

P16-2020-12

В. А. Крылов<sup>1</sup>, Е. Е. Павлик<sup>1</sup>, Г. Н. Тимошенко<sup>1,2</sup>

**ГРАДУИРОВКА МНОГОСФЕРНОГО СПЕКТРОМЕТРА  
НЕЙТРОНОВ В ОТКРЫТОЙ ГЕОМЕТРИИ**

---

<sup>1</sup> Объединенный институт ядерных исследований, Дубна

<sup>2</sup> Государственный университет «Дубна», Дубна, Россия

Крылов В. А., Павлик Е. Е., Тимошенко Г. Н.  
Градуировка многосферного спектрометра нейтронов  
в открытой геометрии

P16-2020-12

Описана процедура градуировки многосферного спектрометра нейтронов с источником  $^{252}\text{Cf}$  в открытой геометрии, и получен градуировочный коэффициент, усредненный по шести сферам. Результаты подтверждены восстановлением исходного спектра  $^{252}\text{Cf}$  по показаниям спектрометра.

Работа выполнена в Лаборатории радиационной биологии ОИЯИ.

Сообщение Объединенного института ядерных исследований. Дубна, 2020

Krylov V. A., Pavlik E. E., Timoshenko G. N.  
Calibration of the Neutron Multisphere Spectrometer in Open Geometry

P16-2020-12

The procedure for calibrating the neutron multisphere spectrometer with a  $^{252}\text{Cf}$  source in open geometry is described, and a calibration coefficient averaged over six spheres is obtained. The results are confirmed with unfolding the initial  $^{252}\text{Cf}$  spectrum by the spectrometer readings.

The investigation has been performed at the Laboratory of Radiation Biology, JINR.

Communication of the Joint Institute for Nuclear Research. Dubna, 2020

При восстановлении спектров нейтронов по показаниям многосферного спектрометра используются расчетные функции его чувствительности (ФЧ) с полиэтиленовыми сферами различного диаметра. Расчет производится с помощью универсальных программ транспорта излучений в веществе методом Монте-Карло. Точность расчетов связана с моделированием переноса нейтронов с помощью констант с непрерывной зависимостью от энергии или библиотек многогрупповых констант в области низких энергий и моделей адрон-ядерных взаимодействий в области высоких энергий, а также с учетом конкретной конструкции спектрометра. ФЧ спектрометра ОИЯИ до энергии 20 МэВ рассчитывались по программе MCNP4C [1], использующей нейтронную базу данных LA150N с сечениями взаимодействий нейтронов с водородом и углеродом до 150 МэВ. Детектором медленных нейтронов в спектрометре является сцинтиллятор LiI(Eu) с обогащением  ${}^6\text{Li}$  до 90 % согласно его паспорту. Сечения взаимодействий нейтронов с Li в LA150N ограничены энергией 20 МэВ.

Чувствительность спектрометра определялась реакцией  ${}^6\text{Li}(n, {}^3\text{H}){}^4\text{He}$  с сечениями из библиотеки JENDL 3.0.

Ввиду того, что в реальности степень обогащения  ${}^6\text{Li}$  кристалла LiI(Eu) меньше заявленного в паспорте, а также из-за ряда методических погрешностей расчета ФЧ, необходимо нормирование расчетных значений ФЧ к реальным по абсолютной величине, т. е. градуировка спектрометра с помощью источника нейтронов с известным выходом и спектром.

Наиболее подходящим источником нейтронов для целей градуировки спектрометра является  ${}^{252}\text{Cf}$  ( $\text{Cf}_2\text{O}_3$ ), распадающийся по двум каналам — это альфа-распад (96,91 %,  $T_{1/2} = 2,7$  года) и спонтанное деление (3,09 %,  $T_{1/2} = 85,5$  года) с периодом полураспада по обоим каналам 2,645 года. Энергетический спектр нейтронов подобен реакторному спектру деления с наиболее вероятной энергией  $\sim 0,7$  МэВ и средней энергией по спектру  $\sim 2,1$  МэВ. Главными преимуществами данного источника являются хорошо известный спектр и большой удельный выход нейтронов, что позволяет делать мощные источники малого размера (т. е. избежать искажений исходного спектра). Изотопный состав Cf в производимых в Димитровграде источниках [2] следующий: 3–5 %  ${}^{249}\text{Cf}$  ( $T_{1/2} = 351$  год), 10–15 %  ${}^{250}\text{Cf}$  ( $T_{1/2} = 13,08$  лет), 5–10 %  ${}^{251}\text{Cf}$  ( $T_{1/2} = 898$  лет), 70–80 %  ${}^{252}\text{Cf}$ . Из этих изотопов только  ${}^{250}\text{Cf}$  обла-

дает спонтанным делением (0,08 %), поэтому с распадом источника в нем увеличивается доля  $^{250}\text{Cf}$ , что несколько меняет его свойства. Цилиндрический источник может обладать небольшой анизотропией выхода нейтронов (с торца и боковой поверхности). Выход гамма-квантов источника составляет  $\sim 5,56$  кванта на нейтрон.

