

## МАТЕМАТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ЭНЕРГЕТИЧЕСКОГО СПЕКТРА ИСТОЧНИКА БЫСТРЫХ НЕЙТРОНОВ

<sup>1</sup>Р.М. Тимченко, <sup>2</sup>В.О. Шпагина, <sup>1</sup>Т.В. Малыхина

<sup>1</sup>Харьковский национальный университет имени В.Н. Каразина, Харьков, Украина

<sup>2</sup>Национальный научный центр «Харьковский физико-технический институт», Харьков, Украина  
timchenkoruslan97@gmail.com

## MATHEMATICAL MODELING OF THE ENERGY SPECTRUM OF FAST NEUTRON'S SOURCE

<sup>1</sup>R.M. Timchenko, <sup>2</sup>V.O. Shpagina, <sup>1</sup>T.V. Malykhina

<sup>1</sup>V.N. Karazin Kharkiv National University, Kharkiv, Ukraine

<sup>2</sup>National Science Center «Kharkov Institute of Physics and Technology», Kharkiv, Ukraine

**Аннотация.** В связи с развитием ядерных технологий существует необходимость экологического мониторинга. Важным этапом разработки приборов для контроля объектов радиационной опасности является моделирование. В работе проведено математическое моделирование энергетического спектра быстрых нейтронов от источника PuBe-239 и сопоставление результатов с данными лабораторных испытаний. Полученные смоделированные характеристики источника нейтронов используются для разработки и исследования тяжелых сцинтилляторов.

**Ключевые слова:** математическое моделирование, детекторы нейтронов.

**Abstract.** The need for environmental monitoring is due to the development of nuclear technologies. Modeling is an important stage in the development of instruments for monitoring radiation hazard facilities. Mathematical modeling the energy spectrum of fast neutrons was carried out in the work, as well as a comparison of results with the data of laboratory tests. The simulated characteristics of the neutron source, obtained as a result, are used to develop and investigation heavy scintillators.

**Key words:** mathematical modeling, neutron detectors.

### Актуальность исследования

С целью экологического мониторинга и контроля объектов радиационной опасности ведущими научными центрами разрабатываются приборы для детектирования нейтронов. Для регистрации нейтронов используются различные классические методы в зависимости от энергии нейтронов. При энергиях нейтронов более 10 МэВ их регистрация основана на использовании соединений, содержащих углерод, и исследовании процессов взаимодействия нейтронов с ядрами углерода. Регистрация нейтронов с энергиями от 100 кэВ до 10 МэВ происходит путем их рассеяния в водородсодержащих средах с последующей регистрацией протонов отдачи [Бритвич, 2004].

В Харьковском национальном университете имени В.Н. Каразина совместно с Харьковским физико-техническим институтом, а также Институтом сцинтилляционных материалов НАН Украины проводятся исследования возможности детектирования потока быстрых нейтронов с использованием тяжелых неорганических сцинтилляторов [Grinyov, 2014]. При разработке приборов для детектирования излучения использование математического моделирования позволяет провести модельный эксперимент, и исследовать свойства разрабатываемых детекторов. Лабораторные исследования детекторов проводятся во вредных и опасных условиях труда, обусловленными наличием ионизирующего излучения. Поэтому математическое моделирование при разработке тяжелых неорганических сцинтилляторов является актуальной задачей.

### Постановка задачи

В работе [Grinyov, 2014] экспериментально исследуется возможность практического применения тяжелых неорганических оксидных сцинтилляторов ( $\text{Bi}_3\text{Ge}_4\text{O}_{12}$ ,  $\text{CdWO}_4$ ,  $\text{Gd}_2\text{SiO}_5$  и др.) для детектирования нейтронов. Однако, для практического применения детекторов необходимо оценить вклад различных механизмов и процессов, происходящих в веществе неорганических сцинтилляторов. Такая задача может быть решена с использованием средств моделирования и последующем анализе результатов путем сопоставления их с экспериментальными данными.

Лабораторные исследования проводились с использованием нейтронного источника  $^{239}\text{PuBe}$ , потому важным этапом исследования является разработка математической модели источника нейтронного излучения.

### Математическое моделирование

Для исследования процессов, происходящих в компонентах экспериментальной установки для детектирования быстрых нейтронов, было проведено математическое моделирование прохождения быстрых нейтронов через эту установку. Моделирование проведено методом Монте-Карло. Описание модели учитывало физико-химические свойства материалов различных компонент установки, их взаимное расположение, а также параметры нейтронного источника. Носителем математической модели является компьютерная программа, разработанная нами для моделирования прохождения через

различные вещества нейтронов, испускаемых источником  $^{239}\text{PuBe}$ . Программа разработана на языке C++ в среде ОС Linux с использованием библиотеки классов Geant4 [Allison, 2016]. Отдельный модуль программы содержал описание нейтронного источника.

Для разработки модели источника нейтронов проведена оцифровка энергетических спектров источника  $^{239}\text{PuBe}$ , представленных в [Anderson, 1972; Бритвич, 2004]. С целью получения равномерного шага по энергии, после оцифровки проведена интерполяция данных кубическими сплайнами, проведенная последовательно по каждому 7 точкам.

На рис. 1 представлены смоделированные спектры нейтронного источника, полученные для  $10^7$  нейтронов, излучаемых изотропно. Энергетические спектры первичных нейтронов вычислялись с шагом 100 кэВ.

