность C определяется как собственное значение оператора зарядового сопряжения. Этот оператор антикоммутирует с оператором полного заряда системы. Поэтому только состояния с полным зарядом, равным нулю, могут обладать определенным значением зарядовой четности. В слабых взаимодействиях происходит нарушение законов сохранения *P*- и *C*-четностей. Однако «обычные» слабые взаимодействия обладают *CP*-инвариантностью (закон сохранения комбинированной четности).

В 1964 г. было обнаружено, что наряду с «обычным» *CP*-инвариантным распадом $K_L \to 3\pi$ с малой вероятностью (порядка 0,2%) происходит распад $K_L \to 2\pi$, в котором *CP*-четность нарушается. Возможно, что *CP*-неинвариантное взаимодействие «сверхслабое» и тогда оно может проявляться практически только в распадах каонов. Это связано с исключительно малой разницей масс нейтральных каонов — K_S и K_L, для которых *CP*-четности различны.

G-четность определяется как собственное значение оператора *G*-четности, равного $C\exp(i\pi I_y)$ [3]. Она определена только для сильновзаимодействующих нестранных частиц с нулевым барионным зарядом, тем самым это могут быть либо π- и η-мезоны, либо образования элементарных частиц с *S* и *B*, равными нулю. *G*-четность сохраняется только в сильных взаимодействиях. В отличие от *C*-четности она имеет определенное значение и для заряженных членов изотопического мультиплета. Сохранение *G*-четности накладывает целый ряд запретов в сильных распадах элементарных частиц.

Квантовое число A введено для объяснения некоторых эмпирических правил отбора в распадах мезонов. Приближенный характер *A*-инвариантности распадов мезоиов связан с тем, что учет роли виртуальных барионов в этих распадах приводит к нарушению *A*-инвариантности. Однако это нарушение может быть малым, так как порог рождения пары барион — антибарион относительно велик [4].

36.3. УНИТАРНАЯ СИММЕТРИЯ И СООТНОШЕНИЕ МЕЖДУ МАССАМИ ЭЛЕМЕНТАРНЫХ ЧАСТИЦ

Унитарная симметрия элементарных частиц может рассматриваться как обобщение симметрии в изотопическом пространстве. Основой изотопической симметрии является инвариантность сильных взаимодействий относительно преобразований в пространстве изотопического спина. Близость масс изотопических мультиплетов, различающихся только значением гиперзаряда *Y*, позволяет сделать предположение, что сильное взаимодействие состоит из собственно сильного взаимодействия и умеренно сильного взаимодействия. Собственно сильное взаимодействие допускает более высокую симметрию — унитарную симметрию элементарных частиц, которая включает в одну группу (супермультиплет) элемеитарные частицы, относящиеся к разным значениям *I* и *Y*. Умеренно сильное взаимодействие нарушает унитариую симметрию, снимая вырождение по массам внутри супермультиплетов.

При симметрии в изотопическом пространстве сохраияются две величины I^2, I_3, а изотопические мультиплеты даются неприводимыми представлениями группы *SU*(2). При унитарной симметрии сохраняются уже три величины: I^2, I_3, *Y*, а унитарные супермультиплеты даются неприводимыми представлениями группы *SU* (3) [5].

Наинизшим физически возможным (т. е. имеющим целочисленные значения *Y*) неприводимым представлением группы *SU* (3) является октет, которому ставят в соответствие восемь барионов p, n, Λ^0, Σ^+, Σ^-, Σ^0, Ξ^-, Ξ^0. Из октетов строятся неприводимые представления более высокого ранга, например первые два: декуплет и 27-плет. Декуплет образуют барионные резонансы с $J^P = {}^3/_2{}^+$, а также Ω^--гиперон. Барионные резонансы с $J^P = {}^5/_2{}^+$ и $J^P = {}^7/_2{}^+$ группируются в октет ($J^P = {}^5/_2{}^+$) и декуплет ($J^P = {}^7/_2{}^+$). Аналогично строятся унитарные супермультиплеты для мезонов и мезонных резонансов.

Преобразоваиия группы *SU*(3) можно рассматривать как преобразование в пространстве унитарного спина *U*. Каждому супермультиплету соответствует определенное значеиие унитарного спина, при этом величина $2U + 1$ равна числу различных значений гиперзаряда *Y* в данном супермультиплете. Для октетов $U = 1$, для декуплетов $U = {}^3/_2$.

Таблица 36.1

Унитарные супермультиплеты элеиентарных частиц [8]

Октеты

Y	*I*	I_3	Барионы $J^P = {}^1/_2{}^+$	Мезоны $J^P = 0^-$	Мезоны $J^P = 1^-$
1	${}^1/_2$	${}^1/_2$	p	K^+	K^{*+}
1	${}^1/_2$	$-{}^1/_2$	n	K^0	K^{*0}
0	1	1	Σ^+	π^+	ρ^+
0	1	0	Σ^0	π^0	ρ^0
0	1	-1	Σ^-	π^-	ρ^-
0	0	0	Λ	η	φ
-1	${}^1/_2$	${}^1/_2$	Ξ^0	$\overline{K}^0$	$\overline{K}^{*0}$
-1	${}^1/_2$	$-{}^1/_2$	Ξ^-	K^-	K^{*-}

Декуплет барионов $J^P = {}^3/_2{}^+$

Частица	I_3	*I*	*Y*
Δ^{++}	${}^3/_2$	${}^3/_2$	1
Δ^+	${}^1/_2$	${}^3/_2$	1
Δ^0	$-{}^1/_2$	${}^3/_2$	1
Δ^-	$-{}^3/_2$	${}^3/_2$	1
Y_1^{*+}	1	1	0
Y_1^{*0}	0	1	0
Y_1^{*-}	-1	1	0
Ξ^{*0}	$-{}^1/_2$	${}^1/_2$	-1
Ξ^{*-}	${}^1/_2$	${}^1/_2$	-1
Ω^-	0	0	-2

Расщепление по массам элементарных частиц внутри супермультиплета получают, сделав простейшее предположение, что умеренно сильное взаимодействие компонент супермультиплета в вакууме описывается неким эффективным постоянным полем. Квантовыми числами, характеризующими такое расщепление, являются *Y* и $I(I + 1) - Y^2/4$. Тогда для масс барионов, входящих в супермультиплет, справедливо соотношение

Гелл-Мана—Окубо:

$$m = m_0 + \Delta m_1 Y + \Delta m_2 [I(I+1) - Y^2/4]. \quad (36.1)$$

Отсюда следует, что массы барионов, входящих в октет, связаны условием

$$2(m_\Xi + m_N) = m_\Sigma + 3m_\Lambda . \quad (36.2)$$

Здесь m_i — масса покоя i-й элементарной частицы.

Из (36.1) для барионного декуплета следует условие эквидистантности масс

$$m_\Omega - m_\Xi = m_\Xi - m_{Y^*} = m_{Y^*} - m_\Delta . \quad (36.3)$$

По аналогичной схеме получают соотношение между квадратами масс элементарных частиц, входящих в мезонные октеты;

$$4m_K^2 = m_\pi^2 + 3m_\eta^2 . \quad (36.4)$$

Формулы (36.2)—(36.4) очень хорошо согласуются с экспериментом. Исключение представляет только октет векторных мезонов (φ, K^*, ρ), для которого согласие хуже.

36.4. СИМВОЛИКА ЭЛЕМЕНТАРНЫХ ЧАСТИЦ

Помимо обычных, «разговорных», наименований элементарных частиц, которые приводятся в таблицах в колонке «Частица», существует предложенная Чу, Гелл-Маном и Розенфельдом [6] символика мезонов и барионов, обеспечивающая группировку элементарных частиц по изотопическому спину и гиперзаряду. В табл. 36.2 и 36.3 приведены символы барионов и мезонов в зависимости от I и Y, объединиеных в унитарные супермультиплеты. Дополнительные обозначения, которые записываются в виде индексов у символа элементарной частицы, обеспечивают группировку частиц по значению четности и спина, а также связывают частицы, расположенные на одной траектории Редже [7]. Правила, по которым вводится индекс у символов барионов и мезонов, приведены в табл. 36.3. Например, протон и нейтрон, для которых $I = {}^1/_2$; $Y = 1$; $J^P = {}^1/_2{}^+$ обозначаются символом N_α (или N_α^I).

Таблица 36.2

Символы мезоиов и мезонных резонансов* [8]

I	Y		
	$+1$	0	-1
0		η	
$1/2$	K		$\bar{K}$
1		π	

Символы барионов и барионных резонансов* [8]

I	Y			
	$+1$	0	-1	-2
0		Λ		Ω
$1/2$	N		Ξ	
1		Σ		
$3/2$	Δ			

* Штриховой линней показаны частицы, объединяющиеся в унитарный октет. Штрих-пунктирная линия показывает объединение частиц в унитарный декуплет.

Таблица 36.3

Иидексы у символов барионов и мезоиов [8]

Частица	Индекс									
		верхний	I	II	I	II	I	II	I	II
		нижний	α	α	β	β	γ	γ	δ	δ
Барион	J^P		1^+	5^+	1^-	5^-	3^-	7^-	3^+	7^+
			2	2	2	2	2	2	2	2
Мезон	J^P		0^+	2^+	0^-	2^-	1^-	3^-	1^+	3^+

36.5. ЭЛЕМЕНТАРНЫЕ ЧАСТИЦЫ, СТАБИЛЬНЫЕ ПО ОТНОШЕНИЮ К СИЛЬНЫМ РАСПАДАМ

Приведенные в табл. 36.4 погрешности измерений, как правило, представляют собой среднеквадратические отклонения. Если приведенное значение получено в результате обработки данных различных экспериментов и погрешности измерений распределены не по нормальному закону, то истинное значение погрешности есть вычисленная погрешность, умноженная на приводимый в таблице множитель S («шкала»).

Q — значение выделяемой при распаде энергии;

P — наибольшее возможное значение импульса частиц;

c — скорость света.

Таблица 36.4

Характеристики элементарных частиц, стабильных по отношению к сильным распадам [9, 10]

Класс	Частица	Квантовые числа $I(J^{PG})\,C$	Масса покоя, *Мэв*	Разность масс, *Мэв*	Среднее время жизни, *сек*	Каналы распада: Схема распада	Каналы распада: Относительная вероятность, %	Каналы распада: Q, *Мэв*	Каналы распада: $\frac{P}{c}$, $\frac{Мэв}{c}$
Фотон	γ	$(1^-)\ C^-$	$0\ (<2\cdot10^{-21})$	—	Стабилен	—	—	—	—
Лептоны	ν_e	$\left(\frac{1}{2}\right)$	$0\ (<60\ эв)$	—	Стабильны	—	—	—	—
	ν_μ	$\left(\frac{1}{2}\right)$	$0\ (<1{,}2)$						
	$e^{\mp}$	$\left(\frac{1}{2}\right)$	$0{,}5110034 \pm \pm 0{,}0000014$	—	Стабильны	—	—	—	—
	$\mu^{\mp}$	$\left(\frac{1}{2}\right)$	$105{,}65948 \pm \pm 0{,}00035$	$m_{\pi^\pm} - m_{\mu^\pm} = 33{,}909 \pm \pm 0{,}006$	$(2{,}1994 \pm \pm 0{,}0006)\ 10^{-6}$, $S = 2{,}2$	$e\,\nu_\mu\,\bar{\nu}_e$ $e\gamma\gamma$ $3e$ $e\gamma$	100 $<1{,}6\cdot10^{-5}$ $<6\cdot10^{-9}$ $<2{,}2\cdot10^{-8}$	105,15	52,8
Мезоны	$\pi^\pm$	$1\,(0^{--})\ C_n^-$	$139{,}5688 \pm \pm 0{,}0064$	$m_{\pi^\pm} - m_\pi^0 = 4{,}6043 \pm \pm 0{,}0037$	$(2{,}6030 \pm \pm 0{,}0023) 10^{-8}$	$\mu\,\nu_\mu$ $e\,\nu_e$ $\mu\,\nu_\mu\,\gamma$ $\pi^0 e\,\nu_e$ $e\nu_e\gamma$ $e\nu e^+e^-$	100 $(1{,}24\pm0{,}03)\ 10^{-4}$ $(1{,}24\pm0{,}25)\ 10^{-4}$ $(1{,}01\pm0{,}09)\ 10^{-8}$ $(3{,}0\pm0{,}5)\cdot10^{-8}$ $<3{,}4\cdot10^{-8}$	33 92 139,07 33,92 4,09 — —	29,80 69,80 29,80 4,50 70 70
	π^0	$1(0^{--})\ C_n^-$	$134{,}9645 \pm \pm 0{,}0074$		$(0{,}84\pm0{,}10)\ 10^{-16}$, $S = 1{,}6$	$\gamma\gamma$ γe^+e^- $\gamma\gamma\gamma$ $e^+e^-e^+e^-$ $\gamma\gamma\gamma\gamma$	98,8 $1{,}19\pm0{,}05$ $< 5\cdot10^{-6}$ $(3{,}2\pm0{,}3)\ 10^{-5}$ $<6{,}1\cdot10^{-5}$	135,00 133,95 — — —	67,50 67,49 — — 67

Класс	Частица	Квантовые числа $I\ (J^{PG})\ C$	Масса покоя, *Мэв*	Разность масс, *Мэв*	Среднее время жизни, *сек*	Каналы распада			
						Схема распада	Относительная вероятность, %	Q, *Мэв*	$P, \frac{Мэв}{c}$
Мезоны	$K^{\pm}$	$\frac{1}{2}\ (0^-)$	$493{,}707 \pm \pm 0{,}037$	$m_{K^0} - m_{K^{\mp}} = =3{,}99 \pm 0{,}13$ $S = 1{,}1$	$(1{,}2371 \pm \pm 0{,}0026) 10^{-8}$, $S = 1{,}2$	$\mu^{\pm} \nu_{\mu}$	$63{,}54 \pm 0{,}19$	388,1	235,6
						$\pi^{+} \pi^{0}$	$21{,}12 \pm 0{,}17$	219,2	205,2
						$\pi^{\pm} \pi^{+} \pi^{-}$	$5{,}59 \pm 0{,}03$	75,0	125,5
						$\pi^{\pm} \pi^{0} \pi^{0}$	$1{,}73 \pm 0{,}05$ $S = 1{,}6$	84,3	133,0
						$\pi^{0} \mu^{\pm} \nu_{\mu}$	$3{,}20 \pm 0{,}09$	253,1	215,2
						$\pi^{0} e^{\pm} \nu_{e}$	$4{,}82 \pm 0{,}05$	358,3	228,4
						$\pi^{\pm} \pi^{\mp} e^{\pm} \nu_{e}$	$(3{,}7 \pm 0{,}2)\ 10^{-5}$	214,1	203,5
						$\pi^{\pm} \pi^{\pm} e^{\mp} \nu_{e}$	$< 5 \cdot 10^{-7}$	214,1	203,5
						$\pi^{\pm} \pi^{0} \gamma$	$(2{,}2 \pm 0{,}7)\ 10^{-4}$	219,2	205,2
						$\pi^{\pm} \pi^{\mp} \mu^{\pm} \nu_{\mu}$	$< 1{,}4 \cdot 10^{-5}$	109,0	151,1
						$\pi^{\pm} \mu^{+} \mu^{-}$	$< 3 \cdot 10^{-6}$	142,9	171,9
						$\pi^{\pm} e^{+} e^{-}$	$< 1{,}1 \cdot 10^{-6}$	353,2	227,2
						$e^{\pm} \nu_{e}$	$(1{,}9 \pm 1{,}2) 10^{-5}$	493,3	246,9
						$\pi^{+} \pi^{+} \pi^{-} \gamma$	$(1 \pm 0{,}4) 10^{-4}$	75,0	125,5
	$K^0 = \frac{K_S + K_L}{\sqrt{2}}$ $\overline{K}_0 = \frac{K_S - K_L}{\sqrt{2}}$	$\frac{1}{2}\ (0^-)$	$497{,}70 \pm \pm 0{,}13$		50% K_S и 50% K_L	—	—	—	—

Продолжение табл. 36.4

Класс	Частица	Квантовые числа $I\,(J^{PG})\,C$	Масса покоя, *Мэв*	Разность масс, *Мэв*	Среднее время жизни, *сек*	Каналы распада: Схема распада	Относительная вероятность, %	Q, *Мэв*	P, $\frac{Мэв}{c}$ 0
Мезоны	K_S	$\frac{1}{2}(0^-)$		$m_{K_L} - m_{K_S} = (-0{,}48 \pm 0{,}02)\tau_S^{-1}$	$(0{,}886 \pm 0{,}007)10^{-10}$ $S = 2{,}4$	$\pi^+\pi^-$ $\pi^0\pi^0$	$68{,}77 \pm 0{,}26$ $31{,}23 \pm 0{,}26$ $S = 1{,}3$	218,5 227,8	206,0 209,0
	K_L	$\frac{1}{2}(0^-)$		$S = 1{,}2$	$(5{,}77 \pm 0{,}59)10^{-8}$	$\pi^0\pi^0\pi^0$ $\pi^+\pi^-\pi^0$ $\pi\,\mu\,\nu_\mu$ $\pi\,e\,\nu_e$ $\pi^+\pi^-$	$21{,}3 \pm 0{,}6$ $11{,}5 \pm 0{,}4$ $27{,}5 \pm 0{,}5$ $39{,}0 \pm 0{,}6$ $0{,}177 \pm 0{,}018$	92,8 83,6 252,5 357,6 218,5	139,3 132,8 216,0 229,3 206,0
	η	$0\,(0^{-+})\,C^+$	$548{,}8 \pm 0{,}6$ $S = 1{,}4$	—	$\Gamma = (2{,}63 \pm \pm 0{,}58)$ *кэв*	$\gamma\gamma$ $\pi^0\gamma\gamma$ $3\pi^0$ $\pi^+\pi^-\pi^0$ $\pi^+\pi^-\gamma$ $\pi^0 e^+ e^-$	$38{,}0 \pm 1{,}0$ $3{,}1 \pm 1{,}1$ $30{,}0 \pm 1{,}1$ $25{,}3 \pm 1{,}4$ $5{,}1 \pm 0{,}7$ $<0{,}04$ $S = 1{,}2$	548,6 413,6 143,7 134,5 269,4 412,6	274,3 257,7 179,4 174,4 236,1 257,7
Барионы	p	$\frac{1}{2}\left(\frac{1^+}{2}\right)$	$938{,}2796 \pm \pm 0{,}00\ 27$	$m_n - m_p = 1{,}29344 \pm \pm 0{,}00007$	Стабилен	—	—	—	—
	n	$\frac{1}{2}\left(\frac{1^+}{2}\right)$	$939{,}5731 \pm \pm 0{,}0027$		918 ± 14	$pe^-\bar{\nu}_e$	100	0,78	1,19

Класс	Частица	Квантовые числа $I\,(J^{PG})\,C$	Масса покоя, *Мэв*	Разность масс, *Мэв*	Среднее время жизни, *сек*	Каналы распада: Схема распада	Относительная вероятность, %	Q, *Мэв*	P, $\frac{Мэв}{c}$
Барионы	Λ	$0\left(\frac{1^+}{2}\right)$	1115,60± ±0,05	—	$(2,578\pm0,021)10^{-10}$ $S=1,6$	$p\,\pi^-$	$64,2\pm0,5$ } $S=1,4$	37,6	100,2
						$n\,\pi_0$	$35,8\pm0,5$ }	40,9	103,7
						$p\,\mu^-\bar{\nu}_\mu$	$(1,57\pm0,35)10^{-4}$	71,5	130,8
						$pe^-\bar{\nu}_e$	$(0,813\pm0,029)10^{-3}$	176,7	163,1
						$p\pi^-\gamma$	$(0,85\pm0,14)10^{-3}$	—	100
	Σ^+	$1\left(\frac{1^+}{2}\right)$	1189,37± ±0,06	$m_{\Sigma^-}-m_{\Sigma^+}=$ $=7,99\pm0,08$ $S=1,2$	$(0,800\pm0,006)10^{-10}$	$p\,\pi^0$	$51,6\pm0,7$	116,2	189,0
						$n\,\pi^+$	$48,4\pm0,7$	110,3	185,0
						$n\,\pi^+\gamma$	$(0,93\pm0,10)10^{-3}$	110,3	185,0
						$\Lambda\,e^+\nu_e$	$(2,02\pm0,47)10^{-5}$	73,4	71,6
						$p\,\gamma$	$(1,85\pm0,4)10^{-3}$	251,1	224,6
						$n\,\mu^+\nu_\mu$	$< 2,4\cdot10^{-5}$	144,2	202,4
						$ne^+\nu_e$	$< 1,0\cdot10^{-5}$	249,3	223,6
	Σ^0	$1\left(\frac{1^+}{2}\right)$	1192,48±0,08	$m_{\Sigma^-}-m_{\Sigma^0}=$ $=4,87\pm0,07$	$<1,0\cdot10^{-14}$	$\Lambda\,\gamma$	100	77,0	74,5
						Λe^+e^-	$5,45\cdot10^{-3}$	—	74
	Σ^-	$1\left(\frac{1^+}{2}\right)$	1197,35±0,06		$(1,482\pm0,017)10^{-10}$ $S=1,5$	$n\,\pi^-$	≈ 100	118,1	192,8
						$n\,\pi^-\gamma$	$\approx 0,1\cdot10^{-4}$	118,1	192,8
						$n\,\mu^-\bar{\nu}_\mu$	$(0,45\pm0,04)10^{-3}$	152,0	209,4
						$n\,e^-\bar{\nu}_e$	$(1,08\pm0,04)10^{-3}$	257,1	229,9
						$\Lambda\,e^-\bar{\nu}_e$	$(0,60\pm0,06)10^{-4}$	81,2	79,0

Класс	Частица	Квантовые числа $I(J^{PG})C$	Масса покоя, *Мэв*	Разность масс, *Мэв*	Среднее время жизни, *сек*	Каналы распада			
						Схема распада	Относительная вероятность, %	Q, *Мэв*	P, $\frac{Мэв}{c}$
Барионы	Ξ^0	$\frac{1}{2}\left(\frac{1^+}{2}\right)$	1314,9±0,6	$m_{\Xi^-} - m_{\Xi^0} = 6,4 \pm 0,6$	$(2,96 \pm 0,12) 10^{-10}$	$\Lambda\,\pi^0$	≈ 100	63,9	134,8
						$p\,\pi^-$	$< 0,9 \cdot 10^{-3}$	236,5	298,7
						$pe^-\bar{\nu}_e$	$< 1,3 \cdot 10^{-3}$	375,5	322,2
						$\Sigma^+ e^-\bar{\nu}_e$	$< 1,5 \cdot 10^{-3}$	124,4	119,0
						$\Sigma^- e^+\nu_e$	$< 1,5 \cdot 10^{-3}$	116,6	111,9
						$\Sigma^+ \mu^-\bar{\nu}_\mu$	$< 1,5 \cdot 10^{-3}$	—	64
						$\Sigma^- \mu^+\nu_\mu$	$< 1,5 \cdot 10^{-3}$	—	49
						$p\mu^-\bar{\nu}_\mu$	$< 1,3 \cdot 10^{-3}$	—	309
	Ξ^-	$\frac{1}{2}\left(\frac{1^+}{2}\right)$	1321,29±0,14		$(1,652 \pm 0,023) 10^{-10}$	$\Lambda\,\pi^-$	≈ 100	65,8	138,7
						$\Lambda\,e^-\bar{\nu}_e$	$(2 \pm 1)\,10^{-3}$	204,9	189,4
						$n\,\pi^-$	$< 0,5 \cdot 10^{-3}$	241,7	303,0
						$\Lambda\,\mu^-\bar{\nu}_\mu$	$< 1,2 \cdot 10^{-3}$	99,7	162,3
						$\Sigma^0 e^-\bar{\nu}_e$	$< 0,3 \cdot 10^{-3}$	128,0	122,2
						$\Sigma^0 \mu^-\bar{\nu}_\mu$	$< 0,5$	22,8	69,5
						$ne^-\bar{\nu}_e$	$< 1,0$	—	327
	Ω^-	$0\left(\frac{3^+}{2}\right)$	1672,2±0,4		$\left(1,3^{+0,3}_{-0,2}\right) 10^{-10}$	$\Xi^0\,\pi^-$	≈ 50	221	296
						$\Xi^-\,\pi^0$			
						$\Lambda\,K^-$	≈ 50	66	216

36.6. МЕЗОНЫ И МЕЗОННЫЕ РЕЗОНАНСЫ

Зарядовая четность нестранных зарядовых триплетов мезонов обозначена символом C_n, относящимся к нейтральному члену триплета.

Надежно установленные квантовые числа подчеркнуты чертой. Отсутствие черты означает, что соответствующее значение наиболее вероятно. Сокращение «нейтр.» относится к нейтралам π^0 и γ. Приводимые иногда за символом частицы цифры в скобках, например $\overline{K}^*$ (890), означают массу частицы в мегаэлектронвольтах и служат для идентификации частицы. Остальные пояснения см. в разд. 36.5.

Таблица 36.5

Характеристики мезонов и мезонных резонансов [9,10]

Тип мезона	Частица	Символ	Квантовые числа $I\ (J^{PG})\ CA$	Масса покоя m, Мэв	Полная ширина резонанса Γ, Мэв	m^2, Гэв^2 [$\Gamma\ (m^2)$, Гэв^2]	Важнейшие каналы распада: Схема распада	Относительная вероятность, %	Q, Мэв	p, $\frac{Мэв}{c}$
η	η	η_β	$0\,(0^{-+})\,C^+A^-$	548,8±0,6	$(2{,}63\pm\pm0{,}58)\,10^{-3}$	0.301	См. табл. 36.4			
	ω	η_γ^1	$0\,(1^{--})\,C^-A^-$	782,7±0,6	10,0±0,4	0,613 [0,008]	$\pi^+\pi^-\pi^0$	90	369	327
							$\pi^+\pi^-$	1*	504	366
							$\pi^0\gamma$	9±0,4	648	380
							η + нейтр.	<1,7	234	199
							$\pi^+\pi^-\gamma$	<5	504	366
							e^+e^-	≃0,015	782	391
							$\mu^+\mu^-$	<0,1	572	377
	η^1	η_β^1	$0\,(0^{-+})\,C^+A^-$	957,6±0,3	<1	0,917 [<0,001]	$\eta 2\pi$	77±4	131	232
							$\rho\gamma$	23±4	203	182
	$K\overline{K}$ (См. 2*)	η_α	$0\,(0^{++})\,C^+A^+$	993±5	40±8	0,986 [0,004]	$\pi\pi$	<70	798	516
							$K\overline{K}$	>30	73	194
	Φ	η_γ	$0\,(1^{--})\,C^-A^+$	1019,7±0,3 $S=1{,}9$	4,2±0,2	1,040 [0,004]	$K_L K_S$	34,6±2,2	23	109
							K^+K^-	46,6±2,5	32	126
							$\pi\rho + 3\pi$	15±5	117	188
							$\pi^0\gamma$	—	885	501
							η + нейтр.	<12	471	362
							$\mu^+\mu^-$	0,025±0,003	808	499
							e^+e^-	0,032±0,002	1018	510
	I	η_α^{II}	$0\,(2^{++})\,C^+A^+$	1270±10	170±30	1,61 [0,22]	$\pi\pi$	83±5	974	619
							4π	4±1	695	556
							$K\overline{K}$	4±3	265	394
	D	η_δ	$0\,(1^{++})\,C^+A^-$	1286±10	30±20	1,65 [0,03]	$K\overline{K}\pi$	—	154	303
							K^*K	—	—100	<0
	E	η_δ	$0\,(1^{++})\,C^+A^-$	1416±10	60±20	2,01 [0,08]	$K^*\overline{K}$	20	35	151
							$K\overline{K}\pi$	40	293	430
							$\eta\pi\pi$	40	—	564
	f'	$\eta_\alpha^{II'}$	$0\,(2^{++})\,C^+A^+$	1516±3	40±10	2,29 [0,06]	$K\overline{K}$	~60	505	561
							$K\overline{K}^*(890)$	~40	111	274
							$\pi\pi$	**	1221	739
π	$\pi^\pm$ π^0	π_β	$1\,(0^{--})\,C_n^+\,A^-$	139,57 134,96	(7,8± ±0,9) эв	0,019483 [0,018217]	См. табл. 36.4			
	$\rho^\pm$	π_γ	$1\,(1^{-+})\,C_n^-\,A^+$	750±10 $S=2{,}8$	170±10 $S=2{,}1$	0,593 0,116	2π	≃100	486	357
							4π	<5	207	243
	ρ^0	π_γ	$1\,(1^{-+})\,C_n^-\,A^+$	756,4±3,2 $S=1{,}6$	115,5±8,2 $S=2{,}1$	0,58 [0.20]	$\pi\gamma$	2	626	370
							e^+e^-	=0,05	764	382
							$\mu^+\mu^-$	≃0,003	558	370
	$K\overline{K}$ (См. 2*)	π_α	$1\,(0^{+-})\,C_n^+\,A^+$	976±10	50±20	0,953 [0,049]	$K^\pm K^0$	Боль-	11	75
							$\eta\pi$	шая —	315	315

Тип мезона	Частица	Символ	Квантовые числа $I(J^{PG})$ CA	Масса покоя m, Мэв	Полная ширина резонанса Г, Мэв	m^2, Гэв² [Г (m^2), Гэв²]	Важнейшие каналы распада: Схема распада	Относительная вероятность, %	Q, Мэв	P, $\frac{Мэв}{c}$
							См. табл. 36.4			
π	A_1	π_δ	$1(1^{+-})C_n^+A^-$	1080±9	≈300	1,17 [0,33]	$\rho\pi$	$\simeq 100$	167	231
							$K\bar{K}$ (См. 4*)	<1	—	—
							$\eta\pi$	$<1,5$	384	380
	B	π	$1(1^{+\ +})C_n^-A^+$	1237±10	120±20 $S=2.2$	1,53 [0,12]	$\omega\pi$	$\simeq 100$	298	339
							$\pi\pi$ (См. 5*)	<30	—	—
							$K\bar{K}$ (См. 5*)	<10	—	—
							4π	<50	662	528
	A_2	π_a^{II}	$1(2^{+-})C_n^+$	1310±10 $S=2,5$	100±10 $S=1,1$	1,72 [0,13]	$\rho\pi$	71,5±1,8	419	413
							$K\bar{K}$	4,7±0,6	333	428
							$\eta\pi$	15,2±1,2	636	529
							$\omega\pi\pi$	8,6±1,8	—	354
							$\eta(958)\pi$	<1	—	280
K	$K\pm$ K^0	K_β	$\frac{1}{2}(0^-)A^-$	493,707±0,037 497,0±0,13		0,244 0,248	См. табл. 36.4			
	$K^*(892)$	K_γ	$\frac{1}{2}(1^-)A^+$	892,2±0,5	49,8±1,1	0,796 [0,044]	$K\pi$	$\simeq 100$	258	288
							$K\pi\pi$	$<0,2$	118	216
							$K\gamma$	$<0,16$	27	310
	K_C	K	$\frac{1}{2}(1^+)A^-$	1242±10	127±25	1,54 [0.16]	$K\rho$	$\simeq 75$	—44	<0
							$K^*\pi$	$\simeq 25$	184	253
	K_A (1280—1400)	K_δ	$\frac{1}{2}(1^+)A^-$	1313±8	54±20 $S=1.6$	1,72 [0,14]	$K^*\pi$ } пере-		290	340
							$K\rho$ } кры-	Большая	53	182
							$K\pi$ } ваются			
							$K\pi$	—	687	558
	$K^*(1420)$	K_a	$\frac{1}{2}(2^+)A^+$	1421±5	100±10	2,02 [0,14]	$K\pi$	55±2,7	767	604
							$K^*\pi$	29,5±2,5	369	414
							$K\rho$	9,2±2,4	137	319
							$K\omega$	4,4±1,7	124	306
							$K\eta$	2,0±2,0	358	482
	$L(1770)$	K	$\frac{1}{2}(2^-)A^-$	1765±10	140±50	3,11 [0.25]	$K\pi\pi$	Большая	1032	788
							$K\omega$	Заметная	520	757
							$K\pi$	<5	1167	825

1* Имеющиеся оценки вероятности распада лежат в интервале от 0,5 до 11 и зависят от предположений о характере интерференции.
2* Не исключено, что этот резонанс просто связан с большим значением длины $K\bar{K}$-рассеяния.
3* Согласно $SU(3)$-симметрии, вероятность мала.
4* Распад запрещен по C-четности для нечетных значений J.
5* Разрешены, если только $J < 3$.

36.7. БАРИОНЫ И БАРИОННЫЕ РЕЗОНАНСЫ [8]

В колонке «Энергия пучка» приведены значения кинетической энергии E и импульса P первичных частиц (π- или K-мезонов), приводящих к образованию соответствующего барионного резонанса. Остальные пояснения см. в разд. 36.5 и 36.6.

Таблица 36.6

Характеристики барионов и барионных резонансов [9, 10]

Тип бариона	Частица	Энергия пучка, Мэв [P, Мэв/c]	$I\left(J^P\right)$	Масса покоя m, Мэв	Полная ширина резонанса Γ, Мэв	m^2, Гэв^2 [Γ (m^2), Гэв^2]	Каналы распада: Схема распада	Относительная вероятность, %	Q, Мэв	P, $\frac{Мэв}{c}$
N	p n	—	$\frac{1}{2}\left(\frac{1^+}{2}\right)$	См. табл. 36.4						
	N (1470)	426 [549]	$\frac{1}{2}\left(\frac{1^+}{2}\right)$	~1400—1470	165—300	2,16 [0,37]	πN $\pi\pi N$	≃60 ≃35	322 —	367 368
	N (1535)	663 [790]	$\frac{1}{2}\left(\frac{1^-}{2}\right)$	~1500—1600	50—160	2,36 [0,15]	πN $N\eta$	≃30 Заметная	472 62	478 210
	N (1520)	610 [737]	$\frac{1}{2}\left(\frac{3^-}{2}\right)$	~1510—1540	105—150	2,30 [0,19]	πN	≃50	440	454
	N (1700)	921 [1051]	$\frac{1}{2}\left(\frac{1^-}{2}\right)$	~1665—1765	100—300	2,89 [0,34]	πN $N\rho$	≃55 ≃10	622 5	580 200
	N (1670)	900 [1030]	$\frac{1}{2}\left(\frac{5^-}{2}\right)$	~1670—1685	115—175	2,79 [0,23]	πN ΛK	≃35 ≃1	610 75	572 231
	N (1688)	900 [1030]	$\frac{1}{2}\left(\frac{5^+}{2}\right)$	~1680—1690	105—180	2,86 [0,24]	πN	≃50	610	572
	N (2190)	1937 [2072]	$\frac{1}{2}\left(\frac{7^-}{2}\right)$	≃2000—2260	150—325	4,80 [0,55]	πN ΛK	30	1112 577	888 711
	N (2650)	3123 [3260]	$\frac{1}{2}\left(\frac{11^-}{2}\right)$	2649±10	≃360	7,02 [0,95]	πN	≃7	1572	1154
	N (1700)	[1050]	$\frac{1}{2}\left(\frac{1}{2}\right)$	1665—1765	100—300	2,89 [0,34]	πN $\pi\pi N$ ΛK ΣK	≃55 ≃25 ~5 <3	— — — —	580 547 250 109
	N (1780)	[1200]	$\frac{1}{2}\left(\frac{1^+}{2}\right)$	1650—1860	50—350	3,17 [0,36]	πN $\pi\pi N$ ΛK	~20 >40 < 7	— — —	633 603 448
	N(1810)	[1260]	$\frac{1}{2}\left(\frac{3^+}{2}\right)$	1770—1860	180—330	3,28 [0,45]	πN $\pi\pi N$ ΛK	~25 >50 ~5	— — —	652 624 386
	N (2220)	[2140]	$\frac{1}{2}\left(\frac{9^+}{2}\right)$	2200—2245	260—330	4,93 [0,67]	πN	~15	—	905
	N (3030)	[4410]	$\frac{1}{2}^{(?)}$	~3030	~400	9,18 [1,21]	πN	—	—	1366

Тип бариона	Частица	Энергия пучка $Мэв$ [P, $Мэв/c$]	$I(J^P)$	Масса покоя m, $Мэв$	Полная ширина резонанса Γ, $Мэв$	m^2, $Гэв^2$ [$\Gamma(m^2)$, $Гэв^2$]	Каналы распада: Схема распада	Относительная вероятность, %	Q, $Мэв$	P, $\frac{Мэв}{c}$
Δ	$\Delta(1232)$	195 [304]	$\frac{3}{2}\left(\frac{3^+}{2}\right)$	$1236,0\pm0,55$ $m_0-m_{++}=0,45\pm0,85$ $m_-\ -m_{++}=7,9\pm6,8$	$120,0\pm2,0$ $\Gamma_-\ -\Gamma_{++}=25\pm23$	1,53 [0,30]	πN	99,4	158	227
	$\Delta(1650)$	867 [997]	$\frac{3}{2}\left(\frac{1^-}{2}\right)$	$\simeq1670$	$\simeq180$	2,72 [0,23]	πN $\pi\pi N$	$\simeq30$ $\simeq70$	592 —	560 510
	$\Delta(1950)$	1346 [1479]	$\frac{3}{2}\left(\frac{7^+}{2}\right)$	$\simeq1920$	$\simeq200$	3,69 [0,77]	πN ΣK	$\simeq50$ $\simeq2$	842 229	722 435
	$\Delta(2420)$	2502 [2638]	$\frac{3}{2}\left(\frac{11^+}{2}\right)$	2423 ± 10	$\simeq275$	5,86 [1,33]	πN ΣK	$\simeq10$ —	1342 729	1023 828
	$\Delta(2850)$	3709 [3847]	$\frac{3}{2}\left(\frac{15^+}{2}\right)$	2850 ± 12	$\simeq300$	8,12 [1,71]	πN	$\simeq3$	1772	1266
	$\Delta(1670)$	[1000]	$\frac{3}{2}\left(\frac{3^-}{2}\right)$	1650—1720	190—270	2,79 [0,43]	πN $\pi\pi N$	$\simeq15$ >60	— —	560 525
	$\Delta(1890)$	[1420]	$\frac{3}{2}\left(\frac{5^+}{2}\right)$	1840—1920	140—350	3,57 [0,47]	πN $\pi\pi N$ ΣK	$\simeq17$ >50 <3	— — —	704 677 400
	$\Delta(1910)$	[1460]	$\frac{3}{2}\left(\frac{1^+}{2}\right)$	1780—1935	200—340	3,65 [0,57]	πN	$\simeq25$	—	716
	$\Delta(3230)$	[5080]	$\frac{3}{2}(?)$	~3230	~440	10,43 [1,42]	πN	—	—	1475
Λ	Λ	—	$0\left(\frac{1^+}{2}\right)$	См. табл. 36.4						
	$\Lambda(1405)$		$0\left(\frac{1^-}{2}\right)$	1405 ± 5	40 ± 10	1,97 [0,06]	$\Sigma\pi$	100	68	142
	$\Lambda(1520)$	138 [395]	$0\left(\frac{3^-}{2}\right)$	$1518,8\pm1,5$	16 ± 2	2,31 [0,02]	$\overline{K}N$ $\Sigma\pi$ $\Sigma\pi\pi$ $\Lambda\pi\pi$	45 ± 1 41 ± 1 $0,8\pm0,1$ $10\pm0,5$	83 183 — 125	234 258 140 250
	$\Lambda(1670)$	393 [737]	$0\left(\frac{1^-}{2}\right)$	1660—1680	23—40	2,79 [0,06]	$\overline{K}N$ $\Lambda\eta$ $\Sigma\pi$	15—35 15—25 30—50	233 6 —	410 66 393
	$\Lambda(1815)$	662 [1062]	$0\left(\frac{5^+}{2}\right)$	1820 ± 5	70—100	3,29 [0,15]	$\overline{K}N$ $\Sigma\pi$	≈61 ≈11	378 478	542 508

Тип барио-на	Частица	Энергия пучка *Мэв* [*P*, *Мэв/с*]	$I\left(J^P\right)$	Масса покоя *m*, *Мэв*	Полная ширина резонанса Γ, *Мэв*	m^2, *Гэв²* [Γ (m^2), *Гэв²*]	Каналы распада: Схема распада	Каналы распада: Относительная вероятность, %	Каналы распада: *Q*, *Мэв*	Каналы распада: *P*, $\frac{Мэв}{c}$
Λ	Λ (1830)	[1090]	$0\left(\frac{5^-}{2}\right)$	1810—1840	70—120	3,35 [0,17]	$\Lambda\eta$ $\sum(1385)\pi$	2 20—60 ~10	151 — —	367 519 554
	$\Lambda_0^*(2100)$	1280 [1703]	$0\left(\frac{7^-}{2}\right)$	2090—2120	80—140	4,41 [0,25]	$\bar{K}N$ $\Sigma\pi$ $\Lambda\eta$ ΞK $\Lambda\omega$	≈30 ~5 <3 <3 <3	673 773 — — —	748 699 617 483 443
	Λ(1690)	[780]	$0\left(\frac{3^-}{2}\right)$	1690±10	30—70	2,86 [0,10]	$N\bar{K}$ $\Sigma\pi$ $\Lambda\pi\pi$ $\Sigma\pi\pi$	20—30 30—50 <25 <25	— — — —	429 409 415 352
	Λ (2350)	[2290]	0(?)	≃2350	140—320	5,52 [0,56]	$N\bar{K}$	—	—	913
	(2585)	[2910]	0(?)	≃2585	~300	6,68 [0,78]	$N\bar{K}$	—	—	1058
Σ	Σ	—	$1\left(\frac{1^+}{2}\right)$	См. табл. 36.4						
	Σ (1385)		$1\left(\frac{3^+}{2}\right)$	(+) 1383,0 ± 1,0, *S* = 1,3 (—) 1387,0 ± 1,2 *S* = 1,6	35 ± 2, *S* = 2,2 42 ± 5, *S* = 3,4	1,92 [0,05]	$\Lambda\pi$ $\Sigma\pi$	88±2 12±2 *S* = 1,4	130 48	208 117
	Σ (1670)	375 [716]	$1\left(\frac{3^-}{2}\right)$	≈1670±10	35—60	2,76 [0,08]	$\bar{K}N$ $\Lambda\pi$ $\Sigma\pi$ $\Lambda\pi\pi$ $\Lambda(1405)\pi$	~8 ~12 ~30—60 ~20 ~30	223 405 323 265 184	410 447 387 389 316
	Σ (1765)	558 [928]	$1\left(\frac{5^-}{2}\right)$	1767±5, *S* = 1,1	≃ 120	3,12 [0,21]	$\bar{K}N$ $\Lambda\pi$ $\Sigma\pi$ $\Sigma(1385)\pi$ $\Lambda(1520)\pi$	≃41 ≃13 ≃1,0 ≈10 15	323 510 423 235 100	496 518 461 315 187
	Σ (1915)	861 [1262]	$1\left(\frac{5^+}{2}\right)$	≈1915	65	3,67 [0,25]	$\bar{K}N$ $\Lambda\pi$ $\Sigma\pi$	≃14 ≃6 ≃6	478 660 —	612 619 568

Тип барио на	Частица	Энергия пучка $M_{эв}$ [P, $M_{эв}/c$]	$I(J^P)$	Масса покоя m, $M_{эв}$	Полная ширина резонанса Γ, $M_{эв}$	m^2, $Гэв^2$ [$\Gamma(m^2)$, $Гэв^2$]	Каналы распада: Схема распада	Относительная вероятность, %	Q, $M_{эв}$	P, $\frac{M_{эв}}{c}$
Σ	$\Sigma(2030)$	1114 [1530]	$1\left(\frac{7^+}{2}\right)$	2020—2040	120—170	4,12 [0,28]	$\bar{K}N$ $\Lambda\pi$ $\Sigma\pi$ ΣK	$\simeq 20$ $\simeq 20$ ~ 4 <2	— 598 — —	700 703 652 412
	$\Sigma(1750)$	[910]	$1\left(\frac{1^-}{2}\right)$	1700—1790	50—100	3,06 [0,13]	$\bar{K}N$ $\Lambda\pi$ $\Sigma\pi$ $\Sigma\eta$	12—45 5—18 6—19 11—44	— 785 — —	483 507 450 54
	$\Sigma(1940)$	[1320]	$1\left(\frac{3^-}{2}\right)$	1865—1950	110—280	3,76 [0,43]	$\bar{K}N$ $\Lambda\pi$ $\Sigma\pi$	~ 21 ~ 4 <7	— — —	678 680 589
	$\Sigma(2250)$	[2040]	$1(?)$	2245—2280	100—230	5,06 [0,36]	$\bar{K}N$	—	—	289
	$\Sigma(2455)$	[2570]	$1(?)$	≈ 2455	≈ 120	6,03 [0,29]	$\bar{K}N$	—	—	979
	$\Sigma(2620)$	[2950]	$1(?)$	$\simeq 2620$	$\simeq 175$	6,86 [0,46]	$\bar{K}N$	—	—	1064
Ξ	Ξ	—	$\frac{1}{2}\left(\frac{1^+}{2}\right)$	См. табл. 36.4						
	$\Xi(1530)$	—	$\frac{1}{2}\left(\frac{3^+}{2}\right)$	(0) 1531,8 ± 0,3 (—) 1535,1 ± 0,7	(0) 9,1 ± 0,5 (—) 10,6 ± 2,6	2,34 [0,02]	$\Xi\pi$	100	70	144
	$\Xi(1820)$	—	$\frac{1}{2}\left(\frac{3^-}{2}\right)$	1795—1870	12—100	3,31 [0,11]	$\Lambda\bar{K}$ $\Xi\pi$ $\Xi(1530)\pi$ $\Xi\pi\pi$ $\Sigma\bar{K}$	~ 65 ~ 10 ~ 20 ~ 5 —	207 360 150 220 —	396 413 234 356 413
	$\Xi(1940)$	—	$\frac{1}{2}\left(\frac{5^+}{2}\right)$	1920—1960	40 ± 140	3,76 [0,17]	$\Xi\pi$ $\Xi(1530)\pi$ ΛK	— — —	473 — 320	501 336 505
Ω	Ω^-	—	$0\left(\frac{3^+}{2}\right)$	См. табл. 36.4						

36.8. МАГНИТНЫЕ МОМЕНТЫ ЭЛЕМЕНТАРНЫХ ЧАСТИЦ [9,10]

Обозначения:

μ_0 — магнетон Бора для электрона ($\mu_0 = 0{,}57883785 \cdot 10^{-14}$ *Мэв/гс* [9]);

μ_μ — магнетон Бора для мюона ($\mu_\mu = 0{,}2799541 \cdot 10^{-16}$ *Мэв/гс* [9]);

$\mu_я$ — ядерный магнетон Бора ($\mu_я = 3{,}1524515 \cdot 10^{-18}$ *Мэв/гс* [9]).

Частица	Магнитный момент
$e^\pm$	$(1{,}0011596567 \pm 0{,}0000000035)\,\mu_0$
$\mu^\pm$	$(1{,}00116616 \pm 0{,}00000031)\,\mu_\mu$
p	$(2{,}7928456 \pm 0{,}0000011)\,\mu_я$
n	$(-1{,}913148 \pm 0{,}000066)\,\mu_я$
Λ	$(-0{,}67 \pm 0{,}06)\,\mu_я$
Σ^+	$(2{,}62 \pm 0{,}41)\,\mu_я$

36.9. ПАРАМЕТРЫ РАСПАДОВ ЭЛЕМЕНТАРНЫХ ЧАСТИЦ [9,10]

Обозначения: S и P — амплитуды s- и p-волн;

$$\alpha = \frac{2\mathrm{Re}\,(S^* P)}{|S|^2 + |P|^2}; \qquad \beta = \frac{2\,\mathrm{Im}\,(S^* P)}{|S|^2 + |P|^2};$$

$$\gamma = \frac{|S|^2 - |P|^2}{|S|^2 + |P|^2}; \qquad \Delta = \mathrm{arctg}\frac{\beta}{\alpha}.$$

Таблица 36.7

Схемы и параметры распадов некоторых элементарных частиц

Схема распада	α	β	γ	Δ, *град*
$\Lambda \to p\pi^-$	$0{,}647 \pm 0{,}013$	—	0,76	$7{,}6^{+4{,}0}_{-4{,}1}$
$\Lambda \to n\pi^0$	$0{,}651 \pm 0{,}045$	—	—	—
$\Sigma^+ \to p\pi^0$	$-0{,}979 \pm 0{,}016$	—	0,17	187 ± 6
$\Sigma^+ \to n\pi^+$	$0{,}066 \pm 0{,}016$	—	$-0{,}97$	-73^{+136}_{-10}
$\Sigma^+ \to p\gamma$	$-1{,}03^{+0{,}52}_{-0{,}42}$	—	—	—
$\Sigma^- \to n\pi^-$	$-0{,}069 \pm 0{,}008$	—	0,98	249^{+12}_{-115}
$\Xi^0 \to \Lambda\pi^0$	$-0{,}44 \pm 0{,}08$	—	0,84	184 ± 15
$\Xi^- \to \Lambda\pi^-$	$-0{,}393 \pm 0{,}023$	$+0{,}10$	0,92	184 ± 15

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Челен Г.** Физика элементарных частиц. Пер. с англ. М., «Наука». 1966.
2. **Марков М. А.** Гипероны и K-мезоны. М., Физматгиз, 1958.
3. **Lee T. D., Yang C. N.** «Nuovo cimento», 1956, v. 3, p. 749.
   Michel L. «Nuovo cimento», 1953, v. 10, p. 319.
4. **Bronzan I. B., Low F. E.** «Phys. Rev. Lett.», 1964, v. 12, p. 522.
5. **Swart J. J.** «Revs Mod. Phys.», 1963, v. 35, p. 916. (См. пер.: «Успехи физ. наук», 1964, т. 84, с. 651.)
   Смородинский Я. А. Унитарная симметрия элементарных частиц. «Успехи физ. наук», 1964, т. 84, с. 3.
6. **Chewet G. F. e. a.** «Sci. Amer.», 1964, v. 21, p. 74. (См. пер.: «Успехи физ. наук», 1964, т. 84, с. 525.)
7. **Ширков Д. В.** «Успехи физ. наук», 1970, т. 102, с. 87.
8. **Rosenfeld A. H. e. a.** «Revs Mod. Phys.», 1967, v. 39, p. 1.
9. **Rosenfeld A. N. e. a.** «Phys. Lett.», 1974, v. 50B, No 1.
10. **Rosenfeld A. N. e. a.** «Revs Mod. Phys.», 1975, v. 47, p. 535.

ГЛАВА 37

ЯДЕРНЫЕ СВОЙСТВА НУКЛИДОВ

37.1 ТАБЛИЦА ИЗОТОПОВ

В соответствии с установившейся к настоящему времени терминологией принято атомы с данным числом протонов и нейтронов в ядре называть *нуклидами*. Нуклиды с одинаковым числом протонов (т. е. принадлежащие одному химическому элементу) называются *изотопами*.

В табл. 37.1 приведены все достоверно известные радиоактивные и стабильные изотопы в порядке возрастания массового числа для каждого элемента. Данные расположены в шести колонках.

Колонка 1 — указан общепринятый символ элемента и его зарядовое число Z.

Колонка 2 — указано массовое число изотопа; символ m, следующий за массовым числом, означает, что в таблице приведено метастабильное состояние изотопа. Метастабильные состояния приведены лишь тогда, когда их периоды полураспада достаточно велики ($\geqslant 1$ *сек*), чтобы идентифицировать их независимо от основных состояний. Символы m_1 и m_2 означают различные метастабильные состояния изотопа.

Колонка 3 — указан полный период полураспада нуклида. Для ряда тяжелых ядер указан также отдельно измеренный парциальный период полураспада для спонтанного деления. Он приведен под основным значением времени жизни ядра и обозначен символом (с. д.).

Колонка 4 — указан основной тип распада изотопа. Использованы следующие символы:

β^- — электронный распад;
β^+ — позитронный распад;
э. з. — захват орбитального электрона;
α — альфа-распад;
и. п. — изомерный переход (распад из возбужденного метастабильного состояния на более низкий уровень);
с. д. — спонтанное деление;
n — испускание нейтронов из возбужденных сос-

тояний, возникающих в результате β-распада;

p — испускание протонов из возбужденных состояний, возникающих в результате β-распада.

Если у ядра существует несколько типов распада, то все они указаны в колонке 4. В ряде случаев за символом типа распада в круглых скобках приведено относительное разветвление (в процентах) способов распада. Например, э. з. (60). Отсутствие скобок означает, что относительное разветвление типов распада не определено.

Для стабильных изотопов в колонке 4 приведены в процентах значения относительной распространенности нуклида в земной коре. Для радиоактивных изотопов с очень большими периодами полураспада (и поэтому сохранившихся в земной коре) указаны как процентное содержание, так и тип распада. Например, ^{87}Rb — 27,85 β^-.

Колонка 5 — указаны значения энергий в мегаэлектронвольтах групп наиболее интенсивных частиц ($\alpha, \beta^-, \beta^+, n, p$), испускаемых при распаде нуклида. Цифры, характеризующие значение энергии, помещены на одной строке с обозначением типа распада. В круглых скобках приведена относительная интенсивность групп частиц (в %) на полное число распадов. В косых скобках (например, /22/) приведена интенсивность групп частиц (в %), отнесенная только к конкретному типу распада. Для сплошных β^+ и β^--спектров в таблице представлены, как правило, значения граничной энергии β-группы с наибольшей энергией. Если β-группа с наибольшей энергией имеет относительно слабую интенсивность, то приводятся значения граничной энергии и интенсивности одной или нескольких β-групп с меньшими граничными энергиями.

Колонка 6 — указаны значения энергии в мегаэлектронвольтах основного γ-излучения, сопровождающего распад нуклида. В круглых скобках приведена интенсивность γ-излучения (в %), отнесенная к полному числу распадов. В косых скобках приведена (в %) относительная интенсивность γ-излучения. Если после значения энергии скобки отсутствуют, это показывает, что значения интенсивностей точно не определены. В ряде случаев указан диапазон значений энергии γ-излучения. Символ 0,511 (ан.) означает, что γ-излучение имеет аннигилляционное происхождение.

Символами *, ** и *** помечены дублет, сложная линия и случай, когда все линии сложные.

Таблица 37.1

Таблица изотопов [1]

Элемент	*A*	Период полураспада	Тип распада или содержание стабильных изотопов, %	Энергия, *Мэв* (относительная интенсивность, %)	
				групп частиц	γ-излучения
$_0n$	1	11,7 *мин*	β^-	0,78	—
$_1H$	1	—	99,9852	—	—
	2	—	0,0148	—	—
	3	12,262 года	β^-	0,0186	—
$_2He$	3	—	$1{,}3\cdot10^{-4}$	—	—
	4	—	~100	—	—
	6	0,797 *сек*	β^-	3,508	—
	8	0,122 *сек*	β^-	—	0,98 (88)
$_3Li$	6	—	7,42	—	—
	7	—	92,58	—	—
	8	0,84 *сек*	β^-	13	—
		—	2α	1,6	—
	9	0,176 *сек*	β^-	13,61	—
			n	0,76	—
$_4Be$	7	53,6 дня	э.з.	—	0,477 (10,3)
	9	—	100	—	—
	10	$2{,}5\cdot10^6$ лет	β^-	0,555	—
	11	13,6 *сек*	β^-	11,5	2,14 (32); 4,67 (2,1); 5,85 (2,4); 6,79 (4,4); 7,99 (1,7)
	12	0,0114 *сек*	n	—	—
$_5B$	8	0,77 *сек*	β^+	—	—
		—	2α	1,6	—
	10	—	19,6	—	—
	11	—	80,4	—	—
	12	0,0203 *сек*	β^- (100)	13,37	4,43 (1,3)
		—	3α (1,5)	0,195 (1,5)	—
	13	0,0186 *сек*	β^-	13,44	3,68 (7)

Элемент	A	Период полураспада	Тип распада или содержание стабильных изотопов, %	Энергия, *Мэв* (относительная интенсивность, %)	
				групп частиц	γ-излучения
$_{6}C$	9	0,127 *сек*	p	8,2 (60); 1,1 (40)	— —
	10	19,48 *сек*	β^+	1,87	0,511 (200, ан.); 0,717 (100); 1,023 (1,7)
	11	20,34 *мин*	β^+ (99)	0,97	0,511 (200, ан.)
		—	э.з. (0,19)	—	—
	12	—	98,892	—	—
	13	—	1,108	—	—
	14	5730 лет	β^-	0,156	—
	15	2,5 *сек*	β^-	9,82 (32); 4,51 (68)	5,299 (68)
	16	0,74 *сек*	n	—	—
$_{7}N$	12	0,01095 *сек*	β^+ (100)	16,4	0,511 (200, ан.); 4,43 (2,4)
		—	3α (3)	0,195 (3)	—
	13	9,96 *мин*	β^+	1,20	0,511 (200, ан.)
	14	—	99,635	—	—
	15	—	0,365	—	—
	16	7,14 *сек*	β^-	10,40 (26); 4,27 (74)	2,75 (1); 6,13 (69); 7,11 (5)
		—	α (0,0006)	1,7	
	17	4,16 *сек*	β^-	8,68 (1,6); 7,81 (2,6); 4,1 (95)	0,87 (3); 2,19 (0,5)
		—	n	0,40 (45); 1,21 (45); 1,81 (5)	—
	18	0,63 *сек*	β^-	9,4	0,82(59); 1,65(59); 1,98(100); 2,47 (41)
$_{8}O$	13	0,0087 *сек*	p	6,40/100/; 6,97/24/	—
	14	70,91 *сек*	β^+	4,12 (0,6); 1,811 (99)	0,511 (200, ан.); 2,312 (99)
	15	123 *сек*	β^+	1,74	0,511(200, ан.)
	16	—	99,759	—	—
	17	—	0,037	—	—
	18	—	0,204	—	—
	19	29,1 *сек*	β^-	4,60	0,197 (97); 1,37 (59)
	20	14 *сек*	β^-	—	1,06 (100)
$_{9}F$	17	66,6 *сек*	β^+	1,74	0,511 (200, ан.)
	18	109,7 *мин*	β^+ (97)	0,635	0,511 (194, ан.)
		—	э.з. (3)	—	—
	19	—	100	—	—
	20	11,56 *сек*	β^-	5,41	1,63 (100)
	21	4,35 *сек*	β^-	5,4	0,350/100/; 1,38/13/
	22	4,0 *сек*	β^-	11	1,28 (100); 2,06 (67)
$_{10}Ne$	17	0,10 *сек*	p	4,59	—
	18	1,5 *сек*	β^+	3,42	0,511 (200, ан.); 1,04 (7)
	19	17,4 *сек*	β^+	2,22	0,511 (200, ан.)
	20	—	90,92	—	—
	21	—	0,257	—	—
	22	—	8,82	—	—
	23	37,6 *сек*	β^-	4,38	0,439 (33); 1,64 (0,9)
	24	3,38 *мин*	β^-	1,99	0,472 (100); 0,88 (8)

Элемент	A	Период полураспада	Тип распада или содержание стабильных изотопов, %	Энергия, *Мэв* (относительная интенсивность, %)	
				групп частиц	γ-излучения
$_{11}$Na	20	0,39 *сек*	β^+	11,4	—
	—		α	2,14/100/; 2,49/5/; 4,44/21/	—
	21	23,0 *сек*	β^+	2,52	0,350 (2,3); 0,511 (200, ан.)
	22	2,62 года	β^+ (90,6)	1,820 (0,05); 0,545	0,511 (180, ан.); 1,275 (100)
	—		э.з. (9,4)	—	—
	23	—	100	—	—
	24	14,96 *ч*	β^-	4,17 (0,003); 1,389 (100)	1,369 (100); 2,754 (100)
	24*m*	0,0203 *сек*	и.п.	—	0,472
	—		β^-	6	—
	25	60 *сек*	β^-	3,83	0,39 (14); 0,58 (14); 0,98 (15); 1,61 (6)
	26	1,04 *сек*	β^-	6,7	1,82 (100)
$_{12}$Mg	20	0,6 *сек*	—	—	—
	21	0,121 *сек*	*p*	3,3; 3,8; 4,58; 6,14	—
	23	12,1 *сек*	β^+	3,03	0,44 (9); 0,511 (200, ан.)
	24	—	78,60	—	—
	25	—	10,11	—	—
	26	—	11,29	—	—
	27	9,46 *мин*	β^-	1,75	0,18 (0,7); 0,84 (70); 1,013 (30)
	28	21,2 *ч*	β^-	0,46	0,031 (96); 0,40 (30); 0,95 (30); 1,35 (70)
$_{13}$Al	24	2,10 *сек*	β^+ (100)	8,5	0,511 (200, ан.)
	—		α ($\sim 10^{-2}$)	2	—
	25	7,24 *сек*	β^+	3,24	0,511 (200, ан.)
	26	$7{,}4 \cdot 10^5$ лет	β^+ (85)	1,17	0,511 (170, ан.); 1,12 (4);
			э.з. (15)	—	1,81 (100)
	26*m*	6,37 *сек*	β^+	3,21	0,511 (200, ан.)
	27	—	100	—	—
	28	2,31 *мин*	β^-	2,85	1,780 (100)
	29	6,6 *мин*	β^-	2,40	1,28 (94); 2,43 (6)
	30	3,3 *сек*	β^-	5,0	2,23 (61); 3,51 (39)
$_{14}$Si	25	0,23 *сек*	*p*	3,34; 4,08; 4,68; 5,39	—
	26	2,1 *сек*	β^+	3,83	0,511 (200, ан.); 0,82 (34)
	27	4,14 *сек*	β^+	3,85	0,511 (200, ан.)
	28	—	92,18	—	—
	29	—	4,71	—	—
	30	—	3,12	—	—
	31	2,62 *ч*	β^-	1,48	1,26 (0,07)
	32	650 лет	β^-	0,21	—

Элемент	A	Период полураспада	Тип распада или содержание стабильных изотопов, %	Энергия, *Мэв* (относительная интенсивность, %)	
				групп частиц	γ-излучения
$_{15}$P	28	0,28 *сек*	β^+	11,0	0,511 (200, ан.); 1,78 (75); 4,44 (10); 7,6 (5)
	29	4,45 *сек*	β^+	3,95	0,511 (200, ан.); 1,28 (0,8); 2,43 (0,2)
	30	2,50 *мин*	β^+	3,24	0,511 (200, ан.); 2,23 (0,5)
	31	—	100	—	—
	32	14,28 дня	β^-	1,710	—
	33	24,4 дня	β^-	0,248	—
	34	12,4 *сек*	β^-	5,1	2,13 (25); 4,0 (0,2)
$_{16}$S	29	0,19 *сек*	*p*	3,73; 5,40	—
	30	1,4 *сек*	β^+	5,09 (20); 4,42 (80)	0,511 (200, ан.); 0,687 (80)
	31	2,72 *сек*	β^+	4,42	0,511 (200, ан.); 1,27 (1,1)
	32	—	95,0	—	—
	33	—	0,760	—	—
	34	—	4,22	—	—
	35	87,9 дня	β^-	0,167	—
	36	—	0,014	—	—
	37	5,07 *мин*	β^-	4,7 (10); 1,6 (90)	3,09 (90)
	38	2,87 *ч*	β^-	3,0 (5); 1,1	1,88 (95)
$_{17}$Cl	32	0,306 *сек*	β^+	9,9	0,511 (200, ан.); 2,24 (70)
			α (0,01)	—	4,29 (7); 4,77 (14)
	33	2,53 *сек*	β^+	4,55	0,511 (200, ан.); 2,9 (0,3)
	34	1,56 *сек*	β^+	4,46	0,511 (200, ан.)
	34*m*	31,99 *мин*	β^+ (~50)	2,48	0,145 (45), 0,511 (100, ан.);
		—	и.п. (~50)	—	1,17 (12); 2,12 (38); 3,30 (12)
	35	—	75,53	—	—
	36	$3{,}08 \cdot 10^5$ лет	β^- (98,1)	0,714	0,511 (0,003, ан.)
			э.з. (1,9)	—	
			β^+ (0,0012)	—	
	37	—	24,47	—	—
	38	37,29 *мин*	β^-	4,91	1,60 (38); 2,170 (47)
	38*m*	0,74 *сек*	и.п.	—	0,66 (100)
	39	55,5 *мин*	β^-	3,45 (7); 2,18 (8); 1,91	0,246 (44); 1,27 (50); 1,52 (42)
	40	1,4 *мин*	β^-	7,5	1,46/100/; 2,83/100/; 3,10; 5,8
$_{18}$Ar	33	0,18 *сек*	*p*	3,16	—
	35	1,83 *сек*	β^+	4,94	0,511 (200, ан.); 1,22 (5); 1,76 (2)
	36	—	0,337	—	—
	37	35,1 дня	э.з.	—	—
	38	—	0,063	—	—
	39	269 лет	β^-	0,565	—
	40	—	99,600	—	—
	41	1,83 *ч*	β^-	2,49 (0,8), 1,198	1,293 (99)
	42	33 года	—	—	—
$_{19}$K	37	1,23 *сек*	β^+	5,14	0,511 (200, ан.); 2,79 (2)
	38	7,71 *мин*	β^+	2,68	0,511 (200, ан.); 2,170 (100)
	38*m*	0,95 *сек*	β^+	5,0	0,511 (200, ан.)
	39	—	93,22	—	—
	40	$1{,}26 \cdot 10^9$ лет	0,118	—	1,460 (11)
		—	β^- (89)	1,314	—

Элемент	A	Период полураспада	Тип распада или содержание стабильных изотопов, %	Энергия, *Мэв* (относительная интенсивность, %)	
				групп частиц	γ-излучения
$_{19}K$	40	—	э.з. (11)	—	—
		—	β^+ (0,001)	0,483	—
	41	—	6,77	—	—
	42	12,36 *ч*	β^-	3,52	0,31 (0,2); 1,524 (18)
	43	22,4 *ч*	β^-	1,82 (1); 1,2 (3); 0,83	0,373 (85); 0,39* (18); 0,59 (13); 0,619 (81)
	44	22,0 *мин*	β^-	5,2	1,156 (61); 1,74 (8); 2,1** (37); 2,6 (7)
	45	16,3 *мин*	β^-	4,0; 2,1	—
	47	17,5 *сек*	β^-	6,1 (1); 4,1	2,0 (84); 2,6 (15)
$_{20}Ca$	37	0,173 *сек*	*p*	3,10	—
	38	0,66 *сек*	β^+	—	—
	39	0,87 *сек*	β^+	5,49	0,511 (200, ан.)
	40	—	96,97	—	—
	41	$8 \cdot 10^4$ лет	э.з	—	—
	42	—	0,64	—	—
	43	—	0,145	—	—
	44	—	2,06	—	—
	45	165 дней	β^-	0,252	—
	46	—	0,0033	—	—
	47	4,535 дня	β^-	1,98 (18); 0,67	0,49 (5); 0,815 (5); 1,308 (74)
	48	—	0,185	—	—
	49	8,8 *мин*	β^-	1,95	3,10 (89); 4,1 (10)
	50	9 *сек*	—	—	0,072
$_{21}Sc$	40	0,179 *сек*	β^+	9,1	0,511 (200, ан.); 3,75
	41	0,60 *сек*	β^+	5,47	—
	42	0,683 *сек*	β^+	—	0,511 (200, ан.)
	42*m*	60,6 *сек*	β^+	2,82	0,438 (100); 0,511 (200, ан.); 1,22 (100); 1,52 (100)
	43	3,92 *ч*	β^+	1,20	0,375 (22); 0,511 (180, ан.)
	44	3,92 *ч*	β^+	1,47	0,511 (188, ан.); 1,159 (100)
		—	э.з. (5)	—	—
	44*m*	2,44 дня	и.п. (98,6)	—	0,271 (86); 1,02 (1,3)
		—	э.з. (1,4)	—	—
	45	—	100	—	—
	46	83,9 дня	β^-	1,48 (0,004); 0,357	0,889 (100); 1,120 (100)
	46*m*	19,5 *сек*	и.п.	—	0,142
	47	3,43 дня	β^-	0,600	0,160 (73)
	48	1,83 дня	β^-	0,65	0,175 (6); 0,983 (100); 1,040 (100); 1,314 (100)
	49	57,5 *мин*	β^-	2,01	1,76 (0,03)
	50	1,72 *мин*	β^-	3,6	0,520 (100); 1,12 (100); 1,55 (100)
	50*m*	0,35 *сек*	и.п.	—	0,258
$_{22}Ti$	41	0,090 *сек*	*p*	2,3/8/; 3,05/17/; 3,68/16/; 4,12/4/; 4,64/50/; 5,30/5/	—
	43	0,56 *сек*	β^+	5,8	—
	44	48 лет	э.з.	—	0,068 (90); 0,078 (98)
	45	3,09 *ч*	β^+	1,04	0,718 (0,4); 1,408 (0,3)
	46	—	7,99	—	—
	47	—	7,32	—	—
	48	—	73,99	—	—
	49	—	5,46	—	—
	50	—	5,25	—	—
	51	5,79 *мин*	β^-	2,14	0,320 (95); 0,605 (1,5); 0,928 (5)
$_{23}V$	46	0,426 *сек*	β^+	6,03	0,511 (200, ан.)
	47	33 *мин*	β^+	1,89	1,80 (0,5)
	48	16,0 дней	β^+ (49)	0,696	0,511 (100, ан.); 0,945 (10);
		—	э.з. (51)	—	0,983 (100); 1,312 (97)
	49	330 дней	э.з.	—	—

Элемент	A	Период полураспада	Тип распада или содержание стабильных изотопов, %	Энергия, *Мэв* (относительная интенсивность, %)	
				групп частиц	γ-излучения
$_{23}$V	50	$6 \cdot 10^{15}$ лет	0,25	—	0,783 (30); 1,55 (70)
	—		э.з. (70)	—	—
	—		β^- (30)	—	—
	51	—	99,75	—	—
	52	3,75 *мин*	β^-	2,47	1,434 (100)
	53	2,0 *мин*	β^-	2,50	—
	54	55 *сек*	β^-	3,3	0,84 (100); 0,99 (100); 2,21 (100)
$_{24}$Cr	48	23 *ч*	э.з.	—	0,116 (98); 0,31 (99)
	49	41,9 *мин*	β^+	1,54	0,063 (14); 0,091 (28); 0,153 (13)
	50	—	4,31	—	—
	51	27,8 дня	э.з.	—	—
	52	—	83,76	—	—
	53	—	9,55	—	—
	54	—	2,38	—	—
	55	3,52 *мин*	β^-	2,59	—
	56	5,9 *мин*	β^-	1,5	0,026; 0,083
$_{25}$Mn	50	0,286 *сек*	β^+	6,61	—
	51	45,2 *мин*	β^+	2,17	—
	52	5,60 дня	э.з. (66)	—	0,511 (67, ан.);
	—		β^+ (34)	0,575	0,744 (82); 0,935 (84); 1,434 (100)
	52*m*	21,1 *мин*	β^+	1,63	0,511 (193, ан.);
	—		и.п. (2)	—	1,434 (100)
	53	$1,9 \cdot 10^6$ *лет*	э.з.	—	—
	54	303 дня	э.з.	—	0,835 (100)
	55	—	100	—	—
	56	2,576 *ч*	β^-	2,85	0,847 (99); 1,811 (29); 2,110 (15)
	57	1,7 *мин*	β^-	2,55	—
	58	1,1 *мин*	β^-	—	—
$_{26}$Fe	52	8,2 *ч*	β^+ (56)	0,80	0,165 (100); 0,511 (112, ан.)
	—		э.з. (44)	—	—
	53	8,51 *мин*	β^+	3,0	0,38 (32); 0,511 (196, ан.)
	54	—	5,84	—	—
	55	2,60 года	э.з.	—	—
	56	—	91,68	—	—
	57	—	2,17	—	—
	58	—	0,31	—	—
	59	45,6 дня	β^-	1,57 (0,3); 0,475	0,192 (2,8); 1,095 (56); 1,292 (44)
	60	$3 \cdot 10^5$ лет	—	—	—
	61	6,0 *мин*	β^-	2,8	0,13/11/; 0,30/48/; 1,03/98/; 1,20/100/
$_{27}$Co	54	0,194 *сек*	β^+	—	—
	55	18,2 *ч*	β^+ (81)	1,50	0,480 (12); 0,511 (160, ан.); 0,930 (80); 1,41 (13)
	—		э.з. (19)	—	
	56	77,3 дня	э.з. (80)	—	0,511 (40, ан.); 0,847 (100); 1,04 (15); 1,24 (66);
			β^+ (20)	1,49	1,76 (15); 2,02 (11); 2,60 (17); 3,26 (13)
	—				
	57	270 дней	э.з.	—	0,122 (87); 0,136 (11)
	58	71,3 дня	э.з. (85)	—	0,511 (30, ан.); 0,810 (99)
	—		β^+ (15)	0,474	0,865 (1,4)
	58*m*	9,2 *ч*	и.п.	—	—
	59	—	100	—	—
	60	5,263 года	β^-	1,48 (0,12); 0,314 (99)	1,173 (100); 1,332 (100)
	60*m*	10,47 *мин*	и.п. ($>$ 99)	—	0,059 (2,1); 1,33 (0,25)
	—		β^- (0,25)	1,55	—
	61	99,0 *мин*	β^-	1,22	0,067 (89)
	62	13,9 *мин*	β^-	2,88	1,17** (180); 1,47 (20); 1,74 (19); 2,03 (7)
	63	52 *сек*	β^-	3,6	—

Элемент	A	Период полураспада	Тип распада или содержание стабильных изотопов, %	Энергия, *Мэв* (от • . интенсивность, %)	
				групп частиц	γ-излучения
$_{28}$Ni	56	6,10 дня	э.з	—	0,163 (99); 0,276 (31); 0,472 (35); 0,748 (48); 0,812 (85); 1,56 (14)
	57	36,0 *ч*	э.з. (54)	—	0,127 (14); 0,511 (92, ан.); 1,37 (86); 1,89 (14)
	—		β^+ (46)	0,85	
	58	—	67,76	—	—
	59	$8 \cdot 10^4$ лет	э.з.	—	—
	60	—	26,16	—	—
	61	—	1,25	—	—
	62	—	3,66	—	—
	63	92 года	β^-	0,067	—
	64	—	1,16	—	—
	65	2,564 *ч*	β^-	2,13	1,115 (16); 1,481 (25)
	66	54,8 *ч*	β^-	0,20	—
	67	50 *сек*	β^-	4,1	0,90* (51); 1,26 (15)
$_{29}$Cu	58	3,20 *сек*	β^+	8,2	—
	59	81,5 *сек*	β^+	3,7	0,511 (197, ан.); 0,872 (9); 1,305 (11)
	60	23,4 *мин*	β^+ (93)	3,92 (6); 3,00 (18); 2,00	0,511 (186, ан.); 0,85 (15); 1,332 (80); 1,76 (52)
	—		э.з. (7)	—	
	61	3,32 *ч*	β^+ (60)	1,22	0,067 (4); 0,284 (12); 0,38 (3); 0,511 (120, ан.); 1,19 (5)
	—		э.з. (40)	—	
	62	9,76 *мин*	β^+	2,91	0,511 (195, ан.); 0,88 (0,3)
	63	—	69,1	—	—
	64	12,80 *ч*	э.з. (43)	—	0,511 (38, ан.); 1,34 (0,5)
	—		β^- (38)	0,573	
	—		β^+ (19)	0,656	
	65	—	30,9	—	—
	66	5,10 *мин*	β^-	2,63	1,039 (9)
	67	58,5 *ч*	β^-	0,57	0,092* (23); 0,184 (40)
	68	30 *сек*	β^-	3,5	0,80 (17); 1,078 (95)
$_{30}$Zn	60	2,1 *мин*	—	—	—
	61	1,48 *мин*	β^+	4,4	0,48 (11); 0,511 (198, ан.); 0,98 (3); 1,64 (6)
	—		э.з. (82)	—	
	62	9,13 *ч*	β^+ (18)	0,66	0,042 (20); 0,51** (47); 0,59 (22)
	—		β^+ (93)	2,34	
	63	38,4 *мин*	э.з. (11)	—	0,511 (186, ан.); 0,669 (8); 0,962 (6)
	—		48,89	—	
	64	—	э.з. (98,3)	—	—
	65	245 дней	β^+ (1,7)	0,327	0,511 (3,4, ан.); 1,115 (49)
	—		27,81	—	
	66	—	4,11	—	—
	67	—	18,56	—	—
	68	—	β^-	0,90	—
	69	57 *мин*	и.п.	—	0,439 (95)
	69*m*	13,8 *ч*	0,62	—	—
	70	—	β^-	2,61	0,39 (1,3); 0,510 (13); 0,92 (3); 1,12 (1,3)
	71	2,4 *мин*	β^-	1,46	0,13 (9); 0,385 (94); 0,495 (75); 0,609 (65); 0,76 (5); 0,99 (8)
	71*m*	3,92 *ч*	β^-	0,30	0,015 (8); 0,145 (90); 0,192 (10)
	72	46,5 *ч*			
$_{31}$Ga	63	33 *сек*	—	—	—
	64	2,6 *мин*	β^+	6,05 (33); 2,8	0,511 (196, ан.); 0,80 (15); 0,992 (43); 1,38 (14); 2,18 (11); 3,32 (18)
	65	15,2 *мин*	β^+ (> 50)	2,24 (12); 2,11	0,061 (12); 0,115 (55); 0,152 (10); 0,511 (180, ан.); 0,75 (10)
	—		э.з. (< 50)	—	
	66	9,45 *ч*	β^+ (57)	4,153	0,511 (114, ан.); 1,039 (37); 2,183 (5); 2,748 (25); 4,30 (5)
	—		э.з. (43)	—	
	67	77,9 *ч*	э.з.	—	0,093 (40); 0,184 (24); 0,296 (22); 0,388 (7)

Элемент	A	Период полураспада	Тип распада или содержание стабильных изотопов, %	Энергия, *Мэв* (относительная интенсивность, %)	
				групп частиц	γ-излучения
$_{31}$Ga	68	68,3 *мин*	β^+ (88)	1,90	0,511(176, ан.); 1,078(3,5)
		—	э.з. (12)	—	
	69	—	60,2	—	—
	70	21,1 *мин*	β^-	1,65	0,173(0,16); 1,040(0,5)
	71	—	39,8	—	—
	72	14,12 *ч*	β^-	3,15	0,630(27); 0,835(96); 2,201(26); 2,50*(20)
	73	4,9 *ч*	β^-	1,19	0,054(9); 0,295(94); 0,74(6)
	74	8,0 *мин*	β^-	2,5	0,60*(100); 0,87*(9); 2,35(45)
	75	2,0 *мин*	β^-	3,3	0,58(3)
	76	32 *сек*	β^-	6	—
$_{32}$Ge	65	1,5 *мин*	β^+	3,7	0,511(197, ан.); 0,67(3); 1,72(2)
	66	2,4 *ч*	β^+ (62)	1,3	0,046(37); 0,114(22); 0,185(23);
		—	э.з. (38)	—	0,27(19); 0,34(19); 0,38(48); 0,47(19); 0,511(124, ан.)
	67	18,7 *мин*	β^+	3,1	0,170*(105); 0,511(170, ан.)
	68	275 дней	э.з.	—	—
	69	36 *ч*	э.з. (67)	—	0,511(68, ан.); 0,573(13); 0,872(10);
		—	β^+ (33)	1,22	1,107(28)
	70	—	20,55	—	—
	71	11,4 дня	э.з.	—	—
	72	—	27,37	—	—
	73	—	7,67	—	—
	73*m*	0,53 *сек*	и.п.	—	0,054(9)
	74	—	36,74	—	—
	75	82 *мин*	β^-	1,19	0,199(1,4); 0,265(11)
	75*m*	48 *сек*	и.п.	—	0,139(34)
	76	—	7,67	—	—
	77	11,3 *ч*	β^-	2,2	0,21*(61); 0,263(45); 0,368(15); 0,417(25); 0,563(18); 0,73**(14)
	77*m*	54 *сек*	β^- (76)	2,9	0,159(12); 0,215(21)
		—	и.п. (24)	—	
	78	1,47 *ч*	β^-	0,71	0,277(94)
$_{33}$As	69	15 *мин*	β^+	2,9	0,23; 0,511(ан.)
	70	52 *мин*	β^+	2,89(6); 2,14	0,511(183, ан.); 0,60(23); 0,67(25); 0,75(23); 1,040(78); 1,12(23); 1,71(22)
	71	62 *ч*	э.з. (~ 70)	—	0 175(90); 0,511(60, ан.)
		—	β^+ (~ 30)	0,81	
	72	26 *ч*	β^+	3,34(17); 2,50	0,511 (150. ан.); 0,630 (8); 0,835(78)
		—	э.з.	—	
	73	80,3 дня	э.з.	—	0,054(9)
	74	17,9 дня	β^+ (29)	1,54(3); 0,95(26)	0,511(59, ан.); 0,596(61); 0,635(14)
		—	э.з. (39)	—	
		—	β^- (32)	1,36	
	74*m*	8,0 *сек*	и.п.	—	0,283
	75	—	100	—	—
	76	26,4 *ч*	β^-	2,97	0,559(43); 0,657(6); 1,22*(5)
	77	38,7 *ч*	β^-	0,68	0,239(2,5); 0,522(0,8)
	78	91 *мин*	β^-	4,1	0,614/42/; 0,70/15/; 0,83/8/; 1,31/11/
	79	9,0 *мин*	β^-	2,15	0,36(2); 0,43(2); 0,89(1)
	80	15,3 *сек*	β^-	6,0	0,666(42); 1,22(4); 1,64(4); 1,77(1,7)
	81	33 *сек*	β^-	3,8	—
$_{34}$Se	70	~44 *мин*	β^+	—	—
	71	4,5 *мин*	β^+	3,4	0,16; 0,511(ан.)
	72	8,4 дня	э.з.	—	0,046(59)
	73	7,1 *ч*	β^+ (65)	1,30	0,066(65); 0,359(99); 0,511(130, ан.)
		—	э.з. (35)	—	

Элемент	A	Период полураспада	Тип распада или содержание стабильных изотопов, %	Энергия, *Мэв* (относительная интенсивность, %)	
				групп частиц	γ-излучения
$_{34}$Se	74	—	0,87	—	—
	75	120,4 дня	э.з.	—	0,121(17); 0,136(57); 0,265(60); 0,280(25); 0,401(12)
	76	—	9,02	—	—
	77	—	7,58	—	—
	77*m*	17,5 *сек*	и.п.	—	0,161(50)
	78	—	23,52	—	—
	79	$\sim 6{,}5 \cdot 10^4$ лет	β^-	0,16	—
	79*m*	3,91 *мин*	и.п.	—	0,096(9)
	80	—	49,82	—	—
	81	18,6 *мин*	β^-	1,58	0,28**(0,9); 0,56**(0,3); 0,83(0,2)
	81*m*	56,8 *мин*	и.п.	—	0,103(8)
	82	—	9,19	—	—
	83	25 *мин*	β^-	1,8	0,22(44); 0,36(69), 1,88(16); 2,29(9)
	83*m*	70 *сек*	β^-	3,8	0,35/16/; 0,65/20/; 1,01**/100/; 2,02/40/
	84	3,3 *мин*	—	—	—
	85	39 *сек*	—	—	—
$_{35}$Br	74	36 *мин*	β^+	4,7	0,511 (ан.); 0,64
	75	1.7 *ч*	β^+ (~90)	1,70	0,285; 0,511 (аи.); 0,62
		—	э.з. (~10)	—	
	76	16,1 *ч*	β^+ (~62)	3,6	0,511(133, ан.); 0,559(63);
		—	э.з. (~38)	—	0,65(19); 1,21(13); 1,86(11)
	77	57 *ч*	э.з. (99)	—	0,24**(30); 0,52(24); 0,58(7)
		—	β^+ (1)	0,34	
	77*m*	4,2 *мин*	и.п.	—	0,108
	78	6,5 *мин*	β^+	2,55	0,511(184, ан.); 0,614(14)
	79	—	50,52	—	—
	79*m*	4,8 *сек*	и.п.	—	0,21
	80	17,6 *мин*	β^- (92)	2,00	0,511(5, ан.); 0,618(7); 0,666(1)
		—	β^+ (2,6)	0,87	
		—	э.з. (5,7)	—	
	80*m*	4,38 *ч*	и.п.	—	0,037(36)
	81	—	49,48	—	—
	82	35,34 *ч*	β^-	0,444	0,554(66); 0,619(41); 0,777(83); 1,044(29)
		—			
	82*m*	6,05 *мин*	и.п. (97,6)	—	0,046(0,3); 0,777(0,15)
		—	β^- (2,4)	—	
	83	2,41 *ч*	β^-	0,93	0,530(1,4)
	84	31,8 *мин*	β^-	4,68	0,88(51), 1,90(18); 3,93(13)
	85	3,0 *мин*	β^-	2,5	—
	86	54 *сек*	β^-	7,1	1,36/39/; 1,56/100/; 2,75/36/
	87	55,6 *сек*	β^-	2,6	1,44/100/; 1,85/18/; 2,48/18/; 2,98/25/; 4,19/21/
	88	15,5 *сек*	β^-	—	0,76
	89	4,5 *сек*	β^-	—	—
$_{36}$Kr	74	20 *мин*	β^+	3,1	0,511 (ан.)
	76	14,8 *ч*	э.з.	—	—
	77	1,19 *ч*	э.з. (~20)	—	—
		—	β^+ (~80)	1,86	
	78	—	0,354	—	—
	79	34,92 *ч*	э.з (92)	—	0,398(10); 0,511(15, ан.); 0,606(10)
			β^+ (8)	0,60	
	79*m*	55 *сек*	и.п.	—	0,127
	80	—	2,27	—	—
	81	$2{,}1 \cdot 10^5$ лет	э.з.	—	—
	81*m*	13 *сек*	и.п.	—	0,190(65)
	82	—	11,56	—	—
	83	—	11,55	—	—
	83*m*	1,86 *ч*	и.п.	—	0,009(9)

Элемент	A	Период полураспада	Тип распада или содержание стабильных изотопов, %	Энергия, *Мэв* и (относительная интенсивность, %)	
				групп частиц	γ-излучения
$_{36}$Kr	84	—	56,90	—	—
	85	10,76 *ч*	β^-	0,67	0,514(0,4)
	85*m*	4,4 *ч*	β^- (77)	0,82	0,150(74); 0,305(13)
		—	и.п. (23)	—	
	86	—	17,37	—	—
	87	76 *мин*	β^-	3,8	0,403(84); 0,85(16); 2,57(35)
	88	2,80 *ч*	β^-	2,8	0,191(35); 0,85(23); 1,55(14); 2,40(35)
	89	3,18 *мин*	β^-	4,0	0,23/85/; 0,51/42/; 0,60/100/; 0,88/65/; 1,12/45/; 1,51/88/;
	90	33 *сек*	β^-	2,80	0.120(65); 0,536(48); 1,11(48)
	91	9,8 *сек*	β^-	3,6	—
	92	3,0 *сек*	β^-	—	—
	93	2,0 *сек*	β^-	—	—
	94	1,4 *сек*	β^-	—	—
$_{37}$Rb	79	24 *мин*	β^+	—	0,15(73); 0,19(29); 0,511(180, ан.)
	80	34 *сек*	β^+	4,1	0,511(195, ан.); 0,618(39)
	81	4,7 *ч*	э.з. (87)	—	—
		—	β^+ (13)	1,03	
	81*m*	31 *мин*	β^+	1,4	—
		—	н.п.	—	
	82	1,25 *мин*	β^+ (96)	3,15	0,511(192, ан.);
		—	э.з. (4)	—	0,777(9)
	82*m*	6,3 *ч*	э.з. (94)	—	0,554(66); 0,619(41);
		—	β^+ (6)	0,78	0,777(83)
	83	83 дня	э.з.	—	0,53**(93); 0,79(0,9)
	84	33,0 дня	э.з. (76)	—	0,511(42, ан.); 0,88(74)
		—	β^+ (21)	1,66	
		—	β^- (3)	0,91	
	84*m*	20 *мин*	и.п.	—	0,216(37); 0,250(65); 0,464(32)
	85	—	72,15	—	—
	86	18,66 дня	β^-	1,78	1,078(8,8)
	86*m*	1,02 *мин*	н.п.	—	0,56
	87	$4{,}8\cdot10^{10}$ лет	27,85	—	—
		—	β^-	0,274	—
	88	17,8 *мин*	β^-	5,3	0,898(13); 1,863(21)
	89	15,4 *мин*	β^-	3,92(7); 2,9(5); 1,6	0,66(17); 1,05(75); 1,26(54)
	90	2,91 *мин*	β^-	6,6	0,83*(61); 3,34**(15); 4,13(11); 4,34*(18)
	91	1,2 *мин*	β^-	4,6	—
	92	5,3 *сек*	β^-	—	—
	93	5,6 *сек*	β^-	—	—
	94	2,9 *сек*	β^-	—	—
$_{38}$Sr	80	1,7 *ч*	э.з.	—	0,58
	81	29 *мин*	э.з.	—	—
		—	β^+	—	—
	82	25,0 дней	э.з.	—	—
	83	32,4 *ч*	э.з. (84)	—	0,040(24); 0,38(35);
		—	β^+ (16)	1,15	0.511(32, ан.); 0,76(40)
	84	—	0,56	—	—
	85	64,0 дня	э.з.	—	0,514(100)
	85*m*	70 *мин*	и.п. (86)	—	0,150(14); 0,231(85)
		—	э.з. (14)	—	—
	86	—	9,86	—	—
	87	—	7,02	—	—
	87*m*	2,83 *ч*	и.п. (99)	—	0,388(80)
		—	э.з.(1)	—	—
	88	—	82,56	—	—
	89	52,7 дня	β^-	1,463	0,91(0,009)
	90	27,7 лет	β^-	0,546	—

Элемент	A	Период полураспада	Тип распада или содержание стабильных изотопов, %	Энергия, *Мэв* (относительная интенсивность, %)	
				групп частиц	γ-излучения
$_{38}Sr$	91	9,67 *ч*	β^-	2,67	0,645(15); 0,748(27); 1,025(30)
	92	2,71 *ч*	β^-	1,5(10); 0,55	0,44(3); 1,37(90)
	93	8,3 *мин*	β^-	2,9	0,60; 0,8; 1,2
	94	1,35 *мин*	β^-	2,1	1,42(100)
	95	0,8 *мин*	β^-	—	—
$_{39}Y$	82	12,3 *мин*	—	—	—
	83	7,4 *мин*	—	—	—
	84	43 *мин*	β^+	3,5	0,795(100); 0,982(100); 1,041(50)
	85	5,0 *ч*	β^+ (70)	2,24	0,231(13);
	—		э.з. (30)	—	0,511(140, ан.)
	85*m*	2,68 *ч*	β^+ (55)	1,54	0,51**(200);
	—		э.з. (45)	—	0,92(9)
	86	14,6 *ч*	э.з. (74)	—	0,51*(35); 0,63*(37);
	—		β^+ (26)	3,15; 2,34	1,077(82); 1,16*(35); 1,925(24)
	86*m*	48 *мин*	и.п.	—	0,208(94)
	87	80 *ч*	э.з. ($>$ 99)	—	0,483
	—		β^+ ($\sim$0,3)	—	—
	87*m*	14 *ч*	и.п.	—	0,381(74)
	—		β^+ ($\sim$5)	—	
	88	108,1 дня	э.з. ($>$ 99)	—	0,898(91); 1,836(100)
	—		β^+ (0,2)	0,76	
	89	—	100	—	—
	89*m*	16,1 *сек*	и.п.	—	0,91(99)
	90	64,0 *ч*	β^-	2,27	—
	90*m*	3,1 *ч*	и.п.(99,6)	—	0,202(97); 0,482(91)
	—		β^- (0,4)	—	
	91	58,8 дня	β^-	1,545	1,21(0,3)
	91*m*	50,3 *мин*	и.п.	—	0,551(95)
	92	3,53 *ч*	β^-	3,63	0,934(14); 1,40(4,7)
	93	10,3 *ч*	β^-	2,89	0,267(6); 0,94(2,3); 1,90(1,8)
	94	20,3 *мин*	β^-	5,0	0,56(6); 0,92(43); 1,13(5)
	95	10,9 *мин*	β^-	—	—
	96	2,3 *мин*	β^-	3,5	0,7; 1,0; 1,5**
$_{40}Zr$	84	16 *мин*	—	—	—
	85	1,4 *ч*	—	—	—
	86	16,5 *ч*	э.з	—	0,028(20); 0,243(96); 0,612(5)
	87	1,6 *ч*	β^+	2,10	0,511 (ан.); 1,2; 2,2
	88	85 дней	э.з.	—	0,394(97)
	89	78,4 *ч*	э.з. (78)	—	0,511(44, ан.);
	—		β^+ (22)	0,90	0,91(99)
	89*m*	4,18 *мин*	и.п. (94)	—	0,588(87); 1,51(6)
	—		э.з. (4,7)	—	—
	—		β^+ (1,4)	2,40(0,2); 0,89(1,2)	—
	90	—	51,46	—	—
	90*m*	0,80 *сек*	и.п.	—	2,18(14); 2,32(86)
	91	—	11,23	—	—
	92	—	17,11	—	—
	93	$1{,}5 \cdot 10^6$ лет	β^-	0,060	—
	94	—	17,40	—	—
	95	65,5 дня	β^-	0,89(2); 0,396	0,724(49); 0,756(49)
	96	—	2,80	—	—
	97	17,0 *ч*	β^-	1,91	0,747(92)
	98	1 *мин*	—	—	—
$_{41}Nb$	88	14 *мин*	β^+	3,2	—
	89	1,9 *ч*	β^+	2,9	0,511(ан.); 1,626; 3,577; 3,838
	89*m*	42 *мин*	β^+	3,1	0,511(ан.); 0,588
	90	14,6 *ч*	β^+	1,50	0,142(75);
	—		э.з.	—	1,14(97); 2,32(82)
	90*m*	24 *сек*	и.п.	—	0,122(71)

Элемент	A	Период полураспада	Тип распада или содержание стабильных изотопов, %	Энергия, *Мэв* (относительная интенсивность, %)	
				групп частиц	γ-излучения
$_{41}$Nb	91*m*	64 дня	и.п. (97)	—	0,104(0,5); 1,21(3)
			э.з. (3)	—	—
	92*m*	10,16 дня	э.з. (> 99)	—	0,934(99)
			β^+ (0,06)	—	—
	93	—	100	—	—
	93*m*	13,6 года	и.п.	—	—
	94	$2 \cdot 10^4$ лет	β^-	0,49	0,702(100); 0,871(100)
	94*m*	6,29 *мин*	и.п. (> 99)	—	0,871(0,2)
			β^- (0,2)	—	—
	95	35,0 дней	β^-	0,160	0,765(100)
	95*m*	90 *ч*	и.п.	—	—
	96	23,35 *ч*	β^-	0,7	0,459(28); 0,569(59); 0,778(97); 1,092(49)
	97	72 *мин*	β^-	1,27	0,665(98)
	97*m*	1,0 *мин*	и.п.	—	0,747(98)
	98	51 *мин*	β^-	3,1	0,720(75); 0,787(100); 1,16(30)
	99	2,4 *мин*	β^-	3,2	0,100/1/; 0,260/1/
	100	3,0 *мин*	β^-	—	0,36/55/; 0,45/40/; 0,53**/100/
$_{42}$Mo	88	27 *мин*	β^+	2,5	0,511(ан.); 2,69
	89	7 *мин*	β^+	4,9	0,511 (ан.)
	90	5,67 *ч*	э.з. (75)	—	0,122(71);
		—	β^+ (25)	1,2	0,257(85); 0,511(50, ан.)
	91	15,49 *мин*	β^+	3,44	0,511(ан.)
	91*m*	64 *сек*	и.п. (~57)	—	0,658(54);
		—	β^+ (~43)	3,99/15/; 2,78/100/	1,21(22); 1,53(15)
	92	—	15,86	—	—
	93	> 100 лет	э.з.	—	—
	93*m*	6,95 *ч*	и.п.	—	0,264(58); 0,685(100); 1,479(100)
	94	—	9,12	—	—
	95	—	15,70	—	—
	96	—	16,50	—	—
	97	—	9,45	—	—
	98	—	23,75	—	—
	99	66,7 *ч*	β^-	1,23	0,181(7); 0,740(12); 0,780(4)
	100	—	9,62	—	—
	101	14,6 *мин*	β^-	2,23	0,191(25); 0,59(21); 1,02(25)
	102	11,5 *мин*	β^-	1,2	—
	103	62 *сек*	β^-	—	—
	104	1,1 *мин*	β^-	4,8	0,070
	105	40 *сек*	β^-	—	—
$_{43}$Tc	92	4,4 *мин*	β^+ (~92)	4,1	0,14(67); 0,33(90);
		—	э.з. (~8)	—	0,511(184, ан.); 0,79(95); 1,54(100)
	93	2,75 *ч*	э.з. (87)	—	0,511(26, ан.);
		—	β^+ (13)	0,80	1,35(65); 1,49(33)
	93*m*	43 *мин*	и.п. (82)	—	0,390(63); 2,66(18)
		—	э.з. (18)	—	—
	94	293 *мин*	э.з. (89)	—	0,511(22, ан.);
		—	β^+ (11)	0,816	0,702(100); 0,849(100); 0,871(100)
	94*m*	53 *мин*	β^+ (66)	2,47	0,511(132, ан.);
		—	э.з. (34)	—	0,871(91); 1,53(10); 1,87(9)
	95	20,0 *ч*	э.з.	—	0,768(82); 0,84(11)
	95*m*	61 день	э.з. (95)	—	0,204(70); 0,584(36);
		—	β^+ (0,42)	0,68	0,838(27)
		—	и.п. (4)	—	—
	96	4,35 дня	э.з.	—	0,778(100); 0,81(84); 0,851(100); 1,12(16)
	96*m*	52 *мин*	и.п.	—	—
	97	$2{,}6 \cdot 10^6$ лет	э.з.	—	—
	97*m*	91 день	и.п.	—	—
	98	$1{,}5 \cdot 10^6$ лет	β^-	0,30	0,66(100); 0,76(100)

Элемент	A	Период полураспада	Тип распада или содержание стабильных изотопов, %	Энергия, *Мэв* (относительная интенсивность, %)	
				групп частиц	γ-излучения
$_{43}$Tc	99	$2{,}12 \cdot 10^5$ лет	β^-	0,292	—
	99*m*	6,05 *ч*	и.п.	—	0,140(90)
	100	15,8 *сек*	β^-	3,38	0,540; 0,60
	101	14,0 *мин*	β^-	1,32	0,307(91); 0,545(8)
	102	4,5 *мин*	β^-	2	0,47
	103	50 *сек*	β^-	2,2	0,135/17/; 0,21/10/
	104	18 *мин*	β^-	4,6	—
	105	7,7 *мин*	β^-	3,4	0,110
	106	37 *сек*	β^-	—	—
	107	29 *сек*	β^-	—	—
$_{44}$Ru	94	57 *мин*	э.з.	—	—
	95	1,65 *ч*	э.з. (85)	—	0,340(70); 0,511(30, ан.);
		—	β^+ (15)	1,33	0,625(13); 1,09(21)
	96	—	5,46	—	—
	97	2,88 дня	э.з.	—	0,215(91); 0,324(8)
	98	—	1,868	—	—
	99	—	12,63	—	—
	100	—	12,53	—	—
	101	—	17,02	—	—
	102	—	31,6	—	—
	103	39,5 дня	β^-	0,70(3); 0,21	0,497(88); 0,610(6)
	104	—	18,87	—	—
	105	4,44 *ч*	β^-	1,87(11); 1,15	0,317*(11); 0,475*(20); 0,67*(16); 0,726(48)
	106	368 дней	β^-	0,039	—
	107	4,2 *мин*	β^-	3,2	0,195(14); 0,86 (7)
	108	4,5 *мин*	β^-	1,3	0,165(28)
$_{45}$Rh	97	32 *мин*	β^+	2,47	—
	98	8,7 *мин*	β^+	2,5	0,65(100)
	99	4,7 *ч*	э.з. (90)	—	0,34(70);
		—	β^+ (10)	0,74	0,511(20, ан.); 0,62(20)
	100	20,8 *ч*	э.з. (93)	—	0,511(13, ан.); 0,540(88);
		—	β^+ (7)	2,62	0,820(25); 2,37(39)
	101	3,0 года	э.з.	—	0,127(88); 0,198(75); 0,325(11)
	101*m*	4,4 дня	э.з. (90)	—	0,307(83); 0,545(6)
		—	и.п. (10)	—	—
	102	206 дней	э.з.	—	0,475(57); 0,511(25, ан.)
		—	β^+	1,29	
		—	β^-	1,15	
	103	—	100	—	—
	103*m*	57,5 *мин*	и.п.	—	0,040(0,4)
	104	43 *сек*	β^-	2,44	0,56(2); 1,24(0,13)
	104*m*	4,41 *мин*	и.п. ($>$ 99)	—	0,051(47); 0,078(2,5);
		—	β^- (0,18)	—	0,097(2,6)
	105	35,88 *ч*	β^-	0,568	0,306(5); 0,319(19)
	105*m*	45 *сек*	и.п.	—	0,129
	106	30 *сек*	β^-	3,54	0,512(21); 0,622*(11)
	107	21,7 *мин*	β^-	1,20	0,305(73); 0,390(11)
	108	16,8 *сек*	β^-	4,5	0,434(43); 0,51**(10); 0,62(22)
	110	5 *сек*	β^-	5,5	0,374
$_{46}$Pd	99	22 *мин*	β^+	2,0	—
	100	4,0 дня	э.з.	—	0,074(34); 0,084(49); 0,126(16)
	101	8,4 *ч*	э.з. (97,5)	—	0,296(30); 0,590(24)
		—	β^+ (2,5)	0,78	
	102	—	0,96	—	—
	103	17,0 дней	э.з.	—	0,297(0,011); 0,362(0,06); 0,498(0,011)
	104	—	10,97	—	—
	105	—	22,2	—	—
	106	—	27,3	—	—

Элемент	A	Период полураспада	Тип распада или содержание стабильных изотопов, %	Энергия, *Мэв* (относительная интенсивность, %)	
				групп частиц	γ-излучения
$_{46}$Pd	107	$\sim 7 \cdot 10^6$ лет	β^-	0,04	—
	107*m*	21,3 *сек*	и.п.	—	0,21
	108	—	26,7	—	—
	109	13,47 *ч*	β^-	1,028	0,088(5); 0,60(0,03)
	109*m*	4,69 *мин*	и.п.	—	0,188(58)
	110	—	11,8	—	—
	111	22 *мин*	β^-	2,2	0,38/5/; 0,60*/13/; 1,4*/8/
	111*m*	5,5 *ч*	и.п. (75)	—	0,17
		—	β^- (25)	2,0	—
	112	21,0 *ч*	β^-	0,28	0,019(20)
	113	1,4 *мин*	β^-	—	—
	115	45 *сек*	β^-	—	—
$_{47}$Ag	103	66 *мин*	β^+	1,6	0,12*/26/; 0,15/23/;
		—	э.з. ($\sim$70)	—	0,27/34/; 0,511/100, ан./.
	103*m*	5,7 *сек*	и.п.	—	0,138
	104	66 *мин*	β^+	0,99	0,556(84); 0,764(48);
		—	э.з.	—	0,854(30)
	104*m*	29,8 *мин*	β^+	2,70	0,511(120, ан.);
		—	э.з.	—	0,556(100)
		—	и.п.	—	—
	105	40 дней	э.з.	—	0,280(32); 0,344**(42)
	106	23,96 *мин*	β^+	1,96	0,511(140, ан.)
	106*m*	8,5 дня	э.з.	—	0,512(86); 0,616(23); 0,717**(31); 0,80**(41); 1,046(29)
	107	—	51,35	—	—
	107*m*	44,3 *сек*	и.п.	—	0,094(5)
	108	2,42 *мин*	β^- (97,5)	1,64	0,434(0,45); 0,511(0,56, ан.);
		—	э.з. (2,2)	—	0,632(1,7)
		—	β^+ (0,28)	0,90	
	108*m*	$>$ 5 лет	э.з. (90)	—	0,434(89); 0,614(90);
		—	и.п. (10)	—	0,722(90)
	109	—	48,65	—	—
	109*m*	39,2 *сек*	и.п.	—	0,088(5)
	110	24,4 *сек*	β^-	2,87	0,658(4,5)
		—	э.з. (0,3)	—	
	110*m*	255 дней	β^- (98,7)	1,5(0,6); 0,53(31); 0,087	0,658(96); 0,764(23); 0,885(71); 0,937(32); 1,384(21)
		—	и.п. (1,3)	—	
	111	7,5 дня	β^-	1,05	0,247(1); 0,342(6)
	111*m*	74 *сек*	и.п.	—	0,065
	112	3,14 *ч*	β^-	3,94	0,617(41); 1,40(5)
	113	5,3 *ч*	β^-	2,0	0,12/10/; 0,30/100/; 0,67/17/
	114	4,5 *сек*	β^-	4,6	0,57
	115	20,0 *мин*	β^-	3,2	0,14**(12); 0,22**(49); 0,28(13); 1,48(11); 2,12(13)
	116	2,5 *мин*	β^-	5,0	0,52; 0,70
	117	1,1 *мин*	β^-	—	—
$_{48}$Cd	103	10 *мин*	β^+	—	0,22; 0,511(ан.); 0,63; 0,85
	104	57 *мин*	э.з.	—	0,084
	105	55 *мин*	э.з.	—	0,308; 0,320; 0,347;
		—	β^+	1,69	0,433; 0,511(ан.)
	106	—	1,22	—	—
	107	6,49 *ч*	э.з. ($>$ 99)	—	0,511(0,56, ан.);
		—	β^+ (0,28)	0,302	0,796(0,08); 0,829(0,21)
	108	—	0,88	—	—
	109	453 дня	э.з.	—	0,088
	110	—	12,39	—	—
	111	—	12,75	—	—
	111*m*	48,6 *мин*	и.п.	—	0,150(30); 0,247(94)
	112	—	24,07	—	—
	113	—	12,26	—	—

Элемент	A	Период полураспада	Тип распада или содержание стабильных изотопов, %	Энергия, *Мэв* (относительная интенсивность, %)	
				групп частиц	γ-излучения
$_{48}$Cd	113*m*	13,6 года	β^-	0,58	0,265 (~ 0,1)
	114	—	28,86	—	—
	115	53,5 *ч*	β^-	1,11	0,262(2); 0,49(10); 0,53(26)
	115*m*	43 дня	β^-	1,62	0,485(0,3); 0,935(1,9); 1,29(0,9)
	116	—	7,58	—	—
	117	2,4 *ч*	β^-	2,23	0,273(31); 0,345(18); 0,434(13); 1,303(19); 1,577(17)
	117*m*	3,4 *ч*	β^-	0,67	0,273(18); 0,880(10); 1,24** (11); 1,433(10); 1,998(15)
	118	49 *мин*	β^-	—	—
	119	2,7 *мин*	β^-	3,5	—
$_{49}$In	106	5,3 *мин*	β^+	4,9	0,511(ан.); 0,63; 1,65; 1,85
	107	33 *мин*	β^+	2,2	0,22(46); 0,511(ан.)
		—	э.з	—	
	108	57 *мин*	э.з	—	0,150; 0,175; 0,243;
		—	β^+	1,29	0,511(ан.); 0,633; 0,872
	109	4,3 *ч*	э.з. (94)	—	0,205; 0,28**; 0,35**;
		—	β^+ (6)	0,79	0,65**; 0,91**
	109m_1	1,3 *мин*	и.п.	—	0,658
	109m_2	0,20 *сек*	и.п.	—	0,40(20); 0,68(100); 1,04(20); 1,43(77)
	110	66 *мин*	β^+ (71)	2,25	0,511(142, ан.);
		—	э.з. (29)	—	0,658(95)
	111	2,81 дня	э.з.	—	0,173(89); 0,247(94)
	112	14,4 *мин*	β^- (44)	0,66	0,511(44, ан.);
		—	β^+ (22)	1,56	0,617(6)
		—	э.з. (34)	—	
	112*m*	20,7 *мин*	и.п.	—	0,156(9)
	113	—	4,23	—	—
	113*m*	99,8 *мин*	и.п.	—	0,393(84)
	114	72 *сек*	β^- (98)	1,988	1,299(0,17)
		—	э.з. (1,9)	—	
		—	β^+ (0,004)	0,42	
	114*m*	50,0 дней	и.п. (96,5)	—	0,192(17); 0,558(3,5);
		—	э.з. (3,5)	—	0,724(3,5)
	115	$6 \cdot 10^{14}$ лет	95,77	—	—
		—	β^-	0,48	—
	115*m*	4,50 *ч*	и.п. (95)	—	0,335(50)
		—	β^- (5)	0,83	
	116	13,4 *сек*	β^-	3,3	0,434(0,12); 0,95(0,1); 1,293(1,2)
	116m_1	54,0 *мин*	β^-	1,00	0,417(36); 1,09(53); 1,293(80); 2,111(20)
	116m_2	2,16 *сек*	и.п.	—	0,164
	117	45 *мин*	β^-	0,74	0,158(87); 0,565(100)
	117*m*	1,93 *ч*	и.п.(47)	—	0,158(14); 0,314(31)
		—	β^- (53)	1,78	
	118	5,7 *сек*	β^-	4,2	1,230(15)
	119	2,1 *мин*	β^-	1,6	0,82(95)
	119*m*	17,5 *мин*	β^- (95)	2,7	0,024; 0,30; 0,91*
		—	и.п. (5)	—	
	120	3,2 *сек*	β^-	5,6	1,171(15)
	121	3,1 *мин*	β^-	3,7	—
	122	8 *сек*	β^-	5	0,99; 1,14
	123	36 *сек*	β^-	4,6	—
	124	~ 3,6 *сек*	β^-	5	0,99/3/; 1,13/10/; 3,21/3/
$_{50}$Sn	108	9,2 *мин*	э.з.	—	0,28; 0,42
	109	18,1 *мин*	э.з	—	0,335; 0,521; 0,89;
		—	β^+	1,6	1,12
	110	4,0 *ч*	э.з.	—	0,283(95)
	111	35,0 *мин*	э.з. (73)	—	0,511(54, ан.);
		—	β^+ (27)	1,51	0,75(1,1); 1,14(1,8); 1,89(1,0)

Элемент	A	Период полураспада	Тип распада или содержание стабильных изотопов, %	Энергия, *Мэв* (относительная интенсивность, %)	
				групп частиц	γ-излучения
$_{50}$Sn	112	—	0,95	—	—
	113	115 дней	э.з.	—	0,255 (1,8)
	113*m*	20 *мин*	и.п. (91)	—	0,079 (0,6)
		—	э.з. (9)	—	—
	114	—	0,65	—	—
	115	—	0,34	—	—
	116	—	14,24	—	—
	117	—	7,57	—	—
	117*m*	14,0 дней	и.п.	—	0,158 (87)
	118	—	24,01	—	—
	119	—	8,58	—	—
	119*m*	~ 250 дней	и.п.	—	0,024 (16)
	120	—	32,97	—	—
	121	27,5 *ч*	β^-	0,383	—
	121*m*	76 *лет*	β^-	0,42	0,037
	122	—	4,71	—	—
	123	125 дней	β^-	1,42	—
	123*m*	39,5 *мин*	β^-	1,26	0,160
	124	—	5,98	—	—
	125	9,4 дня	β^-	2,34	0,811 (1,5); 0,904 (1,4); 1,068 (4); 1,97 (0,6)
	125*m*	9,5 *мин*	β^-	2,04	0,325 (97)
	126	~ 10^5 лет	β^-	—	0,060; 0,067; 0,092
	127	4,1 *мин*	β^-	2,7	0,49 (100)
	128	59 *мин*	β^-	0,80	0,044 (7); 0,072 (19); 0,50 (61); 0,57 (22)
	129	9 *мин*	β^-	—	1,15
	130	2,6 *мин*	β^-	—	—
	131	3,4 *мин*	β^-	—	—
	132	2,2 *мин*	β^-	—	—
$_{51}$Sb	112	0,9 *мин*	β^+	—	0,511 (ан.); 1,27
	—		э.з.	—	
	113	6,4 *мин*	э.з.	—	0,32; 0,511 (ан.);
	—		β^+	2,42	1,03; 1,2**
	114	3,3 *мин*	β^+	2,7	0,9; 1,30
	—		э.з.	—	
	115	31 *мин*	э.з. (67)	—	0,499 (100); 0,511 (67, ан.);
	—		β^+ (33)	1,51	0,98 (5); 1,24 (5)
	116	16 *мин*	э.з. (72)	—	0,511 (56, ан.);
	—		β^+ (28)	2,3	0,93 (26); 1,293 (85); 2,23 (14)
	116*m*	60 *мин*	э.з. (81)	—	0,099 (30); 0,140 (30);
	—		β^+ (19)	1,16	0,406 (36); 0,511 (38, ан.); 0,545 (68); 0,96 (75); 1,06 (27); 1,293 (100)
	117	2,8 *ч*	э.з. (97,4)	—	0,158 (87); 0,511 (5, ан.)
	—		β^+ (2,6)	0,57	
	118	3,5 *мин*	э.з.	—	0,511 (150, ан.);
	—		β^+	2,67	0,83 (0,4); 1,230* (3)
	118*m*	5,1 *ч*	э.з. (> 99)	—	0,041 (29); 0,254 (93);
	—		β^+ (0,16)	—	1,049 (100); 1,230 (100)
	119	38,0 *ч*	э.з.	—	0,024 (16)
	120	15,89 *мин*	β^+	1,70	0,511 (87, ан.);
	—		э.з.	—	1,171 (1,3)
	121	—	57,25	—	—
	122	2,80 дня	β^- (97)	1,97	0,564 (66);
	—		э.з. (3,0)	—	0,686 (3,4)
	—		β^+ (0,006)	0,56	
	122*m*	4,2 *мин*	и.п.	—	0,061 (50); 0,075 (17)
	123	—	42,75	—	—
	124	60,4 дня	β^-	2,31	0,603 (97); 0,72* (14); 1,692 (50)
	124m_1	93 *сек*	и.п. (80)	—	0,505 (20); 0,603 (20);
	—		β^- (20)	1,19	0,644 (20)
	124m_2	21 *мин*	и.п.	—	—

