

## Расчёт спектров фотонейтронных источников

Николай Николаевич Моисеев<sup>1</sup>, Евгений Михайлович Круглов<sup>2</sup>, Андрей Вячеславович Дидык<sup>3</sup>

<sup>1, 2, 3</sup> Всероссийский научно-исследовательский институт метрологии имени Д. И. Менделеева, Санкт-Петербург, Россия,

<sup>1</sup>n.n.moiseev@vniim.ru

**Аннотация.** Рассмотрены вопросы повышения точности определения средней энергии и вида энергетического распределения (формы спектра) нейтронов Sb-Be- и Ra-Be-источников. Указанные фотонейтронные источники применяются для калибровки энергетических шкал нейтронных спектрометров и определения энергетической зависимости чувствительности радиометров и дозиметров нейтронов. Предложена методика расчёта энергетических спектров радионуклидных источников нейтронов типа Sb-Be ( $\gamma, n$ ) и Ra-Be ( $\gamma, n$ ) и приведены результаты расчёта. Исследована зависимость спектра источника от его конструкции. Правильность результатов расчёта энергетических спектров радионуклидных источников подтверждена экспериментально. Полученные данные будут востребованы для определения энергетической зависимости чувствительности нейтронных спектрометров, радиометров и дозиметров.

**Ключевые слова:** спектр, фотонейтронный источник, ( $\gamma, n$ )-реакция

**Для цитирования:** Моисеев Н. Н., Круглов Е. М., Дидык А. В. Расчёт спектров фотонейтронных источников // Измерительная техника. 2021. № 7. С. 54–59. <https://doi.org/10.32446/0368-1025it.2021-7-54-59>

## Photoneutron sources spectra calculation

Nikolaj N. Moiseev<sup>1</sup>, Evgenij M. Kruglov<sup>2</sup>, Andrej V. Didyk<sup>3</sup>

<sup>1, 2, 3</sup> D. I. Mendeleyev Institute for Metrology, St. Petersburg, Russia, <sup>1</sup>n.n.moiseev@vniim.ru

**Abstract.** The issues of increasing the accuracy of determining the average energy and the type of energy distribution (shape of the spectrum) of neutrons from Sb-Be- and Ra-Be-sources are considered. The indicated photoneutron sources are used to calibrate the energy scales of neutron spectrometers and to determine the energy dependence of the sensitivity of radiometers and neutron dosimeters. A method is proposed for calculating the energy spectra of radionuclide neutron sources of the Sb-Be ( $\gamma, n$ ) and Ra-Be ( $\gamma, n$ ) types, and the calculation results are presented. The dependence of the spectrum of the source on its design is investigated. The correctness of the results of calculating the energy spectra of radionuclide sources has been confirmed experimentally. The data obtained will be used to determine the energy dependence of the sensitivity of neutron spectrometers, radiometers and dosimeters.

**Keywords:** spectrum, photoneutron source, ( $\gamma, n$ )-reaction

**Введение.** Нейтроны, в отличие от других видов ионизирующих излучений, не создают пар ионов непосредственно в детекторе. Под воздействием нейтронов в материале детектора возбуждаются ядерные реакции с образованием заряженных частиц и  $\gamma$ -квантов. Это вторичное излучение регистрируется детекторами распространённых типов, такими, как сцинтиллятор, пропорциональный счётчик, ионизационная камера, полупроводниковый детектор и др. Разнообразие ядерных реакций, вызываемых нейтронами, и сильная зависимость сечений этих реакций от энергии нейтронов приводят к тому, что приборы для измерения параметров полей нейтронного излучения всегда имеют достаточно сильную зависимость чувствительности от энергии нейтронов. При исследованиях средств измерений параметров нейтронных полей необходимо определять эту зависимость, поскольку она вносит основной вклад в неопределённость результатов измерений. Корпорация «РОСАТОМ» в положении о порядке проведения испытаний средств

измерений в целях утверждения типа (Приказ № 1/14-НПА от 15.11.2013) требует обязательного определения спектральной зависимости чувствительности приборов, предназначенных для использования в корпорации.

В настоящее время на рынке появились спектрометры нейтронного излучения [1, 2], для которых энергетическая зависимость чувствительности является основной характеристикой.

