

УДК 539.1.074.2

## РЕГИСТРАЦИЯ НЕЙТРОНОВ И ГАММА-КВАНТОВ КСЕНОНОВОЙ ИОНИЗАЦИОННОЙ ИМПУЛЬСНОЙ КАМЕРОЙ

© 2012 г. В. В. Дмитренко, К. Ф. Власик, В. М. Грачев,  
А. Г. Духвалов, С. Е. Улин, З. М. Утешев, А. Е. Шустов

Национальный исследовательский ядерный университет “МИФИ”

Россия, 115409, Москва, Каширское ш., 31

Поступила в редакцию 01.06.2011 г.

После доработки 23.12.2011 г.

Обсуждается возможность регистрации тепловых нейтронов с помощью ксенонового  $\gamma$ -спектрометра на основе цилиндрической ионизационной камеры, заполненной ксеноном при давлении 50 атм. Используется реакция радиационного захвата тепловых нейтронов  $^{131}\text{Xe}(n, \gamma)^{132}\text{Xe}^*$  с испусканием  $\gamma$ -квантов с энергией 668 кэВ, которые и регистрируются спектрометром. Анализируются результаты облучения ксенонового спектрометра с чувствительным объемом 0.2 л. Измеренная эффективность регистрации тепловых нейтронов составила 0.08%. Достоинством детектора является возможность одновременной регистрации и тепловых нейтронов, и  $\gamma$ -квантов, что позволяет выполнять более надежную и эффективную идентификацию радиоактивных и делящихся материалов.

### 1. ВВЕДЕНИЕ

В настоящее время актуальна задача контроля за нераспространением радиоактивных и делящихся материалов, для чего необходимы простые и надежные приборы, способные эффективно регистрировать как  $\gamma$ -кванты, так и нейтроны. Существующие промышленные гамма-нейтронные комплексы решают такую задачу с помощью детекторов различного типа, отдельно регистрирующих  $\gamma$ -кванты и нейтроны, что усложняет их эксплуатацию [1, 2].

В Радиационной лаборатории НИЯУ “МИФИ” разработаны ксеноновые спектрометры (к.с.) на основе цилиндрических импульсных ионизационных камер с экранирующими сетками. Энергетическое разрешение к.с. составляет  $2.0 \pm \pm 0.3\%$  при энергии  $\gamma$ -квантов 662 кэВ [3, 4]. Ксеноновые детекторы обладают хорошей радиационной и температурной стойкостью [4], а также стабильностью при долговременной непрерывной работе [3]. Поскольку в естественном ксеноне содержатся изотопы, способные к радиационному захвату нейтронов, существует принципиальная возможность регистрации нейтронов по  $\gamma$ -квантам, сопровождающим радиационный захват. Таким образом, к.с. можно использовать и как детектор нейтронов.

ноном  $\gamma$ -спектрометром, имеющим чувствительный объем 200 см<sup>3</sup>. Для наполнения  $\gamma$ -детектора использовался предварительно очищенный ксенон с содержанием электроотрицательных примесей  $<10^{-10}$  молярных долей. Схема к.с. приведена на рис. 1, а его основные характеристики — в табл. 1.

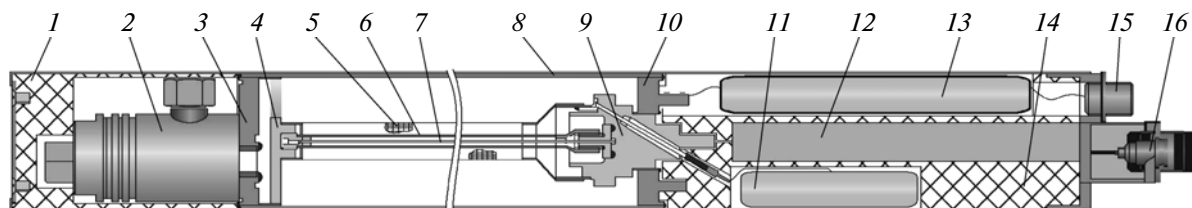
Таблица 1. Основные физико-технические характеристики к.с.