Элемент	A	Период полураспада	Тип распада или содержание стабильных изотопов, %	Энергия, *Мэв* (относительная интенсивность, %)	
				групп частиц	γ-излучения
$_{51}$Sb	125	2,71 года	β^-	0,61	0,427 (31); 0,463 (10); 0,599* (24); 0,634 (11)
	126	12,5 дня	β^-	1,9	0,41; 0,69**
	127	93 *ч*	β^-	1,5	0,46; 0,68; 0,77
	128	10,8 *мин*	β^-	2,6	0,320 (83); 0,75* (200)
	129	4,3 *ч*	β^-	1,87	0,54; 0,81; 0,91
	130	33 *мин*	β^-	—	0,19; 0,33; 0,82**; 0,94
	131	26 *мин*	β^-	—	0,64 (37); 0,95 (48)
	132	2,1 *мин*	β^-	—	—
	133	4,2 *мин*	β^-	—	—
	135	2 *сек*	β^-	—	—
$_{52}$Te	107	2,2 *сек*	α	3,28	—
	108	5,3 *сек*	α	3,08	—
		—	p	2,6; 3,4; 3,7	—
	115	6,0 *мин*	β^+ (~ 80)	2,8	0,511 (160, ан.);
		—	э.з. (~ 20)	—	0,72 (34); 1,28 (32); 1,38 (32)
	116	2,50 *ч*	э.з.	—	0,094
	117	61 *мин*	э.з. (70)	—	0,511 (60, ан.);
		—	β^+ (30)	1,81	0,72 (65); 0,93 (6); 1,78 (9)
	118	6,0 дней	э.з.	—	—
	119	15,9 *ч*	э.з.	—	0,645 (85); 0,70 (11);
		—	β^+ (5)	0,627	1,76 (3,6)
	119*m*	4,68 дня	э.з.	—	0,153 (62); 0,270 (25); 1,221 (67); 2,09 (4)
	120	—	0,089	—	—
	121	17 дней	э.з.	—	0,508 (18); 0,573 (80)
	121*m*	154 дня	и.п. (90)	—	0,212 (82); 1,10 (3)
		—	э.з. (10)	—	
	122	—	2,46	—	—
	123	—	0,87	—	—
	123*m*	117 дней	и.п.	—	0,159 (84)
	124	—	4,61	—	—
	125	—	6,99	—	—
	125*m*	58 дней	и.п.	—	0,035 (7); 0,110 (0,3)
	126	—	18,71	—	—
	127	9,4 *ч*	β^-	0,70	0,058 (0,01); 0 21*(0,03); 0,350 (0,05); 0,417 (0,3)
	127*m*	109 дней	и.п. (99,2)	—	0,059 (0,19); 0,089 (0,08);
		—	β^- (0,8)	—	0,67 (0,004)
	128	—	31,79	—	—
	129	68,7 *мин*	β^-	1,45	0,027 (19); 0,455 (15)
	129*m*	34,1 дня	и.п. (64)	—	0,69 (6)
		—	β^- (36)	1,60	
	130	—	34,49	—	—
	131	24,8 *мин*	β^-	2,14	0,150 (68); 0,453 (16)
	131*m*	30 *ч*	β^- (82)	2,46 (5); 0,9	0,78** (60); 0,85* (31);
		—	и.п. (18)	—	1,127 (13); 1,206 (11)
	132	77,7 *ч*	β^-	0,22	0,053 (17); 0,230 (90)
	133	12,5 *мин*	β^-	—	—
	133*m*	50 *мин*	β^- (87)	2,4	0,432 (50); 0,557 (35);
		—	и.п. (13)	—	0,754 (85); 0,91 (57)
	134	42 *мин*	β^-	—	0,08 (13); 0,17 (16); 0,204 (21); 0,262 (19)
$_{53}$I	117	7 *мин*	β^+	—	0,16; 0,34; 0,511 (ан.)
	118	13,9 *мин*	β^+ (~ 54)	—	0,511 (108, ан.); 0,55;
		—	э.з. (~ 46)	—	0,60; 1,15
	119	19,5 *мин*	β^+ (51)	—	0,26; 0,511 (102, ан.);
		—	э.з. (49)	—	0,78
	120	1,35 *ч*	э.з. (54)	—	0,511 (92, ан.); 0,56;
		—	β^+ (46)	4,0	0,62; 1,52
	121	2,12 *ч*	э.з. (91)	—	0,212 (90); 0,32 (6);

Элемент	A	Период полураспада	Тип распада или содержание стабильных изотопов, %	Энергия, *Мэв* (относительная интенсивность, %)	
				групп частиц	γ-излучения
$_{53}$I		—	β^+ (9)	1,2	0,511 (18, ан.)
	122	3,5 *мин*	β^+	3,1	0,511 (ан.); 0,564; 0,69; 0,78
	123	13,3 *ч*	э.з.	—	0,159 (83)
	124	4,15 дня	э.з. (74)	—	0,511 (50, ан.); 0,605 (67);
		—	β^+ (26)	2,14	0,644 (12); 0,73(14); 1,69(14)
	125	60,2 дня	э.з.	—	0,035 (7)
	126	12,8 дня	э.з. (55)	—	0,386 (34); 0,667 (33)
		—	β^- (44)	1,25	
		—	β^+ (1,3)	1,13	
	127	—	100	—	—
	128	24,99 *мин*	β^- (93,6)	2,12	0,441 (14); 0,528 (1,4)
		—	э.з. (6,4)	—	
	129	$1{,}7 \cdot 10^7$ лет	β^-	0,150	0,040 (9)
	130	12,3 *ч*	β^-	1,7 (0,4); 1,04	0,419 (35); 0,538 (99); 0,669 (100); 0,743 (87)
	131	8,05 дня	β^-	0,806 (0,6); 0,606	0,284 (5,4); 0,364 (82); 0,637 (6,8)
	132	2,26 *ч*	β^-	2,12	0,52** (20); 0,67** (144); 0,773 (89); 0,955 (22)
	133	20,3 *ч*	β^-	1,27	0,53 (90)
	134	52,0 *мин*	β^-	2,43	0,61 (18); 0,85 (95); 0,89 (65); 1,15 (10)
	135	6,68 *ч*	β^-	1,4	1,14 (37); 1,28 (34); 1,46 (12); 1,72 (19)
	136	83 *сек*	β^-	7,0 ($\sim$ 6); 5,6	0,27 (18); 0,39 (19); 1,32** (95); 2,3** (19)
	137	22,0 *сек*	β^-	—	—
		—	β^-, n ($\sim$ 6)	—	—
	138	5,9 *сек*	β^-	—	—
	139	2,7 *сек*	β^-	—	—
$_{54}$Xe	118	6 *мин*	β^+	—	0,05; 0,511 (ан.)
	119	6 *мин*	β^+	—	0,10
	120	40 *мин*	э.з.	—	0,055; 0,073; 0,176; 0,76
	121	39 *мин*	β^+	2,8	0,080; 0,096; 0,132; 0,437; 0,511 (ан.)
	122	20,1 *ч*	э.з.	—	0,060; 0,090; 0,110; 0,148; 0,180; 0,345
	123	2,08 *ч*	э.з.	—	0,090; 0,110; 0,149; 0,178; 0,329; 0,511 (ан.); 0,68; 0,90; 1,10
		—	β^+	1,51	
	124	—	0,096	—	—
	125	16,8 *ч*	э.з.	—	0,055; 0,188; 0,242
	125*m*	55 *сек*	и.п.	—	0,075; 0,111
	126	—	0,090	—	—
	127	36,41 дня	э.з.	—	0,172 (22); 0,203 (65); 0,375 (20)
	127*m*	75 *сек*	и.п	—	0,125; 0,175
	128	—	1,919	—	—
	129	—	26,44	—	—
	129*m*	8,0 дней	и.п.	—	0,040 (9); 0,197 (6)
	130	—	4,08	—	—
	131	—	21,18	—	—
	131*m*	11,8 дня	и.п.	—	0,164 (2)
	132	—	26,89	—	—
	133	5,27 дней	β^-	0,346	0,081 (37)
	133*m*	2,26 дней	и п.	—	0,233 (14)
	134	—	10,4	—	—
	135	9,14 *ч*	β^-	0,92	0,250 (91); 0,61 (3)
	135*m*	15,6 *мин*	и.п.	—	0,527 (80)
	136	—	8,87	—	—
	137	3,9 *мин*	β^-	4,1	0,455 (33)
	138	17,5 *мин*	β^-	2,4	0,16/33/; 0,26/100/; 0,42/40/; 1,78/66/; 2,02/58/
	139	43 *сек*	β^-	—	0,18/41/; 0,22/100/; 0,30/57/; 1,15/23/

Элемент	A	Период полураспада	Тип распада или содержание стабильных изотопов, %	Энергия, *Мэв* (относительная интенсивность, %)	
				групп частиц	γ-излучения
$_{54}$Xe	140	16,0 *сек*	β^-	—	0,13
	141	1,7 *сек*	β^-	—	—
	142	~ 1,5 *сек*	β^-	—	—
	143	1,0 *сек*	β^-	—	—
	144	~ 1 *сек*	β^-	—	—
$_{55}$Cs	123	8,0 *мин*	β^+	—	—
	125	45 *мин*	э.з. (51)	—	0,112; 0,511 (98, ан.)
	—		β^+ (49)	2,05	
	126	1,6 *мин*	β^+ (82)	3,8	0,386 (38); 0,511 (164, ан.)
	—		э.з. (18)	—	
	127	6,2 *ч*	э.з. (96,5)	—	0,125 (10); 0,406 (72);
	—		β^+ (3,5)	1,08	0,511 (7, ан.)
	128	3,8 *мин*	β^+ (~ 51)	2,9	0,441 (27); 0,511 (110, ан.)
	—		э.з. (~ 49)	—	
	129	32,1 *ч*	э.з.	—	0,375 (48); 0,416 (25); 0,550 (5)
	130	30 *мин*	β^+	1,97	0,54; 0,59
	—		э.з.	—	
	—		β^-	0,442	
	131	9,70 дней	э.з.	—	—
	132	6,59 дней	э.з. (97)	—	0,48* (4); 0,668 (99)
	—		β^+ (0,6)	0,40	
	—		β^- (2)	—	
	133	—	100	—	—
	134	2,046 лет	β^-	0,662	0,57** (23); 0,605 (98); 0,796** (99)
	134*m*	2,895 *ч*	и.п.	—	0,128 (14)
	—		β^- (~ 1)	0,55	
	135	$3{,}0 \cdot 10^6$ лет	β^-	0,21	—
	135*m*	53 *мин*	и.п.	—	0,781 (100); 0,840 (96)
	136	13,7 дня	β^-	0,657 (7); 0,341	0,16** (36); 0,340 (53); 0,818 (100); 1,05 (82)
	137	30,0 лет	β^-	1,176 (7); 0,514	0,662 (85)
	138	32,2 *мин*	β^-	3,40	0,463 (23); 1,01 (25); 1,426 (73); 2,21 (18)
	139	9,5 *мин*	β^-	—	1,28
	140	66 *сек*	β^-	—	0,59; 0,88; 1,14; 1,62; 1,85; 2,06; 2,32; 2,72; 3,15
	141	24 *сек*	β^-	—	—
	142	2,3 *сек*	β^-	—	—
$_{56}$Ba	125	6,5 *мин*	—	—	—
	126	97 *мин*	э.з.	—	0,23/100/; 0,70/33/
	127	10 *мин*	β^+	—	—
	128	2,43 дня	э.з.	—	0,134; 0,278
	129	2,61 *ч*	э.з. (94)	—	0,129/26/; 0,182/100/;
	—		β^+ (6)	1,42	0,21**/65/; 1,45/42/
	130	—	0,101	—	—
	131	12,0 дней	э.з.	—	0,124** (28); 0,216 (19); 0,373 (13); 0,496** (48)
	131*m*	14,6 *мин*	и.п.	—	0,107 (40)
	132	—	0,097	—	—
	133	7,2 года	э.з.	—	0,080** (36); 0,302 (14); 0,356 (69)
	133*m*	38,9 *ч*	и.п.	—	0,276 (17)
	134	—	2,42	—	—
	135	—	6,59	—	—
	135*m*	28,7 *ч*	и.п.	—	0,268 (16)
	136	—	7,81	—	—
	136*m*	0,32 *сек*	и.п.	—	0,164 (40); 0,818 (100); 1,05 (100)
	137	—	11,32	—	—
	137*m*	2,554 *мин*	и.п.	—	0,662 (89)
	138	—	71,66	—	—
	139	82,9 *мин*	β^-	2,3	0,166 (23); 1,43 (0,4)
	140	12,80 дней	β^-	1,02	0,030 (11); 0,537 (34)

Элемент	A	Период полураспада	Тип распада или содержание стабильных изотопов, %	Энергия, *Мэв* (относительная интенсивность, %)	
				групп частиц	γ-излучения
$_{56}$Ba	141	18 *мин*	β^-	3,0	0,193/100/; 0,28/50/; 0,46**/30/; 0,64/20/
	142	11 *мин*	β^-	1,7	0,080/30/; 0,26/100/; 0,89/40/; 1,20/35/
	143	12 *сек*	β^-	—	—
$_{57}$La	126	1,0 *мин*	β^+	—	0,256; 0,511 (ан.)
	127	3,5 *мин*	β^+	—	—
	128	4,2 *мин*	β^+	—	0,279; 0,511 (ан.)
	129	10,0 *мин*	β^+	—	—
	—	—	э.з.	—	—
	130	8,7 *мин*	β^+	—	0,356; 0,45; 0,511 (ан.);
	—	—	э.з.	—	0,55; 0,72; 0,81; 0,91; 1,01; 1,19; 1,45; 1,55
	131	56 *мин*	э.з. (72)	—	0,115 (23); 0,364 (20);
	—	—	β^+ (28)	1,94	0,417 (20); 0,511 (56, ан.)
	132	4,5 *ч*	β^+	3,8	0,47; 0,511 (ан.); 0,56; 0,66; 1,03; 1,22; 1,58; 1,92
	133	4,0 *ч*	э.з.	—	0,511 (ан.); 0,8
	—	—	β^+	1,2	
	134	6,8 *мин*	β^+ (62)	2,7	0,511 (124, ан.);
	—	—	э.з. (38)	—	0,605 (6)
	135	19,4 *ч*	э.з.	—	0,481 (1,9); 0,588 (0,13); 0,87** (0,24)
	136	9,5 *мин*	э.з. (~ 67)	—	0,511 (66, ан.); 0,818 (2,5)
	—	—	β^+ (~ 33)	1,9	
	137	$6 \cdot 10^4$ лет	э.з.	—	—
	138	$1{,}12 \cdot 10^{11}$ лет	0,089	—	0,81 (30); 1,426 (70)
	—	—	э.з. (~ 70)	—	
	—	—	β^- (~ 30)	0,21	
	139	—	99,911	—	—
	140	40,22 *ч*	β^-	2,175 (6); 1,69 (15); 1,36	0,329 (20); 0,487 (40); 0,815 (19); 0,923 (10); 1,596 (96); 2,53 (3)
	141	3,87 *ч*	β^-	2,43	1,37 (2)
	142	92,5 *мин*	β^-	4,51	0,65 (48); 0,90 (9); 1,91 (9); 2,41 (15); 2,55 (11)
	143	14,0 *мин*	β^-	3,3	0,62/100/; 0,80/44/; 1,07/26/; 1,17/57/; 1,58/28/; 1,98/35/; 2,56/27/
$_{58}$Ce	129	~ 13 *мин*	—	—	0,080; 0,32; 0,75
	130	30 *мин*	—	—	0,13
	132	4,2 *ч*	э.з.	—	0,18
	133	6,3 *ч*	э.з.	—	0,511 (ан.); 1,8
	—	—	β^+	1,3	
	134	72,0 *ч*	э.з.	—	—
	135	17,0 *ч*	э.з.	—	0,265/100/; 0,300/56/;
	—	—	β^+ ($<$ 1)	0,81	0,52**/46/; 0,59**/98/
	136	—	0,193	—	—
	137	9,0 *ч*	э.з. ($>$ 99)	—	0,446** (2,3); 0,481** (0,06);
	—	—	β^+ ($\leqslant$ 0,009)	—	0,698 (0,04); 0,92** (0,10)
	137*m*	34,4 *ч*	и.п. (99,4)	—	0,168 (0,4); 0,255 (11);
	—	—	э.з. (0,6)	—	0,762 (0,16); 0,825** (0,5)
	138	—	0,250	—	—
	139	140 дней	э.з.	—	0,165 (80)
	139*m*	54 *сек*	и.п.	—	0,746 (93)
	140	—	88,48	—	—
	141	32,5 дня	β^-	0,581	0,145 (48)
	142	—	11,07	—	—
	143	33 *ч*	β^-	1,39	0,057 (11); 0,293 (46); 0,668 (7); 0,725 (8)
	144	284 дня	β^-	0,31	0,080 (2); 0,134 (11)
	145	3,0 *мин*	β^-	2,0	—
	146	14 *мин*	β^-	0,7	0,110/20/; 0,142/42/; 0,22/50/; 0,27/12/; 0,32/100/

Элемент	A	Период полураспада	Тип распада или содержание стабильных изотопов, %	Энергия, *Мэв* (относительная интенсивность, %)	
				групп частиц	γ-излучения
$_{58}$Ce	147	65 *сек*	β^-	—	—
	148	~ 43 *сек*	β^-	—	—
$_{59}$Pr	134	17 *мин*	β^+	—	0,22; 0,30; 0,409; 0,511 (ан.); 0,639; 0,96
	135	22 *мин*	β^+	2,5	0,080; 0,22; 0,30;
	—		э.з.	—	0,511 (ан.)
	136	1,2 *ч*	э.з. (~ 67)	—	0,511 (66, ан.)
	—		β^+ (~ 33)	2,0	—
	137	1,5 *ч*	э.з. (73)	—	0,511 (54, ан.)
	—		β^+ (27)	1,7	—
	138	2,10 *ч*	э.з. (77)	—	0,298 (77); 0,40 (9);
	—		β^+ (23)	1,65	0,511 (46, ан.); 0,79(100); 1,04 (100)
	139	4,5 *ч*	э.з. (89)	—	0,511 (18, ан.);
	—		β^+ (11)	1,09	1,35 (0,5); 1,61(0,3)
	140	3,39 *мин*	э.з. (50)	—	0,511 (100, ан.);
	—		β^+ (50)	2,32	1,596 (0,3)
	141	—	100	—	—
	142	19,2 *ч*	β^-	2,16	1,57 (3,7)
	143	13,59 дня	β^-	0,933	—
	144	17,27 *мин*	β^-	2,99	0,695 (1,5); 1,487 (0,29); 2,186 (0,7)
	145	5,98 *ч*	β^-	1,80	0,072; 0,68; 0,75; 0,92; 0,98; 1,05: 1,16
	146	24 *мин*	β^-	3,7	0,455 (77); 0,74 (16); 0,78 (15); 1,51 (27)
	147	12 *мин*	β^-	2,1	0,078 (17); 0,127 (9); 0,32** (47); 0,56(39); 0,61(10); 0,65(24); 1,26(11)
	148	2,0 *мин*	β^-	4,2	0,30
	149	2,3 *мин*	β^-	2,8	0,08; 0,155; 0,325; 0,36; 0,745
$_{60}$Nd	137	55 *мин*	β^+	3	0,109; 0,511 (ан.); 0,55**
	138	22 *мин*	β^+	2,4	—
	139[2]	29,7 *мин*	β^+	—	0,41
	139*m*	5,5 *ч*	и.п.	—	0,114/80/; 0,327/50/;
	—		β^+	3,1	0,511/1400/; 0,73**/210/;
	—		э.з.	—	0,82**/70/; 0,983/70/
	140	3,3 дня	э.з.	—	—
	141	2,42 *ч*	э.з. (96)	—	0,145 (0,2); 0,511 (6, ан.);
	—		β^+ (4)	0,79	1,14 (2); 1,30 (1)
	141*m*	64 *сек*	и.п.	—	0,755
	142	—	27,13	—	—
	143	—	12,20	—	—
	144	$2{,}4 \cdot 10^{15}$ лет	α	1,83	—
	—		23,87	—	—
	145	—	8,29	—	—
	146	—	17,18	—	—
	147	11,06 дни	β^-	0,81	0,091 (28); 0,319 (3); 0,43** (4); 0,533 (13)
	148	—	5,72	—	—
	149	1,8 *ч*	β^-	1,5	0,114 (18); 0,210 (27); 0,27** (26); 0,541 (10)
	150	—	5,60	—	—
	151	12 *мин*	β^-	2,0	0,118 (40); 0,174** (10); 0,256 (11); 1,180 (9)
$_{61}$Pm	141	22 *мин*	β^+ (57)	2,6	0,195 (13); 0,511 (114, ан.)
	—		э.з. (43)	—	—
	142	40 *сек*	β^+ (~ 95)	3,78	0,511 (190, ан.)
	—		э.з. (~ 5)	—	—
	143	0,73 года	э.з.	—	0,742(47)
	144	0,96 года	э.з.	—	0,474 (45); 0,615 (99); 0,695 (99)
	145	17,7 года	э.з.	—	0,067 (1,0); 0,072 (2,3)
	—		α ($3 \cdot 10^{-7}$)	2,24 [2]	—

Элемент	A	Период полураспада	Тип распада или содержание стабильных изотопов, %	Энергия, *Мэв* (относительная интенсивность, %)	
				групп частиц	γ-излучения
$_{61}$Pm	146	4,4 года	э.з. (65)	—	0,453 (65); 0,75* (65)
	—		β^- (35)	0,78	—
	147	2,62 года	β^-	0,224	—
	148	5,4 дня	β^-	2,48	0,551 (27); 0,914 (15); 1,465 (23)
	148*m*	41,8 дня	β^- (93)	0,69	0,551 (95); 0,630 (87);
	—		и.п. (7)	—	0,727 (36)
	149	53,1 *ч*	β^-	1,07	0,286 (2); 0,58 (0,1); 0,85 (0,2)
	150	2,68 *ч*	β^-	3,05	0,334 (71); 0,831 (18); 1,165 (23); 1,33 (22)
	151	27,8 *ч*	β^-	1,19	0,17** (18); 0,340 (21)
	152	6,5 *мин*	β^-	2,2	0,122; 0,245
	153	5,5 *мин*	β^-	1,65	0,12; 0,18
	154	2,5 *мин*	β^-	2,5	—
$_{62}$Sm	140 [2]	14,7 *мин*	—	—	0,23; 0,14
	141 [2]	23 *мин*	э.з.	—	0,20; 0,43; 0,78
	—		β^+	—	—
	142	73 *мин*	э.з. ($\sim$ 50)	—	0,15—0,35**;
	—		β^+ ($\sim$ 50)	1,03 [2]	0,511 (100, ан.)
	143	9,0 *мин*	э.з. (52)	—	0,511 (100, ан.)
	—		β^+ (48)	2,5 [2]	—
	143*m*	64 *сек*	и.п.	—	0,748
	144	—	3,16	—	—
	145	340 дней	э.з.	—	0,061; 0,485 ($3 \cdot 10^{-3}$)
	146	$7 \cdot 10^7$ лет	α	2,46	—
	147	$1{,}05 \cdot 10^{11}$ лет	α	2,23	—
	—		15,07	—	—
	148	—	11,27	—	—
	149	—	13,82	—	—
	150	—	7,47	—	—
	151	$\sim$ 87 лет	β^-	0,076	0,022 (4)
	152	—	26,63	—	—
	153	46,8 *ч*	β^-	0,80	0,070 (5,4); 0,103 (28)
	154	—	22,53	—	—
	155	23,5 *мин*	β^-	1,53	0,104 (73); 0,246 (4)
	156	9,4 *ч*	β^-	0,72	0,088 (30); 0,166 (10); 0,204 (20)
$_{63}$Eu	142[2]	1,2 *мин*	э.з	—	0,77; 1,03
	—		β^+	—	—
	143	2,3 *мин*	β^+	4,0	0,511 (ан.)
	144	10,5 *сек*	β^+	5,2	0,511 (ан.)
	145	5,9 дня	э.з. (99)	—	0,656/30/; 0,894/100/;
	—		β^+ (1)	1,7 [2]	1,66/16/
	146	4,59 дня	э.з. (96,5)	—	0,511 (7, ан.);
	—		β^+ (3,5)	1,47 (3,3); 2,11 (0,14);	0,634* (77); 0,749 (100)
	147	21,5 дня	э.з. (99,5)	—	0,122 (20); 0,198 (24);
	—		β^+ (0,5)	—	0,680 (11); 0,957 (9);
	—		α (0,002)	2,91	1,079 (9)
	148	54 дня	э.з. ($>$ 99)	—	0,551** (120);
	—		β^+ (0,13)	0,92	0,62** (90);
	—		α ($9 \cdot 10^{-7}$)	2,63	0,72** (18)
	149	106 дней	э.з.	—	0,277/10/; 0,328/10/
	150	12,55 *ч*	β^- (90)	1,01	0,334 (4); 0,406 (3);
	—		э.з. (9)	—	0,511 (0,8, ан.)
	—		β^+ (0,4)	1,24	—
	151	—	47,77	—	—
	152	12,7 года	э.з. (72)	—	0,122 (37); 0,344 (27);
	—		β^- (28)	1,48	0,965 (15); 1,408 (22)
	—		β^+ (0,021)	0,71	—
	152m_1	9,3 *ч*	β^- (77)	1,88	0,842 (13); 0,963 (12);
	—		э.з. (23)	—	0,122 (8)
	—		β^+ (0,011)	0,89	—

Элемент	A	Период полураспада	Тип распада или содержание стабильных изотопов, %	Энергия, *Мэв* (относительная интенсивность, %)	
				групп частиц	γ-излучения
$_{63}$Eu	$152m_2$	96 *мин*	и.п.	—	0,090 (74)
	153	—	52,23	—	—
	154	16 лет	β^-	1,85 (10); 0,87	0,123 (38); 0,724 (21); 0,876 (12); 1,00* (31); 1,278 (37)
	155	1,811 года	β^-	0,25	0,087 (32); 0,105 (20)
	156	15,4 дня	β^-	2,45	0,089 (8); 0,812 (9); 1,07** (11); 1,15** (14); 1,24** (16)
	157	15,1 *ч*	β^-	1,3	0,064 (27); 0,37* (14); 0,413 (27)
	158	46 *мин*	β^-	2,5	0,080/100/; 0,52**/25/; 0,95**/95/; 1,19/16/
	159	18,1 *мин*	β^-	2,6	0,07 (42); 0,09 (18); 0,15 (14); 0,67 (21)
	160[2]	40 *сек*	β^-	—	0,075; 0,17
$_{64}$Gd	145	25 *мин*	э.з	—	0,511 (ан); 0,80/9/; 1,03/10/; 1,75/100/
		—	β^+	2,4	
	146	50 дней	э.з.	—	0,078/30/; 0,115** /100/; 0,155 /45/
	147	35 *ч*	э.з.	—	0,229/150/; 0,39** /85/; 0,64**/70/; 0,77**/60/; 0,932/60/
	148	84 года	α	3,18	—
	149	9,5 дня	э.з ($>$ 99)	—	0,150 (48); 0,299 (26);
		—	α ($\sim$ 0,0007)	3,01	0,347 (25); 0,750 (11)
	150	$2{,}1 \cdot 10^6$ лет	α	2,73	—
	151	120 дней	э.з.	—	0,0216(3); 0,154 (7);
		—	α ($\sim 8 \cdot 10^{-7}$)	2,60	0,175 (3); 0,244 (7)
	152	$1{,}1 \cdot 10^{14}$ лет	α	2,1	—
		—	0,20	—	—
	153	242 дня	э.з.	—	0,070 (2,4); 0,099** (55)
	154	—	2,15	—	—
	155	—	14,7	—	—
	156	—	20,47	—	—
	157	—	15,68	—	—
	158	—	24,9	—	—
	159	18,0 *ч*	β^-	0,95	0,058 (3); 0,363 (9)
	160	—	21,9	—	—
	161	3,6 *мин*	β^-	1,6	0,102 (11); 0,315 (25); 0,361 (66)
	162 [2]	10,4 *мин*	β^-	—	0,41; 0,43
$_{65}$Tb	147	24 *мин*	э.з	—	0,305; 0,511 (ан.)
		—	β^+	—	—
	148	70 *мин*	э.з.	—	0,511 (ан.); 0,78; 1,12
		—	β^+	4,6	—
	149	4,10 *ч*	э.з. (84)	—	0,16; 0,35
		—	α ($\sim$ 16)	3,95	—
	149*m*	4,3 *мин*	э.з.	—	—
		—	α (0,025)	3,99	—
	150	3,1 *ч*	э.з	—	0,511/100, ан./;
		—	β^+	3,6	0,637/100/;
		—	α [2]	3,49 [2]	0,93/35/
	151	18 *ч*	э з. ($>$ 99)	—	0,108 (35); 0,252 (35);
		—	α (0,0005)	3,42	0,288 (32)
	152	17,4 *ч*	э.з (80)	—	0,344/100/; 0,586/14/;
		—	β^+ ($\sim$ 20)	2,82	0,779/14/
	153	55 *ч*	э.з	—	0,083** (11); 0,11** (12); 0,212 (30)
	154	21,0 *ч*	э.з.	—	0,123; 0,248; 0,347; 0,53*; 0,65**
	155	5,6 дня	э.з.	—	0,087 (37); 0,105 (25); 0,180 (8)
	156	5,1 дня	э.з.	—	0,089 (17); 0,199 (40); 0,535 (70); 1,22 (29); 1,42 (15)
	156*m*	5,5 *ч*	и.п.	—	0,088
	157	150 лет	э.з.	—	—
	158	$1{,}2 \cdot 10^3$ лет	э.з (86)	—	0,080 (12); 0,182 (10);
		—	β^- (14)	0,85	0,782 (10); 0,95* (69)
	158*m*	10,5 *сек*	и.п.	—	0,110 (0,5)

Элемент	A	Период полураспада	Тип распада или содержание стабильных изотопов, %	Энергия, *Мэв* (относительная интенсивность, %)	
				групп частиц	γ-излучения
$_{65}$Tb	159	—	100	—	—
	160	72,1 дня	β^-	1,74 (0,4); 0,86	0,087 (12); 0,299 (30); 0,879 (31); 0,966** (31); 1,178 (15)
	161	6,9 дня	β^-	0,59 (10); 0,52	0,026 (21); 0,049 (19); 0,075 (10)
	162	7,48 *мин*	β^-	1,3; 1,5 [2]	0,180/26/; 0,258/100/; 0,81/44/; 0,89/54/
	163	6,5 *ч*	β^-	1,65	0,025; 0,235; 0,330; 0,510
	164 [2]	3 *мин*	β^-	1,0; 2,9	0,17; 0,69
$_{66}$Dy	149	10—20 *мин*	э.з.	—	—
	150	7,2 *мин*	э.з.	—	0,39; 0,511 (ан.)
		—	β^+	—	—
		—	α	4,23	—
	151	18,0 *мин*	β^+ + э.з. (94)	—	0,145; 0,511 (ан.)
		—	α (6)	4,06	—
	152	2,41 *ч*	э.з.	—	0,257
		—	α (0,05)	3,65	—
	153	6,4 *ч*	э.з.	—	0,08**; 0,25**
		—	α (0,0030)	3 48	—
	154	$>1\cdot10^6$ лет	α	2,85	—
	154*m*	13 *ч*	α	3,37	—
	155	10,2 *ч*	э.з.	—	—
		—	β^+ (2)	1,08 (0,14); 0,85 (2)	0,227 (68); 0,52** (8); 1,000 (6); 1,16** (6)
	156	—	0,0524	—	—
	157	8,1 *ч*	э.з.	—	0,326 (91)
	158	—	0,0902	—	—
	159	144 дня	э.з.	—	0,058 (4); 0,348 ($9\cdot10^{-4}$)
	160	—	2,294	—	—
	161	—	18,88	—	—
	162	—	25,53	—	—
	163	—	24,97	—	—
	164	—	28,18	—	—
	165	139,2 *мин*	β^-	1,29	0,095 (4); 0,361 (1,1)
	165*m*	1,26 *мин*	и.п.	—	0,108 (3); 0,514 (1,8)
		—	β^- (2,5)	1,04 (0,4); 0,89	—
	166	81,5 *ч*	β^-	0,48 (5); 0,40	0,082 (12); 0,372 (0,5); 0,426 (0,5)
	167	4,4 *мин*	β^- [2]	—	0,19 — 0,57 [2]
$_{67}$Ho	151	35,6 *сек*	β^+ + э.з. (80)	—	—
		—	α (20)	4,51	—
	152	52,3 *сек*	э.з.	—	—
			α (19)	4,45	—
	153	9 *мин*	α (0,3)	3,92	—
		—	э.з.	—	—
	154	7 *мин*	β^+	—	0,335; 0,511 (ан.)
	155	50 *мин*	β^+	2,1	0,092; 0,138; 0,511 (ан.)
	156	55 *мин*	β^+	2,9/1/; 1,8/18/	0,138/100/; 0,266/99/; 0,367/23/; 0,511 (ан.)
	157	14 *мин*	β^+	—	0,087; 0,152; 0,190; 0,227; 0,511 (ан.)
	158	11,5 *мин*	э.з.	—	0,099; 0,218; 0,329; 0,412; 0,52; 0,647
	158*m*	29 *мин*	и.п.	—	0,099; 0,218; 0,356; 0,412
		—	β^+	1,32	
	159	33 *мин*	э.з.	—	0,057; 0,080; 0,13; 0,253; 0,309
	159*m*	6,9 *сек*	и.п.	—	0,206
	160	25,6 *мин*	э.з. (>99)	—	0,73; 0,96 [2]
		—	β^+ (~0,4)	—	—
	160*m*	5,0 *час*	и.п. (66)	—	0,197 (20); 0,646 (20); 0,729 (50); 0,880 (26); 0,965** (37)
		—	э.з. } (34)	—	
		—	β^+ }	1,9	
	161	2,4 *час*	э.з.	—	0,026 (23); 0,075 (15)
	161*m*	6,1 *сек*	и.п.	—	0,211 (53)

Элемент	A	Период полураспада	Тип распада или содержание стабильных изотопов, %	Энергия, *Мэв* (относительная интенсивность, %)	
				групп частиц	γ-излучения
$_{67}$Ho	162	15 *мин*	э.з. (95)	—	0,081 (8); 0,511 (9, ан.)
	—		β^+ (5)	1,10	—
	162*m*	68 *мин*	и.п. (63)	—	0,185 (26); 0,940 (13);
	—		э.з. (37)	—	1,224 (24)
	163 [2]	~ 30 лет	э.з.	—	—
	163*m*	1,1 *сек*	и.п.	—	0,305
	164	36,7 *мин*	β^- (53)	0,99	0,073; 0,091
	—		э.з. (47)	—	—
	165	—	100	—	—
	166	26,9 *ч*	β^-	1,84	0,081 (5,4); 1,380 (0,9)
	166*m*	$1{,}2 \cdot 10^3$ лет	β^-	—	0,184 (90); 0,280 (30); 0,711 (58); 0,810 (60)
	167	3,1 *ч*	β^-	0,96	0,06 — 0,53 [2]
	168	3,3 *мин*	β^-	2,2	0,85
	169	4,8 *мин*	β^-	1,95	0,15; 0,68; 0,84; 0,92
	170	45 *сек*	β^-	3,1	0,43
$_{68}$Er	152	10,7 *сек*	α (~ 90)	4,80	—
	153	36 *сек*	α (> 75)	4,67	—
	—		э.з. } (25)	—	—
	—		β^+ }		
	154	5 *мин*	α	4,15	—
	157	~ 25 *мин*	β^+	—	0,117; 0,386; 0,511 (ан.); 1,32
	158	2,3 *ч*	э.з.	—	0,072; 0,250; 0,315;
	—		β^+	0,8	0,387; 0,511 (ан.); 0,875
	159	36 *мин*	β^+ [2]	—	0,37—2,60 [2]
	160	29,4 *ч*	э.з.	—	—
	161	3,1 *ч*	β^+	1,2	0,211 (9); 0,592 (8); 0,826 (63)
	162	—	0,136	—	—
	163	75,1 *мин*	э.з. (> 99)	—	0,43 (0,06); 1,10 (0,04)
	—		β^+ (0,004)	0,19	—
	164	—	1,56	—	—
	165	10,34 *ч*	э.з.	—	—
	166	—	33,41	—	—
	167	—	22,94	—	—
	167*m*	2,3 *сек*	и.п.	—	0,208 (43)
	168	—	27,07	—	—
	169	9,6 дня	β^-	0,34	0,008 (0,3)
	170	—	14,88	—	—
	171	7,52 *ч*	β^-	1,49 (2,3); 1,06	0,112 (25); 0,296 (28); 0,308 (63)
	172	49,5 *ч*	β^-	0,89 (< 10); 0,37	0,407 (40); 0,610 (40)
$_{69}$Tm	153	1,6 *сек*	α	5,10	—
	154	3,0 *сек*	α	5,04	—
	161	32 *мин*	э.з.	—	0,084; 0,106; 0,112; 0,172
	162	77 *мин*	э.з.	—	0,102/20/; 0,236/10/
	163	1,8 *ч*	э.з.	—	0,104/8/; 0,240**/5/
	—		β^+	1,1	—
	164	2,0 *мин*	э.з. (50)	—	0,091 (4); 0,511 (100, ан.)
	—		β^+ (50)	2,94	—
	165	30,1 *ч*	э.з.	—	0,243/50/; 0,297** (35);
	—		β^+ (0,007)	0,30	0,807/15/
	166	7,7 *ч*	э.з. (98,2)	—	0,081; 0,19*; 0,215;
	—		β^+ (2)	1,94	0,46; 0,60**
	167	9,6 дня	э.з.	—	0,057 (4); 0,208 (43); 0,532 (2)
	168	85 дней	э.з.	—	0,19** (77); 0,448 (27); 0,73** (40); 0,82** (88)
	169	—	100	—	—
	170	134 дня	β^-	0,97	0,084 (3,3)
	171	1,92 года	β^-	0,097	0,067

Элемент	A	Период полураспада	Тип распада или содержание стабильных изотопов, %	Энергия, *Мэв* (относительная интенсивность, %)	
				групп частиц	γ-излучения
$_{69}$Tm	172	63,6 *ч*	β^-	1,88	0,079(5); 0,181(2,2); 1,09(7); 1,39(7); 1,46(7); 1,53(6)
	173	8,2 *ч*	β^-	1,3(2); 0,89	0,399(89); 0,465(8)
	174	5,2 *мин*	β^-	1,2	0,176(67); 0,273(85); 0,366(93); 0,50(15); 0,99(89)
	175	20 *мин*	β^-	2,0	0,51
	176	1,5 *мин*	β^-	4,2	—
$_{70}$Yb	154	0,39 *сек*	α	5,33	—
	155	1,6 *сек*	α	5,21	—
	162	~24 *мин*	—	—	0,041 [2]
	164	75 *мин*	э.з.	—	—
	165	10,5 *мин*	э.з. β^+	— 1,6 [2]	0,080; 0,069 [2]
	166	57,5 *ч*	э.з.	—	0,082(17)
	167	17,7 *мин*	э.з. β^+ (0,4)	— —	0,113** (90); 0,176(15)
	168	—	0,140	—	—
	169	31,8 дня	э.з.	—	0,063(45); 0,177(22); 0,198(35)
	169 *m*	46 *сек*	и.п	—	0,024 [2]
	170	—	3,03	—	—
	171	—	14,31	—	—
	171 *m*	< 8 дней	и.п.	—	0,019; 0,076
	172	—	21,82	—	—
	173	—	16,13	—	—
	174	—	31,84	—	—
	175	101 *ч*	β^-	0,466	0,114(1,9); 0,283(3,7); 0,396(6,0)
	176	—	12,73	—	—
	176 *m*	11,7 *сек*	и.п.	—	0,19; 0,29; 0,39
	177	1,9 *ч*	β^-	1,40	0,122(3); 0,151(16); 1,080(5); 1,241(3)
	177 *m*	6,5 *сек*	и.п.	—	0,104(65); 0,228(13)
$_{71}$Lu	155	0,07 *сек*	α	5,63	—
	156	0,23 *сек*	α	5,54	—
	167	54 *мин*	э.з. β^+ (~1)	— 1,5	0,030; 0,278; 0,372; 0,402; 0,511 (ан.)
	168	7,1 *мин*	э.з. β^+ (~12)	— 1,2	0,087(7); 0,90(10); 0,99(13)
	169	34 *ч*	э.з. β^+	— 1,2	0,063; 0,111; 0,191; 0,577
	169 *m*	2,7 *мин*	и.п.	—	0,029 [2]
	170	2,05 дня	э.з. β^+	— 2,4	0,084(13)
	170 *m*	0,7 *сек*	и.п.	—	—
	171	8,3 дня	э.з. β^+ (~0,007)	— —	0,019(20); 0,668(14); 0,741(68)
	171 *m*	76 *сек*	и.п.	—	0,071(0,2)
	172	6,70 дня	э.з	—	0,182(26); 0,81(21); 0,90** (45); 1,09(60)
	172 *m*	3,7 *мин*	и.п.	—	—
	173	1,37 года	э.з.	—	0,079(14); 0,101(7); 0,272(18)
	174	3,6 года	э. з.	—	0,076(6); 1,24(9);
	174 *m*	140 дней	и.п.	—	0,067; 0,176; 0,273; 0,994
	175	—	97,40	—	—
	176	$2{,}2 \cdot 10^{10}$ лет	β^- 2,60	0,43 —	0,088(15); 0,202(85); 0,306(95)
	176 *m*	3,69 *ч*	β^-	1,31	0,088(10)
	177	6,74 дня	β^-	0,497	0,113(2,8); 0,208(6,1)
	177 *m*	155 дней	β^-(78) и.п. (22)	0,2 [2] —	0,113(23); 0,208(62); 0,228(37); 0,378(29); 0,418(21)

Элемент	A	Период полураспада	Тип распада или содержание стабильных изотопов, %	Энергия, *Мэв* (относительная интенсивность, %)	
				групп частиц	γ-излучения
$_{71}$Lu	178	22 *мин*	β^-	1,50	0,089; 0,214; 0,326; 0,427
	179	4,6 *ч*	β^-	1,35	0,213
	180	2,5 *мин*	β^-	3,3	—
$_{72}$Hf	157	0,12 *сек*	α	5,68	—
	158	3 *сек*	α	5,27	—
	168	22 *мин*	β^+ (~2)	1,7	0,129; 0,17
			э.з.	—	
	169	1,5 *ч*	э.з.	—	0,115
			β^+	1,3	
	170	12,2 *ч*	э.з.	—	0,120; 0,165; 0,99; 1,28; 2,03; 2,36; 2,52; 2,94
	171	10,7 *ч*	э.з.	—	0,122; 0,188; 0,29; 0,34; 0,47; 0,66; 0,86; 1,07
	172	5 лет	э.з.	—	0,024 (22); 0,082 (10); 0,125** (21)
	173	23,6 *ч*	э.з.	—	0,13** (96); 0,30** (52);
	174	$2 \cdot 10^{15}$ лет	α	2,50	—
		—	0,163	—	—
	175	70 дней	э.з.	—	0,089 (3,4); 0,343 (85)
	176	—	5,21	—	—
	177	—	18,56	—	—
	177 *m*	1,1 *сек*	и.п.	—	0,113 (30); 0,208 (81); 0,228 (48); 0,378 (37)
	178	—	27,1	—	—
	178 *m*	4,3 *сек*	и.п.	—	0,089 (54); 0,214 (75); 0,326 (94); 0,427 (97)
	179	—	13,75	—	—
	179 *m*	18,6 *сек*	и.п.	—	0,217 (94)
	180	—	35,22	—	—
	180 *m*	5,5 *ч*	и.п.	—	0,058 (48); 0,215 (82); 0,333 (93); 0,444 (80)
	181	42,5 дня	β^-	0,41	0,133** (48); 0,346 (13); 0,482 (81)
	182	$9 \cdot 10^6$ лет	β^-	—	0,271 (84)
	183	65 *мин*	β^-	1,6	0,46/58/; 0,82/100/
$_{73}$Ta	172	44 *мин*	β^+	—	0,092; 0,208;
			э.з.	—	0,511 (ан.)
	173	3,7 *ч*	э.з.	—	0,090**; 0,170**;
			β^+	—	0,64; 1,00
	174	1,2 *ч*	э.з.	—	0,091; 0,125; 0,160;
			β^+	—	0,205; 0,280; 0,350; 0,511 (ан.)
	175	10,5 *ч*	э.з.	—	0,08; 0,13; 0,21; 0,27; 0,35; 0,45; 0,60; 0,83; 1, 2; 1,4; 1,7
	176	8,0 *ч*	э.з.	—	0,088; 0,202
	177	56,6 *ч*	э.з.	—	0,113 (6); 0,208 (1)
	178	9,35 *мин*	э.з. (99)	—	0,093/100/;
			β^+ (1)	0,89	0,511(10, ан.); 1,10/11/; 1,35**/46/
	179	~600 дней	э.з.	—	—
	180	—	0,0123	—	—
	180 *m*	8,15 *ч*	э.з. (87)	—	0,093 (4); 0,103 (0,6)
			β^- (13)	0,71	
	181	—	99,9877	—	—
	182	115,1 дня	β^-	1,71 (0,3); 0,522	0,068 (42); 1,122 (34); 1,222 (27)
	182 *m*	16,5 *мин*	и.п.	—	0,147 (40); 0,172 (40); 0,184 (20)
	183	5,0 дней	β^-	0,62	0,108 (11); 0,161** (17); 0,246** (33); 0,30** (11); 0,354 (11)

Элемент	A	Период полураспада	Тип распада или содержание стабильных изотопов, %	Энергия, *Мэв* (относительная интенсивность, %)	
				групп частиц	γ-излучения
$_{73}$Ta	184	8,7 *ч*	β^-	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	50 *мин*	β^-	1,7	0,175 (60)
	186	10,5 *мин*	β^-	2,2	0,20 (74); 0,51 (33); 0,61 (33); 0,73 (48)
$_{74}$W	173	16,5 *мин*	э.з.	—	—
	174	31 *мин*	э.з.	—	—
	175	34 *мин*	э.з.	—	0,26; 0,80; 1,3; 1,6
	176	2,3 *ч*	э.з. ($>$ 99)	—	0,034; 0,100
			β^+ ($\sim$0,5)	—	
	177	135 *мин*	э.з.	—	0,20; 0,42; 0,62; 0,83; 1,00
	178	21,5 дня	э.з	—	—
	179	37,5 *мин*	э.з.	—	0,031 (22)
	179 *m*	5,2 *мин*	и.п.	—	0,222
	180	—	0,135	—	—
	181	140 дней	э.з.	—	0,006 (1); 0,136 (0,1); 0,152 (0,1)
	182	—	26,4	—	—
	183	—	14,4	—	—
	183 *m*	5,3 *сек*	и.п.	—	0,053 (11); 0,099 (9) 0,108 (19)
	184	—	30,6	—	—
	185	75 дней	β^-	0,429	—
	185 *m*	1,62 *мин*	и.п.	—	0,100/16/; 0,13/70/; 0,17/100/
	186	—	28,4	—	—
	187	23,9 *ч*	β^-	1,31 (15); 0,63	0,479 (23); 0,686 (27)
	188	69,4 дня	β^-	0,349	0,227 (0,22); 0,290 (0,40)
	189	11,5 *мин*	β^-	2,5; 2,0	0,258/100/; 0,417/96/
$_{75}$Re	177	17 *мин*	β^+	—	—
	178	15 *мин*	β^+	3,1	—
	179	20 *мин*	э.з.	—	—
	180	2,4 *мин*	β^+	1,1	0,11; 0,511 (ан.);
			э.з.	—	0,88
	181	18 *ч*	э.з.	—	0,365
	182	12,7 *ч*	э.з.	—	0,068; 0,100; 1,122;
			β^+ (0,3)	1,74	1,189; 1,23**; 2,01; 2,0
	183	71 день	э.з.	—	0,046; 0,053; 0,109**; 0,209 0,246; 0,292
	184	38 дней	э.з.	—	0,111; 0,78**; 0,90**
	184 *m*	169 дней	и.п. (70)	—	0,111; 0,78**;
			э.з. (30)	—	0,90**
	185	—	37,07	—	—
	186	88,9 *ч*	β^- (95)	1,07	0,137 (9);
			э.з. (5)	—	0,632 (0,032); 0,768 (0,035)
	187	4,3·10^{10} лет	β^-	0,003	—
		—	62,93	—	—
	188	16,7 *ч*	β^-	2,12	0,155 (10); 0,478 (0,6) 0,633 (0,9)
	188 *m*	18,7 *мин*	и.п.	—	0,092 (5); 0,106 (10)
	189	24,3 *ч*	β^-	1,00	0,150* (4); 0,187* (3) 0,218* (10); 0,245 (4)
	190	2,8 *мин*	β^-	1,6	0,191/10/; 0,392/10/ 0,57/10/; 0,83/3/
	190 *m*	2,8 *ч*	—	—	—
	191	9,8 *мин*	β^-	1,8	—
	192	6 *сек*	β^-	2,5	0,20; 0,29; 0,37; 0,48; 0,57
$_{76}$Os	181	23 *мин*	—	—	—
	182	21,9 *ч*	э.з.	—	0,180/7/; 0,510/10/

Элемент	A	Период полураспада	Тип распада или содержание стабильных изотопов, %	Энергия, *Мэв* (относительная интенсивность, %)	
				групп частиц	γ-излучения
$_{76}$Os	183	12,0 *ч*	э. з.	—	0,114(27); 0,382(90)
	183*m*	9,9 *ч*	э. з. (~54)	—	1,035(6); 1,105**(48)
			и. п. (~46)	—	
	184	—	0,018	—	—
	185	93,6 дня	э. з.	—	0,646(80); 0,875**(11)
	186	—	1,59	—	—
	187	—	1,64	—	—
	188	—	13,3	—	—
	189	—	16,1	—	—
	189*m*	5,7 *ч*	и. п.	—	—
	190	—	26,4	—	—
	190*m*	9,9 *мин*	и. п.	—	0,187 (70); 0,361 (94); 0,502 (98); 0,616 (99)
	191	15,0 дней	β^-	0,143	0,129 (25)
	191*m*	13,0 *ч*	и. п.	—	—
	192	—	41	—	—
	193	31,5 *ч*	β^-	1,13	0,139 (3); 0,28** (2,1); 0,460 (3,9); 0,558 (2,1)
	194	6,0 лет	β^-	0,053	0,043 (10); 0,078 (0,03)
	195	6,5 *мин*	β^-	2	—
$_{77}$Ir	182	15 *мин*	э. з	—	0,133; 0,278; 0,510
	183	0,9 *ч*	э. з.	—	0,24
	184	3,2 *ч*	э. з	—	0,125/100/; 0,267/200/; 0,392/90/
			β^+	—	
	185	14 *ч*	э. з.	—	0,101; 0,254
	186	15,8 *ч*	э. з. (97)	—	0,137 (45); 0,297 (74); 0,434 (35)
			β^+ (3)	1,94	
	187	10,5 *ч*	э. з.	—	0,18 /45/; 0,41 /100/; 0,61 /45/; 0,98 /50/
	188	41,5 *ч*	э. з. (> 99)	—	0,155 (34); 0,633* (29)
			β^+ (~0,3)	1,66	
	189	13,3 дня	э. з.	—	0,245 (18)
	190	11 дней	э. з	—	0,187 (51); 0,37** (39); 0,40** (39); 0,518 (39); 0,56** (72); 0,604 (47)
	190m_1	1,2 *ч*	и. п.	—	—
	190m_2	3,2 *ч*	э. з. (94)	—	0,187 (66); 0,361 (88); 0,502 (92); 0,616 (93)
			и. п. (6)	—	
	191	—	38,5	—	—
	191*m*	4,9 *сек*	и. п.	—	0,129 (25)
	192	74,2 дня	β^- (95,5)	0,67	0,296 (29); 0,308 (30); 0,317 (81); 0,468 (49)
			э. з. (4,5)	—	
	192m_1	1,42 *мин*	и. п. (> 99)	—	0,058 (0,005); 0,317 (0,008); 0,612 (0,003)
			β^- (0,017)	1,5	
	192m_2	> 5 лет	и. п.	—	—
	193	—	61,5	—	—
	193*m*	11,9 дня	и. п.	—	—
	194	17,4 *ч*	β^-	2,24	0,328 (10); 0,64* (1)
	194*m*	47 *сек*	β^-	2,3	0,13; 0,32; 0,63
			и. п.	—	
	195	4,2 *ч*	β^-	1,0	0,10; 0,13; 0,33; 0,37; 0,43; 0,66
	196	120 *мин*	β^-	0,95	0,356 (94); 0,39 (95); 0,44 (95); 0,522 (99); 0,65 (100)
	197	7 *мин*	β^-	2,0	0,50
	198	50 *сек*	β^-	3,6	0,78
$_{78}$Pt	174	0,7 *сек*	α (80)	6,03	—
			э. з / β^+ (20)	—	
	175	2,1 *сек*	α	5,95	—
	176	6,0 *сек*	α (1,4)	5,74	—
			э. з. / β^+ (98,6)	—	
	177	6,6 *сек*	α (0,3)	5,51	—
			э. з. / β^+ (>99)	—	

Элемент	A	Период полураспада	Тип распада или содержание стабильных изотопов, %	Энергия, *Мэв* (относительная интенсивность, %)	
				групп частиц	γ-излучения
$_{78}$Pt	178	21 *сек*	α (1,3)	5,44	—
			э. з., β^+ } (98,7)	—	
	179	33 *сек*	α (0,1)	5,15	—
			э. з., β^+ } (> 99)	—	
	180	50 *сек*	α (0,3)	5,14	—
			э. з., β^+ } (> 99)	—	
	181	51 *сек*	α (0,0006)	5,02	—
			э. з., β^+ } (> 99)	—	
	182	3,0 *мин*	α (0,02)	4,84	—
			э. з., β^+ } (> 99)	—	
	183	6.5 *мин*	α (0,001)	4,73	—
			э. з., β^+ } (> 99)	—	
	184	20 *мин*	α (0,0015)	4,50	—
			э. з., β^+ } (> 99)	—	
	185	1,2 *ч*	э. з.	—	0,035; 0,63; 1,56
	186	3,0 *ч*	э. з.	—	0,67
			α ($1{,}4 \cdot 10^{-4}$)	4,23	
	187	2,0 *ч*	э. з.	—	2,0
	188	10,2 дня	э. з.	—	0,140 /22/; 0,19** /100/; 0,38 /15/
			α ($3 \cdot 10^{-5}$)	3,93	
	189	10,9 *ч*	э. з.	—	0,094 /120/; 0,141/124/; 0,187 /137/; 0,243 /100/; 0,56** /230/; 0,61** /180/; 0,722 /156/
	190	$6{,}9 \cdot 10^{11}$ лет	α 0,0127	3,18	—
	191	3,00 дня	э. з.	—	0,36** (5); 0,410 (3); 0,539 (9)
	192	$\sim 10^{15}$ лет	α	2,6?	—
	—	—	0,78	—	—
	193	< 500 лет	э. з.	—	—
	193*m*	4,3 дня	и. п.	—	—
	194	—	32,9	—	—
	195	—	33,8	—	—
	195*m*	4,1 дня	и. п.	—	0,099 (11); 0,129 (1)
	196	—	25,2	—	—
	197	18 *ч*	β^-	0,670	0,077 (20); 0,191 (6)
	197*m*	78 *мин*	и. п.	—	0,279 (2,6); 0,346 (13)
			β^- (3)	0,737 (3)	
	198	—	7,19	—	—
	199	31 *мин*	β^-	1,69	0,197 (9); 0,32* (8); 0,475* (12); 0,540 (24)
	199*m*	14,1 *сек*	и. п.	—	0,393 (90)
	200	11,5 *ч*	β^-	—	—
	201	2,3 *мин*	β^-	2,66	0,15; 0,23; 1,76
$_{79}$Au	177	1,4 *сек*	α	6,11	—
	178	2,7 *сек*	α	5,91	—
	179	7,1 *сек*	α	5,84	—
	181	10 *сек*	α	5,60; 5,47	—
	183	44 *сек*	α	5,34	—
	185	4,33 *мин*	э. з.	—	—
			β^+	—	
			α (~0,01)	5,07	
	186	12 *мин*	э. з.	—	0,16; 0,22; 0,30; 0,40
	187	8 *мин*	э. з.	—	—
			α [2]	4,69 [2]	
	188	8 *мин*	э. з.	—	0,25; 0,33; 0,63
			β^+	—	
	189	30 *мин*	э. з.	—	0,35; 0,45; 0,71; 0,81 [2]

Элемент	A	Период полураспада	Тип распада или содержание стабильных изотопов, %	Энергия, *Мэв* (относительная интенсивность, %)	
				групп частиц	γ-излучения
$_{79}$Au	190	39 *мин*	э. з.	—	0,29** /100/; 0,60** /5/
	191	3,2 *ч*	э. з.	—	0,14 /10/; 0,30 /60/; 0,60 /10/
	192	4,1 *ч*	э. з.	—	0,137; 0,158; 0,296; 0,308; 0,317
			β^+ (~1)	2,2	
	193	15,8 *ч*	э. з.	—	0,114** (5); 0,18** (11); 0,26* (9)
	193*m*	3,9 *сек*	и. п.	—	0,258 (65)
	194	39,5 *ч*	э. з. (~97)	—	0,294 (12); 0,328 (68)
			β^+ (~3)	1,49	
	195	183 дня	э. з.	—	0,099 (10); 0,129 (1)
	195*m*	30,6 *сек*	и. п.	—	0,261 (77)
	196	6,18 дня	э. з. (93,8)	—	0,333 (25); 0,356 (94); 0,426 (6)
			β^- (6,2)	0,259 (6)	
	196*m*	9,7 *ч*	и. п.	—	0,148 (42); 0,188 (32)
	197	—	100	—	—
	197*m*	7,2 *сек*	и. п.	—	0,130 (8); 0,279 (75)
	198	2,697 дня	β^-	0,962	0,412 (95); 0,676 (1)
	199	3,15 дня	β^-	0,46 (6); 0,30	0,158 (37); 0,208 (8)
	200	48,4 *мин*	β^-	2,2	0,368 (24); 1,227 (23)
	201	26 *мин*	β^-	1,5	0,53
	203	55 *сек*	β^-	1,9	0,69
$_{80}$Hg	185	50 *сек*	э. з.	—	—
			α [2]	5,64 [2]	
	186	1,5 *мин*	э. з.	—	0,125; 0,27; 0,35; 0,44
	187	3 *мин*	э. з.	—	0,175; 0,255; 0,40
	188	3,7 *мин*	э. з.	—	0,14
			α [2]	5,14 [2]	
	189	9,6 *мин*	э. з.	—	0,165; 0,24; 0,32; 0,50
	190	20 *мин*	э. з.	—	0,14**
	191	55 *мин*	э. з.	—	0,26**
	192	4,8 *ч*	э. з.	—	0,114 /10/; 0,157 /20/; 0,274 /100/
			β^+ (<1)	—	
	193	~6 *ч*	э. з.	—	0,187; 0,574; 0,762; 0,855; 1,04; 1,08
	193*m*	10,0 *ч*	э. з. (84)	—	0,218; 0,258; 0,574
			и. п. (16)	—	
			β^+ [2]	1,2 [2]	
	194	1,9 года	э. з.	—	—
	195	9,5 *ч*	э. з.	—	0,20**; 0,261; 0,59* 0,780; 0,930; 1,110; 1,172
	195*m*	40,0 *ч*	э. з. (50)	—	0,200 (35); 0,261 (20); 0,560 (20)
			и. п. (50)	—	
	196	—	0,146	—	—
	197	65 *ч*	э. з.	—	0,077 (18); 0,191 (2)
	197*m*	24 *ч*	и. п. (94)	—	0,134 (42); 0,279 (7)
			э. з. (6)	—	
	198	—	10,02	—	—
	199	—	16,84	—	—
	199*m*	43 *мин*	н. п.	—	0,158 (53); 0,375 (15)
	200	—	23,13	—	—
	201	—	13,22	—	—
	202	—	29,80	—	—
	203	46,9 дня	β^-	0,214	0,279 (77)
	204	—	6,85	—	—
	205	5,5 *мин*	β^-	1,7	0,205
	206	8,1 *мин*	β^-	1,3 [2]	0,31
$_{81}$Tl	191	10 *мин*	э. з.	—	0,511 (ан.)
			β^+	—	
	192	11 *мин*	э. з.	—	0,424
	193	23 *мин*	э. з.	—	0,158; 0,169; 0,178; 0,187; 0,208; 0,216; 0,247; 0,511 (ан)
			β^+	—	

Элемент	A	Период полураспада	Тип распада или содержание стабильных изотопов, %	Энергия, *Мэв* (относительная интенсивность, %)	
				групп частиц	γ-излучения
$_{81}$Tl	193*m*	2,1 *мин*	и. п.	—	0,365
	194	33,0 *мин*	э. з.	—	0,427
	194*m*	32,8 *мин*	э. з.	—	0,097
	195	1,16 *ч*	э. з.	—	—
			β^+	1,8	
	195*m*	3,5 *сек*	и. п.	—	0,383 (95)
	196	1,84 *ч*	э. з.	—	0,426
	196*m*	1,41 *ч*	э. з. (96)	—	0,426
			и п. (4)	—	
	197	2,84 *ч*	э. з.	—	0,152; 0,426
	197*m*	0,54 *сек*	и. п.	—	0,222 (40); 0,385 (90)
	198	5,3 *ч*	э. з	—	0,412(90); 0,65** (40);
			β^+ (~0,7)	2,4	1,20 (21); 1,42 (24)
	198*m*	1,87 *ч*	и. п. (55)	—	0,283(30); 0,412 (45);
			э. з. (45)	—	0,586 (35); 0,635 (35)
	199	7,4 *ч*	э. з.	—	0,158 (5); 0,208 (12); 0,247 (9); 0,455 (14)
	200	26,1 *ч*	э.з.	—	0,368 (88);
			β^+ (0,37)	1,44 (0,06); 1,07 (0,3)	0,579 (10); 1,21** (35)
	201	74 *ч*	э.з.	—	0,135 (2); 0,167(8)
	202	12,0 дней	э.з.	—	0,439(95); 0,522(0,1)
	203	—	29,50	—	—
	204	3,81 года	β^-(97,9)	0,766	—
			э.з.(2,1)	—	
	205	—	70,50	—	—
	206	4,19 *мин*	β^-	1,52	—
	207	4,79 *мин*	β^-	1,44	0,897 (0,16)
	207*m*	1,3 *сек*	и.п.	—	0,35; 1,00
	208	3,10 *мин*	β^-	1,80	0,583 (86); 2,614 (100)
	209	2,2 *мин*	β^-	1,99	0,45 (100); 1,56(100)
	210	1,32 *мин*	β^-	2,3	0,296(80); 0,795 (100)
$_{82}$Pb	194	11 *мин*	э.з.	—	0,204
	195	17 *мин*	э.з.	—	0,39*
	196	37 *мин*	э.з.	—	0,192; 0,240; 0,253; 0,367; 0,503
	197*m*	42 *мин*	э.з. (80)	—	0,085; 0,222;
			и.п. (20)	—	0,234; 0,386*
	198	2,4 *ч*	э.з.	—	0,173 (28); 0,290 (16); 0,38** (40)
	198*m*	25 *мин*	э.з.	—	—
	199	90 *мин*	э.з.	—	0,353 (17);
			β^+	2,8	0,367 (80)
	199*m*	12,2 *мин*	и.п.	—	0,424 (20)
	200	21,5 *ч*	э.з	—	0,109; 0,146*; 0,236; 0,26**; 0,290*; 0,450
	201	9,4 *ч*	э.з.	—	0,330; 0,361;
			β^+	0,55	0,406; 0,585; 0,766; 0,907
	201*m*	61 *сек*	и.п.	—	0,629(51)
	202	~ $3 \cdot 10^5$ лет	э.з.	—	—
	202*m*	3,62 *ч*	и.п. (90)	—	0,422 (90);
			э.з. (10)	—	0,658 (35); 0,787(45); 0,961 (90)
	203	52,1 *ч*	э.з.	—	0,279(81); 0,401 (5)
	203*m*	6,1 *сек*	и.п.	—	0,825 (70)
	204	—	1,40	—	—
	204*m*	66,9 *мин*	и.п	—	0,375 (93); 0,90* (189)
	205	$3{,}0 \cdot 10^7$ лет	э.з.	—	—
	206	—	25,1	—	—
	207	—	21,7	—	—
	207*m*	0,80 *сек*	и.п.	—	0,570 (98); 1,064 (83)
	208	—	52,3	—	—
	209	3,30 *ч*	β^-	0,635	—

Элемент	A	Период полураспада	Тип распада или содержание стабильных изотопов, %	Энергия, *Мэв* (относительная интенсивность, %)	
				групп частиц	γ-излучения
$_{82}$Pb	210	20,4 года	β^-	0,061	0,047 (4)
			α ($1{,}7\cdot10^{-6}$)	3,72	
	211	36,1 *мин*	β^-	1,36	0,405 (3,4); 0,427 (1,8); 0,832 (3,4)
	212	10,64 *ч*	β^-	0,58	0,239 (47); 0,300 (3,2)
	213	10,2 *мин*	β^-	—	—
	214	26,8 *мин*	β^-	1,03 (6); 0,67	0,242 (4); 0,295 (19); 0,352 (36)
$_{83}$Bi	198 [2]	11,8 *мин*	э.з.	—	0,20; 0,32; 0,56; 1,06
	199	24,4 *мин*	э.з. (>99)	—	—
			α (~0,01)	5,53	
	200	35 *мин*	э.з.	—	—
	201	1,85 *ч*	э.з.	—	—
	201*m*	52 *мин*	э.з. (>99)	—	—
			α (0,003)	5,28	
	202	95 *мин*	э.з.	—	0,422; 0,961
	203	11,8 *ч*	э.з	—	0,82** (78);
			β^+	1,35	1,52** (31); 1,87* (35)
	204	11,2 *ч*	э.з	—	0,21**; 0,375; 0,671; 0,91**; 0,98; 1,21**
	205	15,31 дня	э.з.	—	0,703 (28); 0,988 (17);
			β^+ (0,06)	0,98	1,766 (27)
	206	6,243 дня	э.з.	—	0,516 (46); 0,538 (34);
			β^+ ($8\cdot10^{-4}$)	—	0,803 (99); 0,880 (72)
	207	30,2 года	э.з.	—	0,570 (98); 1,063 (77)
	208	$3{,}68\cdot10^5$ лет	э.з.	—	2,614 (100)
	209	—	100	—	—
	210	5,013 дня	β^- (>99)	1,160	—
			α ($1{,}3\cdot10^{-4}$)	4,69 ($5\cdot10^{-5}$); 4,65 ($7\cdot10^{-5}$)	
	210*m*	~$2{,}6\cdot10^6$ лет	α (99,6)	4,96 (58); 4,92 (36); 4,57 (6)	0,262 (45); 0,30 (23); 0,34; 0,61
			β^-(0,4)	—	
	211	2,13 *мин*	α (>99)	6,62 (84); 6,28 (16)	0,351 (14)
			β^- (0,27)	—	
	212	60,60 *мин*	β^- (64)	2,25	0,04 (2); 0,288 (0,5)
			α (36)	6,09 (10); 6,05 (25)	0,46** (0,8); 0,727 (7); 0,785 (1,1); 1,620 (1,8)
	213	47 *мин*	β^- (97,8)	1,39	0,437
			α (2,2)	5,87	
	214	19,9 *мин*	β^- (>99)	3,26	0,609 (47); 0,769 (5); 0,935 (3); 1,120 (17); 1,238 (6); 1,378 (5)
			α (0,021)	5,51 (0,008); 5,45 (0,012)	
					1,40** (4); 1,509 (2); 1,728 (3); 1,764 (17); 1,848 (2); 2,117 (1); 2,204 (5); 2,445 (2)
	215	7 *мин*	β^-	—	—
$_{84}$Po	194	0,5 *сек*	α	6,85	—
	195	3 *сек*	α	6,63	—
	195*m*	1,4 *сек*	α	6,72	—
	196	6 *сек*	α	6,53	—
	197	54 *сек*	α	6,30	—
	197*m*	25 *сек*	α	6,39	—
	198	1,7 *мин*	α (>34)	6,16	—
	199	5,0 *мин*	э.з. (97,3)	—	—
			α (2,7)	5,94	
	199*m*	4,2 *мин*	э.з.(74)	—	—
			α(26)	6,05	
	200	10,5 *мин*	э.з. (88)	—	—
			α(12)	5,86	
	201	15,1 *мин*	э.з. (98,9)	—	—
			α (1,1)	5,68	
	201*m*	8,9 *мин*	э.з. (97)	—	—
			α (3)	5,78	

Элемент	A	Период полураспада	Тип распада или содержание стабильных изотопов, %	Энергия *Мэв* (относительная интенсивность, %)	
				групп частиц	γ-излучения
$_{84}$Po	202	45 *мин*	э.з. (98) α (2)	— 5,58	—
	203	42 *мин*	э.з. (>99) α (0,02)	— 5,49	—
	204	3,6 *ч*	э.з. (>99) α (0,6)	— 5,38	—
	205	1,8 *ч*	э.з. (>99) α (0,07)	— 5,25	—
	206	8,8 дня	э.з. (95) α (5)	— 5,22 (5)	0,286/35/; 0,338/40/; 0,51**/100/; 0,807/60/; 1,02**/85/
	207	5,7 *ч*	э.з. (99) α (~0,01) β^+ (0,5)	— 5,11 1,14	0,25/5/; 0,35/4/; 0,41/13/; 0,74/36/; 0,95/84/; 1,15/6/; 1,37/4/; 2,06/1,6/***
	207*m*	2,8 *сек*	и.п.	—	0,26(42); 0,31(40); 0,82(100)
	208	2,93 года	α э.з. (~0,006)	5,11 —	0,285(0,003); 0,60**(0,006)
	209	103 года	α (>99) э.з. (~0,5)	4,88 (99) —	0,261** (0,4); 0,91 (0,5) —
	210	138,40 дня	α	5,305 (100)	0,803 (0,0011)
	211	0,52 *сек*	α	7,45 (99)	0,570 (0,5); 0,90(0,5)
	211*m*	25 *сек*	α	8,88 (7); 7,28 (91)	0,570 (92); 1,063 (77)
	212	$3{,}04\cdot10^{-7}$ *сек*	α	8,78 (100)	—
	212*m*	45 *сек*	α	11,65 (97)	0,57 (2); 2,61 (2,6)
	213	$4{,}2\cdot10^{-6}$ *сек*	α	8,38	—
	214	$1{,}64\cdot10^{-4}$ *сек*	α	7,69 (100)	—
	215	$1{,}778\cdot10^{-3}$ *сек*	α (>99) β^- (0,00023)	7,38 (100) —	—
	216	0,145 *сек*	α	6,78 (100)	—
	217	<10 *сек*	α	6,55	—
	218	3,05 *мин*	α (>99) β^- (0,0185)	6,00 (100) —	— —
$_{85}$At	200	0,9 *мин*	α э.з.	6,47; 6,42 —	—
	201	1,5 *мин*	α э.з.	6,35 —	—
	202	3,0 *мин*	э.з. (88) α (12)	— 6,23 (4,3); 6,12(7,7)	—
	203	7,4 *мин*	э.з. (86) α (14)	— 6,09	—
	204	9,3 *мин*	э.з. (95,5) α (4,52)	— 5,95	—
	205	26,2 *мин*	э.з. (82) α (18)	— 5,90	—
	206	32,8 *мин*	α (~88) э.з. (~12)	5,70 (88) —	0,068(10)
	207	1,8 *ч*	э.з. (~90) α (~10)	— 5,76	—
	208	1,6 *ч*	э.з. (>99) α (0,5)	— 5,65	0,18(25); 0,66(100); 0,25
	209	5,5 *ч*	э.з. (~95) α (~5)	— 5,65 (5)	0,195 (23); 0,545 (62); 0,780 (94)
	210	8,3 *ч*	э.з. (>99) α (0,17)	— 5,52(0,05); 5,44(0,05); 5,36 (0,06)	0,245 (79); 1,180 (100); 1,436 (29); 1,483 (48); 1,599 (14)
	211	7,21 *ч*	α (40,9) э.з. (59,1)	5,868 —	0,67
	212	0,30 *сек*	α	7,66 (80); 7,60 (20)	—

Элемент	A	Период полураспада	Тип распада или содержание стабильных изотопов, %	Энергия, *Мэв*, (относительная интенсивность, %)	
				групп частиц	γ-излучения
$_{85}$At	212 *m*	0,12 *сек*	α	7,88(20); 7,82(80)	—
	214	$\sim 2 \cdot 10^{-6}$ *сек*	α	8,78(99)	—
	215	$\sim 10^{-4}$ *сек*	α	8,01	—
	216	$\sim 3 \cdot 10^{-4}$ *сек*	α	7,80(97)	—
	217	0,0323 *сек*	α	7,07($>$99)	—
	218	~ 2 *сек*	α($>$99)	6,70(94): 6,65(6)	—
			β^-(0,1)	—	
	219	0,9 *мин*	α($\sim$97)	6,28	—
			β^-($\sim$3)	—	
$_{86}$Rn	201	3 *сек*	α	6,77	—
	202	13 *сек*	α	6,64	—
	203	45 *сек*	α	6,50	—
	203 *m*	28 *сек*	α	6,55	—
	204	75 *сек*	α	6,42	—
	205	1,8 *мин*	α	6,26	—
	206	6,5 *мин*	э.з. (35)	—	—
			α (65)	6,26	
	207	10 *мин*	э.з. (96)	—	—
			α (4)	6,15	
	208	23 *мин*	э.з. (80)	—	—
			α (20)	6,15	
	209	30 *мин*	э.з. (83)	—	—
			α (17)	6,04	
	210	2,42 *ч*	α ($\sim$96)	6,04	—
			э.з. ($\sim$4)	—	
	211	15 *ч*	э.з. (74)	—	0,445 (29); 0,680 (74);
			α (26)	5,85 (9); 5,78 (17)	0,865 (18); 0,946 (21); 1,13 (23); 1,37 (38)
	212	25 *мин*	α	6,27	—
	215	$\sim 10^{-6}$ *сек*	α	8,6	—
	216	$4{,}5 \cdot 10^{-5}$ *сек*	α	8,05	—
	217	$5{,}4 \cdot 10^{-4}$ *сек*	α	7,74	—
	218	0,035 *сек*	α	7,14 (99,8)	0,609 (0,2)
	219	4,00 *сек*	α	6,82 (81); 6,55 (11); 6,42 (8)	0,272 (9); 0,401 (5)
	220	55,3 *сек*	α	6,29(100)	0,55 (0,07)
	221	25 *мин*	β^- ($\sim$80)	—	—
			α ($\sim$20)	6,0	
	222	3,8229 дня	α	5,49(100)	0,510 (0,07)
	223	43 *мин*	β^- [2]	—	—
	224	1,9 *ч*	β^- [2]	—	—
$_{87}$Fr	204	2,0 *сек*	α	7,03	—
	205	3,7 *сек*	α	6,92	—
	206	15,8 *сек*	α	6,80	—
	207	19 *сек*	α	6,78	—
	208	37 *сек*	α	6,66	—
	209	55 *сек*	α	6,66	—
	210	2,6 *мин*	α	6,56	—
	211	3,1 *мин*	α	6,56	—
	212	19,3 *мин*	э.з. (56)	—	—
			α (44)	6,42 (16); 6,39 (17); 6,35 (11)	
	213	34 *сек*	α ($>$99)	6,78	—
			э.з. (0,5)	—	
	218	$5 \cdot 10^{-3}$ *сек*	α	7,85 (93)	—
	219	0,02 *сек*	α	7,31	—
	220	27,5 *сек*	α	6,68 (85); 6,64 (13)	—

Элемент	A	Период	Тип распада или содержание стабильных изотопов, %	Энергия, *Мэв* (относительная интенсивность, %)	
				групп частиц	γ-излучения
$_{87}Fr$	221	4,8 *мин*	α	6,34 (82); 6,12 (15)	0,218 (14)
	222	14,8 *мин*	β^- (>99)	—	—
			α (0,01—0,1)	—	
	223	22 *мин*	β^-	1,15	0,050 (40); 0,080 (13); 0,234 (4)
			α ($\sim 4\cdot10^{-3}$)	5,34 [2]	
$_{88}Ra$	213	2,7 *мин*	α	6,91	—
	219	$\sim10^{-3}$ *сек*	α	8,0	—
	220	0,023 *сек*	α	7,46 (99)	0,465 (1)
	221	30 *сек*	α	6,76 (30); 6,67 (20); 6,61 (34); 6,59(8)	0,091 (3,5); 0,151 (13); 0,175 (2)
	222	38 *сек*	α	6,56 (96)	0,325 (4)
	223	11,435 дня	α	5,75 (9); 5,71 (54); 5,61 (26); 5,54 (9)	0,149** (10); 0,270 (10); 0,33** (6)
	224	3,64 дня	α	5,68 (94); 5,45 (6)	0,241 (3,7)
	225	14,8 дня	β^-	0,36	0,040 (33)
	226	1602 года	α	4,78 (95); 4,60 (6)	0,186 (4)
	227	41,2 *мин*	β^-	1,31	0,291 (4); 0,498 (0,6)
	228	6,7 года	β^-	0,05	—
	230	1 *ч*	β^-	1,2	—
$_{89}Ac$	221	< 1 *сек*	α	7,63; 7,42 [2]	—
	222	5,5 *сек*	α	7,00 (93)	—
	223	2,2 *мин*	α (99)	6,66 (38); 6,65 (42); 6,57 (13)	0,082(0,2); 0,096 (0,2)
			э.з. (1)	—	
	224	2,9 *ч*	э.з. (~90)	—	0,132 (28);
			α (~10)	6,20 (3); 6,14 (3); 6,04 (3)	0,217 (62)
	225	10,0 дней	α	5,73* (10); 5,83(54); 5,79 (28)	0,099; 0,150; 0,187
	226	29 *ч*	β^- (~80)	1,2	0,158 (32); 0,185 (9);
			э.з. (~20)	—	0,230 (47); 0,253 (11)
	227	21,6 года	β^- (99)	0,046	0,070; 0,166; 0,190
			α (1,4)	4,95* (1,2); 4,86*(0,18);	
	228	6,13 *ч*	β^-	2,11	0,34** (15); 0,908 (25); 0,96** (20)
	229	66 *мин*	β^-	—	—
	230	< 1 *мин*	β^-	2,2	—
	231	15 *мин*	β^-	2,1	0,185; 0,28; 0,39; 0,71
$_{90}Th$	223	0,9 *сек*	α	7,56	—
	224	1,05 *сек*	α	7,18 (79); 6,91 (19)	0,177 (9); 0,235 (0,4); 0,297 (0,3); 0,410 (0,8)
	225	8,0 *мин*	α (~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.з. (~10)	—	
	226	30,9 *мин*	α	6,34 (79); 6,22 (19)	0,111 (3,4); 0,242 (1,2)
	227	18,2 дня	α	6,04 (23); 5,98 (24); 5,76 (21); 5,72* (14)	0,050 (8); 0,237** (15); 0,31** (8)

Элемент	A	Период полураспада	Тип распада или содержание стабильных изотопов, %	Энергия, *Мэв* (относительная интенсивность, %)	
				групп частиц	γ-излучения
$_{90}$Th	228	1,910 года	α	5,43 (71); 5,34 (28)	0,084 (1,6); 0,132 (0,2); 0,167 (0,1); 0,214 (0,3)
	229	7340 лет	α	5,05 (7); 4,97**(10); 4,90 (11); 4,84 (58); 4,81 (11)	0,137**(~3); 0,20*(~10)
	230	$8{,}0\cdot10^4$ лет	α	4,68 (76); 4,62 (24)	0,068 (0,6), 0,142 (0,07)
	231	25,52 *ч*	β^-	0,30	0,026 (2); 0,084**(10)
	232	$1{,}41\cdot10^{10}$ лет	100	—	—
			α	4,01 (76); 3,95 (24)	
	233	22,12 *мин*	β^-	1,23	0,029 (2,1); 0,087 (2,7); 0,171 (0,7); 0,453 (1)
	234	24,10 дня	β^-	0,191	0,063*(3,5); 0,093*(4)
$_{91}$Pa	225	2,0 *сек*	α	7,25 [2]	—
	226	1,8 *мин*	α (74)	6,86 (38); 6,82(34)	—
			э.з. (26)	—	
	227	38,3 *мин*	α (~85)	6,47 (43); 6,42** (23); 6,40 (8); 6,36 (7)	0,065** (6); 0,110 (2)
			э.з. (~15)	—	
	228	22 *ч*	э.з. (~98)	—	0,14 (3); 0,20 (9); 0,28 (5);
			α(~2)	6,11** (1); 6,08 (0,4); 6,03 (0,2); 5,80 (0,2)	0,33 (18); 0,41 (13); 0,46 (32); 0,95 (93); 1,57 (7); 1,85 (4)***
	229	1,5 дня	э.з. (>99)	—	—
			α (0,25)	5,67(0,05); 5,62**(0,07); 5,58(0,10); 5,54 (0,03)	
	230	17,7 дня	э.з. (89,6)	—	0,45** (18); 0,91** (24); 0,95 (50)
			β^- (10,4)	0,41	
			α (0,0032)	5,34; 5,32; 5,30 [2]	
	231	$3{,}25\cdot10^4$ лет	α	5,06 (10); 5,02 (23); 5,01 (24); 4,95 (22); 4,73 (11)	0,027 (6); 0,29** (6)
	232	1,31 дня	β^-	1,3 (0,7); 0,32	0,150 (12); 0,87**(51); 0,97 (40)
	233	27,0 дней	β^-	0,568 (5); 0,257	0,31** (44)
	234	6,75 *ч*	β^-	1,3 (≤2); 1,13 (13); 0,53	0,100 (50); 0,126 (26); 0,70 (24); 0,90 (70)***
	234*m*	1,175 *мин*	β^- (>99)	2,29	0,765 (0,30); 1,001 (0,60)
			и. п. (0,13)	—	
	235	23,7 *мин*	β^-	1,4	—
	236	12 *мин*	β^-	3,3	—
	237	39 *мин*	β^-	2,3	0,090/50/; 0,145/45/; 0,205/55/; 0,330/40/; 0,46/100/; 0,75/50/; 0,87/100/; 0,92/100/
$_{92}$U	227	1,3 *мин*	α	6,8	—
	228	9,1 *мин*	α (≤95)	6,69/70/; 6,60/29/	0,152 (0,2); 0,187 (0,3); 0,246 (0,4)
			э.з. (≤5)	—	
	229	58 *мин*	э.з. (~80)	—	—
			α (~20)	6,36 (13); 6,33 (4); 6,30 (3)	
	230	20,8 дня	α	5,89 (67); 5,82 (32)	0,072 (0,54); 0,231 (0,18)
	231	4,3 дня	э. з. (>99)	—	0,084 (7); 0,218 (1)
			α (0,0055)	5,46	

Элемент	A	Период полураспада	Тип распада или содержание стабильных изотопов, %	Энергия, *Мэв* (относительная интенсивность, %)	
				групп частиц	γ-излучения
$_{92}U$	232	72 года	α	5,32 (68); 5,27 (32)	0,058 (0,21); 0,129 (0,082)
	233	$1{,}62\cdot10^5$ лет	α	4,82 (83); 4,78 (15)	0,029 /60/; 0,042 /310/; 0,055 /68/; 0,097 /100/; 0,164 /27/; 0,32* /43/
	234	$2{,}47\cdot10^5$ лет	α	4,77 (72); 4,72 (28)	0,053 (0,2)
	235	$7{,}1\cdot10^8$ лет	α	4,58* (8); 4,40 (57);	0,143 (11); 0,185 (54);
		—	0,7196	4,37 (18)	0,204 (5)
	235*m*	26,1 *мин*	и. п.	—	—
	236	$2{,}39\cdot10^7$ лет	α	4,49 (76); 4,44 (24)	—
	237	6,75 дня	β^-	0,248	0,026 (2); 0,060 (36); 0,165 (2); 0,208 (23)
	238	$4{,}51\cdot10^9$ лет	99,276	—	—
			α	4,20 (75); 4,15 (25)	
	239	23,54 *мин*	β^-	1,29	0,044 (4); 0,075 (51)
	240	14,1 *ч*	β^-	0,36	—
$_{93}Np$	231	~50 *мин*	α	6,29	—
	232	~13 *мин*	э. з.	—	—
	233	35 *мин*	э. з. (>99)	—	—
			α (~10^{-3})	5,54	
	234	4,40 дня	э. з.	—	0,109; 0,23; 0,25;
			β^+ (~0,05)	0,8	0,45; 0,50; 0,75; 0,95; 1,21; 1,56***
	235	410 дней	э. з. (>99)	—	—
			α ($1{,}6\cdot10^{-3}$)	5,02	
	236	22 *ч*	э. з. (51)	—	0,642; 0,688;
			β^- (49)	0,52	
	237	$2{,}14\cdot10^6$ лет	α	4,78** (75); 4,65* (12)	0,030 (14); 0,086 (14); 0,145 (1)
	238	2,10 дня	β^-	1,25	1,01** (42)
	239	2,346 дня	β^-	0,713 (11); 0,437	0,106 (23); 0,209 (4); 0,228 (12); 0,278 (14)
	240	63 *мин*	β^-	0,89	0,16; 0,25; 0,44; 0,56; 0,60; 0,92; 1,00; 1,16
	240*m*	7,3 *мин*	β^-	2,16	0,56 (21); 0,60 (13); 0,92** (3); 1,5** (3)
	241	16 *мин*	β^-	1,3	0,14; 0,18 [2]
$_{94}Pu$	232	36 *мин*	α (≥2)	6,59	—
			э. з. (≤98)	—	
	233	20 *мин*	э. з. (>99)	—	—
			α (0,1)	6,31	
	234	9 *ч*	э. з. (94)	—	—
			α (6)	6,20 (4); 6,15 (1,9)	
	235	26 *мин*	э. з. (>99)	—	—
			α (0,003)	5,86	
	236	2,85 года	α	5,77 (69); 5,72 (31)	0,048 (0,31); 0,109 (0,012)
	237	45,6 дня	э. з. (>99)	—	0,060 (5)
			α (0,0033)	5,66 /21/; 5,37 /79/	
	237*m*	0,18 *сек*	и. п.	—	0,145 (2)
	238	86,4 года	α	5,50 (72); 5,46 (28)	0,099 ($8\cdot10^{-3}$); 0,150 ($1\cdot10^{-3}$)
	239	24390 лет	α	5,16* (88); 5,11 (11)	0,039 (0,007); 0,052 (0,020); 0,129 (0,005); 0,375 (0,0012); 0,414 (0,0012)
	240	6580 лет	α	5,17 (76); 5,12 (24)	0,65** ($2\cdot10^{-5}$)
	241	13,2 года	β^- (>99)	0,021	0,145 ($1{,}6\cdot10^{-4}$)
			α ($2{,}3\cdot10^{-3}$)	4,90 (0,0019)	
				4,85 (0,0003)	
	242	$3{,}79\cdot10^5$ лет	α	4,90 (76); 4,86 (24)	—
	243	4,98 *ч*	β^-	0,58	0,084 (21); 0,381 (0,7)
	244	~$7{,}6\cdot10^7$ лет	α	4,58; 4,54 [2]	—
	245 [2]	10,48 *ч*	β^-	0,9; 1,2	0,33; 0,56
	246	10,85 дня	β^-	0,33 (10); 0,15	0,044 (30); 0,180 (10); 0,224 (25)

Элемент	A	Период полураспада	Тип распада или содержание стабильных изотопов, %	Энергия, *Мэв* (относительная интенсивность, %)	
				групп частиц	γ-излучения
$_{95}$Am	237	~1,3 *ч*	э. з. (>99) α (0,005)	— 6,02	—
	238	1,9 *ч*	э.з.	—	0,36 (12); 0,58 (29); 0,98* (80); 1,35 (76)
	239	12,1 *ч*	э.з. (>99) α (0,005)	— 5,78	0,209 (5); 0,228* (18); 0,278 (17)
	240	51,0 *ч*	э.з.	—	0,90 (23); 1,00 (77)
	241	458 лет	α	5,49 (85); 5,44 (13)	0,060 (36); 0,101** (0,04)
	242	16,01 *ч*	β⁻ (84) э.з. (16)	0,67 —	—
	242*m*	152 года	и.п. (>99) α (0,48)	— 5,21 (0,41)	0,049 (0,20); 0,087 (0,036)
	243	$7{,}95\cdot10^3$ лет	α	5,28 (87); 5,23 (11,5)	0,044 (4); 0,075 (50)
	244	10,1 *ч*	β⁻	0,387	0,099 (5); 0,154 (19); 0,746 (66); 0,900 (25)
	244*m*	26 *мин*	β⁻ (>99) э.з. (0,039)	1,50 —	—
	245	2,07 *ч*	β⁻	0,91	0,253
	246	25 *мин*	β⁻	2,10 (7); 1,60	0,799 (29); 1,07** (65)
$_{96}$Cm	238	2,5 *ч*	э.з. (<90) α (>10)	— 6,51	—
	239	2,9 *ч*	э.з.	—	0,188
	240	26,8 дня	α	6,29 (72); 6,25 (28)	—
		$7{,}9\cdot10^5$ лет	с.д.	—	
	241	35 дней	э.з. (99) α (1,0)	— 5,94	0,475 (95); 0,60 —
	242	162,5 дня	α	6,12 (74); 6,07 (26)	0,044 (0,041); $0{,}102\,(4\cdot10^{-3})$;
		$7{,}2\cdot10^6$ лет	с.д.	—	$0{,}158\,(2{,}5\cdot10^{-3})$
	243	32 года	α	6,06* (6); 5,99* (6); 5,79 (73); 5,74 (11,5)	0,209 (4); 0,228 (12); 0,278 (14)
			э.з. (0,3)	—	
	244	17,6 лет	α	5,81 (77); 5,77 (23)	0,043 (0,02); 0,100 (0,0015); 0,150 (0,0013)
		$1{,}31\cdot10^7$ лет	с.д.	—	
	245	$9{,}3\cdot10^3$ лет	α	5,36 (80); 5,31 (7)	0,13 (5); 0,173 (14)
	246	$5{,}5\cdot10^3$ лет	α	5,39 (81); 5,34 (19)	—
		$1{,}7\cdot10^7$ лет	с.д.	—	
	247	$1{,}64\cdot10^7$ лет	α [2]	—	—
	248	$4{,}7\cdot10^5$ лет	α (89)	5,08 (82); 5,04 (18)	—
		$4{,}6\cdot10^6$ лет	с. д. (11)	—	
	249	64 *мин*	β⁻	0,9	—
	250	$1{,}7\cdot10^4$ лет	с.д.	—	—
$_{97}$Bk	243	4,6 *ч*	э.з. (>99) α (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	4,4 *ч*	э.з. (>99) α (0,006)	— 6,62 (0,003); 6,67 (0,003)	0,218 (100); 0,892 (88)
	245	4,98 дня	э.з. (>99) α (0,11)	— 6,36 (0,018); 6,32 (0,017); 6,15 (0,021); 6,12 (0,016); 5,89 (0,024)	0,253 (31); 0,39* (3)
	246	1,8 дня	э.з.	—	0,800 (40); 1,07** (12)

Элемент	A	Период полураспада	Тип распада или содержание стабильных изотопов, %	Энергия, *Мэв* (относительная интенсивность, %)	
				групп частиц	γ-излучения
$_{97}$Bk	247	$1{,}4\cdot10^3$ лет	α	5,68 (37); 5,52 (58)	0,084 (40); 0,27 (30)
	248	16 *ч*	β^- (70)	0,65	—
			э.з. (30)	—	
	249	314 дней	β^- (>99)	0,125	0,32* ($3\cdot10^{-5}$)
			α (0,0022)	5,42 (0,0015)	
		$6\cdot10^3$ лет	с.д	—	
	250	193,3 *мин*	β^-	1,76 (11); 0,73	0,990 (47); 1,032 (39)
$_{98}$Cf	244	25 *мин*	α	7,18	—
	245	44 *мин*	э.з. (70)	—	—
			α (30)	7,12	
	246	35,7 *ч*	α	6,76 (78); 6,72 (22)	—
		$2{,}1\cdot10^3$ лет	с.д.	—	—
	247	2,5 *ч*	э.з.	—	0,295 (1); 0,417; 0,460
	248	350 дней	α	6,27 (82); 6,22 (18)	—
		$\geqslant1{,}5\cdot10^4$ лет	с.д.	—	
	249	360 лет	α	5,81 (84)	0,333 (16); 0,388 (72)
		$1{,}5\cdot10^9$ лет	с.д.	—	
	250	13,2 года	α	6,03 (83); 5,99 (17)	—
		$1{,}7\cdot10^4$ лет	с.д.	—	
	251	~800 лет	α	5,85 (45); 5,67 (55)	0,18
	252	2,646 года	α (96,9)	6,12 (82); 6,08 (15)	—
		85 лет	с. д. (3,1)	—	
	253	17,6 дня	β^- (>99)	0,27	—
			α (0,31)	5,98	
	254	60,5 дня	с.д. (>99)	—	—
			α (~0,2)	5,84	
$_{99}$Es	245	1,3 *мин*	α (17)	7,70	—
			э.з. (83)	—	
	246	7,3 *мин*	α (10)	7,33	—
			э.з. (90)	—	
	247	5,0 *мин*	α (~7)	7,33	—
			э.з. (~93)	—	
	248	25 *мин*	э.з. (>99)	—	—
			α (~0,3)	6,88	
	249	2 *ч*	э.з. (>99)	—	—
			α (0,13)	6,77	
	250	8 *ч*	э.з.	—	—
	251	1,5 дня	э.з. (>99)	—	—
			α (0,53)	6,49	
	252	~140 дней	α	6,64 (82); 6,58 (13)	0,228 (0,23); 0,278 (0,21); 0,40** (1,1)
	253	20,47 дней	α	6,64 (90)	0,387** (0,05)
		$6{,}4\cdot10^5$ лет	с.д.	—	
	254	276 дней	α	6,44 (93)	0,063 (2); 0,27** (0,12); 0,31* (0,22)
		$7\cdot10^5$ лет	с. д.	—	
	254*m*	39,3 *ч*	β^- (>99)	1,13 (25); 0,43	0,65 (31); 0,69** (38)
			э.з. (0,08)	—	
		>10 лет	с.д.	—	
	255	38,3 дня	β^- (91,5)	—	—
			α (8,5)	6,31	
		>170 лет	с.д.	—	
$_{100}$Fm	245 [2]	4,2 *сек*	α	8,15	—
	246 [2]	1,2 *сек*	α	8,24	—
			с.д.	—	
	247 [2]	9,2 *сек*	α	8,18	—
	247 [2]	35 *сек*	α	7,87; 7,93	—
	248 [2]	38 *сек*	α	7,87; 7,83	—
			с.д.	—	
	249 [2]	2,6 *мин*	α	7,53	—
			э.з.	—	—

Элемент	A	Период полураспада	Тип распада или содержание стабильных изотопов, %	Энергия, *Мэв* (относительная интенсивность, %)	
				групп частиц	γ-излучения
$_{100}$Fm	250	30 *мин*	α	7,42	—
	251	7 *ч*	э.з. (~99) α (~1)	— 6,83 [2]	0,41 [2]
	252	22,7 *ч* >8 лет	α с.д.	7,05 —	—
	253	3,0 дня	э.з. (89) α (11)	— 6,96 (9); 6,91 (2)	0,27 [2]
	254	3,24 *ч* 246 дней	α (>99) с.д. (0,055)	7,20 (82); 7,16 (17) —	—
	255	20,1 *ч* $1{,}10^4$ лет	α с.д.	7,03 (93) —	0,059* (0,9); 0,081* (1,1)
	256	2,7 *ч*	с.д. (97) α (3)	— 6,86	—
	257	80 дней 100 лет	α с.д.	6,53 (94) —	0,180 (8); 0,242 (10)
$_{101}$Md	252 [2]	~8 *мин*	э.з.	—	—
	255	0,6 *ч*	э.з. (90) α (10)	— 7,34	—
	256	1,5 *ч*	э.з. (97) α (3)	— 7,18	—
	257 [2]	4,8 *ч*	э.з. (~92) α (~8)	— 7,08	—
	258 [2]	54 дня	α	6,73; 6,78	—
$_{102}$(No)*[1]	251	0,8 *сек*	α	8,68? (20); 8,58 (80)	—
	252	2,1 *сек*	α (~70) с.д. (~30)	8,41 —	—
	253	100 *сек*	α	8,02	—
	254	55 *сек*	α	8,10	—
	255	180 *сек*	α	8,11	—
	256	2,7 *сек*	α с.д. (0,5)	8,43 —	—
	257	20 *сек*	α	8,27 (50); 8,23? (50)	—
$_{103}$(Lr)*[1]	256 [2]	35 *сек*	α	8,35—8,60	—
	257? [2]	35 *сек*	α	8,50—8,60	—
	258/259 [2]	8 *сек*	α	~8,6	—
$_{104}$Ku	260	0,3 *сек*	с.д.	—	—

*[1] Названия не являются общепринятыми.

Таблица 37.2

Эталонные энергии γ-квантов в диапазоне энергий E_γ от ~ 12 до 3450 *кэв* [1]

Нуклид	Период полураспада	E_γ, *кэв*
^{241}Am	458 лет	11,887±0,004
^{241}Am	458 лет	13,9±0,1
^{57}Co	270 дней	14,36±0,05
^{241}Am	458 лет	17,8±0,1
^{241}Am	458 лет	20,8±0,1
^{109}Gd	453 дня	22,1±0,1
^{109}Gd	453 дня	25,0±0,1
^{241}Am	458 лет	26,348±0,010
^{137}Cs	30,0 лет	32,1±0,1
^{137}Cs	30,0 лет	36,5±0,1
^{241}Am	458 лет	59,543±0,015
^{203}Hg	46,9 дня	70,833±0,001
^{203}Hg	46,9 дня	72,873±0,001
^{131}I	8,05 дня	80,164±0,008
^{203}Hg	46,9 дня	82,5±0,2
^{203}Hg	46,9 дня	84,9±0,1
^{109}Gd	453 дня	87,7±0,2
^{182}Ta	115 дней	100,104±0,002
^{177m}Lu	155 дней	105,36±0,02
^{177m}Lu	155 дней	112,97±0,02
^{177m}Lu	155 дней	121,56±0,03
^{57}Co	270 дней	121,97±0,05
^{177m}Lu	155 дней	128,48±0,02
^{57}Co	270 дней	136,33±0,04
^{141}Ce	33 дня	145,43±0,02
^{182}Ta	115 дней	152,435±0,003
^{177m}Lu	155 дней	153,25±0,04
^{182}Ta	115 дней	156,387±0,003
^{139}Ce	140 дней	165,84±0,03
^{182}Ta	115 дней	179,393±0,004
^{177m}Lu	155 дней	204,08±0,06
^{192}Ir	74,2 дня	205,782±0,014
^{177m}Lu	155 дней	208,34±0,06
^{182}Ta	115 дней	222,109±0,005
^{177m}Lu	155 дней	228,44±0,06
^{182} Ta	115 дней	229,322±0,008
^{212} Pb	10,6 *час*	238,61±0,01
^{214}Pb	26,8 *мин*	241,924±0,030
^{182}Ta	115 дней	264,072±0,009
^{203}Hg	46,9 дня	279,17±0,02
^{177m}Lu	155 дней	281,78±0,07
^{131}I	8,05 дня	284,311±0,010
^{214}Pb	26,8 *мин*	295,217±0,039
^{192}Ir	74,2 дня	295,938±0,009
^{192}Ir	74,2 дня	308,429±0,010
^{192}Ir	74,2 дня	316,486±0,010
^{51}Cr	27,8 дня	320,08±0,05
^{214}Pb	26,8 *мин*	351,992±0,062
^{131}I	8,05 дня	364,491±0,015
^{198}Au	2,698 дня	411,795±0,009
^{192}Ir	74,2 дня	468,053±0,014
^{7}Be	53 дня	477,57±0,05
m_0c^2	*	511,006±0,002
^{207}Bi	30 лет	569,63±0,08
^{208}Tl	3,1 *мин*	583,139±0,023
^{192}Ir	74,2 дня	588,557±0,017

* Аннигиляционное излучение, сопровождающее позитроиный распад нуклидов.

Нуклид	Период полураспада	E_γ, *кэв*
^{192}Ir	74,2 дня	604,385±0,017
^{214}Bi	19,8 *мин*	609,37±0,16
^{192}Ir	74,2 дня	612,435±0,017
^{131}I	8,05 дня	636,90±0,23
^{110m}Ag	253 дня	657,61±0,16
^{137}Cs	30,0 лет	661,595±0,076
^{110m}Ag	253 дня	677,36±0,20
^{110m}Ag	253 дня	686,80±0,25
^{110m}Ag	253 дня	706,28±0,25
^{131}I	8,05 дня	722,91±0,05
^{110m}Ag	253 дня	743,99±0,25
^{110m}Ag	253 дня	763,77±0,20
^{58}Co	71,3 дня	810,46±0,10
^{110m}Ag	253 дня	817,87±0,30
^{54}Mn	303 дня	834,85±0,10
^{56}Co	77 дней	846,77±0,06
^{110m}Ag	253 дня	884,46±0,25
^{46}Sc	83,9 дня	889,18±0,10
^{88}Y	108 дней	897,96±0,10
^{110m}Ag	253 дня	937,2±0,3
^{207}Bi	30 лет	1063,58±0,06
^{65}Zn	245 дней	1115,44±0,01
^{46}Sc	83,9 дня	1120,41±0,10
^{214}Bi	19,8 *мин*	1120,42±0,46
^{182}Ta	115 дней	1121,28±0,12
^{60}Co	5,26 года	1173,226±0,040
^{182}Ta	115 дней	1189,03±0,20
^{182}Ta	115 дней	1221,42±0,10
^{56}Co	77 дней	1238,55±0,11
^{22}Na	2,60 года	1274,53±0,10
^{60}Co	5,26 года	1332,483±0,046
^{24}Na	15,0 *час*	1368,526±0,044
^{110m}Ag	253 дня	1475,5±0,4
^{110m}Ag	253 дня	1504,6±0,5
^{110m}Ag	253 дня	1561,8±0,4
^{58}Co	71,3 дня	1674,9±0,3
^{214}Bi	19,8 *мин*	1764,45±0,22
^{207}Bi	30 лет	1769,71±0,13
^{56}Co	77 дней	1771,64±0,46
^{88}Y	108 дней	1836,08±0,07
^{56}Co	77 дней	2035,13±0,26
^{214}Bi	19,8 *мин*	2204,25±0,4
^{56}Co	77 дней	2598,75±0,35
^{208}Tl	3,1 *мин*	2614,47±0,10
^{24}Na	15,0 *час*	2753,92±0,12
^{56}Co	77 дней	3202,80±0,50
^{56}Co	77 дней	3254,00±0,35
^{56}Co	77 дней	3273,6±0,4
^{56}Co	77 дней	3452,6±0,5

37.3. ЭТАЛОННЫЕ ГРУППЫ α-ЧАСТИЦ

Таблица 37.3

Эталонные группы α-частиц в диапазоне энергий от 2,5 до 7 *Мэв* [1]

Нуклид	Период полураспада	Энергия интенсивных α-групп, *Мэв*	Относительная интенсивность, %
^{146}Sm	$7\cdot10^{7}$ лет	2,46±0,02	100
^{148}Gd	84 года	3,18±0,01	100
^{150}Gd	$2,1\cdot10^{6}$ лет	2,73±0,01	100
^{232}Th	$1,41\cdot10^{10}$ лет	4,011±0,005	77
^{238}U	$4,5\cdot10^{9}$ лет	4,200±0,005	77
^{235}U[5]	$7,1\cdot10^{8}$ лет	4,550±0,003	3
		4,438±0,003	3
		4,394±0,002	62
		4,214±0,003	5,5
^{236}U	$2,39\cdot10^{7}$ лет	4,493±0,003	74
^{230}Th	$8,0\cdot10^{4}$ лет	4,6840±0,0015	76
		4,6175±0,0015	24
^{234}U	$2,4\cdot10^{5}$ лет	4,7736±0,0020	72
^{237}Np[3]	$2,14\cdot10^{6}$ лет	4,787±0,002	51
^{233}U[3]	$1,62\cdot10^{5}$ лет	4,8236±0,0012	84
		4,7829±0,0012	13
^{241}Pu[3]	$5,6\cdot10^{5}$ лет	4,896±0,0015	83
		4,853±0,0015	12
^{242}Pu[3]	$3,73\cdot10^{5}$ лет	4,900±0,002	74
		4,856±0,002	26
^{231}Pa[3]	$3,25\cdot10^{4}$ лет	5,057±0,001	11
		5,013±0,001	25
		4,950±0,001	23
^{239}Pu[3]	$2,44\cdot10^{4}$ лет	5,1556±0,0008	73
		5,1433±0,0008	15
		5,1055±0,0008	11
^{240}Pu[3]	$6,58\cdot10^{3}$ лет	5,1677±0,0007	76
		5,1233±0,0007	24
^{243}Am[3]	$7,95\cdot10^{3}$ лет	5,275±0,001	88
		5,233±0,001	11
^{241}Am[3]	458 лет	5,484±0,001	86
		5,442±0,001	13
^{238}[Pu] [3]	86,4 года	5,499±0,001	72
		5,455±0,001	28
^{243}Cm[4]	32 года	5,785±0,001	73
		5,742±0,001	11
^{244}Cm[4]	17,6 года	5,805±0,001	77
		5,763±0,001	23
^{250}Cf[4]	13,2 года	6,0308±0,0006	85
		5,9891±0,0006	15
^{242}Cm[4]	162,5 дня	6,1129±0,0003	74
		6,0695±0,0005	26
^{252}Cf[4]	2,646 года	6,1183±0,0005	84
		6,0757±0,0005	16
^{249}Cf[4]	360 лет	6,1940±0,0007	2
		5,813±0,001	84
		5,760±0,001	4
^{253}Es[4]	20,47 дня	6,631±0,002	91
^{255}Fm[4]	20,1 часа	7,016±0,002	93

37.4. КВАНТОВЫЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ ЯДЕР

В табл. 37.4 приведены экспериментально определенные значения спинов I, магнитных моментов μ и электрических квадрупольных моментов Q основных и некоторых долгоживущих метастабильных (помечены символом m) состояний [6] 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 I, μ и Q даны в единицах $h/2\pi$ (где h — постоянная Планка), в ядерных магнетонах и барнах соответственно. Значения спинов в круглых скобках получены косвенно.