Для калибровки энергетических шкал спектрометров и определения энергетической зависимости чувствительности радиометров и дозиметров нейтронов в диапазоне энергий  $2,53 \cdot 10^{-2} - 5 \cdot 10^5$  эВ наряду с источниками моноэнергетических и квазимоноэнергетических нейтронов (ISO 8529-1:2001 "Reference neutron radiations. Part 1. Characteristics and methods of production") на базе ускорителей заряженных частиц и фильтрованных пучков из реакторов используются фотонейтронные источники [3]. Конструктивно источник нейтронов – это гамма-излучатель, заключённый в оболочку (радиатор) из

материала с низким порогом  $(\gamma, n)$ -реакции, поскольку энергия гамма-излучения радионуклидных источников не превышает 3 МэВ (СП 2.6.1.1292-03 «Ионизирующее излучение, радиационная безопасность. Гигиенические требования по ограничению облучения населения за счёт природных источников ионизирующего излучения. Санитарные правила» Табл. П1.2). В природе существует только два ядра, на которых можно получить фотонейтроны с использованием естественных гамма-излучателей – бериллий и дейтерия. Порог  $(\gamma, n)$ -реакции бериллия 1,67 МэВ, дейтерия – 2,23 МэВ. [3]. Поэтому в подавляющем большинстве случаев в качестве материала радиатора для фотонейтронных источников используется бериллий. Наибольшее распространение получили фотонейтронные источники на системах радий-бериллий (Ra-Be) и сурьма-бериллий (Sb-Be). Конструкции источников предложены в работе [4], оценка средних энергий для источников типа Sb-Be и Ra-Be составляет 24 и 300 кэВ соответственно.

Эти же значения рекомендованы в ГОСТ 8.355-79 «ГСИ. Радиометры нейтронов. Методы и средства поверки». В более поздних работах отечественных и зарубежных авторов также рекомендуется использовать значения 24 и 300 кэВ [3]. При этом в работах, известных авторам настоящей статьи, не приводятся ни форма спектра, ни методы определения энергии нейтронов.

Для проведения испытаний средств измерений плотности потока нейтронов необходимо более точно определить не только среднюю энергию, но и вид энергетического распределения (формы спектра) нейтронов Sb-Be- и Ra-Be-источников.

Цель работы – определить спектральные характеристики радионуклидных источников нейтронов типа Sb-Be  $(\gamma, n)$  и Ra-Be  $(\gamma, n)$  и исследовать зависимость спектра от конструкции источника.

**Алгоритм расчёта.** Связь между энергией фотонейтронов  $E_n$  и энергией гамма-квантов  $E_\gamma$  основана на законах сохранения энергии и импульсов частиц, участвующих в реакции [5]:

$$E_n = \frac{M}{M + m_n} (E_\gamma - \varepsilon + E_\gamma^2) + \frac{E_\gamma}{(M + m_n)c} \sqrt{2m_n E_n} \cos \theta, \quad (1)$$

где  $\varepsilon$  – энергия связи нейтрона в ядре;  $M, m_n$  – массы конечного ядра и нейтрона;  $c$  – скорость света;  $\theta$  – угол вылета фотонейтрона относительно направления гамма-кванта.

Из выражения (1) следует, что спектр фотонейтронов изменяется в зависимости от угла вылета относительно направления гамма-кванта. Кроме того, нейтроны теряют часть энергии при столкновении с ядрами бериллия. Для наиболее корректного учёта всех влияющих факторов спектры исследуемых фотонейтронных источников рассчитаны методом Монте-Карло [6]. Поскольку спектр нейтронов источника существенно зависит от его конструкции, то расчёт проводили для трёх используемых в лаборатории ВНИИМ источников – два Sb-Be-источника различных конструкций и один Ra-Be-источник.

В первом Sb-Be-источнике излучатель имеет вид шарика из облучённой металлической сурьмы, заключённого

в сферическую стальную оболочку внешним диаметром 6 мм. Радиатор в форме шара диаметром 25 мм из металлического бериллия состоит из двух свинчивавшихся полушарий с внутренней центральной сферической полостью диаметром 6,2 мм. Во втором источнике излучатель выполнен в виде иглы из облучённой металлической сурьмы, упакованной в стальной цилиндр диаметром 6 мм и высотой 25 мм. Радиатор – шар диаметром 70 мм из металлического бериллия с каналом для размещения гамма-источника диаметром 6,2 мм. При размещении гамма-излучателя в радиаторе эффективный центр источника гамма-квантов совпадал с геометрическим центром бериллиевого шара. Канал радиатора над гамма-излучателем закрыт пробкой из бериллия диаметром 6 мм и высотой 22 мм.

В Ra-Be-источнике излучателем служила чистая безводная соль бромистого радия, запаянная в сферическую ампулу из безборного стекла диаметром 8 мм. Радиатор выполнен в виде бериллиевого шара диаметром 40 мм, состоявший из двух свинчивавшихся полушарий с центральной сферической полостью диаметром 8,2 мм.