Как видно из рис. 1, спектры первичных нейтронов, полученные на основе данных [Бритвич, 2004], являются более предпочтительными для дальнейших расчетов методом Монте-Карло с целью исследования отклика детектора, так как полученные энергетические спектры имеют данные по энергиям первичных нейтронов не только в диапазоне от 1 до 11 МэВ, но и в диапазоне от 100 кэВ до 1 МэВ.

В дальнейших модельных экспериментах исследовалась возможность регистрации сигнала от нейтронного источника  $^{239}\text{PuBe}$ , находящегося на расстоянии 250 мм от детектора, причем между источником и детектором помещен свинцовый экран толщиной 50 мм. Размеры детектора составляли  $10 \times 10 \times 10$  мм. В реальных экспериментах свинцовый экран использовался для защиты от гамма-квантов, испускаемых источником (помимо нейтронов). Энергетический спектр вторичных гамма-квантов, образующихся в ходе модельного эксперимента, представлен на рис. 2, а. Однако, в ходе анализа данных моделирования выяснилось, что лишь ничтожно малое количество гамма-квантов регистрируются детектором, что не может повлиять на качество детектирования потока быстрых нейтронов. Энергетический спектр гамма-квантов, попадающих в детектор, представлен на рис. 2, б.

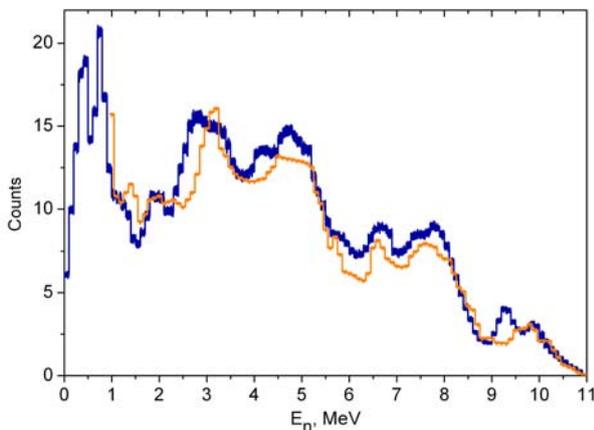


Рис. 1. Смоделированные спектры нейтронного источника, полученные по данным [Anderson, 1972] (светлая линия на графике) и [Бритвич, 2004] (темная линия на графике)

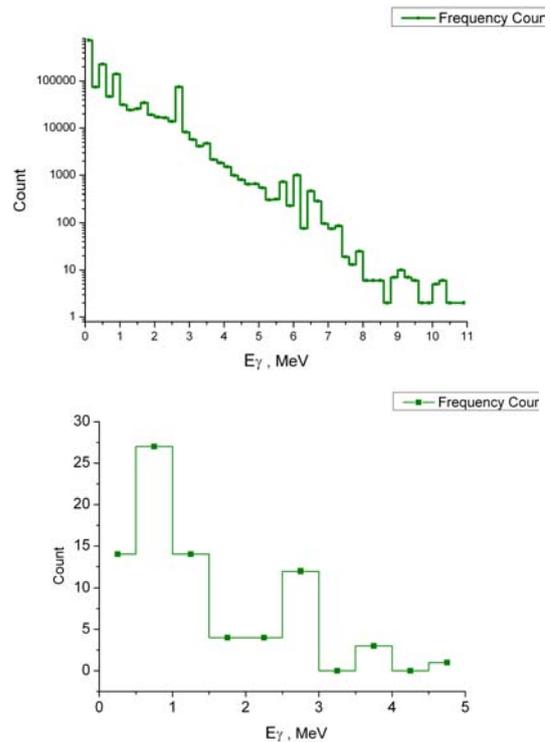


Рис. 1. Смоделированные спектры вторичных гамма-квантов: а — спектр для общего числа гамма-квантов; б — спектр гамма-квантов, регистрируемых детектором

Общее число вторичных гамма-квантов, образованных в ходе модельного эксперимента, равно  $1.514 \times 10^7$ , число гамма-квантов, зарегистрированных детектором, равно 79. Дальнейшие лабораторные испытания подтвердили возможность использования тяжелых неорганических сцинтилляторов малого размера для регистрации потока быстрых нейтронов от источника  $^{239}\text{PuBe}$ .

### Выводы

В результате выполнения работы смоделированы характеристики нейтронного источника, которые используются для исследования отклика сцинтилляционных детекторов на поток нейтронов от источника  $^{239}\text{PuBe}$ . Показано, что модель, основанная на данных [Бритвич, 2004], является более предпочтительной для дальнейшего использования за счет наличия в исходном спектре нейтронов с энергиями ниже 1 МэВ, что существенно для детектирования потоков нейтронов тяжелыми неорганическими сцинтилляторами ( $\text{Bi}_3\text{Ge}_4\text{O}_{12}$ ,  $\text{CdWO}_4$ ,  $\text{Gd}_2\text{SiO}_5$  и др.).

### Список литературы

Бритвич Г.И., Васильченко В.Г., Гилицкий Ю.В. и др. Прототип детектора нейтронов на основе борсодержащего пластического сцинтиллятора. 2004. 23 с.  
 Allison J. et.al. Recent developments in Geant4 // Nuclear Instruments and Methods in Physics Research. 2016. V. 835. P. 186–225.  
 Anderson M.E., Neff. R.A. Neutron Energy Spectra of Different Size  $^{239}\text{Pu-Be}(a, n)$  Sources, 1972.  
 Grinyov B.V., Ryzhikov V.D., Onyshchenko G.M., et al. The highly efficient gamma-neutron detector for control of fissionable radioactive materials // Functional Materials. 2014. N 3(21), P. 345–351.