Таблица 37.4

Спины, магнитные моменты и электрические квадрупольные моменты ядер

Элемент	A	I, $h/2\pi$	μ	Q, *барн*
$_0n$	1	1/2	−1,9131	—
$_1$H	1	1/2	+2,79278	—
	2	1	+0,85742	+0,0028
	3	1/2	+2,9789	—
$_2$He	3	1/2	−2,1276	—
$_3$Li	6	1	+0,82202	−0,0008
	7	3/2	+3,2564	−0,04
	8	(2)	+1,6532	—
$_4$Be	9	3/2	−1,1776	+0,05
$_5$B	10	3	+1,8007	+0,08
	11	3/2	+2,6885	+0,04
	12	(1)	+1,002	—
$_6$C	11	3/2	±1,03	±0,031
	13	1/2	+0,7024	—
$_7$N	12	(1)	±0,46	—
	13	1/2	±0,3221	—
	14	1	+0,4036	+0,01
	15	1/2	−0,2831	—
$_8$O	15	1/2	±0,7189	—
	17	5/2	−1,8937	−0,026
$_9$F	17	(5/2)	±4,722	—
	19	1/2	+2,6288	—
	20	(2)	+2,094	—
$_{10}$Ne	19	1/2	−1,887	—
	21	3/2	−0,6618	+0,09
	23	(5/2)	−1,08	—
$_{11}$Na	21	3/2	+2,386	—
	22	3	+1,746	—
	23	3/2	+2,2175	+0,14
	24	4	+1,690	—
$_{12}$Mg	25	5/2	−0,8551	+0,22
$_{13}$Al	27	5/2	±3,6414	+0,15
$_{14}$Si	29	1/2	−0,5553	—

Продолжение табл. 37.4

Элемент	A	I, $h/2\pi$	μ	Q, барн
$_{15}P$	30	1	—	—
	31	1/2	+1,1317	—
	32	1	—0,2523	—
$_{16}S$	33	3/2	+0,6433	—0,055
	35	3/2	±1,00	+0,04
$_{17}Cl$	35	3/2	+0,82183	— 0,079
	36	2	+1,285	— 0,017
	37	3/2	+0,68411	— 0,062
$_{18}Ar$	35	(3/2)	+0,63	—
	37	3/2	+0,95	—
	39	7/2	—1,3	—
$_{19}K$	37	3/2	+0,204	—
	38	3	+1,374	—
	39	3/2	+0,3914	+0,055
	40	4	—1,298	—0,07
	41	3/2	+0,2149	+0,067
	42	2	—1,141	—
	43	3/2	±0,163	—
	45	3/2	±0,173	—
$_{20}Ca$	41	7/2	—1,595	—
	43	7/2	—1,317	—
$_{21}Sc$	43	7/2	+4,62	—0,26
	44	2	+2,56	+0,10
	44*m*	6	+3,88	—0,19
	45	7/2	+4,7564	—0,22
	46	4	+3,03	+0,12
	47	7/2	+5,34	—0,22
	48	6	—	—
$_{22}Ti$	45	7/2	±0,095	~ ±0,02
	47	5/2	—0,7883	+0,29
	49	7/2	—1,1039	+0,24
$_{23}V$	47	3/2	—	—
	48	4	—	—
	49	7/2	±4,5	—
	50	6	+3,3470	±0,06
	51	7/2	+5,149	—0,05
$_{24}Cr$	49	5/2	±0,48	—
	51	7/2	±0,94	—
	53	3/2	—0,4744	±0,03
$_{25}Mn$	51	5/2	±3,57	—
	52	6	±3,05	—
	52 *m*	2	±0,0076	—
	53	7/2	±5,01	—
	54	3	±3,28	—
	55	5/2	+3,444	+0,4
	56	3	+3,218	—

Продолжение табл. 37.4

Элемент	A	I, $h/2\pi$	μ	Q, барн
$_{26}Fe$	57	1/2	+0,0902	—
	57 *m*	(3/2)	—0,1547	+0,2
	59	3/2	—	—
$_{27}Co$	56	4	±3,83	—
	57	7/2	±4,62	—
	58	2	+4,03	—
	59	7/2	+4,62	+0,4
	60	5	+3,78	—
	60 *m*	2	—	—
$_{28}Ni$	61	3/2	—0,7487	+0,16
	61*m*	(5/2)	+0,42	—
$_{29}Cu$	60	2	+1,22	—
	61	3/2	+2,13	—
	62	1	—0,38	—
	63	3/2	+2,223	—0,180
	64	1	—0,216	—
	65	3/2	+2,382	—0,195
	66	1	±0,283	—
$_{30}Zn$	63	3/2	—0,282	+0,31
	65	5/2	+0,769	—0,026
	67	5/2	+0,8754	+0,17
$_{31}Ga$	66	0	—	—
	67	3/2	+1,850	+0,22
	68	1	±0,0117	±0,031
	69	3/2	+2,016	+0,19
	70	1	—	—
	71	3/2	+2,562	+0,12
	72	3	—0,1322	+0,59
$_{32}Ge$	71	1/2	+0,546	—
	73	9/2	—0,8792	—0,28
	75	1/2	±0,51	—
$_{33}As$	70	4	—	—
	72	2	—	—
	75	3/2	+1,439	+0,29
	76	2	—0,905	—
$_{34}Se$	75	5/2	—	+1,0
	77	1/2	+0,534	—
	79	7/2	—1,02	+0,8
$_{35}Br$	76	1	±0,548	±0,25
	77	3/2	—	—
	79	3/2	+2,106	+0,31
	80	1	±0,514	±0,18
	80 *m*	5	+1,317	+0,71
	81	3/2	+2,270	+0,26
	82	5	±1,626	±0,70

Продолжение табл. 37.4

Элемент	A	I, $h/2\pi$	μ	Q, барн
$_{36}$Kr	83	9/2	—0,970	+0,26
	83*m*	(7/2)	—	+0,44
	85	9/2	±1,005	+0,43
$_{37}$Rb	81	3/2	+2,05	—
	81*m*	9/2	—	—
	82*m*	5	+1,643	—
	83	5/2	+1,4	—
	84	2	—1,32	—
	85	5/2	+1,3524	+0,26
	86	2	—1,691	—
	87	3/2	+2,7500	+0,12
	88	2	±0,51	—
$_{38}$Sr	87	9/2	—1,093	+0,3
$_{39}$Y	89	1/2	—0,1373	—
	90	2	—1,63	—0,15
	91	1/2	±0,164	—
$_{40}$Zr	91	5/2	—1,303	—
$_{41}$Nb	93	9/2	+6,167	—0,22
$_{42}$Mo	95	5/2	—0,9133	±0,12
	97	5/2	—0,9325	±1,1
$_{43}$Tc	99	9/2	+5,68	+0,3
$_{44}$Ru	99	5/2	—0,63	—
	99*m*	3/2	—0,29	~0,1
	101	5/2	—0,69	—
$_{45}$Rh	103	1/2	—0,0883	—
$_{46}$Pd	105	5/2	—0,642	+0,8
$_{47}$Ag	102	5	—	—
	102 *m*	2	+4	—
	103	7/2	+4,4	—
	104	5	+4,0	—
	104 *m*	2	+3,7	—
	105	1/2	±0,101	—
	106	1	+2,9	—
	106 *m*	6	—	—
	107	1/2	—0,1135	—
	108	1	+2,80	—
	109	1/2	—0,1305	—
	109 *m*	7/2	±4,3	—
	110	1	+2,85	—
	110 *m*	6	+3,604	—
	111	1/2	—0,145	—
	112	2	±0,054	—
	113	1/2	±0,159	—

Продолженне табл. 37.4

Элемент	A	I, $h/2\pi$	μ	Q, барн
$_{48}$Cd	105	5/2	—0,74	+0,5
	107	5/2	—0,6144	+0,8
	109	5/2	—0,8270	+0,8
	111	1/2	—0,5943	—
	111 *m*	11/2	—1,11	—1,0
	113	1/2	—0,6217	—
	113 *m*	11/2	—1,087	—0,8
	115	1/2	—0,6477	—
	115 *m*	11/2	—1,040	—0,6
$_{49}$In	109	9/2	+5,53	+0,86
	110	2	+4,36	+0,36
	110 *m*	7	±10,4	±0,21
	111	9/2	+5,53	+0,85
	112	1	+2,81	+0,089
	112 *m*	4	—	—
	113	9/2	+5,523	+0,82
	114 *m*	5	+4,7	—
	115	9/2	+5,534	+0,83
	115 *m*	1/2	—0,244	—
	116 *m*	5	+4,3	—
	117	9/2	—	—
	117 *m*	1/2	—0,2515	—
$_{50}$Sn	113	1/2	±0,88	—
	115	1/2	—0,918	—
	117	1/2	—1,000	—
	119	1/2	—1,046	—
	119 *m*	(3/2)	+0,68	—0,08
	121	3/2	±0,70	±0,08
$_{51}$Sb	115	5/2	+3,46	—0,27
	116	3	—	—
	117	5/2	+2,67	—0,4
	118 *m*	1	±2,5	—
	119	5/2	+3,45	—0,30
	120	1	±2,3	—
	121	5/2	+3,359	—0,29
	121 *m*	(7/2)	+2,51	—0,4
	122	2	—1,90	+0,69
	123	7/2	+2,547	—0,37
	124	3	—	—
	125	(7/2)	±2,6	—
$_{52}$Te	117	1/2	—	—
	119	1/2	±0,25	—
	119 *m*	11/2	—	—
	123	1/2	—0,7359	—
	125	1/2	—0,8871	—
	125 *m*	3/2	+0,60	—0,2
$_{53}$I	123	5/2	—	—
	124	2	—	—
	125	5/2	+3,0	—0,89
	126	2	—	—
	127	5/2	+2,808	—0,79
	127 *m*	(7/2)	—	—0,71
	128	1	—	—
	129	7/2	+2,617	—0,55
	129 *m*	(5/2)	+2,8	—0,68

Продолжение табл. 37.4

Элемент	A	I, $h/2\pi$	μ	Q, барн
$_{53}$I	130	5	—	—
	131	7/2	+2,74	—0,40
	132	4	±3,08	±0,08
	133	7/2	+2,84	—0,26
	135	7/2	—	—
$_{54}$Xe	129	1/2	—0,7768	—
	129 *m*	(3/2)	—	±0,41
	131	3/2	+0,6908	—0,12
$_{55}$Cs	125	1/2	+1,41	—
	127	1/2	+1,46	—
	129	1/2	+1,479	—
	130	1	±1,4	—
	131	5/2	+3,54	—0,57
	132	2	+2,22	+0,46
	133	7/2	+2,578	—0,003
	134	4	+2,990	+0,36
	134 *m*	8	+1,096	—
	135	7/2	+2,729	+0,044
	136	5	+3,70	—
	137	7/2	+2,838	+0,045
	138	3	±0,5	—
$_{56}$Ba	135	3/2	+0,8365	+0,18
	137	3/2	+0,9357	+0,28
$_{57}$La	138	5	+3,707	±0,8
	139	7/2	+2,778	+0,22
	140	3	—	—
$_{58}$Ce	141	7/2	±0,9	—
	143	3/2	—	—
$_{59}$Pr	141	5/2	+4,3	—0,07
	142	2	±0,25	±0,03
	143	7/2	—	—
$_{60}$Nd	141	3/2	—	—
	143	7/2	—1,08	—0,48
	145	7/2	—0,66	—0,25
	147	5/2	±0,59	—
	149	5/2	—	—
$_{61}$Pm	147	7/2	+2,7	+0,7
	148	1	+2,0	+0,2
	149	7/2	—	—
	151	5/2	±1,6	±1,9
$_{62}$Sm	147	7/2	—0,813	—0,20
	149	7/2	—0,670	+0,058
	153	3/2	—0,022	+1,0
	155	3/2	—	±0,9
$_{63}$Eu	151	5/2	+3,464	+1,1
	152	3	±1,924	±3,0

Продолжение табл. 37.4

Элемент	A	I, $h/2\pi$	μ	Q, барн
$_{63}$Eu	152 *m*	0	—	—
	153	5/2	+1,530	+2,8
	154	3	±2,000	—
$_{64}$Gd	153	3/2	—	—
	155	3/2	—0,254	+1,3
	157	3/2	—0,339	+1,7
	159	3/2	—	—
$_{65}$Tb	157	(3/2)	±2,0	—
	158	3	±1,74	+2,7
	159	3/2	±1,99	+1,3
	160	3	±1,68	+3,0
	161	3/2	—	—
$_{66}$Dy	159	3/2	—	—
	161	5/2	—0,46	+2,3
	163	5/2	+0,64	+2,5
	165	7/2	±0,50	—
$_{67}$Ho	161	7/2	—	—
	165	7/2	+4,12	+3,0
	166	0	—	—
$_{68}$Er	163	5/2	+1,1	+3,9
	165	5/2	±0,65	±2,2
	167	7/2	—0,564	+2,8
	169	1/2	+0,513	—
	171	5/2	±0,70	±2,3
$_{69}$Tm	163	1/2	±0,08	—
	165	1/2	—	—
	166	2	±0,047	±4,5
	167	1/2	—	—
	169	1/2	—0,232	—
	170	1	±0,246	±0,59
	171	1/2	±0,229	—
$_{70}$Yb	171	1/2	+0,4919	—
	173	5/2	—0,6776	+3,0
$_{71}$Lu	169	7/2	—	—
	170	0	—	—
	171	7/2	—	—
	175	7/2	+2,23	+5,6
	176	7	+3,18	+8,0
	176 *m*	1	+0,318	—2,3
	177	7/2	+2,24	+5,4
$_{72}$Hf	177	7/2	+0,61	+3
	179	9/2	—0,47	+3
$_{73}$Ta	181	7/2	+2,36	+4,2
	181 *m*	(9/2)	+5,1	+3
	183	7/2	—	—

Продолжение табл. 37.4

Элемент	A	I, $h/2\pi$	μ	Q, барн
$_{74}W$	183	1/2	+0,117	—
	185	3/2	—	—
	187	3/2	—	—
$_{75}Re$	185	5/2	+3,172	+2,7
	186	1	±1,73	~±0,4
	187	5/2	+3,204	+2,6
	188	1	±1,78	~±0,4
$_{76}Os$	187	1/2	+0,0643	—
	189	3/2	+0,6566	+0,8
$_{77}Ir$	191	3/2	+0,145	+1,3
	192	4	—	—
	193	3/2	+0,158	+1,2
	194	1	—	—
$_{78}Pt$	195	1/2	+0,6060	—
	197	1/2	—	—
$_{79}Au$	190	1	±0,066	—
	191	3/2	±0,137	—
	192	1	±0,00785	—
	193	3/2	±0,139	—
	194	1	±0,074	—
	195	3/2	±0,147	—
	196	2	±0,6	—
	196 *m*	12	—	—
	197	3/2	+0,14486	+0,58
	198	2	+0,590	—
	199	3/2	+0,270	—
$_{80}Hg$	193	3/2	—0,62	—2
	193 *m*	13/2	—1,063	—1,2
	195	1/2	+0,538	—
	195 *m*	13/2	—1,049	+1,3
	197	1/2	+0,524	—
	197 *m*	13/2	—1,032	+1,5
	199	1/2	+0,5027	—
	201	3/2	—0,5567	+0,45
	203	5/2	+0,84	—
$_{81}Tl$	195	1/2	—	—
	197	1/2	+1,55	—
	198	2	—	—
	198 *m*	7	—	—
	199	1/2	+1,59	—
	200	2	—	—
	201	1/2	+1,60	—
	202	2	—	—
	203	1/2	+1,6115	—
	204	2	±0,089	—
	205	1/2	+1,6274	—
	206	0	—	—

Продолженне табл. 37.4

Элемент	A	I, $h/2\pi$	μ	Q, барн
$_{82}Pb$	207	1/2	+0,5895	—
$_{83}Bi$	199	9/2	—	—
	200	7	—	—
	201	9/2	—	—
	202	5	—	—
	203	9/2	+4,59	—0,64
	204	6	+4,25	—0,41
	205	9/2	+5,5	—
	206	6	+4,56	—0,19
	209	9/2	+4,080	—0,35
	210	1	±0,0442	±0,13
$_{84}Po$	201	3/2	—	—
	203	5/2	—	—
	205	5/2	~+0,26	±0,17
	207	5/2	~+0,27	±0,28
	209	1/2	+0,76	—
$_{85}At$	211	9/2	—	—
$_{89}Ac$	227	3/2	+1,1	+1,7
$_{90}Th$	229	5/2	+0,38	~ ±4,6
$_{91}Pa$	231	3/2	±1,98	—
	233	3/2	+3,4	—3,0
$_{92}U$	233	5/2	+0,54	+3,5
	235	7/2	—0,35	+4,1
$_{93}Np$	237	5/2	+3,3	—
	238	2	—	—
	239	5/2	—	—
$_{94}Pu$	239	1/2	+0,200	—
	241	5/2	—0,73	+5,6
$_{95}Am$	241	5/2	+1,59	+4,9
	242	1	±0,382	±2,8
	243	5/2	+1,4	+4,9
$_{97}Bk$	249	7/2		—
$_{99}Es$	253	7/2	—	—

37.5. РАДИОАКТИВНЫЕ РЯДЫ

На рис. 37.1—37.4 представлены соответственно радиоактивные ряды тория ($4n$), нептуния ($4n + 1$), урана ($4n + 2$) и актиноурана ($4n + 3$). Указаны химический символ элемента, массовое число ядра и его период полураспада. В скобках приведены старые названия естественных радиоактивных нуклидов. Символы у стрелок указывают тип распада (α; β; *и. п.* — изомерный переход). Если изотоп распадается двумя путями, то у стрелок указано (в %) относительное ветвление типов распада. Пунктирные стрелки соответствуют предполагаемым или очень слабоинтенсивным типам распада.

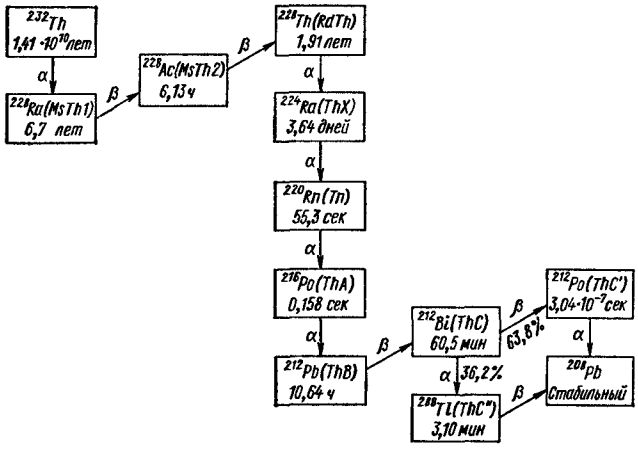


Рис. 37.1. Ториевая серия ($4n$) [8].

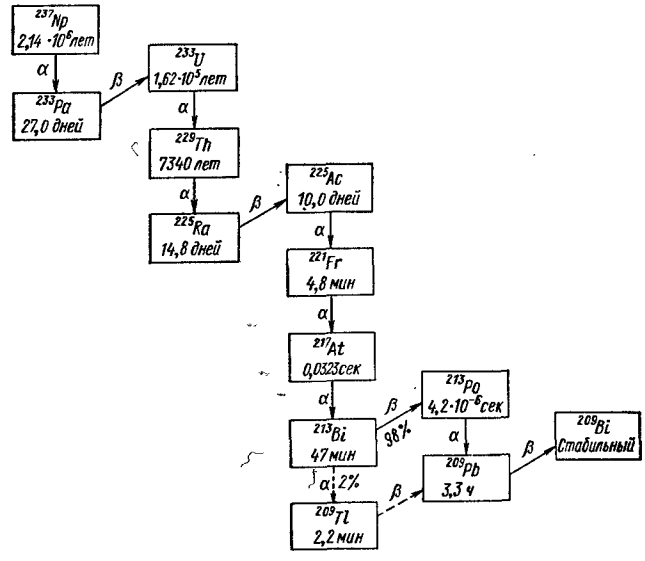


Рис. 37.2. Нептунневая серия ($4n + 1$) [8].

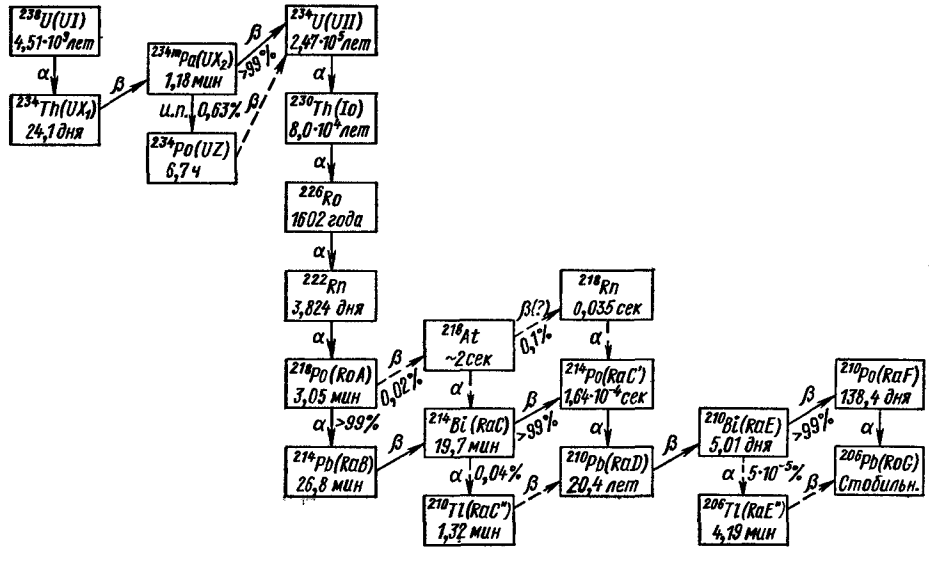


Рис. 37.3. Уран-радиевая серия ($4n + 2$) [8].

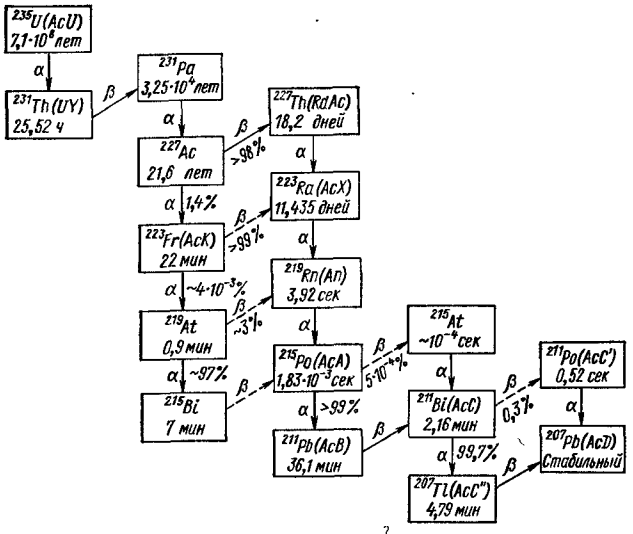


Рис. 37.4. Уран-актниевая серия $(4n + 3)$ [8].

Таблица 37.5

Старые названия естественных радиоактивных нуклидов [7]

Обозначение	Название	Нуклид	Радиоактивный ряд
Ac	Актиний	^{227}Ac	Ac
AcA	Актиний A	^{215}Po	Ac
AcB	Актиний B	^{211}Pb	Ac
AcC	Актиний C	^{211}Bi	Ac
AcC′	Актиний C′	^{211}Po	Ac
AcC″	Актиний C″	^{207}Tl	Ac
AcD	Актиний D	^{207}Pb	Ac
AcK	Актиний K	^{223}Fr	Ac
AcU	Актиноуран	^{235}U	Ac
AcX	Актиний X	^{223}Ra	Ac
AcEm	Актинон (An)	^{219}Rn	Ac
Pa	Протактиний	^{231}Pa	Ac
RdAc	Радиоактиний	^{227}Th	Ac
UY	Уран Y	^{231}Th	Ac
Io	Ионий	^{230}Th	U
Ra	Радий	^{226}Ra	U
RaA	Радий A	^{218}Po	U
RaB	Радий B	^{214}Pb	U
RaC	Радий C	^{214}Bi	U
RaC′	Радий C′	^{214}Po	U
RaC″	Радий C″	^{210}Tl	U
RaD	Радий D	^{210}Pb	U
RaE	Радий E	^{210}Bi	U
RaE″	Радий E″	^{206}Tl	U
RaF	Радий F	^{210}Po	U
RaEm	Радон (Rn)	^{222}Rn	U
RaG	Радий G	^{206}Pb	U
UI	Уран I	^{238}U	U
UII	Уран II	^{234}U	U
UX_1	Уран X_1	^{234}Th	U
UX_2	Уран X_2	^{234m}Pa	U
UZ	Уран Z	^{234}Pa	U
$MsTh_1$	Мезоторий-1	^{228}Ra	Th
$MsTh_2$	Мезоторий-2	^{228}Ac	Th
RdTh	Радиоторий	^{228}Th	Th
Th	Торий	^{232}Th	Th
ThA	Торий A	^{216}Po	Th
ThB	Торий B	^{212}Pb	Th
ThC	Торий C	^{212}Bi	Th
ThC′	Торий C′	^{212}Po	Th
ThC″	Торий C″	^{208}Tl	Th
ThD	Торий D	^{208}Pb	Th
ThX	Торий X	^{224}Ra	Th
ThEm	Торон (Tn)	^{220}Rn	Th

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Lederer C. M., Hollander J. M., Perlman I.** Table of Isotopes. Sixth ed. New York — London — Sydney, John Wiley and Sons, Inc., 1967.
2. **Seelman-Eggebert W., Pfennig G., Münzel H.** Nuclidkarte. 3 Auflage. München, Gersbach und Sohn Verlag, 1968.
3. **Баранов С. А., Кулаков В. М., Шатинский В. М.** «Ядерная физика», 1969, т. 7, вып. 4, с. 727.
4. **Баранов С. А., Шатинский В. М., Кулаков В. М.** «Ядерная физика», 1971, т. 14, вып. 5, с. 1101.
5. **Баранов С. А., Зеленков А. Г., Кулаков В. М.** «Изв. АН СССР. Сер. физ.», 1960, т. 24, № 9, с. 1035.
6. "Nuclear Data Tables", sec. A, 1969, v. 5, N 5—6.
7. **Джелепов Б. С., Пекер Л. К., Сергеев В. О.** Схемы распада радиоактивных ядер. М.—Л., Изд-во АН СССР, 1963, с. 1039.
8. **Kirby H. W.** The Analytical Chemistry of Actinium Miamisburg Ohio, Mound Lab., NAT-33-1-GEN-53.

МЁССБАУЭРОВСКИЕ ЯДРА

38.1. ВВЕДЕНИЕ

Эффектом Мёссбауэра называется упругое (без потери энергии на отдачу) излучение или поглощение γ-квантов ядрами атомов, не сопровождающееся изменением внутренней энергии тела.

Чрезвычайно высокое энергетическое разрешение, наблюдаемое в опытах по эффекту Мёссбауэра $\Gamma/E_0 = 10^{-10}$—10^{-15} (Γ — естественная ширина ядерного уровня, E_0 — энергия ядерного γ-перехода), позволяет не только измерять очень малые изменения энергии ($\sim 10^{-10}$ *эв*), но и наблюдать сверхтонкую структуру ядерных уровней, обусловленную магнитным дипольным и электрическим квадрупольным электронно-ядерными взаимодействиями.

Спектр прошедшего через поглотитель излучения, получаемый обычно в опытах по эффекту Мёссбауэра при относительном (со скоростью v) движении источника и поглотителя, обусловлен изменением энергии γ-кванта $\Delta E = E_0 v/c$ (c — скорость света) за счет эффекта Доплера. Этот спектр $\varepsilon(x)$ определяется выражением [1]:

$$\varepsilon(x) = f_S \int_{-\infty}^{+\infty} \{1 - \exp[-f_A n\sigma(y)]\} F(y)\, dy,$$

где $\varepsilon(x) = \dfrac{1}{N_v}\left(N_{v_\infty} - N_v\right)$; N_v — интенсивность γ-излучения при относительной скорости v; N_{v_∞} — интенсивность вне резонанса; $x = 2(E_0/\Gamma)\cdot(v/c)$; $y = 2(E_v - E_0)/\Gamma$; E_v — энергия γ-кванта при относительной скорости v; $\Gamma = \hbar/\tau$; τ — среднее время жизни возбужденного состояния ядра; $\sigma = \sigma_0/(1+y^2)$ — сечение поглощения γ-кванта с энергией E_v, где $\sigma_0 = \dfrac{2I_1+1}{2I_0+1}\dfrac{2\pi\lambda^2}{1+\alpha}$;

I_0, I_1 — спины основного и возбужденного состояний ядра; $\lambda = \hbar c/E$ — приведенная длина волны γ-излучения; α — коэффициент внутренней конверсии; f_S, f_A — значения вероятностей излучения и поглощения γ-кванта без отдачи; n, *см*$^{-2}$ — число ядер мёссбауэровского нуклида на единицу площади; $F(y)$ — форма линии излучения.

Максимум величины $\varepsilon(x)$ и площадь спектра S для лоренцевской формы линии при $v = 0$ даются выражениями:

$$\varepsilon(0) = f_S[1 - \exp(-f_A n\sigma_0/2)]\, I_0(f_A n\sigma_0/2);$$

$$S = \int_{-\infty}^{+\infty} \varepsilon(x)\, dx = \pi n \sigma_0 f_S f_A [I_0(if_A n\sigma_0/2) + I_1(if_A n\sigma_0/2)],$$

где I_0 и I_1 — функции Бесселя нулевого и первого порядков мнимого аргумента.

Основными параметрами мёссбауэровских спектров являются:

1) *изомерный сдвиг* δ мёссбауэровской линии, обусловленный разностью радиусов ядра в основном и возбужденном состояниях R_0 и R_1, и разностью плотностей электронов на ядрах поглотителя и источника $|\psi_A(0)|^2$ и $|\psi_S(0)|^2$, соответственно:

$$\delta = \frac{4\pi}{5} Ze^2 (R_1^2 - R_0^2)\{|\psi_A(0)|^2 - |\psi_S(0)|^2\},$$

где e — элементарный заряд, Z — порядковый номер ядра [1]:

2) *квадрупольное расщепление* Δ ядерных уровней мёссбауэровской линии, вызванное взаимодействием квадрупольного момента Q ядра с неоднородным электрическим полем, существующим в месте расположения ядра (например, в кристалле с симметрией ниже кубической). $\Delta = E_i - E_k$, где энергии E_i и E_k — собственные значения гамильтониана квадрупольного взаимодействия, принадлежащие различным значениям спина ядра и магнитного квантового числа m_I [2, 3]. В частном случае аксиально-симметричного градиента поля для значения $I = 3/2$:

$$\Delta = E\left(\frac{3}{2}, \frac{3}{2}\right) - E\left(\frac{3}{2}, \frac{1}{2}\right) = \frac{1}{2} e^2 q Q.$$

Здесь q — градиент электрического поля;

3) *магнитное расщепление ядерных уровней*, вызванное взаимодействием дипольного магнитного момента ядра $\bar{\mu}$ со сверхтонким магнитным полем на ядре $\bar{H}_я$, которое создается электронами собственного атома и поляризованными электронами проводимости.

Магнитное расщепление ядерных уровней определяется выражением:

$$\Delta E_m = \bar{\mu} H_я / I = g \mu_я H_я,$$

где $\mu_я$ — ядерный магнетон; g — гиромагнитное отношение (ядерный g-фактор). Расстояние между соседними уровнями равно $g\mu_я H_я$, а расстояние между наивысшим и наинизшим уровнями равно $2g\mu_я I H_я$ [2, 3].

38.2. ХАРАКТЕРИСТИКИ МЁССБАУЭРОВСКИХ ЯДЕР

В табл. 38.1 приведены сведения о материнских изотопах мёссбауэровского ядра (массовое число, тип распада и период полураспада) и следующие характеристики мёссбауэровских ядер:

E — энергия мёссбауэровского γ-перехода (в некоторых случаях приведены значения энергий двух различных γ-переходов, на которых наблюдается эффект Мёссбауэра);

Содержание мёссбауэровского изотопа в естественной смеси изотопов;

$T_{1/2}$ — период полураспада резонансного уровня (время жизни);

Γ — естественная ширина уровня;

$\Delta v\,(\Gamma)$ — доплеровская ширина уровня;

$E_{отд}$ — энергия отдачи свободного ядра;

α — полный коэффициент конверсии для резонансного γ-перехода;

σ_0 — полное сечение резонансного поглощения;

I_0 и I_1 — значения спинов основного и возбужденного уровней ядра;

μ_0 и μ_1 — значения магнитных моментов основного и возбужденного уровней ядра в ядерных магнетонах;

Q_0 и Q_1 — значения квадрупольных моментов основного и возбужденного уровней ядра.

Ядро	Содержание, %	E, кэв	$T_{1/2}$, сек	Γ, кэв	Δv (Γ), мм/сек	$E_{отд.}$ кэв	α	σ_0, см²
$^{40}_{19}K$	0,0118	29,4	$3,9\cdot10^{-9}$	$1,170\cdot10^{-10}$	1,193	$1,160\cdot10^{-5}$	0,35	$1,631\cdot10^{-18}$
$^{57}_{26}Fe$	2,19	14,4125	$9,77\cdot10^{-8}$	$4,6697\cdot10^{-12}$	0,09713	$1,9567\cdot10^{-6}$	9,00	$2,386\cdot10^{-18}$
		136,4	$8,7\cdot10^{-9}$	$5,244\cdot10^{-11}$	0,1152	$1,753\cdot10^{-4}$	0,142	$4,214\cdot10^{-20}$
$^{61}_{28}Ni$	1,19	67,4	$5,3\cdot10^{-9}$	$8,608\cdot10^{-11}$	0,3829	$3,999\cdot10^{-5}$	0,12	$7,212\cdot10^{-19}$
$^{67}_{30}Zn$	4,11	93,0	$9,4\cdot10^{-6}$	$4,854\cdot10^{-14}$	$1,564\cdot10^{-4}$	$6,931\cdot10^{-5}$	0,6	$1,179\cdot10^{-19}$
$^{73}_{32}Ge$	7,76	67,0	$1,62\cdot10^{-9}$	$2,816\cdot10^{-10}$	1,26	$3,302\cdot10^{-5}$	0,229	$4,434\cdot10^{-19}$
$^{83}_{36}Kr$	11,55	9,3	$1,47\cdot10^{-7}$	$3,104\cdot10^{-12}$	0,1000	$5,595\cdot10^{-7}$	11	$1,886\cdot10^{-18}$
$^{99}_{44}Ru$	12,72	90,0	$2,02\cdot10^{-8}$	$2,259\cdot10^{-11}$	0,07525	$4,393\cdot10^{-5}$	—	$1,007\cdot10^{-19}$
$^{107}_{47}Ag$	51,35	93	44	$1,037\cdot10^{-20}$	$3,342\cdot10^{-11}$	$4,34\cdot10^{-5}$	20	$5,388\cdot10^{-20}$
$^{119}_{50}Sn$	8,58	23,875	$1,84\cdot10^{-8}$	$2,48\cdot10^{-11}$	0,31135	$2,572\cdot10^{-6}$	5,5	$1,321\cdot10^{-18}$
$^{121}_{51}Sb$	57,25	37,15	$3,5\cdot10^{-9}$	$1,304\cdot10^{-10}$	1,052	$6,124\cdot10^{-6}$	10,6	$2,037\cdot10^{-19}$
$^{125}_{52}Te$	6,99	35,48	$1,48\cdot10^{-9}$	$3,083\cdot10^{-10}$	2,6045	$5,407\cdot10^{-6}$	13,3	$2,718\cdot10^{-19}$
$^{127}_{53}I$	100	57,6	$1,86\cdot10^{-9}$	$2,453\cdot10^{-10}$	1,2765	$1,403\cdot10^{-5}$	3,75	$2,07\cdot10^{-19}$
$^{129}_{53}I$	Нестабилен	27,75	$1,61\cdot10^{-8}$	$2,834\cdot10^{-11}$	0,30615	$3,205\cdot10^{-6}$	5,0	$3,971\cdot10^{-19}$
$^{129}_{54}Xe$	26,44	39,58	$9,85\cdot10^{-10}$	$4,632\cdot10^{-10}$	3,508	$6,521\cdot10^{-6}$	11	$2,603\cdot10^{-19}$
$^{131}_{54}Xe$	12,18	80,16	$4,5\cdot10^{-10}$	$1,014\cdot10^{-9}$	3,791	$2,634\cdot10^{-5}$	2,1	$6,141\cdot10^{-20}$
$^{133}_{55}Cs$	100	80,99	$6,28\cdot10^{-9}$	$7,265\cdot10^{-11}$	0,2689	$2,648\cdot10^{-5}$	1,63	$1,064\cdot10^{-19}$
$^{141}_{59}Pr$	100	145,43	$1,92\cdot10^{-9}$	$2,376\cdot10^{-10}$	0,4898	$8,054\cdot10^{-5}$	0,45	$1,064\cdot10^{-19}$
$^{149}_{62}Sm$	13,83	22	$7,6\cdot10^{-9}$	$6,003\cdot10^{-11}$	0,818	$1,744\cdot10^{-6}$	12	$3,888\cdot10^{-19}$
$^{151}_{63}Eu$	47,82	21,6	$8,8\cdot10^{-9}$	$5,184\cdot10^{-11}$	0,7195	$1,659\cdot10^{-6}$	29	$2,33\cdot10^{-19}$
$^{153}_{63}Eu$	52,18	97,43	$1,6\cdot10^{-10}$	$2,851\cdot10^{-9}$	8,775	$3,331\cdot10^{-5}$	0,41	$1,817\cdot10^{-19}$
		103,18	$3,86\cdot10^{-9}$	$1,182\cdot10^{-10}$	0,3434	$3,736\cdot10^{-5}$	1,55	$5,972\cdot10^{-20}$
$^{155}_{64}Gd$	14,73	60,0	$2,4\cdot10^{-10}$	$1,901\cdot10^{-9}$	9,50	$1,247\cdot10^{-5}$	7,5	$1,199\cdot10^{-19}$

ровских ядер

I_0	I_1	μ_0	μ_1	Q_0, *барн*	Q_1, *барн*	Сведения о материнском ядре
4^-	3^-	−1,298	—	−0,093	—	$^{39}_{19}K$, (n, γ)
$\frac{1^-}{2}$	$\frac{3^-}{2}$	+0,09024	0,1547	0	+0,33	^{57}Mn, (β^-); 1,7 *мин*; ^{57}Co, (э. з.);270 дней
$\frac{1^-}{2}$	$\frac{5^-}{2}$	—	—	—	—	
$\frac{3^-}{2}$	$\frac{5^-}{2}$	0,746	+0,35	—	—	^{61}Co, (β^-); 1,7 *ч*; ^{61}Cu (β^+); 3,3 *ч*
$\frac{5^-}{2}$	$\frac{3^-}{2}$	+0,876	—	+0,17	—	^{67}Cu, 60 *ч*; ^{67}Ga, 78 *ч*
$\frac{9^+}{2}$	$\frac{9}{2}^+; \frac{11^+}{2}$	−0,8792	—	−0,26	—	^{73}Ga, 4,8 *ч*; ^{73}As, 76 дней
$\frac{9^+}{2}$	$\frac{7^+}{2}$	−0,970	—	+0,26	+0,44	^{83}Br, 2,4 *ч*; ^{83}Rb, 83 дня
$\frac{5^+}{2}$	$\frac{3^+}{2}$	−0,625	−0,285	—	0,15	^{99}Rh, 16,1 дня; ^{99}Tc, $2{,}1 \cdot 10^5$ лет
$\frac{1^-}{2}$	$\frac{7^+}{2}$	−0,1136	—	—	—	^{107}Cd, (э.з., β^+); 6,6 *ч*; ^{107}Pd, (β^-); $7 \cdot 1^6$ лет
$\frac{1^+}{2}$	$\frac{3^+}{2}$	−1,046	+0,7	0	−0,07	^{119m}In, 18 *мин*; ^{119}In, 2,3 *мин*; ^{119}Sb, 38 *ч*; ^{119m}Sn, 245 дней
$\frac{5^+}{2}$	$\frac{7^+}{2}$	+3,359	—	−0,29	—	^{121m}Sn, $>$5 лет; ^{121}Sn, 27 *ч*; ^{121m}Te, 154 дня; ^{121}Te, 17 дней
$\frac{1^+}{2}$	$\frac{3^+}{2}$	−0,8872	+0,65	0	0,19	^{125}Sb, 2,7 года; ^{125}I, 57 дней
$\frac{5^+}{2}$	$\frac{7^+}{2}$	+2,808	1,96	−0,79	−0,71	^{127m}Te, 105 дней; ^{127}Te, 9,3 *ч*; ^{127}Xe, 36 дней
$\frac{7^+}{2}$	$\frac{5^+}{2}$	+2,617	+2,84	−0,55	−0,68	^{129m}Te, 33 дня; ^{129}Te, 70 *мин*
$\frac{1^+}{2}$	$\frac{3^+}{2}$	−0,7768	—	0	−0,41	^{129}I, $1{,}6 \cdot 10^7$ лет; ^{129}Cs, 32 *ч*
$\frac{3^+}{2}$	$\frac{1^+}{2}$	+0,6908	—	−0,12	—	^{131}I, 8,1 дня; ^{131}Cs, 10 дней
$\frac{7^+}{2}$	$\frac{5^+}{2}$	+2,579	+3,25	−0,003	—	^{133}Ba, (э.з.); 7,2 года; ^{133}Xe, (β^-), 5,3 дня
$\frac{5^+}{2}$	$\frac{7^+}{2}$	+4,3	—	−0,06	—	^{141}Nd, 25 *ч*; ^{141}Ce, 33 дня
$\frac{7^-}{2}$	$\frac{7^-}{2}; \frac{5^-}{2}$	−0,75	−1,32; −0,94	+0,06	—	^{149}Pm, 53 *ч*; ^{149}Eu, 106 дней
$\frac{5^+}{2}$	$\frac{7^+}{2}$	+3,464	+2,57	+1,155	+1,5	^{151}Gd, 120 дней; ^{151}Sm, 93 года
$\frac{5^+}{2}$	$\frac{5^-}{2}$	+1,530	+3,21	+2,93	—	^{153}Gd, (э.з.); 242 дня; ^{153}Sm,(β^-) 47 *ч*
$\frac{5^+}{2}$	$\frac{3^+}{2}$	—	+2,03	—	—	
$\frac{3^-}{2}$	$\frac{5^-}{2}$	−0,27	—	+1,3	—	^{155}Eu, (β^-), 1,81 года; ^{155}Tb, 5 дней

Ядро	Содержание, %	E, кэв	$T_{1/2}$, сек	Γ, кэв	Δv (Γ), мм/сек	$E_{отд}$, кэв	α	σ_0, см^2
$^{155}_{64}$Cd	14,73	86,5	$6{,}15\cdot10^{-9}$	$7{,}418\cdot10^{-11}$	0,2571	$2{,}592\cdot10^{-5}$	0,49	$2{,}164\cdot10^{-19}$
$^{156}_{64}$Gd	20,47	88,97	$2{,}19\cdot10^{-9}$	$2{,}083\cdot10^{-10}$	0,702	$2{,}725\cdot10^{-5}$	4,08	$3{,}042\cdot10^{-19}$
$^{158}_{64}$Gd	24,87	79,51	$2{,}4\cdot10^{-9}$	$1{,}901\cdot10^{-10}$	0,717	$2{,}148\cdot10^{-5}$	5,94	$2{,}788\cdot10^{-19}$
$^{159}_{65}$Tb	100	58,0	$1{,}3\cdot10^{-10}$	$3{,}509\cdot10^{-9}$	18,14	$1{,}136\cdot10^{-5}$	10,1	$9{,}827\cdot10^{-20}$
$^{160}_{66}$Dy	2,29	86,8	$2{,}00\cdot10^{-9}$	$2{,}281\cdot10^{-10}$	0,788	$2{,}528\cdot10^{-5}$	4,61	$2{,}894\cdot10^{-19}$
$^{161}_{66}$Dy	18,88	25,65	$2{,}87\cdot10^{-8}$	$1{,}59\cdot10^{-11}$	0,1858	$2{,}194\cdot10^{-6}$	2,5	$1{,}062\cdot10^{-18}$
		74,58	$3{,}1\cdot10^{-9}$	$1{,}472\cdot10^{-10}$	0,5915	$1{,}855\cdot10^{-5}$	0,65	$3{,}216\cdot10^{-20}$
$^{166}_{68}$Er	33,41	80,6	$1{,}82\cdot10^{-9}$	$2{,}507\cdot10^{-10}$	0,9325	$2{,}101\cdot10^{-5}$	7,2	$2{,}296\cdot10^{-19}$
$^{169}_{69}$Tm	100	8,41	$3{,}9\cdot10^{-9}$	$1{,}17\cdot10^{-10}$	4,17	$2{,}247\cdot10^{-7}$	325	$2{,}122\cdot10^{-19}$
$^{170}_{70}$Yb	3,03	84,26	$1{,}59\cdot10^{-9}$	$2{,}869\cdot10^{-10}$	1,021	$2{,}242\cdot10^{-5}$	6,70	$2{,}237\cdot10^{-19}$
$^{171}_{70}$Yb	14,31	66,73	$>5\cdot10^{-10}$	$9{,}125\cdot10^{-10}$	4,0995	$1{,}398\cdot10^{-5}$	10	$9{,}989\cdot10^{-20}$
$^{177}_{72}$Hf	18,50	112,96	$5\cdot10^{-10}$	$9{,}125\cdot10^{-10}$	2,4215	$3{,}871\cdot10^{-5}$	2,47	$6{,}906\cdot10^{-20}$
$^{181}_{73}$Ta	99,99	6,25	$6{,}8\cdot10^{-6}$	$6{,}709\cdot10^{-14}$	$3{,}218\cdot10^{-3}$	$1{,}159\cdot10^{-7}$	45	$1{,}702\cdot10^{-18}$
$^{182}_{74}$W	26,41	100,1	$1{,}37\cdot10^{-9}$	$3{,}33\cdot10^{-10}$	0,9975	$2{,}956\cdot10^{-5}$	3,97	$2{,}456\cdot10^{-19}$
$^{183}_{74}$W	14,40	46,48	$2{,}0\cdot10^{-10}$	$2{,}281\cdot10^{-9}$	14,715	$6{,}339\cdot10^{-6}$	9,0	$2{,}265\cdot10^{-19}$
		99,08	$6{,}0\cdot10^{-10}$	$7{,}604\cdot10^{-10}$	2,300	$2{,}88\cdot10^{-5}$	4,3	$6{,}855\cdot10^{-20}$
$^{184}_{74}$W	30,64	111,2	$1{,}26\cdot10^{-9}$	$3{,}621\cdot10^{-10}$	0,976	$3{,}608\cdot10^{-5}$	2,75	$2{,}638\cdot10^{-19}$
$^{186}_{74}$W	28,41	122,5	$1{,}05\cdot10^{-9}$	$4{,}345\cdot10^{-10}$	1,063	$4{,}332\cdot10^{-5}$	1,72	$2{,}997\cdot10^{-19}$
$^{186}_{76}$Os	1,64	137,2	$8{,}4\cdot10^{-10}$	$5{,}431\cdot10^{-10}$	1,187	$5{,}434\cdot10^{-5}$	1,25	$2{,}888\cdot10^{-19}$
$^{187}_{75}$Re	62,93	134,24	$1{,}0\cdot10^{-11}$	$4{,}562\cdot10^{-8}$	101,9	$5{,}174\cdot10^{-5}$	2,35	$5{,}403\cdot10^{-20}$
$^{188}_{76}$Os	13,3	155,03	$7{,}1\cdot10^{-10}$	$6{,}426\cdot10^{-10}$	1,2425	$6{,}864\cdot10^{-5}$	0,84	$2{,}766\cdot10^{-19}$

I_0	I_1	μ_0	μ_1	Q_0, *барн*	Q_1, *барн*	Сведения о материнском ядре
$\frac{3^-}{2}$	$\frac{3^+}{2}$	—0,27	—0,564	—	—	
0^+	2^+	—	—	—	—	^{156}Eu, 15 дней; ^{156}Tb, 5,4 дня
0^+	2^+	—	—	—	—	^{158}Eu, 60 *мин*; ^{158}Tb, 150 лет
$\frac{3^+}{2}$	$\frac{5^+}{2}$	1,7	—	—	—	^{159}Gd, 18 *ч*; ^{159}Dy, 144 дня
0^+	2^+	—	+0,74	—	—1,0	^{160}Tb, (β^-); 72,4 дня; ^{160}Ho, (э.з., β^+); 25 *мин*
$\frac{5^+}{2}$	$\frac{5^-}{2}$	—0,46	+0,55	+1,9	+1,8	^{161}Tb, (β^-), 6,9 дня; ^{161}Ho, (э.з.); 2,48 *ч*
$\frac{5^+}{2}$	$\frac{3^-}{2}$	—	1,6	—	—	
0^+	2^+	—	0,62	—	—1,9	^{166m}Ho, $1{,}2\cdot10^3$ лет; ^{166}Ho, 27 *ч*; ^{166}Tm, 7,7 *ч*
$\frac{1^+}{2}$	$\frac{3^+}{2}$	—0,232	+0,59	—	—1,2	^{169}Er, 9,3 дня; ^{169}Yb, 31 день
0^+	2^+	—	0,668	—	—	^{170}Tm, 127 дней; ^{170}Lu, 2 дня
$\frac{1^-}{2}$	$\frac{3^-}{2}$	+0,4930	—	—	—	^{171}Tm, 1,9 года; ^{171}Lu, 8,2 дня
$\frac{7^-}{2}$	$\frac{9^-}{2}$	+0,61	+1,06	+3,0	—	^{177m}Lu, 155 дней; ^{177}Lu, 6,7 дня; ^{177}Ta, 56,6 *ч*
$\frac{7^+}{2}$	$\frac{9^-}{2}$	+2,36	—	+4,2	—	^{181}Hf, 45 дней; ^{181}W, 140 дней
0^+	2^+	—	+0,46	—	—1,87	^{182}Ta, 115 дней; ^{182}Re (β^+) 13 *ч*; (э.з.), 64 *ч*
$\frac{1^-}{2}$	$\frac{3^-}{2}$	+0,117	—	—	—1,61	
$\frac{1^-}{2}$	$\frac{5^-}{2}$	+0,117	—	—	—	^{188}Ta, 5 дней; ^{188}Re, 70 дней
0^+	2^+	—	0,52	—	—2,0	^{184}Ta, 8,7 *ч*; ^{184m}Re, 165 дней; ^{184}Re, 38 дней
0^+	2^+	—	+0,64	—	—	^{186}Ta, 10 *мин*; ^{186}Re, 90 *ч*
0^+	2^+	—	+0,64	—	1,54	^{186}Re, 90 *ч*; ^{186}Ir (β^+), 15 *ч*; (э.з.), 1,7 *ч*
$\frac{5^+}{2}$	$\frac{7}{2}$	+3,204	—	+2,6	—	^{187}W, 23,8 *ч*
0^+	2^+	—	0,56	—	—	^{188}Re, 16,8 *ч*; ^{188}Ir, 41 *ч*

Ядро	Содержание, %	E, кэв	$T_{1/2}$, сек	Γ, кэв	Δv (Γ), мм/сек	$E_{отд}$, кэв	α	σ_0, см²
$^{191}_{77}Ir$	37,3	129,4	$1{,}28\cdot10^{-10}$	$3{,}564\cdot10^{-9}$	8,2575	$4{,}707\cdot10^{-5}$	3,02	$5{,}452\cdot10^{-20}$
$^{193}_{77}Ir$	62,7	73	$6{,}0\cdot10^{-9}$	$7{,}604\cdot10^{-11}$	0,3122	$1{,}483\cdot10^{-5}$	6	$3{,}279\cdot10^{-20}$
$^{195}_{78}Pt$	33,8	98,8	$1{,}6\cdot10^{-10}$	$2{,}851\cdot10^{-9}$	8,65	$2{,}688\cdot10^{-5}$	8,55	$5{,}248\cdot10^{-20}$
		129	$6{,}2\cdot10^{-10}$	$7{,}359\cdot10^{-10}$	1,71	$4{,}582\cdot10^{-5}$	1,79	$7{,}746\cdot10^{-21}$
$^{197}_{79}Au$	100	77,3	$1{,}8\cdot10^{-9}$	$2{,}535\cdot10^{-10}$	0,983	$1{,}629\cdot10^{-5}$	3,7	$4{,}355\cdot10^{-20}$
$^{237}_{93}Np$	Нестабилен	59,54	$6{,}3\cdot10^{-8}$	$7{,}242\cdot10^{-12}$	$3{,}646\cdot10^{-2}$	$8{,}032\cdot10^{-3}$	1,065	$2{,}917\cdot10^{-19}$
$^{238}_{92}U$ [6]	Нестабилен	44,7	$2{,}3\cdot10^{-10}$	$1{,}9836\cdot10^{-9}$	13,303	$1{,}882\cdot10^{-5}$	660	$9{,}2\cdot10^{-21}$

38.3. ПАРАМЕТРЫ МЁССБАУЭРОВСКИХ СПЕКТРОВ

Вещество	Спектр
$Na_2[Fe(CN)_5NO]\cdot 2H_2O$	1,712 мм/сек
Металлическое железо $H_я$ = 330 кэ	10,657; 6,167; 1,677
$\alpha = Fe_2O_3$ $H_я$ = 517 кэ	16,70; 9,66; 2,63

Рис. 38.1. Схематическое изображение мёссбауэровских спектров поглощения для ядер ^{57}Fe в различных материалах при температуре 300° К [4].

В табл. 38.2 приведены следующие характеристики: формула химического соединения (сплава), которое содержит мёссбауэровские ядра, находящиеся в стабильном состоянии (поглотитель);

формула химического соединения (сплава), содержащего материнские ядра, или химический символ матрицы, в которую введены атомы материнского изотопа (источник). В скобках указан материнский изотоп либо тип ядерной реакции, используемый для создания возбужденного состояния мёссбауэровского ядра;

T — температура поглотителя и источника (в тех случаях, когда температура не указана, более вероятной является комнатная);

Γ — полуширина отдельной линии экспериментально наблюдаемого мёссбауэровского спектра;

ε — эффект поглощения, определяемый отношением интенсивностей γ-излучения, зарегистрированных в резонансе $(N_{v_{рез}})$ и вне резонанса (N_{v_∞}) к N_{v_∞}:

$$\varepsilon = (N_{v_\infty} - N_{v_{рез}}) / N_{v_\infty}.$$

Если ε приводится с учетом фона от постороннего излучения, рядом с цифрой стоит индекс «0»;

δ — сдвиг наблюдаемого спектра, отсчитываемый от значения $v = 0$; считается, что δ положителен в случае, когда источник и поглотитель движутся навстречу друг другу (если знак δ не указан, более вероятно положительное значение);

Δ — квадрупольное расщепление;

$H_я$ — сверхтонкое магнитное поле, действующее на ядра атомов мёссбауэровского изотопа в данном веществе (поглотителе);

f_S и f_a — вероятности излучения и поглощения γ-кванта без отдачи энергии.

I_0	I_1	μ_0	μ_1	Q_0, барн	Q_1, барн	Сведения о материнском ядре
$\frac{3^+}{2}$	$\frac{1^+}{2}$	+0,18	—	+1,3	—	^{191}Os, 15 дней; ^{191}Pt, 3 дни
$\frac{3^+}{2}$	$\frac{1^+}{2}$	+0,17	0,56	1,5	—	^{193}Os, 32 ч; ^{193}Pt, $\leqslant$500 лет
$\frac{1^-}{2}$	$\frac{3^-}{2}$	—0,606	—0,65	—	—	^{195}Au, 192 дня; ^{195}Ir, 2,3 ч; ^{195}Ir, 2,3 ч
$\frac{1^-}{2}$	$\frac{5^-}{2}$	—	—	—	—	
$\frac{3^+}{2}$	$\frac{1^+}{2}$	+0,1449	+0,37	+0,58	—	^{197}Pt, (β^-), 20 ч; ^{197}Hg (э. з.), 65 ч
$\frac{5^+}{2}$	$\frac{5^-}{2}$	5,0	+2,0	—	—	^{237}U, 6,75 дня; ^{241}Am, 458 лет
0^+	2^+	—	+0,25	+10,5	—3,0	^{242}Pu (α), 3,79·10^5 лет

Таблица 38.2

Параметры мёссбауэровских спектров

Поглотитель		Источник		Г, $\frac{мм}{сек}$	ε, %	δ, $\frac{мм}{сек}$	Δ, $\frac{мм}{сек}$	$H_я$, кэ	f_S	f_A
Формула	Температура, °К	Формула	Температура, °К							
KCl	4	KCl (α, p)	4	11	16	—0,14	—	—	—	—
Fe	—	Cu (Co)	—	0,20	36	—0,226	—	330	—	—
	—	Pd	—	—	—	—0,185	—	—	—	—
	298	Pt	298	0,22	10_0	—0,347	—	—	—	—
	300	Нерж. сталь	300	0,39	16_0	+0,090	—	—	—	—
α-Fe_2O_3	—	Cr	—	0,40	—	+0,51	0,40	517	—	—
	300	Нерж. сталь	300	—	—	+0,47	0,40	—	—	—
Нерж. сталь	—	Cr	—	0,48	21	+0,05	—	—	—	—
	—	Cu	—	0,45	45_0	—0,32	—	—	—	—
	300	Au	—	0,48	—	—0,78	—	—	0,67	—
	300	UO_2	—	—	—	0,32	—	—	—	—
	300	Нерж. сталь	300	0,53	47_0	—	—	—	—	—
$KFeS_2$	298	Pd	298	0,28	18_0	—0,01	0,50	—	—	—
$Na_2[Fe(CN)_5NO]\cdot 2H_2O$	—	Cu	—	—	—	—0,56	—	—	—	—
$Na_2[Fe(CN)_5NO]\cdot 2H_2O$		Pt	300	0,26	21	—0,61	1,712	—	—	—
	300	Нерж. сталь	298	0,38	13_0	—0,18	1,712	—	—	—
Ni	80	Ni (кул. возб.)	80	3,3	4	—	—	—	0,09	0,09
	77	Ni (кул. возб.)	77	—	—	—	—	90	—	—

Поглотитель		Источник		Γ, $\frac{мм}{сек}$	ε, %	δ, $\frac{мм}{сек}$	Δ, $\frac{мм}{сек}$	$H_я$, кэ	f_S	f_A
Формула	Температура, °К	Формула	Температура, °К							
ZnO [5]	4,2	MgO (Ga)	4,2	$0{,}6\cdot10^{-3}$	—	—0,021	—	—	—	—
	4,2	ZnO	4,2	—	0,2	0	—	—	—	—
Ge	77	Ge (кул. возб.)	77	4,4	0,64	+0,11	—	—	0,01	—
Ru	88	Ru (Rh)	85	0,37	4_0	—	—	—	0,14	—
Sn	77	Sn	77	0,6	—	—	—	—	0,29	—
	77	SnO_2	77	1,4	—	+2,55	—	—	—	—
	300	Mg_2Sn	300	—	—	0,68	0	—	—	—
SnO	83	Sn	83	2	—	0,09	2	—	—	—
SnO_2	—	Sn	—	1,3	7,6	+2,6	—	—	—	—
	300	SnO_2	300	1,4	31	—	—	—	0,70	—
	—	Mg_2Sn	—	—	—	—1,9	0,50	—	—	—
Mg_2Sn	300	Mg_2Sn	300	1,0	5	—	—	—	—	—
Te	4,2	Te	4,2	5,2	25	—	7,8	—	—	—
TeO_2	300	TeO_2	77	5,2	—	—	—	—	0,12	0.07
$Na_3H_2{}^{127}IO_6$	20	ZnTe	20	4,1	—	+1,6	—	—	—	—
$^{129}I_2$	100	ZnTe	120	0,87	—	+0,82	—	—	—	—
$Na^{129}I$	77	ZnTe	77	—	—	—0,46	—	—	0,15	0,29
$^{129}XeF_2$	—	NaI	4,2	21	2	0	42	—	—	—
	—	NaI	4,2	9	2	0	42	—	—	—
$Na_4^{129}XeO_6$	4,2	NaI	4,2	13	5,4	—0,3	—	—	—	—
$^{131}XeF_4$	—	$Na_2H_3IO_6$	—	6,8	—	—	6,0	—	—	—
CsCl	—	$BaCl_2\cdot2H_2O$	4,2	1,1	$0{,}3_0$	—0,01	—	—	—	—
Sm_2O_3	—	Eu_2O_3	—	4	—	—	—	—	—	—
^{151}Eu	4	Eu_2O_3 (Gd)	4	—	—	—8,1	—	—	—	—
$^{151}Eu_2O_3$	77	Eu_2O_3 (Gd)	77	—	25	—	—	—	0,54	0,54
$^{155}Gd_2O_3$ (E_γ = = 60 кэв)	80	Sm_2O_3 (Eu)	80	4,3	—	—	—	—	—	—
Gd_2O_3 (E_γ = = 86,5 кэв)	80	Sm_2O_3 (Eu)	80	1,1	0,56	—	—	—	0,012	0,012
Tb_4O_7	80	Dy_2O_3	80	80	2	—	—	—	—	—
$^{161}Dy_2O_3$	300	Dy_2O_3	300	12	—	—	—	—	0,10	—
	—	Gd_2O_3 (Tb)	300	13	6	—	—	—	0,23	—
$^{166}Er_2O_3$	20	Ho_2O_3	20	2	21_0	0	—	—	—	—
Tm	—	Er_2O_3	800	30	—	+5	144	7000	—	—
	—	Er_2O_3		2,5	—	—	—	—	—	—
Tm_2O_3	—	Er_2O_3	300	14	4	—	—	—	—	—
$^{170}Yb_2O_3$	20	Tm	20	—	3,5	+5,7	—	—	—	—
$^{171}Yb_2O_3$	4,2	Er_2O_3 (Tm)	4,2	11	10	—	11	—	—	—
Hf_2O_3	—	Lu_2O_3		11	—	—	—	—	0,11	0,04
Ta	—	W	300	0,26	4,5	+0,9	—	—	—	—
TaC	300	W	300	0,06	0,6	—	—	—	—	—
^{182}W	22	Ta	22	2,0	44_0	+1,3	—	—	—	—
$^{182}W_2O_3$	77	Ta	77	—	—	—	—	—	—	—
^{183}W	300	Ta	300	40	4,4	+0,17	—	—	—	—
$^{184}WCl_6$	4,2	W (Re)	4,2	—	—	—0,10	—	—	—	—
^{186}W	4,2	Re	4,2	4,26	—	—	—	—	—	—
^{186}Os	10	Re	10	3,3	74	—	—	—	—	—
^{188}Os	15	Re	15	7.5	23_0	—	—	—	0,02	0,11
^{191}Ir	91	Os	91	29	1,1	—	—	—	0,07	—
	4	Os	4	22	—					
^{193}Ir	4,2	Os	4,2	—	—	+0,6	—	—	—	—
Pt	20	Pt (Au)	20	—	4	—	—	—	—	0,13
	—	Cu (Au)	4,2	20	4	—	—	—	—	—
Au	4,2	Pt	4,2	6	8_0	—1,2	—	—	0,34	0,14
UO_2 [6]	4,2	PuO_2	4,2	45	—	0	—	2700	—	—
	77	PuO_2	77	48	4	0	—	—	—	—

Таблица 38.3

Изомерный сдвиг δ некоторых веществ относительно металлического железа при температуре 300°K [4]

Вещество	δ, *мм/сек*	Вещество	δ, *мм/сек*
Au	—0,632	Mo	—0,060
In	—0,550	Ta	—0,033
Zn	—0,527	Fe	0,0
Ag	—0,525	Nb	+0,015
Pt	—0,347	$K_4Fe(CN)_6 \cdot 3H_2O$	+0,045
Cu	—0,226	Нерж. сталь	+0,090
Ir	—0,225	Ti	+0,108
Pd	—0,185	Cr	+0,152
Be	—0,120	V	+0,198
Rh	—0,114	$Na_2[Fe(CN)_5NO] \cdot 2H_2O$	+0,257

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Физический** энциклопедический словарь. М., «Советская энциклопедия», 1963, с. 183.
2. **Mössbauer** Effect. Principls and Applications. Wertgein G. K. Acad. Press. N. Y.— Lond., 1964. **Вертхейм Г.** Эффект Мёссбауэра. Пер. с англ. Под ред. В. В. Скляревского. М., «Мир», 1966.
3. **Шпинель В. С.** Резонанс гамма-лучей в кристаллах. М., «Мир», 1969.
4. **Muir A. H., Ando K. J., Coogan H. M.** Mössbauer Effect Data Index 1958—1965. Inter science Publ. New York — London — Sydney, 1966.
5. **Бескровный А. И., Лебедь Н. А., Останевич Ю. М.** В кн. «Proceedings of the Conf. on Mössbauer Spectrometry.", Dresden, 1971, v. 2, p. 583.
6. **Ruby S. L. e. a.** "Phys. Rev.", 1969, v. 184, p. 374.

ГЛАВА 39

РЕАКЦИИ ПОД ДЕЙСТВИЕМ НЕЙТРОНОВ

39.1. ОСНОВНЫЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ НЕЙТРОНА

Масса покоя [1] . . . . $1{,}6749543(86 \cdot 10^{-24})$ *г* = $= 1{,}008665012(37)$ *а. е. м.*

Заряд . . . . . $< 10^{-18}$ заряда электрона [2].

Распад [3] . . . . . $n_0^1 \to p^+ + e^- + \nu^*$, $T_{1/2} = (11{,}7 \pm 0{,}3)$ *мин.*

Верхняя граница энергии β-частиц . . . . . (782±13) *кэв* [3].

Спин . . . . . $\pm 1/2$.

Собственная энергия нейтрона . . . . . 939,5 *Мэв.*

Магнитный момент [4]:

$$\mu_n = (-1{,}913148 \pm 0{,}000066)\ \mu_я,$$

где $\mu_я = (0{,}5050824(20) \cdot 10^{-23}$ *эрг/гс* — ядерный магнетон.

Электрический дипольный момент нейтрона меньше, чем дипольный момент системы, состоящей из двух электронных зарядов, разделенных расстоянием в $5 \cdot 10^{-21}$ *см* [4].

Таблица 39.1

Длины волн, соответствующие различным энергиям нейтронов

Группа нейтронов	*E*, *эв*	*T*, °K	*v*, *см/сек*	λ, *см*
Холодные	$E < 0{,}01$ *эв*	0,001	11,6	$4{,}37 \cdot 10^4$	$9{,}04 \cdot 10^{-8}$
Тепловые	$E \approx 0{,}01 \div 0{,}1$ *эв*	0,0252	293	$2{,}198 \cdot 10^5$	$1{,}80 \cdot 10^{-8}$
Резонансные	$E \approx 0{,}1 \div 50$ *эв*	1,0	$1{,}16 \cdot 10^4$	$1{,}38 \cdot 10^6$	$2{,}86 \cdot 10^{-9}$
Медленные	$E \approx 50 \div 500$ *эв*	100	$1{,}16 \cdot 10^6$	$1{,}38 \cdot 10^7$	$2{,}86 \cdot 10^{-10}$
Промежуточных энергий	$E \approx 500 \div 10^5$ *эв*	10^4	$1{,}16 \cdot 10^8$	$1{,}38 \cdot 10^8$	$2{,}86 \cdot 10^{-11}$
Быстрые	$E \approx 10^5 \approx 10^7$ *эв*	10^6	$1{,}16 \cdot 10^{10}$	$1{,}38 \cdot 10^9$	$2{,}86 \cdot 10^{-12}$
Очень больших энергий	$E \approx 10^7 \div 10^9$ *эв*	10^8	$1{,}16 \cdot 10^{12}$	$1{,}28 \cdot 10^{10}$	$2{,}79 \cdot 10^{-13}$
Релятивистские	$E > 10^9$ *эв*	10^{10}	$1{,}16 \cdot 10^{14}$	$2{,}99 \cdot 10^{10}$	$1{,}14 \cdot 10^{-14}$

39.2. ХАРАКТЕРИСТИКИ ПОРОГОВЫХ РЕАКЦИЙ. ЭНЕРГИИ ВОЗБУЖДЕННЫХ СОСТОЯНИЙ ЯДЕР

Характеристики пороговых реакций. В ядерной реакции $A_1 + A_2 \to A_3 + A_4 + Q$, когда две начальные частицы A_1 и A_2 превращаются в две конечные частицы A_3 и A_4, тепловой эффект реакции или энергетический выход Q определяется массами m_1, m_2, m_3, m_4 частиц, участвующих в реакции:

$$Q = (m_1 + m_2 - m_3 - m_4)\, c^2,$$

где c — скорость света в вакууме. Если Q — отрицательная величина, то в лабораторной системе координат (L-система), где частица A_2 покоится, реакция протекает лишь тогда, когда кинетическая энергия W_1 падающей частицы A_1 больше энергии порога реакции $E_п$:

$$E_п = |Q| \frac{m_1 + m_2}{m_2}.$$

При учете релятивистских эффектов:

$$E_{\text{п}} \approx |Q| \left(\frac{m_1 + m_2}{m_2} + \frac{1}{2} \frac{|Q|}{m_2 c^2} \right).$$

В лабораторной системе координат кинетические энергии W_3 и W_4 частиц продуктов реакции, вылетающих под углами θ_3 и θ_4 к направлению падающей частицы A_1, определяются формулами

$$W_3 = \frac{1}{M^2} \{ \sqrt{m_1 m_3 W_1} \cos\theta_3 \pm [m_1 m_3 W_1 \cos^2\theta_3 + M(m_4 Q + (m_4 - m_1) W_1)]^{1/2} \}^2,$$

где $M = m_3 + m_4$. Выражение для W_4 получается из предыдущего перестановкой индексов 3 и 4. Углы вылета θ_3 и θ_4 ограничены условиями:

$$\sin^2\theta_3 \leqslant \frac{m_4}{m_3} \left\{ \frac{M}{m_1} \left[1 - \frac{|Q|}{W_1} \right] - 1 \right\};$$

$$\sin^2\theta_4 \leqslant \frac{m_3}{m_4} \left\{ \frac{M}{m_1} \left[1 - \frac{|Q|}{W_1} \right] - 1 \right\}.$$

Тепловой эффект реакции Q может быть найден по значению кинетической энергии частицы W_3 и углу вылета θ_3:

$$Q = \frac{M}{m_4} W_3 - \frac{m_4 - m_1}{m_4} W_1 - \frac{2\sqrt{m_1 m_3 W_1 W_3}}{m_4} \cos\theta_3.$$

Таблица 39.2

Энергии первого E_1 и второго E_2 возбужденных состояний ядер некоторых изотопов [5,6]

Ядро	E_1, *Мэв*	E_2, *Мэв*	Ядро	E_1, *Мэв*	E_2, *Мэв*
^{2}D, ^{4}He	Нет	Нет	^{14}N	2,31	3,95
^{6}Li	2,19	3,57	^{16}O	6,06	6,13
^{7}Li	0,479	4,63	^{18}O	1,98	2,45
^{9}Be	1,70	2,43	^{19}F	0,11	0,20
^{10}B	0,717	1,74	^{23}Na	0,44	2,08
^{11}B	2,14	4,46	^{24}Na	1,37	4,12
C	4,44	7,66	^{25}Mg	0,584	0,976
	3,09	3,68	^{26}Mg	1,81	2,94

Продолжение табл. 39.2

Ядро	E_1, *Мэв*	E_2, *Мэв*	Ядро	E_1, *Мэв*	E_2, *Мэв*
^{27}Al	0,842	1,013	^{107}Ag	0,093	0,126
^{28}Si	1,772	4,61	^{109}Ag	0,083	0,129
^{31}P	1,265	2,232	^{110}Cd	0,656	1,38
^{32}S	2,24	3,78	^{112}Cd	0,615	1,23
^{35}Cl	1,22	1,762	^{114}Cd	0,556	1,278
^{37}Cl	0,84	1,73	^{115}In	0,335	0,595
^{39}K	2,53	2,82	^{116}Sn	1,29	2,12
^{40}Ca	3,351	3,73	^{118}Sn	1,22	1,75
^{44}Ca	1,158	1,883	^{120}Sn	1,18	2,215
^{46}Ti	0,892	2,01	^{121}Sb	0,506	0,573
^{48}Ti	0,99	2,31	^{127}I	0,058	0,203
^{51}V	0,323	0,928	^{138}Ba	1,43	1,89
^{52}Cr	1,46	2,43	^{181}Ta	0,136	0,152
^{55}Mn	0,13	0,98	^{182}W	0,101	0,329
^{56}Fe	0,845	2,08	^{183}W	0,046	0,099
^{57}Fe	0,13	0,35	^{184}W	0,11	0,35
^{58}Fe	0,8	1,6	^{186}W	0,126	0,730
^{59}Co	1,098	1,289	^{194}Pt	0,328	0,621
^{58}Ni	1,45	2,45	^{195}Pt	0,099	0,130
^{60}Ni	1,33	2,16	^{196}Pt	0,354	0,685
^{63}Cu	0,668	0,961	^{197}Au	0,077	0,268
^{65}Cu	0,770	1,12	^{199}Hg	0,158	0,208
^{64}Zn	0,980	2,25	^{200}Hg	0,368	0,947
^{65}Zn	0,054	0,118	^{205}Pb	0,803	1,341
^{66}Zn	1,04	2,4	^{207}Pb	0,569	0,894
^{70}Ge	1,036	1,21	^{208}Pb	2,62	3,20
^{72}Ge	0,69	0,84	^{209}Bi	0,90	1,62
^{74}Ge	0,596	1,25	^{230}Th	0,053	0,174
^{75}As	0,199	0,265	^{232}Th	0,049	0,163
^{76}Se	0,55	1,2	^{238}U	0,0404	0,092
^{88}Sr	1,85	2,76	^{235}U	0,007	0,013
^{89}Y	0,913	1,53	^{236}U	0,046	0,151
^{90}Zr	1,77	2,2	^{238}U	0,045	0,148
^{92}Zr	0,93	1,83	^{239}Pu	0,008	0,057
^{93}Nb	0,029	0,765	^{240}Pu	0,043	0,142
^{95}Mo	0,201	0,762	^{241}Pu	0,044	0,080
^{96}Mo	0,770	1,61			

39.3. РЕАКЦИИ (n, γ)

Таблица 39.3

Спектр γ-квантов, испускаемых при поглощении тепловых нейтронов различными ядрами [5]

Исходное ядро	Число фотонов с энергией E, *Мэв*, на 100 поглощенных нейтронов							Наибольшая энергия γ-квантов, *Мэв*
	$E = 0 \div 1$	$E = 1 \div 2$	$E = 2 \div 3$	$E = 3 \div 5$	$E = 5 \div 7$	$E = 7 \div 9$	$E > 9$	
H	0	0	100	0	0	0	0	2,23
D	0	0	0	0	100	0	0	6,24
Li	—	—	—	—	40	60	0	7,26
Be	0	0	0	54	73	0	0	6,80
^{10}B	0	0	0	110	28	60	0,8	11,43
^{14}N	0	0	0	100	0	0	0	4,95
O	—	—	—	54	11	15	12	10,83
Ne	—	100	—	—	111	0	0	6,60

Исходное ядро	Число фотонов с энергией E, *Мэв*, на 100 поглощенных нейтронов							Наибольшая энергия γ-квантов, *Мэв*
	$E = 0 \div 1$	$E = 1 \div 2$	$E = 2 \div 3$	$E = 3 \div 5$	$E = 5 \div 7$	$E = 7 \div 9$	$E > 9$	
Na	96	127	187	70	31	0	0	6,41
Mg	—	—	28	72	10	3,3	0,57	11,09
Al	236	195	69	62	19	19	0	7,724
Si	100	63	30	89	11	41	0,1	10,59
P	290	97	55	98	27	7,2	0	7,94
S	70	32	72	70	44	6,5	0	8,64
Cl	49	85	41	47	55	24	0	8,55
K	100	81	57	106	37	4,7	0	9,36
Ca	14	191	77	85	64	1,8	0	7,83
Sc	52	59	38	65	29	12	0	8,85
Ti	54	160	16,0	24	78	1,3	0,2	10,47
V	83	132	11,4	21	67	16	0	7,98
Cr	85	41	21	12	23	39	6,4	9,716
Mn	125	91	60	50	34	17	0	7,261
Fe	75	60	27	23	25	38	2,1	10,16
Co	61	26	17	42	52	8,5	0	7,486
Ni	84	40	23	23	34	62	0,8	8,997
Cu	68	47	26	30	27	43	0	7,914
Zn	156	93	67	48	29	16	1	9,51
Ga	—	—	—	57	34	0,2	0	7,73
As	—	—	—	47	22	1	0	7,30
Se	—	—	—	65	27	9	1,7	10,483
Br	—	—	—	79	41	6,4	0	7,879
Sr	—	—	—	69	51	14	0,1	9,22
Y	71	23	6	50	59	0	0	6,85
Zr	—	—	—	113	35	4	0	8,66
Nb	—	—	—	54	14	0,4	0	7,19
Mo	137	18	—	84	26	3	0,03	9,15
Rh	91	99	61	38	10	0	0	6,792
Ag	92	87	64	70	17	0,5	0	7,27
Cd	135	92	96	73	17	1	0,1	9,046
In	102	197	78	36	4	0	0	5,86
Sn	216	153	67	139	33	4	0,4	9,35
Sb	150	99	58	36	12	0	0	6,80
Te	58	—	—	—	—	—	—	—
I	30	—	—	97	22	0	0	6,71
Cs	46	—	—	61	25	0	0	6,702
Ba	—	—	—	75	14	1,4	0,1	9,23
La	21,7	8,2	—	35	12,5	0	0	5,045
Pr	—	—	—	34	8	0	0	5,83
Nd	105	—	—	—	—	—	—	—
Sm	167	150	109	45	5	1	0	7,89
Eu	106	153	109	56	6,5	0	0	6,05
Ga	194	117	100	23	34	0,3	0	7,33
Tb	7	—	—	—	—	—	—	—
Dy	90	102	106	43	10	0	0	5,87
Ho	—	98	77	49	8	0	0	6,1
Er	225	145	133	103	14	0	0	6,68
Tm	—	91	73	55	10	0	0	6,5
Hf	137	137	85	52	12	0,5	0	7,62
Ta	137	99	66	55	5	0	0	6,04
W	68	82	59	53	15	0,5	0	7,42
Re	124	88	62	51	10,5	0	0	6,14
Ir	98	85	58	51	19,6	0	0	6,088
Pt	109	92	64	45	15	1	0	7,92
Au	100	69	33	68	38	0,1	0	6,494
Hg	94	122	55	86	41	0	0	6,446
Tl	—	—	—	76	62	0	0	6,54
Pb	0	0	0	0	7	93	0	7,38
Bi	0	0	0	100	0	0	0	4,17
^{232}Th	118	140	64	17	0	0	0	4,92
^{238}U	254	178	91	34	0	0	0	4,062

Таблица 39.4

Сечения реакции (n, γ) в тепловой области для некоторых ядер [6]

Мишень	σ, барн	Мишень	σ, барн
^{113}Cd	21000	^{165}Dy	5000
^{135}Xe	$2{,}7\cdot10^6$	^{168}Yb	11000
^{149}Sm	$6\cdot10^4$	^{176}Lu	4000
^{151}Sm	9000	^{174}Hf	1500
^{151}Eu	9000	^{191}Ir	1000
^{152}Eu	5500	^{198}Au	35000
^{154}Eu	1000	^{196}Hg	3000
^{155}Eu	14000	^{199}Hg	2500
^{155}Gd	$7\cdot10^4$	^{233}Th	1400
^{157}Gd	$1{,}6\cdot10^5$	^{250}Cf	1500
^{164}Dy	2600	^{251}Cf	3000

39.4. РЕАКЦИИ (n, n')

При неупругом рассеянии захват ядром $^{A}_{Z}N$ нейтрона приводит к образованию составного ядра $^{A+1}_{Z}N$, которое впоследствии испускает нейтрон с меньшей энергией, чем первоначальный. После эмиссии нейтрона ядро остается в возбужденном состоянии, переход из которого на основное состояние возможен путем испускания одного или нескольких γ-квантов. Неупругое рассеяние нейтронов возможно только в том случае, если энергия нейтрона в $(A + 1)/A$ раз превышает энергию первого (низшего) возбуждённого состояния ядра-мишени. Как правило, энергия порога с увеличением массового числа A уменьшается.

Неупругое рассеяние не может быть полностью описано единственным сечением. Если кинетическая энергия нейтрона E достаточна для возбуждения нескольких уровней, то возбуждение каждого из них может

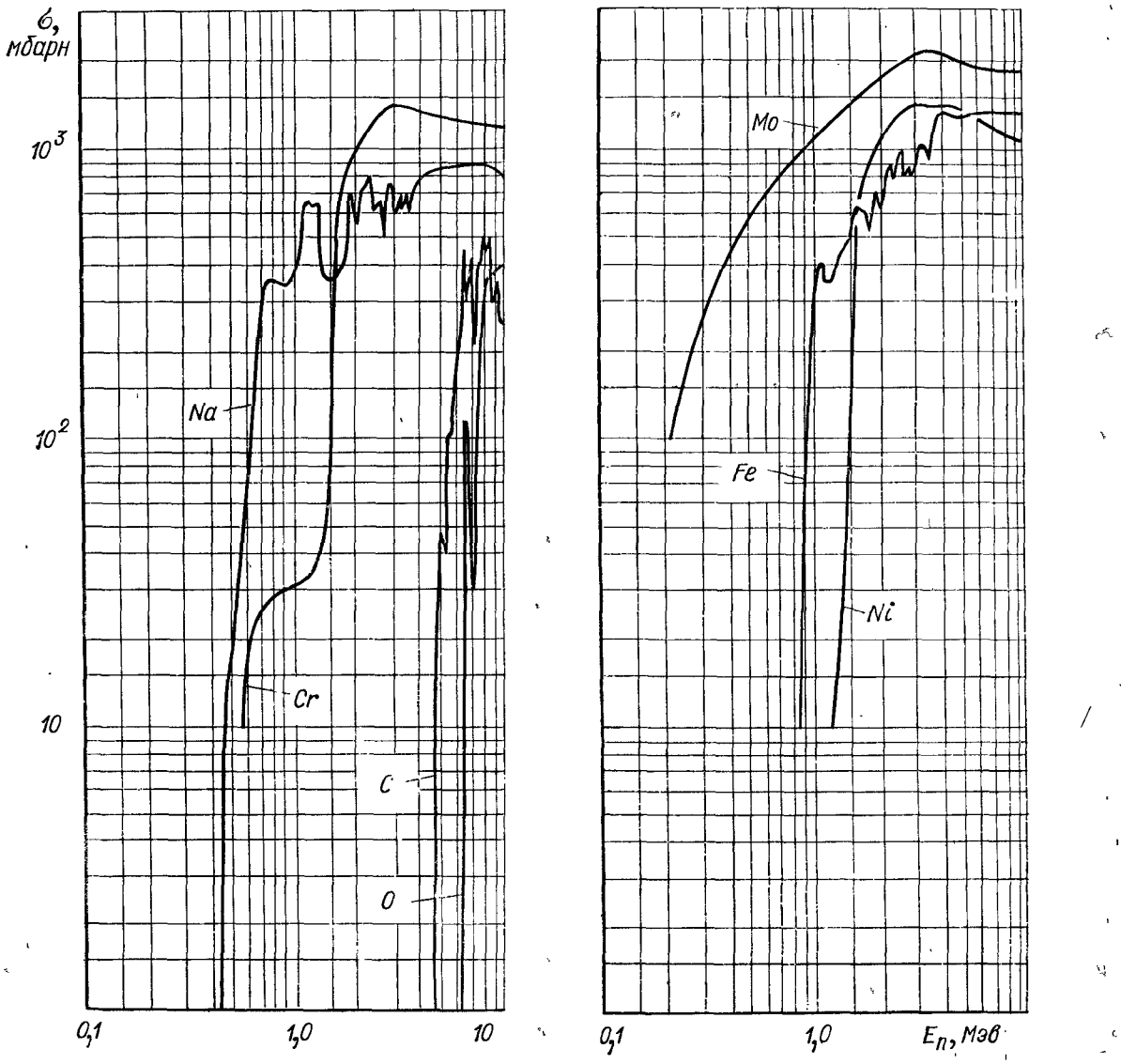


Рис. 39.1. Зависимость сечения неупругого рассеяния нейтронов σ (n, n') для различных ядер от энергии нейтронов E_n [11].

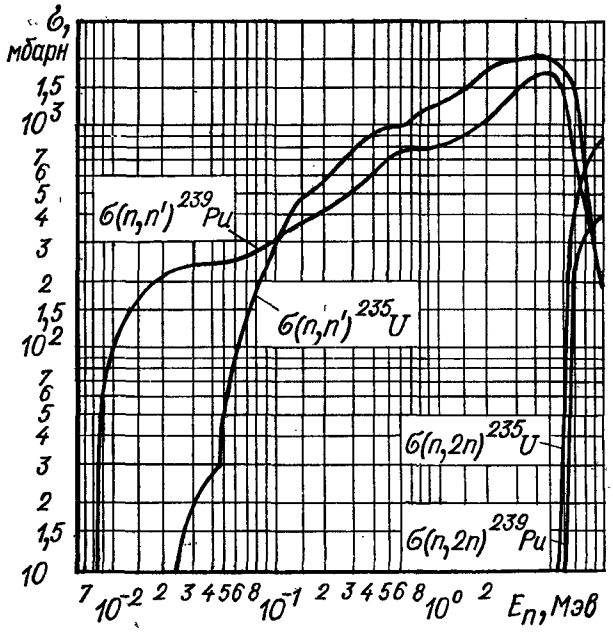


Рис. 39.2. Зависимость сечения σ неупругого рассеяния (n,n') и реакции $(n, 2n)$ для ^{235}U и ^{239}Pu от энергии нейтронов E_n [11].

происходить со своим собственным значением сечения $\sigma(E \to \varepsilon)$; здесь ε — энергия нейтрона после рассеяния. Однако измерения дифференциального сечения $\sigma(E \to \varepsilon)$ достаточно сложны, поэтому часто приводятся интегральные сечения неупругого рассеяния $\sigma_{in}(E)$, которые представляют собой вероятность того, что нейтрон потеряет какое-то количество энергии помимо потери, обусловленной отдачей ядра мишени.

39.5. РЕАКЦИИ $(n, 2n)$

Если энергия нейтрона на несколько мегаэлектронвольт превышает порог реакции $(n, 2n)$, то эта реакция, как правило, идет с большой вероятностью. Сечение реакции $(n, 2n)$ может быть оценено по формуле [4]:

$$\sigma(n, 2n) = \sigma(n, n)\left[1 - (1 + \varepsilon/T)\, e^{-\varepsilon/T}\right],$$

где $\sigma(n, n) \approx \pi R^2$ — сечение первичного испускания нейтрона; R — радиус ядра; ε — разница энергий налетающего нейтрона и порога реакции; T — температура остаточного ядра. Тяжелые элементы имеют температуру остаточного ядра $T \sim 1$ *Мэв*, а легкие ядра несколько больше.

Таблица 39.5

Интегральные сечения неупругого рассеяния $\sigma_{in}(n, n')$

Представлены сечения неупругого рассеяния нейтронов, отвечающие случаям, при которых нейтрон с начальной энергией E имеет после рассеяния энергию меньшую, чем граничная энергия $E_{гр}$ [7]. Обозначения: $E \to E_{гр}$ — минимальный сброс энергии; сп. дел. — спектр деления.

Элемент	$E \to E_{гр}$, *Мэв*	$\sigma_{in}(n, n')$, барн	Элемент	$E \to E_{гр}$, *Мэв*	$\sigma_{in}(n, n')$, барн
Be	14→3	0,16±0,07	Zr	Сп. дел.→0,7	0,302±0,050
B	14→3	0,24±0,04	Ag	Сп. дел.→0,7	0,840±0,105
C	14→3	0,28±0,04	Cd	Сп. дел.→0,7	0,658±0,079
N	14→3	9,46±0,05		14→3	0,66±0,07
Al	14→3	0,62±0,07	Sn	Сп. дел.→0,7	0,369±0,050
	Сп. дел.→0,7	0,087±0,032	W	Сп. дел.→0,7	1,080±0,145
Ti	Сп. дел.→0,7	0,187±0,057		3→1,5	2,4
V	Сп. дел.→0,7	0,224±0,046	Au	14→3	2,06±0,09
Fe	14→3	1,21±0,03		Сп. дел.→0,7	1,00±0,12
	Сп. дел.→0,7	0,276±0,031	Pb	14→3	2,29±0,04
Ni	Сп. дел.→0,7	0,276±0,041		Сп. дел.→0,7	0,208±0,05
Cu	Сп. дел.→0,7	0,304±0,043		2,5→1	0,55
	14→3	1,32±0,05	Bi	14→3	2,28±0,08
Zn	Сп. дел.→0,7	0,305±0,047		Сп. дел.→0,7	0,197±0,035
As	Сп. дел.→0,7	1,67			

Таблица 39.6

Пороги реакции $(n, 2n)$ для различных изотопов [2]

Мишень	A	Энергия порога, *Мэв*	Мишень	A	Энергия порога, *Мэв*	Мишень	A	Энергия порога, *Мэв*
H	2	3,34	Fe	54	14,1	In	115	9,1
	3	8,33		56	11,3	Sn	118	9,2
Li	6	6,2		57	7,9		119	6,6
	7	8,2	Co	59	10,5		124	8,6
Be	9	1,85	Ni	58	11,9	Sb	121	9,3
B	10	9,4		61	7,6		123	9,4
	11	12,6	Cu	63	11,1	Te	—	6,6
C	12	20,3		65	10,2	I	127	9,4
N	14	11,3	Zn	64	11,9	Cs	133	9,1
O	16	17,3		66	11,3	Ba	—	6,8
F	19	10,9		67	7,1	La	139	8,9
Na	23	12,6		68	10,3	Ce	140	9,1
Mg	24	17,1		70	9,3		142	7,2
	25	7,5	Ga	69	10,2	Pr	141	9,5
	26	11,6		71	9,2	Nd	150	7,4
Al	27	13,2	As	75	10,4	Ta	181	7,6
Si	28	17,4	Se	82	9,9	W	—	6,3
	29	8,7	Br	79	10,9	Re	187	7,3
P	31	12,6		81	10,3	Ir	193	7,8
S	32	15,3	Sr	86	9,6	Pt	194	9,5
	34	11,2		87	8,5		195	6,1
Cl	—	10,2		88	11,2		196	8,2
K	39	13,5	Zr	90	12,6	Au	197	8,1
Ca	40	16,3		91	7,3	Hg	201	6,3
Ti	46	13,6	Nb	93	8,8	Tl	203	8,8
	48	11,8	Mo	92	13,4		205	7,5
	49	8,9		97	7,2	Pb	206	8,3
V	51	11,4	Ru	—	7,1		207	6,9
Cr	50	13,7	Rh	103	9,4		208	7,4
	52	12,0	Pd	—	7,1	Bi	209	7,4
	53	7,9	Ag	109	9,1	Th	232	6,4
Mn	55	10,3	Cd	113	6,6	U	238	6,0

Таблица 39.7

Сечения реакции $(n, 2n)$ [5]

Ядро	Энергия нейтронов, *Мэв*	$\sigma(n, 2n)$, *мбарн*
^{2}H	6,11	67±7
	6,55	73±7
	7,32	88±9
	8,26	110±10
	10,2	140±15
	14,1	190±200
^{4}He	90	16±1,6
Li	14	≪100
^{9}Be	Сп. дел.	73±20
	Po-α-Be	310±50
B	14,1	180±2
C	14,1	8±6
	23	44
	27	100
N	12,41	3,03±0,75
	14,1	15±4
	14,7	8,7±0,9
	17,98	11,5±1,2
	Li + D	1,9
	$E_{макс} = 13,8$	
F	14,1	56±7
Na	14,1	13,8±2,2
P	14,4	10,9±8,5
	17,98	74±7,4
Cl	14,4	5,42±0,4
^{39}K	14,4	3,37±0,27
Sc	Li + D	39
Ti	14,1	520±40
V	14,1	660±50
^{52}Cr	14	32±3,2
Mn	Сп. дел.	1,5
	14,1	900±70
Fe	14	180±30
	14,1	500±40
Co	14,1	870±70
^{58}Ni	Сп. дел.	$1,2 \cdot 10^{-3}$
	13,52	13±7 [8]
	14,09	23,5±1,2 [8]
	16,50	53,3±4,3 [8]
	19,76	77,4±3,9 [8]
^{63}Cu	Li + D	314
	12,41	186±19 [9]
	14,74	507±45 [9]
	17,98	836±75 [9]
^{65}Cu	12,06	504±25 [10]
	14,09	906±36 [10]
	16,50	997±56 [10]
	19,76	986±49 [10]
Zn	Li + D	~190
	14	330±60
^{69}Ga	14,8	1070±110
^{71}Ga	14,5	2180±220
^{70}Ge	Сп. дел.	1,5
	Li + D	369
^{82}Se	14,8	1500±500
^{79}Br	14,5	1140±300
^{81}Br	14,5	828±170
Zr	14,1	1250±90
Mo	14,1	1590±120
Ag	14	770±80
Cd	14	890±20
^{115}In	13,3	1428±71
	19,76	1360±140
Sn	14	1040±20
Sb	14	1520±200
^{130}Te	14,5	599±120
I	14,5	1120±400
Cs	14	1600±250
Pr	14,4	1801±130
Nd	14,4	2410±200
Ta	14,1	2640±200
^{187}Re	14,8	1675±170
Au	14,1	2600±200
Hg	14	1900±300
Pb	14	2300±190
	14,1	2710±200
Bi	14,1	2600±190
U	Сп. дел.	11,7±3
^{237}Np	14,5	390

Продолжение табл. 39.7

39.6. РЕАКЦИИ С ИСПУСКАНИЕМ ЗАРЯЖЕННЫХ ЧАСТИЦ

Из составного ядра, образованного при поглощении нейтрона, могут испускаться заряженные частицы, если энергия возбуждения составного ядра была достаточна для того, чтобы заряженная частица имела заметную вероятность проникновения через кулоновский барьер. Реакции с испусканием заряженной частицы на медленных нейтронах обычно экзотермичны, поскольку медленный нейтрон не может сообщить ядру энергию, необходимую для испускания заряженной частицы из ядра.

Таблица 39.8

Реакции на медленных нейтронах с образованием заряженных частиц [4, 6]

Реакция	$\sigma(kT)$, *барн*
$^{3}He + n \rightarrow {}^{3}H + p + 0,764$ *Мэв*	5400
$^{6}Li + n \rightarrow {}^{3}H + \alpha + 4,785$ *Мэв*	945
$^{7}Be + n \rightarrow {}^{7}Li + p + 1,65$ *Мэв*	51000
$^{10}B + n \rightarrow {}^{7}Li + \alpha + 2,791$ *Мэв*	3837
$^{14}N + n \rightarrow {}^{14}C + p + 0,626$ *Мэв*	1,75
$^{17}O + n \rightarrow {}^{14}C + \alpha + 1,72$ *Мэв*	0,5
$^{33}S + n \rightarrow {}^{33}P + p + 0,75$ *Мэв*	0,002
$^{35}Cl + n \rightarrow {}^{35}S + p + 0,62$ *Мэв*	0,3
$^{23}Na + n \rightarrow {}^{23}Ne + p$	0,0007*
$^{24}Mg + n \rightarrow {}^{24}Na + p - 4,734$ *Мэв*	0,001*
$^{27}Al + n \rightarrow {}^{27}Mg + p - 1,835$ *Мэв*	0,0028*
$^{28}Si + n \rightarrow {}^{28}Al + p - 3,857$ *Мэв*	0,004*
$^{31}P + n \rightarrow {}^{31}Si + p - 0,694$ *Мэв*	0,019*
$^{37}Cl + n \rightarrow {}^{36}S + p$	0,00024*
$^{54}Fe + n \rightarrow {}^{54}Mn + p - 2,93$ *Мэв*	0,011*

* Для нейтронов спектра деления.

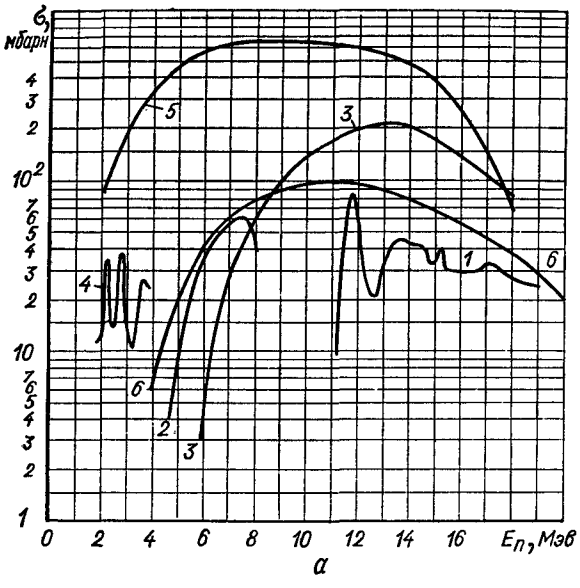


Рис. 39.3. Зависимость сечения σ реакции (n, p) для различных ядер от энергии нейтронов E_n:
а: *1* — $^{16}O\,(n, p)^{16}N$ [12]; *2* — $^{19}F(n, p)^{19}O$ [27]; *3* — $^{24}Mg(n, p)^{24}Na$ [25, 13]; *4* — $^{14}N(n, p)^{14}C$ [4]; *5* — $^{58}Ni\,(n, p)^{58}Co$ [25]; *6* — $^{27}Al(n, p)^{27}Mg$ [25];
б: *1* — $^{28}Si\,(n, p)^{28}Al$ [14]; *2* — $^{31}P\,(n, p)^{31}Si$ [25,15]; *3* — $^{32}S(n, p)^{32}P$ [25, 16]; *4* — $^{56}Fe\,(n, p)^{56}Mn$ [25, 17].

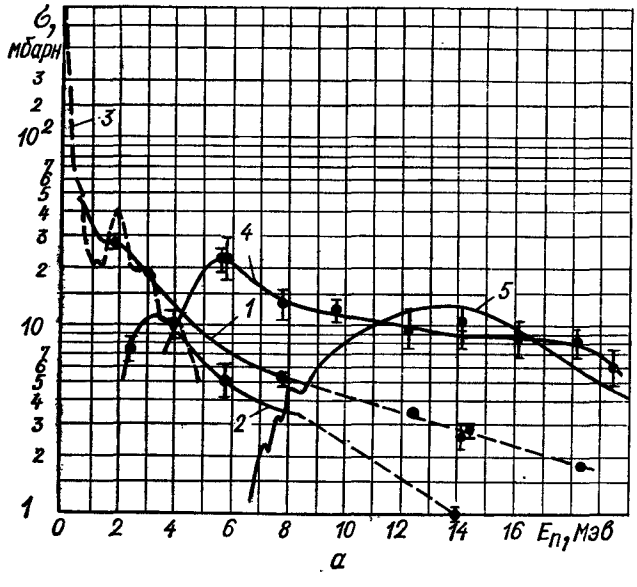


Рис. 39.4. Зависимость сечения σ для различных реакций и ядер от энергии нейтронов E_n:
а: *1* — $^{6}Li(n, p)^{3}H$ [26]; *2* — $^{9}Be(n, \alpha)^{6}He$[18—20]; *3* — $^{10}B(n, \alpha)^{7}Li$ [24]; *4* — $^{10}B(n, 2\alpha)^{3}H$ [21, 22]; *5* — $^{27}Al(n, \alpha)^{24}Na$ [15, 23, 25];
б: *1* — $^{19}F(n, \alpha)^{16}N$[27]; *2* — $^{14}N(n, \alpha)^{11}B$ [4]; *3* — $^{34}S(n, \alpha)^{31}Si$ [16].

39.7. ХАРАКТЕРИСТИКИ ПОРОГОВЫХ ДЕТЕКТОРОВ НЕЙТРОНОВ

В табл. 39.9—39.11 приведены $E_п^{эф}$ — эффективный порог детектора нейтронов; $E_п$ — пороговая энергия; $\bar{\sigma}$ — сечение реакции, усредненное по спектру деления $N(E)$; σ_0 — сечение на «плато». Эти величины связаны соотношениями:

$$\int_0^\infty N\sigma_{акт}(E)\,dE = \sigma_0 \int_{E_п^{эф}}^\infty N(E)\,dE = \bar{\sigma}\int_0^\infty N(E)\,dE.$$

Характеристики пороговых детекторов, реакция (n, p) [25] Таблица 39.9

Элемент	Ядро-мишень (содержание нуклида, %)	Продукт реакции (период полураспада)	$E_п$, *Мэв*	σ_0, *мбарн*	$E_п^{эф}$, *Мэв*	$\overline{\sigma}$, *мбарн*	Материал, из которого изготовлен детектор	Вид радиоактивности	Побочные активности (пороговая энергия, *Мэв*; период полураспада)
Фосфор	^{31}P(100)	^{31}Si (157 *мин*)	0,716	140	3,0	30	Фосфорсодержащее стекло	β^-	^{30}P (12,7; 2,6 *мин*) ^{28}Al (2,0; 2,3 *мин*) ^{29}Al (13,6; 6,6 *мин*) ^{32}P (тепловая энергия; 14,2 дня)
Сера	^{32}S(95)	^{32}P(14,2 дня)	0,954	350	3,2	66	Таблетки, содержащие серу	β^-	^{33}P (8,7; 25 дней) ^{31}Si(1,32; 157 *мин*) ^{35}S (тепловая энергия; 87 дней)
Никель	^{58}Ni(68)	^{58}Co (72 дня)	—	600	3,45	100	Металлический никель	γ, (э.з.*) β^+	^{57}Ni (12,0; 36 *ч*) ^{61}Co (0,5; 1,65 *ч*) ^{56}Ni (тепловая энергия; 2,56 *ч*)
Железо	^{54}Fe(5,82)	^{54}Mn(290 дней)	—	400	3,75	53	Металлическое железо	γ(э.з.)	^{51}Cr (27,8 дня) ^{56}Mn(2,95; 154,5 *мин*)
Алюминий	^{27}Al(100)	^{27}Mg(9,393 *мин*)	1,89	80	5,30	3,5	Металлический алюминий	γ, β^-	^{28}Al(тепловая энергия; 2,3 *мин*) ^{24}Na(3,26; 14,97 *ч*)
Железо	^{56}Fe(91,6)	^{56}Mn(154,5 *мин*)	2,95	130	7,70	0,97	Металлическое железо	γ, β^-	^{51}Cr(27,8 дня) ^{54}Mn(290 дней)
Магний	^{24}Mg(78,8)	^{24}Na 14,97 *ч*	4,9	200	8,00	1,2	Металлический магний	γ, β^-	—

* э.з. — электронный захват.

Таблица 39.10

Характеристики пороговых детекторов, реакции (n, n'), (n, α) и (n, 2n) [25]

Элемент	Ядро-мишень (содержание нуклида, %) Тип реакции	Продукт реакции (период полураспада)	$E_п$, *Мэв*	σ_0, *мбарн*	$E_п^{эф}$, *Мэв*	$\overline{\sigma}$, *мбарн*	Материал, из которого изготовлен детектор	Вид радиоактивности	Побочные активности (пороговая энергия, *Мэв*; период полураспада)
Родий	^{103}Rh(100) (*n*, *n'*)	^{103m}Rh (57 *мин*)	0,040	1500	0,9	1093	Металлический родний	γ, e^-	^{104m}Rh (тепловая энергия; 4,4 *мин*) ^{102}Rh(9,5; 210 дней)
Индий	^{115}In (95,8) (*n*, *n'*)	^{115m}In (4,5 *ч*)	0,335	350	1,65	171	Металлический индий	γ, e^-	^{116m} In (тепловая энергия; 54,1 *мин*) ^{113m} In(0,393; 1,7 *ч*) ^{113} Ag (9,5; 5,3 *ч*) ^{112} Ag (3,4 *ч*)
Алюминий	^{27}Al(100) (*n*, α)	^{24}Na (14,97 *ч*)	3,26	120	8,15	0,61	Металлический алюминий	γ, β^-	^{27}Mg(1,89; 9,39 *мин*)
Медь	^{65}Cu(30,91) (*n*, 2*n*)	^{64}Cu(12,8 *ч*)	10,1	1000	11,7	0,31	Металлическая медь	γ, β^+, β^-	^{61}Co(10,5; 1,65 *ч*) ^{65}Ni (2,56 *ч*) ^{64}Cu (тепловая энергия; 12,8 *ч*)
Медь	^{63}Cu(69,09) (*n*, 2*n*)	^{62}Cu(9,8 *мин*)	10,9	800	13,2	0,073	Металлическая медь	β^+	^{60m}Co(10,5 *мин*) ^{66}Cu (тепловая энергия; 5,1 *мин*) ^{62}Co(13,9 *мин*) ^{65}Ni(2,56 *ч*) ^{61}Co(1,65 *ч*)
Никель	^{58}Ni(68,0) (*n*, 2*n*)	^{57}Ni(37 *ч*)	12,0	80	14	$4\cdot10^{-3}$	Металлический никель	γ, β^+	^{56}Ni(тепловая энергия; 2,56 *ч*) ^{61}Co(0,5; 1,65 *ч*)

Таблица 39.11

Характеристики пороговых детекторов деления [14]

Нуклид	$E_п$, *Мэв*	σ_0, *мбарн*	$E_п^{эф}$, *Мэв*	$\bar{\sigma}$, *мбарн*
^{234}U	~0,3	1500	0,62	1200
^{237}Np	~0,4	1500	0,87	1100
^{236}U	~0,7	850	1,25	520
^{232}Th	~1,3	140	1,40	28
^{238}U	~1,3	606	1,55	310

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Основные** формулы физики. Под ред. Д. Мензела. Пер. с англ. М., Изд-во иностр. лит., 1957.
2. **Экспериментальная** ядерная физика. Под ред. Э. Сегре. Пер. с англ. М., Изд-во иностр. лит., 1955.
3. **Сосновский А. И., Спивак П. Е.** В кн.: «Физические исследования». М., Изд-во АН СССР, 1955, с. 235.
4. **Кертис Л.** Введение в нейтронную физику. Пер. с англ. М., Атомиздат, 1965.
5. **Гордеев И. В., Кардашев Д. А., Малышев А. В.** Ядерно-физические константы. М., Госатомиздат, 1963.
6. **Вейнберг А., Вигнер Е.** Физическая теория ядерных реакторов. Пер. с англ. М., Изд-во иностр. лит., 1961.
7. **Физика** ядерных реакторов. Под ред. И. А. Стенбока. Пер. с англ. М., Атомиздат, 1964.
8. **Rayburn L. A.** "Phys. Rev.", 1961, v. 122, p. 168.
9. **Ferguson J. M., Thompson W. E.** "Phys. Rev.", 1960, v. 118, p. 228.
10. **Prestwood R. J., Bayhurst B. P.** "Phys. Rev.", 1961, v. 121, p. 1458.
11. **Schmidt J. J.** Neutron Cross Sections for Fast Reactor Materials. Karlsruhe, 1962.
12. **De Juren I. A., Stoksberry R. W., Wallis M.** "Phys. Rev.", 1962, v. 127, p. 1229.
13. **Cohen A. V., White P. H.** "Nucl. Phys.", 1956, v. 1, p. 73.
14. **Marion J. B., Brugger R. M., Chapman R. A.** "Phys. Rev.", 1956, v. 101, p. 245.
15. **Grundl J. A. e. a.** "Phys. Rev.", 1958, v. 109, p. 425.
16. **Allen L. e. a.** "Phys. Rev.", 1957, v. 107, p. 1363.
17. **Terrell J., Holm D. M.** "Phys. Rev.", 1958, v. 109, p. 2031.
18. **Stelson P. H., Campbell E. C.** "Phys. Rev.", 1957, v. 106, p. 1253.
19. **Bass R. e. a.** "Nucl. Phys.", 1961, v. 23, p. 122.
20. **Battat M. E., Ribe F. H.** "Phys. Rev.", 1953, v. 89, p. 80.
21. **Frye G. M., Gamneel J. H.** "Phys. Rev.", 1956, v. 103, p. 328.
22. **Wymak M. E. e. a.** "Phys. Rev.", 1958, v. 112, p. 1265.
23. **Schmitt H. W., Halpern J.** "Phys. Rev.", 1961, v. 121, p. 827.
24. **Bichsel H., Bonner T. W.** "Phys. Rev.", 1957, v. 108, p. 1025.
25. **Бекурц К., Виртц К.** Нейтронная физика. Пер. с англ. М., Атомиздат, 1968.
26. **Murrey R. B., Schmidt H. W.** "Phys. Rev.", 1959, v. 115, p. 1707.
27. **Smith D. M., Bostrom N. A., Hudspoth E. L.** "Phys. Rev.", 1960, v. 117, p. 514.

ГЛАВА 40

РЕАКЦИИ, ПРИВОДЯЩИЕ К ОБРАЗОВАНИЮ НЕЙТРОНОВ

40.1. ЭНЕРГИЯ СВЯЗИ НЕЙТРОНОВ

Для получения нейтронов обычно используют различные ядерные реакции, в которых участвуют ядра со слабосвязанными нейтронами. Как правило, в этих реакциях образуется сначала возбужденное промежуточное ядро с энергией возбуждения, равной сумме энергии связи и кинетической энергии (в системе центра масс) налетающей частицы, которая может быть γ-квантом, протоном или α-частицей. Если энергия возбуждения больше энергии связи «последнего нейтрона» в промежуточном ядре, то вероятность излучения нейтрона достаточно велика.

Таблица 40.1

Энергия связи $E_{св}$ последнего нейтрона в легких ядрах [7]

Ядро	$E_{св}$, *Мэв*	Ядро	$E_{св}$, *Мэв*
^{2}H	2,225	^{12}C	18,720
^{3}H	6,258	^{13}C	4,937
^{3}He	7,719	^{14}C	8,176
^{4}He	20,577	^{13}N	20,326
^{5}He	—0,956	^{14}N	10,553
^{6}Li	5,663	^{15}N	10,834
^{7}Li	7,253	^{16}N	2,500
^{8}Li	2,033	^{15}O	13,222
^{8}Be	18,896	^{16}O	15,669
^{9}Be	1,665	^{17}O	4,142
^{10}Be	6,814	^{18}O	8,047
^{9}B	18,575	^{18}F	9,141
^{10}B	8,440	^{19}F	10,442
^{11}B	11,456	^{20}F	6,599
^{11}C	13,092		

40.2. РЕАКЦИИ (γ, *n*)

Фотонейтронные источники. Лишь для двух ядер, ^{2}H и ^{9}Be, можно подобрать радиоактивные излучатели γ-квантов, такие, у которых энергия γ-квантов E_γ была бы выше порога $E_п$ реакции (γ, *n*). Поэтому все радиоактивные (γ, *n*)-источники содержат в качестве материала мишени дейтерий или бериллий [2]. Сечения реакций (γ, *n*) приведены на рис. 40.1. В принципе (за исключением разброса из-за различия в направлениях γ-квантов и испускаемых нейтронов) радиоактивные фотонейтронные источники позволяют получить моноэнергетические нейтроны. Энергия фотонейтронов может быть оценена из [2]:

$$E_н = \frac{A-1}{A}\left[E_\gamma - E_п - \frac{E_\gamma^2}{1862\,(A-1)}\right] + \delta,$$

где A — масса ядра мишени; $E_н$, E_γ и $E_п$, *Мэв*;

$$\delta = E_\gamma \cos\theta \left[\frac{2\,(A-1)\,(E_\gamma - E_п)}{931\,A^3}\right]^{1/2};$$

θ — угол между направлениями γ-кванта и испускаемого нейтрона.

Таблица 40.2

Энергии $E_п$ порогов (γ, n) реакций [1, 4]

Мишень	A	$E_п$, *Мэв*	Мишень	A	$E_п$, *Мэв*
H	2	2,226±0,003	Zr	90	12,48±0,15
	3	6,25±0,01		91	7,2±0,4
Li	6	5,35±0,20	Nb	93	8,78±0,06
	7	7,15±0,07	Mo	92	13,28±0,15
Be	9	1,666±0,002		97	7,1±0,3
B	10	8,55±0,25	Rh	103	9,35±0,2
	11	11,50±0,25	Ag	107	9,353±0,034
C	12	18,7±0,1		109	9,196±0,026
N	14	10,54±0,1	Cd	113	6,5±0,15
O	16	16,3±0,4	In	115	9,05±0,2
F	19	10,4±0,3	Sn	118	9,10±0,2
Na	23	12,05±0,2		119	6,55±0,15
Mg	24	16,4±0,2		124	8,50±0,15
	25	7,25±0,2	Sb	121	9,31±0,06
	26	11,15±0,2		123	8,98±0,05
Al	27	12,75±0,2	Te	125	6,56±0,06
Si	28	16,8±0,4	I	127	9,135±0,022
	29	8,45±0,2	Os	133	8,988±0,033
	30	10,6 [2]	Ba	137	6,949±0,038
P	31	12,2±0,2	La	139	8,775±0,025
S	32	14,8±0,4	Ce	140	9,05±0,2
	34	10,85±0,2		142	7,15±0,2
Cl	35	12,66±0,04[3]	Pr	141	9,361±0,023
	37	10,307±0,038	Nd	145	⩽6,38±0,16
Ar	40	9,8 [2]		150	7,40±0,2
K	39	13,2±0,2	Sm	149	6,45±0,16
Ca	40	15,9±0,4	Eu	151	8,04±0,11
	44	11,4 [2]		153	8,65±0,13
Sc	45	12,0 [2]	Gd	157	6,39±0,11
Ti	46	13,3±0,2	Tb	159	8,141±0,039
	49	8,7±0,3	Dy	163	6,32±0,11
V	51	11,15±0,2	Ho	165	8,16±0,08
Cr	50	13,4±0,2	Er	167	6,64±0,08
	52	11,80±0,25	Tm	169	8,11±0,05
	53	7,75±0,2	Yb	173	6,50±0,08
Mn	55	10,1±0,2	Lu	175	7,88±0,08
Fe	54	13,8±0,2	Hf	177	6,692±0,034
	56	11,15±0,25		179	6,31±0,07
	57	7,75±0,2		180	7,85±0,11
Co	59	10,25±0,2	Ta	181	7,640±0,025
Ni	58	11,7±0,2	W	183	6,29±0,05
	60	11,6 [2]		186	7,28±0,06
Cu	63	10,9±0,2	Re	187	7,18±0,08
	65	10,0±0,2	Ir	193	7,79±0,05
Zn	64	11,7±0,2	Pt	194	9,50±0,2
	66	11,15±0,2		195	6,205±0,04
	67	7,0±0,2		196	8,29±0,14
	68	10,15±0,2	Au	197	8,057±0,022
	70	9,2±0,2	Hg	199	6,59±0,09
Ga	69	10,10±0,2		201	6,21±0,07
	71	9,05±0,2		202	7,60±0,13
Ge	73	6,58±0,16 [5]	Tl	203	8,80±0,2
As	75	10,259±0,031		205	7,515±0,029
Se	82	9,8±0,5	Pb	206	8,09±0,07
Br	79	10,65±0,2		207	6,790±0,023
	81	10,130±0,035		208	7,404±0,028
Rb	85	10,65±0,08	Bi	209	7,432±0,010
	87	9,93±0,07	Th	232	6,35±0,04
Sr	86	9,50±0,2	U	238	5,97±0,10
	87	8,40±0,2			
	88	11,15±0,2			
Y	89	⩽11,59±0,08			

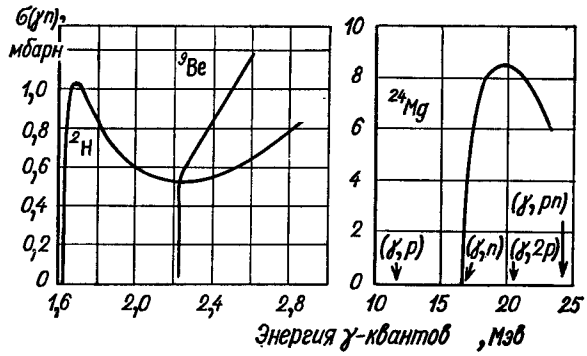


Рис. 40.1. Зависимость сечений реакции σ (γ, n) для дейтерия, бериллия и ^{24}Mg [2]. Стрелками показано расположение порогов для различных фотоядерных реакций на ^{24}Mg.

Таблица 40.3

Характеристики фотонейтронных источников [2, 6]

Обозначения: $T_{1/2}$ — период полураспада; E_γ — энергии γ-квантов; E_n — средняя энергия нейтронов; I — стандартный выход из мишени массой 1 *г*, находящейся на расстоянии 1 *см* от источника γ-квантов с активностью 1 *кюри*

Источник	$T_{1/2}$	E_γ, *Мэв*	E_n, *Мэв*	I, $\frac{10^6 \text{нейтрон}}{\text{сек} \cdot \text{Кюри}}$
^{24}Na + Be	14,8 *ч*	2,76	0,83	14
^{24}Na + D_2O	14,8 *ч*	2,76	0,22	29
^{56}Mn + D_2O	2,59 *ч*	2,7	0,22	0,31
^{56}Mn + Be	2,59 *ч*	1,81; 2,13; 2,7	0,15; 0,30	2,9
^{72}Ga + Be	14,1 *ч*	1,87; 2,21; 2,51	0,2	5,9
^{72}Ca + D_2O	14,1 *ч*	2,51	0,13	6,9
^{88}Y + Be	87 дней	1,9; 2,8	0,158	10
^{88}Y + D	87 дней	2,8	~0,31	0,3
^{116}In + Be	54 *мин*	1,8; 2,1	0,30	0,82
^{124}Sb + Be	60 дней	1,7	0,024	19
^{140}La + Be	40 дней	2,50	0,62	0,3
^{140}La + D_2O	40 дней	2,50	0,151	0,8
^{226}Ra + D_2O	6,7 лет	2,62	0,197	9,5
^{223}Ra + Be	6,7 лет	1,80; 2,62	0,827	3,5
Ra + Be	1620 лет	1,69; 1,75; 1,82; 2,09; 2,20; 2,42	—	3,0
Ra + D_2O	1620 лет	2,42	0,12	0,1

Таблица 40.4

Максимальное сечение $\sigma_{макс}$ реакции (γ, n) и положение пика $E_{макс}$ [2]

Мишень	$E_{макс}$, *Мэв*	$\sigma_{макс}$, *мбарн*
Li	17,5	4
^{12}C	22,5	8,3
^{16}O	24,2	11,4
^{14}N	24,2	2,8
^{24}Mg	20	8,5
^{25}Mg	20	16
^{29}Si	15	23
^{31}P	19	16,6
Cl	19	33
^{40}Ar	20	38
^{40}Ca	19,5	15
^{51}V	17,7	100
Cr	19,7	105
Ni	16,5	50
Br	16,0	175
^{86}Sr	16,0	155
^{88}Sr	16,8	200
^{89}Y	16,3	190
^{90}Zr	16,4	180
^{91}Zr	16,3	200
Ta	15	630
Pa	13,7	810
Bi	14,2	920

Таблица 40.5

Образование фотонейтронов в D_2O под действием долгоживущих продуктов деления ^{235}U [8]

Период полураспада	Число фотонейтронов на один нейтрон деления, 10^{-4}
53 *ч*	0,0106
4,4 *ч*	0,033
1,65 *ч*	0,241
27 *мин*	0,214
7,7 *мин*	0,346
2,4 *мин*	0,728
41 *сек*	2,11
2,5 *сек*	6,73
Полное количество фотонейтронов на один нейтрон деления	10,41

Источники нейтронов на основе тормозного излучения электронных ускорителей. При соударении быстрых электронов с ядрами мишени возникает интенсивное тормозное излучение. Если энергия γ-квантов E_γ тормозного излучения превосходит энергию связи нейтронов в ядрах вещества мишени, то могут быть получены нейтроны в результате реакции (γ, n). Выход нейтронов быстро растет с увеличением энергии электронов. При бомбардировке толстой урановой мишени электронами с энергией 40 *Мэв* выход нейтронов составляет $\sim 10^{14}$ *нейтрон/сек* при токе электронов 1 *ма* [7].

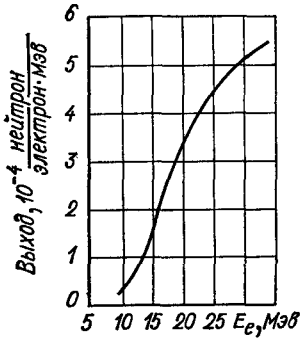


Рис. 40.2. Зависимость выхода нейтронов из толстой урановой мишени от энергии бомбардирующих электронов E_e [7].

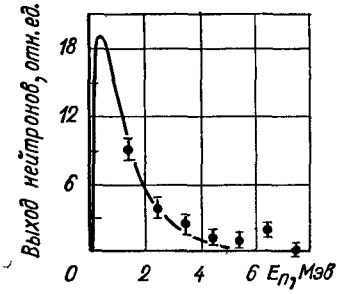


Рис. 40.3. Спектр фотонейтронов, испускаемых висмутом при облучении γ-квантами тормозного излучения с $E_\gamma = 22$ *Мэв* [2]. Сплошная кривая — расчет, точки — эксперимент.