Считается, что спектр быстрых нейтронов источника  $^{252}\text{Cf}$  должен быть близок к однопараметрическому распределению максвелловского типа, т. е. пропорционален  $\sqrt{E} \exp(-E/T)$ , где  $T$  — ядерная максвелловская температура (МэВ), варьирующаяся у разных авторов в диапазоне 1,3–1,5. В литературе приводится большое количество измерений спектра нейтронов  $^{252}\text{Cf}$  различными методами и их аппроксимаций. В работе [3] дано еще одно распределение, хорошо аппроксимирующее спектр в широком диапазоне энергий:  $N(E) = N \exp(-E/a) \sinh(\sqrt{bE})$ , где  $a = 1,18$  МэВ,  $b = 1,03419$  МэВ $^{-1}$ . Тем не менее в качестве международного стандарта ISO 8529-1 (International Organization for Standardization) для метрологии нейтронных детекторов был принят спектр некапсулированного источника  $^{252}\text{Cf}$  с аппроксимацией максвелловским распределением при  $T = 1,43$  МэВ [4]. Капсуляция источника оболочкой из нержавеющей стали не приводит к сколько-нибудь существенному изменению выхода нейтронов и их спектра [5].

Градуировка многосферного спектрометра заключается в измерениях скорости счета от источника  $^{252}\text{Cf}$  со сферами разного диаметра и нормировании расчетных значений скорости счета к экспериментальным результатам. Расчетные значения скоростей счета при различных сферах получаются путем свертки спектра нейтронов источника с расчетными значениями ФЧ.

Градуировка многосферного спектрометра ОИЯИ проводилась в конце июня 2019 г. с помощью аттестованного источника  $^{252}\text{Cf}$  с выходом  $(1,12 \cdot 10^7 \pm 8 \%)$  нейтрон/с на 17.11.2016 г. Все результаты градуировки были приведены к одной дате 21.06.2019 г., на которую выход нейтронов из источника составил  $(5,67 \cdot 10^6 \pm 8 \%)$  нейтрон/с. С целью снижения фона многократно рассеянных нейтронов градуировка выполнялась в открытой геометрии вне помещения. С той же целью источник нейтронов и спектрометр были подняты над поверхностью земли на высоту 232 см. Расстояние между центрами источника и детектора нейтронов равнялось 149,5 см вне зависимости от диаметра сфер. Для вычитания фона нейтронов, многократно рассеянных в окружающей среде, из результатов измерений между источником нейтронов и сферами помещался поглощающий гетерогенный конус (рис. 1).

Конус из полиэтилена плотностью  $0,94$  г/см $^3$  с добавкой по весу 5 % бора дополнен начальной цилиндрической частью из стали и покрыт кадмиевой оболочкой толщиной 0,5 мм. Раствор конуса перекрывал размер сферы с наибольшим диаметром. Геометрия градуировки показана на рис. 2.

Расчетная плотность потока нейтронов на расстоянии 149,5 см, приведенная к 21.06.2019 г., составляла  $20,237$  см $^{-2}$ ·с $^{-1}$ . Однако наличие влаж-

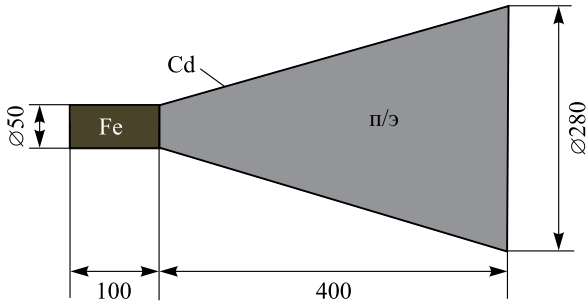


Рис. 1. Конструкция поглощающего конуса (размеры в мм)

