

УДК 621.039, 539.1.074, 621.38

**ВАЛИДАЦИЯ И ВЕРИФИКАЦИЯ РАБОТЫ НОВОГО МУЛЬТИСФЕРНОГО СПЕКТРОМЕТРА**ПЫШКИНА М.Д.<sup>1,2</sup>, ВАСИЛЬЕВ А.В.<sup>1</sup>, ЕКИДИН А.А.<sup>1</sup>, НАЗАРОВ Е.И.<sup>1</sup>, ГУРИНОВИЧ В.И.<sup>3</sup>, КОМАР Д.И.<sup>3</sup>, КОЖЕМЯКИН В.А.<sup>3</sup>1) *Институт промышленной экологии УрО РАН,  
(Екатеринбург, Российская Федерация)*2) *Уральский федеральный университет,  
(Екатеринбург, Российская Федерация)*3) *Научно-производственное унитарное предприятие «АТОМТЕХ»,  
(Минск, Республика Беларусь)*

**Аннотация.** В данной работе представлены разработка, валидация и верификация работы нового мультисферного спектрометра. Спектрометр состоит из активного детектора тепловых нейтронов на основе <sup>3</sup>He-пропорционального счетчика и набора из 12 полиэтиленовых сфер-замедлителей с диаметрами от 3" до 12". Отклики детектора при размещении его внутри сфер-замедлителей различного диаметра были получены с помощью Монте-Карло кода *FLUKA*. Восстановление энергетического распределения плотности потока нейтронного излучения выполнено на основе метода параметризации. Проведена валидация работы разработанного спектрометра и метода восстановления энергетического распределения плотности потока нейтронного излучения с использованием двух наиболее широко распространенных радионуклидных нейтронных источников: <sup>239</sup>Pu(a, n)Be и <sup>252</sup>Cf. Проведены сличения спектров нейтронного излучения, полученные новым мультисферным спектрометром и дозиметром-спектрометром нейтронов ДСН-4.

**Ключевые слова:** Монте-Карло моделирование, нейтроны, дозиметр-радиометр, поправочный коэффициент, геометрия облучения.

**VALIDATION AND VERIFICATION OF THE NEW MULTISPHERE SPECTROMETER OPERATION**MARIYA D. PYSHKINA<sup>1,2</sup>, ALEKSEY V. VASILYEV<sup>1</sup>, ALEKSEY A. EKIDIN<sup>1</sup>, EVGENIY I. NAZAROV<sup>1</sup>, VLADIMIR I. GURINOVICH<sup>3</sup>, DAMIAN I. KOMAR<sup>3</sup>, VALERY A. KOZHEMYAKIN<sup>3</sup>1) *Institute of Industrial Ecology, Ural Branch of the Russian Academy of Sciences,  
(Yekaterinburg, Russian Federation)*2) *Ural Federal University,  
(Yekaterinburg, Russian Federation)*3) *Scientific Production Unitary Enterprise «ATOMTEH»,  
(Minsk, Republic of Belarus)*

**Abstract.** This paper presents the development, validation and verification of the operation of a new multisphere spectrometer. The spectrometer consists of an active thermal neutron detector based on a <sup>3</sup>He-proportional counter and a set of 12 polyethylene spheres-moderators with diameters from 3" to 12". The responses of the detector when placed inside the moderator spheres of various diameters were obtained using the *FLUKA* Monte-Carlo code. The energy distribution of the neutron radiation flux density is reconstructed based on the parameterization method. The operation of the developed spectrometer and the method for reconstructing the energy distribution of the neutron radiation flux density were validated using the two most widespread radionuclide neutron sources: <sup>239</sup>Pu (a, n) Be and <sup>252</sup>Cf. Comparisons of the neutron radiation spectra obtained by the new multisphere spectrometer and the DSN-4 neutron dosimeter-spectrometer have been carried out.