Спектр нейтронов Sb-Be-источников получен для десяти энергий гамма-квантов в диапазоне энергий от 1691,0 до 2182,6 кэВ (все значимые по интенсивности гамма-переходы  $^{124}\text{Sb}$  с энергией, превышающей порог фотоядерной реакции на  $^9\text{Be}$ ).

Спектр нейтронов Ra-Be определён для гамма-переходов в диапазоне энергий 1729,6–2447,7 кэВ.

Основная информация о дифференциальном сечении фотоядерной реакции на  $^9\text{Be}$  получена из работ [7, 8]. В [7] сечение реакции измерено вблизи порога с помощью радионуклидных источников жёсткого гамма-излучения. В [8] использовано тормозное излучение, сечение реакции получено в широком диапазоне энергий.

Измерения, в которых использовалось гамма-излучение радионуклидных источников, более корректны, поскольку в данном случае потоки и энергии используемых гамма-лучей можно измерить с высокой точностью. В работе [7] сечения фотоядерной реакции измерялись при шести значениях энергии гамма-квантов. В табл. 1 приведены некоторые характеристики использованных при измерениях источников и результаты измерений сечения реакции, где  $T_{1/2}$  – период полураспада соответствующего радионуклида;  $\sigma(\gamma, n)$  –

Таблица 1

**Характеристики источников гамма-излучения и результаты измерения сечения фотоядерной реакции на  $^9\text{Be}$**

| Источник          | $T_{1/2}$  | $E_\gamma$ , кэВ | $E_n$ , кэВ | $\sigma(\gamma, n)$ , мб |
|-------------------|------------|------------------|-------------|--------------------------|
| $^{59}\text{Co}$  | 70,80 сут  | 1674,7           | 8           | 0,88 (0,16)              |
| $^{105}\text{Ru}$ | 4,44 ч     | 1705,2           | 34          | 1,33 (0,24)              |
| $^{65}\text{Ni}$  | 2,52 ч     | 1724,9           | 52          | 1,10 (0,20)              |
| $^{28}\text{Al}$  | 2,24 мин   | 1778,9           | 100         | 0,73 (0,13)              |
| $^{88}\text{Y}$   | 106,60 сут | 1836,0           | 152         | 0,47 (0,09)              |
| $^{39}\text{Cl}$  | 37,14 мин  | 2167,6           | 446         | 0,18 (0,04)              |

сечение ( $\gamma, n$ )-реакции на бериллии, в скобках даны значения средних квадратических отклонений (СКО) результатов измерений;  $E_n$  – энергия образующегося нейтрона;  $E_\gamma$  – энергия гамма-квантов.

Зависимость сечения  $\sigma$  фотоядерной реакции на  $^9\text{Be}$ , выраженного в барнах, от энергии гамма-квантов  $E_\gamma$  описывается формулой

$$\sigma(E_\gamma) = ax^b / (1 + cx + dx^2), \quad (2)$$

где  $a=0,2515$ ;  $b=0,59$ ;  $c=-0,231$ ;  $d=0,0257$ ;  $x=\sqrt{E_\gamma-1666}$ .

Распределение (2) имеет максимум при энергии гамма-квантов 1695 кэВ с шириной пика на половине высоты  $FWHM=100$  кэВ, что согласуется с кластерной моделью  $^9\text{Be}$ .

Энергию нейтрона из ( $\gamma, n$ )-реакции можно рассчитать с помощью законов сохранения энергии и импульса при столкновении гамма-кванта с ядром-мишенью. Упрощённое выражение принимает вид

$$E_n = 8(E_\gamma - 1666) / 9 + 0,00015354 E_\gamma \cos \theta \sqrt{E_\gamma - 1666}.$$

Угловое распределение нейтронов предполагалось изотропным ввиду отсутствия другой достоверной информации.

Основными процессами взаимодействия гамма-квантов в указанном выше энергетическом диапазоне являются комптоновское рассеяние, рождение пар и фотоэффект. Данные по сечениям этих процессов взяты из [6]. По этим данным подготовлены аппроксимации полного сечения  $s$  и отношения  $p$  сечения комптоновского рассеяния к полному для всех используемых сред – сурьмы, железа и бериллия.

Сечение упругого рассеяния нейтронов на бериллии аппроксимировалось отрезками прямых (т. е. зависимость сечения  $\sigma$  от энергии  $E_n$  в указанном диапазоне линейна):

$\sigma=5,8$  барн при  $E_n < 40$  кэВ;

$\sigma=(6,12-0,008E_n)$  барн при  $E_n < 140$  кэВ;

$\sigma=(5,778-0,00556E_n)$  барн при  $E_n < 320$  кэВ;

$\sigma=(4,914-0,00286E_n)$  барн при  $E_n < 500$  кэВ.