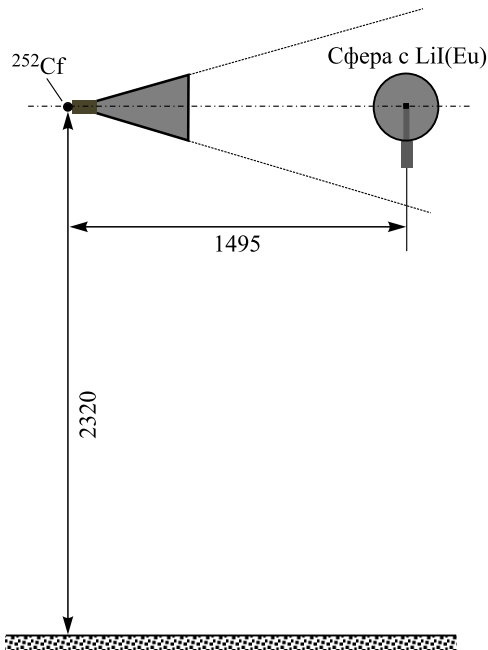


Рис. 2. Геометрия градуировки спектрометра при измерении фона многократно рассеянных во внешней среде нейтронов

ного воздуха между источником и детектором приводит к ослаблению потока прямых нейтронов, облучающих сферы. В работе [6] коэффициент ослабления потока нейтронов  $^{252}\text{Cf}$  в сухом воздухе в геометрии «узкого» пучка определялся как  $\exp\left[d \sum_i \sigma_i(E)\right]$ , где  $d$  — расстояние,  $\sum_i \sigma_i(E)$  — сумма макроскопических сечений взаимодействий нейтронов  $^{252}\text{Cf}$  с кислородом и

азотом воздуха ( $1055 \text{ см}^{-1}$ ). Для расстояния 150 см коэффициент ослабления равен 1,016. Учет относительной влажности воздуха 80 % для данного расстояния дает дополнительное ослабление потока в 1,006 раза [7]. В итоге поток нейтронов из источника снизится на данном расстоянии на 2,21 % и составит  $19,8 \text{ см}^{-2} \cdot \text{с}^{-1}$ .

В спектрометре ОИЯИ регистрируется аппаратурный спектр событий реакции  ${}^6\text{Li}(n, {}^3\text{H}){}^4\text{He}$ , представляющий собой пик событий, соответствующих суммарному энерговыделению тритона и альфа-частицы в кристалле ( $\sim 3,5 \text{ МэВ}$  в эквивалентной энергии электронов). Слева от него регистрируются события от гамма-квантов и шумы. В разностных измерениях с теньвым конусом и без него при одной и той же экспозиции определялся разностный счет под пиком, соответствующим событиям регистрации нейтронов. При градуировке использовались сферы диаметром 3, 5, 8, 10 и 12 дюймов, а также сфера диаметром 10 дюймов со свинцовой вставкой внутри диаметром 8 см, предназначенная для расширения чувствительности спектрометра в области высоких энергий нейтронов. Значения разностных скоростей счета спектрометра приведены в табл. 1.

**Таблица 1. Приведенные к 21.06.2019 г. скорости счета спектрометра при градуировке**

Параметр	Сфера					
	3''	5''	8''	10''	12''	10'' + Pb
Скорость счета без конуса, $\text{с}^{-1}$	0,79251	2,38703	3,00603	2,38243	1,70657	2,87005
Скорость счета с конусом, $\text{с}^{-1}$	0,24023	0,41541	0,33388	0,24009	0,15174	0,32795
Разностная скорость счета, $\text{с}^{-1}$	0,55228	1,97162	2,67215	2,14234	1,55483	2,54210

Свертка спектра нейтронов  ${}^{252}\text{Cf}$  по ISO 8529-1, нормированного на выход  $19,8 \text{ с}^{-1}$ , с расчетными значениями ФЧ дает значения теоретических скоростей счета спектрометра в данном поле. В табл. 2 представлены эти теоретические скорости счета спектрометра и их отношения к экспериментально полученным при градуировке разностным скоростям счета.

Среднее отношение теоретического и экспериментального счета по всем сферам составляет 1,73 и является градуировочным коэффициентом, на который надо умножить восстановленный по показаниям спектрометра спектр нейтронов. В том случае, когда гетерогенная сфера со свинцовой вставкой не используется (сравнительно «мягкий» спектр нейтронов), градуировочный коэффициент можно считать равным 1,75. Суммарная погрешность градуировочного коэффициента превышает 10 %, поскольку только выход нейтронов источника известен с точностью 8 %.

