

УДК 539.1.074.3

МОДЕЛИРОВАНИЕ ЭФФЕКТИВНОСТИ И РАЗРЕШЕНИЯ РЕГИСТРАЦИИ НЕЙТРОНОВ СЦИНТИЛЛЯЦИОННЫМ СЧЕТЧИКОМ НА БАЗЕ $ZnS(Ag):^6LiF$

© 2022 г. Д. А. Бучный^{a, b, *}, В. С. Литвин^{a, c}, Д. Н. Трунов^a,
В. Н. Марин^a, С. Н. Аксенов^a, Р. А. Садыков^a

^aИнститут ядерных исследований РАН, Москва, 117312 Россия

^bНациональный исследовательский ядерный университет МИФИ, Москва, 115409 Россия

^cФизический институт им. П.Н. Лебедева РАН, Москва, 119991 Россия

*e-mail: dbuchnyu@yandex.ru

Поступила в редакцию 15.05.2022 г.

После доработки 25.06.2022 г.

Принята к публикации 25.06.2022 г.

С помощью моделирования методом Монте-Карло был проведен анализ эффективности разработанных в ИЯИ РАН многослойных сцинтилляционных детекторов (счетчиков) нейтронов на основе $ZnS(Ag):^6LiF$. Получена спектральная зависимость эффективности счетчика от угла падения пучка нейтронов. Проведен ряд численных экспериментов на модели времяпролетного порошкового дифрактометра с кольцевыми детекторами на основе разработанных счетчиков, с целью оценки его разрешения. Полученные результаты полезны для оптимизации конфигурации счетчиков и составленных из них детектирующих блоков в условиях сохранения их компактности и простоты изготовления.

Ключевые слова: моделирование методом Монте-Карло, сцинтиллятор, детектор нейтронов, импульсный источник нейтронов, нейтронная дифракция.

DOI: 10.31857/S1028096022120081

ВВЕДЕНИЕ

Моделирование методом Монте-Карло применяется в нейтронографии с конца прошлого века и в настоящее время является для этой области науки незаменимым инструментом, приложения которого включают, но не ограничиваются постановкой виртуальных экспериментов [1, 2]; проектированием и модернизацией исследовательских установок [3, 4], а также их отдельных компонент [5, 6], в том числе детекторов [7–10]. В ведущих исследовательских центрах были разработаны программные пакеты, специально предназначенные для симуляций методом Монте-Карло, основанных на трассировке нейтронных траекторий. Примерами таких пакетов могут служить VITESS [11] и McStas [12], которые уже более двадцати лет поддерживаются разработчиками и регулярно получают новые функции, что подчеркивает актуальность решаемых ими задач.

В случае детектирующих систем работа с цифровым двойником и симуляция эксперимента позволяют сократить время разработки и подобрать подходящую конфигурацию системы в со-

ответствии с возложенными на нее задачами, а также упрощают интерпретацию результатов, полученных в ходе тестовых измерений [13–15]. В настоящее время научным сообществом ведется активная работа по проектированию новых детекторов нейтронов и модернизации существующих, что обусловлено двумя основными факторами: наметившимся переходом от реакторных нейтронных источников к импульсным на базе ускорителей и растущим дефицитом гелия-3 за рубежом [16, 17]. Благодаря развитию микроэлектроники, в частности, технологии кремниевых фотоумножителей (SiPM) одним из наиболее перспективных подходов к созданию высокоэффективных детекторов представляется использование сцинтилляционных детектирующих систем, не требующих высоких напряжений, при этом обладающих быстрым временем отклика и малыми слепыми зонами [17, 18].

В Институте Ядерных Исследований (ИЯИ РАН) были разработаны кольцевые сцинтилляционные детекторы нейтронов, состоящие из линейных счетчиков на основе $ZnS(Ag):^6LiF$ и твердотельных фотоумножителей (SiPM) (рис. 1). К преиму-

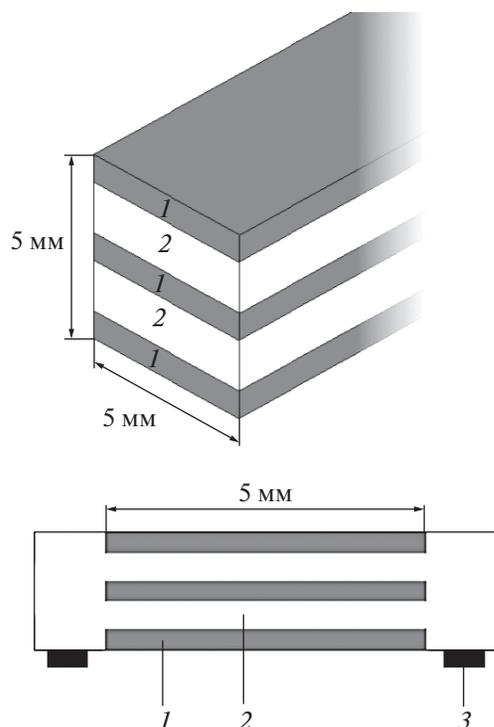


Рис. 1. Счетчик нейтронов, рассматриваемый в модели: 1 – слой сцинтилляционного материала ${}^6\text{Li}$, 2 – слой ПММА световода, 3 – SiPM.