40.3. РЕАКЦИИ (p, n)

Реакции (p, n) широко используются для получения моноэнергетических нейтронов. Этому способствуют низкие значения порога реакции $E_п$ и большие выходы нейтронов. Наиболее распространенные реакции (p, n) [7]:

$$^3H + p \rightarrow {}^3He + n - 0{,}764\ Мэв,$$

$$^7Li + p \rightarrow {}^7Be + n - 1{,}646\ Мэв.$$

При энергиях протонов $E_p > 2{,}378$ *Мэв* возможна реакция

$$^7Li + p \rightarrow {}^{7*}Be + n - 2{,}076\ Мэв;$$
$$\downarrow$$
$$^7Be + \gamma + 430\ кэв.$$

Доля реакции $^7Li + p \rightarrow {}^{7*}Be$ составляет $\sim 10\%$ основной реакции:

$$^{45}Sc + p \rightarrow {}^{45}Ti + n - 2{,}840\ Мэв;$$

$$^{51}V + p \rightarrow {}^{51}Cr + n - 1{,}536\ Мэв.$$

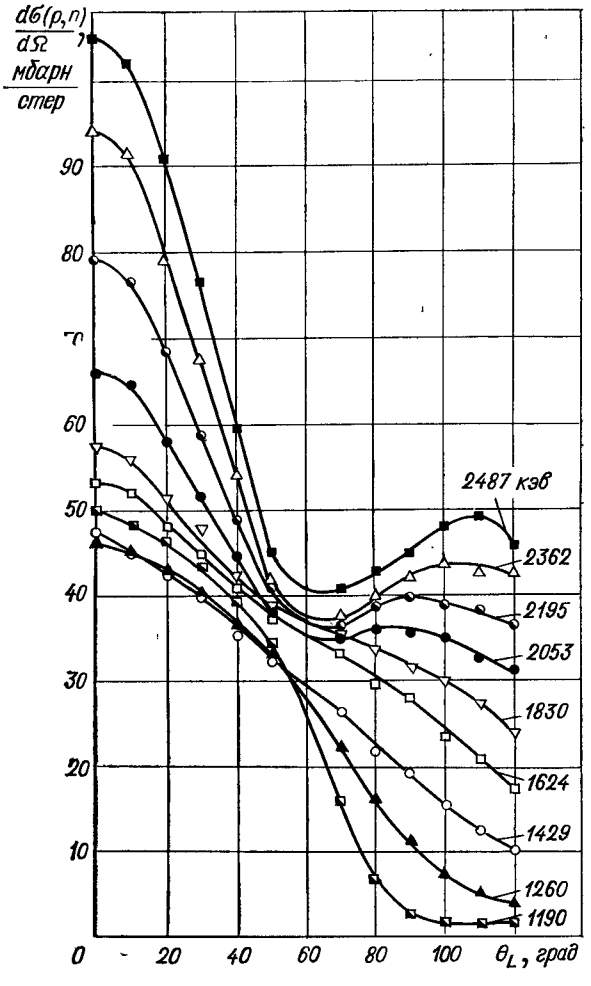


Рис. 40.4. Зависимость дифференциального сечения $d\sigma/d\Omega$ реакции $T(p, n)^3He$ в лабораторной системе координат [24, 27]. Угол разлета нейтронов θ_L и энергия протонов (*кэв*) относятся к лабораторной системе координат.

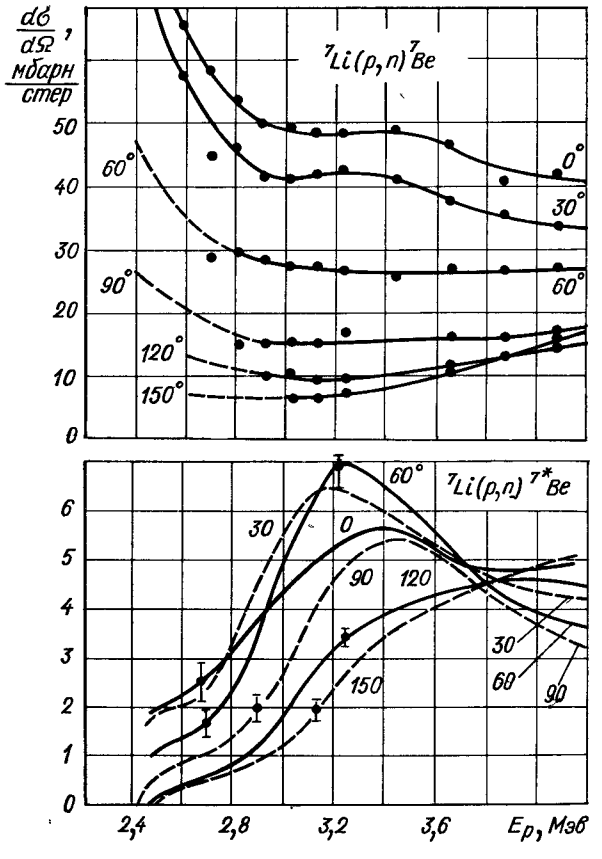


Рис. 40.5. Зависимость дифференциального сечения $d\sigma/d\Omega$ реакций $^7Li(p, n)^7Be$ [21] и $^7Li(p, n)^{7*}Be$ $E^* = 430$ *кэв* [21]. Угол разлета нейтронов θ_L и энергия протонов E_p относятся к лабораторной системе координат.

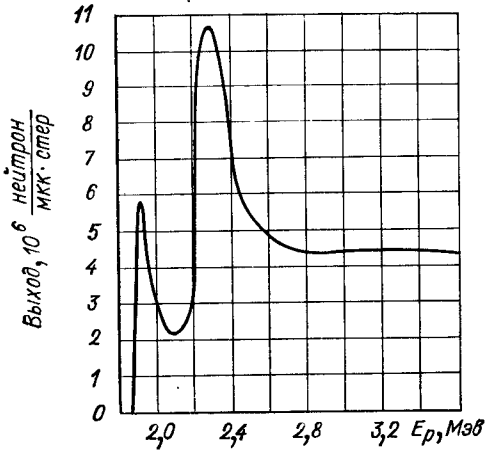


Рис. 40.6. Зависимость выхода нейтронов в реакции $^7Li(p, n)^7Be$ в направлении вперед от энергии протонов E_p [2].

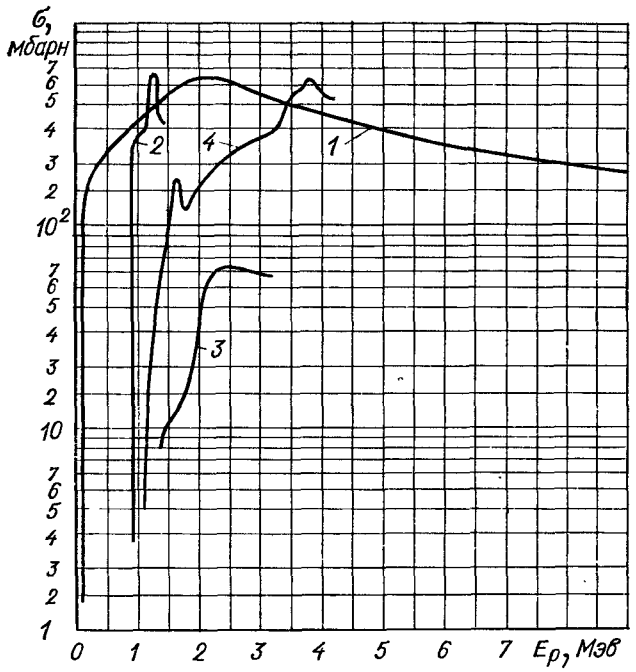


Рис. 40.7. Зависимость сечения σ от энергии протонов E_p для реакций:
1 — $T(p, n)^3He$ [20, 24];
2 — $^7Li(p, n)^7Be$ [2, 20];
3 — $^7Li(p, n)^{7*}Be$ ($E^* = 430$ *кэв*) [21];
4 — $^9Be(p, n)^9B$ [22].

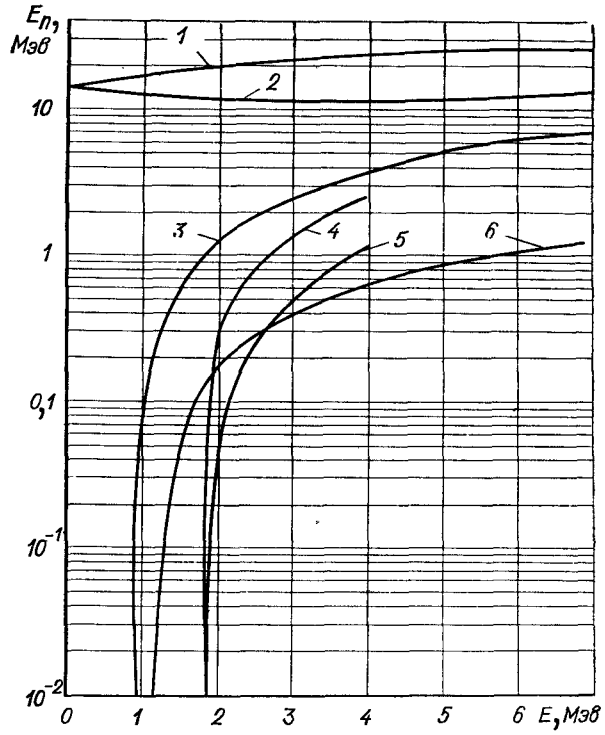


Рис. 40.8. Зависимость энергии E_n нейтронов, испускаемых под углом θ_L [2], от энергии бомбардирующей частицы E в различных реакциях:
1 — $^3H(d, n)^4He$, $\theta_L = 0°$;
2 — $^3H(d, n)^4He$, $\theta_L = 180°$;
3 — $^7Li(p, n)^7Be$, $\theta_L = 0°$;
4 — $^7Li(p, n)^7Be$, $\theta_L = 180°$;
5 — $^3H(p, n)^3He$, $\theta_L = 0°$;
6 — $^3H(p, n)^3He$, $\theta_L = 180°$.

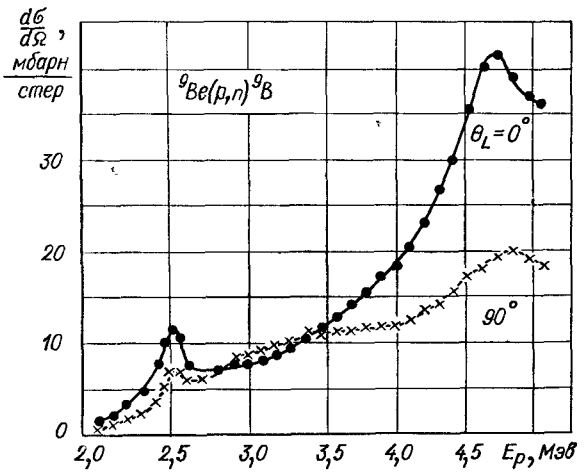


Рис. 40.9. Зависимость дифференциального сечения $d\sigma/d\Omega$ реакции $^9Be(p, n)^9B$ для различных углов вылета нейтронов θ_L в лабораторной системе координат от энергии протонов E_p [18].

Таблица 40.6

Значения пороговой энергии $E_п$ реакции (p, n)

Мишень	A	$E_п$, Мэв	Литература	Мишень	A	$E_п$, Мэв	Литература
H	2	3,339±0,015	[1]	Fe	56	5,451±0,010	[12]
	3	1,019±0,001	[1]	Co	59	1,895±0,005	[16]
Li	7	1,882±0,002	[1]	Ni	60	2,8	[2]
Be	9	2,059±0,002	[1]		61	2,8	[2]
B	10	4,835±0,025	[9]		64	2,4	[2]
	11	3,015±0,003	[1]	Cu	63	4,123±0,008	[11]
C	12	20,1±0,1	[1]		65	2,170±0,005	[11]
	13	3,236±0,003	[1]	Zn	66	5,9	[2]
	14	0,664±0,009	[1]		67	1,805±0,005	[16]
N	15	3,7808±0,0011	[10]		68	3,762±0,005	[16]
O	18	2,590±0,004	[1]		70	1,457±0,002	[15]
F	19	4,233±0,002	[10]	Ga	69	4,0	[2]
Na	23	5,053±0,010	[11]	As	75	1,669±0,002	[15]
Mg	25	5,289±0,025	[11]	Se	77	2,175±0,004	[17]
Al	27	5,800±0,008	[12]	Br	79	2,7	[2]
Cl	37	1,640±0,004	[1]	Rb	87	2,0	[2]
Ar	40	2,390±0,010	[13]	Sr	88	4,457±0,010	[12]
Sc	45	2,908±0,004	[14]	Y	89	3,6	[2]
Ti	48	4,905±0,010	[12]	Zr	90	7,0	[2]
V	51	1,562±0,006	[1]	Ru	99	2,4	[2]
Cr	52	5,4	[2]		101	1,4	[2]
Mn	55	1,034±0,002	[15]	Cd	111	1,6	[2]
					114	3,0	[2]
				Cs	133	1,0	[2]
				Ce	142	3,5	[2]

Энергия нейтронов, образующихся в реакции T (p, n) ^{3}He

Энергия нейтронов E_n, *Мэв*, представлена в зависимости от энергии налетающих протонов E_p и угла вылета нейтронов θ_L в лабораторной системе координат.

Массы покои участвующих в реакции частиц равны соответственно: T — 3,0170050 *а. е. м.*; p — 1,0081450 *а. е. м.*; ^{3}He — 3,0169860 *а. е. м.*; n — 1,0089861 *а. е. м.*

θ_L, *град*	Энергия протонов E_p, *Мэв*											
	1,1	1,2	1,3	1,4	1,5	1,6	1,7	1,8	1,9	2,0	2,1	2,2
0	0,2238	0,3497	0,4643	0,5741	0,6814	0,7869	0,8914	0,9951	1,0982	1,2008	1,3030	1,4050
5	0,2217	0,3474	0,4617	0,5713	0,6783	0,7836	0,8878	0,9912	1,0941	1,1964	1,2983	1,4001
10	0,2154	0,3406	0,4542	0,5630	0,6692	0,7737	0,8772	0,9798	1,0818	1,1835	1,2846	1,3856
15	0,2051	0,3294	0,4418	0,5493	0,6543	0,7575	0,8597	0,9610	1,0618	1,1622	1,2620	1,3617
20	0,1910	0,3143	0,4250	0,5308	0,6339	0,7354	0,8358	0,9354	1,0344	1,1330	1,2312	1,3291
30	0,1535	0,2739	0,3799	0,4809	0,5792	0,6759	0,7715	0,8663	0,9605	1,0543	1,1477	1,2409
40	0,1067	0,2242	0,3241	0,4188	0,5107	0,6010	0,6903	0,7789	0,8668	0,9545	0,0417	1,1287
50	0,0528	0,1710	0,2634	0,3504	0,4348	0,5177	0,5997	0,6809	0,7616	0,8421	0,9221	1,0020
60	—	0,1203	0,2039	0,2823	0,3584	0,4331	0,5070	0,5804	0,6533	0,7259	0,7982	0,8704
70	—	0,0773	0,1508	0,2199	0,2871	0,3534	0,4190	0,4843	0,5492	0,6139	0,6784	0,7427
80	—	0,0454	0,1074	0,1669	0,2252	0,2831	0,3406	0,3979	0,4550	0,5120	0,5689	0,6257
90	—	0,0251	0,0749	0,1248	0,1746	0,2245	0,2744	0,3243	0,3740	0,4240	0,4738	0,5236
100	—	0,0139	0,0522	0,0934	0,1354	0,1781	0,2210	0,2642	0,3075	0,3511	0,3946	0,4382
110	—	0,0082	0,0372	0,0708	0,1062	0,1427	0,1796	0,2171	0,2548	0,2928	0,3309	0,3691
120	—	0,0053	0,0275	0,0552	0,0851	0,1164	0,1485	0,1812	0,2142	0,2476	0,2812	0,3150
130	—	0,0037	0,0213	0,0445	0,0702	0,0974	0,1256	0,1544	0,1837	0,2135	0,2435	0,2737
140	—	0,0028	0,0173	0,0372	0,0597	0,0839	0,1091	0,1350	0,1614	0,1884	0,2155	0,2429
150	—	0,0023	0,0148	0,0324	0,0527	0,0746	0,0976	0,1214	0,1457	0,1705	0,1956	0,2210
160	—	0,0020	0,0132	0,0294	0,0481	0,0686	0,0901	0,1124	0,1353	0,1587	0,1824	0,2063
170	—	0,0019	0,0124	0,0277	0,0456	0,0652	0,0859	0,1073	0,1294	0,1519	0,1748	0,1979
180	—	0,0018	0,0121	0,0272	0,0448	0,0641	0,0845	0,1057	0,1274	0,1497	0,1723	0,1952

θ_L, *град*	2,3	2,4	2,5	2,6	2,7	2,8	2,9	3,0	3,1	3,2	3,3	3,4
0	1,5067	1,6082	1,7096	1,8109	1,9119	2,0131	2,1139	2,2148	2,3155	2,4164	2,5169	2,6177
5	1,5015	1,6028	1,7039	1,8050	1,9058	2,0066	2,1072	2,2079	2,3083	2,4089	2,5092	2,6097
10	1,4862	1,5868	1,6871	1,7874	1,8874	1,9875	2,0873	2,1872	2,2869	2,3867	2,4863	2,5860
15	1,4611	1,5604	1,6595	1,7585	1,8573	1,9561	2,0547	2,1533	2,2517	2,3503	2,4486	2,5470
20	1,4268	1,5243	1,6217	1,7190	1,8160	1,9131	2,0100	2,1068	2,2036	2,3004	2,3970	2,4937
30	1,3339	1,4266	1,5193	1,6118	1,7041	1,7965	1,8886	1,9808	2,0728	2,1649	2,2568	2,3488
40	1,2155	1,3022	1,3887	1,4751	1,5613	1,6475	1,7336	1,8196	1,9056	1,9916	2,0774	2,1633
50	1,0817	1,1612	1,2406	1,3199	1,3991	1,4783	1,5573	1,6363	1,7152	1,7942	1,8730	1,9518
60	0,9425	1,0143	1,0861	1,1578	1,2295	1,3011	1,3725	1,4440	1,5154	1,5868	1,6581	1,7295
70	0,8070	0,8712	0,9353	0,9993	1,0633	1,1273	1,1911	1,2549	1,3188	1,3826	1,4463	1,5101
80	0,6825	0,7392	0,7959	0,8526	0,9092	0,9658	1,0223	1,0789	1,1354	1,1920	1,2484	1,3050
90	0,5735	0,6233	0,6732	0,7230	0,7728	0,8227	0,8725	0,9223	0,9721	1,0219	1,0717	1,1216
100	0,4819	0,5255	0,5693	0,6131	0,6569	0,7007	0,7446	0,7884	0,8323	0,8762	0,9201	0,9640
110	0,4075	0,4459	0,4845	0,5231	0,5617	0,6004	0,6391	0,6778	0,7166	0,7554	0,7942	0,8331
120	0,3490	0,3830	0,4172	0,4515	0,4858	0,5202	0,5546	0,5891	0,6237	0,6582	0,6928	0,7274
130	0,3041	0,3346	0,3653	0,3961	0,4269	0,4579	0,4889	0,5199	0,5510	0,5822	0,6134	0,6446
140	0,2706	0,2984	0,3264	0,3544	0,3826	0,4109	0,4392	0,4676	0,4960	0,5245	0,5531	0,5816
150	0,2466	0,2724	0,2983	0,3244	0,3506	0,3768	0,4032	0,4296	0,4560	0,4826	0,5091	0,5358
160	0,2306	0,2549	0,2785	0,3042	0,3290	0,3539	0,3788	0,4039	0,4290	0,4542	0,4794	0,5047
170	0,2214	0,2449	0,2687	0,2925	0,3165	0,3406	0,3648	0,3891	0,4134	0,4378	0,4622	0,4867
180	0,2184	0,2416	0,2651	0,2887	0,3125	0,3362	0,3602	0,3842	0,4083	0,4324	0,4566	0,4808

θ_L, град	Энергия протонов E_p, Мэв											
	3,5	3,6	3,7	3,8	3,9	4,0	4,1	4,2	4,3	4,4	4,5	4,6
0	2,7181	2,8188	2,9192	3,0198	3,1201	3,2206	3,3209	3,4214	3,5216	3,6220	3,7223	3,8227
5	2,7099	2,8103	2,9105	3,0108	3,1109	3,2111	3,3112	3,4114	3,5114	3,6115	3,7115	3,8117
10	2,6854	2,7850	2,8845	2,9840	3,0833	3,1828	3,2821	3,3816	3,4808	3,5802	3,6794	3,7788
15	2,6452	2,7436	2,8418	2,9400	3,0381	3,1363	3,2344	3,3326	3,4805	3,5287	3,6266	3,7248
20	2,5902	2,6868	2,7833	2,8798	2,9762	3,0727	3,1690	3,2655	3,3617	3,4581	3,5544	3,6508
30	2,4406	2,5325	2,6243	2,7161	2,8078	2,8996	2,9912	3,0830	3,1745	3,2662	3,3578	3,4495
40	2,2491	2,3349	2,4206	2,5063	2,5920	2,6777	2,7632	2,8489	2,9344	3,0201	3,1056	3,1912
50	2,0306	2,1093	2,1881	2,2668	2,3454	2,4241	2,5027	2,5814	2,6599	2,7385	2,8170	2,8957
60	1,8007	1,8720	1,9432	2,0144	2,0856	2,1568	2,2279	2,2991	2,3702	2,4413	2,5124	2,5835
70	1,5738	1,6375	1,7012	1,7649	1,8285	1,8922	1,9558	2,0194	2,0830	2,1466	2,2102	2,2738
80	1,3614	1,4179	1,4743	1,5308	1,5872	1,6436	1,7000	1,7565	1,8128	1,8692	1,9256	1,9820
90	1,1714	1,2212	1,2710	1,3208	1,3706	1,4204	1,4702	1,5200	1,5698	1,6195	1,6692	1,7191
100	1,0079	1,0518	1,0957	1,1397	1,1836	1,2275	1,2714	1,3154	1,3593	1,4032	1,4472	1,4912
110	0,8719	0,9108	0,9497	0,9885	1,0274	1,0663	1,1052	1,1442	1,1831	1,2220	1,2609	1,2999
120	0,7621	0,7967	0,8315	0,8661	0,9008	0,9356	0,9703	1,0051	1,0398	1,0746	1,1094	1,1441
130	0,6759	0,7071	0,7385	0,7698	0,8011	0,8325	0,8638	0,8952	0,9266	0,9580	0,9895	1,0209
140	0,6103	0,6389	0,6676	0,6963	0,7250	0,7537	0,7825	0,8113	0,8400	0,8688	0,8976	0,9265
150	0,5624	0,5891	0,6158	0,6426	0,6693	0,6961	0,7229	0,7497	0,7766	0,8034	0,8303	0,8572
160	0,5300	0,5553	0,5807	0,6061	0,6315	0,6569	0,6824	0,7079	0,7334	0,7589	0,7844	0,8100
170	0,5112	0,5357	0,5603	0,5849	0,6096	0,6342	0,6589	0,6836	0,7083	0,7330	0,7578	0,7826
180	0,5051	0,5293	0,5537	0,5780	0,6024	0,6268	0,6512	0,6757	0,7001	0,7246	0,7491	0,7736

θ_L, град	4,7	4,8	4,9	5,0	5,1	5,2	5,3	5,4	5,5	5,6	5,7	5,8
0	3,9229	4,0233	4,1234	4,2237	4,3240	4,4242	4,5245	4,6246	4,7248	4,8249	4,9252	5,0254
5	3,9116	4,0117	4,1116	4,2116	4,3117	4,4116	4,5116	4,6115	4,7115	4,8114	4,9113	5,0113
10	3,8780	3,9773	4,0765	4,1757	4,2750	4,3741	4,4734	4,5725	4,6718	4,7709	4,8701	4,9693
15	3,8227	3,9208	4,0187	4,1167	4,2147	4,3126	4,4106	4,5085	4,6065	4,7043	4,8023	4,9002
20	3,7470	3,8434	3,9396	4,0358	4,1321	4,2283	4,3246	4,4207	4,5170	4,6131	4,7094	4,8056
30	3,5410	3,6327	3,7242	3,8157	3,9074	3,9988	4,0904	4,1819	4,2734	4,3649	4,4564	4,5479
40	3,2767	3,3623	3,4477	3,5332	3,6188	3,7042	3,7897	3,8751	3,9606	4,0460	4,1315	4,2169
50	2,9742	3,0528	3,1312	3,2097	3,2883	3,3667	3,4453	3,5237	3,6022	3,6806	3,7591	3,8375
60	2,6546	2,7257	2,7967	3,8677	2,9388	3,0098	3,0808	3,1518	3,2229	3,2938	3,3648	3,4358
70	2,3373	2,4009	2,4645	2,5280	2,5915	2,6550	2,7186	2,7821	2,8456	2,9091	2,9726	3,0361
80	2,0384	2,0948	2,1512	2,2075	2,2638	2,3202	2,3766	2,4329	2,4892	2,5456	2,6019	2,6582
90	1,7689	1,8187	1,8685	1,9182	1,9680	2,0178	2,0675	2,1173	2,1670	2,2168	2,2665	2,3163
100	1,5351	1,5790	1,6230	1,6669	1,7108	1,7548	1,7987	1,8427	1,8866	1,9305	1,9745	2,0184
110	1,3389	1,3778	1,4168	1,4556	1,4946	1,5336	1,5725	1,6115	1,6504	1,6894	1,7283	1,7673
120	1,1790	1,2137	1,2486	1,2833	1,3181	1,3529	1,3877	1,4226	1,4574	1,4922	1,5270	1,5618
130	1,0524	1,0838	1,1153	1,1467	1,1781	1,2096	1,2411	1,2726	1,3041	1,3356	1,3670	1,3985
140	0,9553	0,9841	1,0130	1,0418	1,0707	1,0996	1,1284	1,1573	1,1862	1,2151	1,2440	1,2729
150	0,8841	0,9110	0,9379	0,9648	0,9917	1,0187	1,0456	1,0726	1,0995	1,1265	1,1534	1,1804
160	0,8356	0,8611	0,8867	0,9123	0,9378	0,9635	0,9891	1,0147	1,0403	1,0660	1,0916	1,1172
170	0,8074	0,8322	0,8570	0,8817	0,9066	0,9314	0,9562	0,9811	1,0059	1,0308	1,0556	1,0805
180	0,7982	0,8227	0,8472	0,8717	0,8963	0,9209	0,9455	0,9701	0,9946	1,0193	1,0438	1,0684

θ_L, град	5,9	6,0	6,1	6,2	6,3	6,4	6,5	6,6	6,8	7,0	7,2	7,4
0	5,1255	5,2257	5,3258	5,4260	5,5262	5,6263	5,7265	5,8265	6,0269	6,2271	6,4273	6,6275
5	5,1111	5,2111	5,3109	5,4109	5,5108	5,6107	5,7106	5,8104	6,0103	6,2099	6,4096	6,6093
10	5,0684	5,1676	5,2666	5,3658	5,4650	5,5640	5,6633	5,7623	5,9606	6,1587	6,3569	6,5550
15	4,9980	5,0960	5,1938	5,2917	5,3897	5,4875	5,5854	5,6832	5,8790	6,0746	6,2703	6,4659
20	4,9017	4,9979	5,0940	5,1902	5,2864	5,3825	5,4787	5,5748	5,7671	5,9593	6,1515	6,3437
30	4,6394	4,7309	4,8223	4,9138	5,0053	5,0967	5,1882	5,2796	5,4625	5,6453	5,8281	6,0109
40	4,3023	4,3878	4,4731	4,5586	4,6440	4,7294	4,8148	4,9001	5,0709	5,2416	5,4123	5,5830
50	3,9159	3,9944	4,0728	4,1512	4,2297	4,3080	4,3865	4,4648	4,6217	4,7784	4,9351	5,0918

θ_L, град	Энергия протонов E_p, Мэв											
	5,9	6,0	6,1	6,2	6,3	6,4	6,5	6,6	6,8	7,0	7,2	7,4
60	3,5068	3,5778	3,6487	3,7197	3,7907	3,8616	3,9326	4,0035	4,1454	4,2873	4,4291	4,5709
70	3,0096	3,1631	3,2265	3,2900	3,3535	3,4170	3,4805	3,5439	3,6708	3,7977	3,9245	4,0514
80	2,7145	2,7708	2,8272	2,8835	2,9398	2,9961	3,0524	3,1087	3,2213	3,3338	3,4464	3,5589
90	2,3660	2,4158	2,4655	2,5152	2,5650	2,6147	2,6645	2,7142	2,8136	2,9131	3,0125	3,1119
100	2,0623	2,1062	2,1502	2,1941	2,2380	2,2820	2,3259	2,3698	2,4577	2,5455	2,6333	2,7212
110	1,8063	1,8452	1,8842	1,9231	1,9621	2,0010	2,0400	2,0790	2,1569	2,2348	2,3127	2,3906
120	1,5967	1,6315	1,6663	1,7011	1,7360	1,7708	1,8057	1,8405	1,9101	1,9798	2,0495	2,1191
130	1,4300	1,4615	1,4931	1,5245	1,5560	1,5876	1,6191	1,6506	1,7136	1,7766	1,8396	1,9027
140	1,3018	1,3307	1,3596	1,3885	1,4174	1,4463	1,4753	1,5042	1,5620	1,6199	1,6777	1,7356
150	1,2074	1,2343	1,2613	1,2883	1,3153	1,3423	1,3693	1,3963	1,4502	1,5042	1,5583	1,6123
160	1,1429	1,1685	1,1942	1,2198	1,2455	1,2712	1,2968	1,3225	1,3738	1,4252	1,4765	1,5279
170	1,1054	1,1302	1,1551	1,1800	1,2048	1,2298	1,2547	1,2796	1,3293	1,3791	1,4289	1,4788
180	1,0931	1,1177	1,1423	1,1669	1,1915	1,2162	1,2408	1,2655	1,3147	1,3640	1,4133	1,4626

θ_L, град	7,6	7,8	8,0	8,5	9,0	9,5	10,0	10,5	11,0	11,5	12,0	12,5
0	6,8278	7,0279	7,2281	7,7286	8,2288	8,7292	9,2295	9,7297	10,2300	10,7303	11,2305	11,7306
5	6,8091	7,0087	7,2083	7,7076	8,2065	8,7056	9,2046	9,7036	10,2026	10,7015	11,2004	11,6993
10	6,7533	6,9514	7,1495	7,6449	8,1401	8,6353	9,1305	9,6256	10,1208	10,6159	11,1110	11,6060
15	6,6617	6,8572	7,0528	7,5420	8,0308	8,5198	9,0086	9,4975	9,9864	10,4752	10,9640	11,4527
20	6,5360	6,7282	6,9203	7,4009	7,8811	8,3614	8,8417	9,3219	9,8021	10,2823	10,7625	11,2425
30	6,1938	6,3766	6,5593	7,0163	7,4731	7,9299	8,3866	8,8433	9,3000	9,7566	10,2131	10,6696
40	5,7538	5,9244	6,0950	6,5217	6,9481	7,3746	7,8010	8,2273	8,6533	9,0799	9,5060	9,9321
50	5,2486	4,4053	5,5619	5,9537	6,3451	6,7367	7,1281	7,5194	7,9108	8,3020	8,6932	9,0843
60	4,7128	4,8545	4,9963	5,3508	5,7050	6,0592	6,4134	6,7675	7,1215	7,4754	7,8293	8,1831
70	4,1782	4,3050	4,4318	4,7489	5,0657	5,3825	5,6993	6,0159	6,3325	6,6490	6,9655	7,2818
80	3,6715	3,7839	3,8964	4,1777	4,4588	4,7398	5,0208	5,3017	5,5825	5,8633	6,1440	6,4246
90	3,2113	3,3107	3,4101	3,6586	3,9069	4,1551	4,4034	4,6515	4,8996	5,1476	5,3956	5,6434
100	2,8090	2,8967	2,9846	3,2040	3,4234	3,6427	3,8621	4,0813	4,3004	4,5195	4,7386	4,9575
110	2,4685	2,5463	2,6242	2,8189	3,0135	3,2081	3,4027	3,5972	3,7916	3,9860	4,1803	4,3745
120	2,1888	2,2584	2,3281	2,5022	2,6763	2,8503	3,0244	3,1983	3,3722	3,5461	3,7199	3,8936
130	1,9657	2,0287	2,0917	2,2493	2,4067	2,5642	2,7217	2,8791	3,0365	3,1938	3,3511	3,5083
140	1,7934	1,8512	1,9091	2,0537	2,1983	2,3429	2,4875	2,6320	2,7765	2,9210	3,0654	3,2098
150	1,6663	1,7203	1,7743	1,9093	2,0443	2,1793	2,3143	2,4493	2,5842	2,7191	2,8539	2,9887
160	1,5792	1,6306	1,6820	1,8104	1,9388	2,0672	2,1956	2,3239	2,4523	2,5806	2,7088	2,8370
170	1,5286	1,5784	1,6282	1,7528	1,8773	2,0018	2,1264	2,2509	2,3754	2,4998	2,6242	2,7486
180	1,5119	1,5612	1,6106	1,7339	1,8571	1,9804	2,1037	2,2269	2,3501	2,4733	2,5964	2,7195

θ_L, град	13,0	13,5	14,0	14,5	15,0	16,0	17,0	18,0	19,0	20,0	21,0	22,0	23,0	24,0	25,0
0	12,2307	12,7309	13,2311	13,7312	14,2312	15,2316	16,2316	17,2319	18,2320	19,2322	20,2322	21,2323	22,2325	23,2326	24,2326
5	12,1981	12,6970	13,1959	13,6947	14,1934	15,1912	16,1887	17,1863	18,1839	19,1815	20,1789	21,1764	22,1740	23,1714	24,1689
10	12,1010	12,5960	13,0911	13,5861	14,0810	15,0710	16,0608	17,0507	18,0406	19,0304	20,0202	21,0099	21,9997	22,9894	23,9791
15	11,9414	12,4301	12,9189	13,4075	13,8961	14,8735	15,8506	16,8279	17,8050	18,7822	19,7592	20,7362	21,7133	22,6902	23,6671
20	11,7225	12,2026	12,6827	13,1627	13,6426	14,6027	15,5624	16,5223	17,4821	18,4418	19,4014	20,3610	21,3206	22,2801	23,2395
30	11,1261	11,5825	12,0390	12,4954	12,9517	13,8644	14,7769	15,6894	16,6017	17,5140	18,4260	19,3381	20,2501	21,1619	22,0737
40	10,3582	10,7842	11,2102	11,6362	12,0620	12,9138	13,7653	14,6168	15,4680	16,3191	17,1701	18,0209	18,8716	19,7221	20,5725
50	9,4753	9,8664	10,2573	10,6482	11,0390	11,8206	12,6019	13,3831	14,1641	14,9449	15,7254	16,5059	17,2861	18,0661	18,8459
60	8,5368	8,8906	9,2442	9,5978	9,9512	10,6581	11,3647	12,0711	12,7773	13,4832	14,1888	14,8943	15,5996	16,3046	17,0094
70	7,5981	7,9144	8,2306	8,5467	8,8627	9,4947	10,1263	10,7577	11,3889	12,0198	12,6504	13,2808	13,9110	14,5409	15,1705
80	6,7051	6,9857	7,2661	7,5465	7,8267	8,3871	8,9472	9,5071	10,0667	10,6261	11,1851	11,7439	12,3025	12,8607	13,4188
90	5,8912	6,1391	6,3867	6,6344	6,8819	7,3768	7,8715	8,3659	8,8600	9,3539	9,8475	10,3408	10,8339	11,3267	11,8193
100	5,1764	5,3953	5,6141	5,8329	6,0515	6,4886	6,9255	7,3622	7,7986	8,2347	8,6706	9,1062	9,5416	9,9767	10,4115
110	4,5688	4,7630	4,9570	5,1511	5,3451	5,7328	6,1204	6,5077	6,8948	7,2816	7,1681	8,0545	8,4406	8,8264	9,2120
120	4,0673	4,2410	4,4146	4,5882	4,7617	5,1085	5,4551	5,8015	6,1477	6,4936	6,4392	7,1847	7,5300	7,8749	8,2197
130	3,6655	3,8227	3,9798	4,1369	4,2939	4,6077	4,9213	5,2348	5,5480	5,8610	6,1738	6,4864	6,7987	7,1108	7,4228
140	3,3541	3,4985	3,6426	3,7869	3,9311	4,2192	4,5072	4,7950	5,0826	5,3700	5,6571	5,9441	6,2309	6,5174	6,8038
150	3,1235	3,2583	3,3929	3,5271	3,6622	3,9313	4,2002	4,4689	4,7375	5,0058	5,2739	5,5419	5,8096	6,0772	6,3445
160	2,9652	3,0935	3,2215	3,3496	3,4777	3,7336	3,9894	4,2450	4,5004	4,7557	5,0107	5,2655	5,5202	5,7746	6,0289
170	2,8729	2,9973	3,1215	3,2458	3,3700	3,6182	3,8664	4,1143	4,3621	4,6096	4,8570	5,1042	5,3512	5,5980	5,8447
180	2,8426	2,9657	3,0887	3,2117	3,3346	3,5803	3,8259	4,0714	4,3166	4,5616	4,8065	5,0512	5,2957	5,5400	5,7841

40.4 РЕАКЦИИ (*d*, *n*)

Почти все реакции (*d*, *n*), используемые для получения нейтронов, сильно экзотермичны. Реакции не имеют порогов, и нейтроны могут быть получены при энергиях дейтонов, приближающихся к нулю. Исключение составляет реакция ^{12}C (*d*, *n*) ^{13}N, которая эндотермична с $Q = -0{,}282$ *Мэв* и порогом $E_п = 0{,}33$ *Мэв* [2]. Для получения моноэнергетических нейтронов наиболее пригодны реакции D (*d*, *n*) ^3He и T(*d*, *n*) ^4He. Например, в последней реакции можно получить $\sim 10^{11}$ *нейтрон/сек* при бомбардировке ^3H — Ti мишени дейтонами с энергией 300 *кэв* и током 0,5 *ма* [7]. Наиболее распространенные реакции (*d*, *n*) [7]:

$$^2H + {}^2H \rightarrow {}^3He + n + 3{,}265\ Мэв;$$

$$^2H + {}^3H \rightarrow {}^4He + n + 17{,}588\ Мэв;$$

$$^2H + {}^9Be \rightarrow {}^{10}B + n + 4{,}362\ Мэв;$$

$$^2H + {}^7Li \rightarrow {}^8Be + n + 15{,}028\ Мэв;$$

$$^2H + {}^7Li \rightarrow 2{}^4He + n + 15{,}122\ Мэв;$$

$$^2H + {}^7Li \rightarrow {}^5He + {}^4He + 14{,}165\ Мэв;$$
$$\downarrow$$
$$^4He + n + 0{,}958\ Мэв.$$

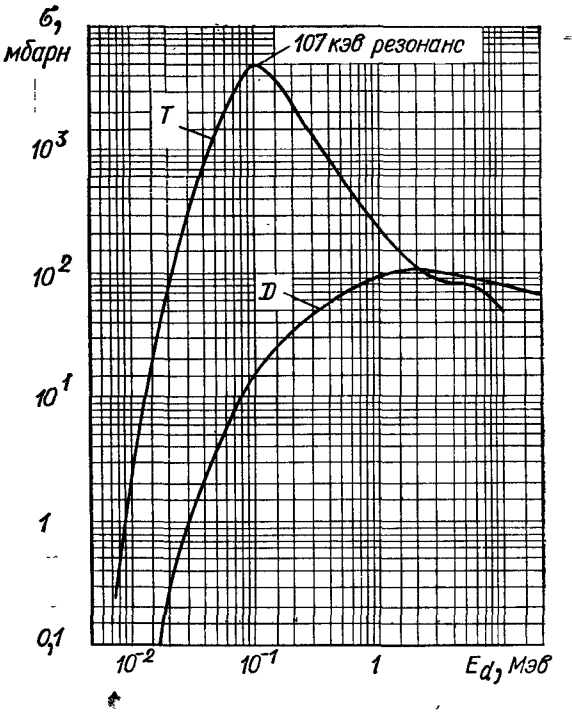


Рис. 40.10. Зависимость сечения σ реакций D(*d*, *n*)^{3}He [2, 7, 24, 28] и T(*d*, *n*)^{4}He [7, 24, 25, 28] от энергии дейтонов E_d.

Таблица 40.8

Нормированное к единице при $\theta = 0°$ угловое распределение нейтронов [25] в реакции T (*d*, *n*) ^{4}He
В скобках даны истинные значения $\sigma(\theta = 0°)$, *мбарн/стер*.

θ, *град*	Энергия дейтонов E_d, *Мэв*							
	0,20	0,50	0,75	1,00	1,25	1,50	1,75	2,00
0	(218)	(57,9)	(33,7)	(23,8)	(19,4)	(17,1)	(15,6)	(14,7)
	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000
15	0,998	0,996	0,997	0,996	0,993	0,989	0,980	0,966
30	0,990	0,988	0,989	0,982	0,974	0,958	0,927	0,882
45	0,980	0,972	0,974	0,958	0,941	0,910	0,861	0,806
60	0,967	0,950	0,948	0,922	0,899	0,853	0,793	0,722
75	0,951	0,923	0,913	0,877	0,844	0,791	0,730	0,658
90	0,934	0,890	0,870	0,825	0,786	0,730	0,671	0,597
105	0,918	0,856	0,824	0,769	0,727	0,673	0,618	0,548
120	0,903	0,823	0,777	0,717	0,673	0,624	0,570	0,511
135	0,890	0,794	0,737	0,671	0,629	0,586	0,536	0,485
150	0,880	0,770	0,705	0,635	0,594	0,558	0,510	0,464
165	0,875	0,757	0,683	0,613	0,572	0,541	0,496	0,450
180	0,873	0,750	0,677	0,606	0,564	0,535	0,492	0,445

θ, *град*	Энергия дейтонов E_d, *Мэв*							
	2,50	3,00	3,50	4,00	4,50	5,00	6,00	7,00
0	(15,0)	(16,4)	(18,4)	(20,7)	(22,9)	(24,5)	(25,8)	(25,7)
	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000
7,5	0,981	0,976	0,966	0,960	0,956	0,950	0,937	0,923
15	0,931	0,910	0,876	0,859	0,842	0,821	0,781	0,737
22,5	0,860	0,821	0,760	0,726	0,698	0,661	0,591	0,509
30	0,790	0,733	0,650	0,603	0,564	0,518	0,440	0,344
45	0,678	0,602	0,504	0,443	0,399	0,361	0,317	0,297
60	0,601	0,517	0,418	0,355	0,314	0,289	0,283	0,284
75	0,536	0,438	0,338	0,274	0,230	0,206	0,197	0,201
90	0,479	0,379	0,286	0,222	0,182	0,156	0,137	0,125
105	0,443	0,356	0,284	0,225	0,194	0,171	0,143	0,128
120	0,427	0,356	0,302	0,251	0,231	0,208	0,176	0,156
135	0,415	0,355	0,315	0,271	0,255	0,227	0,187	0,167
150	0,404	0,351	0,317	0,281	0,262	0,229	0,186	0,167
165	0,395	0,346	0,318	0,286	0,263	0,226	0,186	0,168
180	0,391	0,346	0,319	0,288	0,263	0,224	0,185	0,169

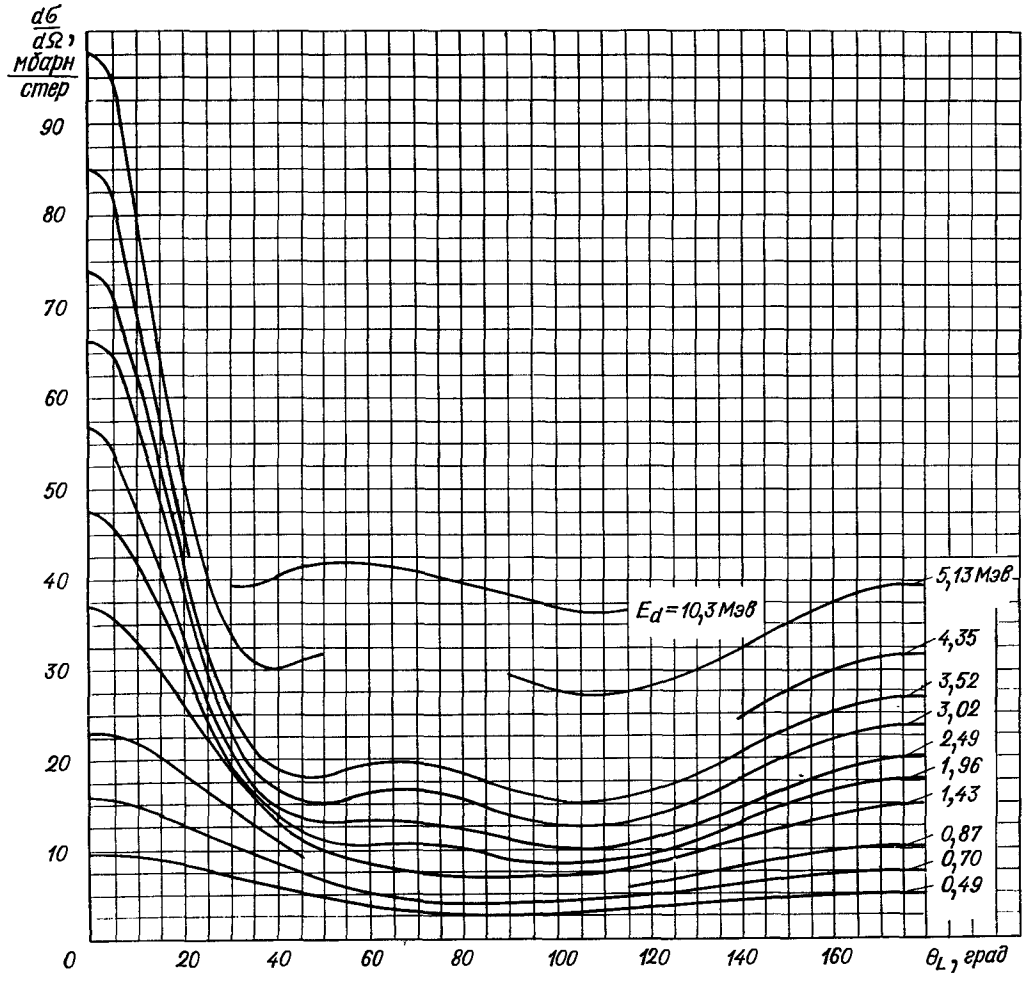


Рис. 40.11. Зависимость дифференциального сечения $d\sigma/d\Omega$ реакции D(d, n)^{3}He от угла раздела нейтронов θ_L в лабораторной системе координат [24].

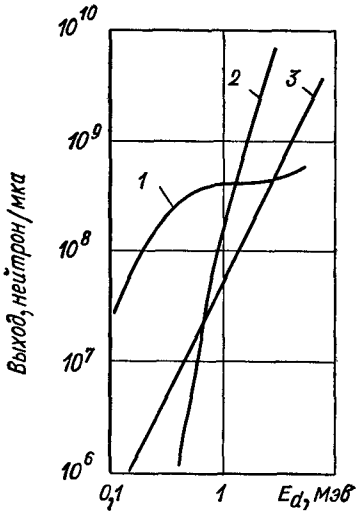


Рис. 40.12. Зависимость выхода нейтронов из толстых мишеней для реакции (d, n) от энергии дейтона E_d [7]: *1* — мишень ^{3}H — Zr; *2* — мишень ^{9}Be; *3* — мишень D_2O (лед).

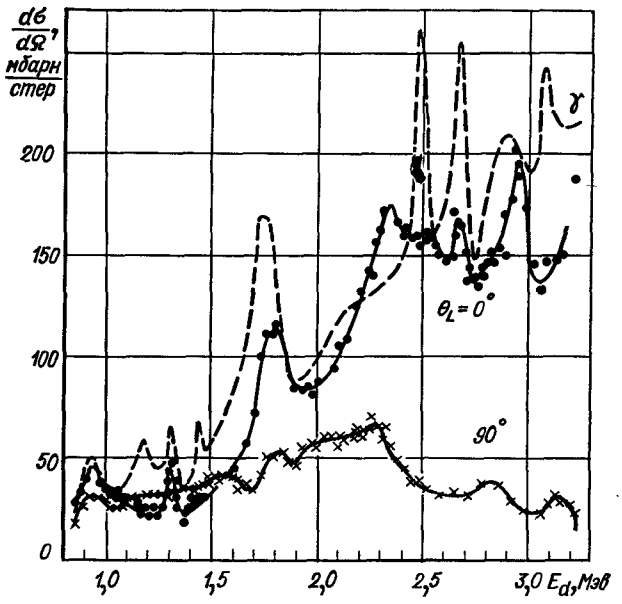


Рис. 40.13. Зависимость дифференциального сечения $d\sigma/d\Omega$ реакции $^{12}C(d, n)^{13}N$ при углах вылета нейтронов 0 и 90° в лабораторной системе координат от энергии дейтона [19]. Штриховой линией показана кривая выхода γ-квантов в относительных единицах.

40.5. РЕАКЦИИ (α, n)

Реакции (α, n) часто используются для получения нейтронов с энергиями порядка нескольких мегаэлектронвольт. Источником нейтронов обычно служит смесь α-излучателя и какого-либо легкого элемента: Be, B, F и т. п. Источники имеют размеры ~ 1—3 *см* и содержат до нескольких десятков кюри α-радиоактивного препарата [2]. Источники, содержащие ^{210}Po и ^{239}Pu, характерны тем, что имеют низкую мощность γ-излучения, приблизительно в 1000 раз меньшую, чем у источников на основе Ra с эквивалентной интенсивностью нейтронов [2].

Для α-частиц ^{210}Po реакция образования нейтронов с мишенью из бериллия происходит согласно уравнению

$$^{9}Be + \alpha \rightarrow {}^{12}C + n + 5{,}7\ Мэв.$$

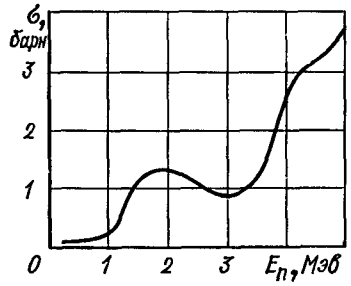


Рис. 40.14. Зависимость сечения реакции $^{9}Be(\alpha, n)^{12}C$ от энергии α-частиц [7].

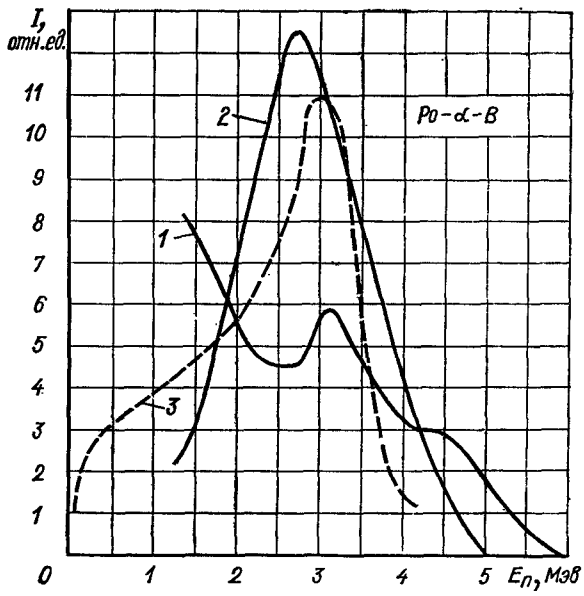


Рис. 40.15. Спектр Po-α-B-источника нейтронов [6]: *1* — Po-α-^{10}B; *2* — Po-α-^{11}B; *3* — естественная смесь изотопов. По оси ординат отложена интенсивность *I*; по оси абсцисс — энергия нейтронов.

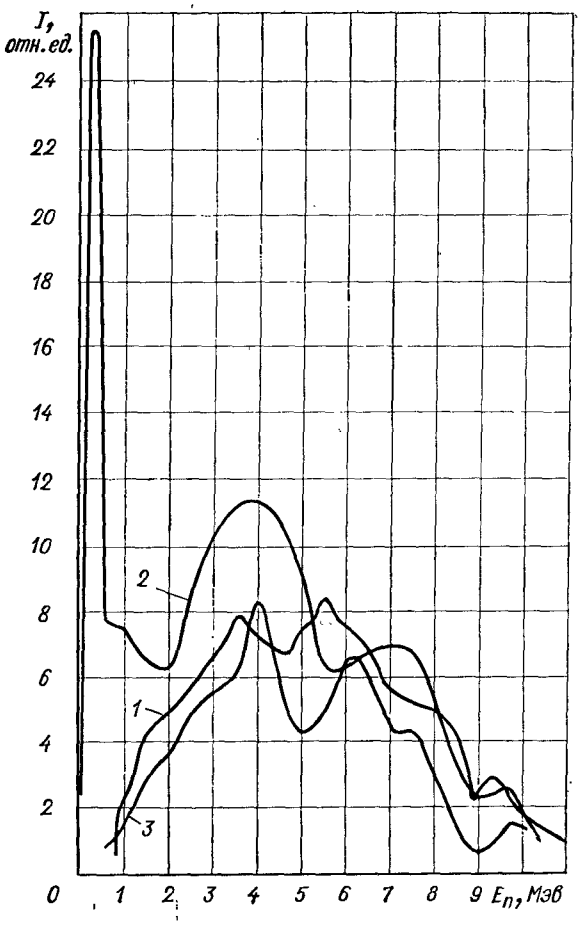


Рис. 40.16. Спектры Po-α-Be различных источников нейтронов:
1 — Po-α-Be [2]; *2* — Pu-α-Be [2, 26]; *3* — Ra-α-Be [2]. По оси ординат отложена интенсивность *1*; по оси абсцисс — энергия нейтронов E_n.

Таблица 40.10

Выход нейтронов из толстых Po-мишеней при бомбардировке их α-частицами [6]

Мишень	Выход, *нейтрон/10^6 α-частиц*	Мишень	Выход, *нейтрон/10^6 α-частиц*
Li	2,6	Na	1,50
Be	80,0	Mg	1,40
B	24,0	Al	0,25
C	0,11	Si	0,16
N	0,01	Cl	0,11
O	0,07	Ar	0,38
F	12,0		

Таблица 40.9

Выход нейтронов из толстых Be и B мишеней [6]

α-Излучатель	Энергия α-частиц E, *Мэв*	Выход, *нейтрон/10^6α-частиц*	
		B-мишень	Be-мишень
U	4,18	—	40
Ra	4,791	15	55
RaA(^{218}Po)	5,998	40	120
RaC′(^{214}Po)	7,680	100	200
RaF(^{210}Po)	5,298	24	80
Rn	5,486	30	90
^{239}Pu[2]	5,1	—	40
^{241}Am[2]	5,4	—	50÷70

Таблица 40.11

Параметры резонансов реакции $^{13}C(\alpha, n)^{16}O$[30]

E_α — энергия α-частиц, при которой имеет место резонанс; Γ — ширина резонанса; $\sigma(\theta_L)$ — дифференциальное сечение рассеяния в лабораторной системе координат.

E_α, *Мэв*	Γ, *кэв*	$\sigma(\theta_L)$, *мбарн/стер*	
		$0° < \theta_L < 10°$	$80° < \theta_L < 100°$
2,09	100	2,7	4,6
2,25	100	6,7	6,2
2,42	80	14	6,8
2,605	$\leqslant 6$	$\geqslant 12$	$\geqslant 15$
2,69	10	24	10
2,775	10	10	7,5
2,825	$\leqslant 7$	$\geqslant 36$	$\geqslant 20$
3,09	90	9,1	4,3
3,33	150	20	7,6
3,42	30	17	7,4
3,67	$\leqslant 8$	$\geqslant 3,5$	$\geqslant 2,1$
3,73	$\leqslant 5$	$\geqslant 17$	$\geqslant 8$
4,125	15	7,4	2,8
4,42	25	28	5,7
4,50	70	6	—
4,63	15	38	9,1
4,75	200	6,8	3,5
5,05	65	30	9,5

40.6 РЕПЕРНЫЕ ТОЧКИ, ИСПОЛЬЗУЕМЫЕ ДЛЯ КАЛИБРОВКИ ПУЧКОВ УСКОРИТЕЛЕЙ

Таблица 40.12

Энергии резонанса или порога E, используемые для калибровки пучков ускорителей [10]

Реакция	E, *кэв*	Ширина резонанса Г, *кэв*
$^{11}B(p, \gamma)^{12}O$	163,1±0,5	6,3±1,0
$^{19}F(p, \alpha\gamma)^{16}O$	340,5±0,2	2,7±0,4
$^{27}Al(p, \gamma)^{28}Si$	992,0±0,5	0,08±0,04
$^{19}F(p, \alpha\gamma)^{16}O$	872,4±0,4	4,5±0,3
$^{7}Li(p, n)^{7}Be$	1880,7±0,4	—
$^{7}Li(p, \gamma)^{8}Be$	441,2±0,3	12,2±0,5
$^{9}Be(p, \gamma)^{10}B$	1083,9±0,6	3,8±0,5
$^{19}F(p, \alpha\gamma)^{16}O$	1346,6±1,1	5±1
$^{19}F(p, \alpha\gamma)^{16}O$	1373,5±0,6	11±1
$^{13}C(p, \gamma)^{14}N$	1746,5±0,5	0,077±0,012
$^{58}Ni(p, \gamma)^{59}Co$	1843,2±0,5	0,1±0,05
$^{9}Be(p, \alpha\gamma)^{6}Li$	2564,6±1,8	39±2
$^{13}C(p, n)^{13}N$	3235,8±1,1	—
$T(p, n)^{3}He$	1019,7±0,5	—
$^{58}Ni(p, \gamma)^{59}Co$	1424,1±0,7	0,05±0,05
$^{16}O(d, n)^{17}F$	1829,2±0,6	—
$^{18}O(p, n)^{18}F$	2573,4±0,8	—
$^{13}C(\alpha, n)^{16}O$	2800±3	4
$^{28}Si(p, p'\gamma)^{28}Si$	3105±6	12
$^{28}Si(p, p'\gamma)^{28}Si$	3340±7	12
$^{23}Na(\alpha, n)^{26}Al$	3492±3	1
$^{15}N(p, n)^{19}Ne$	3780,8±1,1	—
$^{19}F(p, n)^{19}Ne$	4233±2	—
$^{28}Si(p, p'\gamma)^{28}Si$	4240±8	16
$^{28}Si(p, p'\gamma)^{28}Si$	4887±10	12

Таблица 40.13

Энергии γ-квантов, используемых для калибровки гамма-спектрометров

Источник	Энергия резонанса, *кэв*	E_γ, *Мэв*	Литература
$^{11}B(p, p'\gamma)^{11}B$	—	2,14	[29]
$^{12}C(p, \gamma)^{13}N$	456	2,37	[29]
$^{12}C(d, p)^{13}C$	—	3,097	[30]
$^{9}Be(p, \alpha\gamma)^{6}Li$	2565	3,57	[30]
$^{15}N(p, \alpha\gamma)^{12}C$	1650	4,43	[31]
$^{11}B(p, \gamma)^{12}C$	163	4,43	[32]
$^{19}F(p, \alpha\gamma)^{16}O$	340; 1348	6,13	[33]
$^{9}Be(p, \gamma)^{10}B$	1080	6,84	[37]
$^{12}C(p, \gamma)^{13}N$	554	8,06	[34]
$^{19}F(p, \gamma)^{20}Ne$	669	11,67	[35]
$^{15}N(p, \gamma)^{16}O$	1050	13,13	[36]

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Экспериментальная** ядерная физика. Под ред. Э. Сегре. Пер. с англ. М., Изд-во иностр. лит., 1955.
2. **Кёртис Л.** Введение в нейтронную физику. Пер. с англ. М., Атомиздат, 1965.
3. **Bendel W. L. e. a.** "Phys. Rev.", 1958, v. 111, p. 1297.
4. **Geller K. N. e. a.** "Phys. Rev.", 1960, v. 118, p. 1302.
5. **Reinhasdt G. C., Whitehead W. D.** "Nucl. Phys.", 1962, v. 30, p. 201.
6. **Физика** ядерных реакторов. Под ред. И. А. Стенбока. Пер. с англ. М., Атомиздат, 1964.
7. **Бекурц К., Виртц К.** Нейтронная физика. Пер. с нем. М., Атомиздат, 1968.
8. **Вейнберг А., Вигнер Е.** Физическая теория ядерных реакторов. Пер. с англ. М., Изд-во иностр. лит., 1961.
9. **Takayanagi S.** "Nucl. Phys.", 1961, v. 28, p. 494.
10. **Marion J. B.** "Revs Mod. Phys.", 1961, v. 33, p. 139; 1961, v. 33, p. 623.
11. **Kington J. D. e. a.** "Phys. Rev.", 1955, v. 99, p. 1393.
12. **Nelson J. W. e. a.** "Phys. Rev.", 1962, v. 125, p. 2005.
13. **Holland R. E., Lynch F. J.** "Phys. Rev.", 1959, v. 113, p. 903.
14. **Brugger R. M. e. a.** "Phys. Rev.", 1955, v. 100, p. 84.
15. **Gossett C. R., Butler J. W.** "Phys. Rev.", 1959, v. 113, p. 246.
16. **Chapman R. A., Slattery J. C.** "Phys. Rev.", 1957, v. 105, p. 633.
17. **Tohnson C. H.** "Phys. Rev.", 1958, v. 109, p. 1243.
18. **Marion J. B.** "Phys. Rev.", 1956, v. 103, p. 713.
19. **Bailey C. L. e. a.** "Phys. Rev.", 1948, v. 73, p. 274.
20. **MacKlin R. L., Gibbons J. H.** "Phys. Rev.", 1958, v. 109, p. 105.
21. **Bevington P.** "Phys. Rev.", 1961, v 121, p. 871.
22. **Giblons J.** "Phys. Rev.", 1959, v. 114, p. 571.
23. **Jones K. W. e. a.** "Phys. Rev.", 1958, v. 112, p. 1252.
24. **Fowler J. L., Brolley J. E.** "Revs Mod. Phys", 1956, v. 28, p. 103.
25. **Bame S. J. e. a.** "Phys. Rev.", 1957, v. 107, p. 1616.
26. **Frank A. L., Arakawa E. T., Birkhoff R. D.** "Phys. Rev.", 1962, v. 126, p. 1794.
27. **Jarvis G.** "Phys. Rev.", 1950, v. 79, p. 929.
28. **Arnold W. R. e. a.** "Phys. Rev.", 1954, v. 93, p.483.
29. **Woodbury H. H .e. a.** "Phys. Rev.", 1954, v. 93, p. 1311.
30. **Mackin R. J.** "Phys. Rev.", 1954, v. 94, p. 648.
31. **Kraus A. A.** "Phys. Rev.", 1954, v. 94, p. 975.
32. **Segel R. E., Bina M. J.** "Phys. Rev.", 1961, v. 124, p. 814.
33. **Hornyak W. F., Coor T.** "Phys. Rev.", 1953, v. 92, p. 675; **Hunt S. E., Pope R. A., Evans W. W.** "Phys. Rev.", 1957, v. 106, p. 1012.
34. **Hird B. e. a.** "Phys. Rev.", 1954, v. 96, p. 702.
35. **Hane J. V. e. a.** "Phys. Rev.", 1960, v. 120, p. 952.
36. **Bashkin S., Carlson R. R.** "Phys. Rev.", 1957, v. 106, p. 261.
37. **Sprenkel E. L., Daughtry J. W.** "Phys. Rev.", 1961, v. 124, p. 854.

ГЛАВА 41

ПРОХОЖДЕНИЕ НЕЙТРОНОВ ЧЕРЕЗ ВЕЩЕСТВО

41.1. СЕЧЕНИЯ ВЗАИМОДЕЙСТВИЯ НЕЙТРОНОВ С ВЕЩЕСТВОМ ДЛЯ НЕЙТРОНОВ ТЕПЛОВЫХ ЭНЕРГИЙ

Радиационный захват нейтронов — реакция, в которой ядро ${}^{A}_{Z}N$, захватывая нейтрон, превращается в ядро ${}^{A+1}_{Z}N$, а высвобождающаяся энергия испускается в виде γ-квантов. При малых энергиях снятие возбуждения ядра может происходить путем передачи возбуждения одному из внутренних электронов оболочки атома (электроны внутренней конверсии), а при энергиях возбуждения $E^* > 2m_e c^2$ ($m_e c^2 = 511$ *кэв*) возможно образование пары электрон — позитрон.

Ядро ${}^{A+1}_{Z}N$ образуется в возбужденном состоянии, причем энергия возбуждения равна

$$E^* = \frac{M_A}{M_A + M_n} E_n + B_n,$$

где M_A и M_n — массы ядра ${}^{A}_{Z}N$ и нейтрона; E_n — кинетическая энергия нейтрона; B_n — энергия связи последнего нейтрона в ядре ${}^{A+1}_{Z}N$. Энергия связи нейтронов B_n обычно равна 7—8 *Мэв*.

Радиационный захват нейтронов — реакция экзотермическая, поэтому принципиально она возможна при любых энергиях нейтронов и практически на всех ядрах. Для тепловых нейтронов энергия испускаемых γ-квантов E_γ может достигать 10—12 *Мэв*.

Возбужденное состояние ядра имеет конечное время жизни τ, определяющее время распада данного состояния, и связанную с ним парциальную ширину энергетического уровня $\Gamma = \hbar/\tau$. Для медленных нейтронов $\Gamma_\gamma \approx 0{,}1$ *эв* и, следовательно, $\tau \approx 10^{-14}$ *сек*.

Для тепловых нейтронов сечение радиационного захвата $\sigma(n, \gamma)$ в большинстве случаев $\sim 1/\sqrt{E_n}$. В резонансной области сечение $\sigma(n, \gamma)$ описывается формулой Брейта — Вигнера и в максимуме может значительно превышать геометрические размеры ядра. Сечение радиационного захвата быстрых нейтронов $\sigma(n, \gamma) \approx \approx \pi a^2 \Gamma_\gamma / \Gamma$, где a — величина, характеризующая радиус ядра. Радиационный захват медленных нейтронов ядрами известен как реакция, благодаря которой стало доступным большое число радиоактивных изотопов.

Упругое рассеяние нейтронов в общем случае есть результат интерференции потенциального и резонансного рассеяний. При потенциальном рассеянии процесс происходит без образования составного ядра. Резонансное рассеяние происходит через стадию промежуточного ядра.

Для медленных нейтронов длина волны нейтрона λ много больше радиуса ядра a, и преобладает рассеяние нейтронов с орбитальным квантовым числом $l = 0$ (S-рассеяние), сферически-симметричное в системе центра масс. Для более высоких энергий нейтронов становится возможным рассеяние с $l = 1$ (P-рассеяние).

Для большинства наблюдаемых резонансов кинетическая энергия нейтрона не велика и рассеиваются нейтроны с $l = 0$; кроме того, в этой области существенное значение имеют лишь реакции (n, n) и (n, γ), поэтому $\Gamma = \Gamma_n + \Gamma_\gamma$. Выражение для сечения реакции (n, n) в этом случае имеет вид

$$\sigma(n, n) = \pi\lambda^2 g \left| \frac{\Gamma_n}{(E - E_0) + i\Gamma/2} + \frac{2a}{\lambda} \right|^2 + 4\pi a^2 (1 - g),$$

где g — статистический вес, $g = [1 \pm 1/(2I \pm 1)]/2$, I — спин ядра мишени; a — радиус ядра; $2\pi\lambda$ — длина волны падающего нейтрона.

При очень больших энергиях нейтрона ($\lambda \ll a$) интерференционные явления исчезают, и сечение реакции $\sigma(n, n) \approx \pi (a + \lambda)^2$.

В табл. 41.1 представлены экспериментальные данные по сечениям поглощения для нейтронов со скоростью $v = 2200$ *м/сек*. Значения, отмеченные звездочкой, получены в измерениях с реакторными нейтронами, имеющими спектр, близкий к распределению Максвелла.

В четвертой колонке даны сечения захвата σ_γ. Рядом со значением сечения указан тип реакции (n,α) или (n, p). Обозначения отсутствуют в случае радиационного захвата — реакции (n, γ), преобладающей для ядер с массовым числом $A > 35$. Для ядер с порядковым номером $Z \geqslant 88$ в этой колонке приведены полные сечения поглощения $\sigma(n, a)$, которые кроме указанных выше процессов могут включать еще сечение реакции деления $\sigma(n, f)$.

Сечения активации $\sigma_{акт}$ определялись по радиоактивности облученного образца с последующим β-распадом. Иногда сечения активации указаны для отдельных изомерных состояний, причем первым в таблице помещено значение $\sigma_{акт}$ наиболее возбужденного состояния. Там же указаны периоды полураспада образующихся β-активностей.

Если энергия нейтрона мала по сравнению с энергией первого резонансного уровня, то сечение реакции (n, a) обычно меняется по закону «$1/v$»: $\sigma(v) = \sigma_0/v$, где σ_0 — некоторая константа. В этом случае усреднение сечения по максвелловскому спектру $n(v)$ приводит к

$$\bar{\sigma} = \frac{\int \frac{\sigma_0}{v} n(v)\, v\, dv}{\int n(v)\, v\, dv} = \frac{\sigma_0}{\bar{v}},$$

где $\bar{v}$ — среднее значение скорости; $v = \left(\frac{8kT}{\pi m}\right)^{1/2}$.

(Следует отметить, что усреднение сечения на самом деле производится по потоку $n(v) \cdot v$. Однако получаемое значение $\bar{\sigma}$ используется в подавляющем большинстве расчетов.)

Усредненное сечение $\bar{\sigma}$ можно связать со значением сечения $\sigma_{н.в}$ — при наиболее вероятной скорости $v_{н.в} = \sqrt{\pi}\, \bar{v}/2$. Поскольку $\sigma_{н.в} \cdot v_{н.в} = \sigma_0$, то

$$\bar{\sigma} = \frac{\sigma_{н.в}\, v_{н.в}}{\bar{v}} = \frac{\sigma_{н.в}}{1{,}128} = \frac{\sigma(kT)}{1{,}128} = \frac{\sigma_{2200}}{1{,}128},$$

где kT — энергия, соответствующая наиболее вероятной скорости. При $T = 293°\text{K}$ $v_{н.в} = 2200$ *м/сек*.

Для сечений, не подчиняющихся закону $1/v$, указан f-фактор отклонения от этого закона: $\bar{\sigma} = \frac{\sigma(kT)}{1{,}128} f(kT)$.

В шестой колонке приведены средние сечения рассеяния $\bar{\sigma}_{рас}$, полученные экспериментально, для максвелловского спектра нейтронов. Отметим, что на величину $\bar{\sigma}_{рас}$ влияет кристаллическая структура образцов (и даже размеры кристаллических зерен), с которыми производились измерения.

Сечения поглощения, активации и рассеяния для нейтронов тепловых энергий [1,2]

Элемент	Массовое число	Содержание, %; период полураспада	σ_γ, *барн*	$\sigma_{акт}$, *барн*; период полураспада образующегося β-излучателя	$\bar{\sigma}_{рас.}$, *барн*
$_1$H	1	99,985	$(332\pm2)\,10^{-3}$	—	38±4 (газ)
	2	0,015	$(0,46\pm0,10)\,10^{-3}$	$(0,57\pm0,01)\,10^{-3}$; 12,4 лет	7±1
$_2$He		Естеств.	—	—	0,8±0,2
	3	0,00013	5400±200 (n,p)	—	1,0±0,7
	4	100	0	0	—
$_3$Li		Естеств.	71±1,0	—	1,4±0,3
	6	7,52	945 (n,α)	$(28\pm8)\,10^{-3}$	—
	7	92,48	—	36±4; 0,89 *сек*	—
$_4$Be	7	54 дня	54 000±8000 (n,p);	—	—
	9	100	$<1(n,\alpha)$ $(10\pm1)\,10^{-3}$	$(9\pm3)\,10^{-3}$; $2,7\cdot10^6$ лет	7±1
$_5$B		Естеств.	757,7±3,08	—	4±1
	10	19,8	3838±15; $(n,p)<0,2$	0,5±0,2	—
	11	80,2	—	$(5\pm3)\,10^{-3}$; 0,03 *сек*	—
$_6$C		Естеств.	$(3,80\pm0,04)\,10^{-3}$	—	4,8±0,2
	12	98,89	—	$(3,3\pm0,2)\,10^{-3}$	—
	13	1,11	$(0,5\pm0,2)\,10^{-3}$	$(0,9\pm0,3)\,10^{-3}$; 5570 лет	—
	14	5570 лет	<200	$<10^{-6}$; 2,4 *сек*	—
$_7$N		Естеств.	1,88±0,05	—	10±1
	14	99,63	0,08±0,02; 1,75±0,05 (n,p)	—	—
	15	0,37	—	$(24\pm8)\,10^{-6}$; 7,4 *сек*	—
$_8$O		Естеств.	$<0,0002$	—	4,2±0,3
	16	99,76	—	—	—
	17	0,037	0,25±0,15 (n,α)	0,4±0,1; 5570 лет ^{14}C	—
	18	0,204	—	$(0,21\pm0,04)\,10^{-3}$; 29 *сек*	—
$_9$F	19	100	$<10^{-2}$	$(9\pm2)\,10^{-3}$; 11 *сек*	3,9±0,2
$_{10}$Ne		Естеств.	$(32\pm9)\,10^{-3}$	—	2,38±0,04
	20	90,92	—	—	—
	21	0,26	—	—	—
	22	8,82	—	$(36\pm15)\,10^{-3}$; 40 *сек*	—
$_{11}$Na	23	100	$(525\pm10)\,10^{-3}$	0,534±0,007; 14,95 *ч*	4,0±0,5
$_{12}$Mg		Естеств.	0,069±0,002	—	3,6±0,4
	24	78,60	0,034±0,010	—	—
	25	10,11	0,280±0,090	—	—
	26	11,29	$(60\pm60)\,10^{-3}$	$(27\pm5)\,10^{-3}$; 9 *мин*	—
	27	9,5 *мин*		$3\cdot10^{-2}$*; 21 *ч*	—
$_{13}$Al	27	100	$(241\pm3)\,10^{-3}$	$(0,21\pm0,02)\,10^{-3}$; 2,3 *мин*	1,4±0,1
$_{14}$Si		Естеств.	0,16±0,02	—	1,7±0,3
	28	92,27	$(80\pm30)\,10^{-3}$	—	—
	29	4,68	0,28±0,09	—	—
	30	3,05	0,4±0,4	$(110\pm10)\,10^{-3}$; 2,62 *ч*	—
$_{15}$P	31	100	0,20±0,02	0,19±0,010	5±1

Элемент	Массовое число	Содержание, %; период полураспада	σ_γ, *барн*	$\sigma_{акт}$, *барн*; период полураспада образующегося β-излучателя	$\bar{\sigma}_{рас}$, *барн*
$_{16}S$		Естеств.	0,52±0,02	—	1,1±0,2
	32	95,018	$(1,8\pm1,0)\,10^{-3}$ (n, α)	—	—
	33	0,75	0,125±0,100 (n,p); $(n, \alpha)<8$	$(15\pm10)\cdot10^{-3}$; 25,1 дня ^{33}P	—
	34	4,215	—	0,26±0,05; 87 дней	—
	35	0,017	—	0,14±0,04; 5 *мин*	—
$_{17}Cl$		Естеств.	31,0±2,0	—	16±3
	35	75,4	$<5\cdot10^{-5}$ (n, α)	30±20; $3,08\cdot10^5$ лет	—
			0,30±0,10 (n, p)	$<5\cdot10^{-5}$; 14,3 дня ^{32}P	
				0,19±0,05; 87 дней ^{35}S	
	36	$3,08\cdot10^5$ лет	—	90±30	—
	37	24,6	—	$(5\pm3)\,10^{-3}$; 1,0 *сек*	—
				$(0.56\pm0.12)\,10^{-3}$; 37,5 *мин*	
$_{18}Ar$		Естеств.	0,61±0,03	—	1,5±0,5
	36	0,34	—	6±2; 35 дней	—
	38	0,063	—	0,8±0.2; 265 лет	—
	40	99,60	—	0,53±0,02; 109 *мин*	—
	41	109 *мин*	—	>0,06; 3,5 года	—
$_{19}K$		Естеств.	2,07±0,06	—	1,5±3
	39	93,08	1,94±0,15	3±2*; $1,3\cdot10^9$ лет	—
	40	0,012	3.8±0,7;70±20 (n, p)	—	—
	41	6,91	1.24±0,10	1,30±0,1; 12,46 *ч*	—
$_{20}Ca$		Естеств.	0,44±0,02	—	—
	40	96,97	0,22±0,04	—	—
	42	0,64	42±3	—	—
	43	0,145	—	—	—
	44	2,06	—	0,72±0,10; 164 дня	—
	46	0,0033	—	0,25±0,10; 4,8 дня	—
	48	0,185	—	1,1±0,1; 8,5 *мин*	—
$_{21}Sc$	45	100	28,3±0,7	10±4; 20 *сек*	24±2
				22,3±2,2; 85 дней	
$_{22}Ti$		Естеств.	6,9±0,13	—	4±1
	46	7,95	0,6±0,2	—	2±2
	47	7,75	1,7±0,3	—	4±1
	48	73,45	8,3±0,6	—	4±2
	49	5,51	1,9±0,5	—	1±1
	50	5,34	<0,2	0,14±0,03; 5,8 *мин*	3±1
$_{23}V$		Естеств.	5,00±0,01	—	5±1
	50	0,24	250±200	—	—
	51	99,76	—	4,5±0,9; 3,76 *мин*	—
$_{24}Cr$		Естеств.	3,1±0,2	—	3,0±0,5
	50	4,31	17,0±1,4	15,9±1,6; 27,7 дня	—
	52	83,76	0,76±0,06	—	—
	53	9,55	18,2±1,5	—	—
	54	2,38	<0,3	0,38±0,04; 3,6 *мин*	—
$_{25}Mn$	55	100	13,2±0,4	13,17±0,1; 2,58 *ч*	2,3±0,3
$_{26}Fe$		Естеств.	2,62±0,06; $<5\cdot10^{-3}$ (n, α)	—	11±1
	54	5,84	2,3±0,2	2,8±0,4; 2,94 года	—
	56	91,68	2,7±0,2	—	—
	57	1,17	2,5±0,2	—	—
	58	0,31	2,5±2,0	1,01+0,1; 44,3 дня	
			$(n, \alpha)<1,5\cdot10^{-3}$	$<1,5\cdot10^{-3}$; 3,5 *мин* ^{55}Cr	—

Элемент	Массовое число	Содержание, %; период полураспада	σ_γ, *барн*	$\sigma_{акт}$, *барн*; период полураспада образующегося β-излучателя	$\bar{\sigma}_{рас}$, *барн*
$_{27}$Co	59	100	38,0±0,5	16±3; 10,4 *мин* 20±3; 5,28 года	7±1
	60	10,4 *мин*	—	100±50; 1,75 *ч*	—
	60	5,28 года	—	6±2; 1,75 *ч*	—
$_{28}$Ni		Естеств.	4,6±0,2	—	17,5±1,0
	58	67,76	4,4±0,3	—	—
	60	26,16	2,6±0,2	—	—
	61	1,25	2,0±1,0	—	—
	62	3,66	15±2	—	—
	64	1,16	—	1,52±0,14; 2,57 *ч*	—
	65	2,57 *ч*	—	20±2; 56 *ч*	—
$_{29}$Cu		Естеств.	3,85±0,03	—	7,2±0,7
	63	69,1	4,5±0,1	4,5±0,2; 12,9 *ч*	—
	65	30,9	2,2±0,2	1,8±0,4; 5,15 *мин*	—
	66	5,51 *мин*	—	130±40*; 59 *ч*	—
$_{30}$Zn		Естеств.	1,10±0,02	—	3,6±0,4
	64	48,89	$(1,5\pm1)\,10^{-5}$ (n, α)	0,47±0,05; 246 дней $<10^{-5}$; 12,8 *ч* ^{64}Cu	—
	66	27,81	$<2\cdot10^{-5}$ (n, α)	$2\cdot10^{-5}$; 80 лет ^{63}Ni	—
	67	4,11	$(6\pm4)10^{-6}$ (n, α)		—
	68	18,56	$<2\cdot10^{-5}$ (n, α)	$(9,9\pm1)\,10^{-2}$; 13,8 *ч* 1,0±0,2; 52 *мин*	—
	70	0,62	—	85±20, 2,2 *мин*	—
$_{31}$Ga		Естеств.	2,80±0,13	—	4±1
	69	60,2	2,1±0,2	1,4±0,3; 20,2 *мин*	—
	71	39,8	5,1±0,4	5,0±0,5; 14,2 *ч*	—
$_{32}$Ge		Естеств.	2,45±0,20	—	3±1
	70	20,55	3,4±0,3	3,42±0,35; 12 дней	—
	72	27,37	0,98±0,09	—	—
	73	7,67	14±1	—	—
	74	36,74	0,62±0,06	0,04±0,008; 48 *сек* 0,21±0,08; 82 *мин*	—
	76	7,67	0,36±0,07	$(8,0\pm2,0)\,10^{-2}$; 57 *сек* 50±10; 12 *ч*	—
$_{33}$As	75	100	4,3±0,2	5,4±1,0; 27 *ч*	6±1
$_{34}$Se		Естеств.	11,7±0,1	—	11±2
	74	0,87	50±7	26±6; 123 дня	—
	76	9,02	85±7	7±3; 18 *сек*	—
	77	7,58	42±4	—	—
	78	23,52	0,4±0.4	—	—
	80	49,82	0,61±0,06	$(3,0\pm1,0)\,10^{-2}$; 57 *мин* 0,5±0,1; 18 *мин*	—
	82	9,19	2,1±1,5	$(5,0\pm2,5)\,10^{-2}$; 67 *сек* $(4\pm2)\,10^{-3}$; 25 *мин*	—
$_{35}$Br		Естеств.	6,82±0,06	—	6±1
	79	50,52	10,4±1,0	2,9±0,5; 4,6 *ч* 8,5±1,4; 18 *мин*	—
	81	49.48	2,6±0.4	3 3±0,4; 35,9 *ч*	—
$_{36}$Kr		Естеств.	31±2	—	7,2±0,7
	78	0,35	—	2,0±0 5; 34,5 *ч*	—
	80	2,27	95±15; 13 *сек* → $2\cdot10^4$ лет	—	—
	82	11,56	45±15	—	—
	83	11,55	205±30	—	—

Элемент	Массовое число	Содержание, %; период полураспада	σ_γ, барн	$\sigma_{акт}$, барн; период полураспада образующегося β-излучателя	$\bar{\sigma}_{рас}$, барн
$_{36}$Kr	84	56,9	<2	$0{,}10\pm0{,}03$; 4,4 ч $(60\pm20)\,10^{-3}$; 9,4 года	—
	85	9,4 года	<15	—	—
	86	17,37	<2	$(60\pm20)\,10^{-3}$; 77 мин	—
	87	77 мин	—	$<0{,}6$; 2,8 ч	—
$_{37}$Rb		Естеств.	$0{,}73\pm0{,}07$	—	12 ± 2
	85	72,15	—	$0{,}91\pm0{,}08$; 18,7 дня	—
	87	27,85	—	$0{,}12\pm0{,}03$; 17,8 мин	—
	88	17,8 мин	—	$1{,}0\pm0{,}2$; 15,4 мин	—
$_{38}$Sr		Естеств.	$1{,}21\pm0{,}06$	—	10 ± 1
	84	0,56	<3	<1; 70 мин; $1{,}4\pm0{,}3$; 65 дней	—
	86	9,86	—	$1{,}65+0{,}16$; 2,80 ч	—
	87	7,02	—	—	—
	88	82,56	—	$(5\pm1)\,10^{-3}$; 53 дня	—
	89	51 день	—	$0{,}5\pm0{,}1$*; 28 лет	—
	90	19,9 года	—	$1{,}0\pm0{,}6$; 64 ч	—
$_{39}$Y	89	100	$1{,}31\pm0{,}08$	$1{,}26\pm0{,}08$; 63 ч	3 ± 2
	90	63 ч	—	<7; 61 день	—
	94	58 дней	—	$1{,}07\pm0{,}09$; 3,5 ч	—
$_{40}$Zr		Естеств.	$0{,}185\pm0{,}004$	—	8 ± 1
	90	51,46	$0{,}10\pm0{,}07$	—	—
	91	11,23	$1{,}58\pm0{,}12$	—	—
	92	17,11	$0{,}25\pm0{,}12$	—	—
	93	$1{,}1\cdot10^6$ лет	$<0{,}4$	—	—
	94	17,40	$0{,}08\pm0{,}06$	$0{,}036\pm0{,}008$; 63 дня	—
	96	2,80	$0{,}1\pm0{,}1$	$0{,}053\pm0{,}005$; 17 ч	—
$_{41}$Nb	93	100	$1{,}16\pm0{,}02$	$1{,}0\pm0{,}5$; 6,6 мин	5 ± 1
	94	$2{,}2\cdot10^4$ лет	—	15 ± 4; 36 дней	—
$_{42}$Mo		Естеств.	$2{,}7\pm0{,}4$	—	7 ± 1
	92	15,86	$<0{,}3$	$6\cdot10^{-3}$; 6,9 ч	—
	94	9,12	—	—	—
	95	15,70	$13{,}9\pm1{,}4$	—	—
	96	16,50	$1{,}2\pm0{,}6$	—	—
	97	9,45	$2{,}2\pm0{,}7$	—	—
	98	23,75	$0{,}4\pm0{,}4$	$0{,}51\pm0{,}06$; 67 ч	—
	100	9,62	$0{,}5\pm0{,}5$	$0{,}20\pm0{,}05$; 14,3 мин	—
$_{43}$Tc	99	$2{,}1\cdot10^5$ лет	22 ± 3	$2{,}6\pm1{,}3$; 6 ч	—
$_{44}$Ru		Естеств.	$2{,}56\pm0{,}12$	—	6 ± 1
	96	5,7	—	$0{,}21\pm0{,}02$; 2,8 дня	—
	102	31,3	—	$1{,}44\pm0{,}16$; 41 день	—
	104	18,3	—	$0{,}7\pm0{,}2$; 4,5 ч	—
	105	4,5 ч	—	$0{,}2\pm0{,}02$; 1 год	—
$_{45}$Rh	103	100	149 ± 4	12 ± 2; 4,4 мин 140 ± 30; 42 сек	5 ± 1
	104	4,4 мин	—	800 ± 100; 36 ч	—
	104	42 сек	—	40 ± 10*; 36 ч	—
$_{46}$Pd		Естеств.	$8{,}0\pm1{,}5$	—	$3{,}6\pm0{,}6$
	102	0,8	—	$4{,}8\pm1{,}5$; 17 дней	—
	108	26,7	—	$0{,}26\pm0{,}04$; 4,8 мин $10{,}4\pm0{,}8$; 13,6 ч	—
	110	13,5	—	$0{,}21\pm0{,}03$; 23,6 мин $<0{,}05$; 5,5 ч	—

Элемент	Массовое число	Содержание, %; период полураспада	σ_γ, *барн*	$\sigma_{акт}$, *барн*; период полураспада образующегося β-излучателя	$\sigma_{рас.}$ *барн*
$_{47}$Ag		Естеств.	64,8±0,4	—	6±1
	107	51,35	31±2	45±4; 2,3 *мин*	—
	109	48,65	87±7	3,2±0,4; 270 дней 113±13; 24,2 *сек*	—
$_{48}$Cd		Естеств.	2537±9 $f = 1,3$	—	7±1
	106	1,22	—	1,0±0,5; 6,7 *ч*	—
	110	12,39	—	0,2±0,1; 49 *мин*	—
	112	24,07	—	(30±15) 10^{-3}; 5,1 года	—
	113	12,26	20 000 $f = 1,3$	—	—
	114	28,86	—	0,14±0,03; 43 дня 1,1±0,3; 53 *ч*	—
	116	7,58	—	1,5±0,3; 2,9 *ч*	—
$_{49}$In		Естеств.	194±2	—	2,2±0,5
	113	4,23	—	56±12; 49 дней 2,0±0,6; 72 *сек*	—
	115	95,77	—	155±10; 54,2 *мин* 52±6; 13 *сек*	—
$_{50}$Sn		Естеств.	(625±15) 10^{-3}	—	4±1
	112	0,95	—	1,3±0,3; 112 дней	—
	116	14,24	—	(6±2) 10^{-3}; 14,5 дня	—
	117	7,57	—	—	—
	118	24,01	—	(10±6) 10^{-3}; 250 дней	—
	120	32,97	—	(1±1) 10^{-3}; $>$ 400 дней 0,14±0,03; 27,5 *ч*	—
	122	4,71	—	(1±0,5) 10^{-3}; 130 дней 0,16±0,04; 40 *мин*	—
	124	5,98	—	0,2±0,1; 10 *мин* (4±2) 10^{-3}; 10 дней	—
$_{51}$Sb	121	Естеств.	5,7±1,0	—	4,3±0,5
		57,25	5,9±0,5	6,8±1,5; 2,8 дня 0,19±0,03; 13,3 *мин*	—
	123	42,75	4,1±0,3	(30±15) 10^{-3}; 21 *мин* (30±15) 10^{-3}; 1,3 *мин* 2,5±1,5; 60 дней	—
$_{52}$Te		Естеств.	4,7±0,1	—	5±1
	120	0,089	70±70	—	—
	121	17 дней	24±1,0	—	—
	121	154 дня	$<$ 1	—	—
	122	2,46	2,8±0,9	1,1±0,5; 110 дней	—
	123	0,87	410±30	—	—
	124	4,61	6,8±1,3	5±3; 58 дней	—
	125	6,99	1,56±0,16	0,8±0,2; 9,3 *ч*	—
	126	18,71	0,8±0,2	(90±20) 10^{-3}; 110 дней 0,8±0,2; 19,3 *ч*	—
	128	31,79	0,3±0,3	(15±5) 10^{-3}; 33 дня 0,13±0,03; 72 *мин*	—
	130	34,49	0,5±0,3	$<$ 8·10^{-3}; 30 *ч* 0,22±0,05; 25 *мин*	
$_{53}$I	127	100	6,22±0,15	(5,6±0,3) 10^{-3}; 25 *мин*	3,6±0,5
	129	1,7 · 10^2 лет	32±3	24±3; 12,6 *ч*	—
	130	12,6 *ч*	—	18±3; 8,05 дня	—
	131	8,1 дня	—	50±40; 2,4 *ч*	—
$_{54}$Xe		Естеств.	35±5	—	4,3±0,4
	124	0,096	74±1*	—	—
	128	1,92	$<$ 5	—	—
	129	26,44	45±15	—	—
	130	4,08	$<$ 5	—	—
	131	21,18	120±15	—	—

Элемент	Массовое число	Содержание, %; период полураспада	σ_γ, *барн*	$\sigma_{акт}$, *барн*; период полураспада образующегося β-излучателя	$\bar{\sigma}_{рас.}$ *барн*
$_{54}$Xe	132	26,89	<5	0,2±0,1; 5,3 дня	—
	133	5,3 дня	—	190±90	—
	134	10,44	<5	0,2±0,1; 9,13 *ч*	—
	135	9,13 *ч*	$(2,72\pm0,11)\cdot10^6$ $f=1,16$	—	—
	136	8,87	<5	0,15±0,08; 3,9 *мин*	—
$_{55}$Cs	133	100	28,0±1,0	$(2,44\pm0,15)\cdot10^{-3}$; 3,1 *ч* 30±1; 2,3 года	20±10
	134		41,6±0,9	134±12* 2,6·10^6 лет	—
	134^m		2,82±0,07	—	—
	135	2,6·10^6 лет	—	8,7±0,5; 13,7 года	—
	137	33 года	—	$(110\pm33)^*\cdot10^{-3}$; 33 *мин*	—
$_{56}$Ba		Естеств.	1,2±0,1	—	8±1
	130	0,101	—	10,0±1,0; 12 дней	—
	132	0,097	—	7±2; 7,2 года	—
	134	2,42	2±2	—	—
	135	6,59	5,8±0,9	—	—
	136	7,81	0,4±0,4	—	—
	137	11,32	5,1±0,4	—	—
	138	71,66	0,70±0,10	0,5±0,1; 85 *мин*	—
	139	85 *мин*	—	4±1; 12,8 дня	—
	140	12,8 дня	—	$<20^*$; 18 *мин*	—
$_{57}$La		Естеств.	8,9±0,2	—	15±5
	139	99,911	—	8,2±0,8; 40 *ч*	—
	140	40 *ч*	—	3,1±1,0; 3,7 *ч*	—
$_{58}$Ce		Естеств.	0,73±0,08	—	9±6
	136	0,19	25±25	0,6±0,2; 34,5 *ч* 6,3±1,5; 8,7 *ч*	—
	138	0,26	9±6	$(7\pm5)\cdot10^{-3}$; 55 *сек* 0,6±0,3; 140 дней	—
	140	88,48	0,66±0,06	0,31±0,10; 32 дня	—
	142	11,07	1,0±0,2	0,94±0,05; 32 *ч*	—
	143	32 *ч*	—	6,0±0,7; 290 дней	—
$_{59}$Pr	141	100	11,3±0,6	10,8±1,0; 19,2 *ч*	—
	142	19,2 *ч*	—	18±3*; 13,8 дня	—
	143	13,8 дня		89±10; 17 *мин*	—
$_{60}$Nd		Естеств.	49,9±0,3	—	—
	142	27,13	18±2	—	—
	143	12,32	324±10	240±50	—
	144	23,87	5,0±0,6	—	—
	145	8,29	60±6	—	—
	146	17,1	10±1	1,8±0,6; 11,3 дня	—
	148	5,72	3,4±1,0	3,7±1,2; 1,8 *ч*	—
	150	5,60	3,0±1,5	1,5±0,2; 15 *мин*	—
$_{61}$Pm	147	2,5 года	150±50*	60±20; 5,3 дня	—
	148		124±12	—	—
$_{62}$Sm		Естеств.	5828±30 $f=1,5$	—	—
	144	3,16	—	<2; 400 дней	—
	147	15,07	87±60	—	—
	149	13,84	40800±3000	—	—
	151	73 года	12400±400*	—	—
	152	26,63	216±6	140±40; 47 *ч*	—
	154	22,53	—	5,5±1,1; 24 *мин*	—

Элемент	Массовое число	Содержание, %; период полураспада	σ_γ, *барн*	$\sigma_{акт}$, *барн*; период полураспада образующегося β-излучателя	$\sigma_{рас}$, *барн*
$_{63}$Eu		Естеств.	4400±30 $f = 0,95$	—	8±1
	151	47,77	7800±200	1400±300; 9,2 *ч*	—
	152	13 лет	5500±1500	—	—
	153	52,23	440±25	420±100*; 16 лет	—
	154	16 лет	—	1500±40 *; 1,7 года	—
	155	1,7 года	—	14000±4000*; 15,4 дня	—
$_{64}$Gd		Естеств.	46617±100 $f = 0,85$	—	—
	152	0,20	—	$<$125; 230 дней	—
	154	2,15	—	—	—
	155	14,73	56200±1000	70000±20000*	—
	157	15,68	242000±4000	160000±60000*	—
	158	24,87	—	3,9±0,4; 18 *ч*	—
	160	21,90	—	0,8±0,3; 3,6 *мин*	—
$_{65}$Tb	159	100	46±4	$>$22; 73 дня	—
	160	73 дня	—	525±100*; 7 дней	—
$_{66}$Dy		Естеств.	936±20	—	100±20
	158	0,090	—	96±20; 136 дней	—
	164	28,18	—	2000±200; 1,3 *мин*	—
				800±100; 140 *мин*	
	165	139 *мин*	—	5000±2000*; 82 *ч*	—
$_{67}$Ho	165		65±3	60±12; 27,3 *ч*	—
$_{68}$Er		Естеств.	173±17	—	15±4
	162	0,136	—	2,03±0,20; 75 *мин*	—
	164	1,56	—	1,65±0,17; 10 *ч*	—
	168	27,1	—	2,0±0,4; 9,4 дня	—
	170	14,9	—	9±2; 2,5 *сек*+7,5 *ч*	—
$_{69}$Tm	169	100	127±4	130±30; 129 дней	7±3
	170	129 дней	—	150±20*; 1,9 года	—
$_{70}$Yb		Естеств.	37±4	—	12±5
	168	0,140	—	11000±3000*; 32 дня	—
	174	31,84	—	60±40; 101 день	—
	176	12,73	—	5,5±1 0; 1.8 *ч*	—
$_{71}$Lu		Естеств.	112±5	—	—
	175	97,40	—	35±15; 3,7 *ч*	—
	176	2,60	—	4000±800; 6,8 дня	—
$_{72}$Hf		Естеств.	102±3	—	8±2
	174	0,18	1500±1000	390±55	—
	176	5,15	15±15	—	—
	177	18,39	380±30	—	—
	178	27,08	75±10	—	—
	179	13,78	65±15	—	—
	180	35,44	14±5	10±3; 46 дней	—
	181		—	40*	
$_{73}$Ta	181	100	210±1	(30±10) 10^{-3}; 16,4 *мин*	5±1
				19±7; 111 дней	
	182	111 дней	—	(1,7±0,2)·10^4; 5,5 дня	—
$_{74}$W		Естеств.	19,2±1,0	—	5±1
	180	0,14	60±60	10±10; 140 дней	—
	182	26,4	20±2	—	—
	183	14,4	11±1	—	—

Элемент	Массовое число	Содержание, %; период полураспада	σ_γ, *барн*	$\sigma_{акт}$, *барн*; период полураспада образующегося β-излучателя	$\overline{\sigma}_{рас}$, *барн*
$_{74}W$	184	30,6	2,4±0,22	2,1±0,6; 73 дня	—
	186	28,4	35±3	34±7; 24 *ч*	—
	187	24 *ч*	—	90±40; 65 дней	—
$_{75}Re$		Естеств.	86±4	—	14±4
	185	37,07	104±8	120±12; 92 *ч*	—
	187	62,93	66±5	69±7; 17 *ч*	—
	188	17 *ч*	—	$<$2; 150 дней	—
$_{76}Os$		Естеств.	15,3±0,7	—	11±1
	184	0,018	—	$<$200; 97 дней	—
	190	26,4	—	8±3; 16,8 дня	—
	192	41,0	—	1,6±0,4; 31 *ч*	—
	193	31 *ч*	—	600±200; 700 дней	—
$_{77}Ir$		Естеств.	440±20	—	—
	191	38,5	—	260±100; 1,4 *мин* 700±200; 74 дня	—
	192	74 дня	—	700±200	—
	193	61,5	—	130±30; 19 *ч*	—
$_{78}Pt$		Естеств.	8,8±0,4	—	10±1
	190	0,012	150±150	0,76±0,10; 18*ч*	—
	192	0,78	8±8	90±40; 4,3 дня	—
	194	32,8	1,2±0,9	—	—
	195	33,7	27±2	—	—
	196	25,4	0,7±0,7	0,87±0,09; 18 *ч*	—
	198	7,2	4,0±0,5	3,9±0,8; 31 *мин*	—
	199	31 *мин*	—	15±10; 11,5 *ч*	—
$_{79}Au$	197	100	98,8±0,3	96±10; 2,7 дня	9,3±1,0
	198	2,7 дня	—	26000±1200; 3,15 дня	—
	199	3,15 дня	—	30±15*; 48 *мин*	—
$_{80}Hg$		Естеств.	374±5 $f = 0,95$	—	20±5
	196	0,146	3100±1000*	420±80; 24 *ч* 880±175; 65 *ч*	—
	198	10,02	—	0,018±0,004; 46,6 *ч*	—
	199	16,84	2500±800*	—	—
	200	23,13	$<$60*	—	—
	201	13,22	$<$60*	—	—
	202	29,80	$<$60*	3,8±0,8; 47 дней	—
	204	6,85	$<$60*	0,43±0,10; 5,5 *мин*	—
$_{81}Te$		Естеств.	3,4±0,5	—	14±2
	203	29,50	11,4±0,9	8±3; 2,7 года	—
	205	70,50	0,80±0,08	0,10±0,03; 4,2 *мин*	—
$_{82}Pl$		Естеств.	$(170\pm10)\ 10^{-3}$	—	11±1
	204	1,48	0,8±0,6	0,7±0,2*; $5\cdot10^7$ лет	—
	206	23,6	$(25\pm5)\ 10^{-3}$	—	—
	207	22,6	0,70±0,03	—	—
	208	52,3	$<30\cdot10^{-3}$	$(0,6\pm0,2)\ 10^{-3}$; 3,2 *ч*	—
$_{83}Bi$	209	100	$(34\pm2)\ 10^{-3}$	$(19\pm2)\ 10^{-3}$; 5 дней	9+1
$_{86}Rn$	220	54 *сек*	—	$<$0,2*; 25 *мин*	—
	222	3,83 дня	—	0,72±0,07*; 11,7 дня ^{223}Ra	—

Элемент	Массовое число	Содержание, %; период полураспада	$\sigma(n, a)$, *барн*	$\sigma_{акт}$, *барн*	$\bar{\sigma}_{рас}$, *барн*
$_{88}$Ra	223	11,2 дня	—	130±20*; 3,64 дня	—
	224	3,64 дня	—	12±0,5*; 14,8 дня	—
	226	1620 лет	—	20±3*; 41,2 *мин*	—
	228	6,7 года	—	36±5*; $<$10 *мин*	—
$_{89}$Ac	227	22 года	510±40	795±20; 6,13 *ч*	
$_{90}$Th	227	18,6 дня	—	—	—
	228	1,9 года	—	123±15*; $7{,}3 \cdot 10^3$ лет	—
	230	$7{,}5 \cdot 10^4$ лет	22,7±0,6	21,4±0,3; 25,5 *ч*	—
	232	100%; $1{,}45 \cdot 10^{10}$ лет	7,56±0,11	7,33±0,12; 23,3 *мин*	12,5±0,3
	233	23,3 *мин*	—	1450; 24,1 дня	—
	234	24,1 дня	—	1,8±0,5*; $\leqslant$10 *мин*	—
$_{91}$Pa	231	$3{,}248 \cdot 10^4$ лет	200±20	200±15; 1,31 дня	—
	232	1,31 дня	—	760±100*; 27,4 года	—
	233	27,4 дня	—	20±4; 1,18 *мин*	—
	233	27,4 дня		19±3; 6,7 *ч*	—
$_{92}$U		Естеств.	7,68±0,07	—	8,3±0,2
	232	73 года	—	300±200*; $1{,}62 \cdot 10^5$ лет	—
	233	$1{,}61 \cdot 10^5$ лет	578±4	49±2; $2{,}52 \cdot 10^5$ лет	12,4±1,4
	234	0,0057%; $2{,}52 \cdot 10^5$ лет	97±5	105±4; $7{,}1 \cdot 10^8$ лет	—
	235	0,714%; $7{,}1 \cdot 10^8$ лет	683±3	107±5; $2{,}4 \cdot 10^7$ лет	15,2±2,3
	236	$2{,}4 \cdot 10^7$ лет	5,5±0,3	6±1,0; 6,7 дня	—
	238	99,3%; $4{,}5 \cdot 10^9$ лет	2,71±0,02	2,74±0,06; 23,5 *мин*	—
	239	23,5 *мин*	—	22±5; 17 *ч*	8.4±1.2
$_{93}$Np	237	$2{,}2 \cdot 10^6$ лет	170±5	169±6; 2,1 дня	—
	239	2,3 дня	—	31±6*; 7,0 *мин*	—
				18±18*; 60 *мин*	—
$_{94}$Pu	238	89,6 года	403±10	403±10; $2{,}44 \cdot 10^3$ лет	—
	239	$2{,}44 \cdot 10^4$ лет	1028±13	315±16; $6{,}6 \cdot 10^3$ лет	12,1±1,7
	240	$6{,}6 \cdot 10^3$ лет	287±7	250±40; 13,2 года	—
	241	13,2 года	1400±80	390±50; $3{,}7 \cdot 10^5$ лет	—
	242	$3{,}7 \cdot 10^5$ лет	18,6±0,8	19±1; 4,98 *ч*	—
	243	4,98 *ч*	—	170±90*; $7{,}5 \cdot 10^7$ лет	—
	244	$7{,}5 \cdot 10^7$ лет	—	1,8±0,3*; 10 *ч*	—
	245	10,6 *ч*	—	265±145; 11,2 дня	—
$_{95}$Am	241	461 год	630±35	750±80*; 16 *ч*	—
				50±40*; 100 лет	—
	242	100 лет	8000±1000*	—	—
	243	$7{,}6 \cdot 10^3$ лет	115*	74,1±4; 26 *мин*	
$_{96}$Cm	242	16,5 дня	—	20±10; 35 лет	—
	243	35 лет	500±300*	250±150*; 18 лет	—
	244	18 лет	—	15±10*; $2 \cdot 10^4$ лет	—
	245	$2 \cdot 10^4$ лет	—	200±100*; $6{,}6 \cdot 10^3$ лет	—
	246	$6{,}6 \cdot 10^3$ лет	—	15±10*; $>10^6$ лет	—
	248	$4{,}2 \cdot 10^5$ лет	—	6±4; 65 *мин*	—
$_{97}$Bk	249	290 дней	—	500±200; 3,1 *ч*	—
$_{98}$Cf	249	470 лет	900±400*	270±100*; 10 лет	—
	250	10 лет	—	1500±1000*; 700 лет	—
	251	700 лет	—	3000±2000*; 2,2 года	—
	252	2,2 года	—	28±7; 18 дней	—
	254	55 дней	—	$<$2*	—
$_{99}$Es	253	20 дней	—	300±150* ;38 *ч*	—
	254	480 дней	2700±600*	$<$40*; 24 дня	—

41.2. ГРАФИКИ ПОЛНЫХ НЕЙТРОННЫХ СЕЧЕНИЙ В ИНТЕРВАЛЕ ЭНЕРГИЙ 0,01—10^7 эв

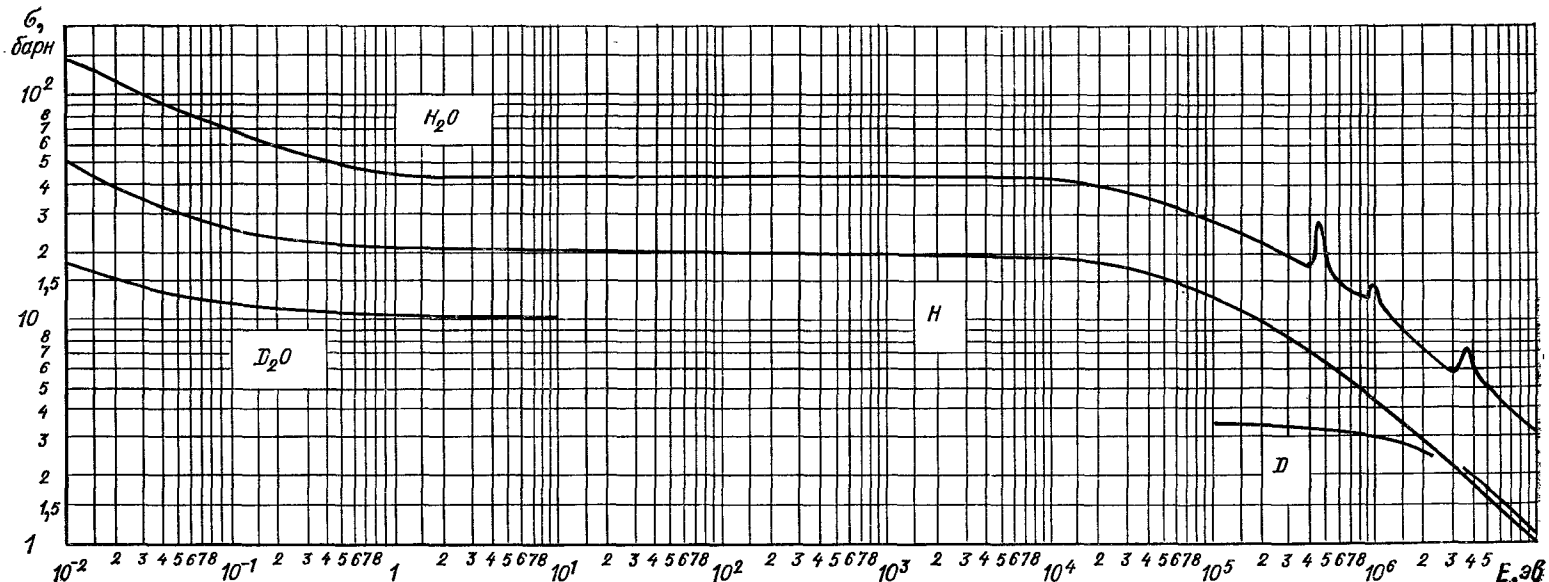


Рис. 41.1. Зависимость полных нейтронных сечений σ от энергии E для ^1H [3], ^2D[2], H_2O [1, 2] и D_2O [2].

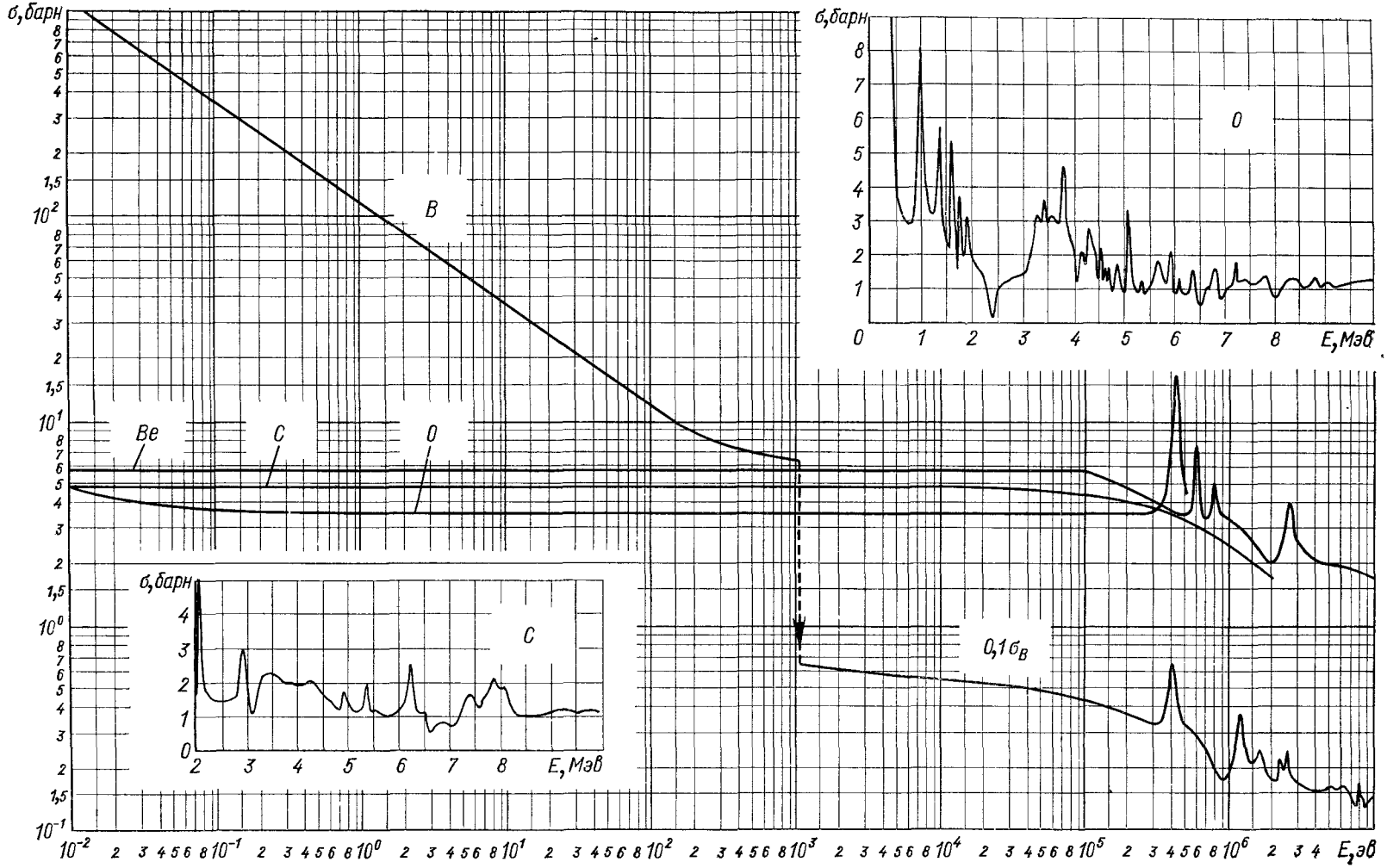


Рис. 41.2. Зависимость полных нейтронных сечений σ от энергии E для Be и B [2], C и O [3].

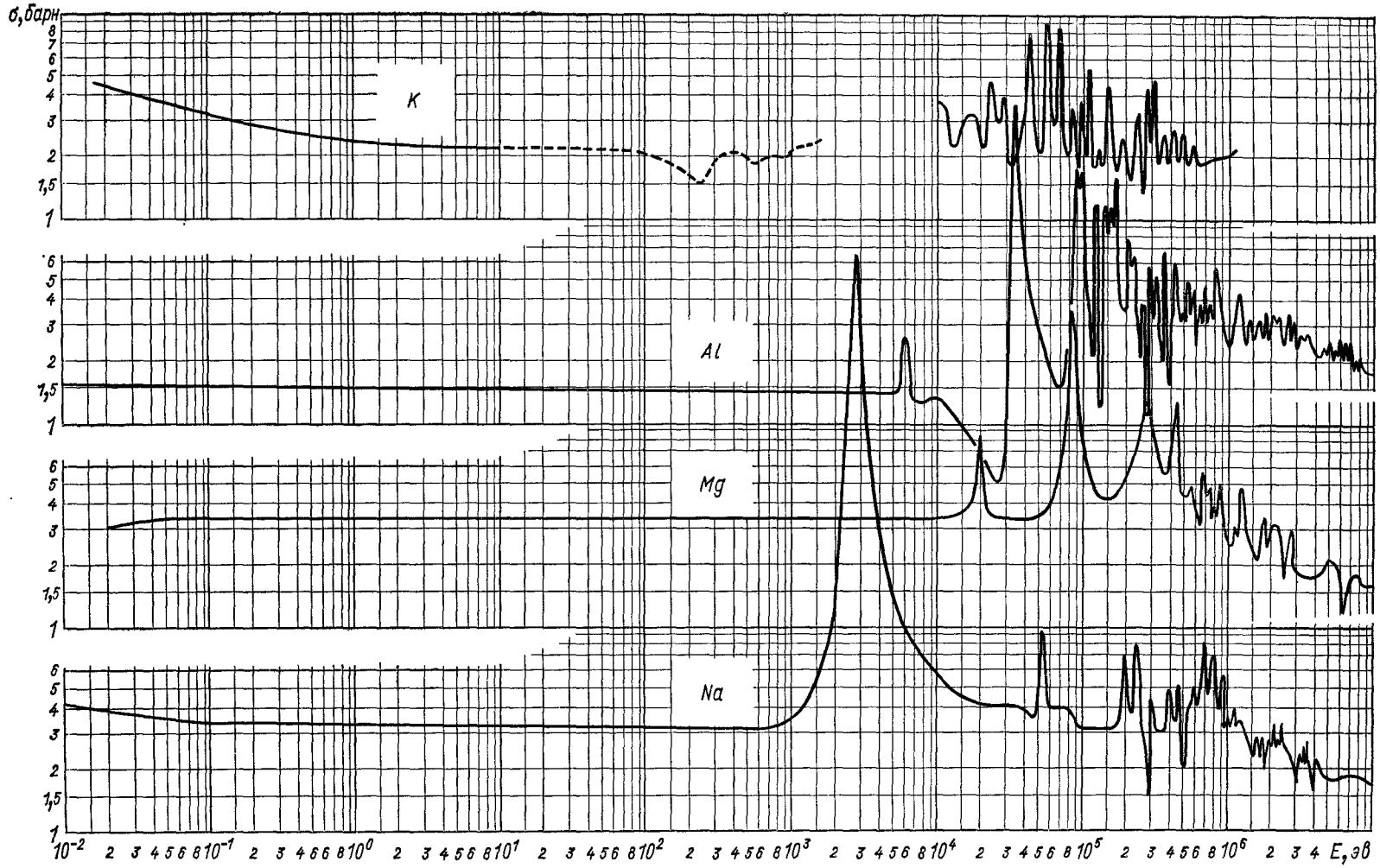


Рис. 41.3. Зависимость полных нейтрониых сечений σ от энергии E для Na, Mg, Al и K [2]. Штриховая лиииия— сечеиие $\sigma_{рас}$ для K [1].