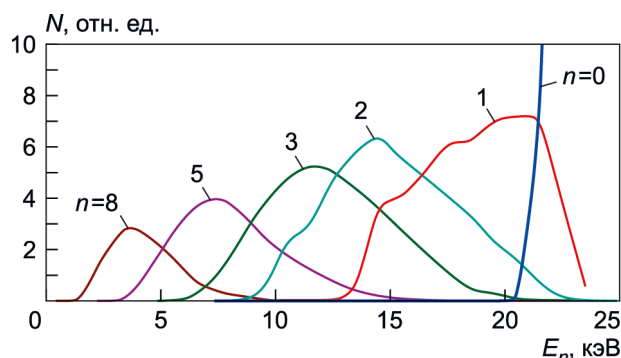


Рис. 1. Зависимость спектра нейтронов, образованных в результате фотоядерной реакции гамма-линии 1691 кэВ, от числа  $n$  столкновений нейтрона с ядрами бериллия

Fig. 1. 1691 keV gamma-ray photonuclear reaction produced neutron spectra dependence on the neutron-beryllium collisions count  $n$

Сечение фотонейтронных реакций по результатам компиляции данных задано в виде таблицы.

Алгоритм расчёта условно представлен как взаимодействие между следующими блоками.

Геометрический блок: источник, контейнер и оболочка сферической формы из сурьмы, железа и бериллия соответственно. Производилась проверка принадлежности начала и конца отрезка траектории одной среде и вычисление координат точки пересечения границ двух сред траекторией частицы.

Блок взаимодействия гамма-квантов со средой. Разыгрывался вид взаимодействия исходного кванта, затем вычислялись параметры рассеянного кванта.

Блок взаимодействия нейтронов с бериллием. Осуществлялся цикл расчёта характеристик нейтрона в процессе упругого рассеяния на ядрах  $^9\text{Be}$ , фиксировалось число взаимодействий за одну траекторию.

Блок анализа. С учётом энергии нейтрона на выходе из бериллиевой сферы и числа взаимодействий за одну траекторию формировались выходные гистограммы спектров и числа взаимодействий.

В каждой истории программа запрашивала начальную энергию гамма-кванта и обрабатывала  $10^6$  траекторий.

Поскольку сечение рождения фотонейтронов мало, то для повышения статистической эффективности расчётов вычисления проводились с использованием статистических весов:

при розыгрыше длины пробега гамма-кванта статистический вес частицы домножался на вероятность взаимодействия на длине  $t$  до выхода из бериллиевой сферы ( $1-e^{-st}$ );

статистический вес нейтрона домножался на вероятность образования фотонейтрона для получения результирующего веса, с которым образовавшийся нейтрон блуждает по бериллиевой сфере, пока не выйдет за её пределы.

Рассеяние нейтрона предполагалось упругим и изотропным в системе центра масс во всём рассматриваемом диапазоне энергий. Число взаимодействий упругого рассеяния за одну траекторию фиксировалось при обработке в блоке анализа.

После запоминания характеристик нейтрона, вышедшего за пределы бериллия, происходил возврат программы в блок взаимодействия гамма-квантов со средой для прослеживания дальнейшей судьбы оставшегося кванта. Разыгрывался тип взаимодействия и, если выпадало рождение пар или фотоэффект, то осуществлялся переход на новую траекторию, а если комптоновское рассеяние, то разыгрывались энергия и угол рассеяния. Если энергия рассеянного кванта оказывалась ниже пороговой, траектория обрывалась, если больше – вводились новые направляющие косинусы рассеянного кванта с учётом известного угла рассеяния при случайно выбранном азимутальном угле, при этом признак гамма-кванта менялся с первичного на вторичный и продолжалось блуждание гамма-кванта до окончания истории.

Учитывая низкое значение сечения образования фотонейтронов, на первый взгляд кажется целесообразным использовать максимально возможное количество материала радиатора. Однако это приведёт к увеличению числа столкновений родившегося нейтрона с ядрами бериллия, и, как следствие, к потере энергии. На рис. 1 представлены