Плотность ксенона, г/см <sup>3</sup>	0.4
Давление ксенона при 23°C, атм	50
Напряжение на катоде детектора, кВ	10
Напряжение на сетке детектора, кВ	7.5
Диапазон измеряемых энергий $\gamma$ -квантов, МэВ	0.05–2
Чувствительный объем, см <sup>3</sup>	200
Диаметр сетки, мм	12
Диаметр анода, мм	4
Толщина стенки детектора, мм	1.2
Энергетическое разрешение для энергии $\gamma$ -квантов 662 кэВ, %	2.0
Габариты, мм	Ø38 × 230
Масса, кг	1
Энергопотребление, Вт	20
Питание, В	24

### 2. ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ОБОРУДОВАНИЕ

#### 2.1. Ксеноновый $\gamma$ -спектрометр

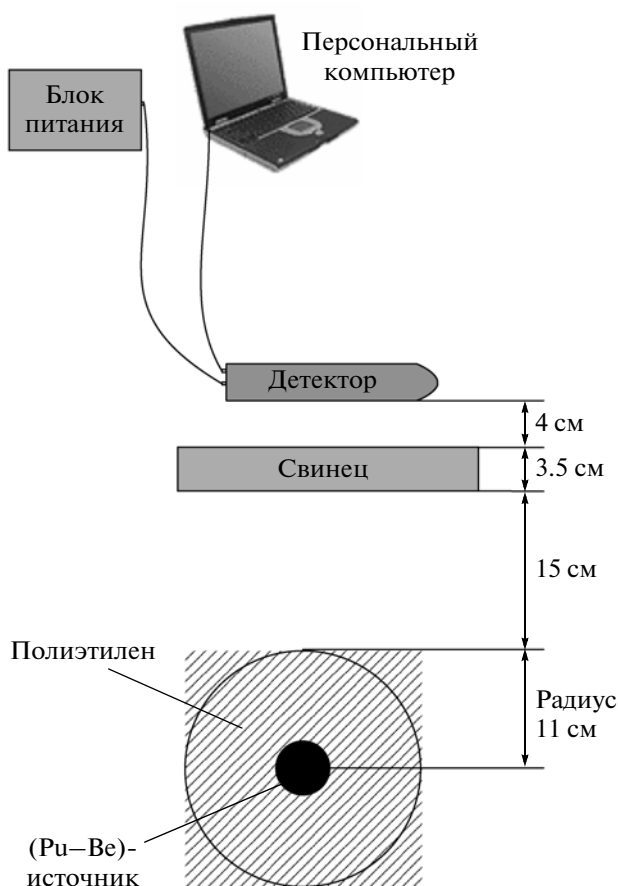
Эксперименты по регистрации тепловых нейтронов проводились с наполненным сжатым ксе-



**Рис. 1.** Схема ксенонового  $\gamma$ -спектрометра. 1 – тefлоновый изолятор; 2 – газовый вентиль; 3 – фланец с вентилем; 4 – керамическая опора для сетки; 5 – экранирующая цилиндрическая сетка; 6 – анод; 7 – заземленная металлическая нить; 8 – корпус детектора (катод); 9 – керамический гермоввод; 10 – фланец с электрическими выводами; 11 – высоковольтный фильтр; 12 – зарядочувствительный усилитель; 13 – источник высоковольтного питания; 14 – тefлоновый изолятор; 15 – разъем питания высоковольтного источника; 16 – разъем зарядочувствительного усилителя.

## 2.2. Условия и схема эксперимента

Оборудование и геометрия эксперимента по регистрации нейтронов к.с. схематически представлены на рис. 2. В качестве источника нейтронов использовался (Pu–Be)-источник (период полураспада  $T_{1/2} = 24000$  лет, диапазон энергий нейтронов 0–14 МэВ, активность источника  $4.6 \cdot 10^6$  Бк).