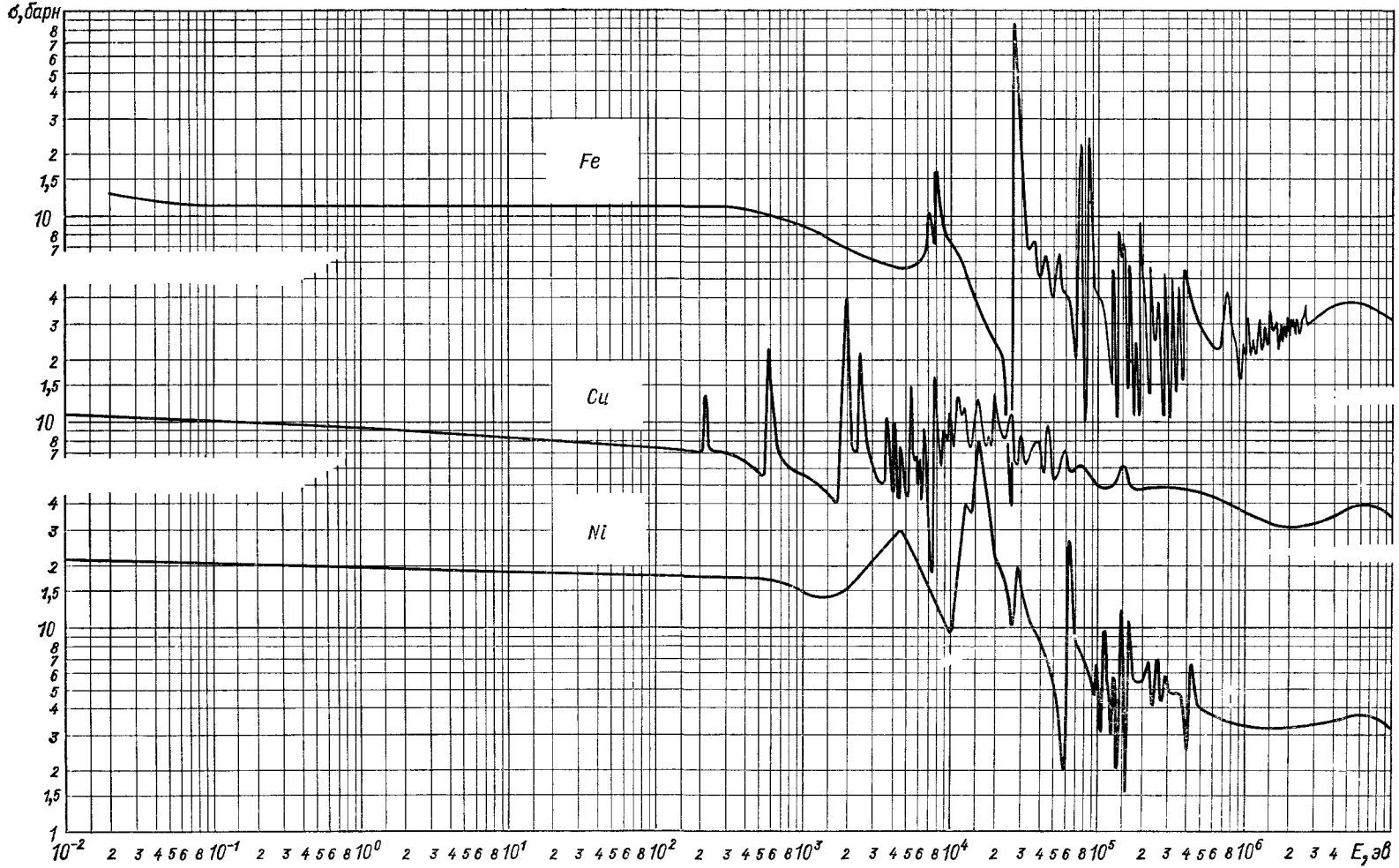
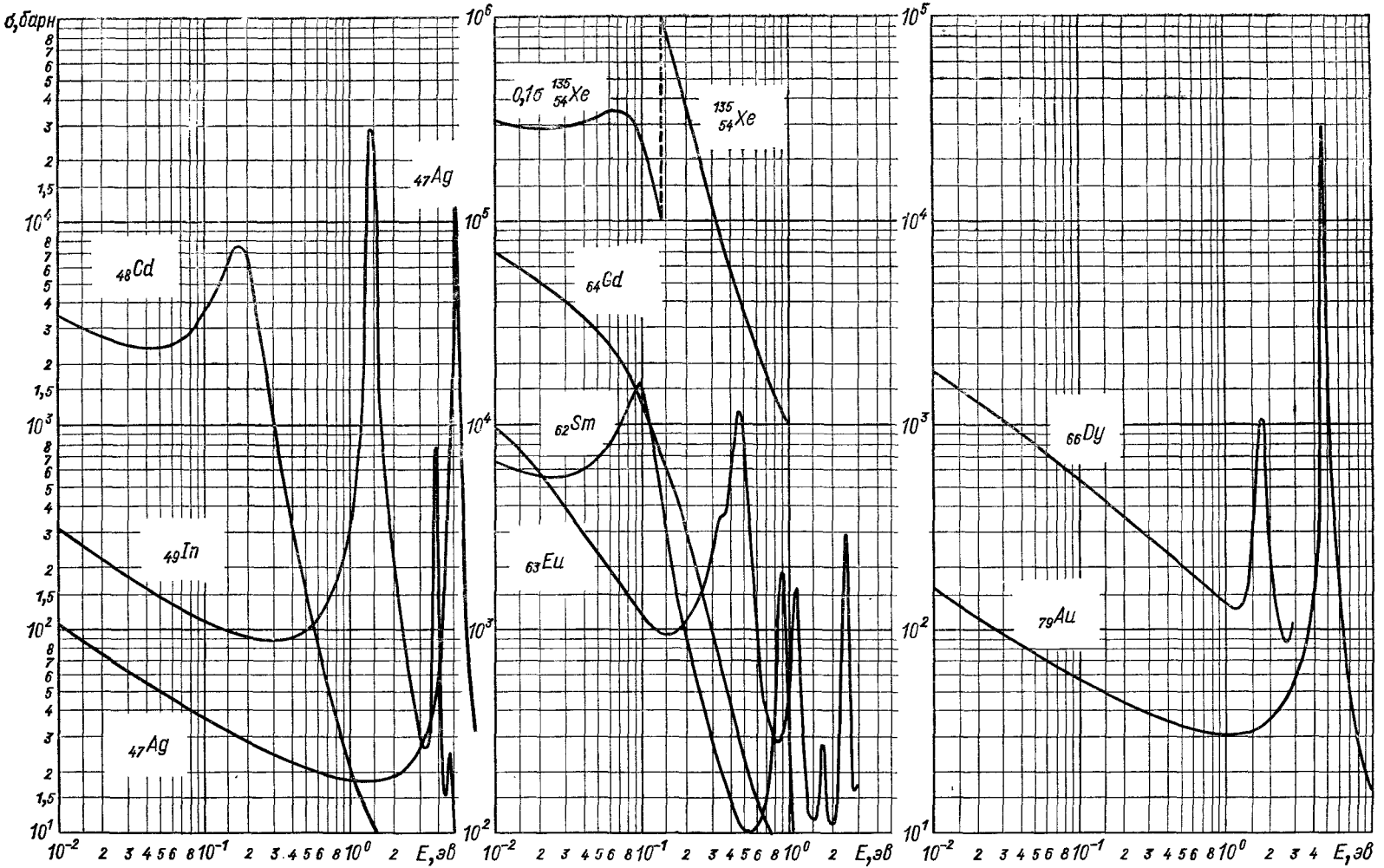


Рис. 41.4. Зависимость полных нейтронных сечений σ от энергии E для Fe, Ni и Cu [2].



41.5. Зависимость полных нейтронных сечений σ от энергии E для Ag, Cd, In, Xe, Sm, Eu, Gd, Dy и Au [2].

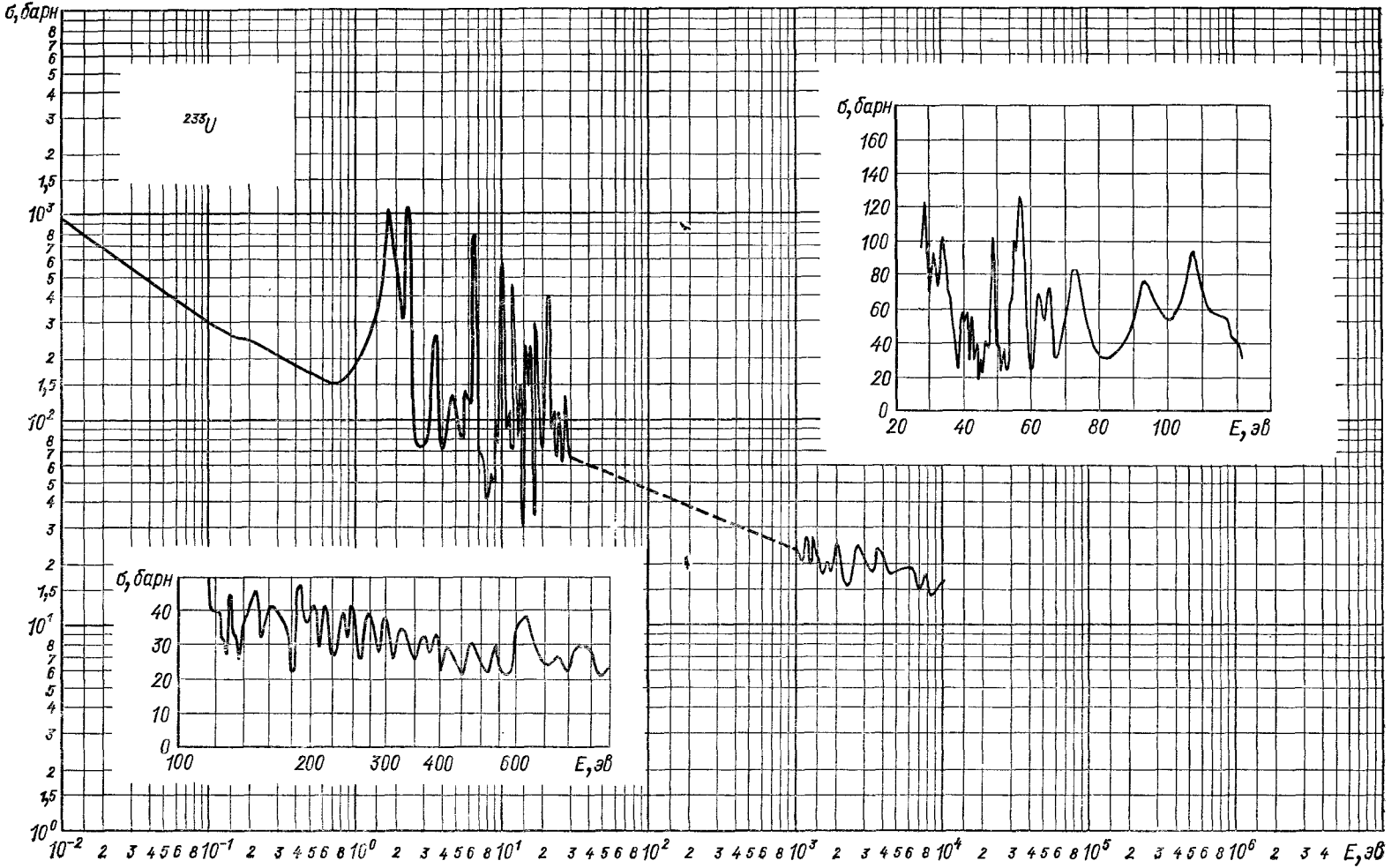


Рис. 41.3. Зависимость полного нейтронного сечения σ от энергии E для ^{233}U [2].

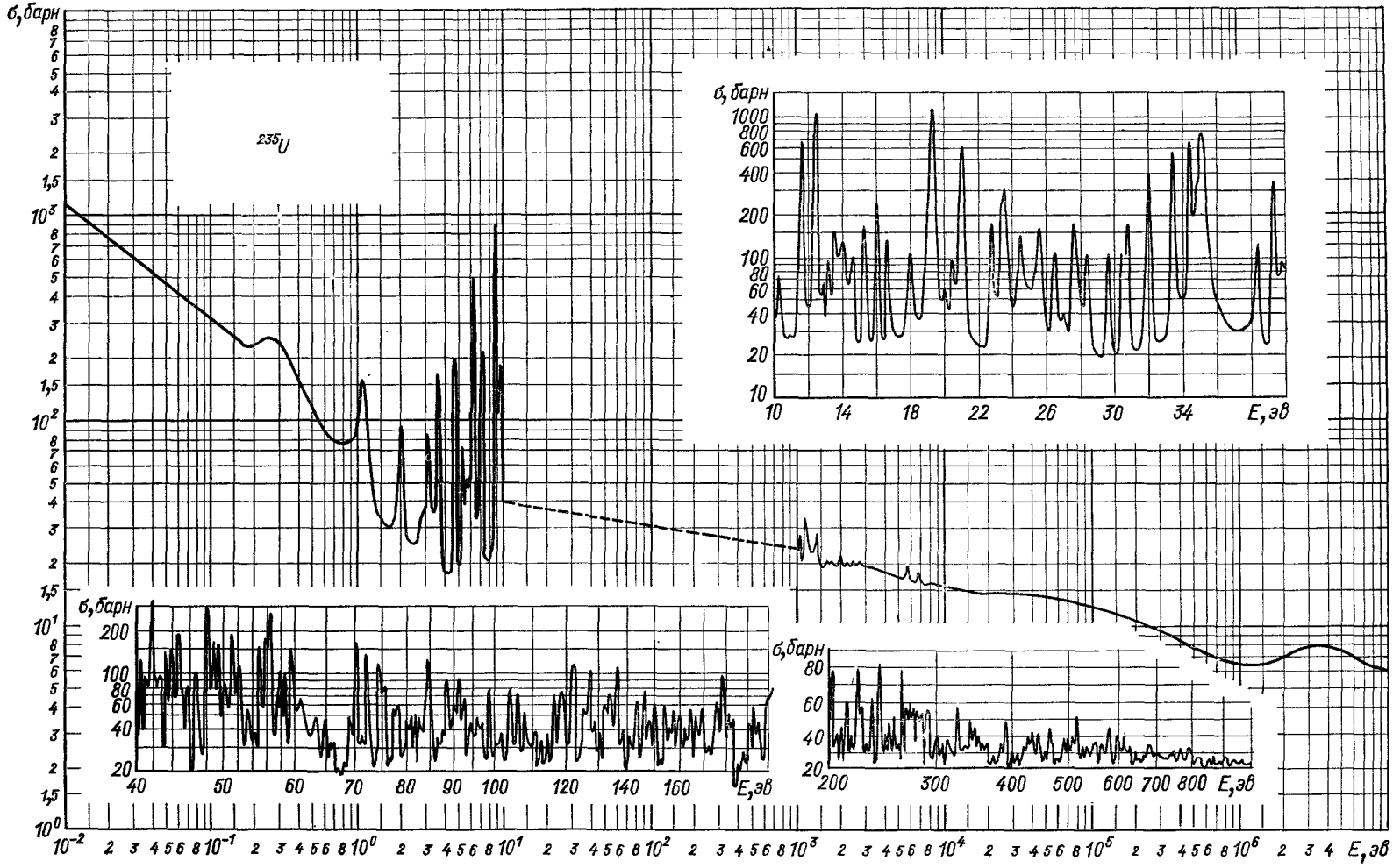


Рис. 41.7. Зависимость полного нейтроиного сечения σ от энергнн E для ^{235}U [3].

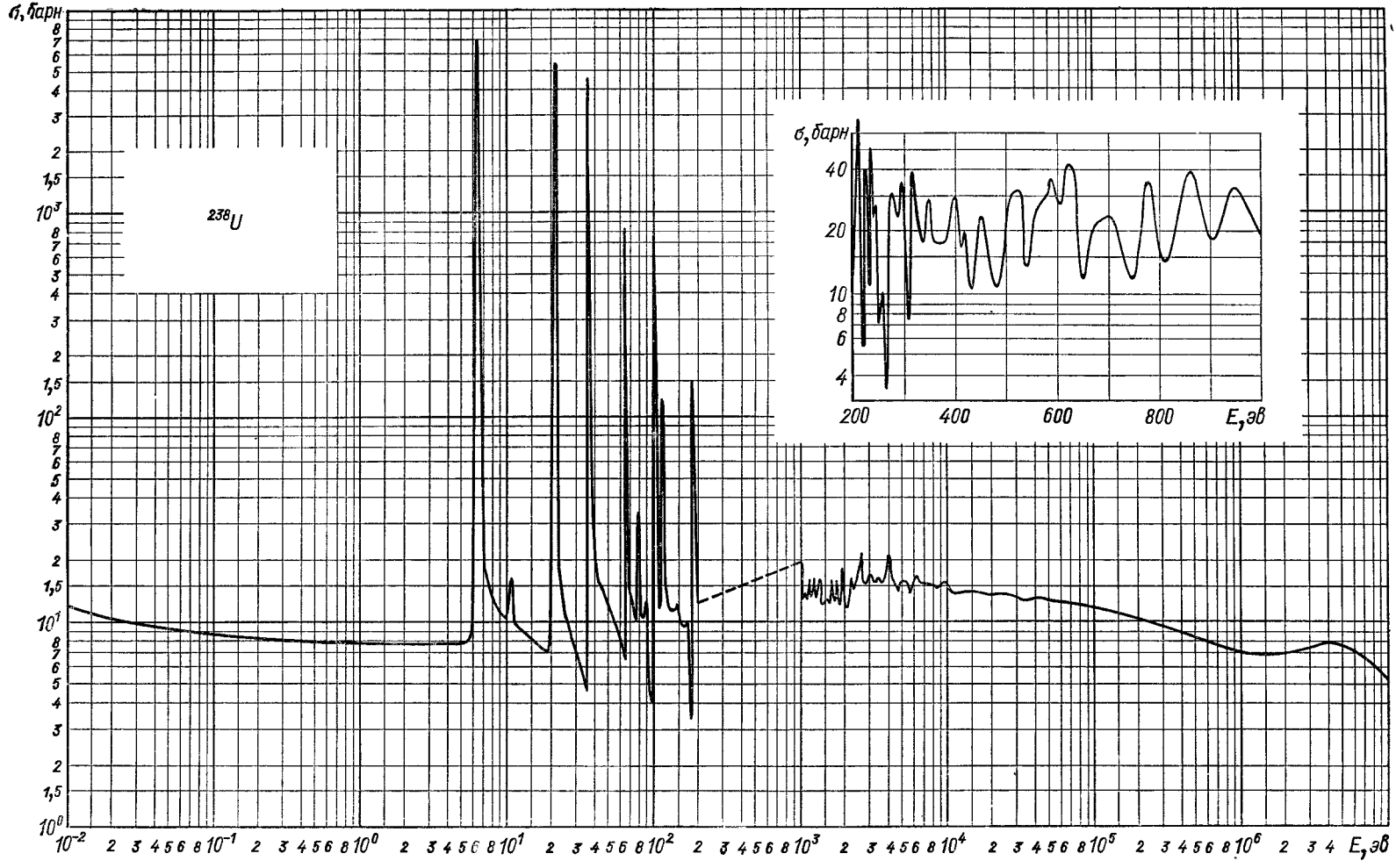


Рис. 41.8. Зависимость полного нейтроинного сечения σ от энергии E для ^{238}U: 0,01—1 *эв* [3], 1—1000 *эв* [2] и 10^3—10^6 *эв* [3].

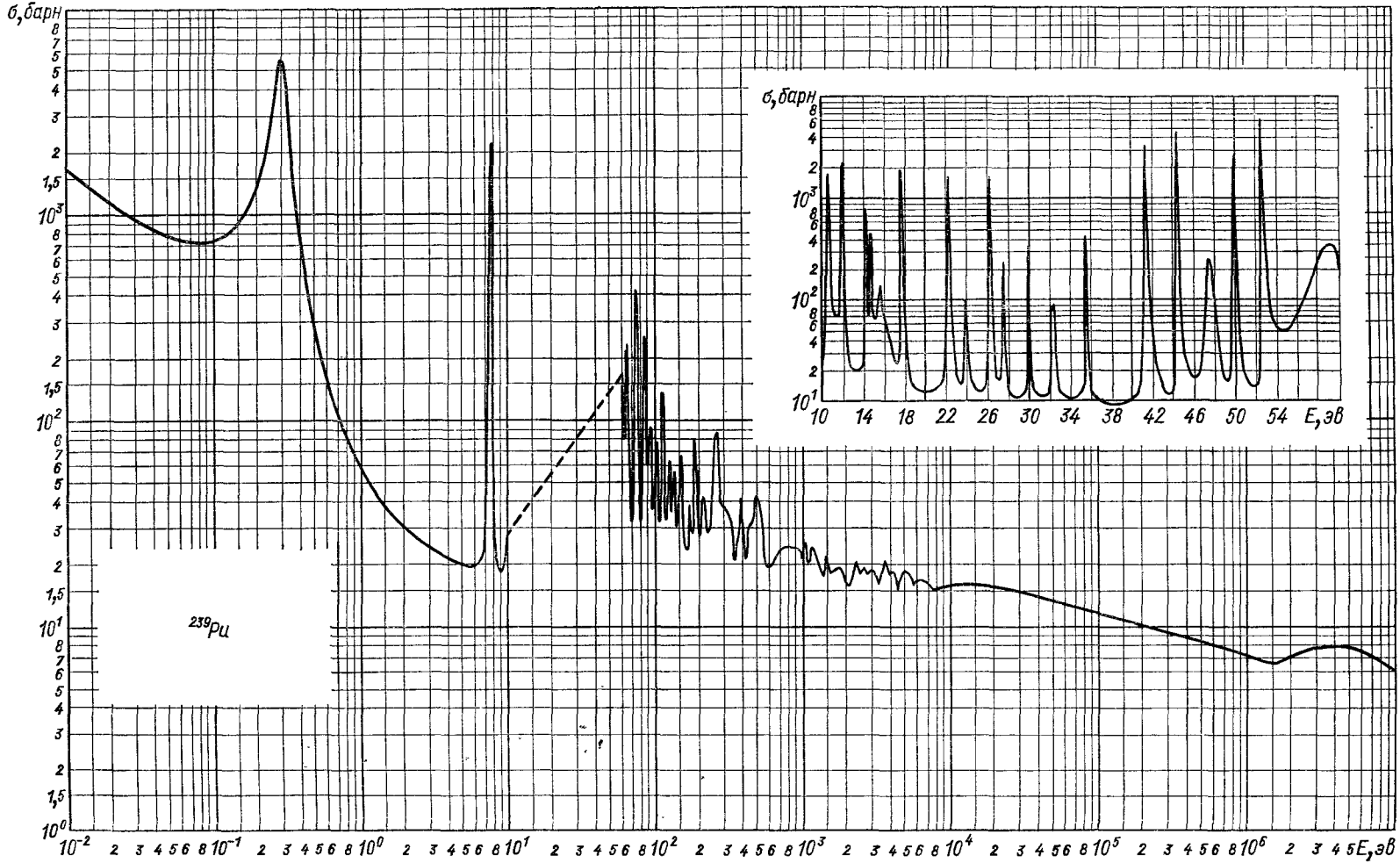


Рис. 41.9. Зависимость полного нейтронного сечения σ от энергии E для ^{239}Pu [3].

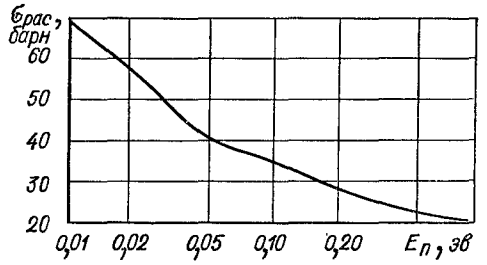


Рис. 41.10. Зависимость сечения рассеяния $\sigma_{рас}$ от энергии нейтронов E_n в H_2O [14].

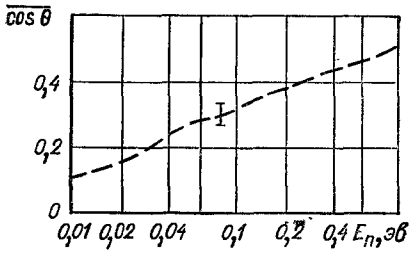


Рис. 41.11. Зависимость среднего косинуса угла рассеяния нейтронов в H_2O от их энергий E_n [14]. Погрешность на кривой дает представление о разбросе экспериментальных данных.

41.3. РЕЗОНАНСНЫЕ ИНТЕГРАЛЫ ЗАХВАТА

Резонансный захват нейтронов. В том случае, если сумма энергии падающего нейтрона и энергии связи его в образующемся промежуточном ядре равна энергии одного из квазистационарных уровней этого ядра, вероятность резонансного захвата нейтрона сильно возрастает. Время жизни квазистационарного уровня τ связано с энергетической шириной Γ соотношением $\tau = \hbar/\Gamma$; $\hbar = h/(2\pi)$, h — постоянная Планка. Вблизи резонансного уровня сечение реакции описывается формулой Брейта — Вигнера. Если скорость нейтронов не велика, то в реакцию вступают главным образом нейтроны с орбитальным квантовым числом $l = 0$. В этом случае формула Брейта — Вигнера для отдельного изолированного резонанса имеет вид

$$\sigma(n, x) = \pi\bar{\lambda}^2 \frac{2J+1}{2(2I+1)} \cdot \frac{\Gamma_n \Gamma_x}{(E-E_0)^2 + \Gamma^2/4}.$$

Здесь $\bar{\lambda} = \lambda/(2\pi)$; λ — длина волны нейтрона; I — спин ядра-мишени; J — спин промежуточного ядра ($J = I \pm 1/2$); Γ_n — нейтронная ширина уровня; Γ_x — ширина для испускания частицы x, $\Gamma = \sum_i \Gamma_i$; E_0 — энергия резонансного уровня. Вероятность эмиссии частицы x: $W_x = \Gamma_x/\Gamma$. В качестве процесса x могут выступать процессы эмиссии нейтрона, γ-кванта, α-частицы, протона и т. п.

Резонансный интеграл захвата. Резонансным интегралом захвата называется величина

$$I = \int_{E_{Cd}}^{\infty} \sigma(E) \frac{dE}{E},$$

Таблица 41.2

Резонансные интегралы захвата [1]

Если в соответствии с экспериментом нижняя граница резонансного интеграла была не 0,4 *эв*, то в скобках указана нижняя граница, например (0,15).

Нуклид	I, барн. Измерено		Вклад $I^{(1/v)}$, барн
	по активации	по поглощению	
Li	—	28	31
B	—	280±40	342
N	—	4,8±2,4	0,83
^{19}F	0,30±0,02	2,3±0,5 [14]	0,23
^{23}Na	~0,24	0,27	—
Mg	—	0,077±0,022	0,03
^{27}Al	~0,16	0,18	0,11
Si	—	0,5	0,07
P	~0,092	2	0,09
S	—	0,6	0,23
Cl	—	12,8±1,7	14,8
K	—	3,5±1,1 [14]	0,91
Ca	—	2	0,19
^{45}Sc	~10,7	—	10,5
Ti	—	3,0	2,6
^{51}V	~2,2	3,3±0,8	2,2
Cr	—	2,6±1,1 [14]	1,4
^{55}Mn	14,0±0,6	14,0±0,3	5,83
Fe	—	1,9±0,4	1,15
^{59}Co	75±5	⩽87	17,1
Ni	—	⩽3,1	2,0
Cu	4,26±0,15	3,7±0,8	1,7
^{63}Cu	5,04±0,15	—	1,95
^{65}Cu	2,30±0,23	—	0,92
Zn	—	1,66±0,16	0,48
Ga	—	11,7±2,7	1,23
^{69}Ga	9,1	—	0,62
^{71}Ga	15	—	1,76
Ge	—	3,5±2,9	1,1
^{75}As	36,8	33	1,9
Se	—	9,6±1,2	5,4
Br	—	118±14	2,9
^{79}Br	147	—	4,6
Rb	9,0±2,8	—	0,32
Sr	—	10,0±2,6	0,53
^{89}Y	0,91	—	0,56
Zr	—	0,93±0,15	0,08
^{93}Nb	3,86	13,5±5,0	0,51
Mo	—	20,2±2,5	1,2
^{95}Mo	—	106±20	6,1
^{98}Mo	10,8±2,5	—	0,08
^{100}Mo	3,73±0,20	—	0,09
^{99}Tc	—	67±20	7,0
^{103}Rh	656	575	69
Pd	—	23	3,5
Ag	—	838±50	28
^{107}Ag	74	—	15
^{109}Ag	1160	1910±200	40
In	—	3686±350	86
^{113}In	1050	—	26
^{115}In	2639±133	—	~91
Sn	—	5,7±0,7	0,27
Sb	—	115±12	2,5
^{121}Sb	162	—	2,6
^{123}Sb	~138	—	1,1
Te	—	~74	2,1
^{127}I	140	183±30	3,1

Продолжение табл. 41.2

Нуклид	I, барн. Измерено		Вклад $I^{(1/v)}$, барн
	по активации	по поглощению	
^{129}I	55±22	—	4,8
^{133}Cs	370±50	503±80	13
^{135}Cs	96±3	—	3,8
Ba	—	7,5	0,53
La	—	11	4,1
Ce	—	3,7±1,7	0,32
^{141}Pr	11,3	7±3	5,1
^{143}Pr	—	190±25	39
Nd	—	40±6	20
^{143}Nd	—	190	140
^{145}Nd	—	146±15	26
^{147}Pm	1700±170	—	55
^{147}Sm	—	<1390	38
^{149}Sm	—	4400	—
^{152}Sm	—	3100±200	98
^{151}Eu	901±138	<3000	—
^{153}Eu	950	1420±100	140
Gd	—	67±8,0	—
^{164}Dy	482±33	—	—
Lu	—	720±70	50
^{175}Lu	463±15	—	5,8
^{176}Lu	887±65	—	—
Hf	1750	2900±350	46
^{180}Hf	21,8	—	5,5
^{181}Ta	590	1110±400	9,2
W	—	338±60	8,5
^{186}W	355	396±59	15,0
^{185}Re	1160	—	46
^{187}Re	305	—	30
Os	—	180±20	6,7
Ir	—	2000±490	193
^{191}Ir	3500	—	420
^{193}Ir	1370	—	57
Pt	—	190	4,2
^{197}Au	1558	—	45
Hg	—	73±5	—
^{203}Tl	129	—	4,8
^{205}Tl	0,5	—	0,04
Pb	—	0,125±0,030	0,075
^{209}Bi	0,085±0,008	—	0,008
^{232}Th	85	85±10	3,2
^{233}Th	500±150	400±100	
^{233}Pa	470±70	1200±400	8,8
U	—	224±40	3,4
^{233}U	—	300±100	—
^{234}U	—	700±100	42
^{235}U	271±25 (γ)	150±50	—
^{236}U	350±40	400±100	2,6
^{238}U	280±15	286±25	1,2
^{237}Np	—	945±130	75
^{238}Pu	—	3260±280	180
^{239}Pu	—	327±22 (γ)	—
		1500±300 (0,15)	—
^{240}Pu	—	9000±1500	130
^{241}Pu	—	1000±300 (0,15)	—
^{242}Pu	—	1300±200	13
^{243}Am	—	2290±50	—

где $E_{Cd} = 0{,}4$ *эв* — эффективная граница кадмиевого среза. Обычно предполагается, что с достаточной степенью точности полный резонансный интеграл имеет вид

$$I = \sum_i I_i^{рез} + I^{(1/v)},$$

где суммирование производится по всем резонансам, а $I^{(1/v)} = (1/2)\sigma$ (2200 *м/сек*) учитывает суммарный вклад сечения, подчиняющегося закону $1/v$.

В качестве эталона при измерениях резонансных интегралов обычно используется ^{197}Au, для которого при толщине образца 0,015 *мг/см*^{2} и толщине кадмиевого фильтра 0,44 *г/см*^{2} принимаются значения $I = (1558 \pm 62)$ *барн* и $I^{(1/v)} = 45$ *барн*.

41.4. ДИФФУЗИОННЫЕ ПОСТОЯННЫЕ ВЕЩЕСТВ

Замедление нейтронов

Если нейтроны с высокими скоростями ввести в среду с малым сечением поглощения нейтронов, то они начнут терять свою энергию в результате столкновений с ядрами. При соответствующих условиях процесс замедления продолжается до тех пор, пока нейтроны не приобретут скорости, отвечающие их тепловому равновесию с ядрами среды.

При энергиях нейтронов <0,1 *Мэв* наиболее существенным процессом является упругое рассеяние нейтронов с нулевым орбитальным квантовым числом $l = 0$. В этом случае рассеяние изотропно в системе центра масс.

В элементарной теории замедления предполагается, что замедление нейтронов обусловлено исключительно упругими соударениями, и ядра, с которыми сталкиваются нейтроны в процессе замедления, до столкновения находились в покое. Эти предположения удовлетворительно выполняются в диапазоне энергий нейтронов от 0,1 *эв* до 0,1 *Мэв*. После соударения с ядром среды нейтрон в лабораторной системе координат отклоняется на угол ψ, определяемый из соотношения

$$\cos\psi = \frac{A\cos\theta + 1}{\sqrt{A^2 + 2A\cos\theta + 1}},$$

где A — масса ядра-мишени и θ — угол рассеяния в системе координат, связанной с центром масс. Среднее значение $\overline{\cos\psi} = 2/(3A)$. Энергия рассеянного нейтрона

$$E_к = \frac{A^2 + 2A\cos\theta + 1}{(A+1)^2} E_н,$$

где $E_н$ — энергия нейтрона до столкновения; $E_к$ — энергия нейтрона после столкновения. Максимальная потеря энергии

$$\max(E_н - E_к) = E_н(1-\alpha) \quad \text{при} \quad \alpha \equiv \left(\frac{A-1}{A+1}\right)^2.$$

Средняя логарифмическая потеря энергии на одно столкновение

$$\xi = \overline{(\ln E_н - \ln E_к)} = \overline{\ln\frac{E_н}{E_к}} = 1 + \frac{(A-1)^2}{2A}\ln\frac{A-1}{A+1}.$$

Среднее число столкновений при замедлении от энергии $E_н$ до энергии $E_к$:

$$N = \frac{1}{\xi}\ln\frac{E_н}{E_к}.$$

Таблица 41.3

Свойства некоторых замедлителей [4,5]

n — среднее число столкновений при замедлении от 2 *Мэв* до тепловой энергии.

Замедлитель	$1-\alpha$	ξ	$\overline{\cos\psi}$	n
^1H	1,00	1,00	0,67	18
^2D	0,889	0,725	0,33	25
^4He	0,640	0,425	0,167	43
^7Li	0,438	0,268	0,095	67
^9Be	0,360	0,209	0,074	86
^{12}C	0,284	0,158	0,056	114
^{16}O	0,222	0,120	0,042	150
Ядра с большим A	$4/(A+2)$	$2/(A+2/3)$	$2/(3A)$	$9A+6$
H_2O	—	0,948	0,323	—
D_2O	—	0,570	0,116	—
BeO	—	0,173	0,061	—

Время замедления нейтронов. Время t, в течение которого нейтрон с начальной энергией $E_н$ замедляется до $E_к$, называют временем замедления, или хронологическим возрастом нейтронов

$$t = \frac{2}{\xi}\overline{\lambda}_{рас}\left(\frac{1}{v_к} - \frac{1}{v_н}\right),$$

где $\overline{\lambda}_{рас}$ — длина свободного пробега нейтрона по отношению к рассеянию; v — скорость нейтрона.

Таблица 41.4

Время замедления t нейтронов от $E_н = 2$ *Мэв* до энергии $E_к = 0{,}025$ *эв* [1, 6]

Замедлитель	$\overline{\lambda}_{рас}$, *см*	t, 10^{-5} *сек*
Вода	1,1	1,0
Тяжелая вода	2,6	4,6
Бериллий	1,6	6,7
Окись бериллия	1,5	7,8
Графит	2,6	15,0

Возраст нейтронов τ. Дифференциальное уравнение теории замедления в среде без поглощения (уравнение возраста Ферми) имеет вид

$$\nabla^2 q(\mathbf{r}, \tau) = \frac{\partial q(\mathbf{r}, \tau)}{\partial \tau},$$

где q — плотность замедления, или число нейтронов в 1 $см^3$, пересекающих за 1 *сек* данное значение энергии E при движении по энергетической шкале. Символический возраст нейтронов

$$\tau(E_к) = \int_{E_к}^{E_н} \frac{D}{\xi \mu_{рас} E}\, dE = \int_0^t D v dt;$$

D — коэффициент диффузии; $\mu_{рас}$ — макроскопическое сечение рассеяния; v — скорость нейтрона; t — время замедления до энергии $E_к$.

Возраст нейтронов τ равен 1/6 среднего квадрата смещения нейтрона (по прямой) при замедлении от энергии $E_н$ до энергии $E_к$: $\tau(E_н \to E_к) = \overline{r_\tau^2}/6$.

Таблица 41.5

Возраст нейтронов для некоторых замедлителей

В скобках в первой колонке указана энергия моноэнергетических нейтронов в мегаэлектронвольтах. Для смесей указано объемное отношение компонент, например 50% H_2O, 50% Zr. $E_к$ — значение граничной энергии, до которой производилось измерение возраста.

Источник нейтронов	Замедлитель (плотность, $г/см^3$)	Детектор ($E_к$, *эв*)	Возраст τ, $см^2$	Литература
Sb-γ-Be (0,025)	H_2O	In	5,48±0,15	[14]
Na-γ-Be (0,970)	H_2O	In	13,9±0,2	[14]
Спектр деления	H_2O	In	27,86±0,1	[14]
Реакция D(d, n) (2,6)	H_2O	In	34,6±2,2	[14]
Ra-α-Be	H_2O	In	48,5	[7]
Po-α-Be	H_2O	In	57,3±2,0	[14]
Реакция T(d, n) (14,1)	H_2O	In	150±6	[14]
Спектр деления	H_2O	(0,025)	30,2±1,5	[1]
Ra-α-Be	H_2O	Dy	55	[7]
Po-α-Be	H_2O	(0,025)	62±5	[9]
Спектр деления	50% H_2O; 50% Al	In	76,8	[7]
» »	50% H_2O; 50% Zr	(0,025)	81,7	[7]
Ra-α-Be	50% H_2O; 50% Pb	In	72,8	[7]
Ra-α-Be	50% H_2O, 50% Fe	In	57,9	[7]
Po-α-Be	50% H_2O; 50% Zr	(0,025)	~92	[7]
Спектр деления	D_2O	In	109±3	[14]
» »	D_2O	(0,025)	120	[1]
Спектр деления	Be (1,85)	In	80,2±0,2	[14]
Ra-α-Be	Be (1,78)	In	120±23	[14]

Источник нейтронов	Замедлитель (плотность, $см^3$)	Детектор ($E_к$, эв)	Возраст τ, $см^2$	Литература
Спектр деления	Be (1,84)	(0,025)	97,2	[1]
» »	BeO (2,96)	In	93,4±4,7	[14]
» »	BeO	(0,025)	105±10	[7]
Sb-γ-Be (0,025)	Графит	In	142—147	[14, 7]
Спектр деления	»	In	312,5±0,5	[14]
Ra-α-Be	»	In	~380	[14]
Pu-α-Be	»	In	~416	[14]
Po-α-Be	»	In	614	[8]
Спектр деления	»	(0,025)	350	[1]
» »	Дифенил	In	54,2±2,4	[10]
Po-α-Be	»	In	106,5±6.8	[10]

Таблица 41.6

Возраст нейтронов спектра деления в смеси $D_2O - H_2O$ до энергии резонанса индия [1]

Отношение объемов $\frac{V(D_2O)}{V(H_2O)}$	Возраст τ, $см^2$
99,8	109±3
99,0	107±5
98,4	106±3
95,3	93±3
94,0	86±3
91,8	78±3

Диффузия нейтронов

Элементарное уравнение диффузии нейтронов (диффузионное уравнение) имеет вид

$$\frac{1}{v}\frac{\partial \Phi}{\partial t} = \operatorname{div}(D \operatorname{grad} \Phi - \mu_{погл}\Phi + S),$$

где Φ — плотность потока нейтронов, $см^{-2} \cdot сек^{-1}$; S — плотность источников $см^{-3}$; $D = \mu_{рас}/[3\mu_{tr}(\mu_{погл} + \mu_{рас})]$ — коэффициент диффузии, $см$ [при $\mu_{погл} \ll \mu_{рас}$ $D \approx 1/(3\mu_{tr})$]; $\mu_{погл}$—макроскопическое сечение поглощения; μ_{tr}—транспортное сечение связанное с транспортной длиной свободного пробега выражением

$$\lambda_{tr} = \frac{1}{\mu_{tr}} = \frac{\lambda_{рас}}{1 - \overline{\cos\psi}} = \frac{1}{\mu_{рас}(1 - \overline{\cos\psi})}.$$

$L = \sqrt{D/\mu_{погл}}$ — длина диффузии ($L^2 = \overline{r^2}/6$, где r—расстояние по прямой линии от точки возникновения нейтрона до захвата); $t = \lambda_{погл}/v = 1/(v\mu_{погл})$ — время диффузии, или время жизни теплового нейтрона.

В непоглощающей среде, имеющей температуру T, нейтроны, находящиеся в тепловом равновесии со средой, имеют максвелловское распределение по скоростям, причем T называют температурой нейтронов.

Таблица 41.7

Максвелловское распределение и средние величины [7]

Обозначения: m — масса нейтрона; v — скорость; k — постоянная Больцмана; T — температура, °K.

Величина	Формула или значение
Нормированное распределение по скоростям	$n(v) = \frac{4}{\sqrt{\pi}}\left(\frac{m}{2kT}\right)^{3/2} v^2 e^{-mv^2/(2kT)}$
Наиболее вероятная скорость	$v_{в.в} = \sqrt{\frac{2kT}{m}} = 128{,}4\sqrt{T}$ $м/сек$
Средняя скорость	$\bar{v} = \sqrt{\frac{8kT}{\pi m}} = 1{,}128 v_{в.в}$
Энергия, соответствующая наиболее вероятной скорости	$mv^2_{в.в}/2 = kT = 8{,}61 \cdot 10^{-5}\ T$ эв
Нормированное распределение по энергии	$n(E) = \frac{2}{\sqrt{\pi}}(kT)^{-3/2}\sqrt{E}\, e^{-E/kT}$
Наиболее вероятная энергия	$kT/2$
Средняя энергия	$m\overline{v^2}/2 = 3kT/2$
Энергия, при которой плотность потока $n(E)\cdot v(E)$ максимальна	kT

Таблица 41.8

Время жизни тепловых нейтронов t в некоторых замедлителях [14]

Замедлитель	Плотность, $г/см^3$	$\lambda_{погл}$, $см$	t, $мсек$
H_2O	1,0	52,8	0,213
D_2O	1,1	32 200	130
D_2O (99,8 мол. %)	1,1	14 300	57,6
Графит	1,6	3210	12,9
Be	1,85	910	3,65
BeO	2,96	1 880	7,6
Парафин	0,87	44	0,178
Плексиглас	1,18	57,7	0,232
Даутерм А*	1,06	87	0,348
Гидрид циркония	3,48	65,7	0,266

* Дифенил и оксидифенил в отношении 0,36:1.

Таблица 41.9

Тепловые диффузионные постоянные веществ [1,5]

Вещество	Плотность, $г/см^3$	$\mu_{погл}$, $см^{-1}$	$\mu_{рас}$, $см^{-1}$	L, $см$	D, $см$
H	$8{,}99\cdot10^{-5}$	$1{,}78\cdot10^{-5}$	$2{,}04\cdot10^{-3}$	5200	482
H_2O	1,00	0,022	3,45	$2{,}767\pm\pm0{,}008$ [14]	0,164
D_2O	1,10	$3{,}05\cdot10^{-5}$	0,449	116 ± 4	0,62
He	$1{,}78\cdot10^{-4}$	$1{,}88\cdot10^{-7}$	$2{,}14\cdot10^{-5}$	10^5	$1{,}87\cdot10^4$
Li	0,534	3,29	0,0649	1,31	5,68
Be	1,84	$1{,}23\cdot10^{-3}$	0,861	$20{,}8\pm0{,}5$	0,532
BeO	2,8	$6{,}2\cdot10^{-4}$	0,760	$32{,}7\pm0{,}5$ [14]	0,75
B	2,45	108	0,546	0,077	0,650
C	1,60	$2{,}99\cdot10^{-4}$	0,385	51 ± 3	0,886
N	$1{,}25\cdot10^{-3}$	$1{,}01\cdot10^{-4}$	$5{,}38\cdot10^{-4}$	2540	651
O	$1{,}43\cdot10^{-8}$	$1{,}04\cdot10^{-8}$	$2{,}26\cdot10^{-4}$	$3{,}78\cdot10^5$	1540
F	$1{,}70\cdot10^{-8}$	$5{,}39\cdot10^{-7}$	$2{,}1\cdot10^{-4}$	$5{,}51\cdot10^4$	1640
Ne	$0{,}90\cdot10^{-3}$	$7{,}52\cdot10^{-5}$	$6{,}45\cdot10^{-5}$	8430	5350
Na	0,971	0,0134	0,102	15,9	3,37
Mg	1,74	$2{,}97\cdot10^{-3}$	0,155	27,3	2,21
Al	2,70	0,0145	0,0844	16,7	4,05
Si	2,35	$8{,}07\cdot10^{-3}$	0,0857	22,2	3,98
P	1,83	$7{,}12\cdot10^{-3}$	0,178	16,4	1,91
S	2,1	0,0205	0,0434	19,5	7,84
Cl	$3{,}21\cdot10^{-3}$	$1{,}84\cdot10^{-3}$	$8{,}73\cdot10^{-4}$	459	389
Ar	$1{,}78\cdot10^{-3}$	$1{,}77\cdot10^{-5}$	$4{,}03\cdot10^{-5}$	$2{,}17\cdot10^4$	8400
K	0,87	0,0278	0,0201	24,7	16,9
Ca	1,54	0,0102	0,0696	21,8	4,87
Sc	2,5	0,804	0,804	0,724	0,421
Ti	4,5	0,328	0,226	2,13	1,49
V	5,96	0,352	0,352	1,65	0,959
Cr	6,92	0,248	0,240	2,37	1,40
Mn	7,42	1,07	0,187	1,30	1,80
Fe	7,86	0,222	0,933	1,28	0,362
Co	8,71	3,38	0,623	0,40	0,541
Ni	8,75	0,413	1,57	0,228	0,215
Cu	8,94	0,326	0,610	1,30	0,552
Zn	7,14	0,0724	0,237	4,43	1,42
Ga	5,90	0,143	0,204	3,40	1,65
Ge	5,46	0,111	0,136	4,72	2,48
As	3,70	0,128	0,179	3,84	1,88
Se	4,5	0,422	0,378	1,45	0,890
Br	3,12	0,158	0,141	3,88	2,38
Kr	$3{,}71\cdot10^{-3}$	$8{,}27\cdot10^{-4}$	$1{,}97\cdot10^{-4}$	1460	1750
Rb	1,53	$7{,}87\cdot10^{-3}$	0,130	18,3	2,55
Sr	2,54	0,0211	0,175	9,54	1,92
Y	5,51	0,0489	0,112	7,57	2,75
Zr	6,44	0,00787	0,340	11,2	0,987
Nb	8,4	0,0632	0,272	4,42	1,23
Mo	10,2	0,173	0,448	2,08	0,749
Tc	11,5	1,54	—	—	—
Ru	12,1	0,185	0,433	2,05	0,776
Rh	12,4	10,8	0,363	0,292	0,924
Pd	12,2	0,551	0,248	1,57	1,35
Ag	10,5	3,69	0,352	0,508	0,953
Cd	8,65	114	0,325	0,0949	1,03
In	7,28	7,30	$0{,}084_0$	0,739	3,99
Sn	7,29	0,0231	0,148	9,90	2,27
Sb	6,22	0,175	0,132	3,80	2,53
Te	6,02	0,134	0,142	4,20	2,36
I	4,94	0,164	0,0844	4,92	3,97
Xe	$5{,}85\cdot10^{-3}$	$9{,}3\cdot10^{-4}$	$1{,}15\cdot10^{-3}$	1770	2890
Cs	1,87	0,238	0,170	2,02	1,96
Ba	3,5	0,0184	0,123	12,2	2,73
La	6,15	0,237	0,403	1,86	0,825
Ce	6,9	0,0217	0,266	7,6	1,25
Pr	6,48	0,313	0,111	3,1	3,0
Nd	6,96	1,34	0,464	0,73	0,72
Sm	7,75	174	0,155	0,112	2,15
Eu	5,22	89	0,166	0,151	2,02
Gd	7,95	1410	—	—	—
Tb	8,33	1,45	—	—	—
Dy	8,56	30,1	3,17	0,187	0,105
Ho	8,76	2,08	—	—	—
Er	9,16	5,7	0,495	0,344	0,67
Tu	9,35	4,23	0,233	0,582	1,43
Yb	7,01	0,903	0,293	1,12	1,14
Lu	9,74	3,76	—	—	—
Hf	13,3	4,71	0,359	0,444	0,931
Ta	16,6	1,16	0,276	1,02	1,21
W	18,9	1,19	0,310	0,953	1,08
Re	21,0	5,84	0,95	0,175	0,252
Os	22,5	1,12	—	—	—
Ir	22,4	30,9	—	—	—
Pt	21,4	0,582	0,661	0,932	0,506
Au	19,3	5,83	0,549	0,323	0,609
Hg	13,6	15,5	0,817	0,163	0,410
Tl	11,9	0,119	0,491	2,39	0,681
Pb	11,3	$5{,}59\cdot10^{-3}$	0,361	12,9	0,925
Bi	9,7	$9{,}5\cdot10^{-4}$	0,252	37,2	1,33
Rn	$9{,}73\cdot10^{-3}$	$5{,}28\cdot10^{-3}$	—	—	—
^{227}Ac	10,0	15.9	—	—	—
Th	11,5	0,226	0,374	2,7	1,65
Pa	15,4	—	—	—	—
U	18,7	0,363	0,393	1,55	3,08
UO_2	10	0,169	0,372	1,9	0,615
^{239}Pu	19,74	57,0	0,478	0,0708	0,286

Таблица 41.10

Диффузионные постоянные D_2O с примесью H_2O при температуре $T = 300°K$ [11]

Примесь H_2O в D_2O, %	$\mu_{погл}^{-1}$, *см* (при v=2200 *м/сек*)	$\mu_{рас}^{-1}$, *см*	L^2, *см²*
0	26500	2,88	25400
0,1	16800	2,87	16100
0,2	12300	2,85	11700
0,3	9670	2,84	9150
0,4	7980	2,82	7500
0,5	6800	2,81	6350
0,6	5920	2,80	5550
0,7	5240	2,78	4850
0,8	4700	2,77	4350
0,9	4270	2,76	3930
1,0	3900	2,74	3560

Таблица 41.11

Значение альбедо тепловых нейтронов для плоских отражателей из различных рассеивающих материалов [14]

Рассеиватель	Толщина отражателя			
	20 см	*40 см*	*60 см*	∞
H_2O	0,811	0,811	0,811	0,811
D_2O	0,853	0,922	0,947	0,981
Be	0,881	0,907	0,910	0,911
Графит	0,834	0,903	0,923	0,936

41.5. КОГЕРЕНТНЫЕ ЯВЛЕНИЯ ПРИ ПРОХОЖДЕНИИ НЕЙТРОНОВ ЧЕРЕЗ ВЕЩЕСТВО

Когерентное рассеяние нейтронов. В сечении рассеяния нейтронов с энергиями $\leqslant 0{,}1$ *эв* принято выделять когерентную $\sigma_к$ и некогерентную $\sigma_{нек}$ части. Упорядоченное расположение ядер рассеивателя приводит к постоянству фазовых соотношений рассеянных от разных ядер нейтронных волн, т. е. приводит к когерентному (интерференционному) рассеянию. Случайное положение спинов нейтронов и рассеивающих ядер, а также хаотическое расположение изотопов в атомах рассеивателя приводят к «спиновой» и «изотопической» некогерентным составляющим в $\sigma_{нек}$. Когерентная и некогерентная составляющие сечения характеризуются своими амплитудами рассеяния $b_к$ и $b_{нек}$:

$$b_к = \frac{I+1}{2I+1} b_+ + \frac{I}{2I+1} b_-;$$

$$b_{нек} = \frac{\sqrt{I(I+1)}}{2I+1} (b_+ - b_-),$$

где I — спин рассеивающего ядра, амплитуды b_+ и b_- характеризуют рассеяние в состояниях, когда полный спин ядра и нейтрона соответственно равны $J = I + 1/2$ и $J = I - 1/2$. Сечения процессов находятся умножением квадратов амплитуд на 4π, например $\sigma_к = 4\pi |b_к|^2$. Температурные колебания атомов в решетке изменяют величину $\sigma_к$. Этот эффект учитывается множителем Дебая — Уоллера, см., например, [12].

Таблица 41.12

Сечения когерентного рассеяния $\sigma_к$ (со знаком) [12]

Ядро	$\sigma_к$, *барн*	Ядро	$\sigma_к$, *барн*
^{1}H	1,79±0,02 (—)	Ge	8,8±0,5 (+)
^{2}D	5,4±0,3 (+)	^{75}As	5,0±0,3 (+)
He	1,1±0,2 (+)	Se	10±0,6 (+)
Li	0,40±0,03 (—)	Br	5,7±0,4 (+)
^{6}Li	6±3 (+)	Kr	7,2±0,4
^{7}Li	0,80±0,05 (—)	Rb	3,8±0,3 (+)
^{9}Be	7,53±0,07 (+)	Sr	4,1±0,3 (+)
C	5,50±0,04	^{89}Y	8,05±0,25 (+)
^{13}C	4,5±0,6 (+)	Zr	6,3±0,3 (+)
N	11,0±0,5 (+)	Nb	6,0±0,2 (+)
O	4,2±0,3 (+)	Mo	5,6±0,2 (+)
^{19}F	3,8±0,3 (+)	Rh	4,5±0,5 (+)
Na	1,55±0,05 (+)	Pd	5,0±0,3 (+)
Mg	3,60±0,10 (+)	Ag	4,6±0,3 (+)
^{27}Al	1,50±0,10 (+)	^{107}Ag	8,7±0,5 (+)
Si	2,0±0,20 (+)	^{109}Ag	2,3±0,2 (+)
^{31}P	3,10±0,16 (+)	Sn	4,6±0,3 (+)
S	1,20±0,08 (+)	Sb	3,7±0,3 (+)
Cl	1,21±0,80 (+)	Te	4,0±0,3 (+)
Ar	0,5±0,10 (+)	^{120}Te	3,5±0,7
^{36}Ar	72±5 (+)	^{123}Te	4,2±0,5
K	1,5±0,1 (+)	^{130}Te	4,1±0,4
Ca	3,0±0,1 (+)	^{127}I	3,4±0,2 (+)
^{40}Ca	3,0±0,1 (+)	Xe	3,0±0,2 (+)
^{44}Ca	0,4±0,03 (+)	^{133}Cs	3,0±0,2 (+)
^{45}Sc	17,5±1,5	Ba	3,5±0,2 (+)
Ti	1,4±0,3 (—)	La	8,7±0,3 (+)
^{46}Ti	2,9±0,1 (+)	Ce	2,7±0,2 (+)
^{47}Ti	1,4±0,1 (+)	^{140}Ce	2,8±0,11 (+)
^{48}Ti	4,2±0,2 (—)	^{142}Ce	2,6±0,2 (+)
^{49}Ti	0,08±0,02 (+)	^{141}Pr	2,4±0,2 (+)
^{50}Ti	3,8±0,2 (+)	Nd	6,5±0,4 (+)
V	0,032±0,008 (—)	^{141}Nd	7,5±0,6 (+)
Cr	1,56±0,03 (+)	^{144}Nd	1,0±0,2 (+)
Mn	1,7±0,1 (—)	^{146}Nd	9,5±0,4 (+)
Fe	11,37±0,05 (+)	^{152}Sm	3±1 (—)
^{54}Fe	2,20±0,13 (+)	^{154}Sm	8±2 (+)
^{56}Fe	12,8±0,2 (+)	Er	7,8±0,4 (+)
^{57}Fe	0,64±0,04 (+)	^{181}Ta	6,1±0,4 (+)
^{59}Co	1,00±0,06 (+)	W	2,74±0,05 (+)
Ni	13,2±0,2 (+)	Os	15,2±1,5
^{58}Ni	25,9±0,3 (+)	Pt	11,2±0,7 (+)
^{60}Ni	1,1±0,1 (+)	Au	7,3±0,1 (+)
^{62}Ni	9,5±0,1 (+)	Hg	22±2 (+)
Cu	7,5±0,2 (+)	Tl	10±1 (+)
^{63}Cu	5,7±0,3	Pb	11,5±2 (+)
^{65}Cu	15,5±0,6	^{209}Bi	9,95±0,04 (+)
Zn	4,3±0,3 (+)		

Дифракция нейтронов. При прохождении пучка медленных нейтронов через кристалл возникают вторичные, дифрагированные (т. е. «отраженные») кристаллическими плоскостями пучки нейтронов. Направления пучков, дифрагированных кристаллом, определяются условиями Вульфа—Брегга: $\lambda = 2d_{hkl} \sin\theta$, где d_{hkl} — межплоскостное расстояние для плоскостей с индексами h, k, l; θ — угол отражения.

Преломление и отражение нейтронов. При пересечении границы двух сред нейтронный пучок так же, как и луч света, отражается и преломляется. Показатель преломления n рассчитывается по формуле $n^2 - 1 = -\lambda^2 N b_к/\pi$, где N—число атомов в 1 *см*³, $b_к$—амплитуда когерентного рассеяния и λ — длина волны падающих

нейтронов. Влияние поглощения среды на показатель преломления незначительно. Например, для кадмия при учете поглощения показатель преломления меняется на 0,5% для нейтронов с $\lambda = 2$ Å.

Рассеяние нейтронов в среде, магнитные моменты атомов которой имеют упорядоченную ориентацию (ферро-, ферри-, антиферромагнетики), является когерентным. Показатель преломления в этом случае определяется из выражения $n^2 - 1 = -\lambda^2 N b_к/\pi \pm \mu B/E$, где μ — магнитный момент нейтрона; E — его энергия и B — магнитная индукция насыщения.

Предельный угол скольжения θ_c для полного отражения нейтронов от зеркала равен

$$\theta_c = \lambda \sqrt{N b_к/\pi}.$$

Таблица 41.13

Предельные углы полного отражения нейтронов

с $\lambda = 1{,}873$ Å [12]

Зеркало	θ_c	Зеркало	θ_c
Be	12,0′	Ni	11,5′
C	10,5′	Zn	7,1′
Fe	10,7′	Cu	9,5′

Кристаллические нейтронные фильтры. Для системы беспорядочно ориентированных кристаллитов в поликристаллическом нейтронном фильтре условие Вульфа — Брегга удовлетворяется только для нейтронов с длиной волны $\lambda < 2d_m$, где d_m — максимальное межплоскостное расстояние кристаллической решетки. При прохождении пучка нейтронов через такой фильтр из пучка вследствие когерентного рассеяния будут выводиться нейтроны с $\lambda < 2d_m$. Ослабление нейтронов с $\lambda > 2d_m$ происходит за счет процессов некогерентного упругого рассеяния, теплового неупругого рассеяния и поглощения. Для многих веществ сечения последних трех процессов много меньше, чем сечение когерентного рассеяния, поэтому в пучке, прошедшем через фильтр, практически отсутствуют нейтроны с $\lambda < 2d_m$.

Таблица 41.14

Граничные длины волн для кристаллических нейтронных фильтров [13]

Вещество	$\lambda_{гр}$, Å	$E_{гр}$, эв
Be	3,95	0,00520
BeO	4,40	0,00420
Pb	5,70	0,00250
Графит	6,69	0,00183
Bi	8,00	0,00128

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Гордеев И. В., Кардашев Д. А., Малышев А. В.** Ядерно-физические константы. М., Госатомиздат, 1963.
2. **Юз Д., Шварц Р.** Атлас нейтронных сечений. М., Атомиздат, 1959.
3. **Schmidt J. J.** Neutron cross section for fast reactor materials. Karlsruhe, 1962.
4. **Вейнберг А., Вигнер Е.** Физическая теория ядерных реакторов. Пер. с англ. М., Изд-во иностр. лит., 1961.
5. **«Атомная энергия»**, 1958, т. 5, вып. 1, с. 82.
6. **Глесстон С., Эдлунд М.** Основы теории ядерных реакторов. Пер. с англ. М., Изд-во иностр. лит., 1954.
7. **Физика** ядерных реакторов. Пер. с англ. Под ред. Стенбока И. А. М., Атомиздат, 1964.
8. **Шалашов Ю. П.** «Атомная энергия», 1965, т. 18, вып. 3, с. 282.
9. **Григорьев И. С.** «Атомная энергия», 1967, т. 23, вып. 4, с. 352.
10. **Юрова Л. Н.** и др. В кн.: «Нейтронная физика». М., Атомиздат, 1961, с. 192.
11. **Галанин А. Д.** Теория ядерных реакторов на тепловых нейтронах. М., Атомиздат, 1959.
12. **Кёртис Л.** Введение в нейтронную физику. Пер. с англ. М., Атомиздат, 1965.
13. **Гуревич И. И., Тарасов Л. В.** Физика нейтронов низких энергий. М., «Наука», 1965.
14. **Бекурц К., Виртц К.** Нейтронная физика. Пер. с нем. М., Атомиздат, 1968.

ГЛАВА 42

ДЕЛЕНИЕ ЯДЕР

42.1. ВВЕДЕНИЕ

Деление атомного ядра — это процесс распада возбужденного ядра на 2 (реже 3 и 4) сравнимых по массе ядра-осколка деления. Деление ядер сопровождается испусканием вторичных нейтронов, γ-квантов и выделением энергии. Делению подвержены ядра всех тяжелых элементов, если только они находятся в достаточно высоких возбужденных состояннях. Процесс деления — это один из возможных путей снятия возбуждения ядра; другие конкурирующие процессы: испускание γ-квантов, испускание нейтронов и т. п.

Энергию возбуждения можно сообщить ядру облучением его γ-кваитами или бомбардировкой его частицами высокой энергии. При неупругом соударении частица может передать ядру часть своей энергии, которая пойдет на возбуждение ядра. Еще один путь получения возбужденного ядра — это образование составного ядра при столкновении с частицей. Особо важное значение имеет процесс образования составных ядер при захвате нейтронов.

Порог деления, вызванного γ-квантами (т. е. энергия наиболее мягких γ-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 величину энергии связи нейтрона с ядром мишени. Поэтому

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 делящимися.

Кроме указанных механизмов возбуждения ядер, которые приводят к делению, возможен процесс деления ядер без каких-либо видимых внешних воздействий на ядро. Такой процесс называется спонтанным делением. Вероятность спонтанного деления несоизмеримо меньше вероятности распада тех же ядер, находящихся в возбужденном состоянии. Например, константа распада $(\Gamma_f/\hbar)$ для спонтанного деления ^{235}U приблизительно равна 10^{-24} *сек*$^{-1}$, а для возбужденного состояния с энергией возбуждения выше порога деления $\Gamma_f/\hbar \sim 10^{14}$ *сек*$^{-1}$.

После захвата нейтрона образуется составное ядро. Время жизни составного ядра по отношению к делению $\tau = \hbar/\Gamma_f \approx 10^{-14}$ *сек*, это время значительно превышает время, в течение которого нейтрон с энергией 1 *Мэв* пролетает поперечник ядра ($\sim 10^{-21}$ *сек*).

Образующиеся при распаде ядра осколки в большинстве случаев имеют разные массы, например при делении ядер урана масса легкого осколка 90—100 *а. е. м.*, а тяжелого 130—140 *а. е. м.* Скорости осколков $\sim 10^9$ *см/сек*. Импульсы осколков равны и противоположны по знаку. Скорость осколков достигает 90% конечного значения уже при расстоянии между ними $\sim 10^{-11}$ *см*, т. е. когда они еще находятся внутри наинизшей электронной оболочки атома. Осколки деления первоначально находятся в возбужденных состояниях. Их суммарная энергия возбуждения ~20 *Мэв*. Возбужденные осколки деления ведут себя так же, как и другие возбужденные ядра: они распадаются с испусканием частиц и γ-квантов. Поскольку осколки имеют большие заряды и переобогащены нейтронами, то испускание нейтронов наиболее вероятно. Время жизни осколков по отношению к испусканию нейтронов $\sim 10^{-17}$ *сек*. Эти нейтроны, испускаемые при делении ядер возбужденными осколками, называются «мгновенными нейтронами деления». Средняя энергия возбуждения осколка после испускания нейтронов равна половине энергии связи нейтрона и равна для обоих осколков 6—7 *Мэв*. Эта энергия излучается в виде γ-квантов за время, характерное для испускания γ-квантов, т. е. около 10^{-14} *сек*.

В начале своего пути осколки имеют положительный заряд от 10 до 20 электронных зарядов, так как некоторые из орбитальных электронов составного ядра «стряхиваются» при делении. Проходя через вещество, осколки теряют свою энергию в основном на ионизацию среды. Вдоль пути двух осколков образуется $\sim 5 \cdot 10^6$ пар ионов. Замедлившиеся осколки захватывают электроны и к моменту, когда их энергия уменьшается до тепловой энергии среды, становятся электрически нейтральными. Время замедления осколков в воздухе $\sim 10^{-9}$ *сек*, а в плотных средах $\sim 10^{-12}$—10^{-13} *сек*. За это время они пробегают в воздухе расстояние ~2 *см*, а в плотных средах $\sim 10^{-3}$ *см*.

Заряд замедлившихся осколков (называемых обычно продуктами деления) сильно отличается от заряда стабильных атомов с той же массой. Это различие уменьшается в результате серии β-распадов (обычно трех или четырех для каждого осколка).

В отдельных случаях β-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 β-распада, то испускание нейтронов будет следовать за β-распадом материнского ядра почти мгновенно и временная зависимость интенсивности запаздывающих нейтронов будет такая же, как у β-распада материнского ядра.

42.2. СПОНТАННОЕ ДЕЛЕНИЕ

При спонтанном делении наблюдается самопроизвольный развал ядра на осколки (обычно 2) и некоторое количество свободных нейтронов. Кинетическая энергия осколков составляет около 150 *Мэв*. Процесс деления сопровождается эмиссией нескольких γ-квантов. Усредненное по достаточно большому количеству распадов, число нейтронов, появляющихся в результате деления ядра, называют средним числом нейтронов на акт деления $\bar{\nu}$.

Таблица 42.1

Периоды полураспада по отношению к спонтанному делению и средние числа нейтронов $\bar{\nu}$, испускаемых на акт деления

Ядро	$T_{1/2}$, годы	$\bar{\nu}$	Литература
^{230}Th	$1{,}5 \cdot 10^{17}$	1,24±0,15*	[2, 3]
^{232}Th	$1{,}4 \cdot 10^{18}$	—	[4]
^{233}Th	—	1,36±0,15*	[3]
^{230}Pa	$>10^{16}$	—	[4]
^{231}Pa	10^{16}	—	[3]
^{232}U	$8 \cdot 10^{13}$	—	[2]
^{233}U	$>3 \cdot 10^{17}$	—	[3]
^{234}U	$2 \cdot 10^{16}$	1,63±0,15*	[2, 3]
^{235}U	$1{,}9 \cdot 10^{17}$	—	[2]
^{236}U	$2 \cdot 10^{16}$	1,58±0,15*	[2, 3]
^{238}U	$8 \cdot 10^{15}$	2,30±0,20	[2]
^{239}U	—	1,71±0,15*	[3]
^{237}Np	$>4 \cdot 10^{16}$	—	[3]
^{238}Np	—	1,67±0,15	[3]
^{239}Np	$>5 \cdot 10^{12}$	—	[2]
^{236}Pu	$3{,}5 \cdot 10^{9}$	2,17±0,20	[2]
^{238}Pu	$4{,}9 \cdot 10^{10}$	2,28±0,10	[2]
^{239}Pu	$5{,}5 \cdot 10^{15}$	—	[3]
^{240}Pu	$1{,}2 \cdot 10^{11}$	2,23±0,05	[2]
^{242}Pu	$6{,}8 \cdot 10^{10}$	2,28±0,13	[2]
^{244}Pu	$2{,}5 \cdot 10^{10}$	—	[2]
^{241}Am	$>1{,}4 \cdot 10^{13}$	—	[3]
^{242}Am	—	2,42±0,15*	[3]
^{240}Cm	$7{,}9 \cdot 10^{5}$	—	[1]
^{242}Cm	$7{,}2 \cdot 10^{6}$	2,59±0,11	[2]
^{244}Cm	$1{,}4 \cdot 10^{7}$	2,82±0,09	[2]
^{246}Cm	$1{,}7 \cdot 10^{7}$	—	[1]
^{248}Cm	$4{,}6 \cdot 10^{6}$	—	[2]
^{250}Cm	$1{,}7 \cdot 10^{4}$	—	[1]
^{249}Bk	$6 \cdot 10^{8}$	3,72±0,16	[2, 3]
^{246}Cf	$2{,}1 \cdot 10^{8}$	2,92±0,9	[2]
^{248}Cf	$7 \cdot 10^{8}$	—	[2]
^{249}Cf	$1{,}5 \cdot 10^{9}$	—	[3]
^{250}Cf	$1{,}5 \cdot 10^{4}$	—	[2]
^{252}Cf	85	3,78±0,04	[1, 2, 4]
^{254}Cf	55,6 дня	3,90±0,14	[2]
^{253}Es	$6{,}4 \cdot 10^{5}$	—	[1]
^{254}Es	$1{,}5 \cdot 10^{5}$	—	[2]
^{252}Fm	>8	—	[1]
^{254}Fm	0,675	4,05±0,19	[1, 2]
^{255}Fm	10^{4}	—	[1]
^{256}Fm	2,7 *ч*	—	[1]
^{257}Fm	100	—	[1]
^{256}Md	3,5 *ч*	—	[2]
^{260}Ku	0,3 *сек*	—	[1]

* Значение экстраполировано от полученного при измерениях с тепловыми или быстрыми нейтронами.

42.3. СЕЧЕНИЯ ДЕЛЕНИЯ ЯДЕР

На рис. 42.1—42.4 представлены графики зависимостей сечения деления некоторых ядер от энергии нейтрона

Таблица 42.2

Сечения делении σ_f ядер под действием тепловых нейтронов ($v = 2200$ м/сек) [4]

$\bar{\nu}$ — число вторичных нейтронов, испускаемых на акт деления. Значения, отмеченные звездочкой, получены для распределения нейтронов в реакторе.

Ядро	σ_f, барн	$\bar{\nu}$	Ядро	σ_f, барн	$\bar{\nu}$	Ядро	σ_f, барн	$\bar{\nu}$
^{223}Ra	<100	—	^{234}Pa	$\leqslant 500$	—	^{236}Pu	170 ± 35	—
^{226}Ra	$<10^{-4}$	—	^{230}U	25 ± 10	—	^{237}Pu	2500 ± 200	—
^{228}Ra	<2	—	^{231}U	400 ± 300	—	^{238}Pu	$16{,}8 \pm 0{,}3$	—
^{227}Ac	<2	—	^{232}U	80 ± 20	—	^{239}Pu	742 ± 4	$2{,}89 \pm 0{,}04$
^{227}Th	1500 ± 1000	—	^{233}U	525 ± 4	$2{,}51 \pm 0{,}02$	^{240}Pu	$0{,}030 \pm 0{,}045$	—
^{228}Th	$\leqslant 0{,}3$	—	^{234}U	$\leqslant 0{,}65$	—	^{241}Pu	1025 ± 10	$2{,}96 \pm 0{,}08$
^{229}Th	$30{,}5 \pm 3$	$2{,}13 \pm 0{,}03$	^{235}U	582 ± 4	$2{,}44 \pm 0{,}02$	^{242}Pu	$0{,}3$	—
^{230}Th	$\leqslant 10^{-3}$	$2{,}13 \pm 0{,}03$	^{238}U	$6 \cdot 10^{-4}$	—	^{241}Am	$3{,}1 \pm 0{,}2$	$3{,}35 \pm 0{,}04$ [5]
^{232}Th	$(6 \pm 2)\ 10^{-5}$	—	^{239}U	14 ± 3*	—	^{242}Am	2500 ± 1000	$3{,}39 \pm 0{,}04$ [5]
^{233}Th	15 ± 2*	—	^{234}Np	900 ± 300	—	^{243}Am	6400 ± 500*	—
^{234}Th	$<10^{-2}$	—	^{236}Np	2800 ± 800	—	^{244}Am	$<7{,}5 \cdot 10^{-2}$	—
^{230}Pa	1500 ± 250	—	^{237}Np	19 ± 3	$2{,}96 \pm 0{,}5$	^{242}Cm	<5*	
^{231}Pa	$(10 \pm 5)\ 10^{-3}$	—	^{238}Np	1600 ± 100	—	^{243}Cm	700 ± 50	—
^{232}Pa	700 ± 100	—	^{239}Np	<1	—	^{245}Cm	1900 ± 200	$3{,}39 \pm 0{,}05$ [5]
^{233}Pa	$<0{,}1$	—				^{249}Cf	600 ± 400*	—

42.4. НЕЙТРОНЫ ДЕЛЕНИЯ

Энергетические спектры мгновенных нейтронов деления. Спектры деления различных ядер весьма подобны. В простейшем виде, в пределах ошибок эксперимента, спектры нейтронов деления могут быть представлены максвелловским распределением [9, 14]:

$$N(E) = \frac{2}{\sqrt{\pi \theta^3}} \sqrt{E}\, e^{-E/\theta},$$

где E — энергия нейтрона в лабораторной системе координат, а параметр θ связан со средней энергией спектра $\bar{E}$:

$$\bar{E} = 3\theta/2.$$

Таблица 42.3

Средние энергии энергетических распределений мгновенных нейтронов для различных изотопов

Ядро	Вид деления	$\bar{E}$, Мэв	Литература
^{233}U	Тепловыми нейтронами	$1{,}96 \pm 0{,}05$	[14]
^{235}U	» »	$1{,}935 \pm 0{,}05$	[14]
^{239}Pu	» »	$2{,}00 \pm 0{,}05$	[14]
^{240}Pu	Спонтанное	1,86	[10]
^{241}Pu	Тепловыми нейтронами	$2{,}002 \pm 0{,}051$	[4]
^{252}Cf	Спонтанное	$2{,}2 \pm 0{,}1$	[14]

Среднее число вторичных нейтронов $\bar{\nu}$, возникающих при делении ядра, имеет тенденцию увеличиваться с возрастанием энергии нейтронов E_n, вызывающих деление. Эта зависимость может быть представлена выражением

$$\bar{\nu}(E_n) = \bar{\nu}_0 + aE_n,$$

где E_n — энергия нейтронов, вызывающих деление, и $\bar{\nu}_0$ — среднее число вторичных нейтронов при делении тепловыми нейтронами. Параметр a слабо зависит от энергии нейтрона.

Таблица 42.4

Среднее число вторичных нейтронов [4]

Ядро	E_n, Мэв	$\bar{\nu}$
^{232}Th	1,40	$2{,}35 \pm 0{,}08$
	1,45	2,4
	2,3	$2{,}26 \pm 0{,}10$ [11]
	3,5	$2{,}35 \pm 0{,}07$
	3,6	$2{,}42 \pm 0{,}10$
	3,75	$2{,}43 \pm 0{,}9$ [11]
	4,0	$2{,}70 \pm 0{,}10$
	14	$4{,}64 \pm 0{,}2$
	14,3	$3{,}68 \pm 0{,}25$ [12]
	14,9	$4{,}43 \pm 0{,}13$
	15,7	$4{,}25 \pm 0{,}13$ [11]
^{233}U	Тепловые	$2{,}51 \pm 0{,}02$
	0,08	$2{,}58 \pm 0{,}06$ [15]
	1,8	$2{,}71 \pm 0{,}04$
	4,0	$3{,}06 \pm 0{,}12$
	14,0	$4{,}23 \pm 0{,}24$ [13]
	14,0	$4{,}4 \pm 0{,}2$
	14,3	$4{,}20 \pm 0{,}30$ [12]
	14,5	$4{,}05 \pm 0{,}25$
	14,8	$4{,}4 \pm 0{,}45$ [2]
	15,0	$4{,}42 \pm 0{,}17$
^{235}U	Тепловые	$2{,}44 \pm 0{,}02$
	0,08	$2{,}43 \pm 0{,}02$
	0,25	$2{,}47 \pm 0{,}02$
	0,40	$2{,}38 \pm 0{,}018$
	0,50	$2{,}47 \pm 0{,}02$
	0,70	$2{,}52 \pm 0{,}06$
	0,746	$2{,}48 \pm 0{,}05$ [15]
	0,75	$2{,}45 \pm 0{,}01$
	1,0	$2{,}48 \pm 0{,}018$
	1,2	$2{,}60 \pm 0{,}05$

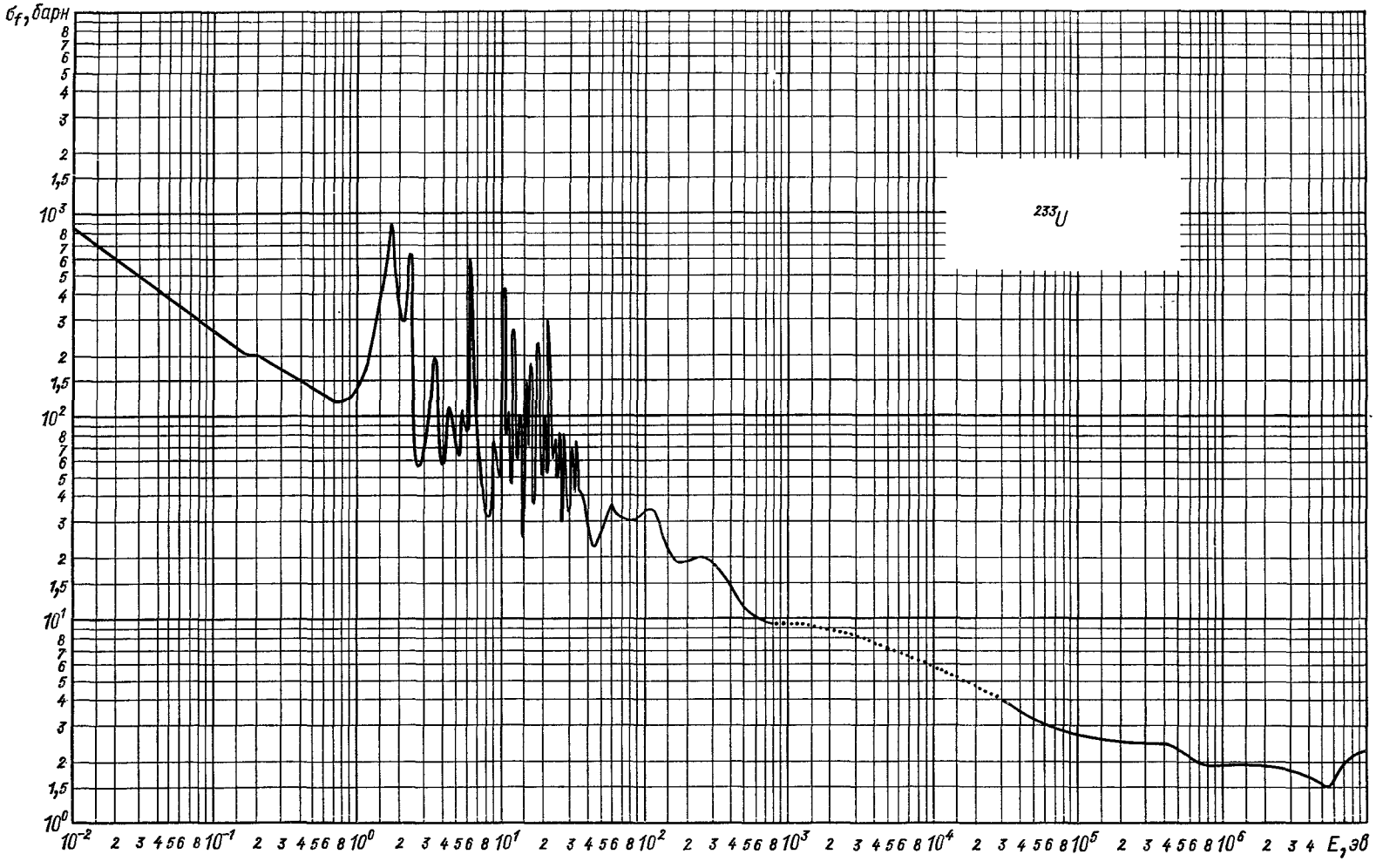


Рис. 42. 1. Зависимость сечения деления ^{233}U от энергии нейтронов [6].

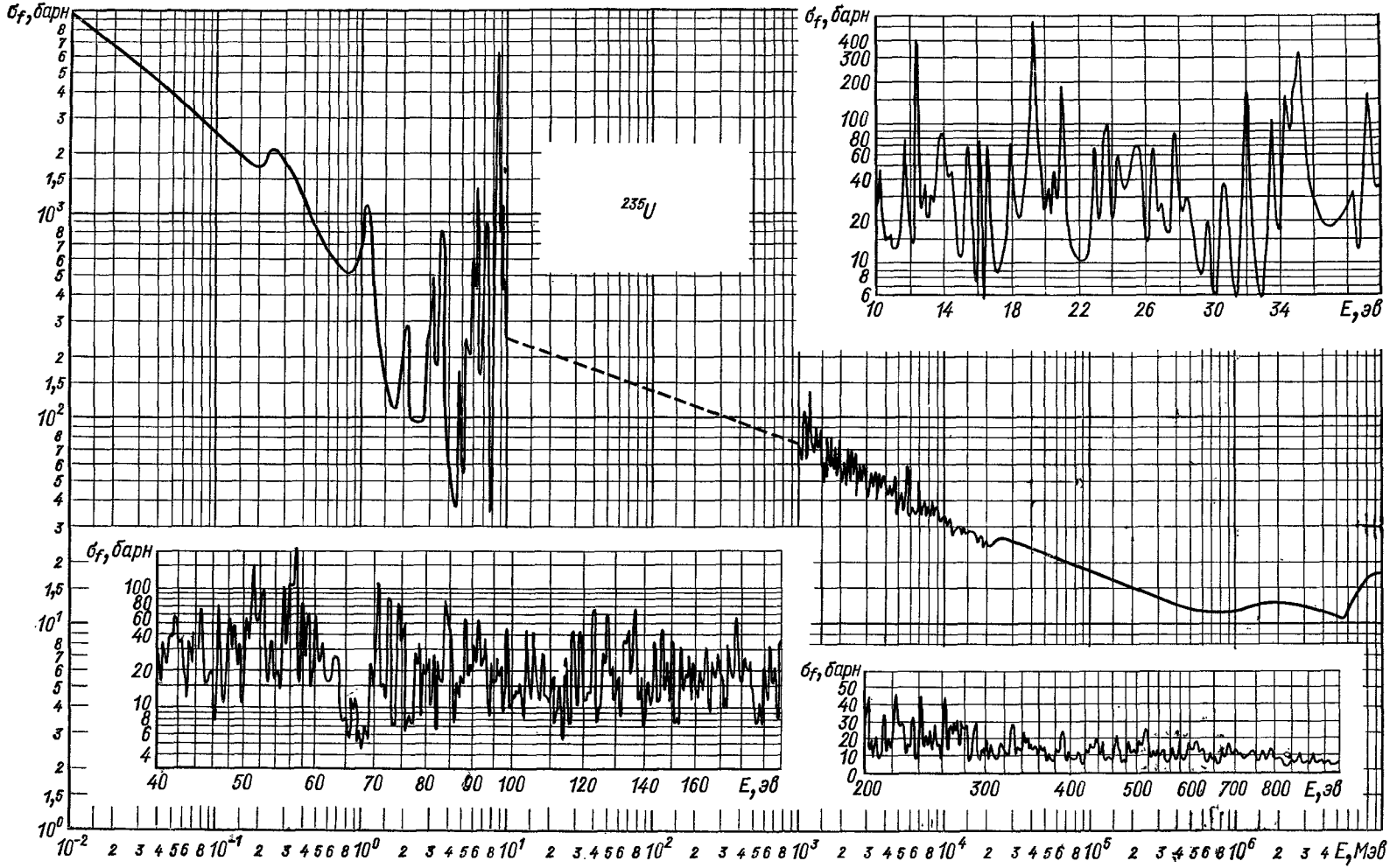


Рис. 42.2. Зависимость сечения деления ^{235}U от энергии нейтронов [7].

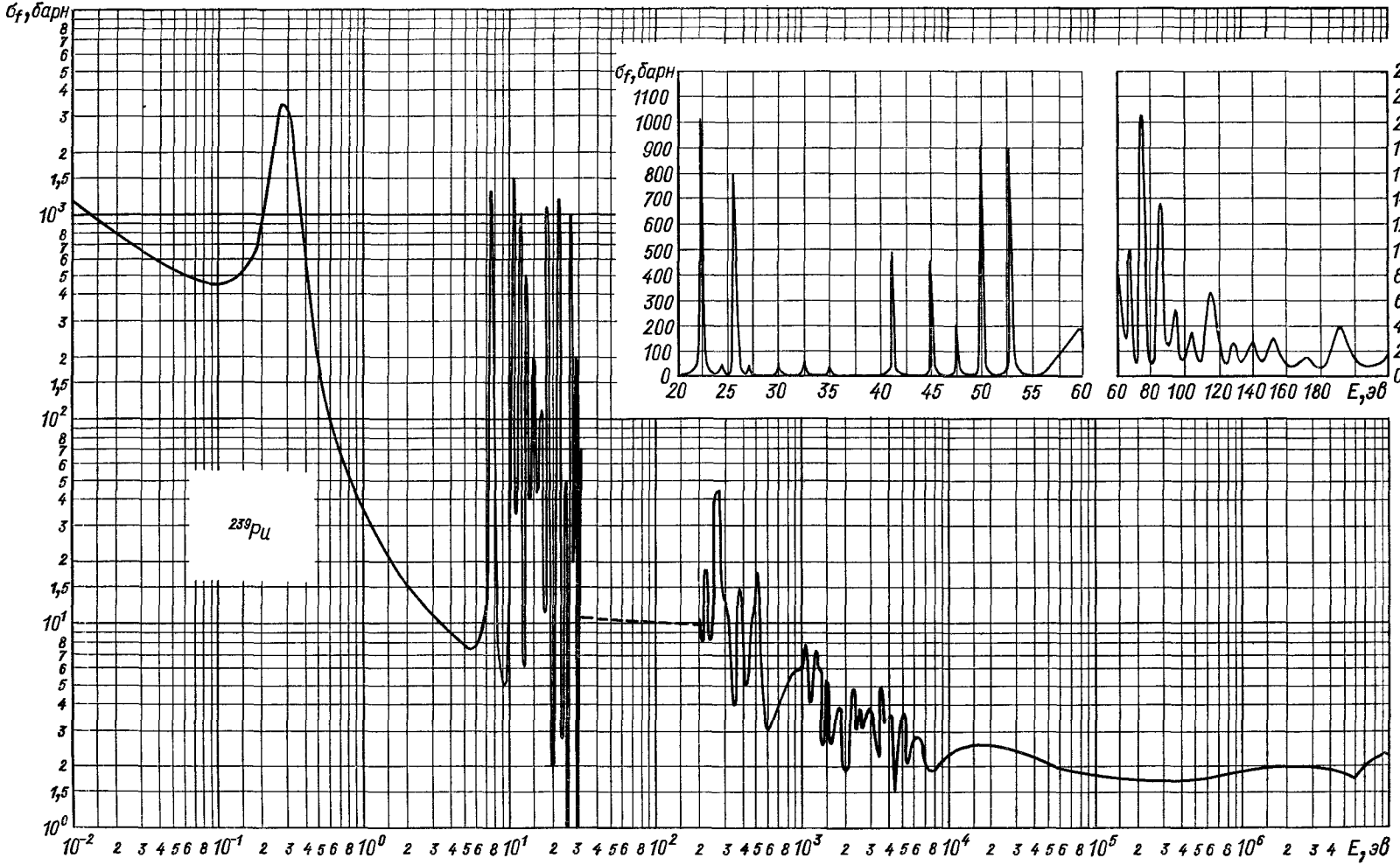


Рис. 42.3. Зависимость сечения деления ^{239}Pu от энергии нейтронов [7].

Продолжение табл. 42.4

Ядро	E_n, *Мэв*	$\bar{\nu}$
^{235}U	1,25	2,54±0,019 [15]
	1,50	2,57±0,019 [15]
	1,8	2,74±0,05
	1,9	3,04±0,55 [15]
	2,0	2,63±0,017
	2,5	2,66±0,017
	3,0	2,72±0,02
	4,0	3,11±0,35 [15]
	4,5	3,26±0,08
	5,0	3,24±0,24
	4,8	3,20±0,25
	14,0	4,13±0,08
	14,0	4,4±0,24
	14,1	4,52±0,32 [15]
	14,5	4,25±0,25
	14,8	4,7±0,5 [19]
	15,0	4,51±0,19
^{238}U	1,5	2,65±0,07
	2,3	2,72±0,08 [11]
	2,5	2,72±0,10
	3,1	2,86±0,06
	3,2	2,80±0,05
	3,6	2,79±0,09
	3,75	3,02±0,10 [11]
	4,0	3,11±0,10
	4,25	3,10±0,40 [15]
	14,0	4,36±0,14
	14,1	4,13±0,25 [15]
	14,2	4,55±0,15
	14,5	4,3±0,2
	14,9	4,75±0,12
^{237}Np	2,5	2,72±0,15
^{239}Pu	Тепловые	2,89±0,03
	0,08	3,05±0,08
	1,3	3,08±0,05 [15]
	1,75	3,14±0,09
	1,8	3,21±0,06
	1,8	3,01±0,15 [15]
	2,1	3,21±0,12
	4,0	3,43±0,11
	4,25	3,66±0,40 [15]
	14,0	4,62±0,28 [13]
	14,1	4,85±0,50 [15]
	14,5	4,71±0,20
	15,0	4,71±0,20
^{240}Pu	Спектр деления	3,42±0,2 [15]
	3,6	3,25±0,15 [15]
	15,0	4,4±0,2 [15]
^{241}Pu	Тепловые	2,96±0,08
	Спектр деления	3,42±0,2

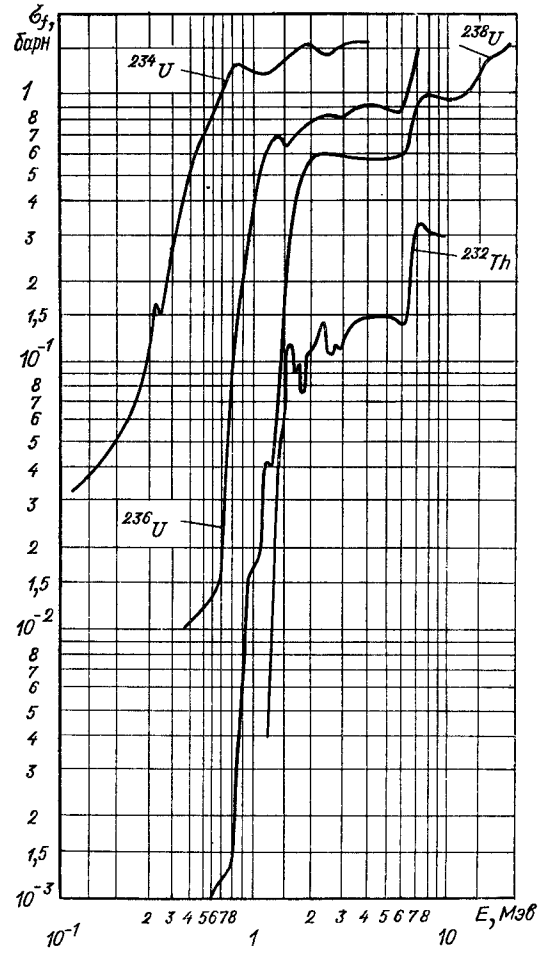


Рис. 42.4. Зависимость сечения деления ядер урана и тория от энергии нейтронов [8].

42.5. МГНОВЕННОЕ γ-ИЗЛУЧЕНИЕ, СОПРОВОЖДАЮЩЕЕ ДЕЛЕНИЕ

Энергия возбуждения осколков деления, остающаяся после эмиссии «мгновенных» нейтронов, обычно равна 3—4 *Мэв/осколок*. Это возбуждение осколков снимается испусканием «мгновенных» γ-квантов. Процесс излучения происходит за времена порядка 10^{-14} *сек* вслед за испусканием нейтронов.

Полная эффективная энергия мгновенного γ-излучения на 1 деление = 7,5 *Мэв*. Средняя энергия мгновенного γ-излучения = 0,9 *Мэв*. Среднее число γ-квантов на 1 деление $\bar{N}_\gamma = 8{,}3$. Среднее число γ-квантов $\bar{N}_\gamma$ обнаруживает слабую зависимость от суммарной кинетической энергии осколков деления T. Значение $\bar{N}_\gamma$ падает линейно с ростом T [2].

В табл. 42.5 представлено энергетическое распределение γ-квантов, сопровождающих деление ^{235}U.

$N(E_\gamma)$ — число γ-квантов, испускаемых при делении внутри энергетического интервала шириной 0,1 *Мэв*; $E_{эф} = E_\gamma N(E_\gamma)$ *Мэв/деление*.

Таблица 42.5

Спектр мгновенных γ-квантов, сопровождающих деление ^{235}U тепловыми нейтронами [20].

E_γ, *Мэв*	$N(E_\gamma)$	$E_{эфф}$	E_γ, *Мэв*	$N(E_\gamma)$	$E_{эфф}$
0,1	0,176	0,0176	3,9	0,0126	0,0491
0,2	0,815	0,1630	4,0	0,0116	0,0464
0,3	0,697	0,2091	4,1	0,0106	0,0435
0,4	0,661	0,2644	4,2	0,00985	0,0414
0,5	0,662	0,3110	4,3	0,00908	0,0391
0,6	0,553	0,3318	4,4	0,00830	0,0365
0,7	0,474	0,3318	4,5	0,00764	0,0344
0,8	0,408	0,2464	4,6	0,00704	0,0324
0,9	0,353	0,3177	4,7	0,00649	0,0305
1,0	0,310	0,3100	4,8	0,00604	0,0290
1,1	0,272	0,2992	4,9	0,00556	0,0272
1,2	0,240	0,2880	5,0	0,00519	0,0260
1,3	0,205	0,2665	5,1	0,00470	0,0240
1,4	0,180	0,2520	5,2	0,00430	0,0224
1,5	0,158	0,2370	5,3	0,00399	0,0217
1,6	0,139	0,2224	5,4	0,00371	0,0200
1,7	0,125	0,2125	5,5	0,00341	0,0188
1,8	0,113	0,2034	5,6	0,00314	0,0176
1,9	0,102	0,1938	5,7	0,00290	0,0165
2,0	0,113	0,2260	5,8	0,00264	0,0153
2,1	0,0818	0,1718	5,9	0,00243	0,0143
2,2	0,0726	0,1597	6,0	0,00223	0,0134
2,3	0,0651	0,1497	6,1	0,00204	0,0124
2,4	0,0579	0,1390	6,2	0,00188	0,0117
2,5	0,0512	0,1280	6,3	0,00172	0,0108
2,6	0,0457	0,1188	6,4	0,00157	0,0100
2,7	0,0409	0,1104	6,5	0,00139	0,0090
2,8	0,0369	0,1033	6,6	0,00128	0,0084
2,9	0,0330	0,0957	6,7	0,00115	0,0077
3,0	0,0298	0,0894	6,8	0,00103	0,0070
3,1	0,0268	0,0831	6,9	0,000916	0,0063
3,2	0,0244	0,0781	7,0	0,000833	0,0058
3,3	0,0219	0,0723	7,1	0,000731	0,0052
3,4	0,0198	0,0673	7,2	0,000629	0,0045
3,5	0,0181	0,0634	7,3	0,000547	0,0040
3,6	0,0165	0,0594	7,4	0,000467	0,0034
3,7	0,0150	0,0555	7,5	0,000388	0,0029
3,8	0,0136	0,0517	7,6	0,000308	0,0023

Таблица 42.6

Полная энергия мгновенных γ-квантов, образующихся при делении некоторых ядер [2]

E_n — энергия нейтронов, вызывающих деление;
$E_{\gamma полн}$ — полная энергия γ-излучения.

Ядро	E_n, *Мэв*	$\overline{N}_\gamma$	$E_{\gamma\ полн}$, *Мэв*
^{235}U	Тепловые	7,4±0,8	7,2±0,8
	2,8	—	7,5±1,1
	14,7	—	7,5±1,1
^{238}U	2,8	—	7,5±1,1
	14,7	—	7,5±1,1
^{252}Cf	Спонтанно	10,3	8,2

42.6. ЭНЕРГИЯ, ВЫДЕЛЯЕМАЯ ПРИ ДЕЛЕНИИ

Суммарная энергия, выделяемая при делении ядер, складывается из:

кинетической энергии осколков деления . $T_{оск}$
энергии
мгновенных γ-квантов . . . . . $E_{\gamma м}$
нейтронов деления . . . . . E_n
β-частиц продуктов деления . . . . . E_β
γ-излучения продуктов деления . . . . $E_{\gamma п.д.}$
γ-излучения, возникающего вследствие захвата нейтронов . . . . . $E_{\gamma з}$
уносимой нейтрино . . . . . E_ν

Уносимая нейтрино энергия не выделяется в виде тепловой энергии, поэтому на один акт деления ^{235}U тепловыми нейтронами приходится ~ 200 *Мэв*, т. е. при мощности 1 *вт* происходит $3{,}1 \cdot 10^{10}$ *деление/сек*.

Таблица 42.7

Распределение энергии, выделяемой при делении

Ядро	$T_{оск}$, *Мэв*		$E_{\gamma м}$, *Мэв*	E_n, *Мэв*	E_β, *Мэв*	$E_{\gamma п.д.}$, *Мэв*	$E_{\gamma з}$, *Мэв*	E_ν, *Мэв*	$E_{полн}$, *Мэв*
	Легкий	Тяжелый							
^{233}U	97	66	7	5,0	9	7	—	—	191
^{235}U	98	67	7,8	4,9	9	7,2	7—10	10	214
^{238}U	95,3	67,4	—	5,2	—	—	—	—	—
^{239}Pu	100	72	7	5,8	9	7	—	—	201

Средняя кинетическая энергия $T_{оск}$ деления может быть приближенно поставлена в зависимость от атомного номера Z и массового числа A делящегося изотопа [2]:

$$T_{оск} = 0{,}121\ Z^2 A^{-1/3}\ Мэв.$$

Таблица 42.8

Средняя кинетическая энергия осколков деления

Ядро	Условия реакции	$T_{оск}$, *Мэв*	Литература
^{209}Bi	Нейтроны с энергией 90 *Мэв*	142±4	[3]
^{209}At	Ионы ^{12}C с энергией 93 *Мэв*	142±6	[5]
^{209}At	Ионы ^{12}C с энергией 123 *Мэв*	146±6	[5]
^{213}Fr	Ионы ^{12}O с энергией 160 *Мэв*	150±10	[5]
^{229}Th	Тепловые нейтроны	160±3	[9]
^{232}Th	Нейтроны с энергией 14,9 *Мэв*	157±4	[5]
^{232}Th	Нейтроны с энергией 45 *Мэв*	168±6	[3]
^{232}Th	Нейтроны с энергией 90 *Мэв*	164±4	[5]
^{233}U	Тепловые нейтроны	163±2	[9]
^{235}U	» »	165±2	[3]
^{235}U	Нейтроны с энергией 90 *Мэв*	166±3	[5]
^{238}U	Нейтроны с энергией 45 *Мэв*	158±6	[3]
^{238}U	Нейтроны с энергией 90 *Мэв*	160±4	[3]

Продолжение табл. 42.8

Ядро	Условия реакции	$T_{оск}$, *Мэв*	Литература
^{238}U	Тормозное излучение $E_{макс} = 70$ *Мэв*	170±2	[5]
^{239}Pu	Тепловые нейтроны	172±2	[9]
^{240}Pu	Спонтанное деление	172±2	[3]
^{241}Pu	Тепловые нейтроны	174±3	[3]
^{242}Pu	Спонтанное деление	174±3	[3]
^{242}Cm	» »	180±10	[9]
^{244}Cm	» »	185±5	[9]
^{245}Cf	» »	183±3	[9]
^{254}Fm	» »	176±6	[9]

42.7. ЗАПАЗДЫВАЮЩИЕ НЕЙТРОНЫ

Запаздывающие нейтроны, испускаемые возбужденными осколками деления, в соответствии с периодами полураспада родоначальников запаздывающих нейтронов делятся на шесть групп. Периоды полураспада и выходы нейтронов для одного и того же делящегося ядра слабо зависят от энергии нейтрона, вызывающего деление.

В табл. 42.9—42.12 приняты обозначения: $T_{1/2}$ — период полураспада; $I_{отн}$ — относительная доля нейтронов в группе; $I_{абс}$ — абсолютное число нейтронов в группе на один акт деления.

Таблица 42.9

Данные по запаздывающим нейтронам при делении изотопов U и Pu тепловыми нейтронами [4]

Изотоп	Номер группы	$T_{1/2}$, *сек*	$I_{отн}$	$I_{абс}$
^{233}U	1	55,00±0,54	0,086	0,00057±0,00003
	2	20,57±0,38	0,299	0,00197±0,00009
	3	5,00±0,21	0,252	0,00166±0,00027
	4	2,13±0,20	0,278	0,00184±0,00016
	5	0,615±0,242	0,051	0,00034±0,00016
	6	0,277±0,047	0,034	0,00022±0,00009
	Полный выход		1,000	0,0056±0,0003
^{235}U	1	55,72±1,28	0,033	0,00052±0,00005
	2	22,72±0,71	0,219	0,00346±0,00018
	3	6,22±0,23	0,196	0,00310±0,00036
	4	2,30±0,09	0,395	0,00624±0,00026
	5	0,610±0,083	0,115	0,00182±0,00015
	6	0,230±0,025	0,042	0,00066±0,00008
	Полный выход		1,000	0,0158±0,0005
^{239}Pu	1	54,28±2,34	0,035	0,00021±0,00006
	2	23,04±1,67	0,298	0,00182±0,00023
	3	5,60±0,40	0,211	0,00129±0,00030
	4	2,13±0,24	0,326	0,00199±0,00022
	5	0,618±0,213	0,086	0,00052±0,00018
	6	0,257±0,045	0,044	0,00027±0,00010
	Полный выход		1,000	0,0061±0,0003

Продолжение табл. 42.9

Изотоп	Номер группы	$T_{1/2}$, *сек*	$I_{отн}$	$I_{абс}$
^{241}Pu	1	54,0±1,0	—	0,000154±0,00004
	2	23,2±0,5	—	0,00365±0,0001
	3	5,6±0,6	—	0,00275±0,0004
	4	1,97±0,1	—	0,00620±0,0008
	5	0,43±0,04	—	0,00290±0,0003
	6	—	—	—
	Полный выход			0,0154±0,0015

Таблица 42.10

Данные по запаздывающим нейтронам при делении изотопов Th, U и Pu нейтронами спектра деления [4]

Изотоп	Номер группы	$T_{1/2}$, *сек*	$I_{отн}$	$I_{абс}$
^{232}Th	1	56,03±0,95	0,034	0,00169±0,00012
	2	20,75±0,66	0,150	0,00744±0,00037
	3	5,74±0,24	0,155	0,00769±0,00108
	4	2,16±0,08	0,446	0,02212±0,00110
	5	0,571±0,042	0,172	0,00858±0,00073
	6	0,211±0,019	0,043	0,00213±0,00031
	Полный выход		1,000	0,0496±0,0020
^{233}U	1	55,11±1,86	0,086	0,00060±0,00003
	2	20,74±0,86	0,274	0,00192±0,00009
	3	5,30±0,19	0,277	0,00159±0,00025
	4	2,29±0,01	0,317	0,00222±0,00012
	5	0,546±0,042	0,073	0,00051±0,00010
	6	0,221±0,042	0,023	0,00016±0,00005
	Полный выход		1,000	0,00700±0,0004
^{235}U	1	54,51±0,94	0,038	0,00063±0,00005
	2	21,84±0,54	0,213	0,00351±0,00011
	3	6,00±0,17	0,188	0,00310±0,00028
	4	2,23±0,06	0,407	0,00672±0,00023
	5	0,496±0,029	0,128	0,00211±0,00015
	6	0,179±0,017	0,026	0,00043±0,00005
	Полный выход		1,000	0,0165±0,0005
^{238}U	1	52,38±1,29	0,013	0,00054±0,00005
	2	21,58±0,39	0,137	0,00564±0,00025
	3	5,00±0,19	0,162	0,00667±0,00027
	4	1,93±0,07	0,388	0,01599±0,00067
	5	0,490±0,023	0,225	0,00927±0,00039
	6	0,172±0,009	0,075	0,00309±0,00024
	Полный выход		1,000	0,0412±0,0017

Продолжение табл. 42.10

Изотоп	Номер группы	$T_{1/2}$, сек	$l_{отн}$	$l_{абс}$
^{239}Pu	1	53,75±0,95	0,038	0,00024±0,00002
	2	22,29±0,36	0,280	0,00176±0,00002
	3	5,19±0,12	0,216	0,00136±0,00013
	4	2,09±0,08	0,328	0,00207±0,00012
	5	0,549±0,049	0,103	0,00065±0,00007
	6	0,216±0,017	0,035	0,00022±0,00003
	Полный выход		1,000	0,0063±0,0003
^{240}Pu	1	53,56±1,21	0,028	0,00022±0,00003
	2	22,14±0,38	0,273	0,00238±0,00016
	3	5,14±0,42	0,199	0,00162±0,00044
	4	2,08±0,19	0,350	0,00315±0,00027
	5	0,511±0,077	0,128	0,00119±0,00018
	6	0,172±0,033	0,029	0,00024±0,00005
	Полный выход		1,000	0,0088±0,0006

Таблица 42.11

Средние энергии $E_{ср}$ групп запаздывающих нейтронов для ^{235}U

Номер группы	$T_{1/2}$, сек	$E_{ср}$, кэв	Литература
1	54	250±20	[16]
2	22	460±10	[16]
3	5,9	405±20	[16]
4	2,2	450±20	[16]
5	0,46	420±60	[6]

Таблица 42.12

Родоначальники запаздывающих нейтронов [16—18]

Согласно терминологии, предлагаемой в работе [17], родоначальникамн запаздывающих нейтронов называются первые β-активные осколки деления, а продукты распада осколков называются излучателямн запаздывающих нейтронов.

Номер группы	$T_{1/2}$, сек	Наиболее вероятные родоначальники
1	55	^{87}Br (54 сек) + ^{142}Cs (~ 1 мин)
2	22	^{137}I (24,2 сек) + ^{88}Br (15,5 сек) + + ^{136}Te (20 сек)
3	6	^{138}I (5,9 сек) + ^{89}Br (3,9 сек)
4	2,2	^{139}I (2,7 сек) + ^{94}Kr (1,4 сек) + + ^{144}Cs
5	0,5	^{140}I
6	0.18	^{93}Br + ^{145}Cs

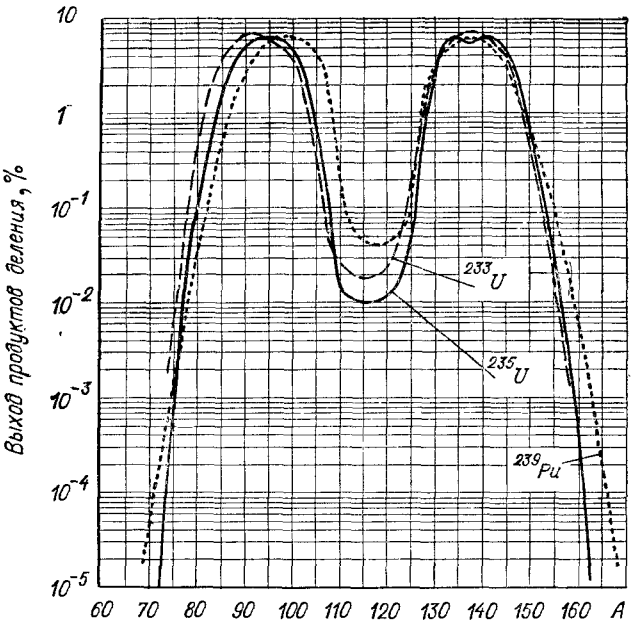


Рис. 42.5. Зависимость выходов продуктов деления ^{233}U, ^{235}U и ^{239}Pu под действием тепловых нейтронов от массового числа A [4, 22]. Для ^{233}U и ^{239}Pu приведены независимые выходы. Для ^{235}U дан полный выход.

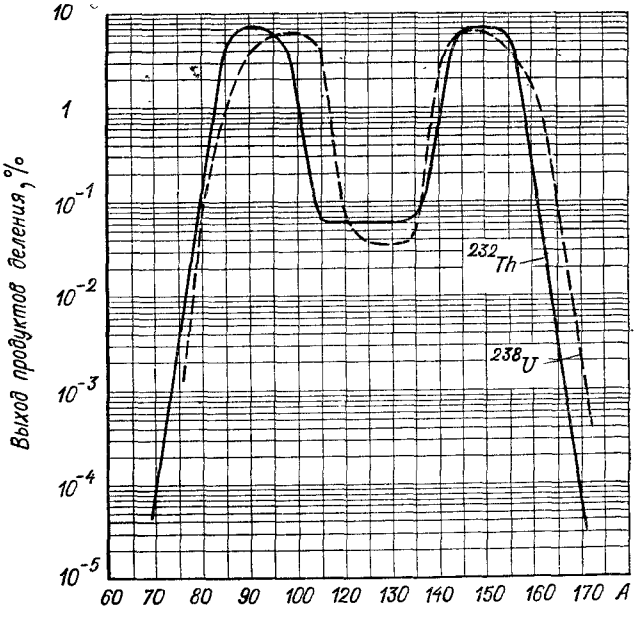


Рис. 42.6. Независимые выходы продуктов деления ^{232}Th и ^{238}U под действием нейтронов спектра деления как функция массового числа A [22].

42.8. ПРОДУКТЫ ДЕЛЕНИЯ ЯДЕР

Выходы продуктов деления. На рис. 42.5 и 42.6 приведены выходы (в процентах при нормировке всей кривой на 200%) продуктов деления, образующихся при делении ^{233}U, ^{235}U и ^{239}Pu тепловымн нейтронами, а также ^{232}Th и ^{238}U при деленнн нейтронамн спектра деления. Независимым выходом называют непосредственный выход осколков при делении ядра. Полный выход какого-либо изотопа складывается из независимого выхода и той

доли, которая образуется в результате цепочки β-распадов.

Излучение продуктов деления. В создании β- и γ-излучения продуктов деления участвуют более 100 радиоактивных изотопов, поэтому часто рассматривают совокупное β- или γ-излучение в момент времени t после деления, усредненное по многим актам деления.

Зависимость интенсивности β- и γ-излучений продуктов деления [$A_\beta(t)$ и $A_\gamma(t)$] от времени может быть представлена приближенно выражениями:

$$A_\beta(t) \approx 1{,}4\, t^{-1{,}2}\ \textit{Мэв} \cdot \textit{сек}^{-1} \cdot \textit{деление}^{-1}\ [22];$$

$$A_\gamma(t) \approx 2t^{-1{,}2}\ \textit{Мэв} \cdot \textit{сек}^{-1} \cdot \textit{деление}^{-1}\ [21],$$

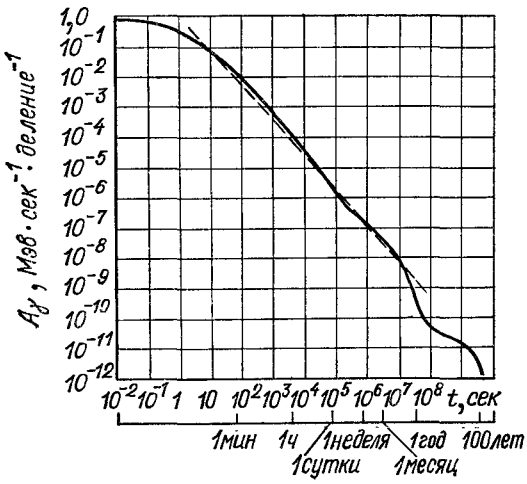


Рис. 42.7. Зависимость мощности γ-излучения A_γ продуктов деления ^{235}U от времени [21]. Пунктиром проведена кривая $2\,t^{-1{,}2}$.

которые справедливы для интервала 10 *сек* $< t <$ 100 суток с погрешностью ±20%.

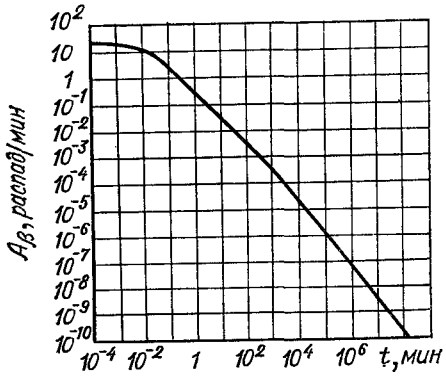


Рис. 42.8. Зависимость полной β-активности A_β продуктов деления ^{235}U от времени. Кривая получена усреднением экспериментальных и теоретических данных, собранных в работе [22].