**Таблица 2. Теоретические скорости счета спектрометра и результаты градуировки**

Параметр	Сфера					
	3''	5''	8''	10''	12''	10'' + Pb
Теоретическая скорость счета, с <sup>-1</sup>	0,99958	3,49773	4,43927	3,72634	2,74629	4,11926
Отношение теоретической и экспериментальной скорости счета	1,810	1,774	1,661	1,739	1,776	1,620

Проверка полученных результатов была осуществлена путем восстановления исходного спектра <sup>252</sup>Cf по разностному счёту спектрометра для сфер 3, 5, 8, 10 и 12 дюймов при градуировке. На рис. 3 такое сравнение спектров представлено в единицах летаргии. Согласие спектров по форме хорошее, несмотря на то, что для восстановления спектра был использован не весь набор сфер. Видно, что восстановленный спектр несколько шире, что связано с особенностями метода регуляризации, лежащего в основе программы восстановления спектра.

Помимо градуировки с использованием источника <sup>252</sup>Cf выполнена аналогичная процедура с источником Pu-Be II разряда в большом свободном помещении. К сожалению, спектр нейтронов Pu-Be источника известен с меньшей точностью и зависит от конкретной упаковки источника, особенно в области низких энергий. Тем не менее при градуировке спектрометра с этим источником был получен коэффициент  $1,8 \pm 0,6$ , усредненный по тем же сферам, что, в общем, подтверждает полученные с <sup>252</sup>Cf результаты.

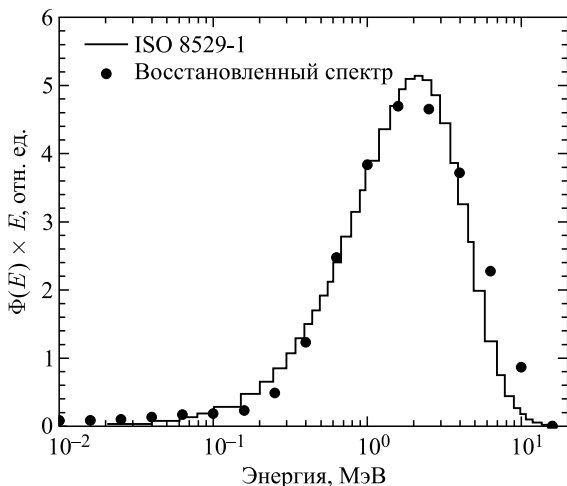


Рис. 3. Сравнение исходного и восстановленного по показаниям спектрометра спектров <sup>252</sup>Cf

Авторы выражают благодарность В. Н. Швецову за огромную помощь в выполнении данной работы.

## ЛИТЕРАТУРА

1. MCNP — A General Monte Carlo *N*-Particle Transport Code. Version 4C. LA-13709-M, Los Alamos National Laboratory, 2000.
2. Гордеев Я. Н., Зинковский В. И., Карасев В. И., Карелин Е. А., Крылов Е. А., Курочкин Н. С., Сюзев В. Н. Изготовление нейтронных источников из калифорния-252. Препринт НИИАР-10(418), Дмитровград, 1980.
3. *Thomas D. et al.* Revision of ISO 8529 — Reference Neutron Radiations // Radiation Protection Dosimetry. 2018. V. 180, Iss. 1–4, P. 21–24,
4. ISO 8529-2:2000. Reference Neutron Radiations. Part 2. Calibration Fundamentals of Radiation Protection Devices Related to the Basic Quantities Characterizing the Radiation Field. Geneva, 2000.
5. *Weinmann-Smith R., Croft S., Swinhoe M. T., Enqvist A.* Changes to the 252-Cf Neutron Spectrum Caused by Source Encapsulation // ESARDA Bulletin. No. 54, June 2017.
6. *Grande Marianna Lourdes Marie L. et al.* Experimental, Computational, and Analytical Methods for the Characterization of a Neutron Field for Calibration of Neutron Monitoring Instruments in the Philippines // Philippine J. Sci. 2019. V. 149 (S1). P. 93–99.
7. *Масляев П. Ф.* Учет влияющих факторов при поверке установок с радионуклидными источниками нейтронного излучения // АНРИ. 2016. № 2. С. 1–9.

Получено 19 мая 2020 г.



Редактор *М. И. Зарубина*

Подписано в печать 26.06.2020.

Формат 60 × 90/16. Бумага офсетная. Печать офсетная.

Усл. печ. л. 0,56. Уч.-изд. л. 0,63. Тираж 170 экз. Заказ № 59947.

Издательский отдел Объединенного института ядерных исследований

141980, г. Дубна, Московская обл., ул. Жолио-Кюри, 6.

E-mail: [publish@jinr.ru](mailto:publish@jinr.ru)

[www.jinr.ru/publish/](http://www.jinr.ru/publish/)