**Keywords:** Monte-Carlo simulation, neutrons, dosimeter-radiometer, correction factor, exposure geometry.

**Введение**

За биологической защитой на объектах использования атомной энергии нейтронное излучение имеет непрерывный спектр, охватывающий до 11 порядков по энергии – от 0,025 эВ до 20 МэВ. Так как энергетическая зависимость чувствительности отдельных индивидуальных дозиметров отличается от удельного индивидуального эквивалента дозы, то широкий диапазон

энергий нейтронов в большинстве случаев приводит к искаженной оценке индивидуальной дозы персонала. Наиболее точные и простые оценки эффективной дозы при воздействии нейтронного излучения на персонал могут быть получены с использованием информации о энергетическом и угловом распределении плотности потока нейтронов на рабочем месте персонала. В 1960 году группа ученых предложила новый тип нейтронного спектрометра [1]. Он состоял из небольшого детектора на основе сцинтиллятора  ${}^6\text{LiI}(\text{Eu})$ , установленного внутри полиэтиленовых сфер-замедлителей с размерами от 2 до 12 дюймов в диаметре. Спектрометры такого типа претерпели множество изменений за последние 60 лет – использовались различные типы нейтронных детекторов и сфер-замедлителей [2,3]. Для регистрации нейтронов применялись активные нейтронные детекторы на основе фольг Au и In, ионизирующие камеры, такие как  ${}^3\text{He}$  и  $\text{BF}_3$  пропорциональные счетчики, сцинтиллятор  ${}^6\text{LiI}(\text{Eu})$ . Целью данной работы была разработка, валидация и верификация работы нового мультисферного спектрометра для целей индивидуальной дозиметрии нейтронного излучения на рабочих местах персонала объектов использования атомной энергии.

### Материалы и методы

В новом мультисферном спектрометре применяется  ${}^3\text{He}$ -пропорциональный счетчик, который регистрирует нейтроны после их замедления до тепловых энергий в полиэтиленовых сферах различного размера. Типичный счетчик представляет собой заполненную газом трубку с высоким напряжением, приложенным к аноду и катоду. Нейтрон, проходящий через трубку, будет взаимодействовать с атомом  ${}^3\text{He}$  с образованием трития ( ${}^3\text{T}$ ) и протона. Протон ионизирует окружающие атомы газа, создавая заряды, которые, в свою очередь, ионизируют другие атомы газа в процессе лавинообразного размножения. Результирующие заряды собираются в виде измеримых электрических импульсов с амплитудами, пропорциональными энергии нейтронов. Импульсы служат для идентификации и количественной оценки нейтронов определенной энергии. В данной работе использовался  ${}^3\text{He}$ -пропорциональный счетчик с давлением  ${}^3\text{He}$  10 бар внутри цилиндрического активного объема  $3,9\text{ см}^3$  ( $\text{Ø}2,5 \times 2,5\text{ см}$ ) [4].

Изначально оригинальный сферический спектрометр Боннера содержал 5 полиэтиленовых сфер-замедлителей диаметром 2, 3, 5, 8, 12 дюймов. Поскольку большинство нейтронных спектрометров на основе  ${}^3\text{He}$  обычно содержат до 14 сферических замедлителей, были изготовлены 12 полиэтиленовых сфер-замедлителей с номинальными диаметрами 3, 3,5, 4, 4,5, 5, 6, 7, 8, 9, 9,5, 10, 12 дюймов, входящих в состав разработанного спектрометра. Сферические замедлители большего диаметра и со слоем металла не разрабатывались из-за диапазона энергий возможных нейтронных полей. Все сферические замедлители изготовлены из полиэтилена высокой плотности с добавлением технического углерода для уменьшения старения полиэтилена. Плотность этого материала  $0,96\text{ г/см}^3$ . Спектрометр разработан УП «АТОМТЕХ», г. Минск, Республика Беларусь [5]. Внешний вид спектрометра представлен на рис. 1.