42.9. ФОТОДЕЛЕНИЕ И ДЕЛЕНИЕ ЯДЕР ПОД ДЕЙСТВИЕМ ЗАРЯЖЕННЫХ ЧАСТИЦ

Процесс деления ядер становится возможным, если энергия возбуждения ядра U превышает пороговую энергию возбуждения составного ядра (порог деления) U_A. При делении ядер под действием γ-квантов величина порога совпадает с минимальной (пороговой) энергией E^*_γ γ-кванта, еще способного вызвать реакцию деления. В случае деления ядер под действием нейтронов $E^*_n = U_A - B_n$, поэтому значения E^*_n могут быть и отрицательными.

Таблица 42.13

Мощность источников γ-излучения продуктов деления из активной зоны реактора, работавшего в течение времени T [20]

Мощность γ-источников (*Мэв/сек*) отнесена к 1 *вт* мощности реактора.

Время после остановки, *сек*	Кампания реактора T					
	1 ч	1 сутки	1 неделя	1 месяц	3 месяца	6 месяцев
10^2	$4{,}82\cdot10^{10}$	$7{,}20\cdot10^{10}$	$7{,}91\cdot10^{10}$	$8{,}29\cdot10^{10}$	$8{,}50\cdot10^{10}$	$8{,}61\cdot10^{10}$
10^3	$1{,}83\cdot10^{10}$	$3{,}99\cdot10^{10}$	$4{,}70\cdot10^{10}$	$5{,}07\cdot10^{10}$	$5{,}28\cdot10^{10}$	$5{,}39\cdot10^{10}$
10^4	$2{,}54\cdot10^{9}$	$1{,}43\cdot10^{10}$	$2{,}09\cdot10^{10}$	$2{,}46\cdot10^{10}$	$2{,}67\cdot10^{10}$	$2{,}78\cdot10^{10}$
10^5	$1{,}65\cdot10^{8}$	$2{,}62\cdot10^{9}$	$6{,}89\cdot10^{9}$	$1{,}03\cdot10^{10}$	$1{,}23\cdot10^{10}$	$1{,}34\cdot10^{10}$
$2\cdot10^5$	$6{,}51\cdot10^{7}$	$1{,}24\cdot10^{9}$	$4{,}39\cdot10^{9}$	$7{,}47\cdot10^{9}$	$9{,}44\cdot10^{9}$	$1{,}05\cdot10^{10}$
$5\cdot10^5$	$2{,}16\cdot10^{7}$	$4{,}77\cdot10^{8}$	$2{,}28\cdot10^{9}$	$4{,}70\cdot10^{9}$	$6{,}51\cdot10^{9}$	$7{,}55\cdot10^{9}$
10^6	$9{,}81\cdot10^{6}$	$2{,}24\cdot10^{8}$	$1{,}22\cdot10^{9}$	$3{,}00\cdot10^{9}$	$4{,}60\cdot10^{9}$	$5{,}57\cdot10^{9}$
$2\cdot10^6$	$4{,}14\cdot10^{6}$	$9{,}70\cdot10^{7}$	$5{,}92\cdot10^{8}$	$1{,}74\cdot10^{9}$	$3{,}04\cdot10^{9}$	$3{,}90\cdot10^{9}$
$5\cdot10^6$	$1{,}31\cdot10^{6}$	$3{,}12\cdot10^{7}$	$2{,}05\cdot10^{8}$	$7{,}27\cdot10^{8}$	$1{,}56\cdot10^{9}$	$2{,}18\cdot10^{9}$
10^7	$5{,}81\cdot10^{5}$	$1{,}39\cdot10^{7}$	$9{,}42\cdot10^{7}$	$3{,}61\cdot10^{8}$	$8{,}34\cdot10^{8}$	$1{,}18\cdot10^{9}$
$2\cdot10^7$	$1{,}88\cdot10^{5}$	$4{,}49\cdot10^{6}$	$3{,}05\cdot10^{7}$	$1{,}17\cdot10^{8}$	$2{,}70\cdot10^{8}$	$3{,}85\cdot10^{8}$
$5\cdot10^7$	$1{,}02\cdot10^{4}$	$2{,}45\cdot10^{5}$	$1{,}69\cdot10^{6}$	$6{,}81\cdot10^{6}$	$1{,}80\cdot10^{8}$	$3{,}10\cdot10^{7}$
10^8	$3{,}55\cdot10^{3}$	$8{,}52\cdot10^{4}$	$5{,}96\cdot10^{5}$	$2{,}54\cdot10^{6}$	$7{,}51\cdot10^{6}$	$1{,}48\cdot10^{7}$
$2\cdot10^8$	$2{,}69\cdot10^{3}$	$6{,}47\cdot10^{4}$	$4{,}53\cdot10^{5}$	$1{,}94\cdot10^{6}$	$5{,}80\cdot10^{6}$	$1{,}16\cdot10^{7}$
$5\cdot10^8$	$2{,}10\cdot10^{3}$	$5{,}04\cdot10^{4}$	$3{,}53\cdot10^{5}$	$1{,}51\cdot10^{6}$	$4{,}52\cdot10^{6}$	$9{,}04\cdot10^{6}$
10^9	$1{,}44\cdot10^{3}$	$3{,}45\cdot10^{4}$	$2{,}42\cdot10^{5}$	$1{,}03\cdot10^{6}$	$3{,}10\cdot10^{6}$	$6{,}19\cdot10^{6}$
$2\cdot10^9$	$6{,}75\cdot10^{2}$	$1{,}62\cdot10^{4}$	$1{,}13\cdot10^{5}$	$4{,}85\cdot10^{5}$	$1{,}45\cdot10^{6}$	$2{,}91\cdot10^{6}$
10^{10}	1,79	4,32	$3{,}02\cdot10^{2}$	$1{,}29\cdot10^{9}$	$3{,}88\cdot10^{3}$	$7{,}76\cdot10^{3}$

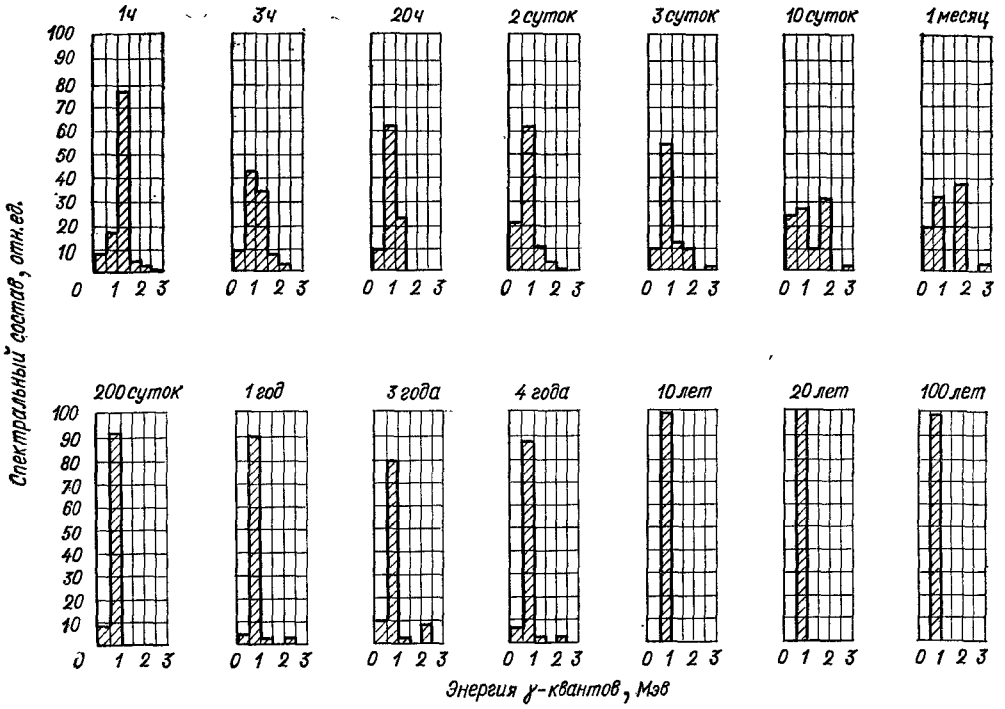


Рис. 42.9. Зависимость спектрального состава γ-излучения продуктов деления ^{235}U от времени [21].

Отметим, что вследствие туннельного эффекта ядро может разделиться и при $U < U_A$, поэтому значения E_n^* и U_A принципиально не могут быть точно определены в опыте.

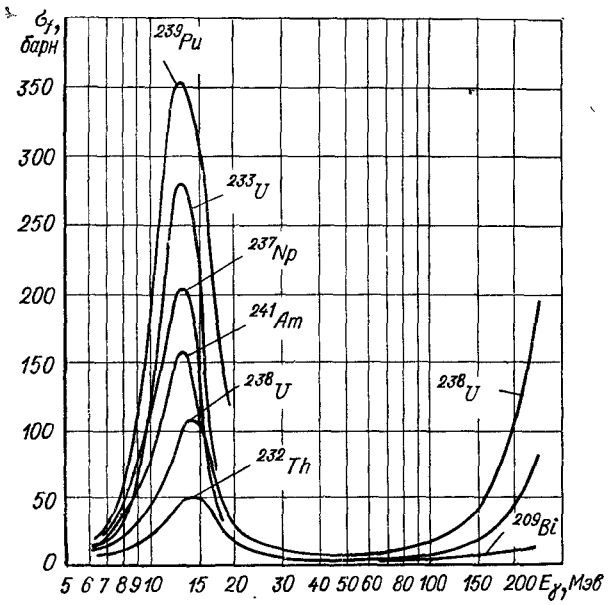


Рис. 42.10. Зависимость сечения фотоделения некоторых ядер от энергии фотонов [2].

Таблица 42.14

Пороги деления некоторых ядер [2]

Составное ядро	Изученная реакция	U_A, Мэв	B_n, Мэв	E_γ^* или E_n^*, Мэв
^{232}Th	(γ, f)	5,8	—	5,8
^{233}Th	(n, f)	6,64	5,09	1,55
^{232}Pa	(n, f)	6,50	5,65	0,85
^{233}U	(γ, f)	5,6	—	5,6
^{234}U	(d, pf)	5,4	6,77	—1,4
^{235}U	(γ, f)	6,0	—	6,0
^{235}U	(n, f)	5,86	5,25	0,61
^{236}U	(d, pf)	5,9	6,44	—0,5
^{237}U	(n, f)	6,47	5,32	1,15
^{238}U	(γ, f)	5,75	—	5,75
^{239}U	(d, pf)	6,28	4,78	1,50
^{239}U	(n, f)	6,28	4,78	1,50
^{237}Np	(γ, f)	5,7	—	5,7
^{238}Np	(n, f)	6,04	5,42	0,62
^{239}Pu	(n, f)	6	—	6
^{240}Pu	(d, pf)	4,9	6,43	—1,5
^{241}Pu	(n, f)	6,10	5,44	0,66
^{241}Am	(γ, f)	6,0	—	6,0
^{242}Am	(n, f)	6,48	5,55	0,93

Таблица 42.15

Сечение деления σ_f (*барн*) некоторых ядер-мишеней под действием протонов*

Энергия протонов, *Мэв*	^{165}Ho	^{181}Ta	^{185}Re. ^{187}Re	^{197}Au	^{209}Bi	^{232}Th	^{235}U	^{238}U
100	—	—	—	—	—	0,87±0,15	1,5±0,5	1,35±0,2
200	—	—	—	0,35±0,05	1,5±0,15	0,83±0,1	1,3±0,1	1,3±0,1
300	—	—	—	0,49±0,7	2,0±0,15	0,79±0,1	1,3±0,1	1,37±0,1
450 [26]	0,002	0,005	0,019	0,061	0,21	0,67	—	—

* Значения получены путем пересчета с графиков, приведенных в работе [25].

Таблица 42.16

Зависимость сечения деления ^{233}U от энергии E_α бомбардирующих α-частиц [24]

E_α, *Мэв*	σ_f, *барн*	E_α, *Мэв*	σ_f, *барн*
23,5	0,184	35,3	1,27
26,2	0,4	41,0	1,43
30,7	1,06	44,3	1,99

Таблица 42.17

Зависимость сечения деления ^{235}U от энергии E_α бомбардирующих α-частиц [23, 24]

E_α, *Мэв*	σ_f, *барн*	E_α, *Мэв*	σ_f, *барн*
19,7	0,0018	32,8	0,78
20,5	0,010	33,8	1,03
21,9	0,058	34,1	1,29
23,1	0,087	37,1	1,49
25,9	0,31	39,9	1,38
26,8	0,42	42,8	1,76
28,2	0,580	45	1,84

Таблица 42.18

Характеристики деления различных ядер под действием мезонов [2]

Ядро-мишень	Мезоны	Энергия частицы, *Мэв*	Вероятность деления $\frac{\sigma_f}{\sigma_{полн}}$	Сечение деления σ_f, *барн*
^{209}Bi	π^-	Медленные	0,02	—
Hg	π^-	122	0,005	—
^{238}U	μ^-	Медленные	0,07±0,15	—
^{238}U	π^+	280	—	1,0±0,2
^{238}U	π^-	Медленные	0,18—0,87	—
W	π^-	»	0,002	—

Таблица 42.19

Сечения деления (*мбарн*) различных ядер под действием ионов ^{14}N [27, 28]

Ядро-мишень	Энергия ионов, *Мэв*				
	70	80	90	100	110
^{197}Au	—	220±50	500±100	1000±180	1200±150
^{209}Bi	64±20	550±150	1300±300	1750±150	2150±200
Re	—	38±8	250±60	410±80	
^{235}U	—	65±20	220±30	630±70	—
^{238}U	6,5	130±30	480±100	1300±250	1500

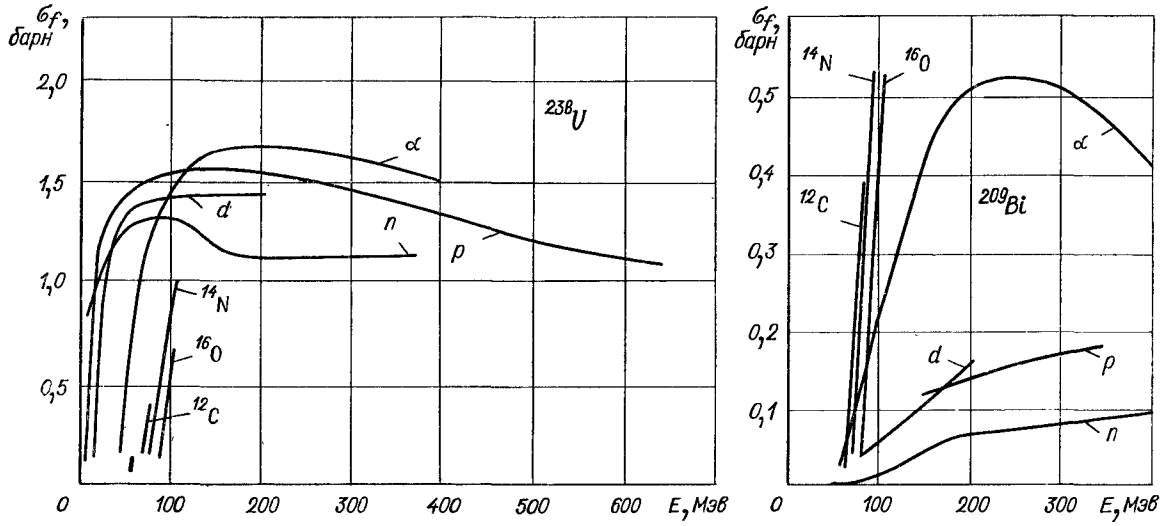


Рис. 42.11. Зависимость сечения деления ядер ^{238}U и ^{209}Bi от энергии различных бомбардирующих частиц [2].

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Lederer C. M., Hollander J. M., Perlman I.** Table of isotopes. ed. New York — London — Sidney. John Wiley and Sons, Inc., 1967.
2. **Краут А.** Достижения физики деления ядер.— В кн.: «Физика деления ядер». Пер. с англ. М., Госатомиздат, 1963.
3. **Хальперн И.** Деление ядер. Пер. с англ. М., Физматгиз, 1962.
4. **Гордеев И. В. и др.** Ядерно-физические константы. М., Госатомиздат, 1963.
5. **Ядерные** реакции. Под ред. П. М. Эндта, М. Демера, П. Б. Смитта. Пер. с англ. Т. 1, 2. М., Атомиздат, 1962, 1964.
6. **Юз Д., Шварц Р.** Атлас нейтронных сечений. М., Атомиздат,-- 1959.
7. **Schmidt J. J.** Neutron cross section for fast reactor materials. Karlsruhe, 1962.
8. **Вейнберг А., Вигнер Е.** Физическая теория ядерных реакторов. Пер. с англ. М., Изд-во иностр. лит., 1961.
9. **Террелл Дж.** Распределение числа нейтронов деления. Спектры нейтронов деления.— В кн.: «Физика деления ядер». Пер. с англ. М., Госатомиздат, 1963, с. 351, 365.
10. **Большов В. И. и др.** В кн.: «Физика деления атомных ядер». М., Госатомиздат, 1962, с. 127.
11. **Кузьминов Б. Д.** В кн.: «Нейтронная физика». М., Госатомиздат, 1961, с. 241, 246.
12. **Васильев Ю. А.** В кн.: «Физика деления атомных ядер». М., Госатомиздат, 1962, с. 121.
13. **Флеров Н. Н., Талызин В. Н.** «Атомная энергия», 1961, т. 10, вып. 1, с. 68.
14. **Кёртис Л.** Введение в нейтронную физику. Пер. с англ. М., Атомиздат, 1965.
15. **Личмен Р. Б.** В кн.: «Труды Второй междунар. конф. по мирному использованию атомной энергии. Докл. иностр. ученых», т. 2, М., Атомиздат, 1959, с. 282.
16. **Киппин Г. Р.** Запаздывающие нейтроны.— В кн. «Успехи в области ядерной энергии». Пер. с англ. М., Изд-во иностр. лит., 1958, с. 216.
17. **Киппин Г. Р.** «Атомная энергия», 1958, т. 4, вып. 2, с. 250.
18. **Паппас А.** В кн.: «Труды Второй междунар. конф. по мирному использованию атомной энергии. Докл. иностр. ученых», т. 2. М., Атомиздат, 1959, с. 308.
19. **Протопопов А. Н., Блинов М. В.** «Атомная энергия», 1958, т. 1, с. 71.
20. **Бродер Д. Л., Попков К. К., Рубанов С. М.** Малогабаритная защита реакторов. М., Атомиздат, 1967.
21. **Лейпунский О. П.** Гамма-излучение атомного взрыва. М., Атомиздат, 1959.
22. **Физика** ядерных реакторов. Пер. с англ. Под ред. И. А. Стенбока. М., Атомиздат, 1964.
23. **Gunnink R., Cobble J. W.** "Phys. Rev.", 1959, v. 115, p. 1247.
24. **Vandenbosch R. e. a.** "Phys. Rev.". 1958, v. 111, p. 1358.
25. **Jungerman J. A.** «Phys. Rev.», 1956, v. 101, c. 807.
26. **Krucer P., Sugarman N.** «Phys. Rev.», 1955, v. 99, p. 1459.
27. **Поликанов С. М., Друин В. А.** «Журн. эксперим. и теор. физ.», 1959, т. 36, с. 744.
28. **Друин В. А., Поликанов С. М., Флеров Г. Н.** «Журн. эксперим. и теор. физ.», 1957, т. 32, с. 1298.

ГЛАВА 43

ТЕРМОЯДЕРНЫЕ РЕАКЦИИ

43.1. ФОРМУЛА ГАМОВА

Термоядерными реакциями называют реакции слияния легких ядер, сопровождающиеся выделением энергии. Сечения σ термоядерных реакций при малых значениях энергии ($E \leqslant 200$ *кэв*) участвующих в реакции частиц могут быть оценены по формуле Гамова:

$$\sigma(E) = (A/E) \exp\left(-B/\sqrt{E}\right). \qquad (43.1)$$

Здесь σ — сечение реакции, *см*^{2}; E — энергия бомбардирующей частицы в лабораторной системе координат; *эв*; A и B — константы Гамова. Константа A имеет размерность энергии, а размерность константы B: $[B] = [E^{1/2}]$. Константы Гамова обычно вычисляются для каждой конкретной реакции из имеющейся экспериментальной зависимости сечения от энергии. Формула Гамова позволяет произвести экстраполяцию экспериментальной зависимости $\sigma(E)$ в область энергий, для которых отсутствуют экспериментальные данные. Для грубой оценки может быть использовано теоретически вычисленное значение произведения

$$BE^{-0.5} = 2\pi Z_1 Z_2 e^2/(\hbar v),$$

где Z_1 и Z_2 — заряды реагирующих частиц; v — скорость бомбардирующей частицы в лабораторной системе координат; e — заряд электрона и $\hbar$ — постоянная Планка.

43.2. ЭНЕРГЕТИЧЕСКИЕ ВЫХОДЫ ТЕРМОЯДЕРНЫХ РЕАКЦИЙ

Ниже приведены энергетические выходы термоядерных реакций, рассчитанные по массам изотопов [1—3]. Все энергетические выходы даны в мегаэлектронвольтах. В общем балансе энергий необходимо учитывать энергию, выделяющуюся при распаде некоторых короткоживущих продуктов реакций, таких, как ^{5}He, ^{5}Li, ^{8}Be (имеющих время жизни $\sim 10^{-16}$ *сек*);

$$^5\text{He} \rightarrow {}^4\text{He} + n + 0{,}958;$$

$$^5\text{Li} \rightarrow {}^4\text{He} + {}^1\text{H} + 1{,}965;$$

$$^8\text{Be} \rightarrow 2\,{}^4\text{He} + 0{,}094,$$

а также энергию, выделяющуюся при распаде ^{6}He:

$$^6\text{He} \rightarrow {}^6\text{Li} + \beta^- + \tilde{\nu} + 3{,}510\ \textit{Мэв}$$

с периодом полураспада $T_{1/2} = 0{,}802$ *сек*.

Принятые обозначения: β^- — электрон; β^+ — позитрон; ν — нейтрино; $\tilde{\nu}$ — антинейтрино.

1. $^1\text{H} + {}^1\text{H} \rightarrow {}^2\text{H} + \beta^+ + \nu + 0{,}420$
2. $^2\text{H} + {}^1\text{H} \rightarrow {}^3\text{He} + \gamma + 5{,}494$
3. $^2\text{H} + {}^2\text{H} \rightarrow {}^3\text{H} + {}^1\text{H} + 4{,}033$
   $\rightarrow {}^3\text{He} + n + 3{,}270$
4. $^3\text{H} + {}^1\text{H} \rightarrow {}^4\text{He} + \gamma + 19{,}814$
5. $^3\text{H} + {}^2\text{H} \rightarrow {}^4\text{He} + n + 17{,}590$
   $\rightarrow {}^5\text{He} + \gamma + 16{,}632$
6. $^3\text{H} + {}^3\text{H} \rightarrow {}^4\text{He} + 2n + 11{,}332$
   $\rightarrow {}^5\text{He} + n + 10{,}374$
7. $^3\text{He} + {}^2\text{H} \rightarrow {}^4\text{He} + {}^1\text{H} + 18{,}354$
   $\rightarrow {}^5\text{Li} + \gamma + 16{,}388$
8. $^3\text{He} + {}^3\text{H} \rightarrow {}^4\text{He} + {}^2\text{H} + 14{,}321$
   $\rightarrow {}^4\text{He} + {}^1\text{H} + n + 12{,}096$
   $\rightarrow {}^5\text{He} + {}^1\text{H} + 11{,}138$
   $\rightarrow {}^5\text{Li} + n + 10{,}131$
   $\rightarrow {}^6\text{Li} + \gamma + 15{,}793$
9. $^3\text{He} + {}^3\text{He} \rightarrow {}^4\text{He} + 2\,{}^1\text{H} + 12{,}860$
   $\rightarrow {}^5\text{Li} + {}^1\text{H} + 10{,}895$
10. $^4\text{He} + {}^2\text{H} \rightarrow {}^6\text{Li} + \gamma + 1{,}472$
11. $^4\text{He} + {}^3\text{H} \rightarrow {}^7\text{Li} + \gamma + 2{,}467$
12. $^4\text{He} + {}^3\text{He} \rightarrow {}^7\text{Be} + \gamma + 1{,}587$
13. $^6\text{Li} + {}^1\text{H} \rightarrow {}^4\text{He} + {}^3\text{He} + 4{,}021$
    $\rightarrow {}^7\text{Be} + \gamma + 5{,}608$
14. $^6\text{Li} + {}^2\text{H} \rightarrow {}^4\text{He} + {}^3\text{H} + {}^1\text{H} + 2{,}561$
    $\rightarrow {}^4\text{He} + {}^3\text{He} + n + 1{,}797$
    $\rightarrow 2\,{}^4\text{He} + 22{,}375$
    $\rightarrow {}^5\text{He} + {}^3\text{He} + 0{,}839$
    $\rightarrow {}^5\text{Li} + {}^3\text{H} + 5{,}028$
    $\rightarrow {}^7\text{Li} + {}^1\text{H} + 5{,}028$
    $\rightarrow {}^7\text{Be} + n + 3{,}384$
    $\rightarrow {}^8\text{Be} + \gamma + 22{.}280$
15. $^6\text{Li} + {}^3\text{H} \rightarrow 2\,{}^4\text{He} + n + 16{,}117$
    $\rightarrow {}^5\text{He} + {}^4\text{He} + 15{,}160$
    $\rightarrow {}^7\text{Li} + {}^2\text{H} + 0{,}995$
    $\rightarrow {}^8\text{Li} + {}^1\text{H} + 0{,}803$
    $\rightarrow {}^8\text{Be} + n + 16{,}023$
16. $^6\text{Li} + {}^3\text{He} \rightarrow {}^5\text{Li} + {}^4\text{He} + 14{,}916$
    $\rightarrow {}^8\text{Be} + {}^1\text{H} + 16{,}787$
17. $^6\text{Li} + {}^4\text{He} \rightarrow {}^{10}\text{B} + \gamma + 4{,}461$
18. $^6\text{Li} + {}^6\text{Li} \rightarrow {}^7\text{Li} + {}^4\text{He} + {}^1\text{H} + 3{,}556$
    $\rightarrow {}^7\text{Be} + {}^4\text{He} + n + 1{,}912$
    $\rightarrow {}^3\text{Be} + {}^4\text{He} + 20{,}808$
    $\rightarrow {}^9\text{Be} + {}^3\text{He} + 1\ 895$
    $\rightarrow {}^9\text{B} + {}^3\text{H} + 0{,}808$
    $\rightarrow {}^{10}\text{B} + {}^2\text{H} + 2{,}989$
    $\rightarrow {}^{11}\text{B} + {}^1\text{H} + 12{,}220$
    $\rightarrow {}^{11}\text{C} + n + 1{,}895$
19. $^7\text{Li} + {}^1\text{H} \rightarrow 2\,{}^4\text{He} + 17{,}347$
    $\rightarrow {}^8\text{Be} + \gamma + 17{,}252$
20. $^7\text{Li} + {}^2\text{H} \rightarrow 2\,{}^4\text{He} + n + 15{,}122$
    $\rightarrow {}^5\text{He} + {}^4\text{He} + 14{,}164$
    $\rightarrow {}^8\text{Be} + n + 15{,}028$
    $\rightarrow {}^9\text{Be} + \gamma + 16{,}693$
21. $^7\text{Li} + {}^3\text{H} \rightarrow {}^5\text{He} + {}^4\text{He} + n + 7{,}907$
    $\rightarrow {}^6\text{He} + {}^4\text{He} + 9{,}834$
    $\rightarrow {}^8\text{Be} + 2n + 8{,}770$
    $\rightarrow {}^9\text{Be} + n + 10{,}435$

22. $^{7}Li + {}^{3}He \rightarrow {}^{6}Li + {}^{4}He + 13,325$
$\rightarrow {}^{8}Be + {}^{2}H + 11,759$
$\rightarrow {}^{9}Be + {}^{1}H + 11,199$
$\rightarrow {}^{9}B + n + 9,349$
$\rightarrow {}^{10}B + \gamma + 17,786$

23. $^{7}Li + {}^{4}He \rightarrow {}^{11}B + \gamma + 8\ 664$

24. $^{7}Li + {}^{6}Li \rightarrow {}^{9}Be + {}^{4}He + 15,220$
$\rightarrow {}^{10}B + {}^{3}H + 1,994$
$\rightarrow {}^{11}B + {}^{2}H + 7,192$
$\rightarrow {}^{12}B + {}^{1}H + 8,337$
$\rightarrow {}^{11}C + 2n + 2,204$
$\rightarrow {}^{12}C + n + 20,924$

25. $^{7}Li + {}^{7}Li \rightarrow {}^{8}Be + {}^{6}He + 7,272$
$\rightarrow {}^{10}Be + {}^{4}He + 14,783$
$\rightarrow {}^{11}B + {}^{3}H + 6,197$
$\rightarrow {}^{12}B + {}^{2}H + 3,309$
$\rightarrow {}^{13}B + {}^{1}H + 5,964$
$\rightarrow {}^{12}C + 2n + 13.672$
$\rightarrow {}^{13}C + n + 18,619$

26. $^{9}Be + {}^{1}H \rightarrow {}^{6}Li + {}^{4}He + 2,126$
$\rightarrow {}^{8}Be + {}^{2}H + 0,559$
$\rightarrow {}^{10}B + \gamma + 6.587$

27. $^{9}Be + {}^{2}H \rightarrow 2\,{}^{4}He + {}^{3}H + 4,687$
$\rightarrow {}^{7}Li + {}^{4}He + 7,154$
$\rightarrow {}^{8}Be + {}^{3}H + 4,592$
$\rightarrow {}^{10}Be + {}^{1}H + 4,590$
$\rightarrow {}^{10}B + n + 4,363$
$\rightarrow {}^{11}B + \gamma + 6,197$

28. $^{9}Be + {}^{3}H \rightarrow {}^{8}Li + {}^{4}He + 2,930$
$\rightarrow {}^{11}B + n + 9,561$
$\rightarrow {}^{12}B + \gamma + 10,463$

29. $^{9}Be + {}^{3}He \rightarrow {}^{8}Be + {}^{4}He + 18,913$
$\rightarrow {}^{10}B + {}^{2}H + 1,094$
$\rightarrow {}^{11}B + {}^{1}H + 10,325$
$\rightarrow {}^{11}C + n + 7,562$

30. $^{9}Be + {}^{4}He \rightarrow {}^{12}C + n + 5,704$
$\rightarrow {}^{13}C + \gamma + 10,650$
$\rightarrow {}^{13}C + {}^{2}H + 9,178$
$\rightarrow {}^{14}C + {}^{1}H + 15,130$
$\rightarrow {}^{13}N + 2n + 3,951$
$\rightarrow {}^{14}N + n + 14,504$

31. $^{9}Be + {}^{6}Li \rightarrow {}^{8}Be + {}^{7}Li + 5,587$
$\rightarrow {}^{10}B + {}^{5}He + 1,933$
$\rightarrow {}^{11}B + {}^{4}He + 14,347$

32. $^{9}Be + {}^{7}Li \rightarrow {}^{8}Be + {}^{8}Li + 0,367$
$\rightarrow {}^{12}B + {}^{4}He + 10,463$
$\rightarrow {}^{13}C + {}^{3}H + 8,183$
$\rightarrow {}^{14}C + {}^{2}H + 10,102$
$\rightarrow {}^{15}C + {}^{1}H + 9,095$
$\rightarrow {}^{14}N + 2n + 7,251$
$\rightarrow {}^{15}N + n + 18,086$

33. $^{10}B + {}^{1}H \rightarrow {}^{7}Be + {}^{4}He + 1,148$
$\rightarrow {}^{11}C + \gamma + 8,693$

34. $^{10}B + {}^{2}H \rightarrow 3\,{}^{4}He + 17,914$
$\rightarrow {}^{8}Be + {}^{4}He + 17,819$
$\rightarrow {}^{11}B + {}^{1}H + 9,231$
$\rightarrow {}^{11}C + n + 6,468$
$\rightarrow {}^{12}C + \gamma + 25,182$

35. $^{10}B + {}^{3}H \rightarrow {}^{9}Be + {}^{4}He + 13,227$
$\rightarrow {}^{11}B + {}^{2}H + 5,199$
$\rightarrow {}^{12}B + {}^{1}H + 6,343$
$\rightarrow {}^{12}C + n + 18,931$

36. $^{10}B + {}^{3}He \rightarrow 3\,{}^{4}He + {}^{1}H + 12,420$
$\rightarrow {}^{8}Be + {}^{4}He + {}^{1}H + 12,326$
$\rightarrow {}^{9}B + {}^{4}He + 12,140$
$\rightarrow {}^{11}C + {}^{2}H + 3,199$
$\rightarrow {}^{12}C + {}^{1}H + 19,695$
$\rightarrow {}^{12}N + n + 1.5$

37. $^{10}B + {}^{4}He \rightarrow {}^{12}C + {}^{2}H + 1,341$
$\rightarrow {}^{13}C + {}^{1}H + 4,063$
$\rightarrow {}^{13}N + n + 1,060$

38. $^{10}B + {}^{6}Li \rightarrow {}^{11}C + {}^{5}He + 4,038$
$\rightarrow {}^{12}C + {}^{4}He + 23,716$
$\rightarrow {}^{13}C + {}^{3}He + 8,085$
$\rightarrow {}^{13}N + {}^{3}H + 5,845$
$\rightarrow {}^{14}N + {}^{2}H + 10,141$
$\rightarrow {}^{15}N + {}^{1}H + 18,751$
$\rightarrow {}^{14}O + 2n + 1,990$
$\rightarrow {}^{15}O + n + 15,209$

39. $^{10}B + {}^{7}Li \rightarrow {}^{12}C + {}^{4}He + n + 16{,}463$
$\rightarrow {}^{13}C + {}^{4}He + 21{,}410$
$\rightarrow {}^{14}N + {}^{3}H + 9{,}146$
$\rightarrow {}^{15}N + {}^{2}H + 13{,}723$
$\rightarrow {}^{16}N + {}^{1}H + 13{,}985$
$\rightarrow {}^{15}O + 2n + 7{,}957$

40. $^{11}B + {}^{1}H \rightarrow {}^{8}Be + {}^{4}He + 8{,}588$
$\rightarrow {}^{12}C + \gamma + 15{,}957$

41. $^{11}B + {}^{2}H \rightarrow {}^{8}Be + {}^{4}He + n + 6{,}363$
$\rightarrow {}^{9}Be + {}^{4}He + 8{,}028$
$\rightarrow {}^{12}B + {}^{1}H + 1{,}144$
$\rightarrow {}^{12}C + n + 6{,}363$
$\rightarrow {}^{13}C + \gamma + 18{,}679$

42. $^{11}B + {}^{3}H \rightarrow {}^{10}Be + {}^{4}He + 8{,}586$
$\rightarrow {}^{13}C + n + 12{,}422$

43. $^{11}B + {}^{3}He \rightarrow {}^{3}Be + {}^{6}Li + 4{,}566$
$\rightarrow {}^{10}B + {}^{4}He + 9{,}122$
$\rightarrow {}^{12}C + {}^{2}H + 10{,}463$
$\rightarrow {}^{13}C + {}^{1}H + 13{,}185$
$\rightarrow {}^{13}N + n + 10{,}182$
$\rightarrow {}^{14}N + \gamma + 20{,}735$

44. $^{11}B + {}^{4}He \rightarrow {}^{14}C + {}^{1}H + 0{,}784$
$\rightarrow {}^{14}N + n + 0{,}157$

45. $^{11}B + {}^{6}Li \rightarrow {}^{12}C + {}^{4}He + n + 12{,}260$
$\rightarrow {}^{13}C + {}^{4}He + 17{,}207$
$\rightarrow {}^{14}N + {}^{3}H + 4{,}942$
$\rightarrow {}^{15}N + {}^{2}H + 9{,}520$
$\rightarrow {}^{16}N + {}^{1}H + 9{,}782$
$\rightarrow {}^{15}O + 2n + 3{,}753$

46. $^{11}B + {}^{7}Li \rightarrow {}^{13}C + {}^{4}He + n + 9{,}954$
$\rightarrow {}^{14}C + {}^{4}He + 18{,}131$
$\rightarrow {}^{15}N + {}^{3}H + 8{,}525$
$\rightarrow {}^{16}N + {}^{2}H + 4{,}758$
$\rightarrow {}^{17}N + {}^{1}H + 8{,}415$
$\rightarrow {}^{16}O + 2n + 12{,}169$

47. $^{12}C + {}^{1}H \rightarrow {}^{13}N + \gamma + 1{,}944$

48. $^{12}C + {}^{2}H \rightarrow {}^{11}B + {}^{3}He + 5{,}168$
$\rightarrow {}^{13}C + {}^{1}H + 2{,}722$
$\rightarrow {}^{14}N + \gamma + 10{,}272$

49. $^{12}C + {}^{3}H \rightarrow {}^{11}B + {}^{4}He + 3{,}858$
$\rightarrow {}^{14}C + {}^{1}H + 4{,}641$
$\rightarrow {}^{14}N + n + 4{,}015$

50. $^{12}C + {}^{3}He \rightarrow {}^{11}C + {}^{4}He + 1{,}858$
$\rightarrow {}^{14}N + {}^{1}H + 4{,}779$
$\rightarrow {}^{15}O + \gamma + 22{,}793$

51. $^{12}C + {}^{4}He \rightarrow {}^{16}O + \gamma + 7{,}161$

52. $^{12}C + {}^{6}Li \rightarrow {}^{14}N + {}^{4}He + 8{,}799$
$\rightarrow {}^{16}O + {}^{2}H + 5{,}689$
$\rightarrow {}^{17}O + {}^{1}H + 7{,}607$
$\rightarrow {}^{17}F + n + 4{,}064$

53. $^{12}C + {}^{7}Li \rightarrow {}^{15}N + {}^{4}He + 12{,}382$
$\rightarrow {}^{16}O + {}^{3}H + 4{,}695$
$\rightarrow {}^{17}O + {}^{2}H + 2{,}580$
$\rightarrow {}^{18}O + {}^{1}H + 8{,}402$
$\rightarrow {}^{13}F + n + 5{,}964$

54. $^{13}C + {}^{1}H \rightarrow {}^{14}N + \gamma + 7{,}550$

55. $^{13}C + {}^{2}H \rightarrow {}^{11}B + {}^{4}He + 5{,}168$
$\rightarrow {}^{12}C + {}^{3}H + 1{,}311$
$\rightarrow {}^{14}C + {}^{1}H + 5{,}952$
$\rightarrow {}^{14}N + n + 5{,}325$

56. $^{13}C + {}^{3}H \rightarrow {}^{12}B + {}^{4}He + 2{,}280$
$\rightarrow {}^{14}C + {}^{2}H + 1{,}919$
$\rightarrow {}^{15}C + {}^{1}H + 0{,}912$
$\rightarrow {}^{15}N + n + 9{,}903$

57. $^{13}C + {}^{3}He \rightarrow 2{}^{3}Be + 8{,}168$
$\rightarrow {}^{12}C + {}^{4}He + 15{,}631$
$\rightarrow {}^{14}N + {}^{2}H + 2{,}056$
$\rightarrow {}^{15}N + {}^{1}H + 10{,}667$
$\rightarrow {}^{15}O + n + 7{,}125$

58. $^{13}C + {}^{4}He \rightarrow {}^{16}O + n + 2{,}215$

59. $^{13}C + {}^{6}Li \rightarrow {}^{16}O + {}^{2}H + 7{,}000$
$\rightarrow {}^{17}O + {}^{2}H + 4{,}885$

60. $^{13}C + {}^{7}Li \rightarrow {}^{17}O + {}^{3}H + 7{,}000$
$\rightarrow {}^{18}O + {}^{2}H + 5{,}681$

61. $^{14}N + {}^{1}H \rightarrow {}^{15}O + \gamma + 7{,}293$

62. $^{14}N + {}^{2}H \rightarrow 4{}^{4}He + 6{,}300$
$\rightarrow {}^{12}C + {}^{4}He + 13{,}575$
$\rightarrow {}^{15}N + {}^{1}H + 8{,}610$
$\rightarrow {}^{15}O + n + 5{,}068$
$\rightarrow {}^{16}O + \gamma + 20{,}736$

63. $^{14}N + {}^{3}H \rightarrow {}^{13}C + {}^{4}He + 12{,}267$
$\rightarrow {}^{15}N + {}^{2}H + 4{,}577$
$\rightarrow {}^{15}N + {}^{1}H + n + 2{,}352$
$\rightarrow {}^{16}N + {}^{1}H + 4{,}852$
$\rightarrow {}^{16}O + n + 14{,}478$

64. $^{14}N + {}^{3}He \rightarrow {}^{12}C + {}^{4}He + {}^{1}H + 8{,}081 \rightarrow {}^{13}N + {}^{4}He + 10{,}024$

$\rightarrow {}^{15}O + {}^{2}H + 1{,}799$

$\rightarrow {}^{16}O + {}^{1}H + 15{,}243$

65. $^{14}N + {}^{4}He \rightarrow {}^{18}F + \gamma + 4{,}416$

66. $^{14}N + {}^{6}Li \rightarrow {}^{15}O + {}^{4}He + n + 3{,}594$

$\rightarrow {}^{16}O + {}^{4}He + 19{,}263$

$\rightarrow {}^{18}F + {}^{2}H + 2{,}943$

67. $^{14}N + {}^{7}Li \rightarrow {}^{18}F + {}^{3}H + 1{,}950$

$\rightarrow {}^{19}F + {}^{2}H + 4{,}013$

68. $^{15}N + {}^{1}H \rightarrow {}^{12}C + {}^{4}He + 4{,}965$

$\rightarrow {}^{16}O + \gamma + 12{,}126$

69. $^{15}N + {}^{2}H \rightarrow {}^{13}C + {}^{4}He + 7{,}687$

$\rightarrow {}^{16}N + {}^{1}H + 0{,}262$

$\rightarrow {}^{16}O + n + 9{,}901$

70. $^{15}N + {}^{3}H \rightarrow {}^{17}O + n + 7{,}787$

71. $^{15}N + {}^{3}He \rightarrow {}^{14}N + {}^{4}He + 9{,}743$

$\rightarrow {}^{16}O + {}^{2}H + 6{,}632$

$\rightarrow {}^{17}O + {}^{1}H + 8{,}550$

$\rightarrow {}^{17}F + n + 5{,}008$

72. $^{15}N + {}^{4}He \rightarrow {}^{19}F + \gamma + 4{,}012$

73. $^{15}N + {}^{7}Li \rightarrow {}^{19}F + {}^{3}H + 1{,}546$

74. $^{16}O + {}^{1}H \rightarrow {}^{17}F + \gamma + 0{,}601$

75. $^{16}O + {}^{2}H \rightarrow {}^{14}N + {}^{4}He + 3{,}110$

$\rightarrow {}^{18}F + \gamma + 7{,}527$

$\rightarrow {}^{17}O + {}^{1}H + 1{,}918$

76. $^{16}O + {}^{3}H \rightarrow {}^{15}N + {}^{4}He + 7{,}688$

$\rightarrow {}^{18}O + {}^{1}H + 3{,}707$

$\rightarrow {}^{18}F + n + 1{,}269$

77. $^{16}O + {}^{2}He \rightarrow {}^{15}O + {}^{4}He + 4{,}909$

$\rightarrow {}^{18}F + {}^{1}H + 2{,}033$

$\rightarrow {}^{19}N + \gamma + 8{,}443$

78. $^{16}O + {}^{4}He \rightarrow {}^{20}Ne + \gamma + 4{,}730$

79. $^{16}O + {}^{6}Li \rightarrow {}^{18}F + {}^{4}He + 6{,}053$

$\rightarrow {}^{20}Ne + {}^{2}H + 3{,}257$

80. $^{16}O + {}^{7}Li \rightarrow {}^{19}F + {}^{4}He + 9{,}233$

$\rightarrow {}^{20}Ne + {}^{3}H + 2{,}264$

81. $^{17}O + {}^{1}H \rightarrow {}^{14}N + {}^{4}He + 1{,}193$

$\rightarrow {}^{18}F + \gamma + 5{,}609$

82. $^{17}O + {}^{2}H \rightarrow {}^{15}N + {}^{4}He + 9{,}802$

$\rightarrow {}^{16}O + {}^{3}H + 2{,}115$

$\rightarrow {}^{18}O + {}^{1}H + 5{,}822$

$\rightarrow {}^{18}F + n + 3{,}384$

83 $^{17}O + {}^{3}H \rightarrow {}^{19}O + {}^{1}H + 3{,}521$

84. $^{17}O + {}^{3}He \rightarrow {}^{16}O + {}^{4}He + 16{,}435$

$\rightarrow {}^{18}F + {}^{2}H + 0{,}155$

$\rightarrow {}^{19}Ne + n + 4{,}300$

85 $^{17}O + {}^{4}He \rightarrow {}^{20}Ne + n + 0{,}588$

86. $^{18}O + {}^{1}H \rightarrow {}^{15}N + {}^{4}He + 3{,}980$

$\rightarrow {}^{19}F + \gamma + 7{,}993$

87. $^{18}O + {}^{2}H \rightarrow {}^{15}N + {}^{4}He + n + 1{,}755$

$\rightarrow {}^{16}N + {}^{4}He + 4{,}245$

$\rightarrow {}^{19}O + {}^{1}H + 1{,}732$

$\rightarrow {}^{19}F + n + 5{,}768$

88. $^{18}O + {}^{3}H \rightarrow {}^{17}N + {}^{4}He + 3{,}872$

$\rightarrow {}^{20}O + {}^{1}H + 3{,}079$

$\rightarrow {}^{20}F + n + 6{,}112$

89 $^{18}O + {}^{3}He \rightarrow {}^{17}O + {}^{4}He + 12{,}532$

$\rightarrow {}^{19}F + {}^{2}H + 2{,}499$

$\rightarrow {}^{20}F + {}^{1}H + 6{,}876$

$\rightarrow {}^{20}Ne + n + 13{,}119$

90. $^{18}O + {}^{6}Li \rightarrow {}^{16}N + {}^{8}Be + 2{,}677$

$\rightarrow {}^{19}F + {}^{4}He + n + 4{,}295$

$\rightarrow {}^{20}F + {}^{4}He + 10{,}895$

91. $^{18}O + {}^{7}Li \rightarrow {}^{20}F + {}^{4}He + n + 3{,}645$

43.3. ЗВЕЗДНЫЕ ЦИКЛЫ

Предполагается, что источником энергии Солнца и звезд являются термоядерные реакции, происходящие в их недрах. В результате этих реакций происходит превращение легких элементов в более тяжелые, например синтез ^{4}He из ^{1}H. Синтез более тяжелых элементов обычно осуществляется путем последовательной цепи нескольких термоядерных реакций. Этот комплекс реакций носит название звездного цикла.

Ниже приведены реакции, входящие в цикл и их энерговыделение [9, 10]. Под заголовком цикла указаны исходные вещества и конечные продукты, образующиеся в цикле (элементарные частицы и фотоны опущены), а также суммарная выделяемая энергия.

Протонный цикл (*pp*-цикл)

$4\,{}^{1}H \rightarrow {}^{4}He$, $E = 100{,}794$ *Мэв*

$^{1}H + {}^{1}H \rightarrow {}^{2}H + \beta^{+} + \nu + 0{,}420$

$^{2}H + {}^{1}H \rightarrow {}^{3}He + \gamma + 5{,}494$

$^{3}He + {}^{3}He \rightarrow {}^{4}He + 2\,{}^{1}H + 12{,}860$

$^{3}He + {}^{4}He \rightarrow {}^{7}Be + \gamma + 1{,}587$

$^{7}Be + e^{-} \rightarrow \gamma^{*} + {}^{7}Li + 0{,}862$

$^{7}Li + {}^{1}H \rightarrow 2\,{}^{4}He + 17{,}347$

$^{7}Be + {}^{1}H \rightarrow {}^{8}B + \gamma + 0{,}134$

$$^8B \rightarrow {}^8Be + \beta^+ + \nu + 17{,}979$$

$$^8Be \rightarrow 2^4He + 0{,}094$$

Углеродно-азотный цикл (C—N-цикл)

$$4^1H \rightarrow {}^4He, \quad E = 24.689 \text{ } Мэв$$

$$^{12}C + {}^1H \rightarrow {}^{13}N + \gamma + 1{,}944$$

$$^{13}N \rightarrow \beta^+ + \nu + {}^{13}C + 1{,}199$$

$$^{13}C + {}^1H \rightarrow {}^{14}N + \gamma + 7{,}550$$

$$^{14}N + {}^1H \rightarrow {}^{15}O + \gamma + 7{,}293$$

$$^{15}O \rightarrow {}^{15}N + \beta^+ + \nu + 1{,}738$$

$$^{15}N + {}^1H \rightarrow {}^{12}C + {}^4He + 4{,}965$$

Двойной углеродно-азотно-кислородный цикл

(C—N—O-бицикл) C—N-цикл + 3^1H + ^{15}N + ^4He + ^{14}N

$$E = 24.689 \text{ } Мэв + 15{,}658 \text{ } Мэв$$

C—N-цикл +

$$^{15}N + {}^1H \rightarrow {}^{16}O + \gamma + 12{,}126$$

$$^{16}O + {}^1H \rightarrow {}^{17}F + \gamma + 0{,}601$$

$$^{17}F \rightarrow {}^{17}O + \beta^+ + \nu + 1{,}738$$

$$^{17}O + {}^1H \rightarrow {}^4He + {}^{14}N + 1{,}193$$

Неоново-натриевый цикл (Ne—Na-цикл)

$$4^1H \rightarrow {}^4He, \quad E = 24{,}687 \text{ } Мэв$$

$$^{20}Ne + {}^1H \rightarrow {}^{21}Na + \gamma + 2{,}433$$

$$^{21}Na \rightarrow {}^{21}Ne + \beta^+ + \nu + 2{,}523$$

$$^{21}Ne + {}^1H \rightarrow {}^{22}Na + \gamma + 6{,}741$$

$$^{22}Na \rightarrow {}^{22}Ne + \beta^+ + \nu + \gamma + 1{,}821$$

$$^{22}Ne + {}^1H \rightarrow {}^{23}Na + \gamma + 8{,}792$$

$$^{23}Na + {}^1H \rightarrow {}^{20}Ne + {}^4He + 2{,}377$$

Гелиевый цикл (He-цикл)

$$4^4He \rightarrow {}^{16}O, \quad E = 15{,}530 \text{ } Мэв$$

$$^4He + {}^4He \rightleftarrows {}^8Be$$

$$^8Be + {}^4He \rightarrow {}^{12}C + \gamma + 7{,}369$$

$$^{12}C + {}^4He \rightarrow {}^{16}O + \gamma + 7{,}161$$

43.4. ЭФФЕКТИВНЫЕ СЕЧЕНИЯ ТЕРМОЯДЕРНЫХ РЕАКЦИЙ

На рис. 43.1—43.7 приведены экспериментальные зависимости полных сечений термоядериых реакций от энергии бомбардирующей частицы. Для энергий, меньших 200 *кэв*, можно получить приближенное значение сечения реакции, обработав экспериментальные данные по формуле Гамова (43.1) и экстраполировав полученные кривые в область малых энергий. В тех случаях, когда авторы не конкретизировали продукты реакции, а измеряли суммарное сечение для всех возможных каналов реакции, в подрисуночной подписи не указаны продукты реакции, например Li(*t*, *n*).

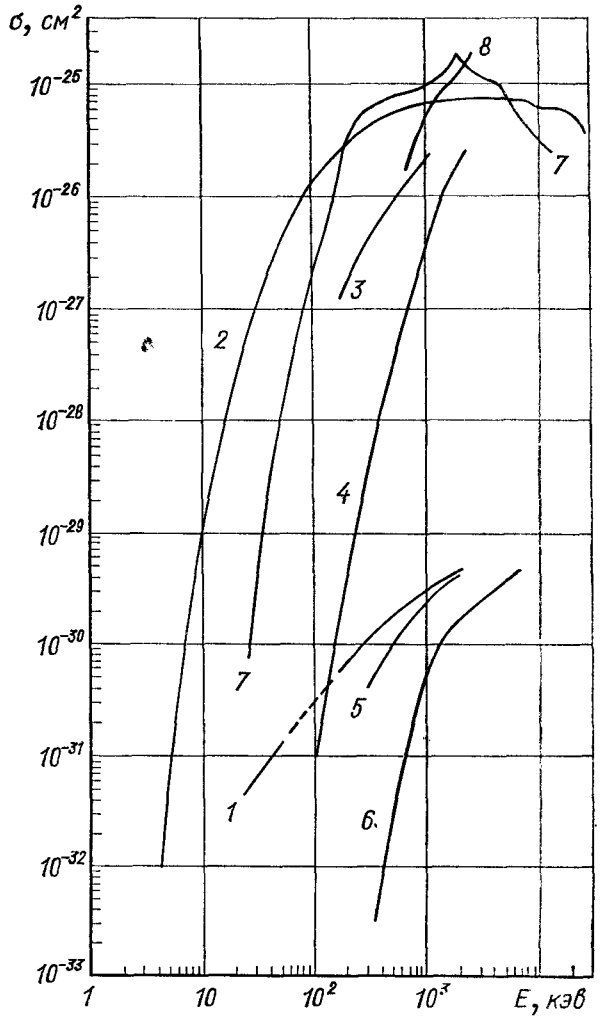


Рис. 43.1. Сечения термоядерных реакций:
1 — $^2H(p,\gamma)^3He$ [11, 12];
2 — $^2H(d, p)^3H$ [13—25];
3 — ^3He $(t, d)^4He$ [43];
4 — ^3He $(^3He, p)$ [44, 84];
5 — ^3H $(\alpha, \gamma)^7Li$ [45];
6 — ^3He $(\alpha, \gamma)^7Be$ [46, 82, 83];
7 — ^6Li (p, α) ^3He [47, 48, 86, 87];
8 — $^6Li(t, n)$ [57].

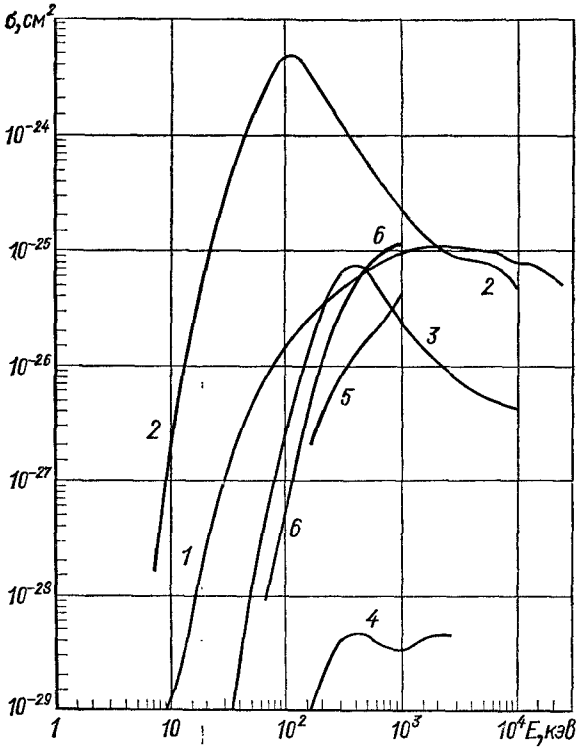


Рис. 43.2. Сечения термоядерных реакций:
1 — $^{2}H(d, n)\,^{3}He$ [13, 14, 18, 21—27];
2 — $^{3}H(d, n)\,^{4}He$ [13, 31—36];
3 — $^{3}He(d, p)\,^{4}He$ [13, 38—41];
4 — $^{3}He\,(d, \gamma)\,^{5}Li$ [42];
5 — $^{3}He(t, pn)\,^{4}He$ [43];
6 — $^{6}Li(d, p)\,^{7}Li$ [49—51].

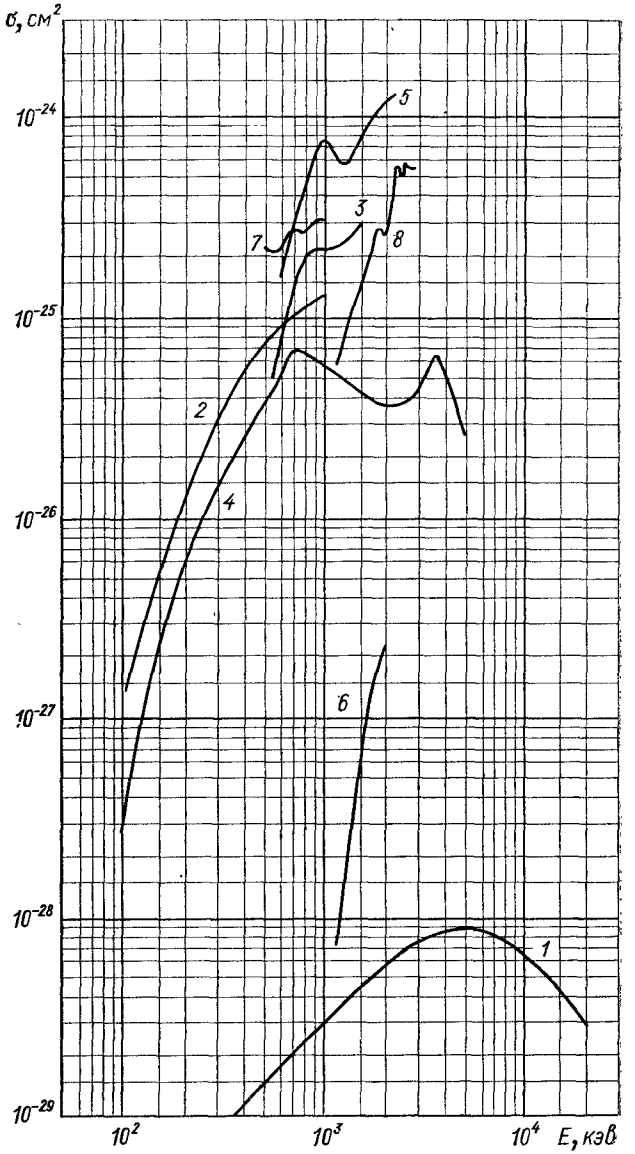


Рис. 43.3. Сечения термоядерных реакций:
1 — $^{3}H(p, \gamma)\,^{4}He$ [28—30];
2 — $^{6}Li(d, n)\,^{7}Be$ [49, 52, 53];
3 — $^{6}Li(d, t)$ [54];
4 — $^{6}Li(d, \alpha)\,^{4}He$ [53, 55, 56];
5 — $^{7}Li(t, n)$ [57];
6 — $^{7}Li(^{7}Li, p)\,^{13}B + {}^{7}Li(^{7}Li, d)\,^{12}B$ [64];
7 — $^{9}Be\,(p, d)\,^{8}Be$ [65];
8 — $^{9}Be\,(t, n)$ [68].

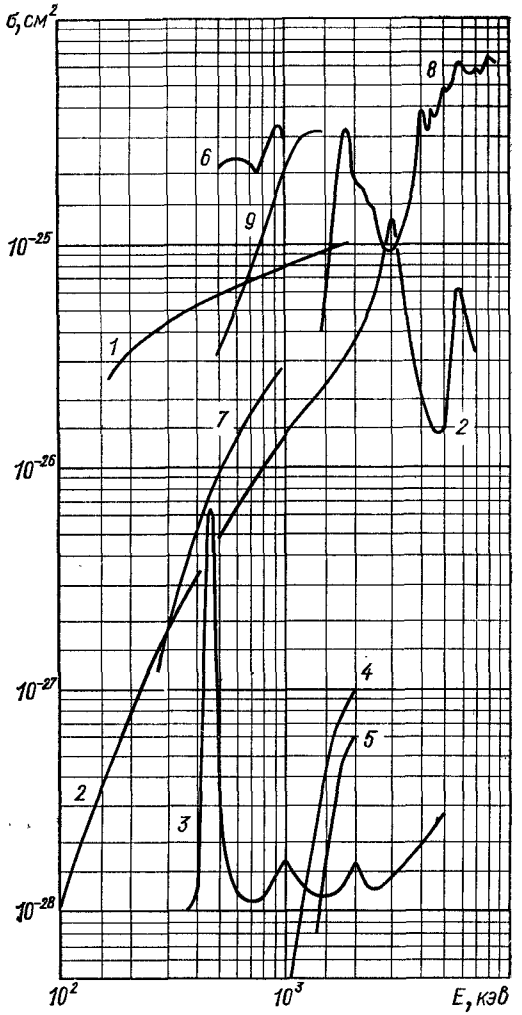


Рис. 43.4. Сечения термоядерных реакций:
1 — $^{3}H(t, n)$ [37];
2 — $^{7}Li(p, d)\ ^{4}He$ [56, 58—60];
3 — $^{7}Li(p, \gamma)\ ^{8}Be$ [61—63];
4 — $^{6}Li(^{7}Li, p)\ ^{12}B$ [64];
5 — $^{7}Li(^{7}Li, ^{8}Be)\ ^{6}He$ [64];
6 — $^{9}Be(p, \alpha)\ ^{6}Li$ [65];
7 — $^{9}Be(d, p)\ ^{10}Be$ [66, 67];
8 — $^{9}Be(\alpha, n)\ ^{12}C$ [69, 70, 85];
9 — $^{10}B(d, n)$ [75].

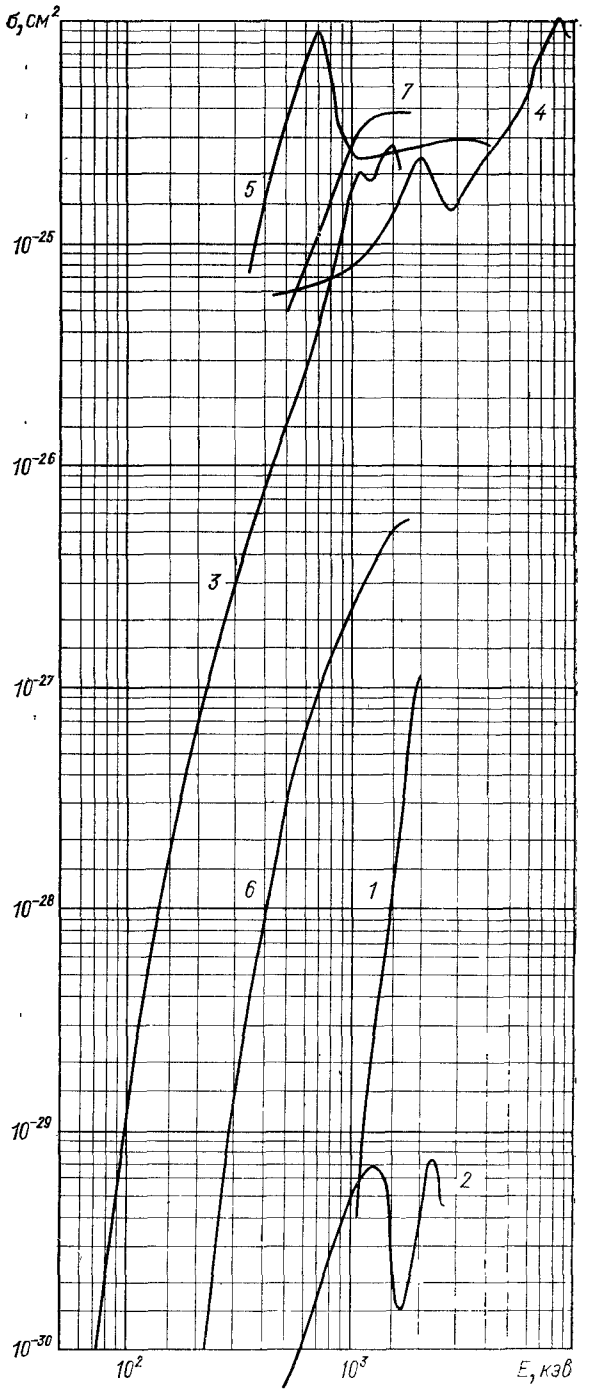


Рис. 43.5. Сечения термоядерных реакций:
1 — $^{9}Be(^{7}Li, ^{8}Li)\ ^{8}Be$ [64];
2 — $^{10}B(p, \gamma)\ ^{11}C$ [71];
3 — $^{10}B(p, \alpha)\ ^{7}Be$ [72—74];
4 — $^{10}B(\alpha, n)\ ^{13}N$ [70];
5 — $^{11}B(p, \alpha)\ ^{8}Be$ [76, 77];
6 — $^{11}B(d, p)\ ^{12}B$ [78];
7 — $^{11}B(d, n)$ [75].

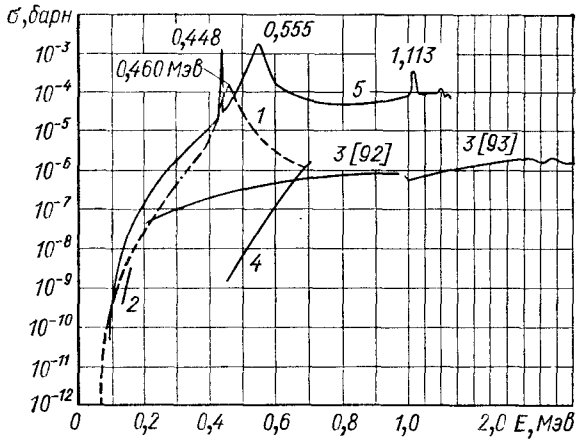


Рис. 43.6. Сечения термоядерных реакций:
1 — $^{12}C(p, \gamma)\ ^{13}N$ [4, 9, 79—81];
2 — $^{14}N(p, \gamma)\ ^{15}O$ [9, 81];
3 — $^{7}Be(p, \gamma)\ ^{8}B$ [92, 93];
4 — $^{13}C(\alpha, n)\ ^{16}O$ [6];
5 — $^{13}C(p, \gamma)\ ^{14}N$ [5].

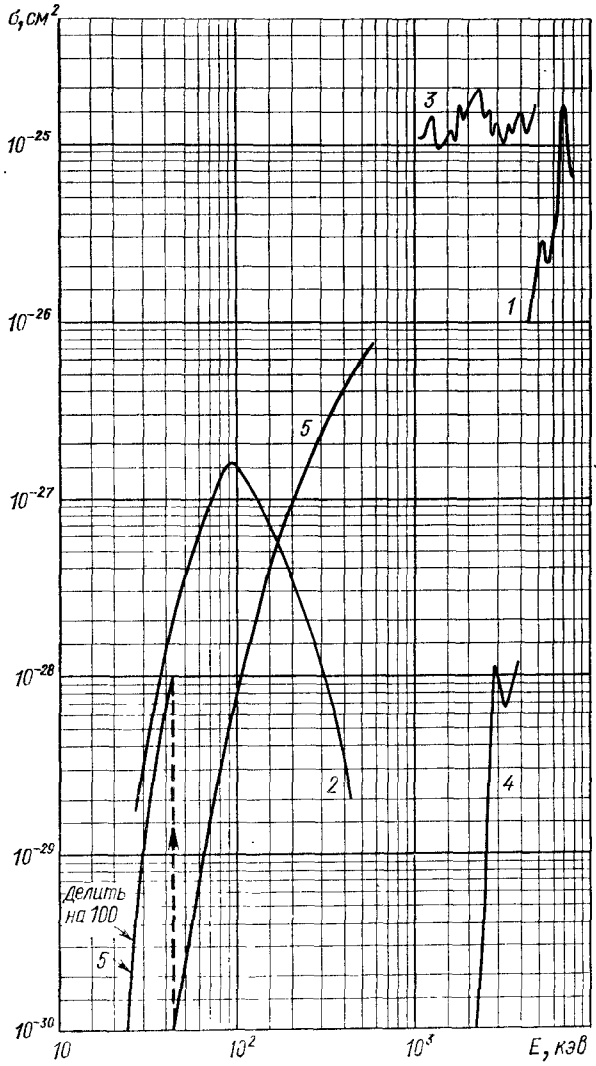


Рис. 43.7. Сечения термоядерных реакций:
1 — $^{7}Li(\alpha, n)\ ^{10}B$ [70, 88];
2 — $T(d, \gamma)\ ^{5}He$ [89];
3 — $^{12}C(d, n)\ ^{13}N$ [90];
4 — $^{18}O(\alpha, \gamma)\ ^{22}Ne$ [91];
5 — $^{7}Li(p, \alpha)\ ^{4}He$ [7, 8, 86].

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Mattaugh J. H. E. e. a.** "Nucl. Phys.", 1965, v. 67, p. 1.
2. **Ajzenberg-Selove F., Lauritsen T.** "Nucl. Phys.", 1959, v. 11, p. 1; 1966, v. 78, p. 1; "Rev. Mod. Phys.", 1955, v. 27, p. 66; "Nucl. Phys.", 1968, v. A114, p. 1.
3. **Ajzenberg-Selove F.** "Nucl. Phys.", 1970, v. A152, p. 1, 1971, v. A 166, p. 1; 1972, v. A190, p. 1.
4. **Дейнеко А. С. и др.** «Журн. эксперим. и теор. физ.», 1957, т. 32, с. 251.
5. **Fowler W. A. e. a.** "Ann. Rev. Astron. and Astrophys.", 1967, v. 5, p. 525.
6. **Davis C. N.** "Nucl. Phys.", 1968, v. A110, p. 619.
7. **Spinka H., Tombrello T.** "Nucl. Phys.", 1971, v. A164, p. 1.
8. **Fiedler O., Kunze P.** "Nucl. Phys.", 1967, v. A96, p. 513.
9. **Burbidge E. M. e. a.** "Rev. Mod. Phys.", 1957, v. 29, p. 547.
10. **Holmgren H. D., Jonston R. L.** "Phys. Rev.", 1959, v. 113, p. 1556.
11. **Griffiths G. M. e. a.** «Canad. J. Phys.», 1962, v. 40, p. 402.
12. **Griffiths G. M., Lal M., Scarfe C. D.** "Canad. J. Phys.", 1963, v. 41, p. 724.
13. **Arnold W. R. e. a.** "Phys. Rev.", 1954, v. 93, p. 483.
14. **Cook C. F., Smith J. R.** "Phys. Rev.", 1953, v. 89, p. 785.
15. **Blair J. M. e. a.** "Phys. Rev.", 1948, v. 74, p. 1599.
16. **Wenzel W. A., Whaling W.** "Phys. Rev.", 1952, v. 88, p. 1149.
17. **Sanders J. H., Moffatt J., Roaf D.** "Phys. Rev.", 1951, v. 81, 602.

18. **Preston G., Shaw P. F., Joung S. A.** "Proc. Roy. Soc.", 1954, v. A226, p. 206.
19. **Allered J. C., Phillips D. D., Rosen L.** "Phys. Rev.", 1951, v. 82, p 782.
20. **Magnag-Vallette D. e. a.** "J. Phys. et Radium' , 1960, v. 21, p. 125.
21 **Von Engel A., Goodyear C. C.** "Proc. Roy. Soc.", 1961, v. A264, p. 445.
22. **Волков В. В и др.** В сб.: Ядерные реакции на легких ядрах. М., Атомиздат, 1957, с. 15.
23. **Ганеев А. С. и др.** См. [22], с. 26.
24. **Brolley J. E., Putnam T. M., Rosen L.** "Phys. Rev.", 1957, v. 107, p. 820.
25. **Van Oers W. T. M., Brockman K. W.** "Nucl. Phys.", 1963, v. 48, p. 625.
26. **Давиденко В. А. и др.** См. [22], с. 7.
27. **Hunter G. F., Richards H. T.** "Phys. Rev.", 1949, v. 76, p. 1445.
28. **Fuller E. G.** "Phys. Rev.", 1954, v. 96, p. 1306.
29. **Perry J. E., Bame S. J.** "Phys. Rev.", 1955, v. 99, p. 1368.
30. **Gemmel D. S., Jones G. A.** "Nucl. Phys.", 1962, v. 33, p. 102.
31. **Fowler J. L., Brolley J. E.** "Revs Mod. Phys.", 1956, v. 28, p. 103.
32 **Conner J. E., Bonner T. W., Smith J. R.** "Phys. Rev.", 1952, v. 88, p. 468.
33. **Argo H V. e. a.** "Phys. Rev.", 1952, v. 87, p. 612.
34 **Bame S. J., Perry J. E.** "Phys. Rev.", 1957, v. 107, p. 1616.
35. **Fowler J. L., Stovall E. J.** "Phys. Rev.", 1951, v. 82, p. 502.
36. **Балабанов Е. М. и др.** См. [22], с. 48, 57.
37. **Говоров А. М. и др.** «Журн. эксперим. и теор. физ.», 1962, т. 42, с. 383.
38. **Bonner T. W., Conner J. E., Little A. B.** "Phys. Rev.", 1952, v. 88, p. 473.
39. **Allred J. C.** "Phys. Rev.", 1951, v. 84, p. 695.
40. **Yarnell J. L., Lovberg R. H., Strattow W. R.** "Phys. Rev.", 1953, v. 90, p. 292.
41 **Клюгарев А. П., Есельсон Б. Н., Вальтер А. К.** «Докл. АН СССР», 1956, т. 109, с. 737.
42. **Blair J. M., Hintz N. M., Van Patter D. M.** "Phys Rev." 1954, v. 96, p. 1023.
43. **Ли Га Ен и др.** «Журн. эксперим. и теор. физ.», 1960, т. 39, с. 225.
44. **Good W. M., Kunz W. E., Moak C. D.** "Phys. Rev.", 1954, v. 94, p. 87.
45. **Griffiths G. M. e. a.** "Canad. J. Phys.", 1961, v. 39, p. 1397.
46. **Holmgren H. D., Johnston R. L.** "Phys. Rev.", 1959, v. 113, p. 1556.
47. **Jeronymo J. M. F., Mani G. S., Sadegh A.** "Nucl. Phys.", 1963, v. 43, p. 417.
48. **Temmer G. M.** Proc. Conf. on Direct Interaction and Nucl. Reaction Mechanisms, Padua, 1962. Ed. by E. Clementel and C. Villi, N. Y.— Lond., Cordow and Breach Science Publishers, 1963, v. 1, p. 1013.
49. **Whaling W., Bonner T. W.** "Phys. Rev.", 1950, v. 79, p. 258.
50. **Nickel W. E.** "Phys. Rev.", 1954, v. 95, p. 426.
51. **Роуз Д., Кларк М.** Физика плазмы и управляемые термоядерные реакции. М., Госатомиздат, 1963.
52. **Birk M. e. a.** "Nucl. Phys.", 1963, v. 41, p. 58.
53. **Hirst F., Johnston J., Pool M. J.** "Philos. Mag.", 1954, v. 45, p. 762.
54. **Macklin R. L., Banta H. E.** "Phys. Rev.", 1955, v. 97, p. 753.
55 **Jeronymo J. M. F. e. a.** "Nucl. Phys.", 1962, v. 38, p. 11.
56. **Heydenburg N. P. e. a.** "Phys. Rev.", 1948, v. 77 p. 405.
57. **Вальтер А. К. и др.** «Атомная энергия», 1961, т. 10, с. 577.
58. **Timm U.** "Naturwissenschaften", 1957, Bd. 44, s. 279; 1958, Bd 45, S. 204.
59. **Cassongnou Y. e. a.** "Nucl. Phys.", 1962, v. 33, p. 449; 1963, v. 41, p. 164; 1962, v. 42, p. 353.
60. **Теплов И. Б. и др.** «Журн. эксперим. и теор. физ.», 1962, т. 42, с. 353.
61. **Wilkinsow D. H.** "Philos Mag.", 1954, v. 45, p. 259.
62. **Hunt S. E.** "Proc. Phys. Soc.", 1952, v. A65, p. 982.
63. **Bonner T. W., Evans J. E.** "Phys. Rev." ,1948, v. 73 p. 666.
64. **Norbeck E., Littlejohn C. S.** "Phys. Rev.", 1957, v.— 108, p. 754.
65. **Talbott F. L., Busala A., Weissenbach G. C.** "Phys. Rev.", 1951, v. 82, p. 1.
66. **Resnick J., Hanna S. S.** "Phys. Rev.", 1951, v. 82, p. 463.
67. **Biggerstaff J. A. e. a.** "Nucl. Phys.", 1962, v. 36, p. 631.
68. **Вальтер А. К., Вацет П. И. и др.** «Укр. фіз. журн.», 1961, т. 6 "с. 457.
69. **Bonner T. W. e. a.** "Phys. Rev.", 1956, v. 102, p. 1348.
70. **Gibbons J. H., Macklin R. L.** "Phys. Rev.", 1965, v. 137, p. 1508; 1959, v. 114, p. 571.
71. **Day R. B., Huus T.** "Phys. Rev.", 1954, v. 95, p.1003.
72. **Bach G. G., Liveresy D. J.** "Philos. Mag.", 1956, v. 46, p. 824.
73. **Bureham W. E., Freeman J. M.** "Philos Mag.". 1950, v. 41, p. 337.
74. **Brown A. B., Snyder C. W., Fowler W. A. e. a.** "Phys. Rev.", 1951, v. 82, p. 195.
75. **Burke W. H., Risser J. R., Phillips G. G.** "Phys. Rev.", 1954, v. 93, p. 188.
76. **Symons C. D., Treacy P. B.** "Nucl. Phys.", 1963, v. 46, p. 93.
77. **Beckman O., Huus T., Zupancic C.** "Phys. Rev.", 1953, v. 91, p. 606.
78. **Hudspeth E. L., Smann C. P.** "Phys. Rev.", 1949, v. 76, p. 1150.
79. **Bailey C. L., Stratton W. R.** "Phys. Rev.", 1950, v. 77, p. 194.
80. **Hall R. N., Towler W. A.** "Phys. Rev.". 1950, v. 77, p. 197.
81. **Lamb W. A. S., Hester R. E.** "Phys. Rev.". 1957, v. 107, p. 550.
82. **Parker P. D., Kavanagh R. M.** "Phys. Rev.". 1963, v. 131, p. 2578.
83. **Nagatani K. e. a.** 'Nucl. Phys.", 1969, v. A128, p. 325.
84. **Dwarakanath M. R., Winkler H.** "Phys. Rev.", 1971, v. C4, p. 1532.
85. **Van der Zwan L., Geiger K. W.** "Nucl. Phys.", 1970, v. A152, p. 481.
86. **Haworth L. I., King L. D. P.** "Phys. Rev.", 1938, v. 54, p. 38.
87. **Gemeinhardt W. e. a.** "Z. Phys.", 1968, Bd 197, S. 58.
88. **Macklin R. L., Gibbons J. H.** "Phys. Rev.". 1968, v. 165, p. 1147.
89. **Безотосный В. М. и др.** «Ядерная физика», 1969, т. 10, с. 225.
90. **Jaszczak R. J. e. a.** "Phys. Rev.", 1969, v. 181, p. 1428.
91. **Adams A. e. a.** "Nucl. Phys.". 1969, v. A131, p. 430.
92. **Parker P. D.** "Phys. Rev.", 1966, v. 150, p. 851.
93. **Vaughn E. J. e. a.** "Phys. Rev.", 1970, v. C2, p. 1657.

ГЛАВА 44

ПРОХОЖДЕНИЕ ИОНИЗИРУЮЩЕГО ИЗЛУЧЕНИЯ ЧЕРЕЗ ВЕЩЕСТВО

44.1. ОСНОВНЫЕ ОБОЗНАЧЕНИЯ И ОПРЕДЕЛЕНИЯ

e — электрон
p — протон
d — дейтон (ядро ^2_1H)
α — α-частица (ядро ^4_2He)
F — осколок деления
γ — γ-квант
$m_{0(x)}$ — масса покоя частицы x
m_x — масса частицы x
v_x — скорость частицы x
E_x — кинетическая энергия частицы x
β — отношение скорости частицы к скорости света, v/c
μ — массовый или линейный коэффициент ослабления при экспоненциальном законе поглощения
z и Z — заряды частицы и среды (в единицах заряда электрона)
трек, — траектория частицы в тормозящей среде
R_x — пробег частицы, x — путь частицы до полной потери ионизующей способности; R_x — измеряется в направлении первоначального движения или, если это оговорено (для электронов), вдоль трека
$H\rho$ — произведение напряженности поля на радиус кривизны траектории заряженной частицы в магнитном поле

$\overline{R}$ — *пробег частиц* — средний арифметический пробег частиц данного сорта и энергии

$R_{экстр}$ — *экстраполированный пробег*, определяется экстраполяцией к нулевой интенсивности наиболее крутой части зависимости числа прошедших через слой поглотителя частиц от толщины поглотителя. Используется главным образом для описания пробега электронов в направлении первоначального движения

$-dE/dx$ — *тормозная способность* — характеристика удельных потерь энергии в веществе частицей данного сорта отнесенных к плотности мишени.

44.2. КИНЕТИЧЕСКИЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ РЕЛЯТИВИСТСКИХ ЧАСТИЦ [2]

Масса движущейся частицы

$$m_v = m_0 \frac{E + m_0c^2}{m_0c^2} = \frac{m_0}{\sqrt{1-\beta^2}}.$$

Параметр $H\rho$ (рис. 44.1) определяется формулой:

$$H\rho = \frac{1}{300z}\sqrt{E^2 + 2Em_0c^2},$$

где $H\rho$, 10^6 [*э·см*]; E и m_0c^2 — кинетическая энергия и энергия покоя, *Мэв*.

Скорость частицы (рис. 44.2):

$$v = c\sqrt{1-\left(\frac{m_0c^2}{E + m_0c^2}\right)^2}.$$

Связь между энергией и импульсом частицы:

$$E = \sqrt{c^2p^2 + m_0^2c^4} - m_0c^2,$$

p — импульс частицы.

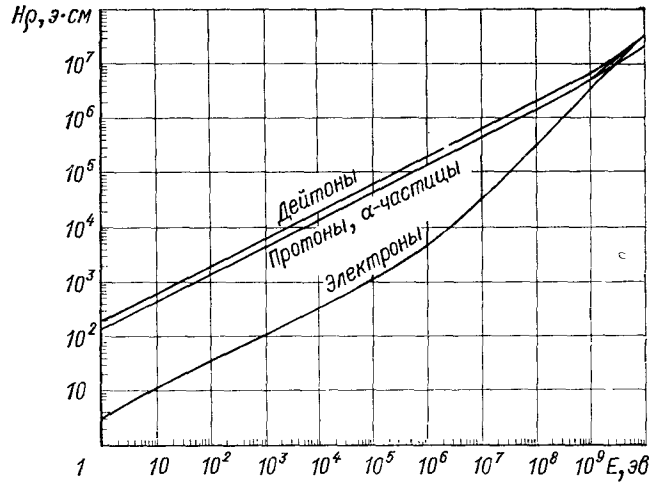


Рис. 44.1. Связь между энергией E заряженных частиц и параметром $H\rho$ [1].

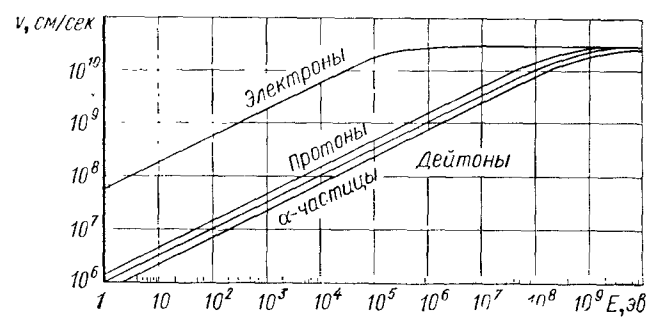


Рис. 44.2. Связь между энергией E и скоростью v заряженных частиц [1].

44.3. ПРОХОЖДЕНИЕ ТЯЖЕЛЫХ ЗАРЯЖЕННЫХ ЧАСТИЦ ЧЕРЕЗ ВЕЩЕСТВО

Тяжелые заряженные частицы ($m \gg m_e$) теряют энергию постепенно, в основном за счет ионизации и возбуждения атомов тормозящей среды. Некоторая часть выбитых со своих орбит электронов тормозящей среды (δ-электроны) имеет сравнительно высокую энергию вплоть до $4\,(m/M)E$ (где m/M — отношение массы электрона и заряженной частицы) и производит вторичную ионизацию. Полная ионизация, т. е. сумма первичной и вторичной ионизаций, обычно в три раза превышает первичную. Параллельный пучок тяжелых заряженных частиц, проходя через вещество, почти не рассеивается. Так, для протонов с энергией 1 *Мэв* вероятность рассеяния на угол, превышающий 10°, равна 0,53% на 1 *см* пробега в атмосфере; разброс пробегов моноэнергетических частиц не превышает 1—2%.

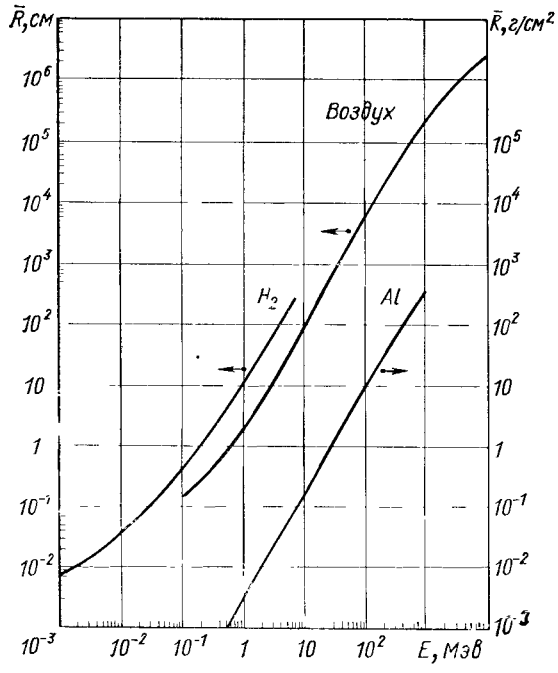


Рис. 44.3. Связь между энергией E и пробегом $\bar{R}$ протонов в H_2 [1, 3], воздухе [1] и Al [1]. Стрелками указана шкала кривых по оси ординат.

Таблица 44.1

Пробег протонов высокой энергии. г/см². в Be, C, Al, Cu, Pb и воздухе [13]

E, Мэв	Be	C	Воздух	Al	Cu	Pb
50	2,722	2,488	2,557	2,928	3,599	5,275
75	5,655	5,160	5,293	6,021	7,321	10,52
100	9,461	8,623	8,835	10,01	12,01	17,17
150	19,37	17,63	18,03	20,34	24,35	34,11
200	31,91	29,02	29,64	33,34	39,71	55,14
300	63,33	57,53	58,68	65,79	77,82	107,0
400	101,4	91,99	93,73	104,9	123,5	168,6
500	144,4	131,0	133,3	148,9	174,9	237,6
600	191,3	173,4	176,3	196,7	230,5	312,0
700	241,3	218,6	222,0	247,6	289,5	390,5
800	293,7	265,9	269,8	300,0	350,9	472,2
1000	404,0	365,3	370,0	412,0	479,4	642,2
2000	1007	907,3	910,3	1014	1168	1543
3000	1633	1469	1463	1634	1871	2445
5000	2879	2584	2543	2587	3248	4185
7000	4100	3675	3583	4046	4580	5847
10 000	5889	5270	5081	5777	6512	8234

Таблица 44.2

Относительная и максимальная тормозная способность различных веществ для протонов [1]

Чем меньше Z, тем больше относительная (по отношению к воздуху) тормозная способность вещества $(dE/dx)_{отн}$; E_0 — энергия, при которой тормозная способность вещества максимальна; $(dE/dx)_{макс}$ — максимальное значение тормозной способности.

Вещество	$-(dE/dx)_{отн}$ 100 кэв	$-(dE/dx)_{отн}$ 2 Мэв	$-(dE/dx)_{отн}$ 1000 Мэв	E_0, кэв	$-(dE/dx)_{макс}$, Мэв·см²/г
Водород	2,4	1,52	1,16	30	3400
Воздух	1	1	1	100	620
Алюминий	0,68	0,82	0,91	72	440
Золото	0,14	0,34	0,61	160	100

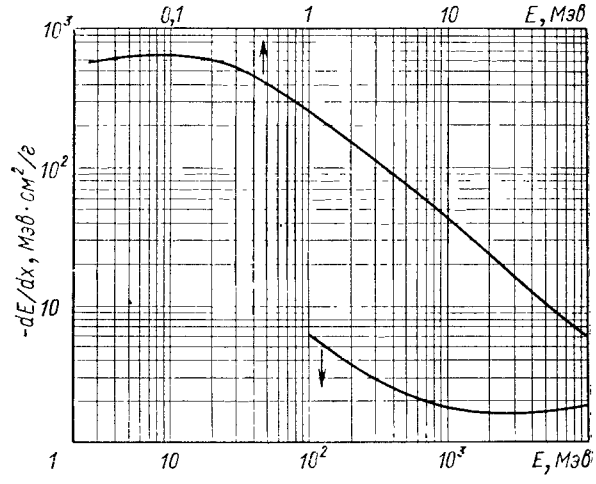


Рис. 44.4. Тормозная способность — dE/dx воздуха для протонов как функция их энергии E [1].

Пробег дейтонов, α-частиц и других тяжелых заряженных частиц

Связь между пробегом протона и пробегом однозарядной частицы другой массы (кроме электрона) дается формулой [4],

$$R_x(E) = \frac{m_x}{m_p} R_p\left(\frac{m_p}{m_x} E\right).$$

Например, пробег дейтонов может быть определен по пробегу протонов с энергией $E_d = 2E_p$.

Для частиц, заряд которых больше единицы и сохраняет постоянное значение на основном участке пробега справедливо соотношение [4]

$$R_p(v) = \frac{m_p}{m_x} z^2 R_x(v) - C,$$

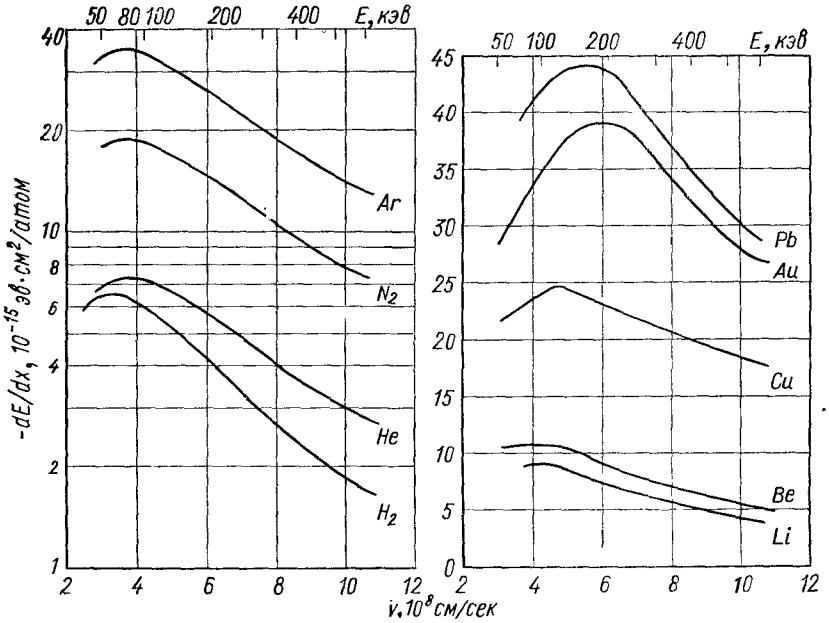


Рис. 44.5. Тормозная способность — dE/dx для протонов как функция их энергии E и скорости v в различных веществах [3].

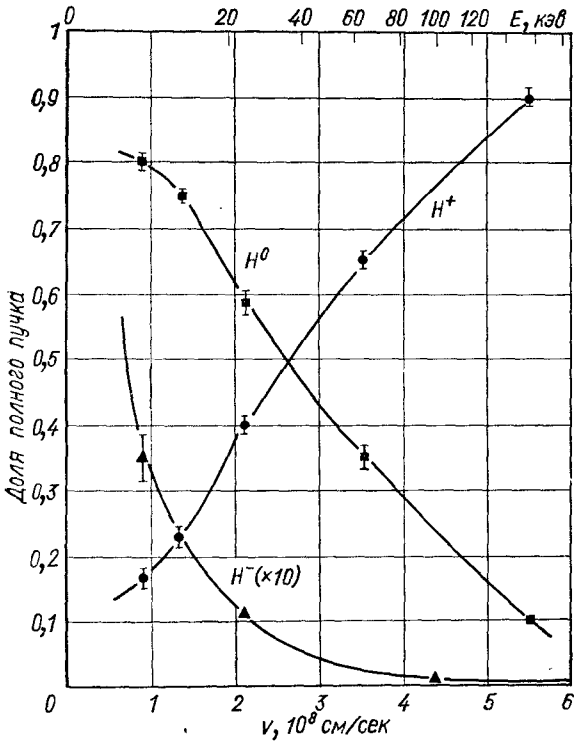


Рис. 44.6. Равновесие между H^+, H^0 и H^- в алюминиевой фольге как функция энергии E и скорости v протонов [3].

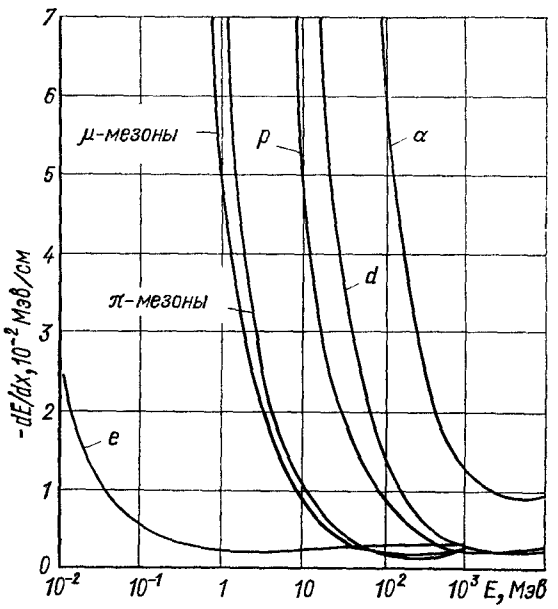


Рис. 44.7. Удельные потери энергии — dE/dx различными заряженными частицами в воздухе [4].

где постоянная C учитывает неодинаковый захват и потерю электронов движущейся частицей и протоном. Для α-частиц

$$R_p(E) = 1{,}007R_\alpha(3{,}972E) - 0{,}2, \quad E \geqslant 0{,}5 \text{ Мэв}.$$

Пробег α-частиц в различных веществах (рис. 44.8 и 44.9) может быть рассчитан по их пробегу в воздухе с помощью эмпирической формулы [4]:

$$R_{\alpha,\,x}(E) = 0{,}56R_{\alpha,\,\text{возд}}(E)\,A^{1/3},$$

где $R_{\alpha,\,x}$ — пробег в веществе, *мг/см²*; $R_{\alpha\,\text{возд}}$ — пробег в воздухе, *см* (15 °С, 760 *мм рт. ст.*); A — массовое число вещества.

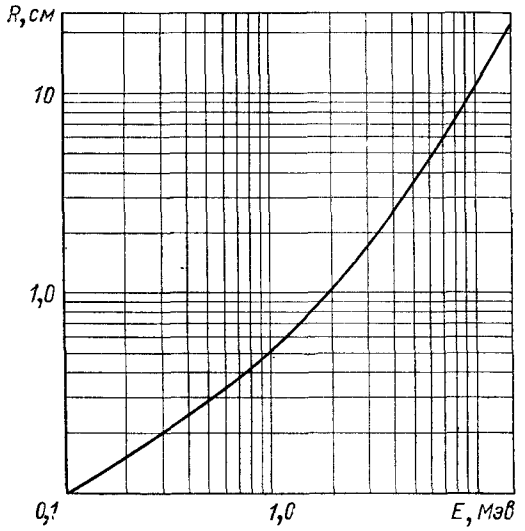


Рис. 44.8 Пробег α-частиц $\overline{R}$ в воздухе (15 °С, 760 *мм рт. ст.*) как функция энергии α-частиц [1].

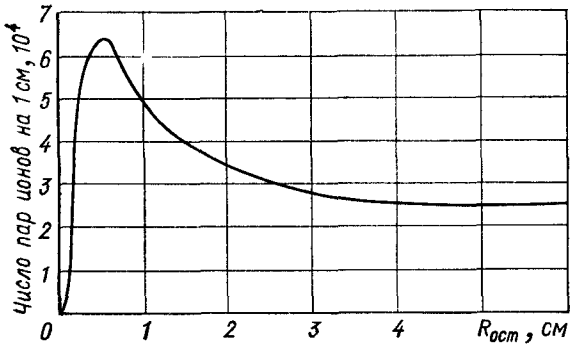


Рис. 44.9. Удельная ионизация воздуха (15 °С, 760 *мм рт. ст.*) α-частицами в зависимости от остаточного пробега $R_{\text{ост}}$, т. е. расстояния от конца пробега данной частицы [4].

Таблица 44.3

Энергия E, расходуемая α-частицами на образование пары ионов в различных газах [1]

Газ	E, *эв*	Газ	E, *эв*
Xe	21,3	O_2	32,3
Kr	22,3	CO_2	33,8
Ar	24,3	CO	33,9
C_2N_4	26,9	Воздух	34,7
Ne	27,1	H_2	35,0
CH_4	29,3	N_2	36,2
He	30,2		

Прохождение осколков деления через вещество

Заряд осколка деления при прохождении через вещество непрерывно уменьшается. Эффективный заряд осколка определяется приближенным соотношением [1]

$$z_{\text{эф}} \simeq z^{1/3}\hbar v/e^2,$$

где Z — заряд ядра осколка; e — заряд электрона, ед. СГСЭ.

Между пробегами осколков деления и α-частиц, имеющих одну и ту же скорость, существует приближенное соотношение [1] (рис. 44.10 и 44.11),

$$\frac{R_F}{R_\alpha} \simeq 7\,\frac{A_F}{z_F^{3/2}}\left(\frac{e^2}{\hbar v}\right)^2.$$

Таблица 44.4

Усредненные отдельно по тяжелой и легкой группам свойства осколков деления ^{235}U [4]

Параметр	Группа	
	легкая	тяжелая
Массовое число	95	139
Атомный номер	38	54
Начальный заряд	+20	+22
Начальная энергия, *Мэв*	97	65
Пробег в воздухе R, *мм*	27	21

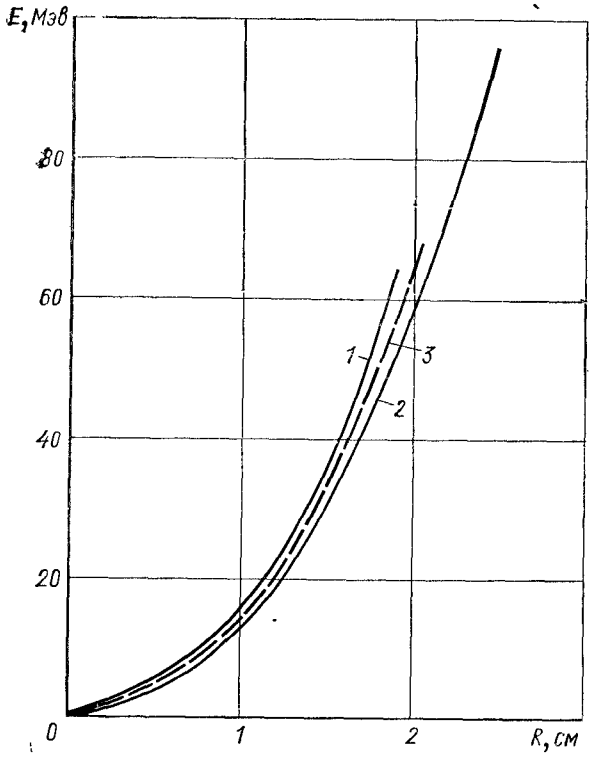


Рис. 44.10. Зависимость пробега осколка деления в воздухе R от оставшейся у него энергии E [5]: *1* — тяжелый осколок; *2* — легкий осколок; *3* — усредненная кривая.

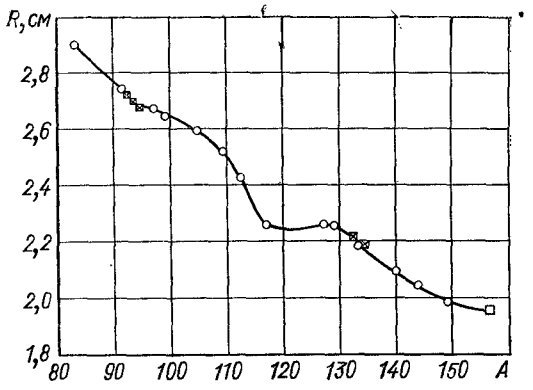


Рис. 44.11. Зависимость экстраполированного пробега R осколков деления ^{239}Pu в воздухе (15° С, 760 *мм рт. ст.*) от их массового числа A [4]

44.4. ПРОХОЖДЕНИЕ БЫСТРЫХ ЭЛЕКТРОНОВ ЧЕРЕЗ ВЕЩЕСТВО

По мере торможения в веществе моноэнергетический параллельный пучок электронов трансформируется в диффузный поток со сложным пространственно-энергетическим распределением (рис. 44.12—44.16). Для элект-

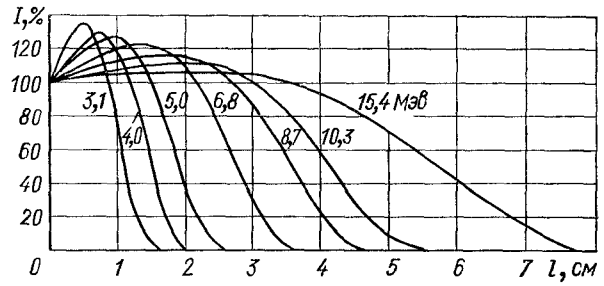


Рис. 44.12. Распределение энерговыделения по глубине при облучении воды электронами различных энергий [6]. Все кривые нормированы к 100% по начальному участку

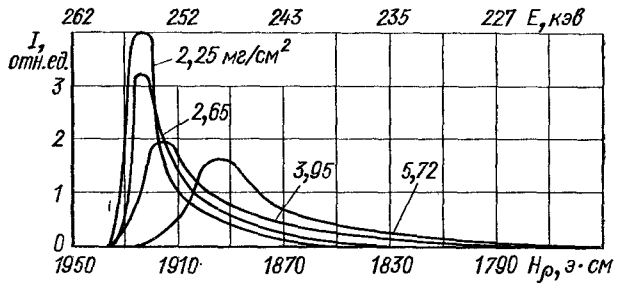


Рис. 44.13. Энергетическое распределение в пучке электронов после прохождения слюды различной толщины Первоначальная энергия электронов 263 *кэв* ($H\rho$ = 1938) [1].

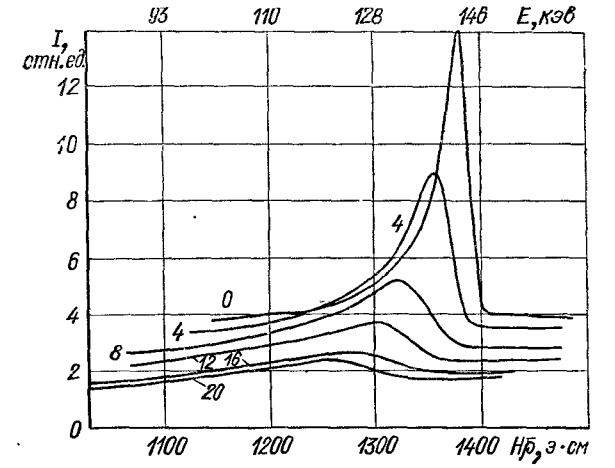


Рис. 44.14. Энергетическое распределение в пучке электронов после прохождения ими стопки медных фольг [6]. Кривые соответствуют прохождению пучка через 0; 4; 8; 12; 16; 20 медных фольг по 0,62 *мг/см²* каждая.

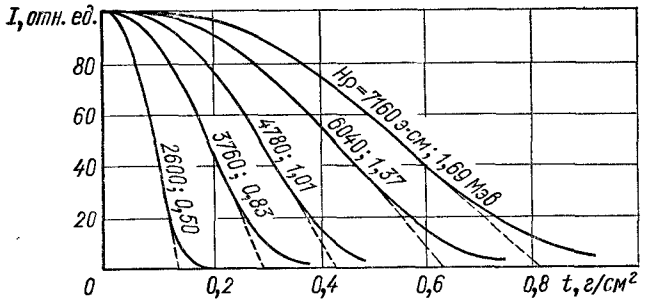


Рис. 44.15. Поглощение параллельного моноэнергетического пучка электронов различной энергии в алюминии [6].

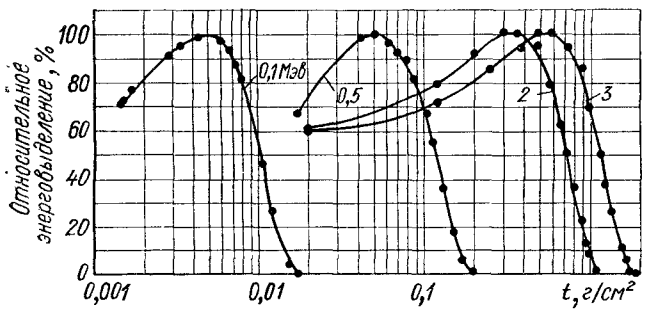


Рис. 44 16. Распределение энерговыделения по глубине t алюминия для электронов различной энергии [6].

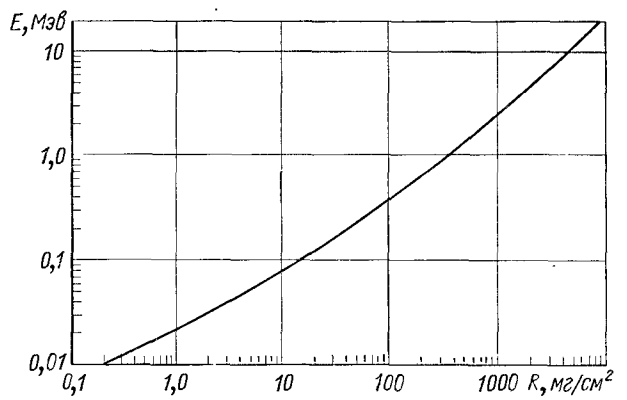


Рис. 44.17. Связь экстраполированного пробега R и энергии электронов в алюминии [4].

роиов поэтому имеют смысл только понятия экстраполированного пробега и пробега вдоль трека (рис. 44.17 и 44.18). В диапазоне от 50 *кэв* до 3 *Мэв* зависимость экстраполированного пробега электронов в алюминии от энергии хорошо описывается формулой Фламмерсфильда [7]:

$$E = 1{,}92\,(R^2 + 0{,}22R)^{1/2},$$

где E — энергия электронов, *Мэв*; R — пробег в алюминии, *см*.

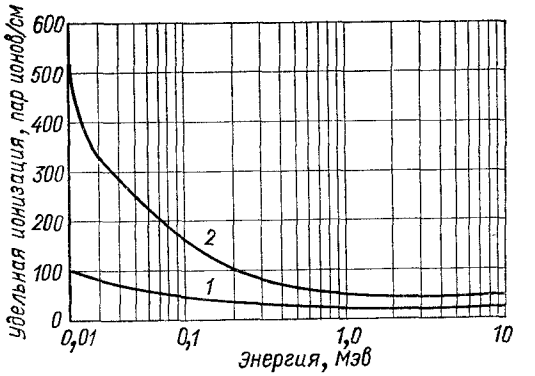


Рис. 44.18. Первичная (*1*) и полная (*2*) ионизация воздуха электроиами различной энергии [4].

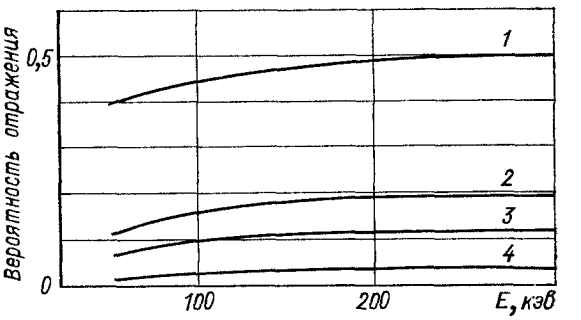


Рис. 44.19. Зависимость вероятности отражения электрона, иормально падающего на поверхиость различных материалов, от энергии электрона E [7]: *1* — вольфрам; *2* — сталь; *3* — алюминий; *4* — графит.

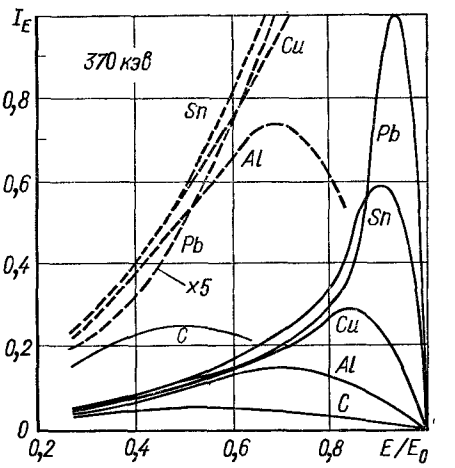


Рис. 44.20. Энергетический спектр электронов, отраженных от различных материалов [6]. E_0 = 370 *кэв* — энергия падающих электронов.

Значительная часть электронов отражается от мишени (рис. 44.19 и 44.20).

Если источник электронов имеет спектр, подчиняющийся закону простого β-распада, с граничной энергией $E_{макс}$, то число электронов, прошедших через слой поглотителя, убывает с увеличением толщины поглотителя приблизительно экспоненциально вплоть до коэффициента ослабления ~20 (рис. 44.21).

Толщина поглотителя, необходимая для уменьшения числа электронов вдвое (слой «половинного ослабления») приближенно равняется [7]:

$$d \simeq 0{,}095 \frac{Z}{A} E_{макс}^{3/2},$$

где d — толщина слоя половинного ослабления, $г/см^2$; Z и A — заряд и массовое число ядра-мишени; $E_{макс}$ — граничная энергия, *Мэв*. Формула применима для всех элементов от водорода до меди.

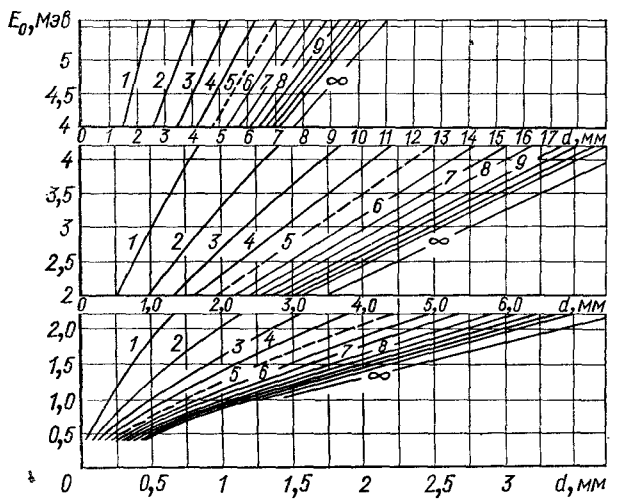


Рис. 44.21. Абсорбционные кривые для определения максимальной энергии β-спектра. E_0 — энергия; d — толщина алюминия, необходимая для уменьшения интенсивности в 2^n раз. Значение n проставлено в разрывах кривых.

Если пучок электронов проходит через достаточно тонкую фольгу, так что потерями энергии можно пренебречь, то средний квадрат угла рассеяния электронов в лабораторной системе координат после прохождения фольги равен [1]:

$$\overline{\theta^2} = 0{,}157 \frac{Z(Z+1)}{A} \frac{d}{(pv)^2} \ln\left[4\pi Z^{4/3} N d \left(\frac{\hbar}{mv}\right)^2\right],$$

где d — толщина фольги, $г/см^2$; p — импульс; m — масса и v — скорость электрона; $[pv] = [Мэв]$; N — число атомов в 1 $см^3$ вещества; A и Z — массовое число и заряд ядра вещества фольги.

Данные табл. 44.5 позволяют оценить максимальную толщину водоподобной мишени при неравномерности облучения ± 20% среднего значения.

Таблица 44.5

Максимально допустимая толщина водоподобной мишени при энергетической дозе облучения на глубине не менее 60% максимальной [8]

Энергия, *Мэв*	Толщина мишени, *см*, при облучении		Энергия, *Мэв*	Толщина мишени, *см*, при облучении	
	с одной стороны	с двух сторон		с одной стороны	с двух сторон
0,5	0,15	0,35	5	1,8	4,4
1	0,3	0,7	10	3,7	8,7
2	0,7	1,7	15	5,5	13,0
3	1,1	2,6			

Таблица 44.6

Характеристики торможения электронов в воде и биологической ткани [9]

R — истинный пробег (вдоль трека); $-dE/dx$ — дифференциальные потери энергии; dI/dx — удельная первичная ионизация; $\bar{x}$ — среднее расстояние между первичными ионизациями.

Энергия электронов, *кэв*	R, *мкм*	$-dE/dx$, *кэв/мкм*	$\frac{dI/dx}{\text{пар ионов}/\text{мкм}}$	$\bar{x}$, 10^{-2} *см*
1	0,053	12,3	233	4,3
1,5	0,101	9,4	163	6,1
2	0,160	7,7	127	7,9
3	0,312	5,7	88	11,3
4	0,509	4,6	68	14,7
6	1,025	3,36	47	21,2
8	1,697	2,68	36,6	27,3
10	2,52	2,30	30,1	33,2
15	5,11	1,67	21,4	47
20	8,47	1,34	16,7	60
30	17,33	0,98	11,8	85
40	28,83	0,78	9,3	108
60	58,67	0,538	6,7	149
80	96,48	0,482	5,4	185
100	141	0,417	4,6	216
150	278	0,328	3,55	282
200	444	0,284	3,12	321
300	832	0,238	2,51	398
400	1275	0,217	2,23	448
500	1740	0,205	2,11	473

Мощность тормозного γ-излучения при прохождении быстрых электронов через тонкую мишень может быть рассчитана по формуле [9]:

$$W_{торм} = 19(E + 511) Z^2 \frac{\rho d}{A} i,$$

где $W_{торм}$ — мощность тормозного излучения *вт*; E — энергия электронов, *кэв*; Z, A — заряд ядра и массовое число вещества; ρ — плотность мишени, $г/см^3$; d — толщина мишени, *см*; i — ток электронов, *ма*. Формула справедлива для $E \ll 1$ *Мэв*.