ществам счетчиков данного типа можно отнести небольшое рабочее напряжение, пренебрежимо малые слепые зоны и относительно высокую эффективность регистрации нейтронов [19]. Сочетание небольших габаритов и эффективности данных приборов позволяет создавать из них блоки детекторов, обладающие возможностью регистрировать нейтроны в большом телесном угле, и получать дифрактограммы в широком диапазоне переданных импульсов при порошковой время-пролетной дифракции нейтронов [20]. Ранее с использованием разработанных детекторов были проведены тестовые дифракционные эксперименты при угле рассеяния $2\theta = 90^\circ$ [21], подобное изображенному на рис. 2. При использовании данных счетчиков для регистрации нейтронов, рассеянных под другими углами, возможны два подхода: создание блоков детектирования со счетчиками, ориентированными строго перпендикулярно направлению рассеяния, или использование счетчиков с фиксированной ориентацией, например, параллельно или перпендикулярно падающему на образец пучку. В первом варианте все счетчики обладают одинаковой эффективностью независимо от угла рассеяния, однако возможна потеря разрешения вследствие неточности юстировки счетчиков. Последняя конфигурация упрощает изготовление детекторов и позволяет

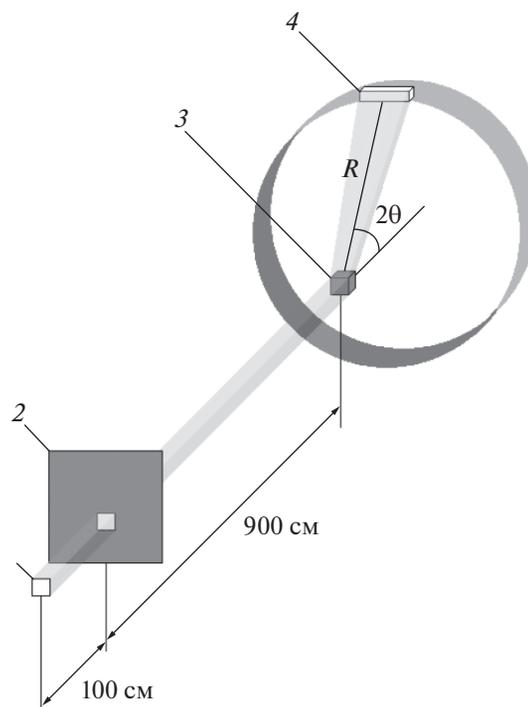


Рис. 2. Схема модельного дифрактометра, реализованного при помощи программного пакета VITESS: 1 – поверхность замедлителя нейтронов (1×1 см), 2 – коллимирующая щель (1×1 см), 3 – поликристаллический образец ($1 \times 1 \times 1$ см), 4 – нейтронный счетчик кольцевого детектора (2θ – угол дифракции, расстояние образец–детектор $R = 30$ см).

создавать универсальные дифрактометры с перемещаемыми блоками детекторов. При этом актуальным становится исследование эффективности регистрации нейтронов при различных углах рассеяния, поскольку разработанные счетчики нейтронов имеют сложную структуру и прямоугольное сечение и, как следствие, зависимость эффективности регистрации от ориентации относительно пучка нейтронов.

В данной работе проведено моделирование методом Монте-Карло многослойного сцинтилляционного счетчика на базе $\text{ZnS}(\text{Ag}):{}^6\text{LiF}$, как в качестве обособленного элемента, так и в роли составляющей блока детекторов в дифракционном эксперименте. Основной задачей моделирования является анализ эффективности в зависимости от ориентации и предварительная оценка разрешающей способности дифрактометра в зависимости от конфигураций нейтронного детектора с целью оптимизации конструкции блока детекторов при условии сохранения компактности, небольшого числа слоев сцинтиллятора и простоты изготовления.

МОДЕЛИРОВАНИЕ ДИФРАКЦИОННОГО ЭКСПЕРИМЕНТА

При моделировании рассматривался линейный счетчик, прямоугольное поперечное сечение которого (5×5 мм) составляют три слоя материала сцинтиллятора на основе ^6Li толщиной 0.5 мм, разделенные двумя слоями световода из органического стекла (ПММА) толщиной 1.75 мм каждый (рис. 1.). Длина единичного линейного счетчика составляет 50 мм. Светосбор осуществляется посредством фокусирующих линз типа “рыбий глаз” на торцах световода, которые размещены непосредственно перед SiPM [22]. Важно отметить, что 8% массы ПММА-световода составляет водород, обладающий высоким показателем сечения некогерентного рассеяния нейтронов, что приводит к искажению нейтронных траекторий внутри счетчика.