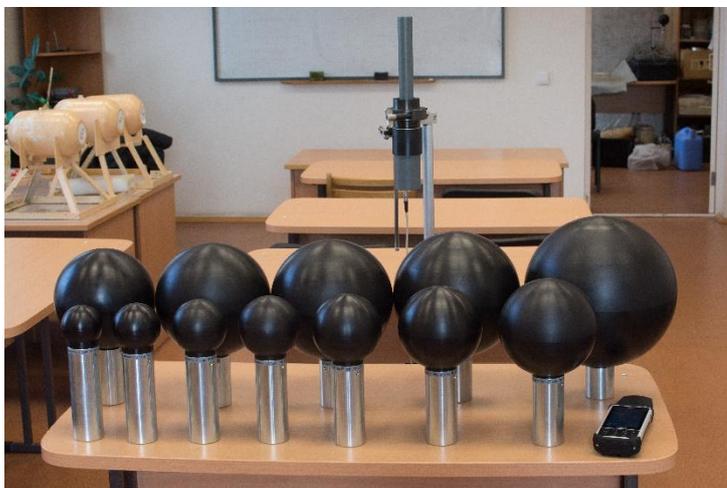


Рис. 1. Внешний вид спектрометра

Спектрометр был смоделирован с помощью Монте-Карло кода *FLUKA* [6, 7] для получения функций отклика детектора внутри каждого сферического замедлителя. Модель детектора включала детекторный объем, заполненный  $^3\text{He}$ , электронику, смоделированную в виде цилиндра из нержавеющей стали со стальным тросом, помещенные в полиэтиленовый цилиндр, покрытый нержавеющей сталью. Модель счетчика со сферическим замедлителем помещалась в сферический объем, заполненный воздухом, но исключаяющий рассеяние нейтронов. Имитационная модель представлена на рис. 2.

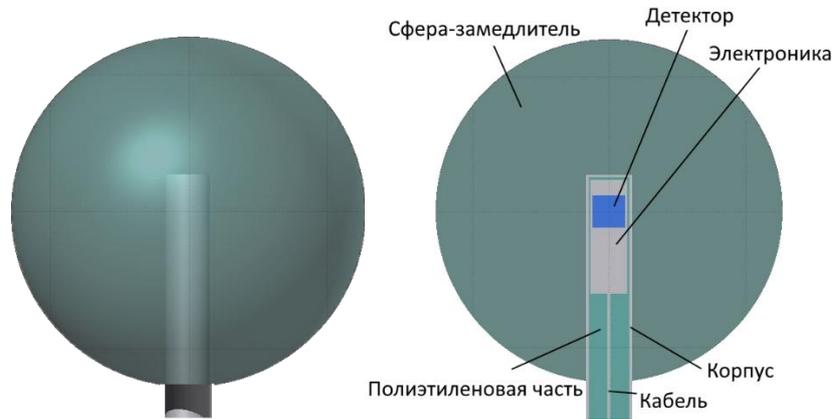


Рис. 2. Монте-Карло – модель спектрометра

Спектрометр облучался моноэнергетическим нейтронным пучком квадратного сечения, покрывающим всю площадь прибора. Энергия нейтронного пучка менялась от  $10^{-3}$  до  $10^7$  эВ. Функция отклика представлена на рис.3. Предполагается, что функция отклика «голого» детектора имеет энергетическую зависимость  $1/v$ . Но, как видно, она имеет пик в области энергий от  $1 \cdot 10^{-2}$  до  $5 \cdot 10^{-2}$  эВ. Этот пик появляется, вероятно, потому что нейтроны перед тем, как провзаимодействовать с  $^3\text{He}$ , проходят через конструкционный материалы, такие как сталь (Fe, Ni и т. д.) и полиэтилен.