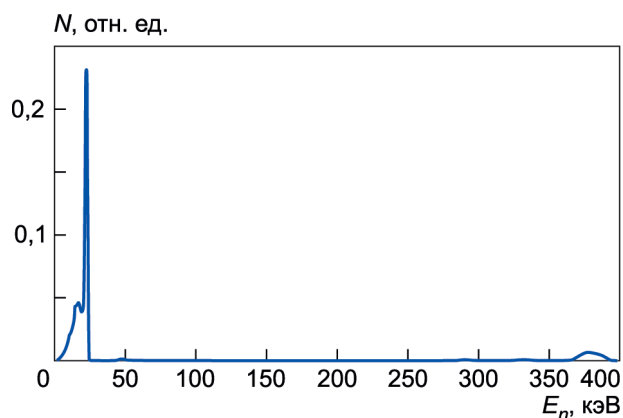


Рис. 2. Спектр нейтронов Sb-Be-источника с бериллиевой сферой диаметром 25 мм

Fig. 2. 25 mm diameter beryllium sphere Sb-Be neutron source spectrum

спектры нейтронов, образованных в результате фотоядерной реакции гамма-линии 1691 кэВ в зависимости от числа столкновений нейтрона с ядрами бериллия.

С увеличением числа столкновений в расчётном спектре отчётливо наблюдается сдвиг максимума распределения в область низких энергий. Поэтому с увеличением размеров радиатора будет происходить не только увеличение числа нейтронов, но и их рассеивание, и спектр нейтронов будет смягчаться из-за увеличения среднего числа столкновений. Это значит, что бессмысленно говорить о средней энергии нейтронов абстрактного фотонейтронного источника без уточнения его конструкции. Средняя энергия будет существенно меняться в зависимости от величины и формы бериллиевого радиатора.

Уменьшение количества бериллия приводит не только к уменьшению потока нейтронов. Увеличивается влияние неточности знания количества материала в источнике на погрешность расчёта спектра нейтронов (неидеально сферическая форма активной части Sb, неравномерная толщина стальной оболочки и т. п.). Анализ влияющих факторов показывает, что оптимальной может быть признана конструкция, при которой и источник гамма-квантов, и радиатор имеют сферическую форму, при этом наружный диаметр источника лежит в диапазоне 4–6 мм, а наружный диаметр бериллиевого радиатора – в диапазоне 20–40 мм.

На рис. 2 представлен рассчитанный с помощью программы, описанной выше, спектр Sb-Be-источника с диаметром бериллиевой сферы 25 мм; 98 % нейтронов находится в интервале энергий до 25 кэВ.

На рис. 3 приведены расчётные спектры Sb-Be-источников нейтронов с диаметрами бериллиевых радиаторов 25; 40; 70; 120 мм.

Рассмотрим спектр нейтронов, не испытывавших рассеяния. При  $E_\gamma = 1691$  кэВ энергия фотонейтронов изменяется по закону  $E_n = (22,222 + 1,294 \cos \theta)$  кэВ. Поскольку распределение рождающихся нейтронов при расчёте считалось изотропным, спектр фотонейтронов, не испытывавших рассеяния, должен быть равномерно распределён в интервале энергий 20,928–23,516 кэВ. Однако результат расчёта оказался иным.

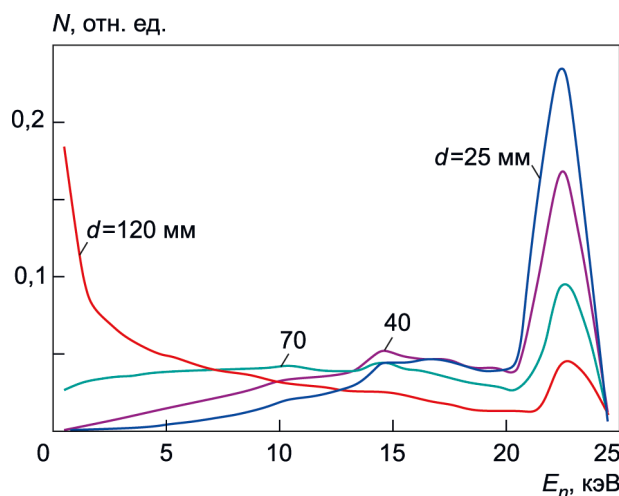


Рис. 3. Начальные участки спектров нейтронов сферических Sb-Be источников с бериллиевыми сферами диаметром 25; 40; 70; 120 мм

Fig. 3. Various diameters (25; 40; 70; 120 mm) beryllium spheres Sb-Be neutron source spectrum low energy part