В процессе моделирования осуществлена оценка разрешения нейтронного счетчика при измерении времяпролетных спектров, рассеянных на поликристаллическом образце нейтронов. При проведении численного эксперимента использовался программный пакет VITESS (Virtual Instrumentation Tool for ESS), предоставляющий широкие возможности настройки конфигурации установки и мониторинга нейтронных потоков в ходе численного эксперимента: анализ спектра нейтронного пучка, его расходимости, поляризации, времени пролета и т.д. Все модули VITESS исполняются параллельно, обмениваясь данными в режиме реального времени, что дает возможность работать с большим количеством траекторий (10^{10} – 10^{12}) при ограниченных вычислительных мощностях [23].

На рис. 2 приведена схема модельного эксперимента по дифракции нейтронов, длина пролетной базы в данной модели составляет 10 м. В данном случае линейный счетчик рассматривался как составляющая кольцевого сцинтилляционного детектора, подобного разработанному ранее ИЯИ РАН. С целью экономии вычислительных ресурсов моделирование было разделено на два условных этапа. В ходе первого этапа источник производит коллимированный нейтронный пучок, подаваемый затем на образец для вычисления трехмерной дифракционной картины, которая записывается в виде файла с таблицей нейтронных траекторий. Второй этап составляет серия экспериментов по регистрации рассеянных образцом нейтронов при различных углах рассеяния 2θ . В процессе эксперимента использовались сохраненные в файле траектории, как входные данные, что позволяло проводить вычисления для различных конфигураций детектора без необходимости повторной симуляции процесса рассеяния нейтронного пучка на образце.

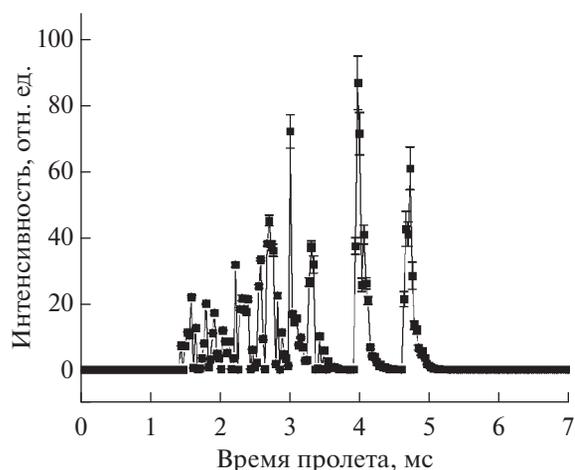


Рис. 3. Дифрактограмма, полученная в ходе виртуального эксперимента для угла рассеяния 2θ .

Спектральные и временные характеристики модельного источника нейтронов приближены к спектрам импульсного источника нейтронов РАДЭКС, ИЯИ РАН. Исходя из проведенных измерений, длительность импульса этого источника составляет 90 мкс при $\lambda = 1 \text{ \AA}$ [24]. Были рассмотрены нейтроны с длиной волны $\lambda < 2.1 \text{ \AA}$ при частоте импульсов источника 50 Гц. При этом программный модуль источника выступает также как коллиматор пучка, генерируя траектории нейтронов, выходящие с поверхности плоского замедлителя (1×1 см) и проходящие через направляющее окно (1×1 см), расположенное на расстоянии 100 см от поверхности. Полученный пучок проходит оставшуюся часть пролетной базы и рассеивается на образце, в качестве которого использован кубический ($1 \times 1 \times 1$ см) образец поликристаллического алмаза (карбонадо), который ранее неоднократно использовался на источниках ИЯИ РАН в качестве тестовых образцов. Рассеянные образцом нейтроны, попадают затем в линейный счетчик, который является сегментом кольцевого детектора, находящийся на расстоянии $R = 30$ см от образца. Зарегистрированные счетчиком нейтроны составляют времяпролетный спектр, соответствующий выбранному углу рассеяния. Для модели были выбраны углы рассеяния $2\theta = 20^\circ, 30^\circ, 45^\circ, 60^\circ, 75^\circ, 90^\circ, 105^\circ, 120^\circ, 135^\circ, 150^\circ$. Оценка разрешения дифрактометра $\Delta d/d$ при выбранном угле производится путем измерения ширины на полувысоте брэгговских пиков (рис. 3). Для этого в дифрактограмме для каждого угла рассеяния 2θ выбирался одиночный пик наибольшей интенсивности, который, после вычитания фона, подгонялся функцией псевдо-Фойгта. Из результатов подгонки определялась ширина на полувысоте и погрешность ее определения.