Для толстой мишени, в которой электроны полностью тормозятся, интенсивность неотфильтрованного тормозного излучения приблизительно равна [9]:

$$W_{торм} \simeq 3 \cdot 10^{-6} E^{1,75} Zi.$$

Спектральное распределение тормозного γ-излучения (исключая характеристическое рентгеновское излучение) почти не зависит от атомного номера мишени, а относительное спектральное распределение $h\nu/E$ почти не зависит от энергии моноэнергетических электронов или максимальной энергии электронов β-спектра (рис. 44.23). Угловое распределение тормозного излучения ориентировано преимущественно вперед по пути замедляющихся электронов, его диаграмма направленности тем уже, чем больше энергия электронного пучка (рис. 44.22).

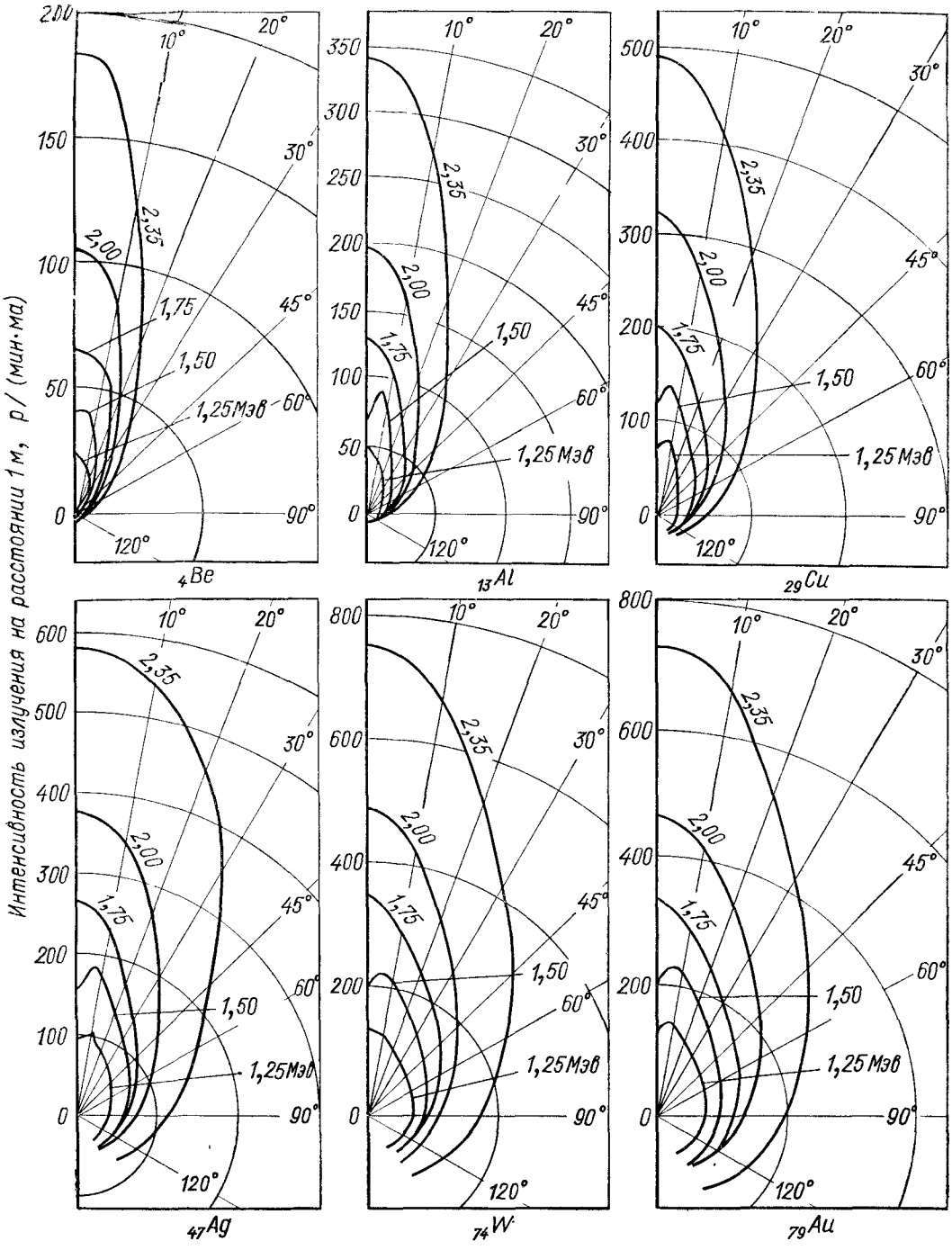


Рис. 44.22. Интенсивность и угловое распределение тормозного излучения, испускаемого моноэнергетическими электронами в мишенях, толщина которых немного больше максимальной длины свободного пробега электронов [7].

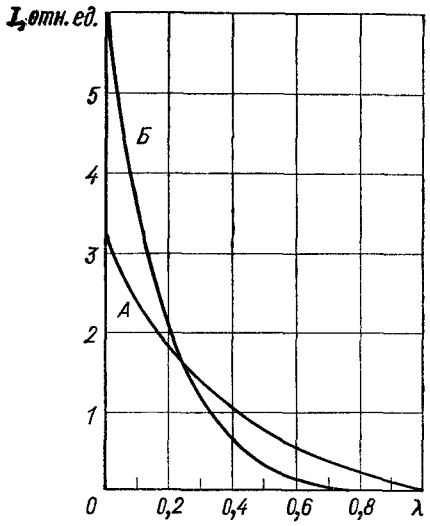


Рис. 44.23. Относительное распределение интенсивности тормозного излучения, образующегося при полной остановке электронов. *А* — моноэнергетические электроны энергии E_0; *Б* — спектр β-излучения с максимальной энергией E_0. Параметр $\lambda = h\nu/E_0$. Площадь под обеими кривыми нормирована к единице [7].

44.5. ПРОХОЖДЕНИЕ γ-ИЗЛУЧЕНИЯ ЧЕРЕЗ ВЕЩЕСТВО

При прохождении через вещество γ-излучение испытывает три основных типа взаимодействия: фотоэффект, комптоновское рассеяние и эффект образования электронно-позитронных пар (рис. 44.24, 44.25). При фотоэффекте γ-квант исчезает, передав всю свою энергию

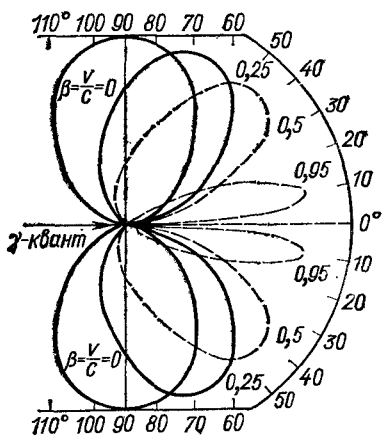
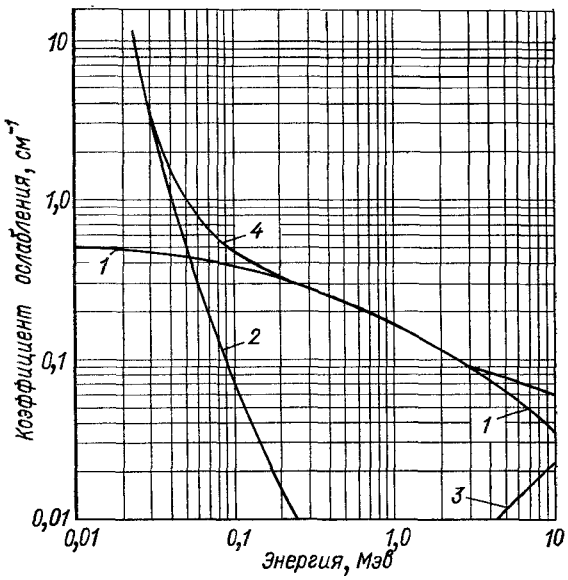


Рис. 44.24. Угловое распределение фотоэлектронов для малой (сплошная линия) и большой (прерывистая линия) энергий фотонов. Значение β около кривых соответствует энергии фотоэлектронов [14].

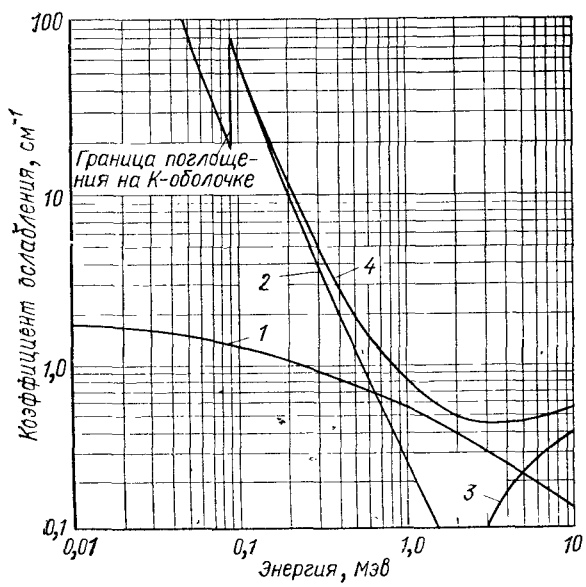
связанному электрону. Эффективное сечение фотоэффекта для γ-квантов малой энергии характеризуется скачкообразной зависимостью от длины волны. Эмпирическая формула Викториина, описывающая величину фотоэффекта для длин волн, меньших λ_K (граничная длина волны, за которой начинается поглощение на *K*-оболочке), имеет вид [14]:

$$\mu_\Phi \simeq \rho C\lambda^3 - \rho D\lambda^4.$$

Здесь μ_Φ — линейный коэффициент ослабления пучка γ-квантов за счет фотоэффекта, $см^{-1}$; ρ — плотность,



а



б

Рис. 44.25. Коэффициенты ослабления γ-квантов в алюминии (*а*) и свинце (*б*) [7] за счет различных процессов: *1* — комптон-эффект; *2* — фотоэффект; *3* — образование пар; *4* — полный коэффициент ослабления.

$г/см^3$; λ — длина волны, Å; C и D — эмпирические константы, значения которых для ряда элементов приведены в табл. 44.7.

Таблица 44.7

Константы формулы Викториина [4]

Элемент	Z	C	D	λ_K, Å
C	6	1,211	0,0183	43,5
N	7	2,034	0,0393	31,1
O	8	3,161	0,07739	23,5
Al	13	14,69	0,8583	7,935
Fe	26	129	28,41	1,739
Cu	29	178,9	49,09	1,377
Br	35	313,7	127	0,918
Ag	47	808,8	624,8	0,4844
Pb	82	4537	13 998	0,1404
Вода	—	2,808	0,06873	(23,5)
Воздух	—	2,762	0,1017	(23,5)

Угловое распределение фотоэлектронов, вырванных из атома при фотоэлектрическом рассеянии, показано на рис. 44.25.

Длина волны γ-кванта при комптоновском рассеянии на свободном электроне увеличивается на $\Delta\lambda$ [9]:

$$\Delta\lambda = \frac{h}{mc}(1-\cos\varphi) = 0{,}02427\,(1-\cos\varphi),\ \text{Å}$$

где φ — угол рассеяния γ-кванта.

Таблица 44.8

Сечения комптоновского рассеяния $\sigma_к$ γ-квантов, рассчитанные на один электрон [7]

E, *Мэв*	$\sigma_к$, *барн*	E, *Мэв*	$\sigma_к$, *барн*	E, *Мэв*	$\sigma_к$, *барн*
0,010	0,6370	0,3	0,3535	6	0,07320
0,015	0,6270	0,4	0,3167	8	0,05990
0,020	0,6160	0,5	0,2892	10	0,05100
0,030	0,5960	0,6	0,2675	15	0,03773
0,040	0,5780	0,8	0,2350	20	0,03024
0,050	0,5610	1,0	0,2112	30	0,02199
0,060	0,5460	1,5	0,1716	40	0,01746
0,080	0,5170	2,0	0,1464	50	0,01456
0,100	0,4929	3,0	0,1151	60	0,01254
0,150	0,4436	4,0	0,0960	80	0,00988
0,200	0,4066	5,0	0,0820	100	0,00820

Максимальное значение $\Delta\lambda$ (при рассеянии назад) равно удвоенной комптоновской длине волны 0,0484 Å, что соответствует 255,5 *кэв*. Неупруго рассеянные γ-кванты не могут иметь большей энергии при обратном рассеянии. На рис. 44.26 представлены дифференциальные, а в табл. 44.8 — полные сечения комптоновского рассеяния в зависимости от энергии γ-квантов. В табл. 44.9 даны энергии γ-квантов, испытавших комптоновское рассеяние.

Эффективное сечение процесса образования пар $\sigma_{пар}$ равно нулю при $h\nu < 2m_0c^2$ [1, 14].

Для энергий в несколько мегаэлектронвольт $\sigma_{пар} \sim Z^2(h\nu - 2m_0c^2)$. Для больших энергий $\sigma_{пар} \sim Z^2 \ln(h\nu)$.

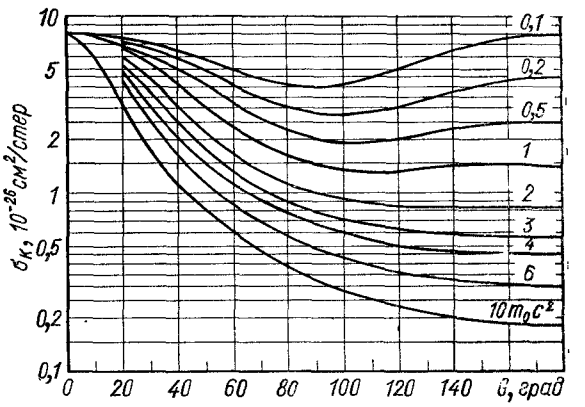


Рис. 44.26. Зависимость комптоновского дифференциального сечения рассеяния на один электрон $\sigma_K(\theta)$ от энергии $E/E_0 = h\nu/mc^2$ (цифры у кривых) и угла рассеяния θ γ-квантов [7].

Таблица 44.9

Энергия γ-квантов, *Мэв*, испытавших комптоновское рассеяние [7]

Угол рассеяния, *град*	Энергия падающих γ-квантов, *Мэв*			
	0,5	1,25	3,0	6,0
10	0,4925	1,204	2,749	5,075
20	0,4715	1,086	2,203	3,481
30	0,4408	0,936	1,663	2,300
40	0,4051	0,789	1,249	1,576
60	0,3332	0,556	0,749	0,857
90	0,2501	0,357	0,428	0,461
120	0,1998	0,263	0,300	0,316
150	0,1743	0,220	0,246	0,256
180	0,1665	0,208	0,211	0,239

Прохождение узкого монохроматического пучка γ-квантов через вещество

Всякое взаимодействие γ-кванта с веществом выводит его из узкого пучка, поэтому ослабление такого пучка происходит экспоненциально по мере увеличения протяженности среды l:

$$J = J_0 \exp(-\mu l).$$

Линейный коэффициент ослабления μ определяется всеми парциальными коэффициентами взаимодействия:

$$1/\mu = N(\sigma_ф + \sigma_к + \sigma_{пар}).$$

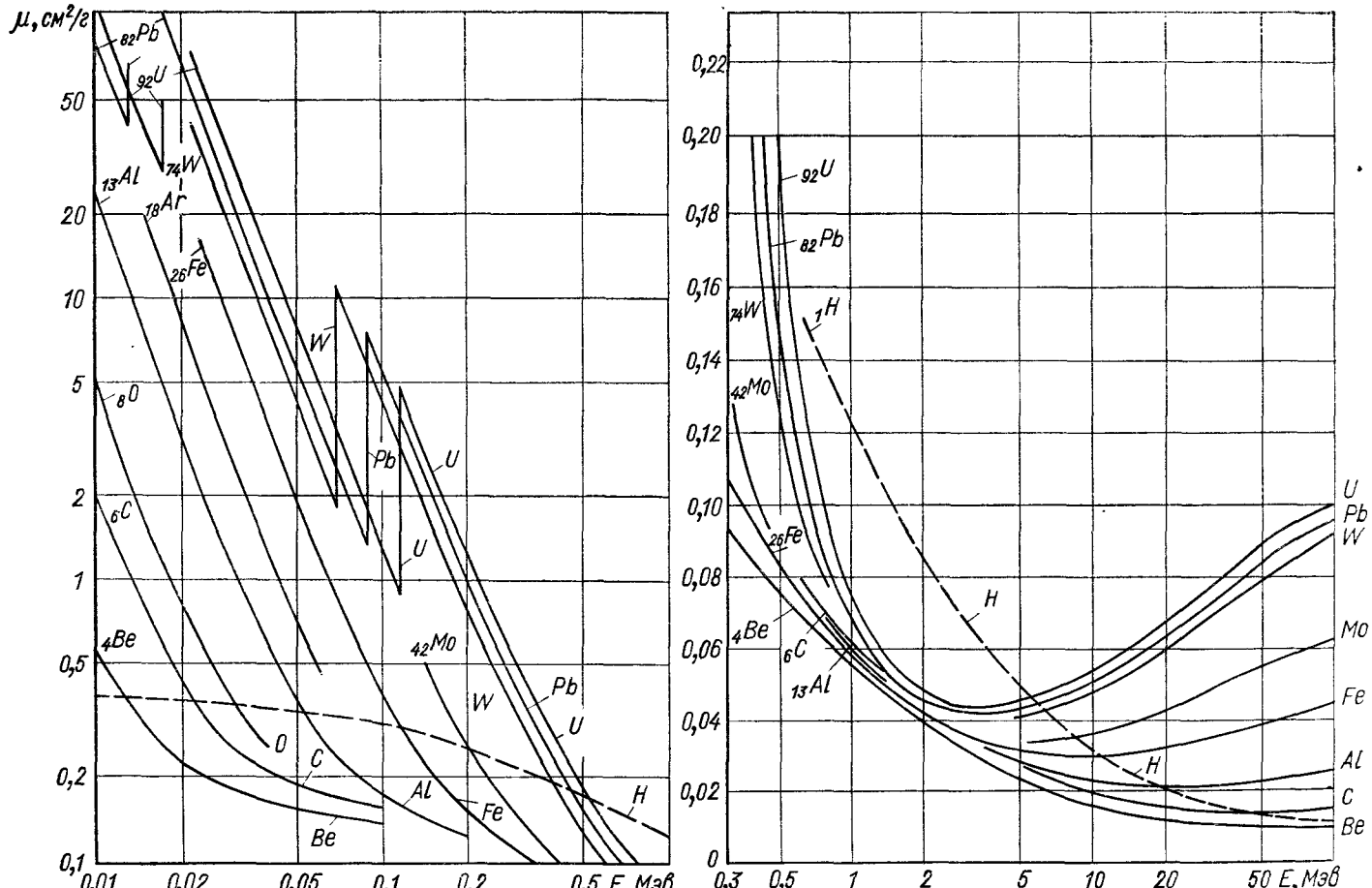
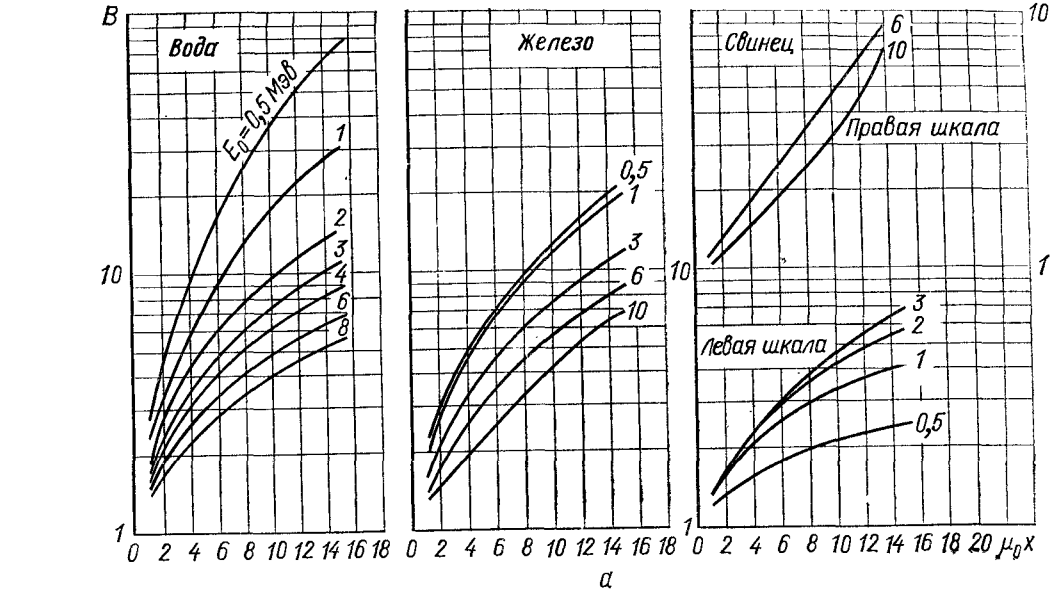


Рис. 44.27. Массовый коэффициент ослабления μ узкого пучка γ-квантов в различных веществах как функция энергии γ-квантов E [7].



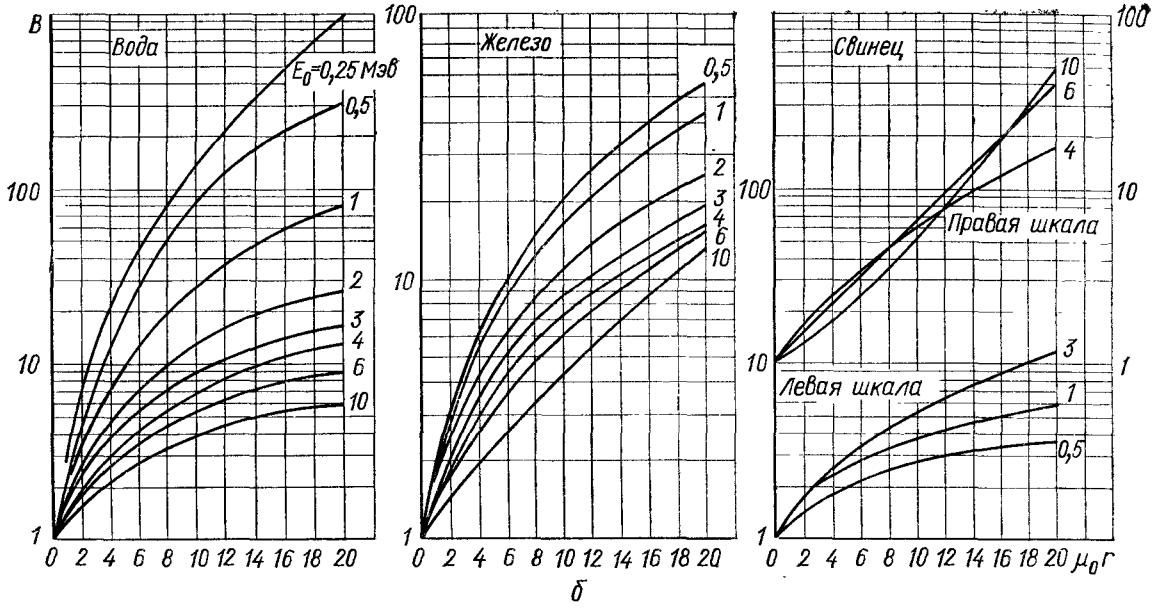


Рис. 44.28. Дозовый фактор накопления B как функция толщины защиты для плоского мононаправленного (*а*) и точечного изотропного (*б*) источников [7].

Здесь N — число ядер среды в 1 $см^3$; $\sigma_ф$, $\sigma_к$, $\sigma_{пар}$ — сечения фото- и комптон-эффекта и сечение образования пар в расчете на один атом. В случае весьма узкого пучка γ-квантов значительную роль может играть также их упругое рассеяние без потери энергии, происходящее в основном на малые углы, интегральный вклад которого мал по сравнению с комптоновским рассеянием.

На рис. 44.27 приведены массовые коэффициенты ослабления для узкого пучка γ-квантов в зависимости от атомного номера поглотителя и энергии γ-квантов.

Ослабление широких пучков γ-квантов

Широкий пучок γ-квантов ослабляется в меньшей степени, чем узкий, из-за обратного попадания в него рассеянных квантов.

Широкий, первоначально параллельный пучок ослабляется иначе, чем сферически расходящийся из точечного источника. Обычно закон ослабления широкого пучка записывают в виде

$$J = J_0 \exp(-\mu l)\, B(\mu l,\ h\nu,\ Z),$$

где μ — линейный коэффициент ослабления узкого пучка, B — фактор накопления. Для узкого пучка $B \equiv 1$. Поскольку энергия, донесенная γ-квантами до данной поверхности не вполне пропорциональна их биологическому действию, то в силу деформации энергетического спектра различают энергетический и дозовый факторы накопления.

На рис. 44.28 представлены зависимости дозового фактора накопления от толщины и материала защиты энергии первичного источника γ-квантов.

Защита от γ-излучения

Таблица 44.10

Толщина защиты из свинца, *мм*, в зависимости от кратности ослабления и энергии γ-излучения (широкий пучок) [11]

Кратность ослабления	Энергия γ-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	10
2	1	2	3	4	5	7	8	10	11,5	13	17	20	21	20	16	13,5
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
10^3	7	15	24	33	44	57	69,5	81	92	102	141	165	160	178	165	133
$5 \cdot 10^3$	9	19	30	42	55	70	85	99	112	124	170	198	219	217	203	166
10^4	10,5	21	33	45,5	59	75	91	106	120	133	183	213	236	234	220	180
$5 \cdot 10^4$	11,5	23,5	37	52	69	87	105	123	140	156	214	247	263	272	258	215
10^5	11,5	24	38	54	72	92	111	130	148	165	227	262	289	289	275	229

Таблица 44.11

Толщина защиты из железа, *см*, в зависимости от кратности ослабления и энергии γ-излучения (широкий пучок) [11]

Кратность ослабления	Энергия γ-излучения, *Мэв*															
	0,1	0,2	0,3	0,4	0,5	0,6	0,7	0,8	0,9	1,0	1,5	2,0	3	4	5	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	11,4
30	2,4	4,5	6,2	7,5	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
1000	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
$5 \cdot 10^3$	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
10^4	6,8	11,5	14,7	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
$5 \cdot 10^4$	8,6	13,8	17,0	19,6	21,8	23,6	25,2	26,9	28,4	29,9	35,9	40,8	47,2	50,4	55,0	53,0
10^5	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
10^6	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	69,0	67,0
10^7	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	79,4	78,0

Таблица 44.12

Толщина защиты из бетона, *см*, в зависимости от кратности ослабления и энергии γ-излучения (широкий пучок) [11]

Для бетона $\rho=2{,}3$ *г/см*^{3}.

Кратность ослабления	Энергия γ-излучения, *Мэв*															
	0,1	0,2	0,3	0,4	0,5	0,6	0,7	0,8	0,9	1,0	1,5	2,0	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	28,9	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
1000	15,5	28,2	39,2	48,1	55,2	59,2	62,5	65,3	67,8	70,4	81,7	92,7	110,9	120,9	137,9	155,0
$5\cdot10^3$	18,8	33,1	45,6	56,4	65,7	70,0	74,0	77,0	80,2	82,8	97,4	110,9	132,7	146,8	166,7	186,7
10^4	18,8	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
$5\cdot10^4$	23,3	42,3	56,4	68,6	78,1	83,4	88,7	93,4	97,9	102,1	120,4	136,2	164,9	181,6	206,6	233,6
10^5	30,5	50,5	64.6	75,1	82,8	88,3	93,5	98,1	102,5	106,8	126,6	144,4	173,8	191,4	218,4	248,9
10^6	49,3	66,4	79,8	89,8	97,4	103,7	109,2	114,1	119,5	124,4	149,8	171,4	205,4	225,4	260,6	295,8
10^7	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 44.13

Толщина защиты из воды, *см*, в зависимости от кратности ослабления и энергии γ-излучения (широкий пучок) [11]

Кратность ослабления	Энергия γ-излучения, *Мэв*															
	0,1	0,2	0,3	0,4	0,5	0,6	0,7	0,8	0,9	1,0	1,5	2,0	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
1000	72	92	104	113	118	124	129	134	138	143	167	189	226	257	306	368
$5\cdot10^3$	81	105	120	130	138	147	154	160	165	170	198	225	271	309	368	446
10^4	91	114	128	139	147	155	162	168	175	181	912	241	290	331	396	480
$5\cdot10^4$	103	128	144	156	167	175	183	190	196	205	241	276	334	383	460	554
10^5	110	135	152	164	175	184	192	201	209	216	255	292	353	404	487	587
10^6	128	156	176	192	205	215	224	233	243	253	299	342	415	479	571	695
10^7	150	178	200	217	232	243	255	265	277	288	344	393	478	554	657	807

44.6. ОТНОСИТЕЛЬНАЯ БИОЛОГИЧЕСКАЯ ЭФФЕКТИВНОСТЬ И ДОПУСТИМЫЕ УРОВНИ РАЗЛИЧНЫХ ВИДОВ ИЗЛУЧЕНИЯ

Единица поглощенной дозы излучения — рад — соответствует поглощению в 1 *г* облучаемого вещества 100 *эрг* энергии излучения.

Единицей экспозиционной дозы рентгеновского и γ-излучения служит рентген (*р*) — доза рентгеновского или γ-излучения в воздухе, производящая в 0,001293 *г* воздуха по 1 ед. СГСЭ ионов каждого знака. Для тех видов и энергий излучения, для которых на образование пары ионов в воздухе требуется 34 *эв*, 1 *р* соответствует поглощению 88 *эрг* в 1 *г* воздуха, т. е. 0,88 *рад* (γ-излучение и электроны при $E \ll 3$ *Мэв*) (рис. 44.29). Для таких видов излучения, как осколки деления, приведенное выше соотношение между рентгеном и радом неприменимо.

Относительная биологическая эффективность различных видов излучения неодинакова. Коэффициент относительной биологической эффективности (ОБЭ) различных видов излучения характеризует степень биологического воздействия данного вида излучения по сравнению с γ-излучением при равенстве поглощенных доз.

За единицу ОБЭ принято биологическое действие рентгеновского излучения с энергией 200 *кэв*, создающего 100 пар ионов на 1 *мкм* пути в воде. ОБЭ различных биологических реакций может по-разному зависеть от линейной передачи энергии (ЛПЭ).

В связи с тем, что действие излучения на человеческий организм в целом является объектом количественного контроля, введено регламентированное значение ОБЭ для человеческого организма в целом [10, 15] — коэффициент качества излучения *КК*.

Степень облучения организма выражают в эквивалентных дозах $D_э$, т. е. энергетическая доза облучения умножается на его коэффициент качества. Единицей измерения $D_э$ является 1 *бэр* — биологический эквивалент рада.

Естественное облучение человека за счет космической радиации и природных радиоактивных изотопов составляет 0,1 *рад/год* [12]. Доза профессионального облучения не должна превышать 0,1 *бэр* в неделю

(5 *бэр* в год) для персонала, непосредственно занятого с источниками излучений.

Для персонала, работающего в смежных помещениях и отдельных лиц из населения соответствующая доза составляет 0,5 *бэр/год* и для всего населения 5 *бэр* за 30 лет. Более подробно допустимые уровни внешнего и внутреннего облучения приведены в специальной литературе [10, 15].

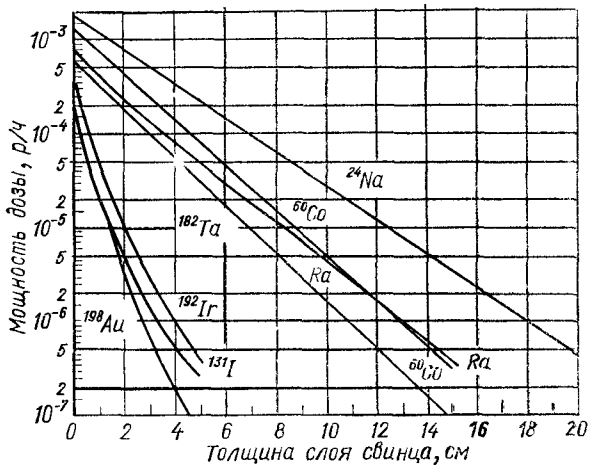


Рис. 44.29. Мощность дозы на расстоянии 1 *м* от различных источников γ-излучения интенсивностью 1 *мкюри* в зависимости от толщины свинцовой защиты [7].

Таблица 44.14

Коэффициент качества *КК* для излучений с различными значениями ЛПЭ [15]

ЛПЭ в воде, *кэв/мкм*	*КК*	ЛПЭ в воде, *кэв/мкм*	*КК*
3,5	1	23—53	5—10
3,5—7,0	1—2	53—175	10—20
7,0—23	2—5		

Таблица 44.15

Коэффициенты качества различных видов ионизирующих излучений при хроническом облучении всего тела [15]

Вид излучения	*КК*	Вид излучения	*КК*
γ-Излучение	1	Нейтроны с энергией: 5 *кэв*	2,5
Рентгеновское излучение	1	20 *кэв*	5
Электроны и позитроны	1	500 *кэв*	8
α-Излучение ($E \leqslant$ *Мэв*)	10	500 *кэв*	10
Протоны ($E \leqslant$ *Мэв*)	10	1 *Мэв*	10,5
Тяжелые ядра отдачи	20	5 *Мэв*	7
Тепловые нейтроны	3	10 *Мэв*	6,5

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Экспериментальная** ядерная физика. Под ред. Э. Сегре. Пер. с англ. М., Изд-во иностр. лит., 1955.
2. **Гринберг А. П.** Методы ускорения заряженных частиц. М.—Л., Гостехиздат, 1950.
3. **Barnett C. F., Gauster W. B., Ray J. A.** Atomic and Molecular Collision Cross Sections. Oak Ridge Nat. Lab., ORNL-3113.
4. **Прайс В.** Регистрация ядерного излучения. Пер. с англ. М., Изд-во иностр. лит., 1960.
5. **Росси Б., Штауб Г.** Ионизационные камеры и счетчики. Пер. с англ. М., Изд-во иностр. лит., 1951.
6. **Handbuch** der Physic, b 34. Springer-Verlag. Berlin, 1958.
7. **Прайс В., Хортон К., Спинни К.** Защита от ядерных излучений. Пер. с англ. М., Изд-во иностр. лит., 1959.
8. **Брегер А. Х.** Источники ядерных излучений и их применение в радиационно-химических процессах. М., ВИНИТИ, 1960.
9. **Егер Р.** Дозиметрия и защита от излучений Пер. с нем. М., Госатомиздат, 1961.
10. **Нормы** радиационной безопасности НРБ—69. Изд. 2-е. М., Атомиздат, 1972.
11. **Аглинцев К. К., Кодюков В. М.** Прикладная дозиметрия. М., Госатомиздат, 1962.
12. **Гусев Н. Г., Ковалев Е. Е., Осанов Д. П.** Защита от ионизирующих излучений. М., Атомиздат, 1969.
13. **Защита** от ионизирующих излучений. Т. 2. М., Атомиздат, 1973.
14. **Горшков Г. В.** Проникающие излучения радиоактивных источников. Л., «Наука», 1967.
15. **Моисеев А. А., Иванов В. И.** Справочник по дозиметрии и радиационной гигиене. М., Атомиздат, 1974.

ГЛАВА 45

КОСМИЧЕСКОЕ ИЗЛУЧЕНИЕ

45.1. ВВЕДЕНИЕ

К первичному космическому излучению принято относить заряженные и нейтральные частицы, входящие в верхние слои атмосферы Земли. Вступая во взаимодействие с ядрами атомов атмосферы, первичное космическое излучение может породить большое разнообразие новых элементарных частиц. Ядерно-активные частицы вызывают в атмосфере Земли смешанные электронно-ядерные ливни, состоящие из мезонов, нуклонов и

электронно-фотонной компоненты. Ливни электромагнитного происхождения (электронно-фотонные ливни) образуют мягкую (быстро поглощаемую веществом) компоненту космического излучения. Электронно-ядерные ливни вызываемые космическими частицами очень больших энергий, носят название широких атмосферных ливней (на уровне моря их поперечные размеры могут достигать нескольких километров). Полное количество энергии, заключенное в космическом излучении в галактическом пространстве, по порядку величины сравнимо с другими формами энергии во Вселенной.

Плотность различных форм энергии в Галактике [1]

Форма энергии	Плотность энергии, *эв/см³*
Космическое излучение	1
Свет звезд	1
Магнитная энергия	1
Турбулентное движение галактического газа	10—100
Вращение Галактики	1000
Энергия массы покоя в Галактике	10^9

Некоторые характеристики космического излучения [2]

Общее число частиц и γ-квантов, приходящих в атмосферу Земли	$8 \cdot 10^{17}$ *сек*$^{-1}$
Общая энергия космического излучения, входящего в верхние слои атмосферы	$9 \cdot 10^{18}$ *Гэв/сек* = $= 1{,}4 \cdot 10^9$ *вт*
Сила тока, создаваемая частицами, если бы они все несли положительный заряд	0,13 *а*
Количество пар ионов, образуемых космическим излучением на уровне моря (в среднем)	1,63 *пара ионов/(см²·сек)*
Общая энергия космического излучения, достигающего поверхности Земли	40 *вт*

45.2. ПЕРВИЧНОЕ КОСМИЧЕСКОЕ ИЗЛУЧЕНИЕ

Состав

Таблица 45.1

Распространенность элементов в космическом излучении [1]

Ядра*	Z	Первичное космическое излучение: Число ядер на 10^6 протонов	Первичное космическое излучение: Содержание (к числу первичных частиц), %	Распространенность во Вселенной на 10^6 атомов водорода
Протоны	1	100 000	93,0	100 000
α-Частицы	2	6 800	6,3	7 700
L-группа ядер	3—5	150	0,14	$6 \cdot 10^{-4}$
M-группа ядер	6—9	440	0,4	150
H-группа ядер	⩾10	150	0,14	30
Железо	26	15	0,014	1,5
Другие ядра	⩾30	<1	0,001	10^{-3}

* Содержание электронов и фотонов в первичном космическом излучении не превышает 1 и 0.1% соответственно [1].

Таблица 45.2

Относительная распространенность элементов внутри групп ядер *L*, *M* и *H* (+ подгруппа *VH*) космического излучения [4]

L		*M*		*H*		*VH*	
Элемент	Содержание, %	Элемент	Содержание, %	Элемент	Содержание, %	Элемент	Содержание, %
Li	23	C	44	Ne	21,4	Ca	4,7
Be	10	N	21	Na	13,4	Sc	0,8
B	67	O	31	Mg	23,2	Ti	3,0
		F	4	Al	4,5	V	0,8
				Si	8,0	Cr	5,0
				P	0,9	Mn	0
				S	0	Fe	9,9
				Cl	0,7	Co	0
				Ar	2,4	Ni	1,3
				K	0		

Таблица 45.3

Ядерный состав солнечного и галактического космического излучения [1]

Ядра	Z	Солнечное космическое излучение	Галактическое космическое излучение
He	2	107±14	48
Be, B	4; 5	⩽0,02	0,8
C	6	0,59±0,07	1,8
N	7	0,19±0,04	⩽0,8
O	8	1,0	1,0
F	9	⩽0,03	0,1
Ne	10	0,13±0,02	0,30
Mg	12	0,043±0,011	0,32
Si	14	0,033±0,011	0,12
P—Sc	15—21	0,057±0,017	0,13
Ti—Ni	22—28	⩽0,02	0,28

* За единицу принято содержание атомов кислорода ($Z = 8$).

Плотность частиц.

в солнечном ветре	1—9 *см*$^{-3}$
в космическом излучении около Земли	10^{-10} *см*$^{-3}$ [3]

Таблица 45.4

Плотность потока космических частиц [3]

n — число частиц, падающих на границе земной атмосферы, на 1 *м²* в единице телесного угла в 1 *сек*

Компонента	Z	n, *м*$^{-2}$ *сек*$^{-1}$
Протоны	1	1300
α-Частицы	2	94
L-группа ядер	3—5	2,0
M-группа ядер	6—9	6,7
H-группа ядер	⩾10	2,0
Подгруппа ядер *VH*	⩾20	0,5
Фотоны с $E_\gamma > 50$ *Мэв*	0	5 [1]

Энергетический спектр

В широком интервале энергий ($2 \cdot 10^9$—10^{15} *эв/нуклон*) наблюдается плавное убывание интенсивности космического излучения с увеличением энергии частиц:

$$I_A(>E) = K_A E^{-(\gamma-1)};$$

здесь $I_A(>E)$— интенсивность потока ядер группы A, *частица/(м²·стер·сек)*, энергии которых больше, чем E, *Гэв/нуклон*; K_A — некоторый постоянный коэффициент. В области меньших энергий показатель энергетического спектра γ зависит от солнечной активности, поскольку в космическом излучении солнечного происхождения преобладают частицы малых энергий.

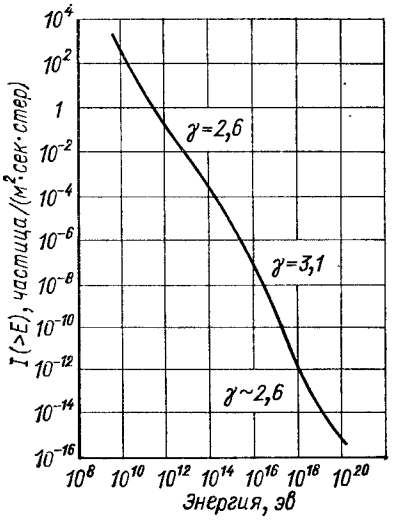


Рис. 45.1. Полная интенсивность $I(>E)$ всех групп ядер космического излучения [3].

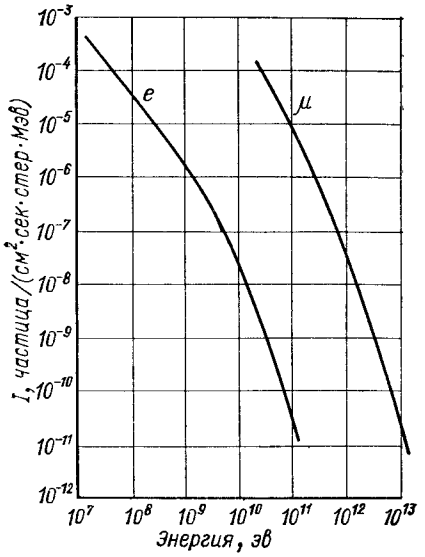


Рис. 45.2. Форма энергетического спектра электронной [3] и мюонной [13] компонент космического излучения.

45.3. ВТОРИЧНОЕ КОСМИЧЕСКОЕ ИЗЛУЧЕНИЕ

Высотный ход интенсивности космического излучения

При углублении в атмосферу Земли меняется как состав, так и интенсивность космического излучения. На больших высотах основную роль играют процессы генерации ливней. В дальнейшем, с уменьшением энергии вторичных частиц, ядерно-каскадные процессы затухают и общая интенсивность космического излучения начинает падать вследствие ионизационного торможения и поглощения медленных частиц.

Поток нейтронов на уровне моря [6]:

$$I_n = \begin{cases} (2{,}3 \pm 0{,}6) \cdot 10^{-3}\ см^{-2} \cdot сек^{-1}; & E_n < 0{,}4\ эв; \\ (4{,}2 \pm 1{,}0) \cdot 10^{-3}\ см^{-2} \cdot сек^{-1}, & E_n > 0{,}4\ эв. \end{cases}$$

Таблица 45.5

Интенсивность отдельных групп космического излучения [4]

Группа ядер	Интервал энергий, *Гэв/нуклон*	$\gamma - 1$	K_A
Протоны	4,7—16,0	1,40±0,10	4800
α-Частицы	2,5—800	1,49±0,22	360
α-Частицы	2,5—8,0	1,45±0,11	300
α-Частицы	1,3—8,0	1,5	415
α-Частицы	1,4—4,0	1,48±0,12	360
Группа *M*	2,5—8,0	1,57±0,12	25,4±4,2
Группа *M*	2,5—8,0	1,6±0,15	26,0±2,2
Группа *H*	2,5—8,0	1,60±0,15	11,9±2,0

Таблица 45.6

Соотношение числа заряженных *C*- и нейтральных *N*-частиц космического излучения в зависимости от высоты над поверхностью Земли [5]

Глубина атмосферы, *г/см²*	Энергия, *Гэв*	*N/C*
5—50	~1000	0,083±0,03
610	200—2000	0,74±0,08
670	~10	0,77±0,035
700	200—1000	0,57±0,10
710	200—2000	0,65±0,007
780	200—2000	0,56±0,11
800	~60	0,40±0,12
800	20—40	0,66±0,11
1000	~27	0,64±0,08

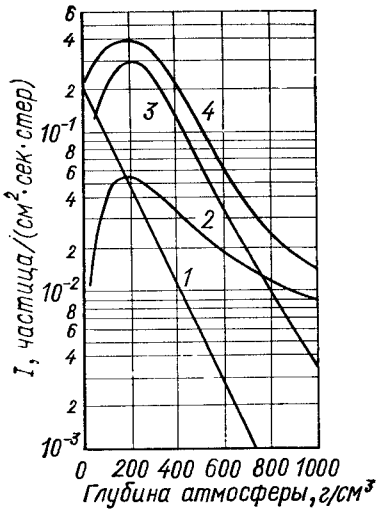


Рис. 45.3. Высотный ход интенсивности *I* различных компонент космического излучения для 50° с. ш. [10]: *1* — нуклонная; *2* — мюонная и *3* — электронная компоненты; *4* — полная интенсивность.

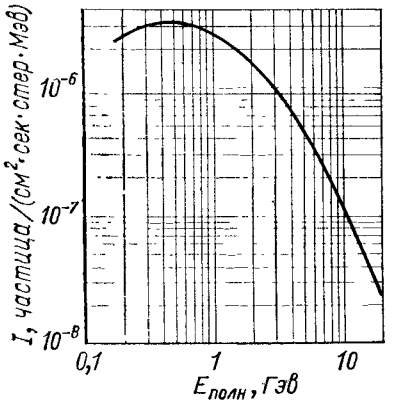


Рис. 45.4. Дифференциальный энергетический спектр μ-мезонов на уровне моря для 50° с. ш. [10].

Геомагнитные явления

Вследствие влияния магнитного поля Земли ее поверхности могут достигать лишь те частицы космического излучения, магнитная жесткость которых $\xi = A \cdot p/(Z \cdot e)$ больше некоторой величины, являющейся функцией географических координат и направления движения частицы (A — массовое число ядра; Z — его заряд; p — импульс частицы; e — заряд электрона). Широтный эффект составляет ~10% на уровне моря и резко возрастает при удалении от поверхности Земли.

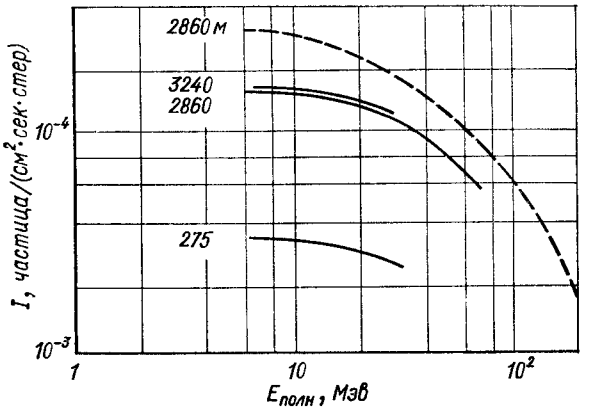


Рис. 45.5. Интегральные энергетические спектры электронов (сплошные кривые) и фотонов (штриховая кривая) в нижних слоях атмосферы [10].

Таблица 45.7

Характеристика космического излучения, входящего в атмосферу на различных широтах [2]

Характеристика излучения	Геомагнитная широта		
	3°	39°	52°
Энергия излучения, падающего на 1 $см^2$ атмосферы в 1 *сек*, *эв*	$1 \cdot 10^9$	$1{,}7 \cdot 10^9$	$3{,}2 \cdot 10^9$
Общее число ионов, образуемых в 1 *сек* в столбе атмосферы площадью 1 $см^2$	$3 \cdot 10^7$	$5{,}4 \cdot 10^7$	$7{,}4 \cdot 10^7$
Нижний предел энергии частиц, достигающих Земли, устанавливаемый магнитным полем Земли, *эв*	$1{,}5 \cdot 10^{10}$	$8 \cdot 10^9$	$2 \cdot 10^9$
Средняя энергия частиц, пробивающих атмосферу, *эв*	$3 \cdot 10^{10}$	$1{,}6 \cdot 10^{10}$	$0{,}88 \cdot 10^{10}$
Вероятное число частиц, падающих на 1 $см^2$ внешней поверхности атмосферы в минуту	1,9	6,5	21,8

Таблица 45.8

Зависимость магнитной жесткости, *Гэв*, для вертикально падающих частиц от географических координат [5]

Географическая широта, *град*	Восточная долгота, *град*								
	0	20	40	60	80	100	120	140	160
Северная									
70	0,274	0,376	0,453	0,505	0,54	0,55	0,56	0,57	0,512
60	1,12	1,28	1,42	1,54	1,70	1,82	1,87	1,90	1,76
50	3,06	3,60	3,81	3 77	3,84	3,98	4,15	4,26	4,37
40	6,7	7,20	7,60	7,80	8,2	9,4	9,6	9,0	8,5
30	11,2	11,6	12,6	13,5	14 3	14,5	14,5	13,9	13,1
20	14,4	14,9	15,5	16,1	16,5	16,8	16,4	16,0	14,8
10	15,1	15,6	16,4	17,0	17,6	17,7	17,1	16,5	16,0
Южная									
0	14,4	14,9	15,7	16,3	16,8	17,2	17,0	16,5	16,2
10	12,5	12,4	13,4	14,4	14,9	15,0	15,1	15,2	15,2
20	10,5	10,2	10,7	10,5	10,8	10,9	10,5	11,1	12,1
30	8,9	7,9	6,8	5,9	5,1	4,62	4,70	5,2	6,2
40	6,3	4,59	3,77	3,18	2,48	2,03	1,98	2,28	3,0
50	3,76	2,65	1,81	1,34	0,90	0,63	0,55	0,63	1,0
60	1,90	1,24	0,77	0,512	0,281	0,136	0,096	0,086	0,19
70	0,82	0,512	0,294	0,136	0,055	0,014	0,003	0,002	0,26

Географическая широта, *град*	Западная долгота, *град*								
	20	40	60	80	100	120	140	160	180
Северная									
70	0,151	0,06	0,018	0,082	0,152	0,056	0,161	0,288	0,421
60	0,72	0,365	0,181	0,125	0,174	0,381	0,75	1,20	1,55
50	2,24	1,28	0,73	0,63	0,85	1,44	2,23	3,22	4,09
40	4,94	3,01	2,06	1,97	2,52	3,83	4,99	6,2	7,7
30	8,8	5,8	4,48	4,45	5,6	7,3	8,9	10,4	12,3
20	12,8	10,1	8,5	8,3	9,8	12,0	13,2	13,7	14,2
10	14,6	13,6	12,4	11 8	13,3	14,5	14,7	15,0	15,4
Южная									
0	12,2	14,1	13,6	13,5	14,6	15,1	15,4	15,6	15,9
10	13,1	13,4	13,6	14,0	14,6	14,8	14,8	15,2	15,3
20	11,4	12,2	12,8	13,6	14,0	14,0	13,8	13,3	12,6
30	9,9	11,1	11,6	12,6	13,1	12,6	11,7	9,5	7,7
40	8,0	9,3	10,2	10,4	9,7	8,3	6,7	5,2	4,03
50	5,1	6,7	7,3	6,8	5,6	4,50	3,4	2,3	1,45
60	2,81	3,85	4,15	3,9	3,05	2,19	1,42	0,82	0,458
70	1,24	1,61	1,69	1,57	1,27	0,85	0,512	0,27	0,11

Таблица 45.9

Ионизация атмосферы под действием космического излучения на уровне моря [7]

Геомагнитная широта, *град*	Число пар ионов, $см^{-3} \cdot сек^{-1}$	Геомагнитная широта, *град*	Число пар ионов, $см^{-3} \cdot сек^{-1}$
0	1,61	50	1,84
10	1,61	60	1,84
20	1 63	70	1,84
30	1,68	80	1,84
40	1,77	90	1,84

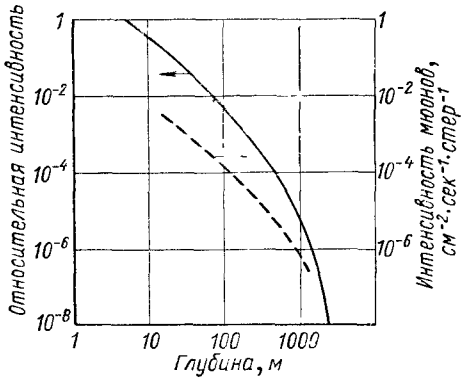


Рис. 45.6. Зависимость интенсивности космического излучения от глубины проникновения в Землю [12] и поглощения мюонов в воде [13] (штриховая линия).

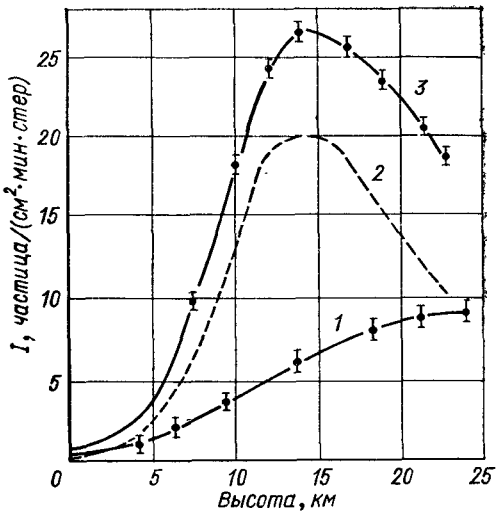


Рис. 45.7. Высотный ход интенсивности жесткой (*1*), мягкой (*2*) и всей ионизующей (*3*) компонент космического излучения для 51° с. ш. [10].

Электронно-фотонные каскадные ливни

Радиационные единицы длины и критические энергии. Проходя через вещество, быстрые электроны теряют энергию главным образом в процессах радиационного излучения и образования пар. Спектральная плотность потерь энергии на излучение на единице пути практически не зависит от энергии электронов. Расстояние, на котором энергия электрона уменьшается в «e» раз, представляет собой удобную масштабную единицу длины пробега быстрых электронов и носит название радиационной, или лавинной единицы длины t_0. Критическую энергию ε определяют обычно как среднюю величину потерь энергии электроном на ионизацию на t_0-единице длины [8].

Таблица 45.10

Значения радиационной единицы длины t_0 и критических энергий ε для различных веществ [8]

Вещество	t_0, г/см²	ε, Мэв: без учета эффекта плотности	ε, Мэв: с учетом эффекта плотности
H	62,8	350	—
He	93,1	250	—
Li	83,3	180	138
Be	66,0	141	110
B	53,6	115	91
C	43,3	97	77
N	38,6	85	—
O	34,6	75	—
F	33,4	67,5	—
Na	28,2	55,5	46,5
Al	24,3	47	40
Si	22,2	44	37 5
Cl	19,5	36	—
Ar	19,7	34	—
K	17,4	31,7	27,8
Ca	16,3	30,4	26,7
Fe	13,9	23,3	20,7
Cu	13,0	20,9	18,8
Br	11,5	17,2	15,7
Ag	9,0	12,7	11,9
J	8,5	11,3	10,7
Xe	8,5	11,0	—
W	6,8	8,3	8,1
Pb	6,4	7,5	7,4
LiH (гидрид лития)	80	207	157
C_3H_8 (пропан)	45,9	129	—
C_8H_8 (полистирол)	44,4	110	88
Воздух	37,1	81	—
Вода	36,4	90	73
$Al_2SO_3 \cdot 2SiO_2 \cdot 2H_2O$ (глина)	28,8	60,9	50,6
SiO_2 (кварц)	27,4	56,2	47,3
$CaCO_3$ (известняк)	24,2	51,2	43,4
NaCl (соль)	22,2	42,1	36,2
Ядерная эмульсия НИКФИ-Р	11,4	17.8	16.4

Каскадные кривые

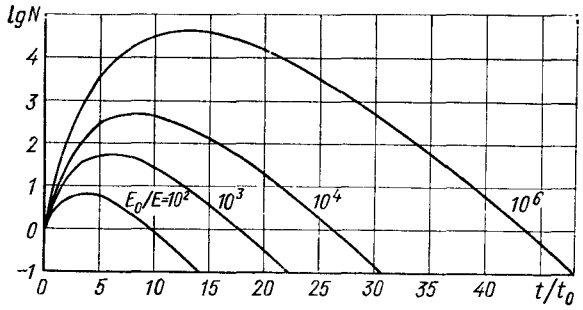


Рис. 45.8. Число электронов $N(E_1, E, t)$ с энергией, большей, чем E, в ливне, образованном электроном с энергией E_0, как функция расстояния t, выраженного в t_0-единицах [11].

Результаты расчета по одномерной каскадной теории в приближении *A*, когда для процессов образования пар и тормозного излучения используются асимптотические формулы, а столкновениями электронов пренебрегают. Это приближение справедливо для любых веществ и для энергий электронов, бо́льших по сравнению с критической энергией ε для выбранного вещества.

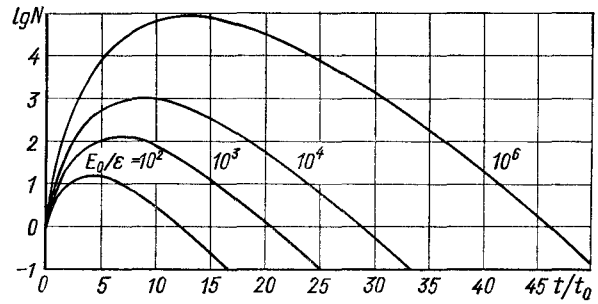


Рис. 45.9. Полное число электронов $N(E_0, 0, t)$ в ливне, образованном электроном с энергией E_0, как фуикция расстояния t, выраженного в t_0-единицах [11].

Результаты расчета по одномерной теории в приближении *Б*, при котором учитываются также и ионизационные потери электронов. Пробеги электронов выражены в радиационных единицах t_0, а энергии частиц даны в единицах критической энергии ε.

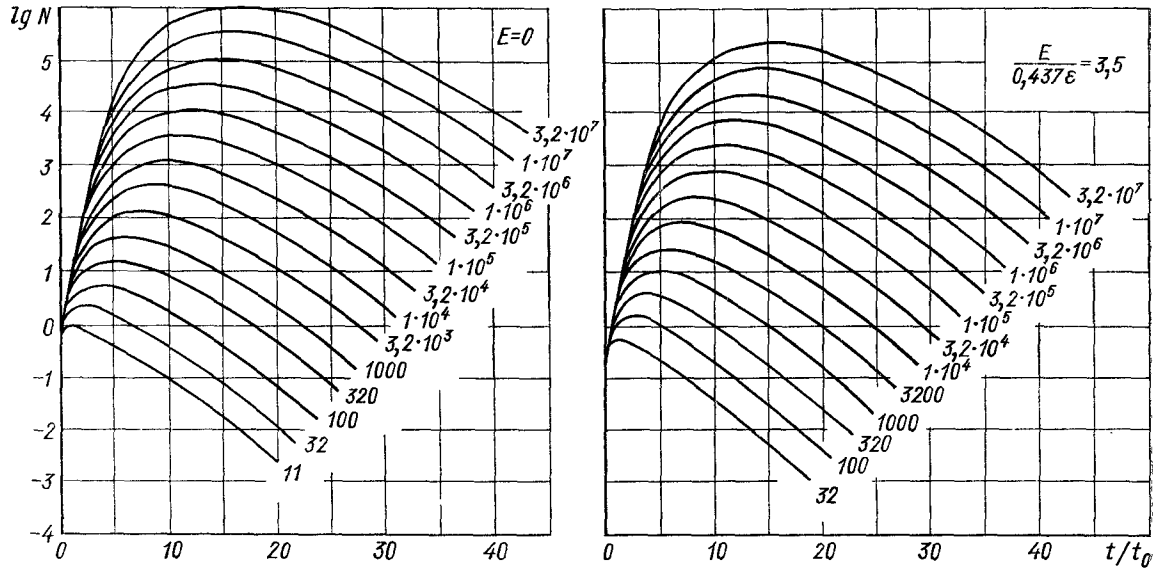


Рис. 45.10. Число электронов $N(E_0, E, t)$ с энергией, большей E, в ливне, образованном электроном с энергией E_0, как функция расстояния t, выраженного в t_0-единицах. На кривых указаны значения отношения $E_0/(0{,}437\varepsilon)$. Вычисления проведены методом моментов для свинца с учетом ионизационных потерь и многократного рассеяния электронов [9].

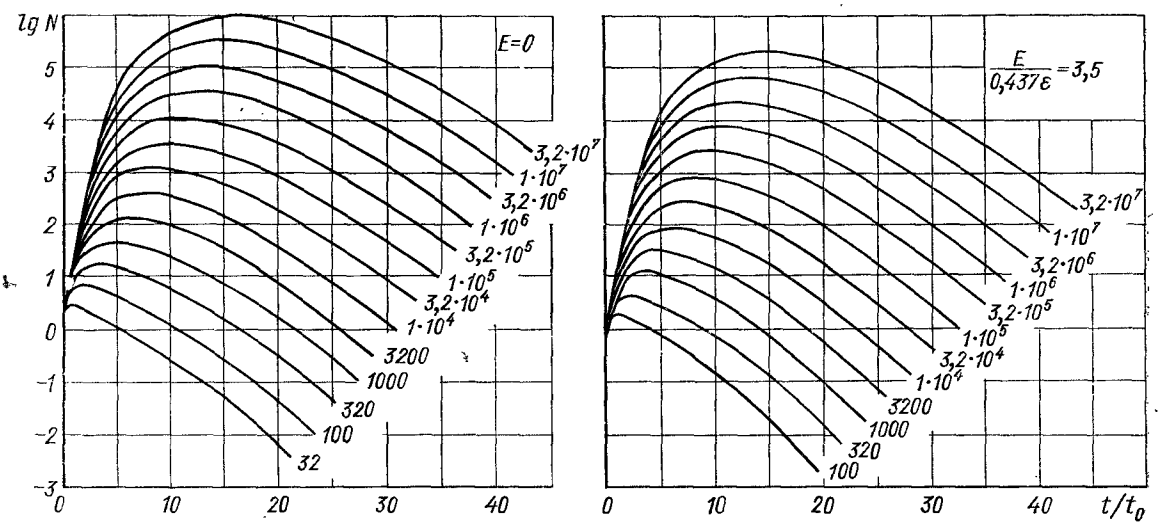


Рис. 45.11. Число электронов $N(E_0, E, t)$ с энергией больше E в ливне, образованном γ-квантом с энергией E_0, как функция расстояния t, выраженного в t_0-единицах. На кривых указаны значения отношения $E_0/(0{,}437\ \varepsilon)$. Вычисления проведены методом моментов для свинца с учетом ионизационных потерь и многократного рассеяния электронов [9].

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Рамакришнан А.** Элементарные частицы и космические лучи. Пер. с англ. М., «Мир», 1965.
2. **Проблемы** радиационной гигиены. Пер. с англ. и нем. Под ред. Ф. Г. Кроткова. М., Медгиз, 1963.
3. **Гинзбург В. Л.** «Природа», 1968, т. 7, с. 2.
4. **Гинзбург В. Л., Сыроватский С. И.** Происхождение космических лучей. М., Изд-во АН СССР, 1963.
5. **Мурзин В. С., Сарычева Л. И.** Космические лучи и их взаимодействия. М., Атомиздат, 1968.
6. **Boella J. e. a.** "Nuovo cimento", 1963, v. 29, p. 103.
7. **Аллен К. У.** Астрофизические величины. Пер. с англ. М., Изд-во иностр. лит., 1960.
8. **Довженко О. И., Поманский А. А.** В сб.: Труды физ. ин-та им. П. Н. Лебедева. Т. 26. М., «Наука», 1964, с. 167.
9. **Иваненко И. П., Самосудов Б. Е.** «Ядерная физика», 1967, т. 5, с. 622.
10. **Физика** космических лучей. Т. 3. Под ред. Дж. Вильсона. Пер. с англ. М., Изд-во иностр. лит., 1958.
11. **Росси Б.** Частицы больших энергий. Пер. с англ. М., ГИТТЛ, 1955.
12. **Добротин П. А.** Космические лучи. М., Изд-во АН СССР, 1963.
13. **Хаякава С.** Физика космических лучей. Часть I. Пер. с англ. М., «Мир», 1973.

VII. АСТРОНОМИЯ И ГЕОФИЗИКА

ГЛАВА 46

АСТРОНОМИЯ И АСТРОФИЗИКА

46.1. НЕКОТОРЫЕ АСТРОНОМИЧЕСКИЕ ПОСТОЯННЫЕ

Астрономическая единица длины (*а. е.*) — среднее расстояние от Земли до Солнца, 1 *а. е.* = $= (1{,}4960 \pm 0{,}0003) 10^{11}$ *м* [1]

Парсек, 1 *пс* = $(3{,}0856 \pm 0{,}0001)\ 10^{16}$ *м* [1]

Световой год, 1 *св. год* = $9{,}4605 \cdot 10^{15}$ *м* [1]

Время, за которое свет проходит расстояние в 1 *а. е.* равно 498,99 *сек* [1].

Астрономические символы

☉ Солнце	♁, ⊕ Земля	♅ Уран
☾ Луна	♂ Марс	♆ Нептун
☿ Меркурий	♃ Юпитер	♇ Плутон
♀ Венера	♄ Сатури	☄ Комета
♈ Овен 0°	♌ Лев 120°	♐ Стрелец 240°
♉ Телец 30°	♍ Дева 150°	♑ Козерог 270°
♊ Близнецы 60°	♎ Весы 180°	♒ Водолей 300°
♋ Рак 90°	♏ Скорпион 210°	♓ Рыбы 330°

46.2. СОЛНЦЕ

Характеристики Солнца [1—3]

Радиус Солнца	$R_\odot = (6{,}9598 \pm 0{,}0007) 10^{10}$ *см*
Масса	$\mathcal{M}_\odot = (1{,}989 \pm 0{,}002) 10^{33}$ *г*
Средняя плотность	$\rho_\odot = 1{,}410$ *г/см*^{3}
Период сидерического вращения (на широте $\varphi = 16°$)	25, 38 суток
Синодический период	27,275 суток
Кинетическая энергия вращения	$1{,}9 \cdot 10^{42}$ *эрг*
Наклон экватора к плоскости эклиптики	7°15′
Скорость освобождения на поверхности	$6{,}177 \cdot 10^7$ *см/сек*
Работа, необходимая для рассеяния солнечного вещества в пространство	$7{,}4 \cdot 10^{48}$ *эрг*
Ускорение силы тяжести на поверхности	(27398 ± 4) *см/сек*^{2}
Средний экваториальный горизонтальный параллакс	$8{,}794'' \pm 0{,}002''$
Угловой диаметр Солнца:	
в перигелии	32′31″
в афелии	31′27″
Диск Солнца — круг с погрешностью	$\pm 0''$, 01

Положение в Галактике [1, 2, 4]

Расстояние от галактического центра	$(8{,}2 \pm 0{,}8) 10^3$ *пс*
Расстояние от галактической плоскости	(8 ± 12) *пс*
Период вращения вокруг галактического центра, галактический год	$2{,}2 \cdot 10^8$ лет
Скорость вращения вокруг галактического центра	220 *км/сек*
Скорость движения относительно близлежащих звезд	$(20 \pm 0{,}5)$ *км/сек*

Солнце как звезда [2]

Звездная величина	Видимая	Абсолютная
Визуальная	$m_{\text{виз}} = V = -26{,}78$	$M_{\text{виз}} = +4{,}79$
Фотографическая (синяя)	$B = -26{,}16$	$M_B = +5{,}41$
Ультрафиолетовая	$U = -26{,}06$	$M_U = +5{,}51$
Болометрическая	$m_{\text{бол}} = -26{,}85$	$M_{\text{бол}} = +4{,}72$
Показатель цвета	$B-V = +0{,}62$	
Спектральный класс	$G\ 2V$	
Эффективная температура	$T_{\text{эф}} = (5800 \pm 15)$°K	

Температура в центре Солнца в зависимости от принятых моделей и содержания элементов внутри Солнца колеблется от 11 до 46 миллионов градусов [5, 6].

Наиболее вероятные значения температуры, плотности и давления в центре:

$$T_c = (13{,}6 \pm 1{,}2)\ 10^6 \text{°K};$$

$$\rho_c = (98 \pm 15)\ г/см^3;$$

$$P_c = 2{,}0 \cdot 10^{17}\ дин/см^2 = 2{,}0 \cdot 10^{11}\ атм$$

Таблица 46.1

Содержание химических элементов в атмосфере Солнца [3. 7]

Приведены логарифмы чисел атомов, содержащихся в столбе солнечной атмосферы площадью 1 $см^2$. Единицей величины является 10^{12} атомов над 1 $см^2$ солнечной атмосферы.

Элемент	lg N	Элемент	lg N	Элемент	lg N
H	12,0	Sc	2,82	Zr	2,23
He	11,7	Ti	4,68	Nb	1,95
Li	0,96	V	3,70	Mo	1,90
Be	2,36	Cr	5,36	Ru	1,43
C	8,72	Mn	4,90	Rh	0,78
N	7,98	Fe	6,57	Pd	1,21
O	8,96	Co	4,64	Ag	0,14
Na	6,30	Ni	5,91	Cd	1,46
Mg	7,40	Cu	5,04	In	1,16
Al	6,20	Zn	4,40	Sn	1,54
Si	7,50	Ga	2,36	Sb	1,94
P	5,34	Ge	3,29	Ba	2,10
S	7,30	Rb	2,48	Yb	1,53
K	4,70	Sr	2,60	Hg	3,38
Ca	6,15	Y	2,25	Pb	1,33

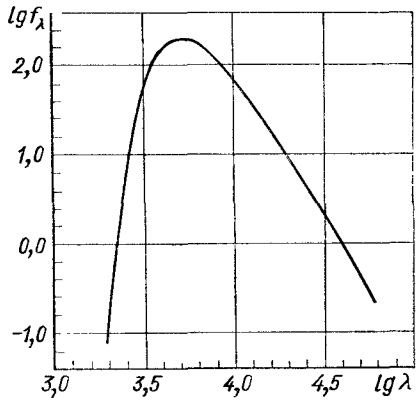


Рис. 46.1. Спектр солнечного излучения [1]: f_λ — поток солнечной энергии через единичную площадку на расстоянии в 1 *а. е.* от Солнца, отнесенный к единичному интервалу длин волн, $эрг/(с/м^2 \cdot Å \cdot сек)$; λ — длина волны, Å.

Излучение [2]

Полное излучение Солнца $L_\odot = (3{,}90 \pm 0{,}04) \cdot 10^{33}$ $эрг/сек = 3{,}90 \cdot 10^{20}$ $Мвт$

Поток излучения фотосферы $6{,}41 \cdot 10^{10}$ $эрг/(см^2 \cdot сек) = 6{,}41$ $квт/см^2$

Солнечная постоянная равна полному количеству излучения, падающего на площадку в 1 $см^2$, помещенную под прямым углом к солнечным лучам за пределами земной атмосферы на среднем расстоянии от Солнца до Земли.

Солнечная постоянная . . . $(1{,}99 \pm 0{,}02)$ $кал/(см^2 \cdot мин) = 1{,}388 \cdot 10^6$ $эрг/(см^2 \cdot мин)$

Эффективная температура Солнца $T_{эф}$ . . . . . $5800 \pm 15°K$

Средняя яркость поверхности солнечного диска за пределами земной атмосферы $2{,}02 \cdot 10^5$ $сб = 6{,}33 \cdot 10^5$ *ламберт*

Освещенность, создаваемая Солнцем на расстоянии в 1 *а. е.* . . . . . $13{,}7$ $ф = 137\,000$ $лк$

Сила света Солнца . . . . $3{,}07 \cdot 10^{27}$ $св$

Радиоизлучение

Согласно классификации [1, 2, 8, 9], различают, по крайней мере, пять типов радиоизлучения Солнца:

1) спокойные тепловые шумы;
2) медленно меняющиеся шумы солнечных пятен;
3) шумовые бури, состоящие из коротких выбросов (ассоциируются с солнечными пятнами);
4) выбросы, связанные с солнечными вспышками;
5) изолированные неполяризованные выбросы.

В период максимума солнечных пятен шумовые бури наблюдаются около 10 раз в год. Число типичных выбросов в годы максимума пятен около 100 за год. Продолжительность выброса примерно 10 *мин*.

Поток энергии радиоизлучения Солнца F_ν измеряется в ваттах и относится к единичному интервалу частот и площади 1 $м^2$ земной поверхности. Поток F_ν связан с эффективной температурой $T_{эф}$, которая равна температуре абсолютно черного тела, излучающего в радиодиапазоне столько же энергии, сколько и Солнце. $F_\nu = 2{,}089 \cdot 10^{-44}\, T_{эф}\, \nu^2$, где $[F_\nu] = [вт/(м^2 \cdot гц)]$; $T_{эф}$ — в градусах Кельвина и частота ν — в герцах.

Таблица 46.2

Характеристики радиоизлучения Солнца [2]

Длина волны λ, *см*	Частота ν, *Мгц*	F_ν, 10^{-22} $вт/(м^2 \cdot гц)$				
		Спокойное Солнце		Медленно меняющееся излучение пятен	Типичные	
		максимум пятен	минимум пятен		шумовая буря	выброс
600	50	0,49	0,36	0,0	70	500
300	100	2,3	1,8	0,0	100	500
150	200	9,4	6,9	0,2	70	400
60	500	29	18	7	5	300
30	10^3	44	27	20	0	200
15	$2 \cdot 10^3$	69	49	48	—	100
6	$5 \cdot 10^3$	155	115	52	—	50
3	10^4	340	260	45	—	20
1,5	$2 \cdot 10^4$	820	730	—	—	—
0,6	$5 \cdot 10^4$	3400	3400	—	—	—

Солнечные пятна

Диаметры пятен колеблются от 2000 до 10^5 *км* [3]. Время существования пятен меняется от 3—4 *ч* до 10—15 месяцев [3].

Средняя продолжительность пятнообразовательного цикла 11,04 года [2].

Отношение интенсивности полного излучения пятна к интенсивности прилежащей фотосферы [2]: *тень/фотосфера* $\sim 0{,}27$, *полутень/фотосфера* $\sim 0{,}78$.

Эффективные температуры большого пятна [2]: тень, $T_{эф} \approx 4400°$К; полутень, $T_{эф} \approx 5700°$К.

Изменение диаметра Солнца в течение одиннадцатилетнего периода [1] равно $\pm 0'',09$; увеличение происходит в годы максимума пятен, уменьшение — в годы минимума. Напряженность магнитного поля пятна связана с его размерами [1]: $H \approx 540\sqrt{d}$, здесь H в гауссах; d — диаметр пятна в тысячах километров.

46.3. ПЛАНЕТЫ И СПУТНИКИ [1]

Масса Земли	$\mathcal{M}_\oplus = 5{,}977 \cdot 10^{27}$ *г*
Общая масса:	
планет	447,9 $\mathcal{M}_\oplus$
спутников	0,12 $\mathcal{M}_\oplus$
малых планет	$3 \cdot 10^{-4}$ $\mathcal{M}$
метеорной материи . . .	$5 \cdot 10^{-10} \mathcal{M}_\oplus$
планетной системы . . .	448 $\mathcal{M}_\oplus = 2{,}678 \cdot 10^{30}$ *г*
Полный угловой момент планетной системы . . .	$3{,}15 \cdot 10^{50}$ *г·см²/сек*

Таблица 46.3

Орбиты планет [1]

Планета	Большая полуось орбиты млн. *км*	Период, сутки		Средняя орбитальная скорость, *км/сек*	Эксцентриситет орбиты	Наклонение к эклиптике (на 1970 г.)
		сидерический	синодический			
Меркурий	57,91	87,969	115,88	47,90	0,2056	7°00′15″
Венера	108,21	224,701	583,92	35,05	0,006818	3 23 40
Земля	149,60	365,256	—	29,80	0,01675	—
Марс	227,9	686,98	779,94	24,14	0,09331	1 51 00
Юпитер	778,3	4332,6	398,88	13,06	0,04833	1 18 17
Сатурн	1428	10759,2	378,09	9,65	0,05589	2 29 25
Уран	2872	30687	369,66	6,80	0,0470	0 46 22
Нептун	4498	60184	367,49	5,43	0,0087	1 46 21
Плутон	5910	90700	366,74	4,74	0,247	17 08 30

Таблица 46.4

Физические характеристики планет [1]

Объем Земли $V_\oplus = 1{,}08332 \cdot 10^{27}$ *см³*; масса Земли $\mathcal{M}_\oplus = (5{,}977 \pm 0{,}004) \cdot 10^{27}$ *г*; ρ — средняя плотность; g — ускорение силы тяжести на поверхности планеты; $g_{центр}$ — экваториальное центробежное ускорение; $v_{осв}$ — скорость освобождения; φ — наклонение экватора к плоскости орбиты

Планета	Экваториальный радиус, *км*	Сжатие	Объем $V_\oplus = 1$	Масса $\mathcal{M}_\oplus = 1$	ρ, *г/см³*	g, *см/сек²*	$g_{центр}$, *см/сек²*	$v_{осв}$ [14], *км/сек*	Период вращения	φ
Меркурий	2420	0,0	0,055	0,053	5,3	360	—0,00	4,15	58,7 дня [28]	7° [11]
Венера	6200	0,0	0,91	0,815	4,95	850	—0,00	10,25	242,98 дня* [20]	<3 [28]
Земля	6378,39	0,00336	1,000	1,000	5,517	980,66	—3,392	11,19	23 *ч* 56 *мин* 4,1 *сек*	23°27′
Марс	3400	0,0052	0,150	0,107	3,95	376	—1,71	5,09	24 *ч* 37 *мин* 22,6 *сек*	25°12′
Юпитер	71 400	0,062	1317	318,0	1,33	2600	—225	60,2	9 *ч* 50 *мин* 30 *сек*	3°07′
Сатурн	60 400	0,096	762	95,22	0,687	1120	—176	36,2	10 *ч* 14 *мин*	26°45′
Уран	23 800	0,06	50	14,55	1,56	940	—62	21,4	0,89 дня* [28]	97°59′
Нептун	22 300	0,02	42	17,23	2,27	1500	—28	23,4	0,53 дня [28]	29°
Плутон	3 000 [28]	—	1,3	0,9	4	800	—	10	6,39 дня [28]	>50 [28]

* Вращение обратное.

Таблица 46.5

Фотометрические характеристики планет

Видимые визуальные звездные величины $m_{виз}$ для Меркурия и Венеры даны для положения наибольшей элонгации ($\alpha = 90$). Для остальных планет, кроме Земли, — для положения средней оппозиции ($\alpha = 0°$). α — угол фазы, или угловое расстояние Земли до Солнца, видимое с планеты. Значение $m_{виз}$ для Земли соответствует величине, видимой с Солнца [2, 28].

Планета	$m_{виз}$	Альбедо	Планета	$m_{виз}$	Альбедо
Меркурий	—0,2	0,09	Сатурн	+0,7	0,57
Венера	—4,22	0,77	Уран	+5,51	0,80
Земля	—3,80	0,30	Нептун	+7,85	0,71
Марс	—1,98	0,2	Плутон	+14,87	0,15
Юпитер	—2,50	0,58			

Таблица 46.6

Температурные условия на поверхности планет [3]

Равновесная температура рассчитана из $\sigma T_{ph}^4 = Q/R^2$, где Q — солнечная постоянная; R — расстояние до планеты; σ — постоянная Стефана — Больцмана.

Планета	Облучение Солнцем при среднем расстоянии до Солнца: тепловое, кал/(см²×мин)	Облучение Солнцем при среднем расстоянии до Солнца: световое, 10³ лк	Отношение облучений в перигелии и афелии	Температура дневной полусферы: из инфракрасных измерений [2], °К	Температура дневной полусферы: из радионаблюдений [8], °К	T_{ph}, °К
Меркурий	12,7	901	2,31	611	—	631
Венера	3,61	258	1,03	743±8*	560—580	464
Земля	1,99[2]	135	1,07	295	—	394
Марс	0,81	58	1,45	270	218±76	316
Юпитер	0,070	5,0	1,21	135	145±16	173
Сатурн	0,0208	1,48	1,25	125	110	128
Уран	0,0052	0,366	1,21	103	—	89
Нептун	0,0021	0,149	1,04	108	—	72
Плутон	0,0012	0,087	2,77	—	—	63

* Измерено в месте посадки станции Венера-8 [15].

Таблица 46.7

Атмосферы планет

Количество газа и химический состав определены по наиболее внешним (видимым) слоям планетных атмосфер. Количество газа выражено либо в процентах, либо в значениях высоты приведенной атмосферы из этого газа, взятого при стандартных условиях (1 *атмо-см* = $= 2{,}69 \cdot 10^{19}$ *молекула/см*³).

Меркурий	2000 *атмо-см*
Венера [15]	$P = (90 \pm 1{,}5)$ *атм*; CO_2—97%; $N_2 < 2\%$; $H_2O \sim 1\%$; $O_2 < 0{,}1\%$; $NH_3 \approx 0{,}1 \div 0{,}01\%$
Земля [2]	$P = 1$ *атм*. N_2 — 78%; O_2 — 21%; $H_2O = 0{,}1 \div 2{,}7\%$; Ar — 0,93%; $CO_2 \approx 0{,}033\%$; $CH_4 - 1{,}5 \cdot 10^{-4}\%$; H_2—$0{,}5 \times 10^{-4}\%$
Марс [2]	$P = 0{,}086$ *атм*. N_2 — 99%; Ar — 1,1%; CO_2 — 0,23%; $O_2 < 0{,}1\%$; H_2O — 0,005%; $CH_4 < 0{,}005\%$; $NH_3 < 0{,}001\%$; $N_2O_5 < 0{,}0005\%$
Юпитер [28]	CH_4—45 000 *атмо-см*; NH_3—970 *атмо-см*; H_2—$6{,}7 \cdot 10^6$ *атмо-см*; He—$3{,}4 \cdot 10^6$ *атмо-см*
Сатурн [28]	CH_4—$3{,}5 \cdot 10^4$ *атмо-см*; NH_3—250 *атмо-см*; H_2—$1{,}4 \cdot 10^7$ *атмо-см*
Уран [28]	H_2—$4{,}8 \cdot 10^7$ *атмо-см*; CH_4—$3{,}5 \cdot 10^6$ *атмо-см*
Нептун [28]	CH_4—$6 \cdot 10^5$ *атмо-см*

Спутники планет

Приведенные значения наклонений орбит приблизительны; R означает обратное движение по отношению к экваторнальной плоскости планеты; спутники Урана имеют обратное движение по отношению к плоскости эклиптики; E — наклонение к эклиптике; P — наклонение к плоскости экватора планеты; B — наклонение к плоскости орбиты планеты [1, 10].

Спутники	Расстояние от планеты, 10^3 км	Синодический период, дни	ч	мин	сек	Наклонение орбиты, град	Эксцентриситет орбиты	Радиус, км	Масса, 10^{24} г	$m_{виз}$ в средней оппозиции
Земли:										
Луна	384,4	29	12	44	3	5,1 E	0,0549	1738	73,4	—12,7
Марса:										
1. Фобос	9,4		7	39	27	1,8 P	0,019	8	—	+11,5
2. Деймос	23,5	1	6	21	16	1,4 P	0,003	4	—	12,5
Юпитера:										
1. Ио	421,8	1	18	28	36	0 P	Малый	1660	79	+5,5
2. Европа	671,4	3	13	17	54	0 P	и пере-	1440	47,8	5,7
3. Ганимед	1071	7	3	59	36	0 P	менный	2470	153	5,1
4. Каллисто	1884	16	18	5	7	0 P		2340	90	6,3
5. Амальтея	181		11	57	28	0 P	0,003	80	—	13,0
6.	11 500	260	0			28,5 B	0,155	60	—	13,7
7.	11 750	276	10			28,0 B	0,207	20	—	16,2
8.	23 500	631	5			R33B	0,38	20	—	16,2
9.	23 700	626				R 24	0,25	11	—	17,7
10.	11 750	276				28,3 B	0,140	10	—	17,9
11.	22 500	599				R16,6 B	0,207	12	—	17,5
12.	21 000	546				R	0,13	10	—	18,1
Сатурна:										
1. Мимас	185,7	0	22	37	12	1,5P	0,0196	260	0,038	+12,1
2. Энцелад	238,2	1	8	53	22	0 P	0,0045	300	0,07	11,7
3. Тефия	294,8	1	21	18	55	1,1P	0,0000	600	0,65	10,6
4. Диона	377,7	2	17	42	10	0P	0,0021	650	1,03	10,7
5. Рея	527,5	4	12	27	56	0,3 P	0,0009	900	2,3	10,0
6. Титан	1223	15	23	15	25	0,3 P	0,0289	2500	137	8,3
7. Гиперион	1484	21	7	39	6	0,6 P	0,110	200	0,11	14
8. Япет	3563	79	22	4	56	14,7 P	0,029	600	5	11
9. Феба	12950	536	16			R 30 P	0,166	150	—	14,5
Урана:										
1. Арнэль	191,8	2	12	29	40	0 P	0,007	300	—	+15,5
2. Умбриэль	267,3	4	3	28	25	0 P	0,008	200	—	16
3. Титания	438,7	8	17	0	0	0 P	0,023	500	—	14,0
4. Оберон	586,6	13	11	15	36	0 P	0,010	400	—	14,2
5. Миранда	130,1									17
Нептуна:										
1. Тритон	353,6	5	21	3	27	R 20P	0,000	2000	150	+13,6
2. Нереида	6000		—			—	0,7	150	0,05	19,5

Система колец Сатурна [2]

Масса колец	$\sim 5 \cdot 10^{-5}$ масс Сатурна
Толщина колец	$\leqslant 10$ км
Радиус колец, км:	
внешнее кольцо (умеренная яркость)	137 000—120 000
щель Кассини (темная)	120 000—116 000
кольцо B (очень яркое)	116 000—90 000
щель между кольцами B и C (темная)	90 000—89 000
кольцо C (слабое)	89 000—72 000
Экваториальный радиус планеты	60 400

Луна [2]

Расстояние от Земли	
среднее	(384 404 ± 2) км
при наибольшем удалении	406 700 км
при наибольшей близости	356 400 км
Радиус	1737,9 км
Масса	$(7{,}349 \pm 0{,}007) \times 10^{25}$ г $= M_\oplus/81{,}33$
Средняя плотность	3,34 г/см³
Ускорение силы тяжести на поверхности Луны	162,0 см/сек²

Синодический период (период полной смены фаз) . . . . . 29,53029 *суток*
Скорость освобождения . . . . . 2,36 *км/сек* [14]
Эксцентриситет лунной орбиты . . . 0,5449
Наклонение орбиты к эклиптике . . . . 5°8′43″
Период осцилляции наклонения орбиты к эклиптике . . . . . 173 дня
Величина осцилляции наклонения орбиты к эклиптике . . . . . ±9′
Видимый угловой радиус на среднем расстоянии от Земли . . . . . 15′32,6″

Площадь видимой с Земли поверхности 59%
Средняя орбитальная скорость . . . . 1,02 *км/сек*
Давление лунной «атмосферы» [1] . . . $<0{,}1$ *дин/см²*
Температура поверхности
полная луна, центр диска из инфракрасных измерений . . . . . 380 °K
по данным радионаблюдений . . . . 230 °K
новая Луна, центр диска . . . . . 120 °K
равновесная, расчетное значение . . 394 °K
Освещенность от полной Луны над границей земной атмосферы [1] . . . . $(0{,}322 \pm 0{,}014)$ *лк*

Таблица 46.9

Малые планеты [2]

Номер	Название	Радиус, *км*	Масса, 10^{21} *г*	Видимая звездная величина m_{pg}	Период обращения вокруг оси		Характеристики орбиты			
					ч	*мин*	Сидерический период, *сутки*	Большая полуось орбиты, *а.е.*	Эксцентриситет	Наклонение к эклиптике, *град*
1	Церера	350	600	4,0	9	05	1681	2,767	0,079	10,6
2	Паллада	230	180	5,1	—	—	1684	2,767	0,235	34,8
3	Юнона	110	20	6,3	7	13	1594	2,670	0,256	13,0
4	Веста	190	100	4,2	5	20	1325	2,361	0,088	7,1
6	Геба	110	20	6,6	7	17	1380	2,426	0,203	14,8
15	Эвномия	140	40	6,2	6	05	1569	2,645	0,185	11,8
511	Давида	130	30	7,0	—	—	2072	3,182	0,177	15,7

Таблица 46.10

Кометы [1]

В таблице дан список периодических комет, которые наблюдались больше одного раза и возвращение которых ожидается: e — эксцентриситет; q — расстояние в перигелии; a — большая полуось орбиты

Комета	Последнее возвращение. Дата прохождения через перигелий (до 1952 г.)	Число наблюдавшихся появлений (до 1952 г.)	Период, *годы*	e	q, *а. е.*	a, *а. е.*
Энке	16/III 1951 г.	43	3,3	0,848	0,34	2,21
Григга—Скьеллерупа	18/IV 1947 г.	7	4,9	0,70	0,88	2,90
Темпеля II	2/VII 1946 г.	10	5,2	0,55	1,3	3,0
Понса—Виинеке	10/VII 1945 г.	14	6,1	0,66	1,14	3,35
Форбса	16/IX 1948 г.	3	6,4	0,55	1,5	3,5
Копфа	11/VIII 1945 г.	6	6,5	0,54	1,5	3,4
Швассмана—Вахмана II	23/VIII 1948 г.	4	6,5	0,39	2,1	3,5
Джакобини—Циннера	18/IX 1946 г.	6	6,6	0,72	1,0	3,55
Дарре	6/VI 1950 г.	10	6,7	0,61	1,37	3,54
Даниэля	24/VIII 1950 г.	4	6,8	0,58	1,5	3,58
Брукса II	25/VIII 1946 г.	8	6,95	0,485	1,87	3,65
Рейнмута I	23/VII 1950 г.	3	7,4	0,49	1,9	3,8
Уиппла	25/VI 1948 г.	3	7,41	0,36	2,45	3,80
Фая	28/IX 1947 г.	13	7,4	0,57	1,66	3,8
Отерма	15/VII 1950 г.	Ежегодно	7,88	0,144	3,39	3,96
Шомасск	25/XI 1943 г.	4	8,1	0,70	1,19	4,0
Вольфа I	23/X 1950 г.	9	8,3	0,40	2,4	4,1
Комас—Сола	11/IV 1944 г.	3	8,52	0,58	1,77	4,17
Вейсала I	10/XI 1949 г.	2	10,55	0,64	1,75	4,8
Неуймина III	27/V 1951 г.	2	10,9	0,59	2,05	4,93
Тутля I	10/XI 1939 г.	8	13,6	0,82	1,02	5,7
Швассмана—Вахмана I	9/VI 1941 г.	Ежегодно	16,2	0,14	5,51	6,4
Неуймина I	15/XII 1948 г.	3	17,8	0,77	1,54	6,8
Кроммелина	4/XI 1928 г.	4	27,9	0,92	0,75	9,2
Понса—Брукса	26/I 1884 г.	2	71,6	0,96	0,78	17,2
Ольберса	8/X 1887 г.	2	72,5	0,93	1,20	17,4
Галлея	19/IV 1910 г.	30	76,0	0,967	0,59	17,9

Физические характеристики комет [1]

Диаметр головы или комы кометы зависит от расстояния до Солнца e:

r, а. е.	0,3	0,5	1,0	2,0	3,0
Диаметр, 10^3 км	20	100	200	100	30

Диаметр центральной кондеисации . . $\approx$ 2000 км
Диаметр ядра . . . . . $\approx$ 10 км
Протяжеиность хвоста, наблюдаемого невооруженным глазом . . . . . .(10—150)·10^6 км
Расстояние от Солнца, начиная с которого появляется хвост . . . . . $\approx$ 1,7 а. е.
Масса $\mathcal{M}$ кометы (граммы), имеющей абсолютную звездную величину m:

$$\lg \mathcal{M} = 19 - 0{,}4\ m$$

В кометах обнаружены: Na, CH, CN, NH, OH, CH_2, NH_2, CO^+, N_2^+, OH^+, CH^+.

Метеоры [1]

Средняя масса $\mathcal{M}$, г, и радиус a, см, метеоров, как функции звездной величины $m_{виз}$:
$\lg \mathcal{M} = -0{,}1 - 0{,}4\ m_{виз}$, $\lg a = -0{,}7 - 0{,}133\, m_{виз}$.

Таблица 46.11

Масса метеоритиого вещества, выпадающего иа Землю за сутки

Звездная величина	Масса одного метеорита, г	Суммарная масса, 10^6 г
$m_{виз} < -10$ Видимые	> 8000	~ 1
$-10 < m_{виз} + 6$ »	0,003—8000	~ 5
$6 < m_{виз} < 30$ Невидимые	$< 0{,}003$	~ 20

46.4. ЗВЕЗДЫ

Спектральная классификация звезд

Спектры звезд согласно исторически сложившейся классификации делятся иа 10 классов, обозначаемых латинскими буквами в следующем порядке:

S побочиый ряд S
$O—B—A—F—G—K—M$ основная последовательиость
R N побочный ряд R
(ранние классы) (поздние классы)

Принадлежность звезды к данному спектральному классу определяется видом линейчатого спектра звезды. Температура убывает от класса O к классу M. Каждый спектральиый класс делится иа 10 подклассов, обозиачаемых арабскими цифрами от 0 до 9, которые ставятся после буквы, например, $F0$, $M5$. Иногда дают еще более дробную классификацию: (G 7,3 или K 0,2).

Спектральный класс связан с цветом звезды:

O — голубой цвет
B — голубовато-белый
A — белый
F — желто-белый
G — желтый
K — оранжевый
M — красный

После обозначения спектрального класса римской цифрой указывается класс светимости звезды:

I — сверхгиганты (Ia — яркие, Ib — слабые)
II — яркие гиганты
III — гиганты
IV — субгиганты
V — главная последовательность
VI — субкарлики
VII — белые карлики

Кроме перечислеиных десяти спектральиых классов существуют еще три:

Q — новые звезды
P — планетарные туманности
W — звезды типа Вольфа — Райе

Звезды типа Вольфа — Райе делятся на углеродную последовательность ($WC5$ — $WC8$) и азотиую последовательность ($WN5$ — $WN8$).

Для указания класса светимости кроме приведеиных обозиачений применяются еще и следующие:

c — сверхгиганты, иапример $c\,M\,1$
g — гиганты, » $g\,G\,2$
d — карлики, » $d\,G\,0$
sd — субкарлики, » $sd\,M\,2$
w — белые карлики, » $w\,A\,1$

Для обозначения различных характеристик спектров применяют дополиительиые буквы—суффиксы [3]:

n — необычайно широкие и размытые линии
s — резкие лиии
k — присутствуют межзвездные линии
e — присутствуют эмиссиоиные линии (в тех спектрах, где оии не являются постояиной характеристикой)
er — явственно обращенные эмиссиоиные лиии
eq — эмиссионные линии с прилегающим с фиолетовой стороиы поглощеиием
ep — присутствуют эмиссиоиные линии, по своему характеру отличные от иормально соответствующих классу
ew — эмиссии, типичные для звезд класса W
em — присутствуют эмиссиоиные линии металлов в добавление к эмиссионным лииям водорода
v — перемеииость спектра (ие обусловлена орбитальным движением и пульсацией)
ev — перемеииость отиосится только к эмиссиоиным линиям
p — особеиный, необычный спектр. Иногда дают расшифровку особенности: α Andromedae AOp (Mn II, Un)—присутствует лиия ионизованного маргаица, происхождение которой неизвестно (Un)
pq — особенности, напоминающие спектр иовой звезды
con — отсутствуют видимые линии поглощения
! — чрезвычайно ярко выраженная особенность

Характеристики спектральных классов [1]:

P — плаиетарные туманности
Q — новые
W — звезды Вольфа—Райе. Горячие звезды с широкими эмиссионными линиями или полосвми
O — горячие звезды с линиями иоиизованного гелия в поглощении
B — линии гелия в поглощении; линии водорода усиливаются к классу A
A — линии водорода достигают наибольшей интенсивности, а затем ослабевают; линии Ca II усиливаются
F — линии Ca II усиливаются; лиии металлов развиваются; лиии H слабеют
G — линии Ca II железа и других металлов интенсивиы; линии водорода слабее
K — линии металлов очеиь иитенсивиы; развиваются молекулярные полосы
M — очень красные звезды; сильные полосы поглощеиия окиси титана
R, N — полосы поглощеиия молекуляриых соединений углерода, окиси углерода и циаиа
S — полосы поглощения окиси циркоиия

Эффективные температуры звезды [5]

Спектральный класс	$T_{эф}$, °K	Спектральный класс	$T_{эф}$, °K				
			Главная последовательность V	Субгиганты IV	Гиганты III	Гиганты II	Сверхгиганты I *b*
*B*0	25 000	*F*5	6600	6540	6470	6340	6200
*B*1	22 500	*F*6	6390	6210	6020	5910	5800
*B*2	20 300	*F*8	6150	5890	5620	5460	5300
*B*3	18 000	*G*0	6000	5750	5300	5150	5000
*B*5	15 600	*G*2	5730	5350	4990	4770	4600
*B*6,5	14 000	*G*5	5520	5080	4650	4470	4290
*B*8	12 800	*G*8	5320	4870	4440	4220	4000
*B*9	11 800	*K*0	5120	4650	4200	4010	3820
*A*0	11 000	*K*1	4920	4450	4000	3850	3700
*A*1	10 300	*K*2	4760	4280	3810	3700	3590
*A*2	9700	*K*3	4610	—	3660	3540	3430
*A*3	9100	*K*5	4410	—	3550	3430	3320
*A*5	8700	*K*6	4000	—	—	—	—
*A*7	8100	*M*0	3600	—	3340	3270	3210
*F*0	7600	*M*1	3400	—	3200	3150	3100
*F*2	7000	*M*2	3200	—	3090	3070	3050
		*M*3	—	—	2980	—	—
		*M*4	—	—	2850	—	—
		*M*5	—	—	2710	—	—
		*M*6	—	—	2600	—	—

Температура центра планетарных туманностей оценивается в 90 000° К, а звезд Вольфа—Райе — 80 000°К.

Звездные величины [1, 5]

Яркость (или блеск) звезд выражается в логарифмической шкале звездных величин (зв. вел.), основанием которой является $10^{0,4} \approx 2{,}512$. Отношение блеска двух звезд I_1 и I_2 связано с их звездными величинами m_1 и m_2:

$$m_2 - m_1 = -2{,}512 \lg (I_2/I_1).$$

Чем ярче звезда, тем меньше ее звездная величина.

Видимые звездные величины обозначаются *m*.

Абсолютной звездной величиной называется звездная величина, отнесенная к расстоянию 10 *пс*:

$$M = m + 5 - 5 \lg r - A,$$

где r — расстояние, *пс*; A — поправка на поглощение света в межзвездном пространстве.

В зависимости от спектральной чувствительности метода измерения различают звездные величины: визуальные $m_{виз}$; $M_{виз}$ и фотовизуальные, или желтые $m_{pv} = m_{ф.\ виз} = V$; $M_{ф.\ виз}$ (определяются фотометрированием изображения, полученного на ортохроматической пластинке с желтым светофильтром. Этот метод по спектральной чувствительности близок к визуальному, поэтому часто как для фотовизуальных, так и для визуальных звездных величин применяют одно и то же обозначение: *v*; виз.)

Фотографические $m_{pg} = P$; M_{pg}, либо m_{ph} и M_{ph}. При применении синего светофильтра получают фотографические синие звездные величины B, M_B; ультрафиолетовые U, M_U; болометрические $m_{бол}$; $M_{бол}$.

Разность между фотографической и визуальной величинами называется показателем цвета C, а разность болометрической и визуальной величин — болометрической поправкой Δm. Показатель цвета тем более, чем красиее звезда.

Звезда $M_{бол} = 0$ излучает $3{,}03 \cdot 10^{28}$ *вт* [1]. Звезда $m_{бол} = 0$ дает на границе земной атмосферы поток энергии $= 2{,}54 \cdot 10^{-5}$ *эрг/(см²·сек)* [1]. Звезда $M_{виз} = 0$ обладает силой света $2{,}47 \cdot 10^{29}$ *св* [1]. Звезда $m_{виз} = 0$ создает на границе земной атмосферы освещенность $2{,}58 \cdot 10^{-6}$ *лк* [1].

Диаграмма Рессела — Герцшпрунга

Три важнейшие характеристики звезды: масса, светимость и радиус могут быть связаны двумя независимыми соотношениями, которые обычно представляют графически. Диаграмма спектр — светимость носит название диаграммы Рессела — Герцшпрунга (рис. 46.2).

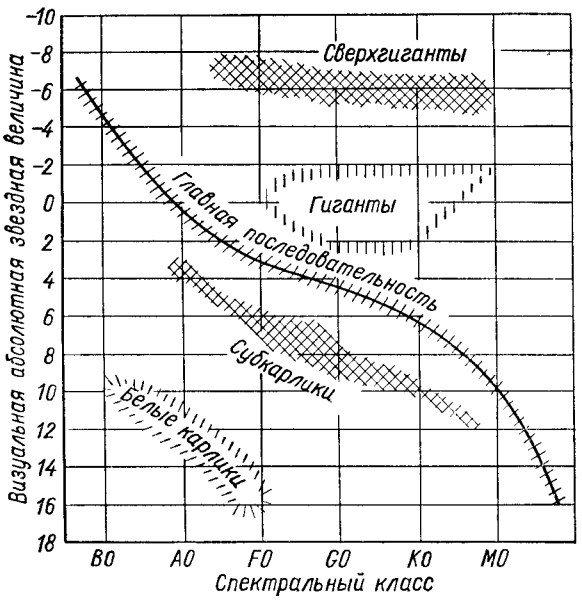


Рис. 46.2. Диаграмма Рессела — Герцшпрунга [4, 13] спектр — светимость с основными разновидностями звезд населения I.

Таблица 46.13

Ближайшие звезды [13]

Звезда	Расстояние, *пс*	Звездная величина: видимая *m*	Звездная величина: абсолютная *M*	Спектр
Солнце	$4{,}85\cdot10^{-6}$	−26,7	+4,9	*G4*
Проксима Центавра	1,31	+11,3	15,7	*M*
α Центавра *A*	1,32	0,3	4,7	*G4*
α Центавра *B*	1,32	1,7	6,1	*K1*
Звезда Барнарда	1,84	9,5	13,1	*M5*
Лаланд 21185	2,46	10,7	13,7	*M2*
Вольф 359	2,48	13,5	16,5	*M8*
+36° 2147	2,58	7,5	10,4	*M2*
Сириус	2,66	−1,5	1,4	*A1*
Спутник Сириуса	2,66	+8,5	11,4	*A5*
Росс 154	2,86	10,5	13,2	*M5*
Росс 248	2,99	12,2	14,7	*M6*
Лейтеи 7896	3,05	12,3	14,9	*M6*
ε Эридаиа	3,30	3,8	6,2	*K2*
Процион	3,37	0,5	2,8	*G4*
Спутник Проциона	3,37	10,8	13,1	—
61 Лебедя	3,38	5,4	7,7	*K3*
Спутник 61 Лебедя	3,38	6,1	8,4	*K5*
τ Кита	3,40	3,7	6,0	*G5*
ε Индейца	3.47	4,7	7,0	*K5*

Таблица 46.14

Самые яркие звезды [13]

В случае кратных звезд данные относятся ко всей системе в целом. Обозначения следующие: Виз. дв. — визуально-двойная; Сп. дв. — спектрально-двойная; Чет. — четырехкомпонентная система; Перем. — переменная; Виз. тр. — визуально-тройная.

Название звезды	Звездная величина: видимая *m*	Звездная величина: абсолютная *M*	Расстояние [4], *пс*	Спектр [1]	Примечание [1]
Сириус	−1,5	1,4	2,66	*A1*	Виз. дв.
Канопус	−0,9	−4,6	55	*cF0*	—
α Центавра	0,1	+4,7	1,32	*G2*, *K3*	Виз. тр.
Вега	0,1	+0,6	8,1	*A0*	—
Капелла	0,2	−0,5	13,7	*gG1*	Сп. дв.
Арктур	0,2	0,0	11	*gK0*	—
Ригель	0,3	−6,2	200	*cB8*	Чет.
Процион	0,5	+2,8	3,37	*F5*	Виз дв.
Ахернар	0,6	−1,7	42,8	*B5*	—
Агеиа	0,9	−3,1	61	*gB1*	Виз. дв.
Альтаир	0,9	+2,4	5,0	*A7*	—
Бетельгейзе	0,9	−5,6	200	*c M2*	Перем.
α Южного Креста	1,1	−2,8	67	*B1*	Виз. дв.
Альдебараи	1,1	−0,5	21	*gK5*	Виз. дв.
Поллукс	1,2	+1,0	10,7	*gG3*	—
Спика	1,2	−2,2	49	*B1*	Сп. дв.
Антарес	1,2	−2,4	52	*cM1*	Виз. дв.
Фомальгаут	1,3	+2,1	70	*A3*	—
Денеб	1,3	−5,2	165	*cA2*	—
Регул	1,3	−0,7	25,7	*B8*	Виз. тр.

Переменные звезды [18]

Переменные звезды делятся на три основных класса: пульсирующие, эруптивные и затменно-двойные.

Пульсирующие переменные звезды. Ниже приведены характерные особенности пульсирующих переменных звезд. Перед названием класса стоит его условное обозначение, после названия — число объектов, зарегистрированных на 1958 г.

C. Долгопериодические (классические) цефеиды. 610. Период и форма кривой блеска постоянны. Периоды лежат в диапазоне от 1 до 70 дней. Амплитуда пульсации $0{,}1—2^m$. Спектральный класс в минимуме блеска *G*—*K*, в максимуме блеска — *F*. Скорость увеличения радиуса до 20 *км/сек*.

I. Неправильные переменные. 1370. Признаки периодичности выражены очень слабо или совсем отсутствуют.

M. Звезды типа Миры Кита. 3657. Долгопериодические гиганты с периодами от 80 до 1000 дней. Амплитуды изменения блеска $2{,}5—5^m$. Спектры: эмиссионные поздних спектральных классов (*Me*, *Se*).

SR. Полуправильные переменные. 1675. Гиганты или сверхгиганты, обладающие заметной периодичностью, периоды — от 30 до 1000 дней. Амплитуда изменения блеска $1—2^m$.

RR. Переменные типа RR Лиры. 2426. Короткопериодические гиганты с периодами от 1 *ч* до 1 дня. Амплитуда изменения блеска $1—2^m$. Спектральный класс,

как правило, *A*. Период и форма кривой блеска постоянные. Скорость увеличения радиуса до 100 *км/сек*.

RV. Звезды типа RV Тельца. 92. Сверхгиганты. Периоды от 30 до 150 дней, амплитуда до 3^m. Спектральные классы *G*, *K*, *M*.

βC. *Звезды типа* β *Цефея. 11.* Пульсирующие гиганты, амплитуда изменения блеска $\sim 0{,}1^m$. Периоды от 2,5 до 7 *ч*. Спектр B1—B3.

δSc. *Звезды типа* δ *Щита. 5.* Переменные класса *F* с амплитудами $0{,}25^m$ и периодами до 1 дня.

αCV. *Звезды типа* α *Гончих Псов. 9.* Амплитуда изменения блеска $\sim 0{,}1^m$. Периоды от 1 до 25 дней. Спектр: *Ap*, сильные линии кремния, стронция, хрома и редкоземельных элементов. Обладают мощными магнитными полями, изменяющимися вместе с изменением блеска и спектра.

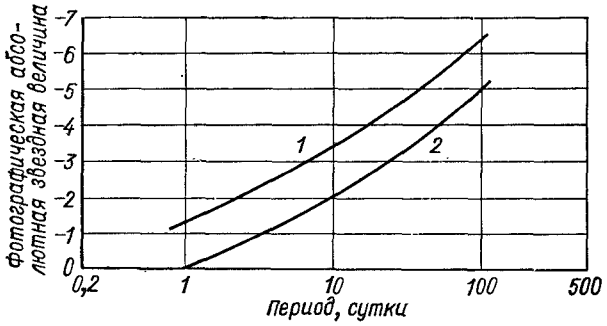


Рис. 46.3. Зависимость период — светимость для цефеид [4]:
1 — классические цефеиды (δ-Цефея); *2* — цефеиды населения II (*RR*-Лиры).

Средняя абсолютная звездная величина связана у цефеид с периодом изменения блеска. Зависимость период — светимость несколько различна для звезд, концентрирующихся к галактической плоскости (классические цефеиды), и звезд, встречающихся в шаровых скоплениях (звезды населения II).

Эруптивные переменные. Ниже приведены характерные особенности эруптивных переменных звезд. Перед названием класса стоит его условное обозначение, после названия — число объектов, зарегистрированных на 1958 г.

N. Новые звезды. 146. Карликовые горячие звезды, внезапно, за время от одного до нескольких десятков дней, увеличивающие блеск на $7—16^m$ и затем в течение нескольких лет остывающие до первоначального состояния. Вблизи максимума блеска спектр класса *A* или *F* с линиями поглощения. После достижения максимума блеска появляются широкие эмиссионные линии водорода, гелия и других элементов [3]. Скорость выбрасывания вещества от 300 до 1600 *км/сек*. Полная энергия, выделяемая за вспышку, до 10^{45} *эрг*. Частота вспышек в Галактике ~ 2 в год [1].

Ne. Новоподобные переменные. 35. Напоминают новые характером изменения блеска или спектральными особенностями.

SN. Сверхновые звезды. 7. Внезапно увеличивающие блеск на 20 и более звездных величин и затем медленно ослабевающие. Спектр характеризуется очень широкими эмиссионными полосами. После вспышки спектр O, *WC* или *WN*. Скорости сбрасывания оболочки достигают 8000 *км/сек*. Полная энергия вспышки до 10^{49} *эрг*. Частота появлений в Галактике ~ 1 вспышка за 250 лет [1].

RCB. Звезды типа R Северной Короны. 39. Звезды высокой светимости классов *F* — *K* и *R*, характеризуемые медленными непериодическими ослаблениями блеска на $1—9^m$. В минимуме блеска появляются эмиссионные линии металлов.

RW. Звезды типа RW Возничего. 590. Характеризуются быстрыми и неправильными изменениями блеска. Амплитуды достигают нескольких звездных величин. Большинство звезд связано с диффузными туманностями.

UG. Звезды типа U Близнецов. 112. Карликовые звезды, за 1—2 дня увеличивающие свой блеск на $2—6^m$, затем ослабевающие в течение нескольких десятков дней. Средняя частота вспышек от 20 до 600 дней. Строгой периодичности нет. Спектр с эмиссионными линиями HI, HeI и HeII, CaII. В максимуме блеска линии исчезают.

Список галактических новых [2] Таблица 46.15

Новая	Год вспышки	Видимая звездная величина			Спектр после вспышки	Время уменьшения блеска на 3^m, дни	Тип
		начальная стадия	максимум	конечная стадия			
Тельца (Краб)	1054	—	—6	—	Э. т.*	—	*SN* I
Кассиопеи (Тихо)	1572	—	—4,1	—	Э. т.	—	*SN* I
Змееносца (Кеплера)	1604	—	—2,2	—	—	—	*SN* I
T Возничего	1891	13	4,0	14,8	*Oe*	120	*N*
Персея-2	1901	13,5	0,2	13,3	*Oe*	12	*N*
Ящерицы	1910	13,7	4,6	14,3	*Ocon*	37	*N*
Близнецов-2	1912	15	3,5	14,6	*Oe*	34	*N*
Орла-3	1918	10,6	—1,1	10,6	*Oe*	7	*N*
Лиры	1919	16,0	6,5	15,0	*Ocon*	70	*N*
Лебедя-3	1920	15	2,0	16,1	*Oe*	14	*N*
RR Скульптора	1925	12,7	1,2	9	—	150	*N*
DQ Геркулеса	1934	14,3	1,4	13,8	—	105	*N*
CP Ящерицы	1936	15,3	2,1	14,9	—	9	*N*
Кормы	1942	17	0,2	—	*Oe*	8	*SN*?

* Э. т. — Эмиссионная туманность.

UV. Звезды типа UV. Кита. 15. Карликовые звезды спектральных классов *dM3e — dM6e*. В течение нескольких десятков секунд увеличивают блеск $1-6^m$. Полная продолжительность вспышки несколько десятков минут.

Звезды типа Z Жирафа. 15. Схожи с *UG*, но имеют периоды постоянства блеска. Амплитуды изменения блеска: от 2 до 5^m. Длительности циклов колеблются от 10 до 40 дней.

Затменно-двойные звезды [18]. Обозначение *E*. На 1958 г. зарегистрировано 2763 объекта. Двойные системы с плоскостью орбиты, близкой к лучу зрения наблюдателя. При вращении вокруг общего центра тяжести один компонент затмевает другой. Периоды изменения блеска совпадают с периодами обращения по орбите (от нескольких часов до десятков лет). Амплитуда изменения блеска может достигать нескольких звездных величин.

Пульсары

Предположительно пульсары — это карликовые или нейтронные звезды, заметно меняющие свой блеск в раднодиапазоне (наиболее изучены дециметровый и метровый диапазоны). Для некоторых пульсаров обнаружены пульсации в видимом свете и рентгеновском излучении. Периодичность пульсаций весьма велика (с погрешностью до 10^{-6}%). Замечено, что периоды мерцания пульсаров могут плавно увеличиваться на величину от 10^{-5} *сек/год* до 10^{-7} *сек/год*.

Таблица 46.16

Характеристики пульсаров, обнаруженных до 9 февраля 1970 г. [16]

Обозначения: *AP* 1541+09; *P* — пульсар; прямое восхождение $\alpha=15$ *ч* 41 *мин*; склонение 9°.