**Рис. 2.** Оборудование и схема эксперимента по облучению к.с. нейтронами и  $\gamma$ -квантами от (Pu–Be)-источника.

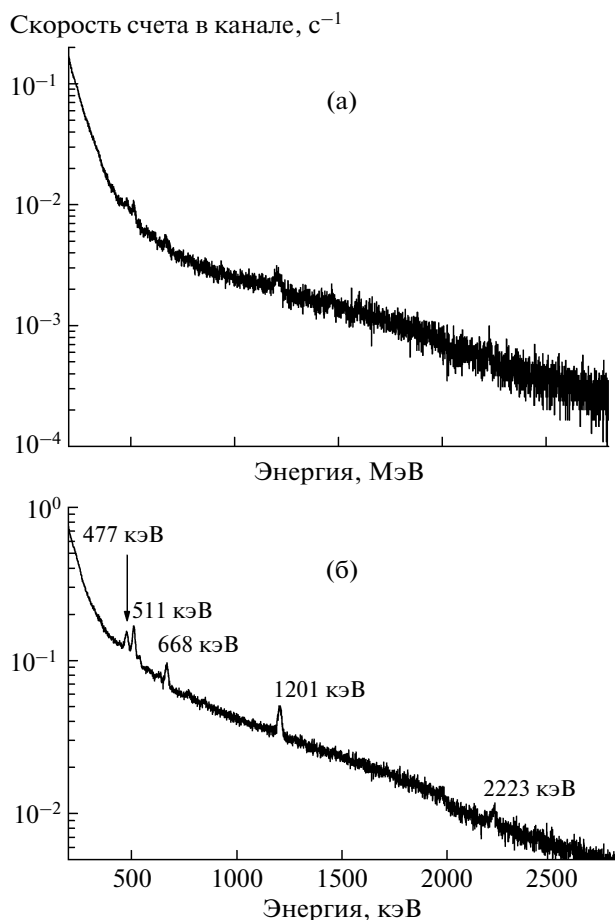
Достоинством этого источника является незначительный фон сопутствующего  $\gamma$ -излучения.

Для замедления нейтронов (Pu–Be)-источник помещался в полиэтиленовый контейнер с толщиной стенок 11 см. Для снижения интенсивности  $\gamma$ -квантов, сопровождающих образование нейтронов в (Pu–Be)-источнике, между детектором и источником нейтронов устанавливался свинцовый экран толщиной 3.5 см. Сам полиэтиленовый замедлитель также является источником фоновых  $\gamma$ -квантов. В нем при взаимодействии нейтронов с протонами генерируются  $\gamma$ -кванты с энергией 2223 кэВ, которые частично проникают через свинцовый поглотитель.

Набор информации, ее хранение, обработка и визуализация полученных результатов осуществлялись с помощью платы анализатора импульсов SBS-50M, установленной внутри персонального компьютера [5].

## 3. СПЕКТРОМЕТРИЯ РЕГИСТРИРУЕМЫХ ИЗЛУЧЕНИЙ

Предварительно измеренный фоновый спектр в рабочем помещении показан на рис. 3а. Время экспозиции фонового спектра составило 54000 с. Затем с помощью к.с. были измерены спектры излучений от (Pu–Be)-источника (рис. 3б). Для удобства сравнения на спектрах представлены скорости счета, а не количества событий. Время экспозиции составило 18000 с. Часть линий, присутствующих в измеренных спектрах, связана с наличием фонового излучения с энергией 2223 кэВ в лаборатории. Появление пика с энергией  $E_\gamma = 511$  кэВ связано с аннигиляционными  $\gamma$ -квантами, возникающими при взаимодействии  $\gamma$ -излучения с энергией более 1022 кэВ с конструктивными элементами ксенонового детектора и материалами, окружающими его. Гамма-линия с энергией 477 кэВ, вероятно, связана с радиационным захватом нейтронов изотопом  $^{10}\text{B}$ , содержащимся в полиэтилене, окружающем (Pu–Be)-источник.



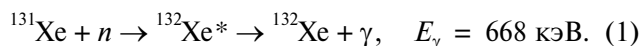
**Рис. 3.** Спектры, измеренные к.с. в рабочем помещении: **а** – естественного радиационного фона (время экспозиции 54000 с); **б** – при наличии источника нейтронов (время экспозиции 18000 с).