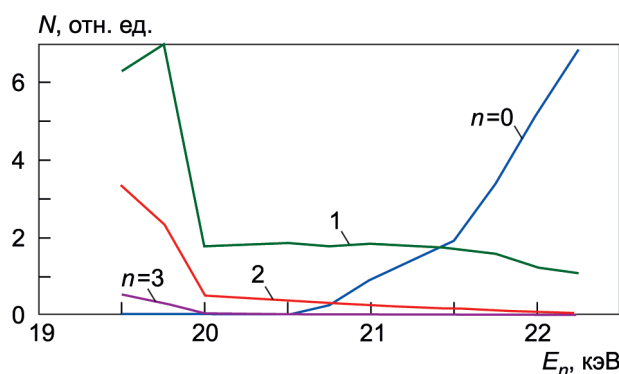


Рис. 4. Спектр нейтронов, образованных гамма-линией 1691 кэВ, в зависимости от числа столкновений  $n$  рождённого нейтрона с ядрами бериллия

Fig. 4. 1691 keV gamma photons born neutrons spectra dependence on the collisions number with beryllium nuclei  $n$

Поэтому провели дополнительный расчёт этой области спектра с шагом по энергии 0,25 кэВ. На рис. 4 приведено распределение по энергиям нейтронов, образованных гамма-линией 1691 кэВ, в зависимости от числа столкновений образовавшегося нейтрона с ядрами бериллия.

При отсутствии столкновений ( $n=0$ ) спектр не имеет формы равномерного распределения (см. рис. 4). Треугольный характер спектра при отсутствии рассеяния нейтронов ( $n=0$ ) можно объяснить следующим эффектом. Длина пробега гамма-кванта в бериллии до взаимодействия достаточно велика, поэтому в первом приближении можно считать, что нейтроны рождаются равномерно во всём объёме. Длина пробега нейтрона в бериллии около 1,3 см, поэтому с большей вероятностью наружу выходят нейтроны, образовавшиеся вблизи поверхности и рассеявшиеся на малые углы, следовательно, обладающие большей энергией. Нейтроны, рассеявшиеся назад, имеют меньшую энергию,

и выход их затруднен из-за большей толщины материала на пути пробега.

Методика расчёта спектра Ra-Be-источника полностью идентична, поэтому не имеет смысла описывать её подробно.

На рис. 5 приведён спектр Ra-Be-источника с диаметром сферического бериллиевого радиатора 40 мм и диаметром сферического гамма-излучателя 8 мм (такой источник имеется в распоряжении лаборатории нейтронных измерений ВНИИМ).

**Результаты расчёта и их анализ.** В результате проведённых расчётов средние энергии источников описанных выше конструкций определены для Sb-Be 25,3 и 18,3 кэВ соответственно, для Ra-Be – 114,6 кэВ.

Критерий правильности расчёта формы спектра используемых источников – близость отношений экспериментально определённых значений чувствительности детекторов к значениям чувствительности  $R$ , рассчитанным по формуле

$$R = \int_0^{E_{\max}} R(E)\varphi(E)dE. \quad (3)$$

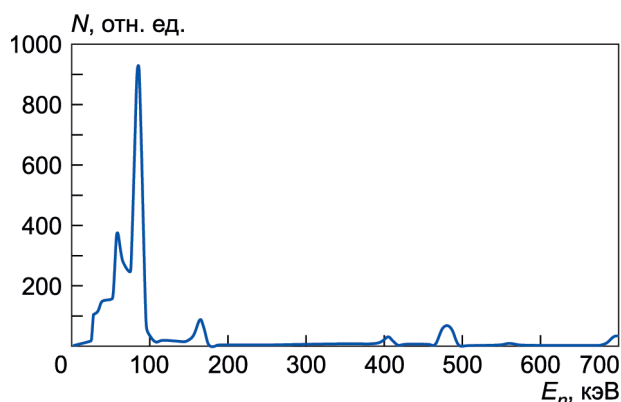


Рис 5. Спектр фотонейтронов Ra-Be источника со сферическим бериллиевым радиатором диаметром 40 мм

Fig 5. 40 mm diameter beryllium sphere Ra-Be neutron source spectrum

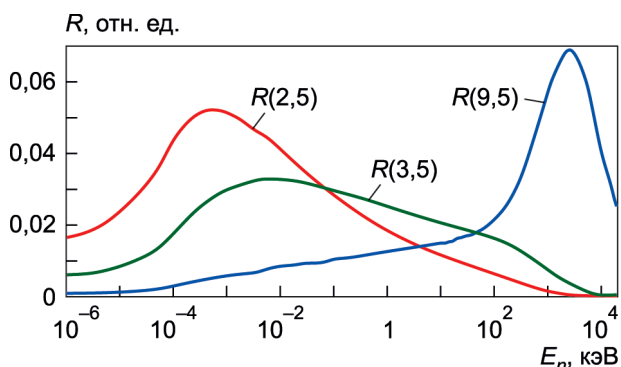


Рис. 6. Нормированные значения зависимости чувствительности сфер Боннера диаметром 2,5; 3,5; 9,5 дюймов (63,5; 88,9; 241,3 мм) от энергии нейтронов

Fig. 6. Normalized response functions energy dependence of Bonner spheres 2,5; 3,5; 9,5 inches (63,5; 88,9; 241,3 mm) diameters

Экспериментальные  $R_3$  значения чувствительности определялись из соотношения

$$R_3 = N^*/\varphi,$$

где  $N^*$  – скорость счёта детектора, скорректированная с учётом мёртвого времени и фона;  $\varphi$  – плотность потока нейтронов в месте расположения эффективного центра детектора.