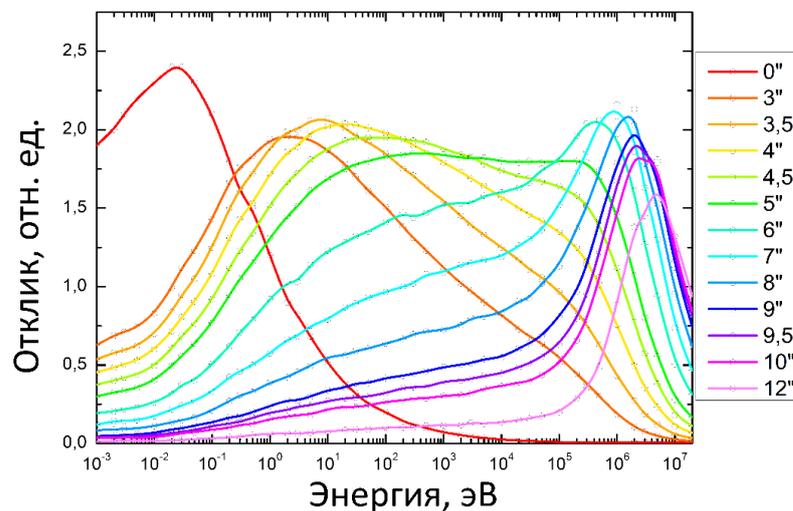


Рис. 3. Отклик детектора внутри сфер-замедлителей различного диаметра

Для валидации работы разработанного спектрометра были проведены измерения скоростей счета от двух наиболее популярных радионуклидных источников:  $^{239}\text{Pu}(\alpha, n)\text{Be}$  и  $^{252}\text{Cf}$ . Центр спектрометра и нейтронный источник были размещены на расстоянии 1 м и подняты на 1,5 м от пола. Расстояние между спектрометром и стенами помещения составляло  $\sim 3$  м и  $\sim 2$  м в эксперименте с источниками  $^{239}\text{Pu}(\alpha, n)\text{Be}$  и  $^{252}\text{Cf}$  соответственно, чтобы минимизировать количество рассеянных нейтронов. В ходе эксперимента скорость счета

определялась детектором, помещенным в сферы различного диаметра. Результаты измерения счетчика для обоих источников представлены в табл. 1.

**Табл. 1.** Результаты измерений скорости счета

Диаметр сферы, дюйм	<sup>239</sup> Pu(α, n)Be	<sup>252</sup> Cf
	Скорость счета, с <sup>-1</sup>	
0	3,3±	0,6±
3	5,9±	2,1±
3,5	8,1±	2,4±
4	10,1±	3,3±
4,5	14,0±	4,3±
5	16,0±	5,4±
6	20,5±	6,8±
7	24,2±	7,7±
8	26,1±	7,5±
9	24,3±	7,0±
9,5	25,1±	6,5±
10	24,8±	6,4±
12	21,1±	4,5±

Определение энергетического распределения плотности потока нейтронов в определенном энергетическом диапазоне возможно после восстановления всего спектра во всем энергетическом диапазоне. Метод восстановления спектра измеряемого нейтронного потока основан на вычислении минимума невязки при сравнении измеренных скоростей счета и тех, которые были получены путем перемножения матриц чувствительности детектора в сферах-замедлителях и спектра нейтронного излучения, представляемого в виде суперпозиции спектра тепловых, промежуточных и быстрых нейтронов, описываемых формулами, которые приводятся в табл. 2 [8].

**Табл. 2.** Функции, описывающие плотность потока в разных энергетических диапазонах

Тепловые, $\varphi_{th,j}$ , E<10 <sup>-7</sup> МэВ	Промежуточные, $\varphi_{epi,j}$ , 10 <sup>-7</sup> МэВ< E<0,1 МэВ	Быстрые, $\varphi_{f,j}$ , E> 0,1 МэВ
$\frac{E_j}{T_0^2} \cdot e^{(-E_j/T_0)}$	$[1 - e^{-(E_j/E_d)^2}] \cdot E_j^{(b-1)} \cdot e^{(-E_j/\beta')}$	$E_j^\alpha \cdot e^{(-E_j/\beta)}$

где  $E_j$  – энергия j-ого энергетического интервала, МэВ,  $T_0^2$  – энергия пика тепловых нейтронов,  $2,53 \cdot 10^{-8}$  МэВ,  $E_d$  – энергия, характеризующая нижнюю границу функции,  $7,07 \cdot 10^{-8}$  МэВ,  $b$  – наклон возрастающей стороны спектра, отн. ед.,  $\beta'$  – наклон ниспадающей части спектра, МэВ,  $\alpha$  – переменная, описывающая форму пика быстрых нейтронов, отн. ед.,  $\beta$  – переменная, описывающая энергию пика быстрых нейтронов, МэВ.