Помимо указанных линий, в спектре четко видна  $\gamma$ -линия с энергией  $E_\gamma = 668$  кэВ. Площадь под пиком составила 11185 событий или 0.62 со-

**Таблица 2.** Распространенность изотопов ксенона в природе и сечения радиационного захвата нейтронов

Изотоп ксенона	Содержание в смеси $\epsilon$ , %	Сечение $\sigma$ , б, радиационного захвата нейтронов	Эффективное сечение $\epsilon\sigma$ , б	Энергия $\gamma$ -квантов радиационного захвата, кэВ
$^{124}\text{Xe}$	0.1	165	0.165	188
$^{126}\text{Xe}$	0.1	3.5	$\sim 0.004$	125
$^{128}\text{Xe}$	1.9	8	0.152	197
$^{129}\text{Xe}$	26.4	21	5.544	536
$^{130}\text{Xe}$	4.1	26	1.066	164
$^{131}\text{Xe}$	21.2	85	18.02	668
$^{132}\text{Xe}$	26.9	0.45	0.121	233
$^{134}\text{Xe}$	10.4	0.27	0.028	527
$^{136}\text{Xe}$	8.9	0.26	0.023	601

бытий/с. (для фонового спектра площадь равна 2359 событий или 0.04 событий/с.). Анализ возможного механизма образования этой линии показал, что она не может возникнуть в (Pu–Be)-источнике или в материалах, окружающих детектор. Происхождение этой линии, скорее всего, связано с взаимодействием тепловых нейтронов с рабочим веществом к.с., а именно с изотопом ксенона  $^{131}\text{Xe}$ . Возникновение этой линии описывается реакцией радиационного захвата нейтронов в самом ксеноне:



По данным, приведенным в работе [7], естественный ксенон представляет собой смесь девяти преимущественно стабильных изотопов. В табл. 2 приведены процентные содержания  $\epsilon$  изотопов ксенона в смеси, сечения  $\sigma$  радиационного захвата нейтронов, эффективное сечение  $\epsilon\sigma$  и энергия испускаемого  $\gamma$ -кванта.

Видно, что с наибольшей вероятностью нейтроны захватываются именно изотопом  $^{131}\text{Xe}$ , поскольку он имеет максимальное эффективное сечение захвата, равное 18 б. У ближайшего к нему по этому параметру изотопа  $^{129}\text{Xe}$  вероятность захвата нейтрона вдвое ниже (эффективное сечение  $\sim 6$  б).

Время жизни образующегося возбужденного ядра изотопа ксенона  $^{132}\text{Xe}$  составляет  $T_{1/2} = 4.9 \times 10^{-12}$  с, и испущенный при захвате нейтрона  $\gamma$ -квант с энергией 668 кэВ может тут же зарегистрироваться, вызвав ионизацию ксенона в результате фотоэффекта или серии комптоновских рассеяний.

#### 4. ЭФФЕКТИВНОСТЬ РЕГИСТРАЦИИ НЕЙТРОНОВ И ГАММА-КВАНТОВ

При образовании  $\gamma$ -линии с энергией 668 кэВ (см. реакцию (1))  $\gamma$ -кванты испускаются мгновенно, что позволяет регистрировать их в процессе облучения к.с. нейтронами от (Pu–Be)-источника. Экспериментально измеренная зависимость эффективности регистрации к.с.  $\gamma$ -квантов показана на рис. 4.

Подсчитав число событий в пике (см рис. 3б) с энергией  $E_\gamma = 668$  кэВ, можно определить эффективность регистрации ксенонового  $\gamma$ -спектрометра. Математическая обработка пика показала, что к.с. регистрирует порядка 0.021 событий/(с  $\cdot$  см<sup>2</sup>). Для оценки эффективности регистрации нейтронов ксеноновым  $\gamma$ -спектрометром поток нейтронов от (Pu–Be)-источника в той же самой конфигурации эксперимента (см. рис. 2) был зарегистрирован нейтронным сцинтилляционным  $^6\text{LiI}(\text{Eu})$ -детектором диаметром 3 см и длиной 1.2 см. Согласно измерениям  $^6\text{LiI}(\text{Eu})$ -детектором, поток нейтронов, проходящих через к.с. в данном эксперименте, составил 27 нейтронов/(с  $\cdot$  см<sup>2</sup>).