Измерения проводились с тремя детекторами типа сфер Боннера диаметром 2,5; 3,5; 9,5 дюймов (63,5; 88,9; 241,3 мм соответственно), существенно различающимися по зависимости чувствительности от энергии.

На основании данных о спектральной зависимости чувствительности сфер Боннера, приведённых в [9], рассчитаны таблицы с шагом 1 кэВ в области энергий нейтронов 0–720 кэВ. Выражение (3) преобразовано к виду

$$R = \sum_{i=1}^{720} R(E_i)\varphi(E_i). \quad (4)$$

Поскольку в [9] приведены нормированные значения функций спектральной зависимости чувствительности (рис. 6), т. е. представлен вид зависимости, а не абсолютные значения чувствительности, отношение  $R_3/R$  не равно единице. Поэтому сравнивались отношения экспериментально полученных и рассчитанных по формуле (4) значений чувствительности для источников различного спектрального состава. Результаты приведены в табл. 2, где  $d_c$  – диаметр сферы;  $Sb_{d70}$ ;  $Sb_{d25}$ ;  $Ra_{d40}$  – Sb-Be- и Ra-Be-источники диаметром 70, 25, 40 мм соответственно.

Из таблицы следует, что экспериментально измеренные и рассчитанные значения эффективностей детекторов к нейтронному излучению различного спектрального состава совпадают в пределах 1 % в пяти случаях из шести. Отличие в 2,6 % для чувствительности сферы диаметром 241,3 мм к нейтронам Ra-Be-источника можно объяснить большой погрешностью экспериментально определённого значения эффективности, поскольку поток нейтронов Ra-Be-источника составлял всего  $2,7 \cdot 10^5 \text{ с}^{-1}$ , а чувствительность детектора диаметром 241,3 мм в этой области энергий очень низка.

Дополнительным подтверждением правильности расчёта спектров служат результаты ключевых международных сличений CCRI(III)-K1 [10], в которых Sb-Be-источник

Таблица 2

Отношения экспериментально полученных и рассчитанных значений чувствительности для источников различного спектрального состава

| $d_c, \text{ мм}$ | $\frac{R_3(Sb_{d70})}{R_3(Sb_{d25})}$ | $\frac{R(Sb_{d70})}{R(Sb_{d25})}$ | $\frac{R_3(Ra_{d40})}{R_3(Sb_{d25})}$ | $\frac{R(Ra_{d40})}{R(Sb_{d25})}$ |
|-------------------|---------------------------------------|-----------------------------------|---------------------------------------|-----------------------------------|
| 63,5              | 1,128                                 | 1,126                             | 0,720                                 | 0,726                             |
| 88,9              | 1,047                                 | 1,049                             | 0,873                                 | 0,869                             |
| 241,3             | 0,935                                 | 0,937                             | 1,359                                 | 1,395                             |

диаметром 25 мм использовался для создания поля квази-моноэнергетических нейтронов с энергией 24,5 кэВ.

**Заключение.** Определены спектральные характеристики источников нейтронов типа Sb-Be ( $\gamma, n$ ) и Ra-Be ( $\gamma, n$ ), экспериментально подтверждена возможность использования таких источников для определения чувствительности нейтронных детекторов типа сфер Боннера. В настоящее время в составе эталонной базы России в области нейтронных измерений нет генераторов моноэнергетических нейтронов с энергиями менее 2,5 МэВ (реакция  $D(d, n)^3\text{He}$ ). Источники нейтронов типа Sb-Be ( $\gamma, n$ ) и Ra-Be ( $\gamma, n$ ) помогают решить проблему калибровки энергетических шкал нейтронных спектрометров в области энергий нейтронов до сотен килоэлектронвольт и определения энергетической зависимости чувствительности радиометров и дозиметров нейтронов при проведении их испытаний для утверждения типа средств измерений.