Аналитически спектр нейтронов может быть представлен с помощью следующего математического выражения:

$$\varphi_j = P_{th} \cdot \varphi_{th,j} + P_{epi} \cdot \varphi_{epi,j} + P_f \cdot \varphi_{f,j}, \text{ с}^{-1} \text{ см}^2 \text{ МэВ}^{-1} \quad (1)$$

где  $P_{th}, P_{epi}, P_f$  – весовые коэффициенты, отн. ед.

Для целей верификации работы спектрометра проведены параллельные измерения спектра <sup>239</sup>Pu(α,n)Be радионуклидного источника с помощью разработанного спектрометра и дозиметра-спектрометра нейтронов [9]. Дозиметр-спектрометр нейтронов состоит из пластикового сцинтиллятора с ZnS(Ag), набора из 4-х сфер замедлителей и блока отображения информации. Внешний вид прибора приведен на рис. 4.

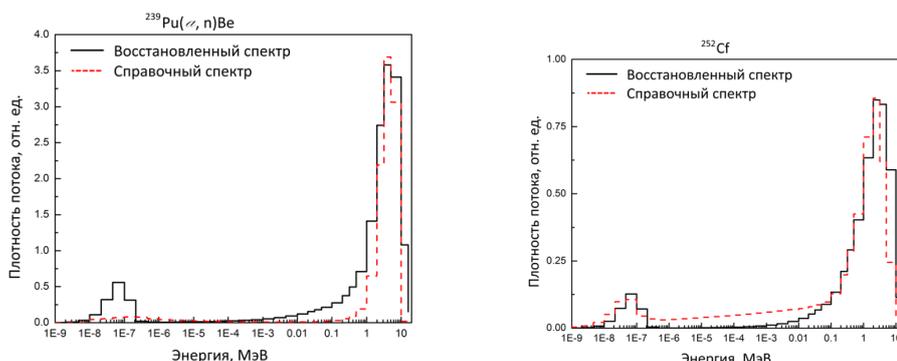


**Рис. 4.** Внешний вид дозиметра-спектрометра нейтронов ДСН-4

Геометрия измерений для разработанного спектрометра и дозиметра-спектрометра нейтронов была идентична. Приборы располагались на расстоянии 1,0 м от источника и на высоте 1,5 от поверхности пола. В случае разработанного спектрометра проводились измерения скоростей счета. В случае дозиметра-спектрометра нейтронов – мощность AMBIENTного эквивалента дозы.

### Результаты и их обсуждение

Спектры радионуклидных источников  $^{239}\text{Pu}(\alpha, n)\text{Be}$  и  $^{252}\text{Cf}$  восстановлены и сопоставлены с литературными данными [10, 11]. Спектры восстановлены в диапазоне энергий от  $10^{-9}$  до 20 МэВ. Восстановленные и справочные спектры приведены на рис. 5.



**Рис. 5.** Восстановленные и справочные спектры  $^{239}\text{Pu}(\alpha, n)\text{Be}$  и  $^{252}\text{Cf}$  радионуклидных источников

Хорошо видно, что положение пиков восстановленных и справочных спектров совпадает по энергии. Наличие пика тепловых нейтронов в восстановленных спектрах обоих источников свидетельствует об наличии рассеянных нейтронов.

По справочным и восстановленным спектрам были рассчитаны следующие характеристики:  $h^*(10)$  и средняя энергия спектра. Результаты расчета представлены в табл. 3.

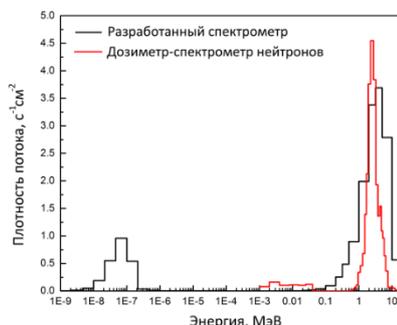
**Таблица 3.** Дозиметрические характеристики справочных и восстановленных спектров  $^{239}\text{Pu}(\alpha, n)\text{Be}$  и  $^{252}\text{Cf}$  радионуклидных источников