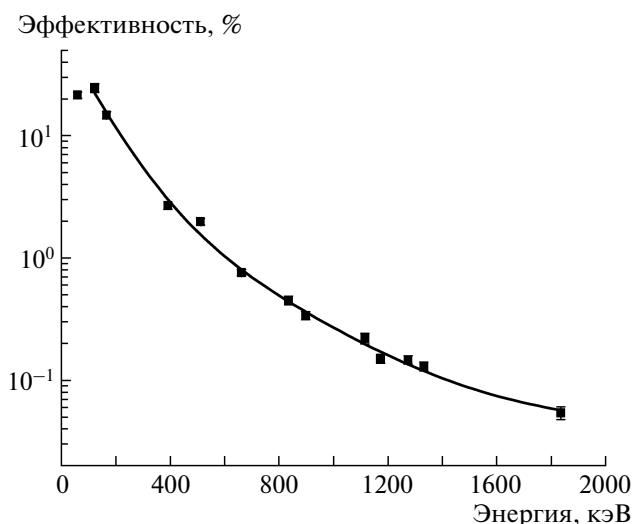


Рис. 4. Экспериментальная зависимость эффективности регистрации к.с.  $\gamma$ -квантов от их энергии.

Отсюда можно сделать вывод, что эффективность регистрации нейтронов к.с. составила порядка 0.08%.

## 6. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Исходя из результатов проведенного эксперимента можно сделать вывод о том, что  $\gamma$ -спектрометр, наполненный сжатым ксеноном, может использоваться как детектор тепловых нейтронов с эффективностью 0.08%, регистрируя  $\gamma$ -кванты с энергией 668 кэВ радиационного захвата нейтрона изотопом ксенона  $^{131}\text{Xe}$ .

Однако следует отметить, что практическое применение предложенного в данной работе метода регистрации нейтронов и  $\gamma$ -квантов одним прибором ограничено вследствие недостаточного энергетического разрешения к.с., ~2% при 662 кэВ, и метод затрудняет разделение искомой  $\gamma$ -линии 668 кэВ, вызванной радиационным захватом нейтронов, от  $\gamma$ -линии с энергией 662 кэВ от  $^{137}\text{Cs}$ , присутствие которого не всегда можно исключить.

Во избежание этих трудностей и с целью увеличения эффективности регистрации тепловых нейтронов ксеноновым  $\gamma$ -спектрометром можно использовать реакцию захвата нейтрона ядром  $^3\text{He}$ :  $^3\text{He}(n, p)^3\text{H}$  (0.764 МэВ) — с сечением захвата 5330 б. Заметим, что в случае  $\gamma$ -спектрометра на сжатом ксеноне технологически удобно добавлять в состав рабочего вещества примесь  $^3\text{He}$ .

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Ромоданов В.Л., Сахаров В.К., Белевитин А.Г. и др. // Атом. энергия. 2008. Т. 105. Вып. 2. С. 93.
2. Дмитренко В.В., Самосадный В.Т. // Приборы и системы управления. 1998. № 9. С. 60.
3. Власик К.Ф., Грачев В.М., Дмитренко В.В. и др. // ПТЭ. 1999. № 5. С. 114. (Vlasik K.F., Grachev V.M., Dmitrenko V.V. et al. // Instrum. Exp. Tekh. 1999. V. 42. № 5. P. 685.)
4. Власик К.Ф., Грачев В.М., Дмитренко В.В. и др. // ПТЭ. 1998. № 3. С. 19. (Vlasik K.F., Grachev V.M., Dmitrenko V.V. et al. // Instrum. Exp. Tekh. 1998. V. 41. № 3. P. 309).
5. Официальный сайт фирмы “Грин Стар” [www.greenstar.ru](http://www.greenstar.ru)
6. Справочник. Физические величины / Под ред. И.С. Григорьева, Е.З. Мейлихова. М.: Атомиздат, 1991.