#### Список литературы

1. Руднев П., Моисеев Н., Дидык А. Спектрометр-дозиметр SDMF-1206PRO.DB – эффективный инструмент для исследования нейтронного и  $\gamma$ -излучения // *Электроника: Наука, технология, бизнес*. 2016. № 8 (158). С. 78–81.
2. Моисеев Н. Н., Дидык А. В. Исследование сцинтилляционного спектрометра-дозиметра гамма-квантов и быстрых нейтронов // *АНРИ*. 2016. № 4 (87). С. 24–30.
3. Roberts N. J., Moiseev N. N., Kralik M., *Metrologia*, 2011, vol. 48, no. 6, pp. S239–S253.  
<https://doi.org/10.1088/0026-1394/48/6/S02>
4. Curtiss L. F., Carson A., Reproducibility of Photo-Neutron, *Standards. Phys. Rev.*, 1949, vol. 76, 1412.  
<https://doi.org/10.1103/PhysRev.76.1412.2>
5. Ландау Л. Д., Лифшиц Е. М. Теоретическая физика. Учебник в 10 т. Т. 1. М. Наука 1988. 216 с.
6. Metropolis N., Ulam S., The Monte-Carlo method, *J. Amer. Statistical assoc.*, 1949, vol. 44, no. 247, pp. 335–341.
7. Fujishiro M., Tabata T., Okamoto K., Tsujimoto T., *Canadian Journal of Physics*, 1982, vol. 60, pp. 1672–1679.  
<https://doi.org/10.1139/p82-224>
8. Сторм Э., Израэль Х. Сечения взаимодействия гамма-излучения (для энергий 0,001–100 МэВ и элементов с 1 по 100). Справочник: Пер. с англ. М.: Атомиздат, 1973, 254 с.

9. Wiegel B., Alvera A. V., Siebert B. R. L., *Calculation of the Response Function of Bonner Spheres with a Spherical  $^3\text{He}$  Proportional Counter Using a Realistic Detector Model*, PTB-Bericht N-21, Braunschweig, 1994, 84 p.

10. Thomas D. J., Lewis V. E., Klein H., Allisy-Roberts P. J., *Metrologia*, 2010, vol. 47, no. 1A, 06014.  
<https://doi.org/10.1088/0026-1394/47/1A/06014>

#### References

1. Rudnev P., Moiseev N., Didyk A., SDMF-1206PRO.DB spectrometer-dosimeter is the effective tool for neutron and gamma radiation research, *Electronics: Science, Technology, Business*, 2016, no. 8 (158), p. 78–81. (in Russ.)
2. Moiseev N. N., Didyk A. V., Issledovanie scintillacionnogo spektrometra-dozimetra gamma-kvantov i bystryh nejtronov [Investigation of the scintillation spectrometer-dosimeter of gamma quanta and fast neutrons], *ANRI*, 2016, no. 4 (87), p. 24. (in Russ.)
3. Roberts N. J., Moiseev N. N., Kralik M., *Metrologia*, 2011, vol. 48, no. 6, pp. S239–S253.  
<https://doi.org/10.1088/0026-1394/48/6/S02>
4. Curtiss L. F., Carson A., Reproducibility of Photo-Neutron, *Standards. Phys. Rev.*, 1949, vol. 76, 1412.  
<https://doi.org/10.1103/PhysRev.76.1412.2>
5. Landau L. D., Liashits E. M., *Teoreticheskaja fizika [Theoretical physics]*, in 10 vol., vol. 1, Moscow, Nauka Publ., 1988, 216 p.
6. Metropolis N., Ulam S., The Monte-Carlo method, *J. Amer. Statistical assoc.*, 1949, vol. 44, no. 247, pp. 335–341.
7. Fujishiro M., Tabata T., Okamoto K., Tsujimoto T., *Canadian Journal of Physics*, 1982, vol. 60, pp. 1672–1679.  
<https://doi.org/10.1139/p82-224>
8. Storm Ellery, Israel Harvey, *Photon Cross Sections from 0,001 to 100 MeV for Elements 1 through 100*, Los Alamos, N. M., Los Alamos Scientific Laboratory of the University of California, 1967.
9. Wiegel B., Alvera A. V., Siebert B. R. L., *Calculation of the Response Function of Bonner Spheres with a Spherical  $^3\text{He}$  Proportional Counter Using a Realistic Detector Model*, PTB-Bericht N-21, Braunschweig, 1994, 84 p.
10. Thomas D. J., Lewis V. E., Klein H., Allisy-Roberts P. J., *Metrologia*, 2010, vol. 47, no. 1A, 06014.  
<https://doi.org/10.1088/0026-1394/47/1A/06014>

Статья поступила в редакцию 01.04.2021; принята к публикации 01.06.2021.