Характеристика	$^{239}\text{Pu}(\alpha, n)\text{Be}$		$^{252}\text{Cf}$	
	Справочный	Восстановленный	Справочный	Восстановленный
$h^*(10)$ , пЗв•см <sup>2</sup>	381	343	275	328
$E$ , МэВ	3,1	3,0	1,4	2,0
$\varphi$ , с <sup>-1</sup> •см <sup>2</sup>	10,6	16,6	4,9	4,6

Дозиметрические характеристики как для восстановленных, так и для справочных спектров  $^{239}\text{Pu}(\alpha, n)\text{Be}$  и  $^{252}\text{Cf}$  радионуклидных источников хорошо согласуются. Разница между значениями, полученными из экспериментальных и справочных спектров, заключается в том, что наличие пика тепловых нейтронов снижает значения дозиметрических характеристик.

### Заключение

Проведена верификация работы разработанного спектрометра и метода восстановления энергетического распределения плотности потока нейтронного излучения. В качестве альтернативного метода определения энергетического распределения плотности потока нейтронного излучения использован дозиметр-спектрометр нейтронов в комплекте с программным обеспечением. Результаты верификации работы прибора и метода приведены на рис. 6. и в табл. 4.



**Рис. 6.** Результаты определения спектра  $^{239}\text{Pu}(\alpha, n)\text{Be}$  источника разработанным спектрометром и дозиметр-спектрометром нейтронов

**Табл. 4.** Дозиметрические характеристики спектра  $^{239}\text{Pu}(\alpha, n)\text{Be}$  источника, полученные разработанным спектрометром и дозиметр-спектрометром нейтронов

Характеристика	$^{239}\text{Pu}(\alpha, n)\text{Be}$	
	Разработанный спектрометр	Дозиметр-спектрометр нейтронов
$H^*(10)$ , мкЗв/ч	343	148
$E$ , МэВ	2,5	2,7
$\varphi$ , $\text{c}^{-1}\cdot\text{см}^{-2}$	16,6	27,0

### Благодарность

Представленное исследование финансировалось РФФИ, проект № 19-38-90096.

### Список литературы

1. R.L. Bramlett, R.I. Ewing, T.W. Bonner, A new type of neutron spectrometer (Nuclear Instruments and Methods, 1960), pp. 1-12.
2. F.D. Brooks, H. Klein, Neutron spectrometry: historical review and present status (Nuclear Instruments and Methods in Physics Research A, 2002), pp. 1-11.
3. D.J. Thomas, A.V. Alevra, Bonner sphere spectrometers: a critical review (Nuclear Instruments and Methods in Physics Research A, 2002), pp. 12-20.
4. <https://consensus-group.ru/images/ip/counters/docs/Helium-25-90-10,0-OC.pdf>
5. [https://atomtex.com/sites/default/files/datasheets/at1117m\\_all\\_options\\_0.pdf](https://atomtex.com/sites/default/files/datasheets/at1117m_all_options_0.pdf)
6. T.T. Bohlen, F. Cerutti, M.P.W. Chin, A. Fasso, A. Ferrari, P.G. Ortega, A. Mairani, P.R. Sala, G. Smirnov and V. Vlachoudis, The Fluka Code: Developments and Challenges for High Energy and Medical Applications (Nuclear Data Sheets 120, 2014), pp. 211–214.
7. A. Ferrari, P.R. Sala, A. Fasso and J. Ranft. Fluka: a multi-particle transport code (CERN–2005–10, INFN/TC 05/11, SLAC–R–773, 2005).
8. R. Bedogni, C. Domingo, A. Esposito, F. Fernandez, FRUIT: An operational tool for multisphere neutron spectrometry in workplaces (Nuclear Instruments and Methods in Physics Research A, 2007), pp. 1301- 1309.
9. Дозиметр-радиометр ДКС-96Н, Каталог оборудования радиационного контроля, «ООО НПП «Доза» 2009г.
10. Compendium of neutron spectra and detector responses for radiation protection purposes: supplement to technical reports series no. 318. — Vienna: International Atomic Energy Agency, 2001.
11. International standard ISO 8529. – Switzerland: International Standard Organization, 2001.