Название пульсара	Галактическая широта, *град*	Период, *сек*	Расстояние, *пс*	Длительность импульса, *мсек*
MP 0031	—07	0,940	300	25
MP 0254	—54	0,448	250	10
CP 0329	+54	0,714	670	7
MP 0450	—18	0,554	625	20
NP 0527	+21	3,745	1250	148
NP 0531	+21	0,033	1400	9,5
PSR 0628—28	—28	1,244	250	50
MP 0736	—40	0,374	2400	40

Продолжение табл. 46.16

Название пульсара	Галактическая широта, *град*	Период, *сек*	Расстояние, *пс*	Длительность импульса, *мсек*
CP 0808	+74	1,292	140	90
MP 0818	—15	1,237	—	25
AP 0823+26	+26	0,530	480	13
PSR 0833—45	—45	0,089	500	2
CP 0834	+06	1,273	320	38
MP 0835	—40	0,765	3000	20
PSR 0904+77	+77	1,579	—	<80
MP 0940	—56	0,662	3620	30
PP 0943	+08	1,093	440	24
CP 0950	+08	0,253	70	21
MP 0959	—56	1,438	2250	50
CP 1133	+16	1,188	120	43
MP 1154	—62	0,400	6750	—
AP 1237+25	+25	1,382	210	60
MP 1240	—63	0,388	5500	60
MP 1359	—50	0,690	—	20
MP 1426	—66	0,788	1500	10
MP 1449	—65	0,180	2250	5
PSR 1451—68	—68	0,263	300	25
HP 1508	+55	0,739	490	20
MP 1530	—53	1,372	500	25
AP 1541+09	+09	0,748	870	100
MP 1604	—03	0,421	—	10
PSR 1642—03	—03	0,387	825	20
MP 1706	—15	0,654	250	20
MP 1727	—50	0,835	3500	30
MP 1747	—48	0,742	1000	20
PSR 1749—28	—28	0,562	1270	4,7
MP 1818	—03	0,600	1750	20
MP 1857	—25	0,611	—	35
MP 1911	—05	0,825	1875	20
CP 1919	+21	1,337	310	40
PSR 1929+10	+10	0,227	200	10
JP 1933+16	+16	0,358	3570	—
MP 1944	+17	0,440	—	35
JP 1946	+35	0,717	—	—
AP 2015+28	+28	0,557	360	28
JP 2022	+51	0,529	—	—
PSR 2045—16	—16	1,961	280	100
JP 2113	+46	1,014	—	—
PSR 2218+47	+47	0,538	1100	30
AP 2303+30	+30	1,575	—	30

Таблица 46.17

Белые карлики [2]

Звезда	Спектр	$m_{\text{вниз}}$	$M_{\text{вниз}}$	$\lg \frac{\mathcal{M}}{\mathcal{M}_\odot}$	$\lg \frac{R}{R_\odot}$	$\lg \frac{\rho}{\rho_\odot}$
Ван Маанена	*wF8*	12,35	14,24	+0,1	—1,95	6,0
40 Эридана *B*	*wA2*	9,5	11,0	—0,37	—1,82	5,1
Сириус *B* [27]	*wA5*	10,0	11,3	—0,01	—2,11	6,328*
Процион *B*	*wF8*	10,8	13,1	—0,29	—1,9	5,4
R 627	*wA5*	14.24	13,8	—0,2	—2,3	6,7
W 1346	*wA2*	11,5	10,8	+0,4	—1,81	5,8

* Ускорение силы тяжести $4{,}5\cdot10^8$ *см/сек*^{2}. Гравитационное красное смещение, расчет 83 *км/сек*; измерено (81±6) *км/сек* [27]

Гиганты [10, 17]

Звезда	Спектр	Светимость		Температура поверхности, °К	Радиус (Солнце-1)	Плотность, $г/см^3$
		$m_{внз}$	$M_{внз}$			
Капелла	$gG1$	0,09	—0,06	5500	12	$2{,}4\cdot10^{-3}$
Арктур	$gK0$	—0,06	—0,0	4100	30	$3\cdot10^{-4}$
Альдебаран	$gK5$	1,1	—0,1	3300	60	$2\cdot10^{-5}$
Шеат	$gM5$	2,6	—1,4	2900	170	$2\cdot10^{-6}$
Бетельгейзе	$cM2$	0,73	—4,1	3100	290	$6\cdot10^{-7}$
Антарес	$cM1$	1,0	—4,6	3100	480	$3\cdot10^{-7}$
Мира	$cM7e$	—	—0,8	—	460	—
Рас-Альгети	$cM8$	—	—3,4	—	800	—

46.5. ГАЛАКТИКА И ВСЕЛЕННАЯ

Галактика [2]

Диаметр . . . . . ~25 *кпс*
Толщина . . . . . ~4 *кпс*
Масса . . . . . $\sim 1{,}1\cdot10^{11}\ \mathcal{M}_\odot$

Общая средняя плотность $\sim 7\cdot10^{-24}\ г/см^3 = 0{,}1\mathcal{M}_\odot/пс^3$
Средняя плотность в центре Галактики . . $4\mathcal{M}_\odot/пс^3$
Абсолютная звездная величина (если смотреть со стороны северного полюса Галактики). . . $M_{виз} = -20{,}5^m$
Скорости освобождения для галактического центра . . . . . 450 *км/сек*
для окрестностей Солнца . . . . . 290 *км/сек*
для границ Галактики 180 *км/сек*
Потенциальная энергия Галактики . . . . . $1{,}1\cdot10^{59}$ *эрг*

Скорость галактического вращения на разных расстояниях от центра Галактики [4]:

Расстояние, *св. лет*	Скорость, *км/сек*
5000	150
10 000	190
15 000	220
20 000	230
25 000	224
30 000	213
35 000	197
40 000	180

Плотность звездной материи в окрестностях Солнца $0{,}05\ \mathcal{M}_\odot \cdot пс^{-3} = 3{,}5\cdot10^{-24}\ г/см^3$ [1].

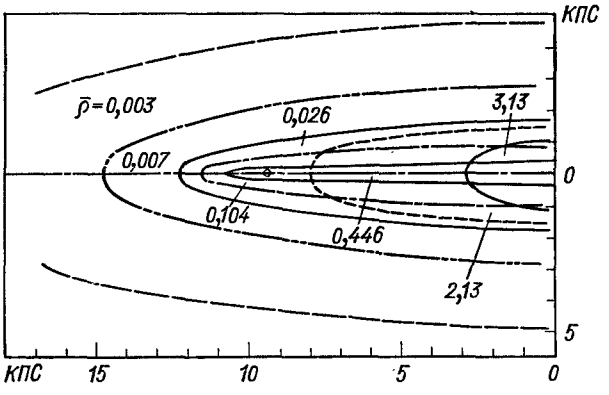


Рис. 46.4. Схематическая модель Галактики [4]. Положение Солнца отмечено кружком. Средние плотности даны в единицах плотности материи вблизи Солнца.

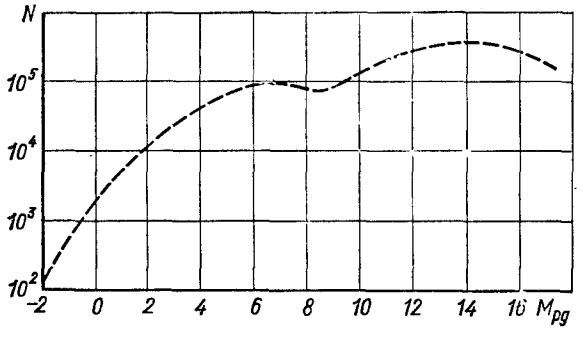


Рис. 46.5. Функция светимости [4]. По вертикальной оси отложено число звезд в кубе с ребром 1000 световых лет в окрестностях Солнца в зависимости от абсолютной звездной величины.

Таблица 46.19

Характеристнки галактнческих подсистем [3]

Подсистемы	Полутолщина однородного слоя, *пс*	Число известных объектов	Предполагаемое число объектов
Объекты, концентрирующиеся около галактической плоскости			
Долгопернодические цефеиды	44	500	$3\cdot10^4$
Звезды класса *B*	46	10 000	$1{,}5\cdot10^5$
Рассеянные звездные скопления	53	500	$3{,}3\cdot10^4$
Звезды класса *O*	58	200	$6{,}5\cdot10^3$
Темные (пылевые) туманности	100	10^4	10^8
Сверхновые звезды	—	7	—
Подсистемы промежуточной составляющей			
Новые звезды	182	100	10^6
Перемеиные тнпа *RV* Тельца	200	92	10^4—10^5
Звезды классов *R*, *N*	100—300	435	$3{,}35\cdot10^4$
Планетарные туманности	217	350	$1{,}3\cdot10^5$
Звезды класса *S*	360	90	$5\cdot10^3$
Белые карлики	400	100	$6\cdot10^9$
Долгопериодические переменные звезды	500	3000	$1{,}3\cdot10^6$

Продолжение табл. 46.19

Подсистемы	Полутолщина однородного слоя, *пс*	Число известных объектов	Предполагаемое число объектов
Объекты, составляющие сферическую часть Галактикн			
Долгопериодические переменные с пернодом $P=150-200$ *дн*	2000	300	10^5
Короткопернодические цефеиды	2000	3000	$1{,}7\cdot10^4$
Долгопериодические цефеиды тнпа *W* Девы	2000	50	$2\cdot10^4$
Субкарлнкн	2600	300	10^{11}
Шаровые звездные скоплення	3000	100	250
Все звезды в среднем	380	10^9	$1{,}2\cdot10^{11}$

В звездное население I типа входят: горячие гиганты и сверхгиганты, долгопериодические цефеиды, новые и сверхновые звезды, рассеянные скопления, водородные облака, пылевые туманности.

В звездное население II типа входят: красные карлики, красные гиганты, короткопериодические цефеиды, шаровые скоплення. Звездное население II типа образует ядра галактик и преобладает в областях, удаленных от основной плоскости спиральных галактик.

Среднее энерговыделение, отнесенное к единице массы для звездного населения для I и II типа, составляет соответственно 100 и 0,1 *эрг/(г·сек)* [3].

Межзвездная среда

Таблнца 46.20

Яркие диффузные туманности [2]

К ярким туманностям *E*-тнпа относятся туманности с эмиссионными линиями в спектре. *E*-туманности светятся вследствие возбуждения атомов светом близлежащей звезды, обычно принадлежащей к более раннему, чем *B1* спектральному классу. Яркие туманности *C*-типа отражают свет близлежащих звезд.

Туманность	Тнп	$m_{\text{внз}}$	Расстояние, *пс*	Угловой днаметр, *сек*	Плотность *атом/см³*	Масса, $\mathcal{M}_\odot=1$	Возбуждающая звезда: Спектр	Возбуждающая звезда: $M_{\text{виз}}$
Крабовидная *NGC* 1952	*E*	8,6	1050	5	1000	—	—	—
Большая туманность в Орионе *NGC* 1976	*E*	4	460	30	600	700	*Oe*	5,4
Розетка *NGC* 2237	*E*	—	1400	60	30	9000	*O5e*	7,3
Лагуна *NGC* 6523	*E*	5,8	1500	25	30	3000	*O5e*	6,0
Северная Америка *NGC* 7000	*CE*	—	800	80	10	3000	*O6*	6,0
Туманность в Плеядах *NGC* 1432	*C*	—	126	40	—	—	B5	3,0

Таблица 46.21

Параметры различных типов темиых туманностей [1]

Параметры	Глобула: I	Глобула: II	«Угольный мешок»	Большое облвко
Диаметр, *пс*	0,06	0,5	8	40
Полное поглощенне проходящего света A_{pg}, *зв. вел.*	5	1,5	1,5	1,4
Плотность вещества, ρ, *г/см³*	$>10^{-21}$	$5\cdot10^{-23}$	$3\cdot10^{-24}$	$5\cdot10^{-25}$
Масса, $\mathcal{M}_\odot=1$	$>0{,}002$	0,05	13	300

Поглощение света звезд, межзвездная пыль [2]

Поглощение света звезд вблизи галактической плоскости A_{pg}	2,0 *зв. вел./кпс*
Для звезд, свет которых не задерживается облаками A_{pg}	0,3 *зв. вел./кпс*
Средняя плотность пылинок в пространстве вблизи галактической плоскости	$1{,}3\cdot10^{-26}$ *г/см*^{3}
Масса пылинок	10^{-13} *г*
Температура пылинок	25 °К

Межзвездный газ [1]

Средняя плотность межзвездного газа $1{,}2\cdot10^{-24}$ *г/см*^{3} = 0,7 атомов водорода в 1 *см*^{3}. Химический состав межзвездного газа совпадает с общей космической распространенностью элементов.

В соответствии с состоянием межзвездного газа различают области HI и HII. В областях HI водород в основном нейтрален, а металлы ионизованы. Кинетическая температура $T \approx 90°$ К. В областях HII водород и металлы ионизованы. Кинетическая температура $T \approx 10\,000°$К.

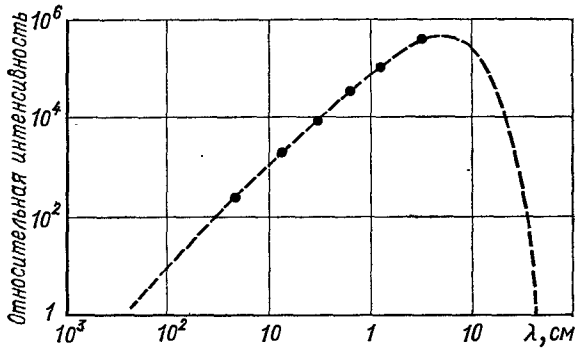


Рис. 46.6. Спектр равновесного (черного) излучения с температурой 3° К (пунктир) и измеренные значения для реликтового излучения (точки) [12, 22].

Излучение и поля в межзвездном пространстве [2]

Плотности энергии:	*эрг/см*^{3}
Реликтовое излучение [22]	$0{,}6\cdot10^{-12}$
Излучение (свет звезд)	$0{,}7\cdot10^{-12}$
Турбулентное движение газа	$0{,}5\cdot10^{-12}$
Общее галактическое вращение . . .	$1300\cdot10^{-12}$
Космические лучи	$1\cdot10^{-12}$
Магнитные поля	$4\cdot10^{-12}$
Эквивалентная температура реликтового излучения T	2,9±0,7°К
Напряженность межзвездного магнитного поля	$1\cdot10^{-5}$ *гс*

Внегалактические туманности (галактики) [1]

Согласно классификации Хаббла, галактики делятся на правильные и неправильные. Правильные галактики подразделяются [19] на спиральные *S* и эллиптические *E*. В соответствии со степенью развития спиральной структуры спиральные галактики имеют подтипы *So*, *Sa*, *Sb*, *Sc* для галактик с центральным ядром и

Таблица 46.22

Распределение галактик по абсолютным величинам [13]

Абсолютная звездная величина	Количество галактик *S* и *Ir* в 1000 *Мпс*^{3}	Количество галактик *E* в 1000 *Мпс*^{3}
От —21 до —22	0,025	—
От —20 до —21	0,52	0,091
От —19 до —20	6,9	1,7
От —18 до —19	19	5,5
От —17 до —18	30	6,9
От —16 до —17	55	9,1
От —15 до —16	155	—

Таблица 46.23

Члены местной группы галактик [19] и некоторые ярчайшие галактики [13]

Галактика	Тип	Расстояние Δ, *Мпс*	Звездная величина		Угловые размеры, *мин*	Диаметр, *кпс*	Масса $\mathcal{M}$, $10^9\,\mathcal{M}_\odot$	Лучевая скорость, *км/сек*
			видимая	абсолютная				
Галактика	*Sbc*	—	—	—19	—	30	110 [2]	—
Большое Магелланово Облако	*Ir* I	0,048	0,63	—18,1	10°×9,5°	8,4	6	+280 [1]
Малое Магелланово Облако	*Ir* I	0,048	2,8	—16,0	4°×2°	3,9	13	—167 [2]
Туманность Андромеды, *M*31, *NGC* 224	*Sb*	0,69	4,4	—20,3	197×92	40	340	—35
NGC 205 } Спутники *M*31	*E5p*	0,69	8,9	—15,8	26×16	5,2	1,6 [1]	—8
*M*32, *NGC*221 } Спутники *M*31	*E2*	0,69	9,1	—15,6	12×8	2,4	1,8	+17
Система в Скульпторе	*dE*	0,11	9,2	—11,2	—	—	0,002	—
Система в Печи	*dE*	0,23	9,1	—12,9	60	4,0	0,02	+40 [2]
*M*81, *NGC* 3031 } Группа Большой	*Sb*	1,54	7,9 [1]	—18,7	16×10	6 [1]	150	+80 [2]
*M*82, *NGC* 3034 } Медведицы	*Ir* I	3,3	9,3 [1]	—16,8	8 [1]	2,7 [1]	15	+390 [1]
NGC 55	*Ir* I	1,9 [2]	7,1 [2]	—19,2 [2]	25 [1]	—	40	+180 [2]
NGC 253	*Sb*	2,2 [2]	7 [2]	—20 [2]	22 [1]	8 [1]	30	—70 [2]
NGC 5236	*Sc*	4,0 [2]	7,6 [2]	—19,1	10×8	12 [2]	—	+320 [2]
Сомбреро [2]	*Sa*	4,4	8,1	—20,4	—	8	130	1020
NGC 4594	*Sa*	5,0	9,0 [1]	—20,7	7×1,5	3,0	50	1130 [1]
NGC 4486 [2]	*E0*	11	8,9	—21.5	—	13	1000	1220 [2]

SBo, *SBa*, *SBb*, *SBc* для галактик с ядром, находящимся посередине перемычки, соединяющей спиральные ветви. Эллиптические галактики делятся на подтипы от *E0* до *E7* по степени увеличения сплюснутости эллипса. Неправильные галактики обозначаются *Ir*. Индекс I приписывается неправильным галактикам клочковатой формы, не имеющим ядра, индекс II приписывают неправильным галактикам неразрешенной структуры (на звезды, скопления, области *H*II и т. п.). При наличии некоторых отклонений в структуре галактики от типичных свойств добавляется индекс *p* (например, *ESp*).

Пространственная плотность галактик . . . . . 3 Mnc^{-3}

Вклад излучения галактик в яркость неба на 1 *кв·град* . . . . $0{,}5\,(m_{pg} = 10)$

Средняя масса галактик . . . . . $\sim 5 \cdot 10^{10} \mathcal{M}_\odot = 10^{43}$ *г*

Количество звезд в галактиках . . $10^9 - 10^{11}$

Зависимость масса $\mathcal{M}_G$ —светимость M_{pgG} для галактик:

$$\lg \mathcal{M}_G \approx \lg \mathcal{M}_\odot - 0{,}4\, M_{pgG} + 3{,}16.$$

Вселенная

Внегалактические туманности имеют тенденцию удаляться от нашей Галактики. Скорость удаления v, *км/сек*, связана с расстоянием до галактики: $v = HR$, где H — постоянная Хаббла, R — расстояние, *Mnc* (выражение справедливо при $v \ll c$)

$$H = 75\ (км/сек)/Mnc = 2{,}44 \cdot 10^{-18}\ сек^{-1}\ [19]$$

Возраст Вселенной [25] . . . . . $1/H = 13 \cdot 10^9$ лет

Средняя плотность материи [1] . . . $\rho = 10^{-29}$ *г/см*^{3}

Численность галактик в наблюдаемой части Вселенной [1] . . . . . $\sim 10^{10}$

Масса наблюдаемой части Вселенной [2] . . . . . $10^{54} - 3 \cdot 10^{55}$ *г*

Плотность излучения [1] . . . . . $4 \cdot 10^{-13}$ *эрг/см*^{3}

46.6. КОСМИЧЕСКОЕ РАДИОИЗЛУЧЕНИЕ

Поверхностная интенсивность радиоизлучения неба J связана с эквивалентной температурой T и частотой ν [1]:

$$J_\nu = 3{,}0715 \cdot 10^{-40}\, T\nu^2\ вт/(м^2 \cdot стер. \cdot гц)$$

(T — в градусах Кельвина, ν — в герцах).

Яркость радиосвечения неба имеет хорошо выраженный максимум в направлении на галактический центр. Яркие дискретные радиоисточники, как правило, не совпадают с яркими оптическими звездами.

Излучение межзвездного водорода ($\nu = 1420$ *Мгц*) тоже концентрируется к плоскости Млечного Пути, но резкий максимум в направлении на центр Галактики отсутствует [8].

Средняя эквивалентная температура небесной сферы на частоте 100 *Мгц* составляет 700° К [1].

Излучение от полной небесной сферы на частоте 100 *Мгц*

$$W = 2{,}7 \cdot 10^{-20}\ вт/(м^2 \cdot сек)\ [1].$$

Спектры различных источников характеризуются спектральными индексами α или n, причем $\alpha + n = 2$:

$$J_\nu \sim \nu^\alpha \sim \lambda^{n-2}; \quad T \sim \nu^{\alpha-2} \sim \lambda^n.$$

Значения α и n для $\nu \approx 100$ *Мгц* [2]:

Источники	α	n
Галактические (в среднем)	—0,71	2,71
Внегалактические	—1,05	3,05
Неидентифицированные	—1,21	3,21
Общее галактическое излучение	—0,45	2,45
Участки холодного неба	—0,60	2,60

Число радиоисточников N в единице телесного угла дающих поток больше F при $\nu = 100$ *Мгц* [2]:

F, *вт/(м*^{2} *· гц)*	10^{-23}	10^{-24}	10^{-25}
$\lg N$	—1	+0,3	+2,1

Таблица 46.24

Спектральный состав радиоизлучения различных участков неба [26]

$T_А$ — эквивалентная температура участка неба близкого к галактическому центру. $T_Б$ — температура участка на экваторе. Участок В расположен в холодной области неба вдали от галактического экватора.

ν, *Мгц*	$T_А$, °К	$T_Б$, °К	$T_В$, °К
18,3	$2 \cdot 10^5$	75 000	50 000
40	67 000	900	8500
64	21 000	3100	2200
90	7700	—	—
100	6000	720	490
160	2180	—	—
200	1190	120	70
480	145	16,6	—
1200	17,9	—	—
3000	2,77	—	—

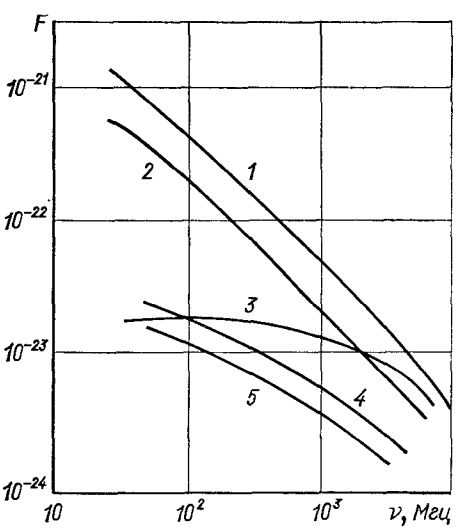


Рис. 46.7. Спектральный состав наиболее мощных дискретных источников радиоизлучения [26]:
1 — Кассиопея А; *2*— Лебедь А; *3* — Телец А; *4* — Центавр А; *5* — Дева А.
F — поток излучения, *вт/(м*^{2}*· гц)*.

Таблица 46.25

Некоторые галактические источники радиоизлучения [8]

Источник	Расстояние Δ, *кпс*	Угловые размеры	α для частоты ν = 100 *Мгц*	Поток F, 10^{-26} *вт/(м²гц)*		Описание
				ν=100 *Мгц*	ν=1000 *Мгц*	
Лебедь *X*	~1,5	5° [1]	—0,2 [1]	4900*	—	Тепловой источник, область *H* II
Туманность Омега (*NGC* 6618)	1,7	0, 45°	—	1300*	—	Тепловой источник, область *H* II
Туманность Северная Америка	0,9	2, 5°	—	550*	—	Тепловой источник, область *H* II
Туманность Розетка (*NGC* 2244)	1,4	1, 33°	—0,17	500	320	Тепловой источник, область *H* II
Кассиопея А	3,4	3′×4′	—0,8	19 000	3100	Остатки сверхновой II типа 369 г.
Крабовидная туманность (*M*1)	1,1	3′,5××5′,5	—0,26	1700	1100	Остатки сверхновой I типа 1054 г.
Кассиопея В	0,36	6′	—0,7	250	56	Остатки сверхновой I типа Тихо Браге 1572 г.
Сверхновая Кеплера	1,0	2,5′	—	80	—	Остатки сверхновой I типа 1604 г.

* Приведено для частоты ν = 22 *Мгц*.

Таблица 46.26

Внегалактические источники радиоизлучения [8]

Источник	Расстояние Δ, *Мпс*	$m_{виз}$	Угловые размеры		α для частоты ν=100 *Мгц*	Поток F, для ν=100 *Мгц*, 10^{26} *вт/(м²·гц)*	W радио [9], *эрг/сек*	Описание
			оптические	радио				
Лебедь А	220	17,9	2″	85″	—0,68	11 800	10^{44}	$M = -21,1$. Сталкивающиеся галактики
Дева А (*NGC* 4486)	11	9,9	11″	11″	—0,73	1780	$8 \cdot 10^{40}$	$M = -20,5$. Сферическая галактика с голубым выбросом
Центавр А (*NGC* 5128)	4	6,5	20″	3°×8°	—0,66	1750	10^{40}	$M = -21,3$. Столкновение эллиптической и спиральной галактик
Геркулес А	340	17,6	0,5″	2,5″	—0,8	580	$4 \cdot 10^{43}$	Двойная галактика с линиями излучения
Гидра А	210	15,9	0,5″	1″	—	400	—	То же
Персей А (*NGC* 1275)	70	13,3	2,4″	2,4″	—0,8	130	$3 \cdot 10^{41}$	Сталкивающиеся галактики

Квазары

Квазары — это квазизвездные внегалактические источники, радиоизлучение которых подобно радиоизлучению наиболее мощных радиогалактик. Квазары характерны голубоватым цветом и яркими линиями в спектре, имеющими большое красное смещение [19]. Обозначение : *QSS*.

Таблица 46.27

Характеристики некоторых квазаров [13]

При оценке расстояний Δ использовалось значение постоянной Хаббла $H=75$ *км/(сек·Mnc)*. Расстояние оценивается из скорости разбегания v_r; $\Delta = v_r/H$, а скорость разбегания оценивается по красному смещению $Z = \Delta\lambda/\lambda$ из графика рис. 46.8.

Квазар	$Z = \Delta\lambda/\lambda$	v_r, 10^3 *км/сек*	Δ, *Mnc*	Угловые размеры
3C 273	0,16	49 [19]	650	$<0{,}2''$ [19]
3C 48	0,37	90	1200	$<1'$
3C 147	0,55	130	1750	$<1'$
3C 254	0,734	155	2000	—
3C 245	1,029	180	2400	—
3C 287	1,055	185	2500	—
3C 286	1,86	230	3100	$<1'$
3C 9	2,012	240	3200	

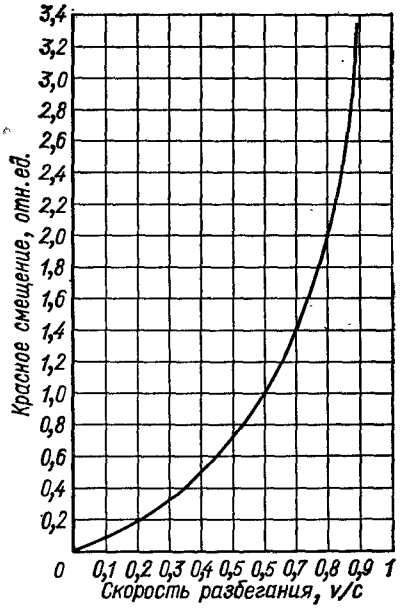


Рис. 46.8. Красное смещение удаленных галактик [21].

46.7. КОСМИЧЕСКИЕ ПОЛЕТЫ И ИСКУССТВЕННЫЕ СПУТНИКИ ЗЕМЛИ

Время существования спутника массой 100 *кг* и диаметром 1 *м* на круговых орбитах [23]:

Высота круговой орбиты, *км*	200	250	300	350	400	500
Время существования, сутки	0,4	4	20	65	160	1010

	Квазар 3C 273:	Квазар 3C 48:
Яркость M [13]	$-26{,}5$	-25
$m_{\text{внз}}$ [21]	13	16
Энергия излучения [13], *эрг/сек*:		
оптического	$2\cdot10^{46}$	$5\cdot10^{45}$
радио	10^{45}	10^{45}
Размер, *пс*	<500 [19]	<5000 [13]
Масса [21], $M_\odot$	$2\cdot10^5$	$2\cdot10^6$

Идентифицированные линии [13, 21, 24]:

Mg II (2798 Å);	Mg II (2798 Å);
H_δ (4102 Å); H_γ (4340 Å);	Ne V (2975 Å);
	Ne V (3346 Å);
H_β (4861 Å); H_α (6563 Å);	Ne V (3426 Å);
O III (5007 Å)	O II (3727 Å);
	Ne III (3869 Å)

Таблица 46.28

Время существования, сутки, спутника массой 100 *кг* и диаметром 1 *м* на эллиптических орбитах [23]

Высота перигелия, *км*	Высота апогея, *км*				
	500	700	1000	1300	1600
200	9	18	37	58	82
230	25	52	102	165	237
260	53	116	238	370	535
300	114	260	545	890	1280
400	410	1120	2630	4450	6600

Таблица 46.29

Периоды обращения спутников Земли

Период обращения спутника зависит от средней высоты полета. В случае движения по круговой орбите скорость движения спутника постоянна и равна первой космической скорости на данной высоте [14].

Высота, км	Круговая скорость, м/сек	Период обращения, ч	Высота, км	Круговая скорость, м/сек	Период обращения, ч
0	7909	1,41	1 690	7032	2,00
250	7759	1,49	2 000	6901	2,12
500	7617	1,58	5 000	5921	3,35
750	7482	1,66	10 000	4935	5,78
1000	7354	1,75	35 800	3072	23,935
1500	7116	1,93			

Таблица 46.30

Значения минимально необходимых скоростей для полета к планетам [14] (высота участка выведения 200 км)

Планета	Скорость в конце участка выведения, км/сек	Продолжительность полета до встречи с планетой, год	Планета	Скорость в конце участка выведения, км/сек	Продолжительность полета до встречи с планетой, год
Меркурий	13,31	0,29	Сатурн	15,03	6,04
Венера	11,25	0,40	Уран	15,73	16,0
Марс	11,35	0,71	Нептун	16,00	30,6
Юпитер	14,05	2,72			

46.8. КОСМИЧЕСКАЯ РАСПРОСТРАНЕННОСТЬ ЭЛЕМЕНТОВ

Атомные массы элементов, приведенные в табл. 46.31, даны в шкале, в которой за единицу принята 1 *а. е. м.*, равная массе 1/12 атома ^{12}C (см. разд. 1.6). Множитель перехода к физической шкале равен 1,000300. В последней колонке приведен десятичный логарифм космической распространенности элементов [7]. Все значения даны относительно водорода, для которого принято $\lg N = 12{,}00$. Значения даны для числа атомов естественной смеси изотопов.

Таблица 46.31

Космическая распространенность элементов

Атомный номер	Элемент	Атомная масса, *а. е. м*	lg *N*
1	H	1,00797	12,00
2	He	4,0026	11,21
3	Li	6,639	3,50
4	Be	9,0122	2,80
5	B	10,811	2,88
6	C	12,01115	8,60
7	N	14,0067	8,05
8	O	15,9994	8,95
9	F	18,9984	6,0
10	Ne	20,183	8,70
11	Na	22,9898	6,30
12	Mg	24,312	7,40
13	Al	26,9815	6,22
14	Si	28,086	7,50
15	P	30,9738	5,40
16	S	32,064	7,35
17	Cl	35,453	6,25
18	Ar	39,948	6,88
19	K	39,102	4,82
20	Ca	40,08	6,19
21	Sc	44,956	2,85
22	Ti	47,90	4,89
23	V	50,942	3,82
24	Cr	51,996	5,38
25	Mn	54,9380	5,12
26	Fe	55,847	6,57
27	Co	58,9332	4,75
28	Ni	58,71	5,95
29	Cu	63,54	4,50
30	Zn	65,37	4,28
31	Ga	69,72	2,45
32	Ge	72,59	3,20
33	As	74,9216	2,11
34	Se	78,96	3,33
35	Br	79,909	2,65
36	Kr	83,80	2,21
37	Rb	85,47	2,35
38	Sr	87,62	2,70
39	Y	88,905	2,45
40	Zr	91,22	2,50
41	Nb	92,906	1,50
42	Mo	95,94	1,88
43	Tc	99	—0,6 [1]
44	Ru	101,07	1,44
45	Rh	102,905	0,8
46	Pd	106,4	1,26
47	Ag	107,870	0,82
48	Cd	112,40	1,45
49	In	114,82	0,75
50	Sn	118,69	1,57
51	Sb	121,75	0,95
52	Te	127,60	2,05
53	J	126,9044	1,35
54	Xe	131,30	2,06
55	Cs	132,905	1,16
56	Ba	137,34	2,08
57	La	138,91	1,10
58	Ce	140,12	1,29
59	Pr	140,907	0,66
60	Nd	144,24	1,36
61	Pm	147	0,2 [1]
62	Sm	150,35	0,89
63	Eu	151,96	0,48
64	Gd	157,25	1,05

Продолжение табл. 46.31

Атомный номер	Элемент	Атомная масса, *а. е. м.*	lg *N*
65	Tb	158,924	0,25
66	Dy	162,50	1,08
67	Ho	164,930	0,39
68	Er	167,26	0,84
69	Tm	168,934	0,08
70	Yb	173,04	0,78
71	Lu	174,97	0,06
72	Hf	178,49	0,4
73	Ta	180,948	0.75
74	W	183,85	0,6
75	Re	186,2	0,9
76	Os	190,2	1,4
77	Ir	192,2	1,2
78	Pt	195,09	1,7
79	Au	196,967	0,66
80	Hg	200,59	0,75
81	Tl	204,37	0,55
82	Pb	207,19	1,50
83	Bi	208,980	0,5
84	Po	210	—
85	At	211	—
86	Rn	222	—10,3 [1]
87	Fr	223	—
88	Ra	226,12	—5,2,[1]
89	Ac	227	—9,6 [1]
90	Th	232,038	0,00
91	Pa	231	—7,6 [1]
92	U	238,03	—0,30
93	Np	237	—
94	Pu	242	—

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Аллен К. У.** Астрофизические величины. Пер. с англ. М., Изд-во иностр. лит., 1960.
2. **Allen C. W** Astrophysical Quantities. 2nd ed., Lond., Univ. of London, 1963.
3. **Курс** астрофизики и звездной астрономии. Под ред. А. А. Михайлова. М., «Наука», т. 2, 1962; т. 3, 1964; т. 1, 1973.
4. **Бок Б., Бок П.** Млечный путь. Пер. с англ. М., Физматгиз, 1959.
5. **Франк-Каменецкий Д. А** Физические процессы внутри звезд. М., Физматгиз, 1959.
6. **Аллер Л.** Астрофизика. Пер. с англ. М., Изд-во иностр. лит., 1955.
7. **Аллер Л.** Распространенность химических элементов. Пер. с англ. М., Изд-во иностр. лит., 1963.
8. **Стайнберг Ж., Леку Ж.** Радиоастрономия. Пер. с франц. М., Изд-во иностр. лит., 1963
9. **Смит Г.** Радиоастрономия. Пер. с англ. М., Изд-во иностр. лит., 1962.
10. **Рессел Г. Н., Дэган Р. С., Стюарт Д. К.** Астрономия. Пер. с англ. М.—Л., ОНТИ, 1935.
11. **Справочник** по космонавтике. Под ред. Н. Я. Кондратьева и В. А. Одинцова. М., Изд-во Мин-ва обороны СССР, 1966.
12. **Корец М. А.** «Природа», 1966, т. 11, с. 54; 1968, т. 4, с. 119.
13. **Агекян Т. А.** Звезды, галактики, Метагалактика. М., «Наука», 1966
14. **Александров С. Г., Федоров Р. Е.** Советские спутники и космические корабли. М., Изд-во АН СССР, 1961.
15. **«Правда»**, 8 сентября 1972 г.; **Маров М. Я.** «Природа», 1972, т. 10, с. 9.
16. **Корец М. А., Понизовский З. Л.** «Природа», 1970, т. 7, с. 35.
17. **Гольдберг Л., Аллер Л.** Атомы, звезды и туманности. М. — Л., Гостехиздат, 1948.
18. **Кукаркин Б. В. и др.** Общий каталог перемеиных звезд. М., Изд-во АН СССР, 1958.
19. **Воронцов-Вельямиов Б. А.** Внегалактическая астрономия. М., «Наука», 1972
20. **«Природа»**, 1971, т. 1, с. 92.
21. **Гринштейн Д. Л.** В сб.: «Астрофизика». Пер. с англ, М., «Наука», 1967, с. 152.
22. **Гинзбург В. Л.** «Наука и жизнь», 1968, т. 3, с. 50.
23. **Охоцимский Д. Е.** «Успехи физ. наук», 1957, т. 58, с. 33.
24. **Ефремов Ю. Н.** «Природа», 1964, т. 2, с. 32.
25. **Бербидж М., Бербидж Д.** См. [21], с. 169.
26. **Шкловский И. С.** Космическое радиоизлучение. М., Физматгиз, 1956.
27. **«Природа»**, 1972, т. 9, с. 104.
28. **Коидратьев К. Я.** Погода и климат на планетах. М., «Знание», 1975.

ГЛАВА 47

ГЕОФИЗИКА

47.1. ОБЩИЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ ЗЕМЛИ

Фигура Земли

В 1967 г. на съезде Международной Ассоциации Геодезии в Швейцарии была принята «Геодезическая система 1967» со следующими характеристиками Земли:

Экваториальный радиус Земли	$a = 6378160$ *м*
Геоцентрическая гравитационная постоянная Земли (включая атмосферу)	$GM = 398603 \cdot 10^9$ *м²/сек²*
Динамический коэффициент формы Земли	$J = 0{,}0010827$
Угловая скорость вращения Земли	$\omega = 7{,}2921151467 \times 10^{-5}$ *рад/сек*
Отношение массы атмосферы к массе Земли . . .	$\mu_a = 0{,}000001$

Этой системе соответствуют следующие параметры Земли:

Геометрические

Большая полуось	$a = 6378160$ *м*
Малая полуось	$b = 6356774{,}5161$ *м*
Линейный эксцентриситет .	$E = 521864{,}6732$ *м*
Полярный радиус кривизны	$c = 6399617{,}4290$ *м*

e — первый эксцентриситет	$e^2 = 0{,}00669460532856$
e' — второй эксцентриситет	$e'^2 = 0{,}00673972512832$
Сжатие	$f = (a-b)/a = 0{,}00335292371299$
Обратное сжатие	$1/f = 298{,}247167427$
Средний радиус	$R_1 = (2a+b)/3 = 6371031{,}5054$ *м*
Радиус сферы равной площади	$R_2 = 6371029{,}9148$ *м*
Радиус сферы равного объема	$R_3 = 6371023{,}5234$ *м*

Физические

Нормальный потенциал эллипсоида	$U_0 = 6263703052{,}3\ \frac{см}{сек^2}$ *м*
Коэффициенты сферических гармоник разложения потенциала в ряд:	
$J_2 = 0{,}0011827;$	$J_6 = 0{,}00000000608516$
$J_4 = -0{,}00000237126440;$	$J_8 = -0{,}00000000001428$
Нормальное ускорение силы тяжести на экваторе . .	$\gamma_e = 978{,}03184558$ *см/сек²*
Нормальное ускорение силы тяжести на полюсе . . .	$\gamma_p = 983{,}21772792$ *см/сек²*
$f^* = (\gamma_p - \gamma_e)/\gamma_e = 0{,}00530236552330$	
$k = (b\gamma_p - a\gamma_e)/(a\gamma_e) = 0{,}00193166338321$	

В СССР в 1946 г. принят эллипсоид Красовского с параметрами:

Экваториальный радиус . .	$a = 6378245$ *м*
Полярный радиус	$b = 6356863$ *м*
Сжатие	$f = 1/298{,}3$
Площадь поверхности эллипсоида	$5{,}10 \cdot 10^8$ *км²*
Объем эллипсоида	$1{,}083 \cdot 10^{12}$ *км³*
Средний радиус равновеликой сферы	$R_1 = 6371110$ *м*
Средняя плотность Земли .	$\rho = 5{,}517$ *г/см³*
Масса Земли, имеющей плотность ρ, ...	$M = 5{,}975 \cdot 10^{27}$ *г*

Строение Земли

Форма Земли, близкая к эллипсоиду вращения, указывает на то, что вещество Земли находится в гидростатическом равновесии по отношению к действующим на него силам (притяжения и центробежным), т. е. ведет себя по отношению к длительно действующим силам как жидкое тело [3, 4]. По оценкам, вязкость Земли равна 10^{23} *пз*.

В то же время модуль сдвига, определенный для Земли в целом по кратковременным воздействиям (землетрясения, приливы и перемещения масс в атмосфере и т. п.), составляет около $15 \cdot 10^{11}$ *дин/см²*. Таким образом, земной шар является вязко-упругим телом с периодом релаксации $\tau \approx 10^{10}$ *сек*.

Упругие свойства внутри Земли изменяются на некоторых определенных глубинах скачком и плавно в пределах слоев, разделеиных этими границами. Важнейшими границами являются поверхность Мохоровичича, 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: ядро, мантию и кору. Кора обладает наибольшей жесткостью, мантия характеризуется высокой вязкостью, а ядро иаходится в состоянии, близком к жидкому, и реагирует лишь на продольные волны изменением своего объема. Внутри трех главных зон земного шара имеются менее четко выражеиные границы.

Внутреннее строеиие Земли оцеиивается по известной ее массе, моменту иперции земного шара и на основе изучения упругих волн от землетрясений [4]. Получено, что плотиость вещества в центре Земли $\rho_ц \geqslant 12{,}2$ *г/см³* и ядро Земли отделено от вышележащих слоев на глубиие 2900 *км* резким скачком плотности, порядка 4 *г/см³*. Скачкообразные изменения плотности с глубиной могут быть вызваны изменением как вещественного состава пород, так и их фазового состояния.

Кора коитинентов в 3—10 раз толще коры океана [5]. Толщина коры коитиеитов различна на платформах (30—40 *км*) и в геосиниклиналях (40—80 *км*). В зоиах самых высоких гор Памира и Гималаев она достигает 70—80 *км*. Нижняя граница коры — граница Мохоровичича M — в этих областях образует корни гор, которые глубоко (на 30—40 *км*) по сравнению с платформеннными равнинными районами внедряются в мантию. Кора океанов — тонкая, около 4—8 *км*. Граница M залегает здесь иа глубине 10—15 *км*. Разность глубин границы M на коитиеитах и в океанах составляет 20—50 *км*. Средняя плотность коры иа коитинентах 2,7 — 2,8 *г/см³*, под океанами — 2,9 *г/см³*. Плотность верхней маитии 3,3—3,4 *г/см³*. Кора как бы плавает в более тяжелой маитии. На континентах поверхность мантии образует впадины, в океанах — огромные выступы. Земная кора континентов и океанов различается по значениям скоростей распространения упругих волн. Кора океанов не содержит слоев со скоростью распространеиия продольных воли ~6 *км/сек*, характерных для коры континентов.

В земиой коре различают два главных слоя: осадочиый, состоящий из пород, залегающих почти горизонтально, и консолидированиый, или кристаллический. Скорости распространения упругих волн в осадочных породах имеют широкие пределы, но в толстых слоях обычно не превышают 5 *км/сек*. Консолидированной части коры свойствеины скорости свыше 6 *км/сек* (на коитиеитах в верхней части коисолидированиой коры скорости близки к 6 *км/сек*, в нижней — к 7 *км/сек*; на океанах 6,5—7 *км/сек*).

Суммариая масса [6] главных элементов земной коры, которая делится иа литосферу, гидросферу, биосферу и атмосферу, распределяется следующим образом:

Элемент земной коры	Масса, 10^{15} *т*
Литосфера	2300
Гидросфера	1644
Атмосфера	5,1
Биосфера	0,01

47.2. ЛИТОСФЕРА

Состав

Лятосфера состоит из осадков и кристаллических пород. В пределах литосферы различают [6] два резко различных региона: глубинная океаническая область (площадь 268 млн. *км²*, средняя глубина ниже уровня моря 4, 5*км*, мощность слоя 6 *км*) и область континентального щита (площадь 105 млн. *км²*, средняя высота над уровнем моря 0,75 *км*, мощность 35,05 *км*). Различают две переходные области, химически промежуточные между составом этих регионов: область молодых складчатых поясов (площадь 42 млн. *км²*) и субокеаническую область (площадь 93 млн. *км²*). Остающиеся 2 млн. *км²* суши в осиовном представляют собой вулканические острова.

Таблица 47.1

Плотность, сила тяжести и давление внутри Земли [4]

Глубина, *км*	Плотность ρ, *г/см³*	Сила тяжести *g*, *см/сек²*	Давление *P*, 10^{12} *дин/см²*
0	2,76	980	0,000
33	2,85	983	0,009
33	3,32	983	0,009
80	3,36	984	0,025
80	3,87	984	0,025
200	3,94	983	0,071
400	4,06	981	0,149
800	4,30	977	0,313
1200	4,52	974	0,485
2400	5,13	1010	1,056
2900	9,74	1068	1,330
3600	10,72	913	2,02
4800	11,87	632	3,06
5400	16,16	457	3,53
6000	17,65	184	3,85
6371	17,90	0	3,92

Таблица 47.2

Космогонический возраст Земли [3]

Использованный метод	Оценка возраста, млн. лет	Начальные условия
По приливному трению	2000—4000	Луна на ближайшем расстоянии от Земли
По содержанию натрия в океанах	>180	Образование океанов
По осадконакоплению	>350	То же
По солнечному излучению	>20	Образование Солнца
По температуре в земной коре	>20	Образование Земли
По радиоактивности горных пород	>3000	Кристаллизация древних пород
По отношению свинец/уран в земной коре	<4000	Образование земной коры
По содержанию ^{235}U	<5000	То же
По содержанию свинцовых руд	4500 ± 300	» »

Таблица 47.3

Абсолютная шкала геологического летоисчисления [2]

Эра	Эпоха	Млн. лет назад
Кайнозой	Новейшая	0—10 000 лет
	Плейстоцен	10
	Плиоцен	15
	Миоцен	30
	Олигоцен	40
	Эоцен	50
	Палеоцен	60

Продолжение табл. 47.3

Эра	Эпоха	Млн. лет назад
Мезозой	Верхнемеловая	80
	Нижнемеловая	125
	Юрская	160
	Триасовая	200
Палеозой	Пермская	250
	Пенсильванская	280
	Миссисипская	310
	Девонская	350
	Силурийская	410
	Ордовикская	470
	Кембрийская	550
Протерозой	Позднедокембрийская	$1{,}6\cdot10^3$
Архей		$3{,}6\cdot10^3$
	Породы до образования земной коры	$4{,}5\cdot10^3$

Таблица 47.4

Средний химический состав литосферы [5]

Соединение	Масса, 10^{18} *т*	Содержание, %	Соединение	Масса, 10^{18} *т*	Содержание, %
SiO_2	13 050	55,2	Fe_2O_3	661	2,8
Al_2O_3	3 629	15,3	K_2O	452	1,9
CaO	2 082	8,8	TiO_2	385	1,6
FeO	1 381	5,8	P_2O_5	62,0	0,3
MgO	1 234	5,2	MnO	42,6	0,2
Na_2O	682	2,9			

Таблица 47.5

Основные физические свойства горных пород [7]

Свойство	Пределы значений для горных пород	
	магматических и метаморфических	осадочных
Плотность, *г/см³*	2,5—3,3	1,9—2,9
Пористость, %	до 10	до 40
Магнитная восприимчивость, 10^{-6} ед. СГСМ	100—4000	до 600
Остаточное намагничивание, 10^{-6} ед. СГСМ	до 4000	—
Модуль Юнга, 10^{11} *Г/см²*	5—30	2,5—12
Коэффициент Пуассона	0,21—0,28	0,23—0,27
Скорость распространения продольных колебаний, *км/сек*	4,9—10,1	0,5—5,9

Продолжение табл 47.5

Свойство	Пределы значений для горных пород	
	магматических и метаморфических	осадочных
Удельное электрическое сопротивление, *ом·м*	400—100 000	0,3—5000
Коэффициент теплопроводности, *ккал/(м·ч·град)*	0,1—2,5	0,9—2,6
Удельная теплоемкость, *кал/(г·град)*	0,12—0,28	0,16—0,23

Таблица 47.6

Распространенность химических элементов в земной коре [8, 9]

Атомный номер	Элемент	Массовое содержание, %	Атомный номер	Элемент	Массовое содержание, %
1	Водород	1,00	42	Молибден	$1\cdot10^{-3}$
2	Гелий	$1\cdot10^{-6}$	44	Рутений	$5\cdot10^{-6}$
3	Литий	$5\cdot10^{-3}$	45	Родий	$1\cdot10^{-6}$
4	Бериллий	$4\cdot10^{-4}$	46	Палладий	$5\cdot10^{-6}$
5	Бор	$5\cdot10^{-3}$	47	Серебро	$5\cdot10^{-6}$
6	Углерод	0,35	48	Кадмий	$5\cdot10^{-4}$
7	Азот	0,04	49	Индий	$1\cdot10^{-5}$
8	Кислород	49,13	50	Олово	$8\cdot10^{-3}$
9	Фтор	0,08	51	Сурьма	$5\cdot10^{-5}$
10	Неон	$5\cdot10^{-7}$	52	Теллур	$1\cdot10^{-6}$
11	Натрий	2,40	53	Иод	$1\cdot10^{-4}$
12	Магний	2,35	54	Ксенон	$3\cdot10^{-9}$
13	Алюминий	7,45	55	Цезий	$1\cdot10^{-3}$
14	Кремний	26,00	56	Барий	0,05
15	Фосфор	0,12	57	Лантан	$6,5\cdot10^{-4}$
16	Сера	0,10	58	Церий	$2,9\cdot10^{-3}$
17	Хлор	0,20	59	Празеодим	$4,5\cdot10^{-4}$
18	Аргон	$4\cdot10^{-4}$	60	Неодим	$1,7\cdot10^{-3}$
19	Калий	2,35	62	Самарий	$7\cdot10^{-4}$
20	Кальций	3,25	63	Европий	$2\cdot10^{-5}$
21	Скандий	$6\cdot10^{-4}$	64	Гадолиний	$7,5\cdot10^{-4}$
22	Титан	0,61	65	Тербий	$1\cdot10^{-4}$
23	Ванадий	0,02	66	Диспрозий	$7,5\cdot10^{-4}$
24	Хром	0,03	67	Гольмий	$1\cdot10^{-4}$
25	Марганец	0,10	68	Эрбий	$6,5\cdot10^{-4}$
26	Железо	4,20	69	Тулий	$1\cdot10^{-4}$
27	Кобальт	$2\cdot10^{-3}$	70	Иттербий	$8\cdot10^{-4}$
28	Никель	0,02	71	Лютеций	$1,7\cdot10^{-4}$
29	Медь	0,01	72	Гафний	$4\cdot10^{-4}$
30	Цинк	0,02	73	Тантал	$2,4\cdot10^{-5}$
31	Галлий	$1\cdot10^{-4}$	74	Вольфрам	$7\cdot10^{-3}$
32	Германий	$4\cdot10^{-4}$	75	Рений	$1\cdot10^{-7}$
33	Мышьяк	$5\cdot10^{-4}$	76	Осмий	$5\cdot10^{-6}$
34	Селен	$8\cdot10^{-5}$	77	Иридий	$1\cdot10^{-6}$
35	Бром	$1\cdot10^{-3}$	78	Платина	$2\cdot10^{-5}$
36	Криптон	$2\cdot10^{-8}$	79	Золото	$5\cdot10^{-7}$
37	Рубидий	$8\cdot10^{-3}$	80	Ртуть	$5\cdot10^{-6}$
38	Стронций	0,035	81	Таллий	$1\cdot10^{-5}$
39	Иттрий	$5\cdot10^{-3}$	82	Свинец	$1,6\cdot10^{-3}$
40	Цирконий	0,025	83	Висмут	$1\cdot10^{-5}$
41	Ниобий	$3,2\cdot10^{-5}$	84	Торий	$1\cdot10^{-3}$
			85	Уран	$4\cdot10^{-4}$

Гравиметрия

Сила тяжести на поверхности Земли [4]. Основные элементы гравитационного поля Земли — его потенциал, первые и вторые производные — относятся к прямоугольной системе координат с направлениями осей: x — на север, y — на восток, z — вниз, по направлению отвесной линии. Гравитационный потенциал W выражается в *эрг*, а для его первой $g_z = dW/dz$ и вторых производных (W_{xx}, W_{yx}...) введены специальные наименования единиц измерения. Для ускорения силы тяжести: 1 *гал* = 1 *см/сек*^{2}. Вторые производные потенциала измеряются в этвешах, иногда этвеш обозначается буквой E: 1 *этвеш* = 10^{-9} *сек*^{2}.

Сила тяжести на поверхности Земли определяется первой производной гравитационного потенциала по направлению внутренней нормали (ускорением силы тяжести) и представляет собой сумму сил гравитационного притяжения Земли и центробежной силы инерции.

Значения вторых производных потенциала силы тяжести на поверхности эллипсоида Красовского выражаются формулами:

$$W_{yy} - W_{xx} \equiv W_\Delta = 5,1\,[1 + \cos 2\varphi]\ \textit{этвеш};$$

$$W_{xz} = 8,1 \sin^2 \varphi\ \textit{этвеш}$$

Таблица 47.7

Зависимость силы тяжести g от широты места φ на поверхности эллипсоида Красовского [10 — 12]

φ, *град*	g, $\frac{см}{сек^2}$	φ, *град*	g, $\frac{см}{сек^2}$	φ, *град*	g, $\frac{см}{сек^2}$
0	978,0300	30	979,3213	60	981,9141
5	978,0692	35	979,7299	65	982,2853
10	978,1855	40	980,1659	70	982,6061
15	978,3756	45	980,6159	75	982,8665
20	978,6337	50	981,0663	80	983,0257
25	978,9521	55	981,5034	85	983,1759
				90	983,2360

Таблица 47.8

Нормальные значения внешнего и внутреннего вертикального градиента силы тяжести на поверхности международного эллипсоида 1924 г. [10,12]

Широта φ, *град*	$W_{zz}^{внут}$, *этвеш*	$W_{zz}^{внеш}$, *этвеш*
20	3087,23	849,30
30	3086,63	848,70
40	3085,89	847,96
50	3085,10	847,17
60	3084,36	846,43
70	3083,76	845,83

Вариации силы тяжести [4]. Периодические изменения силы тяжести на поверхности Земли, обусловленные влиянием Луны, составляют до $2{,}49 \cdot 10^{-4}$ *см/сек*^{2}, когда Луна находится в зените. Амплитуда солнечного приливного действия составляет $9{,}6 \cdot 10^{-5}$ *см/сек*^{2}, так что суммарное влияние Луны и Солнца на силу тяжести достигает $3{,}45 \cdot 10^{-4}$ *см/сек*^{2}.

Амплитуда приливных изменений силы тяжести зависит от широты места наблюдения и уменьшается к высоким широтам.

Сейсмология

Сейсмичность Земли [15]. Накопление упругих напряжений в тектонически активных местах земной коры вызывает тектонические землетрясения. К ним относится подавляющее большинство землетрясений, в том числе все катастрофические. Причиной землетрясений могут быть также вулканические процессы: извержения, взрывы газа и т. п.

Вулканические землетрясения сравнительно редки, слабы, носят локальный характер. На глубинах 50 — 700 *км* возникают очень сильные глубокофокусные, или плутонические, землетрясения.

Упругие волны в Земле [13]. Распространение упругих деформаций при землетрясениях носит волновой характер. Обычно исследуются продольные *P* и поперечные *S* объемные волны, а также поверхностные — волны Рэлея *R*, у которых колебание частиц происходит в плоскости, перпендикулярной к поверхности и проходящей через направление сейсмического луча, и поперечные поверхностные волны Лява *L*.

Скорость сейсмических волн возрастает с глубиной, причем на верхней границе земной коры скорость продольных волн 7,8—8,0 *км/сек*, а поперечных 4,3—4,4 *см/сек*. После очень небольшого уменьшения скорости на глубине около 80—100 *км* она вновь растет с глубиной. Особенно большой рост скорости продольных и поперечных волн наблюдается на глубине порядка 400—600 *км* (с 9 до 10 *км/сек*). К этим глубинам приурочен максимум частоты глубоких землетрясений. Начиная с 900 *км* и до границы ядра рост скорости замедляется. На границе ядра скорость продольных волн составляет 13,6 *км/сек*, а поперечных 7,3—7,4 *км/сек*.

На границе ядра скорость продольных волн падает скачком до 7,8—8,0 *км/сек* и снова растет с глубиной: после довольно резкого изменения скорости на глубине около 5000 *км* она остается постоянной и в центре Земли достигает 11,2—11,3 *км/сек*.

Поперечные волны через земное ядро не проходят.

Землетрясения [14]. Для характеристики силы землетрясений используется главным образом степень повреждения зданий и сооружений; кроме того, учитываются остаточные явления в грунтах, субъективные ощущения и т. п.

Интенсивность землетрясений выражается в магнитудах *M* — величинах, определяемых по записям объемных или поверхностных волн на сейсмических станциях [13]. Определения магнитуд относятся к землетрясениям, очаги которых залегают на глубине 20—30 *км*.

Землетрясение, энергия которого принята за единицу ($M = 0$) расходует энергию около 10^{12} *эрг*. Наиболее сильные землетрясения не превосходят $M = 8{,}5$, что соответствует энергии до 10^{27} *эрг*. Прирост интенсивности на 0,5 *M* соответствует увеличению энергии примерно в 10 раз.

Таблица 47.9

Шкала землетрясений, принятая в СССР в 1952 г.

Эта шкала основана на максимальной амплитуде смещения маятника, параметры которого (период собственных колебаний 0,25 *сек* и логарифмический декремент затухания 0,50) соответствуют характеристикам зданий, имеющих массовое распространение.

Балл	Наименование	Смещение [15], *мм*	Ускорение [11], *мм/сек*^{2}	Характеристика
1	Незаметное	—	2,5	Колебания почвы отмечаются приборами (микросейсмы)
2	Очень слабое	—	2,5—5,0	Иногда ощущаются людьми
3	Слабое	—	5—50	Колебания отмечаются немногими людьми
4	Умеренное	0,5	10—15	Отмечаются многими людьми. Возможно колебание окон, дверей
5	Довольно сильное	0,5—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 стенках
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	Многочисленные трещины на поверхности Земли, большие обвалы в горах
12	Сильная катастрофа	—	> 500	Изменение рельефа в больших размерах

Таблица 47.10

Частота землетрясений на Земле [13]

Характеристика землетрясения	Интенсивность, M	Число в год
Катастрофическое	7,8 и выше	1
Опустошительное	7,0—7,7	10
Разрушительное	6,0—6,9	100
Очень сильное	5,0—5,9	1 000
Сильное	4,0—4,9	10 000
Умеренное	3,0—3,9	100 000

Микросейсмические колебания [17, 18]. Микросейсмические колебания, микросейсмы 1-го рода — глобальное явление, связанное с деятельностью циклонов над водными бассейнами. Периоды их заключены в диапазоне 1—12 *сек*; в основном большим периодам соответствуют большие амплитуды. Непрерывные колебания поверхности имеют синусоидальную или неправильную форму с сезонными изменениями интенсивности. Значения смещений колеблются от 0,3 до 4,5 *мкм*.

Микросейсмы 2-го рода вызваны поверхностными явлениями (транспорт, промышленные предприятия, лес, прибой и т. п.); они имеют периоды от 0,001 до 0,1 *сек*, зависят от грунтовых условий и быстро убывают с удалением от источника. Амплитуды смещений лежат в диапазоне $\sim 10^{-4}$—$5 \cdot 10^{-2}$ *мкм*.

Земной магнетизм

Магнитное поле Земли характеризуется вектором напряженности T и выражается в эрстедах (*э*) или гаммах (γ) ($1\gamma = 10^{-5}$ *э*). Проекции вектора T на оси прямоугольной системы координат образуют составляющие геомагнитного поля; z — вертикальную, x — северную, y — восточную. Часто применяется также горизонтальная $H = \sqrt{x^2 + y^2}$ составляющая.

Угол между горизонтальным направлением H и географическим меридианом называется склонением D, а угол, образуемый вектором напряженности с горизонтальной плоскостью, — наклонением J.

Постоянное магнитное поле Земли [16, 19]. Географическое распределение постоянного магнитного поля соответствует полю однородно намагниченной сферы с координатами полюсов: северного (в Южном полушарии) $\varphi = 71{,}2°$, $\lambda = 150{,}8°$ и южного (в Северном полушарии) $\varphi = 70{,}5°$, $\lambda = 264°$. Линия, соединяющая магнитные полюса, 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 0,65 *э*, напряженность магнитного поля на магнитном экваторе 0,35 *э*. Градиенты вертикальной dz/dh и горизонтальной $dz/d\varphi$ составляющих магнитного поля по высоте h и широте φ для широты Ленинграда равны:

$$\frac{dz}{dh} = -23{,}5\ \gamma/км; \quad \frac{dz}{d\varphi} = 250\ \gamma/град = 2{,}5\ \gamma/км;$$

$$\frac{dH}{dh} = -7{,}5\ \gamma/км; \quad \frac{dH}{d\varphi} = -400\ \gamma/град = -4{,}0\ \gamma/км.$$

Магнитный момент однородно намагниченного земного шара [20] $M = 8{,}3 \cdot 10^{25}$ ед. СГСМ.

Элементы постоянного магнитного поля Земли изменяются на ее поверхности в следующих пределах [21].

Полный вектор напряженности поля

от $+0{,}62$ до $-0{,}73$ *э*

Горизонтальная составляющая . . от 0 до 0,41 *э*

Вертикальная составляющая . . от $+0{,}62$ до $-0{,}73$

Магнитное склонение . . . . . от -180 до $+180°$

Магнитное наклонение . . . . . от -90 до $+90°$

Географическое распределение постоянного магнитного поля Земли с учетом магнитных аномалий площадью от нескольких километров до целых материков изображается в виде карт. Карта составляющих напряженности магнитного поля приведена на рис. 47.1.

Вековые вариации геомагнитного поля [4]. Средние значения элементов геомагнитного поля изменяются со временем. Сравнение элементов поля для 1885 и 1950 г. приводит к выводу, что полный магнитный момент Земли уменьшается в течение года приблизительно на $7 \cdot 10^{-4}$ своего значения. Следовательно, короткий в геологическом отношении отрезок времени достаточен, чтобы полностью изменить всю картину геомагнитного поля.

Переменное магнитное поле Земли. Периодические вариации. Все периодические вариации магнитного поля Земли имеют источники 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 вариации с периодом 11 лет, связанные с изменением солнечной активности и т. п. Амплитуды всех периодических вариаций, кроме солнечно-суточных, составляют единицы угловых минут склонения и единицы гамм напряженности поля.

Непериодические вариации магнитного поля Земли. Магнитные бури [21]. 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 земном шаре и имеют тенденцию к повторению через 27 суток. Поле изменяется по величине и направлению на несколько процентов за время от нескольких часов до нескольких суток.

Земные теллурические токи [22, 23]. Токи и переменное геомагнитное поле — явления, связанные между собою. Плотность теллурческих токов j для различных участков земной поверхности приблизительно одинакова $j = 2$ *а/км*^{2}. Интенсивность теллурических токов возрастает от низких широт к высоким. На низких широтах напряженность поля обычно не превосходит 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.

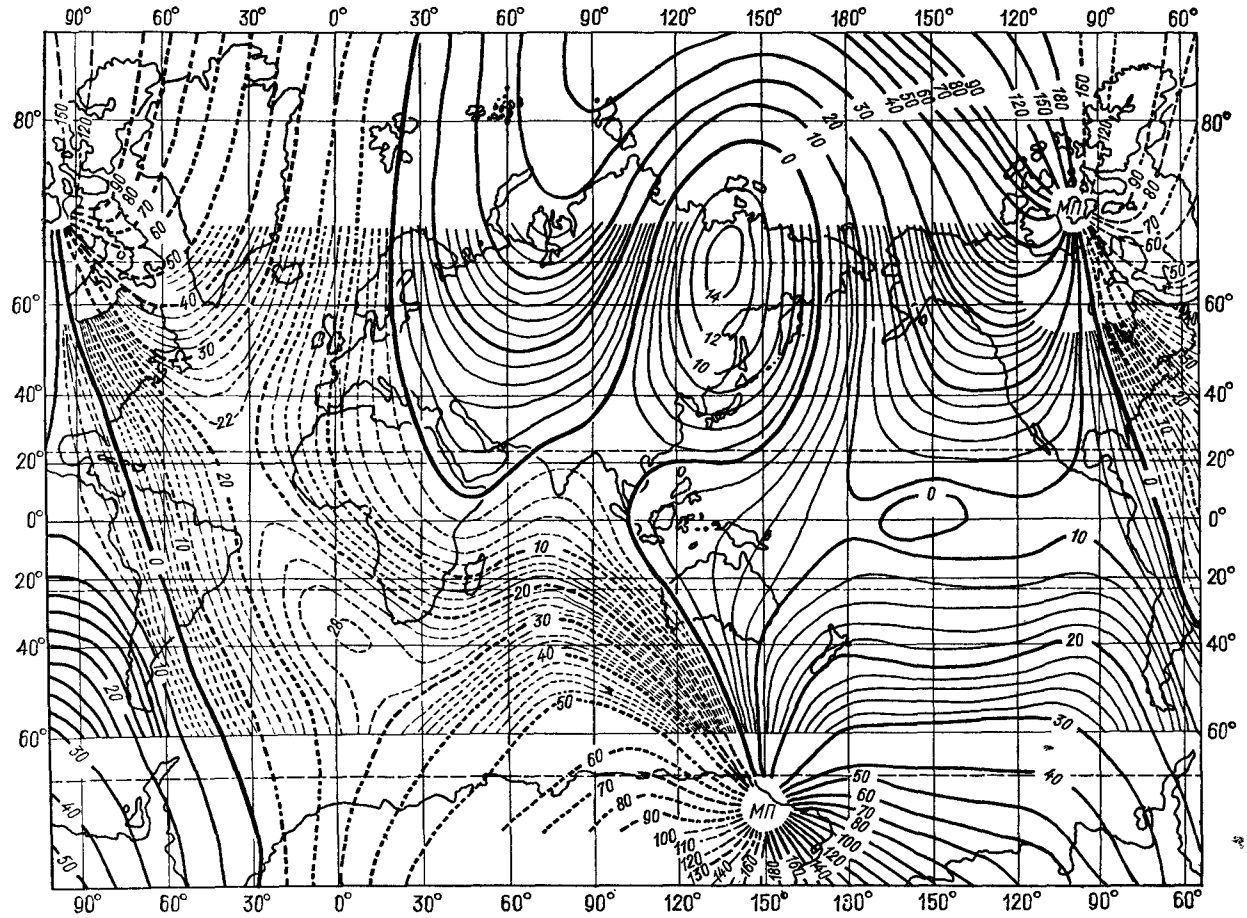


Рис. 47.1. Напряженность магнитного поля Земли T, *мэ*, на 1965 г. [32].

Таблица 47.11

Солнечно-суточные вариации геомагнитного поля [21]

Составляющая напряженности	Годы низкой магнитной активности				Годы высокой магнитной активности			
	Средние широты		Высокие широты		Средние широты		Высокие широты	
	Спокойные дни	Возмущенные дни	Спокойные дни	Возмущенные дни	Спокойные дни	Возмущенные дни	Спокойные дни	Возмущенные дни
Горизонтальная H, $0{,}8\cdot10^{-3}$ *а/м*	7—40	18—58	44—80	90—402	8—74	25—109	27—77	50—460
Вертикальная z, $0{,}8\cdot10^{-3}$ *а/м*	4—16	9—36	20—90	103—305	6—26	14—128	15—70	128—315
Модуль полного вектора, $0{,}8\cdot10^{-3}$ *а/м*	6—26	11—64	20—65	150—300	8—35	13—104	35—110	230—275

Геотермика

Температура внутри Земли [4, 24]. У поверхности Земли температура почвы и неглубоко залегающих горных пород определяется балансом тепла, получаемого от Солнца и излучаемого в атмосферу. Роль терморегулятора играет водная и воздушная оболочка 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*.

Вековые изменения температуры проникают глубже 50 *м* и сохраняются надолго вследствие запаздывания температурной волны по фазе с глубиной. Вечная мерзлота, распространяющаяся местами до нескольких сот метров, является реликтом ледникового периода, миновавшего 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 120° С, в разведочных скважинах на Северном Кавказе зарегистрирована температура около 160° С на глубине 3200 *м*. Скорость изменения температуры с глубиной характеризуется величиной геотермического градиента или обратной ему величиной геотермической ступени *м/град*. Значения dT/dh изменяются от 0,1 до 0,01 *град/м*. Для дна океана средние значения dT/dh поридка 0,08 *град/м* (для Тихого океана) и 0,04 *град/м* (для Северной Атлантики).

Средний поток тепла из недр Земли составляет около $1{,}2 \cdot 10^{-6}$ *кал/(см²·сек)* с отклонениями от среднего до 50%. На суше измерения теплового потока дали значение $1{,}04 \cdot 10^{-6}$ (Англия) и $1{,}16 \cdot 10^{-6}$ *кал/(см²·сек)* (Южная Африка). Средние значения потока тепла через дно океана $0{,}14 \cdot 10^{-6}$—$8{,}09 \cdot 10^{-6}$ *кал/(см²·сек)*. Постоянным источником внутреннего тепла Земли являются радиоактивные элементы. Отмечено, что если бы радий был распределен равномерно до глубины в несколько десятков километров с такой же средней концентрацией, как в гранитах, то выделение тепла одним радием могло бы дать весь наблюдаемый тепловой поток Земли.

Таблица 47.12

Концентрация радиоактивных элементов в горных породах различных типов [33]

Порода	Концентрация, отн. ед.			
	^{238}U	^{235}U	^{232}Th	^{40}K
Гранит	2,9	2,1	0,1	3,1
Промежуточная	1,4	1,0	4,3	1,3
Базальтовая	0,9	0,65	3,2	1,1
Дунит	0,9	0,00	0,0	0,00

Из всех имеющихся сведений следует, что температура внутри Земли интенсивно возрастает до глубины 200 *км*, после чего ее рост с глубиной резко замедляется. Температура в центре Земли может быть оценена в 2000 — 4000° С, причем более вероятно нижнее значение.

Охлаждение глубинных слоев Земли в настоящее время идет медленно. Активной в термическом отношении зоной являются верхние слои Земли до глубин 100—200 *км*, особенно в областях распространения кислых изверженных и магматических пород.

Тепловой баланс Земли [31]. Земля ежегодно поглощает 168 *ккал/см²*. Из них: 112 *ккал/(см²·г)* — земная поверхность; 56 *ккал/(см²·г)* — атмосфера Земли. Потеря земной поверхностью через длинноволновое эффективное излучение 40 *ккал/(см²·г)*. Потери на испарение 59 *ккал/(см²·г)*. Передача в атмосферу через турбулентную теплоотдачу 13 *ккал/(см²·г)*.

47.3. ГИДРОСФЕРА

Распределение запасов воды на поверхности Земли [24]

Таблица 47.13

Запасы воды	Объем, $км^3$	Масса, T
Океаны и моря	$1336 \cdot 10^6$	$1{,}3 \cdot 10^{18}$
Полярный лед	$3{,}5 \cdot 10^6$	$3{,}5 \cdot 10^{15}$
Озера	$2{,}5 \cdot 10^5$	$2{,}5 \cdot 10^{14}$
Подземные озера	$2{,}5 \cdot 10^5$	$2{,}5 \cdot 10^{14}$
Реки	$5 \cdot 10^4$	$5 \cdot 10^{13}$
Болота	$6 \cdot 10^3$	$6 \cdot 10^{12}$
Снежный покров	250	$2{,}5 \cdot 10^{11}$
Полные запасы	$\sim 1340 \cdot 10^6$	$(1{,}8 \div 2{,}7)\ 10^{18}$

Влагооборот. Баланс влаги по поверхности Земли [24]. Общее количество воды, выпадающей за один год в виде осадков для всего земного шара оценивается в $5 \cdot 10^{14}$ *T*, 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 $км^3$ воды. Испарение с поверхности океана составляет 113 *см/год* или 407 000 $км^3$ воды, и речной сток в океаны оказывается равным 10,3 *см/год*, или 37 000 $км^3$.

Для поверхности суши с учетом стока в океан получены следующие значения: осадки 70,0 *см/год* (102000 $км^3$), испарение 44,6 *см/год* (64 900 $км^3$) и сток 25,4 *см/год* (37 000 $км^3$). На долю частей суши, не имеющих стока в океан, приходится всего около 8000 $км^3$ осадков и столько же на испарение. В целом для земного шара годовой слой осадков, равный годовой величине испарения, составляет 92,8 *см/год* (472 000 $км^3$), причем на сушу из общего количества осадков выпадает только 22%, а на океан 78%; испарение же с поверхности суши составляет 14% общего испарения, а остальные 86% испаряются с поверхности океана.

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.

Состав океанической и пресной воды

Вследствие большой ионизирующей способности воды растворенные в ней соли оказываются в ионно-дисперсной форме. Общее количество растворенных веществ в 1 *л* морской воды в граммах называется соленостью, выражается в промиллях и обозначается S, $^0/_{00}$. Существует связь между S, $^0/_{00}$, и хлорностью (содержанием хлора в морской воде):

$$S,\ ^0/_{00} = 0{,}03 + 1{,}805\ \mathrm{Cl},\ ^0/_{00}.$$

Средняя соленость морской воды S равна $34{,}85^0/_{00}$, средняя хлорность Cl равна 19,37%.

Таблица 47.14

Средний химический состав океанической воды при $T = 5°C$ и хлорности 19 $^0/_{00}$ [25]

Элемент	Содержание, %	Элемент	Содержание, %
Кислород	85,94	Медь	$6\cdot10^{-7}$
Водород	10,80	Свинец	$4\cdot10^{-7}$
Хлор	1,898	Марганец	$4\cdot10^{-7}$
Натрий	1,056	Селен	$4\cdot10^{-7}$
Магний	$1{,}272\cdot10^{-1}$	Цезий	$2\cdot10^{-7}$
Сера	$8{,}84\cdot10^{-2}$	Уран	$1{,}5\cdot10^{-7}$
Кальций	$4{,}00\cdot10^{-2}$	Молибден	$5\cdot10^{-8}$
Калий	$3{,}80\cdot10^{-2}$	Галлий	$5\cdot10^{-8}$
Бром	$6{,}5\cdot10^{-3}$	Торий	$<5\cdot10^{-8}$
Углерод	$3{,}0\cdot10^{-3}$	Никель	$3\cdot10^{-8}$
Азот	$1{,}7\cdot10^{-3}$	Ванадий	$3\cdot10^{-8}$
Стронций	$1{,}33\cdot10^{-3}$	Церий	$3\cdot10^{-8}$
Бор	$4{,}6\cdot10^{-4}$	Иттрий	$3\cdot10^{-8}$
Кремний	$>2\cdot10^{-4}$	Лантан	$3\cdot10^{-8}$
Фтор	$1{,}3\cdot10^{-4}$	Криптон	$2{,}8\cdot10^{-8}$
Аргон	$6{,}1\cdot10^{-5}$	Висмут	$2\cdot10^{-8}$
Рубидий	$2\cdot10^{-5}$	Неон	$1{,}1\cdot10^{-8}$
Литий	$1\cdot10^{-5}$	Кобальт	$1\cdot10^{-8}$
Фосфор	$1\cdot10^{-5}$	Серебро	$1\cdot10^{-8}$
Иод	$5\cdot10^{-6}$	Ксенон	$9{,}4\cdot10^{-9}$
Барий	$5\cdot10^{-6}$	Скандий	$4\cdot10^{-9}$
Мышьяк	$1{,}5\cdot10^{-6}$	Ртуть	$3\cdot10^{-9}$
Цинк	$1\cdot10^{-6}$	Гелий	$5{,}2\cdot10^{-10}$
Алюминий	$1\cdot10^{-6}$	Золото	$5\cdot10^{-10}$
Железо	$1\cdot10^{-6}$	Радий	$(0{,}2\div3)\cdot10^{-10}$

Таблица 47.15

Важнейшие вещества, растворенные в морской, озерной и речной водах [7]

Вещества, растворенные в морской воде			Вещества, растворенные в озерной и речной водах		
Ионы	Концентрация, *г/т*	Общая масса, 10^{12} *т*	Ионы	Концентрация, *г/т*	Общая масса, 10^9 *т*
Cl^{-}	19 360	30 976	CO_2	51,2	1178
Na^{+1}	10 770	17 232	CO^{+2}	29,8	680
SO_4^{-2}	2 701	4 321	SO_4^{-2}	17,7	407
Mg^{+2}	1 298	2 077	SiO_2	17,1	393
Ca^{+2}	408	653	Cl^{-1}	8,3	191
K^{+1}	387	619	Na^{+1}	8,4	193
HCO^{-}	128	205	Mg^{+2}	5,0	155
Br^{-1}	66	106	$(Al, Fe)_2\ O_3$	4,0	92
H_3BO_3	27	43	K^{+1}	3,1	71
Sr^{+2}	14	22	NO_3^{-1}	1,3	30

Таблица 47.16

Растворимость газов ($см^3/л$) в морской и пресной воде в зависимости от температуры

Газ	В пресной воде при T				В морской воде, $S=35^0/_{00}$ при T			
	0° С	10° С	20° С	30° С	0° С	10° С	20° С	30° С
N_2	18,10	14,60	12,24	10,98	14,04	11,72	10,18	9,08
O_2	10,29	8,02	6,57	5,57	8,04	6,41	5,35	4,50
Ar	0,54	0,42	0,35	0,30	0,41	0,31	0,25	0,21
CO_2	0,52	0,36	0,26	0,20	0,44	0,31	0,23	0,18
Всего. . .	29,45	23,40	19,42	17,05	22,93	18,75	16,01	13,97

Плотность и электропроводность воды

Плотность ρ морской воды. Плотность морской воды зависит от температуры, солености и давления. Зависимость ρ от солености определяется формулой

$$\sigma_0 = (-0{,}093 + 0{,}8149\ S^0/_{00} - 0{,}000482\ S^2\ ^0/_{00} + \\ + 0{,}0000068\ S^3\ ^0/_{00})\ г/см^3,$$

где

$$\sigma_0 = (\rho_0 - 1)\,1000\ г/см^3 \qquad \rho_0 = \rho_{T=0°C}$$

Характерные для поверхности моря значения плотности, зависящие от температуры, находятся в пределах от 0,9960 до 1,0283 *г/см³*. Все значения плотности, зависящие от температуры, солености и давления, которые возможны в Мировом океане, укладываются в пределах 1,0757—0,9960 *г/см³*.

Разности плотности воды

Вода	Отклонение плотности от океанической, 10^{-4} *г/см³*
Океаническая	0,0
Снеговая	—0,038
Дождевая	—0,025
Внутренних озер, рек, ручьев	—0,015
В живых организмах	—0,003
$^1H_2\ ^{16}O$	—2,6
В растениях	+0,002
В минералах	+0,009
В Мертвом море	+0,015

Таблица 47.17

Удельная электропроводность λ, 10^5 (*сим/м*), морской воды в зависимости от температуры и солености *S*

T, °C	*S*, ‰			
	10	20	30	40
0	923	1747	2528	3276
15	1378	2594	3740	4834
25	1712	3214	4626	5967

Физические свойства морского льда [26].

В высоких широтах различают глетчериый (образуется исключительно из осадков) и морской лед. Морская вода не имеет определенной точки замерзания. При общей солености воды 33‰ образование льда начинается при —1,8° С. Но между кристаллами льда остается небольшое количество морской воды, в которой отдельные соли выкристаллизовываются при более иизких температурах и только при —55° С полностью застывает образовавшийся рассол. Солеиость и количество находящегося во льду воздуха определяет плотность морского льда.

Таблица 47.18

Плотиость морского льда в зависимости от солеиости *S* и содержания в ием воздуха

Объемное содержание воздуха, %	*S*, ‰			
	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

Звук и свет в океане

Звук в океаие [26]. Скорость звука определяется уравнением Лапласа $v = \sqrt{\gamma/\rho\varkappa}$, где $\gamma = c_p / c_v$; ρ — плотность и $\varkappa$ — адиабатическая сжимаемость. Однако значения скорости звука, определенные по этой формуле, оказываются заниженными иа 3—4 *м/сек*[1]. Номограммы значений скорости звука в морской воде приведены в [28].

В океане под гомогеиным поверхностиым слоем температура с глубиной сильно понижается, скорость звука также уменьшается, однако одновременное увеличение давления с глубиной влечет за собой некоторое повышение скорости звука. В зависимости от стратификации температуры и солености на глубинах 700—1300 *м* наблюдается миинмум скорости звука. Отчетливые минимумы отсутствуют только там, где термическая стратификация незначительна (море Уэделла и Красное).

Свет в океаие [26]. При высоте Солица более 40° море поглощает почти полностью падающий на него свет, а отражает менее 5%. При большом волнении и большом количестве пены иа поверхности отражательная способность повышается и отражение может превысить 40% падающего излучения. С убыванием высоты Солнца отражение сильно возрастает.

Тепловой баланс океана

В сутки в море проиикает $Q_{сол}$ = 295 *кал/см*², из них на прямую радиацию приходится 64% и на диффузную 44%.

Таблица 47.19

Коэффициент преломлеиия света в морской воде в зависимости от длииы волны λ и солеиости *S* [29]

λ, *нм*	*S*, ‰			
	0	10	20	35
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

Расход тепла с поверхности моря в процентах от $Q_{сол}$ приходится на подводную освещенность — 2%, на отражение — 6%, на тепловую энергию эффективного излучения поверхности — 42%, на конвекцию — 7%, иа испарение — 51%. Менее значительными составляющими теплового баланса Мирового океана являются: приход тепла в результате химико-биологических реакций — 0,1%, приход тепла от трения — 0,05% и приход тепла от распада радиоактивных веществ в морской воде — 0,000017%. Приход тепла из внутренних частей Земли — 0,03%.

Проникающая в море тепловая энергия используется почти исключительно в тонком приповерхностиом слое. В чистой океанической воде уже в самом верхнем саитиметровом слое поглощается 27% радиации, в метровом слое — 62% и только 0,45% всей энергии доходит до глубины 100 *м*.

Таблица 47.20

Нагревание (°С) слоя воды толщиной 1 *м* иа различиых глубинах при поглощеиии 1000 *кал/см*²

Залегание слоя, *м*	Вода	
	чистая океаническая	мутная прибрежная
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

47.4. АТМОСФЕРА

Строение атмосферы

Атмосфера на своем протяжении 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 по высоте.

Прилегающий к Земле слой — *тропосфера* —характеризуется уменьшением температуры с высотой (порядка 6 *град/км*) и кончается *тропопаузой* на высоте от 7 *км* на полюсе до 17 *км* на экваторе. Выше лежит *стратосфера*, где температура возрастает приблизительно от 200° К в тропопаузе до 280° К в *стратопаузе* (на высоте 50 *км*). Далее следует *мезосфера*, где температура уменьшается с высотой до 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 ультрафиолетовой радиации Солнца. Средний градиент температуры равен 20 *град/км* до высоты 150 *км*, а далее рост ее постепенно замедляется и заканчивается на высоте 300 *км*. Эта область атмосферы называется *термосферой* и заканчивается *термопаузой*, которая лежит днем на высоте 350—450 *км*, а ночью опускается на высоту 200—250 *км*. Термосфера и лежащий над ней обширный слой *метасферы* носят общее название *гетеросферы*, так как характеризуются гравитационным разделением газов. Благодаря этому разделению на высоте около 750 *км* преобладает атомарный кислород, а на высоте 1500 *км* — гелий.

Разделение газов заканчивается на высоте в 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 высотах до 200 000 *м* по характеру изменения температуры атмосфера делится на одиннадцать слоев. Общим свойством всех слоев является линейность изменения молекулярной температуры $T_м$, ° К, по геопотенциальной высоте Ф, выражаемой в геопотенциальных метрах (*гп. м*). Геопотенциальная (Ф) и геометрическая (z) высоты связаны соотношением $\Phi = rz/(r + z)$, где $r = 6\,371\,210$ *м* — средний радиус Земли.

Молекулярная температура $T_м$ связана с кинетической T следующей зависимостью:

$$T_м = T_0 \cdot \frac{M_0}{M_z},$$

где M_0 и M_z — молекулярные массы воздуха на уровне моря и на рассматриваемой высоте соответственно. Для расчетов приняты следующие значения физических характеристик атмосферы на уровне моря и физических констант:

Барометрическое давление на географической широте $\varphi = 45°32'40''$ при температуре ртути 273,15° К и средней плотности ртути 13595,1 *кг/м*³:

$$P_0 = 1013{,}25 \text{ мбар} = 760 \text{ мм рт. ст.}$$

Температура $T_0 = 15°C = 288{,}15°K$.

Газовая постоянная сухого воздуха:
универсальная . . . .3,31436 · 10^7 *эрг/(град·моль)*;
удельная . . . . . .2,87039 · 10^6 *эрг/(град·г)*.

Динамическая вязкость воздуха при $T = 273°K$:

$$\mu_0 = 1{,}75 \cdot 10^{-6} \text{ кг·сек/м}^2 = 1716{,}16 \cdot 10^{-7} \text{ пз}.$$

Ускорение силы тяжести $g_0 = 980{,}665$ *см/сек*².

Стандартная атмосфера

По многочисленным данным, полученным прямыми и косвенными методами, определены характеристики некоторой средней, или стандартной атмосферы.

Барометрическая формула [24]. Для определения разности высот $z_2 - z_1$ между двумя точками, давление в которых равно P_2 и P_1, можно воспользоваться барометрической формулой Лапласа:

$$z_2 - z_1 = 18\,400\,(1 + 0{,}00366\,\overline{t}) \cdot [1 + 0{,}378\,(\overline{e}/p)] \times$$

$$\times\,(1 + 0{,}00264\cos 2\varphi)\,(1 + 3{,}14 \cdot 10^{-7}\,\overline{h})\,\lg(p_1/p_2).$$

где $\overline{t}, \overline{h}, \overline{(e/p)}$ — средние значения температуры, высоты над уровнем моря и отношения парциального давления водяного пара к атмосферному. Если пренебречь зависимостью силы тяжести от широты и высоты и считать воздух сухим, можно воспользоваться упрощенной барометрической формулой:

$$z_2 - z_1 = 18\,400\,(1 + 0{,}00366\,\overline{t})\,\lg(P_1/P_2).$$

Таблица 47.21

Состав атмосферного воздуха [29, 24]

Вещество	Молекулярная масса, *а.е.м.*	Объемное содержание, %	Число молекул на 1 *см*² вертикального столба
N_2	28,0134	78,084 ± 0,004	$1{,}678 \cdot 10^{25}$
O_2	31,998	20,946 ± 0,002	$4{,}501 \cdot 10^{24}$
Ar	39,948	0,934 ± 0,001	$2{,}007 \cdot 10^{23}$
CO_2	44,009	0,030 ± 0,003	$7{,}09 \cdot 10^{21}$
Ne	20,179	$(1{,}818 \pm 0{,}004)\,10^{-3}$	$3{,}89 \cdot 10^{20}$
He	4,0026	$(5{,}24 \pm 0{,}004)\,10^{-4}$	$1{,}13 \cdot 10^{20}$
CH_4	16,043	$\sim 2{,}2 \cdot 10^{-4}$	—
Kr	83,80	$(1{,}14 \pm 0{,}01) \cdot 10^{-4}$	$2{,}45 \cdot 10^{19}$
NO_2	46,005	$(0{,}5 \pm 0{,}1)\,10^{-4}$	—
H_2	2,0158	$\sim 0{,}5 \cdot 10^{-4}$	—
Xe	131,30	$(8{,}7 \pm 0{.}1)\,10^{-6}$	$1{,}87 \cdot 10^{18}$
Озон	—	$(0 - 0{,}07)\,10^{-4}$	—
Сухой воздух	28,966	100,0	$2{,}149 \cdot 10^{25}$

Распределение молекулярной массы и температуры по высоте

Таблица 47.22

Высота z, км	Молекулярная масса, а. е. м	Температура, °К		Градиент молекулярной температуры, °К/гп. м.	Высота z, км	Молекулярная масса, а. е. м	Температура, °К		Градиент молекулярной температуры, °К/гп. м.
		молекулярная	кинетическая				молекулярная	кинетическая	
0	28,966	288,15	288,15	—0,00651122	110	28,934	257,64	257,36	0,00801741
11	28,966	216,66	216,66	0	120	28,727	335,00	332,24	0,02345357
25	28,966	216,66	216,66	0,00276098	150	28,107	1010,00	980,05	0,01987408
46	28,966	247,00	247,00	0	160	27,900	1199,40	1155,26	0,00308461
54	28,966	274,00	274,00	—0,00349544	170	27,700	1228,71	1175,00	0,00308461
80	28,966	185,00	185,00	0	180	27,476	1257,93	1193,20	0,00308461
95	28,966	185,00	185,00	0,00500000	190	27,245	1287,06	1210,60	0,00308461
					200	27,000	1316,10	1226,80	0,00308461

Таблица стандартной атмосферы

Таблица 47.23

Геометрическая высота z, км	Температура, °К	Барометрическое давление, мм рт. ст.	Плотность, кг/м³	Скорость звука, м/сек	Вязкость			Средняя длина свободного пробега молекул l, 10^{-8} м
					динамическая μ, 10^{-4} пз	кинематическая ν, 10^{-5} м²/сек	g, м/сек²	
—2	301,19	958,50	1,4781	347,90	1,8517	1,2528	9,81281	5,3471
—1,5	297,93	905,30	1,4114	346,01	1,8362	1,3010	9,81127	5,5833
—1	294,67	854,52	1,3469	344,11	1,8207	1,3517	9,80973	5,8329
—0,5	291,42	806,21	1,2850	342,21	1,8051	1,4048	9,80819	6,0957
0	288,15	760,00	1,2250	340,28	1,7894	1,4607	9,80665	6,3741
0,5	284,90	715,96	1,1672	338,36	1,7736	1,5196	9,80511	6,6688
1	282,65	674,12	1,1117	336,43	1,7578	1,5812	9,80357	6,9791
1,5	278,40	634,30	1,0582	334,48	1,7420	1,6461	9,80203	7,3079
2	275,14	596,28	1,0066	332,52	1,7260	1,7146	9,80049	7,6572
2,5	271,89	560,24	0,95706	330,55	1,7099	1,7866	9,79896	8,0260
3	268,64	525,98	0,90941	328,56	1,6937	1,8624	9,79742	8,4170
3,5	265,38	493,35	0,86345	326,56	1,6773	1,9426	9,79588	8,8333
4	262,13	462,46	0,81942	324,56	1,6610	2,0271	9,79435	9,2744
4,5	258,88	433,15	0,77714	322,54	1,6446	2,1162	9,79281	9,7426
5	255,63	405,37	0,73654	320,51	1,6280	2,2103	9,79128	10,240
5,5	252,38	379,04	0,69758	318,47	1,6114	2,3100	9,78974	10,771
6	249,13	354,13	0,66022	316,41	1,5946	2,4153	9,78820	11,335
6,5	245,88	330,54	0,62441	314,34	1,5778	2,5268	9,78667	11,936
7	242,63	308,26	0,59010	312,25	1,5609	2,6452	9,78514	12,579
7,5	239,38	287,20	0,55725	310,15	1,5439	2,7705	9,78360	13,264
8	236,14	267,38	0,52591	308,05	1,5267	2,9030	9,78207	13,994
8,5	232,89	248,62	0,49585	305,92	1,5095	3,0443	9,78053	14,777
9	229,64	230,95	0,46712	303,78	1,4922	3,1942	9,77900	15,614
9,5	226,40	214,36	0,43977	301,63	1,4747	3,3534	9,77747	16,509
10	223,15	198,70	0,41357	299,45	1,4571	3,5232	9,7794	17,471
11	216,66	170,19	0,36485	295,07	1,4217	3,8966	9,77287	19,610
12	216,66	145,44	0,31180	295,07	1,4217	4,5595	9,76981	22,946
13	216,66	124,30	0,26648	295,07	1,4217	5,3351	9,76675	26,849
14	216,66	106,24	0,22776	295,07	1,4217	6,2420	9,76369	31,413
15	216,66	90,810	0,19467	295,07	1,4217	7,3029	9,76063	36,752
16	216,66	77,616	0,16640	295,07	1,4217	8,5437	9,75758	42,996
17	216,66	66,350	0,14224	295,07	1,4217	9,9952	9,75452	50,301
18	216,66	56,719	0,12159	295,07	1,4217	11,692	9,75146	58,840
19	216,66	48,489	0,10395	295,07	1,4217	13,676	9,74842	68,825
20	216,66	41,455	0,088870	295,07	1,4217	15,997	9,74437	80,505
22	216,66	30,305	0,064966	295,07	1,4217	21,883	9,73927	110,13
24	216,66	22,158	0,047501	295,07	1,4217	29,929	9,73318	150,62
26	216,40	16,219	0,034336	296,93	1,4367	41,842	9,72710	209,25
28	224,87	11,959	0,024701	300,61	1,4665	59,370	9,72102	293,27
30	230,35	8,8777	0,017901	304,25	1,4959	83,565	9,71494	407,86
35	244,01	4,3522	$8,2842 \cdot 10^{-3}$	313,14	1,5681	189,29	9,69978	897,62
40	257,66	2,2191	$4,0003 \cdot 10^{-3}$	321,78	1,6384	409,56	9,68466	1890,0
45	271,28	1,1732	$2,0086 \cdot 10^{-3}$	330,17	1,7068	849,77	9,66957	3821,8
50	274,00	0,63441	$1,0754 \cdot 10^{-3}$	331,82	1,7203	1599,7	9,65452	7158,5
60	253,40	0,18092	$3,3162 \cdot 10^{-4}$	319,11	1,6166	4874,9	9,62452	22 684
70	219,15	0,043761	$9,2747 \cdot 10^{-5}$	296,76	1,4353	1547,5	9,59466	77 433
80	185,00	0,0083564	$2,0979 \cdot 10^{-5}$	272,66	1,2420	59202	9,56494	322 410
90	185,00	0,013834	$3,4733 \cdot 10^{-6}$	272,66	1,2420	35759	9,53536	194 7400

Таблица 47.24

Рекомендуемые физические характеристики для высот от 95 000 до 300 000 *м*

Геометрическая высота, *км*	Температура, °К	Барометрическое давление, *мм рт. ст.*	Плотность, *кг/м³*	Молекулярная масса, *а. е. м.*	Ускорение свободного падения тела, *м/сек²*
95	185,00	$5{,}6408\cdot10^{-4}$	$1{,}4170\cdot10^{-6}$	28,996	9,52061
100	209,22	$2{,}4310\cdot10^{-4}$	$5{,}3993\cdot10^{-7}$	28,962	9,50591
105	233,36	$1{,}1504\cdot10^{-4}$	$2{,}2900\cdot10^{-7}$	28,952	9,49121
110	257,36	$5{,}8671\cdot10^{-5}$	$1{,}0583\cdot10^{-7}$	28,934	9,47660
115	294,97	$3{,}2314\cdot10^{-5}$	$5{,}0674\cdot10^{-8}$	28,831	9,46199
120	332,24	$1{,}9165\cdot10^{-5}$	$2{,}6586\cdot10^{-8}$	28,727	9,44741
125	442,64	$1{,}2555\cdot10^{-5}$	$1{,}3025\cdot10^{-8}$	28,624	8,43288
130	552,04	$9{,}0540\cdot10^{-6}$	$7{,}5055\cdot10^{-9}$	28,520	9,41839
135	660,51	$6{,}9357\cdot10^{-6}$	$4{,}7873\cdot10^{-9}$	28,417	9,40390
140	768,00	$5{,}5394\cdot10^{-6}$	$3{,}2766\cdot10^{-9}$	28,314	9,38948
145	874,48	$4{,}5608\cdot10^{-6}$	$2{,}3605\cdot10^{-9}$	28,210	9,37507
150	980,05	$3{,}8428\cdot10^{-6}$	$1{,}7682\cdot10^{-9}$	28,107	9,36069
155	1068,1	$3{,}2937\cdot10^{-6}$	$1{,}3855\cdot10^{-9}$	28,003	9,3437
160	1155,3	$2{,}8598\cdot10^{-6}$	$1{,}1081\cdot10^{-9}$	27,900	9,33205
165	1165,6	$2{,}4996\cdot10^{-6}$	$9{,}5683\cdot10^{-10}$	27,810	9,31671
170	1175,0	$2{,}1887\cdot10^{-6}$	$8{,}2787\cdot10^{-10}$	27,700	9,30240
175	1184,2	$1{,}9200\cdot10^{-6}$	$7{,}1767\cdot10^{-10}$	27,588	9,28821
180	1193,2	$1{,}6872\cdot10^{-6}$	$6{,}2332\cdot10^{-10}$	27,476	9,27400
185	1202,0	$1{,}4850\cdot10^{-6}$	$5{,}4236\cdot10^{-10}$	27,361	9,25983
190	1210,6	$1{,}3093\cdot10^{-6}$	$4{,}7276\cdot10^{-10}$	27,245	9,24570
195	1218,9	$1{,}1562\cdot10^{-6}$	$4{,}1282\cdot10^{-10}$	27,125	9,23159
200	1226,8	$1{,}0226\cdot10^{-6}$	$3{,}6109\cdot10^{-10}$	27,000	9,21750
205	1236,0	$9{,}0586\cdot10^{-7}$	$3{,}1603\cdot10^{-10}$	26,875	9,20347
210	1245,0	$8{,}0379\cdot10^{-7}$	$2{,}7709\cdot10^{-10}$	26,750	9,18950
215	1253,7	$7{,}1435\cdot10^{-7}$	$2{,}4336\cdot10^{-10}$	26,620	9,17548
220	1262,0	$6{,}3585\cdot10^{-7}$	$2{,}1412\cdot10^{-10}$	26,487	9,16150
225	1269,9	$5{,}6684\cdot10^{-7}$	$1{,}8870\cdot10^{-10}$	26,348	9,14762
230	1277,4	$5{,}0606\cdot10^{-7}$	$1{,}6656\cdot10^{-10}$	26,205	9,13370
235	1284,4	$4{,}5245\cdot10^{-7}$	$1{,}4726\cdot10^{-10}$	26,055	9,11989
240	1290,9	$4{,}0508\cdot10^{-7}$	$1{,}3039\cdot10^{-10}$	25,899	9,10610
245	1297,0	$3{,}6317\cdot10^{-7}$	$1{,}1563\cdot10^{-10}$	25,739	9,09228
250	1302,8	$3{,}2604\cdot10^{-7}$	$1{,}0270\cdot10^{-10}$	25,577	9,07850
255	1309,5	$2{,}9311\cdot10^{-7}$	$9{,}1190\cdot10^{-11}$	25,392	9,06480
260	1316,2	$2{,}6390\cdot10^{-7}$	$8{,}1111\cdot10^{-11}$	25,213	9,05110
265	1322,6	$2{,}3794\cdot10^{-7}$	$7{,}2256\cdot10^{-11}$	25,033	9,03744
270	1328,8	$2{,}1481\cdot10^{-7}$	$6{,}4465\cdot10^{-11}$	24,854	9,02380
275	1334,6	$1{,}9421\cdot10^{-7}$	$5{,}7605\cdot10^{-11}$	24,672	9,01021
280	1340,0	$1{,}7581\cdot10^{-7}$	$5{,}1548\cdot10^{-11}$	24,488	8,99660
285	1344,9	$1{,}5936\cdot10^{-7}$	$4{,}6195\cdot10^{-11}$	24,299	8,98309
290	1349,5	$1{,}4465\cdot10^{-7}$	$4{,}1463\cdot10^{-11}$	24,110	8,96960
295	1353,9	$1{,}3142\cdot10^{-7}$	$3{,}7253\cdot10^{-11}$	23,920	8,95610
300	1358,0	$1{,}1956\cdot10^{-7}$	$3{,}3521\cdot10^{-11}$	23,731	8,94270

Радиационный баланс атмосферы

Средний радиационный баланс Северного полушария при средних условиях облачности [31]:

Составляющие радиационного баланса	Поток энергии, *кал/(см² · мин)*
Коротковолновая радиация:	
Инсоляция на верхней границе атмосферы	0,500
Поглощение радиации в атмосфере (общее)	0,087
озоном	0,014
водяным паром и пылью	0,065
облаками	0,008
Отражение и рассеяние радиации в мировое пространство (общее)	0,176
атмосферой	0,034
облаками	0,121
земной поверхностью	0,021
Поглощение радиации земной поверхностью (общее)	0,237
прямой солнечной	0,112
пропущенной облаками	0,072
рассеянной	0,053
Длинноволновая радиация (общее излучение)	0,324
Эффективное излучение земной поверхности:	
тепловое излучение	0,572
противоизлучение атмосферы	0,482
эффективное излучение	0,090
Тепловое излучение тропосферы:	
тепловое излучение, поглощенное тропосферой	0,545
собственное тепловое излучение тропосферы	0,765

Тепловое излучение в мировое пространство земной поверхности (в «окнах прозрачности»)	0,027
тропосферы	0,283
стратосферы	0,014

Поглощение лучистой энергии в атмосфере [24]. Осиовную роль в поглощении лучистой энергии в атмосфере играют кислород, озон, углекислый газ, водяной пар и пыль. В целом атмосферой поглощается 17—25% солнечной раднации. Кислород имеет полосы поглощения главным образом в ультрафиолетовой части спектра.

В видимой части поглощение происходит в полосах *A* с центром около 0,76 *мкм* и *B* с центром около 0,69*мкм*, однако поглощение в них мало и слабо влияет на ослабление раднации.

Озон образуется в результате поглощения солнечной радиации ($\lambda < 2420$ Å) на высотах от 10 до 60 *км* с центром поглощения около 22 *км*. Основные полосы поглощения озона лежат также в ультрафиолетовой области, следствием чего является то, что наблюдаемый у земной поверхности спектр обрывается на длине волны ~3000 Å. В этой области спектра поглощение озоном солнечной радиации 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 содержаиием, но и очень большим числом линий и полос в его спектре. Наибольшее значение из них имеют полосы, расположеииые в инфракрасной области спектра.

Полосы поглощеиия водяиого пара

Обозначение полосы	α	β	ρ, σr	φ	ψ	Ω
Цеитр полосы λ, *мкм*	0,72	0,82	0,93	1,13	1,38	1,86
Обозначение полосы	ω_1	ω_2	x	—	y	
Цеитр полосы λ, *мкм*	2,01	2,05	2,68	3,2—4,0	4,0—4,9	

В видимой области иаиболее сильны две полосы: α 7300—6850 Å и «дождевая» полоса 6060—5850 Å.

Таблица 47.25

Альбедо различиых поверхностей

Поверхность	Альбедо, %	Поверхность	Альбедо, %
Чернозем:		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 раститель-ность	10—18
влажная	16		
Песок желтый:			
сухой	35		
серый	18—23		
речной	43		

Отражение солиечиой радиации [24]. Альбедо-интегральное отношение отраженного по всем направлениям потока к потоку, упавшему на отражающую поверхность Земли, близко к 40%, причем основной вклад (75%) вносит альбедо облаков, а наименьшее значение (7%) имеет альбедо земной поверхности. Остальную часть составляет альбедо атмосферы.

Электрические явления в атмосфере

Иоиы в атмосфере [24]. 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 — тяжелые и ультратяжелые ионы. Обнаруживаются также средние или промежуточные ноны, природа которых не вполне ясна.

Капли тумана и облачных элементов имеют размеры 10^{-4}—10^{-3} *см* и могут иметь заряд, но к числу ионов обычно не относятся. Как правило, каждый ион несет один элементарный заряд, если его радиус меньше 10^{-6} *см*.

Из многочисленных известных ионизаторов главнейшими для иижних слоев атмосферы являются излучения радиоактивных веществ, содержащихся в земной коре и атмосфере, а также космические лучи. Над океанами осиовным ионизатором является космическое излучение.

Таблица 47.26

Осиовиые группы атмосферных ионов

Группа ионов	Подвижиость, $см^2/(в \cdot сек)$	Радиус иона, Å
Легкие	10^{-2}—1	6,6—80
Средние	10^{-3}—10^{-2}	80—250
Тяжелые	10^{-3}—$2{,}5 \cdot 10^{-3}$	250—550
Ультратяжелые	$< 2{,}5 \cdot 10^{-3}$	> 550

Таблица 47.27

Число иоиов, возиикающих за 1 *сек*, в 1 $см^3$ воздуха [30]

Расположение воздушной массы	Ионизатор			Итого
	Излучение радиоактивных элементов		Космическое излучение	
	почвы	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

Проводимость воздуха [30]. Средняя удельная проводимость воздуха $\lambda = 2 \cdot 10^{-4}$ ед. СГСЭ (над сушей от $0{,}2 \cdot 10^{-4}$ до $5 \cdot 10^{-4}$ ед. СГСЭ в зависимости от помутнения атмосферы и содержаиия радиоактивных элементов в земной коре). Близ населенных пунктов она уменьшается (близ Лондона $\lambda = 0{,}35 \cdot 10^{-4}$ ед. СГСЭ, на Шпиц-

бергене $\lambda = 4{,}95 \cdot 10^{-4}$ ед. СГСЭ). Проводимость нижних слоев атмосферы более чем на 95% обусловлена легкими ионами.

Над сушей у земной поверхности концентрация тяжелых ионов в 10—100 раз больше, чем легких.

Электрическое поле в атмосфере. [24]. Почти всегда вертикальная составляющая электрического поля в атмосфере значительно превосходит его горизонтальные составляющие, что соответствует отрицательному заряду земной поверхности. Средняя поверхностная плотность электрического заряда Земли равна $dQ/ds = -3{,}45 \cdot 10^{-4}$ ед. СГСЭ/$см^2$. Полный заряд Земли равен $Q = -17 \cdot 10^{14}$ ед. СГСЭ $= -5{,}7 \cdot 10^5$ $к$. 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, которые возникают в результате нескольких групп процессов электризации, в числе которых соударение поляризованных частиц, захват частичками осадков воздушных ионов, разбрызгивание капель воды, электризация при изменении агрегатного состояния.

Таблица 47.28

Электрический заряд Q осадков различного происхождения и ток i, создаваемый ими [24]

Характер осадков	$Q_{ср}$, $к$	$Q_{макс}$, $к$	$i_{ср}$, $а$	$i_{макс}$, $а$
Обложной дождь .	$10^{-15} — 10^{-14}$	$5 \cdot 10^{-13}$	$5 \cdot 10^{-15}$	$5 \cdot 10^{-14}$
Ливневый дождь .	$10^{-13} — 10^{-12}$	$5 \cdot 10^{-12}$	$1 \cdot 10^{-14}$	$5 \cdot 10^{-12}$
Град . . .	10^{-11}	10^{-10}	—	$1 \cdot 10^{-11}$
Снег . . .	$10^{-12} — 10^{-11}$	$5 \cdot 10^{-11}$	$1 \cdot 10^{-14}$	$5 \cdot 10^{-13}$

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 ($1{,}3 \cdot 10^{-12}$ $к$) больше положительного ($1{,}1 \cdot 10^{-12}$ $к$). Капли обложного дождя заряжены до 0,5—10 $в$, у грозового ливня до 300 $в$ при среднем значении 40 $в$.

Стратификация атмосферы в зависимости от степени ионизации [30]

Наблюдения за распространением радиоволн показали, что газы, образующие атмосферу, ионизованы. Известны четыре регулярно наблюдаемых более или менее ярко выраженных слоя: D, E, F_1 и F_2.

Слои E и F_2 непрерывны и простираются над всем земным шаром, а слои D и F_1 регулярно появляются лишь в определенное время суток и года. Кроме того, в области непрерывных слоев E и F_2 время от времени появляются спорадические слои $E_{спор}$ и $F_{2спор}$, представляющие собой отдельные облака с большой концентрацией ионов и электронов. Нижняя граница ионосферы совпадает с началом слоя D. Число электронов в 1 $см^3$ 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 $км$ до 130—140 $км$ располагается слой E — постоянно существующая область ионизации с максимумом концентрации электронов (до $\sim 2 \cdot 10^5$ $см^{-3}$) на высоте 120—130 $км$. Ночью концентрация электронов уменьшается по $5 \cdot 10^3$ $см^{-3}$. Слой E днем отражает и заметно поглощает волны длиннее 10 $м$, а при наклонном падении отражает более короткие (15—20 $м$). На уровне максимальной концентрации электронов слоя E находится нижняя граница полярных сияний.

На высоте 200—500 $км$ в области слоев F_1 и F_2 наблюдается наибольшая концентрация электронов. Слой F_1 образуется только летом в дневные часы в нормальных условиях на высоте 180—220 $км$. Максимальная концентрация электронов в слое F_1 составляет $(2 \div 5)10^5$ $см^{-3}$. Слой F_1 существенно влияет на распространение коротких волн. Максимальная концентрация электронов в слое F_2 составляет несколько миллионов в 1 $см^3$. Высота зоны максимальной концентрации 200—400 $км$. Состояние слоя F_2 оказывает решающее влияние на радиоволны в диапазоне 10—200 $м$.

Выше максимума слоя F_2 концентрация ионов и электронов очень медленно уменьшается с высотой, приближаясь на высотах 2000—3000 $км$ к состоянию межпланетного газа ($10^3 — 10^2$ $см^{-3}$).

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 $O_2 \rightarrow O + O$, а область D — ионизации O_2, соответствующей первому потенциалу ионизации. Максимумы ионизации областей F_1 и F_2 располагаются примерно на высотах 200 и 275 $км$ соответственно. В течение ночи области F_1 и F_2 сливаются, образуя один слой ионизации. Слой D ночью исчезает, а слой E заметно рассасывается.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Гутенберг Б.** Физика земных недр. Пер. с англ. М., Изд-во иностр. лит., 1963.
2. **Харлей П. М.** Возраст Земли. Пер. с англ. М., Физматгиз, 1962.
3. **Джеффрис Г.** Земля, ее происхождение, история и развитие. Пер. с англ. М., Изд-во иностр. лит., 1960.
4. **Федынский В. В.** Разведочная геофизика. М., «Недра», 1964.
5. **Косминская И. П.** «Вестник АН СССР», 1965, т. 2, с 51
6. **Польдерварт А.** В сб.: Земная кора. Пер. с англ. М., Изд-во иностр. лит., 1957, с. 130.
7. **Берч Ф.** См. [6] , с. 114.
8. **Ферсман А. Е.** Геохимия. М., ОНТИ, 1933—1939 г., т. 1—4.
9. **Чердынцев В. В.** Распространенность химических элементов. М., Гостехиздат, 1956.
10. **Жонголович И. Л.** В кн.: Труды ЦНИИГеодезии, аэрофотосъемки и картографии, 1948, вып. 68.
11. **Cassinis G.** «Bull. Géodesique», 1928, v. 25, с. 117.
12. **Сорокин Л. В.** Гравиметрия и гравиметрическая разведка. М., Гостехиздат, 1948.
13. **Саваренский Е. Ф., Кирнос Д. П.** Элементы сейсмологии и сейсмометрии. М., Гостехиздат, 1955.
14. **ГОСТ** СССР 6249—52.
15. **Землетрясения** в СССР. М., Изд-во АН СССР, 1961.
16. **Тверской П. Н.** Курс геофизики. Л., Гидрометеоиздат, 1939.
17. **Проскурякова Т. А., Рыкунов Л. Н.** В сб.: Международный геофизический год. Т. 5, М., «Наука», 1963.
18. **Melton B. S., Jonson D. P.** «Proc. JBB», 1962, v. 50, N 11, p. 2328.

19. **Яновский Б. М.** Земной магнетизм. М., Гостехиздат, 1953.
20. **Афанасьева Е. И.** «Изв. АН СССР. Сер. геофиз.», 1947, т. 2, с. 55.
21. **Справочник** по переменному магнитному полю Земли. Л., Гидрометеоиздат, 1954.
22. **Краев А. П.** Основы геоэлектрики. Л., Изд-во ЛГУ, 1950.
23. **Виноградов П. А.** «Геология и геофизика», 1963, № 12, с. 111.
24. **Тверской П. Н.** Курс метеорологии. Л., Гидрометеоиздат, 1962.
25. **Бруевич С. В.** Элементарный состав воды Мирового Океана.— В кн.: «Труды Ин-та Океанологии АН СССР. Т. 2. М., «Наука», 1948.
26. **Дитрих Г., Колле К.** Общее мореведение. Л., Гидрометеоиздат, 1961.
27. **Зубов Н. Н.** Океанологические таблицы. Л., Гидрометеоиздат, 1957.
28. **Баррс Л. С.** Таблицы скорости звука в морской воде. М., Изд-во Выч. Цеитра АН СССР, 1961.
29. **Ннколс М.** Аэрономия. Пер. с аигл. М., Изд-во иностр. лит., 1964.
30. **Аверкиев М. С.** Метеорология. М., Изд-во МГУ, 1960, т. 2.
31. **Будыко М. И., Кондратьев И. Я.** «Космические исследования», 1964, т. 2, вып. 1, с. 62.
32. **Карты** напряженности магнитного поля Земли Института земного магнетизма ионосферы и распространения радиоволн. Л., Леиингр. отд., 1964.
33. **Jecobs J. 1.** The Earth Interior.— "Encycl. of Physics". Ed. E. S. Flügge. Springer-Verlag, Berlin v. 47, 1956.

ТАБЛИЦЫ ФИЗИЧЕСКИХ ВЕЛИЧИН

Справочник

Под редакцией академика
И. К. Кикоина

Редакторы *Ю. С. Аборин, Т. С. Лим*
Художественный редактор *А. Т. Кирьянов*
Переплет художника *А. С. Александрова*
Технический редактор *Н. А. Власова*
Корректоры *Н. А. Смирнова и Л. С. Тимохова*

Сдано в набор 31.1. 1975 г. Подписано к печати 2.11. 1976 г. Т-03231, Т-03234. Формат 84×108/16. Бумага типографская № 1. Усл. печ. л. 105,84. Уч.-изд. л. 127,06. Тираж 28 000 экз. Цена 7 р. 16 коп. Зак. изд. 1345. Зак. тип. 748.

Атомиздат 103031 Москва К-31, ул. Жданова, 5.

Ярославский полиграфкомбинат Союзполиграфпрома при Государственном комитете Совета Министров СССР по делам издательств, полиграфии и книжной торговли. 150014, Ярославль, ул. Свободы, 97.

ВНИМАНИЮ ЧИТАТЕЛЕЙ!

На базах и складах Союзкниги и издательства имеется следующая литература:

Коэффициенты перевода единиц измерения физико-технических величин. 1967 г. 40 стр., 0—08 коп.

Заказы принимают все книжные магазины, распространяющие научно-техническую литературу. В Москве обращайтесь по адресу: Москва, 103031, ул. Петровка, 15, магазин № 8, отдел «Книга почтой».

АТОМИЗДАТ