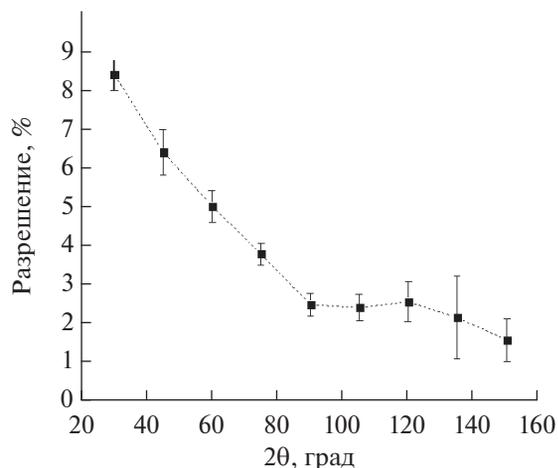


Рис. 4. Разрешающая способность сцинтилляционного счетчика в численном дифракционном эксперименте (2θ – угол дифракции, расстояние образец-детектор $R = 30$ см).

На рис. 4 приведена полученная зависимость разрешающей способности сегмента кольцевого детектора (счетчика) от угла рассеяния нейтронов с образца. Как видно, разрешающая способность нейтронных детекторов в модельном дифракционном эксперименте варьируется от 2.0% до 7.6% в зависимости от угла рассеяния регистрируемых нейтронов. При этом погрешность, вносимая длительностью нейтронного импульса для длины волны в 1 \AA составляет 2% и может быть уменьшена путем увеличения пролетной базы установки.

АНАЛИЗ ЭФФЕКТИВНОСТИ

Необходимо учитывать, что модульная структура пакета VITESS подразумевает линейную и последовательную передачу информации о нейтронных траекториях между компонентами установки, и поэтому имеет ограниченные возможности моделирования устройств, подобных рассмотренному в этой работе сцинтилляционному детектору. В частности, прошедшие сквозь одну из плоскостей сцинтиллятора нейтроны, в принципе, могут вернуться в нее в результате обратного рассеяния на последующих элементах.

В связи с вышеизложенным, для исследования функции эффективности одиночного нейтронного счетчика при различных конфигурациях плоскостей сцинтиллятора и угла рассеяния была написана программа на языке Python, проводящая моделирование прохождения нейтронного пучка через многослойную структуру с использованием метода трассировки нейтронных траекторий [25]. В ходе симуляции происходит пошаговая генерация траектории нейтронов, проходя-

щих через счетчик, при этом к каждой итерации применяются вероятности поглощения/рассеяния нейтрона на его текущем окружении (блок-схема программы приведена на рис. 5).

Угол дифракции попадающих на счетчик нейтронов определяет ориентацию его поперечного сечения относительно рассеянного пучка от образца и угловой размер детектора. Так, наименьший угловой размер детектора будет при угле дифракции $2\theta = 90^\circ$. При увеличении/уменьшении угла в пределах $45^\circ < 2\theta < 135^\circ$, модель учитывает нейтроны, вошедшие в счетчик через боковую поверхность, соответственно, повышается и угловой размер детектора.

Заявленная производителем эффективность детектирования тепловых нейтронов одним слоем $\text{ZnS(Ag):}^6\text{LiF}$ составляет 42% при длине волны 1.9 \AA . На основании этого концентрация атомов ^6Li в пластинах сцинтиллятора в рамках данной модели принята соответствующей макроскопическому сечению поглощения $n\sigma = 10.9 \text{ см}^{-1}$ для этой длины волны, исходя из формулы (1):

$$0.42 = 1 - \exp(-dn\sigma),$$

где d – толщина пластины сцинтиллятора; n – концентрация атомов ^6Li ; σ – микроскопическое сечение поглощения нейтронов атомами ^6Li при длине волны 1.9 \AA .

Событие регистрации нейтрона принято эквивалентным его поглощению ядром ^6Li . Для учета рассеяния нейтронов на атомах водорода в объеме световода было использовано приближение изотропного упругого рассеяния нейтронов. Таким образом, при событии рассеяния нейтрон меняет направление, случайным образом, на угол, равномерно распределенный по телесному углу 4π .

Некогерентное рассеяние нейтронов внутри счетчика оказывает влияние, с одной стороны, на его эффективность: изначально не поглощенные в слое сцинтиллятора нейтроны могут вернуться в него, рассеявшись на последующих ПММА-слоях, кроме того, в результате искажения траектории нейтрон может покинуть счетчик раньше, чем это произошло бы на изначальной траектории и наоборот. С другой стороны, рассеяние вносит вклад в фактическую длину пролета нейтрона, оценка которого приведена на рис. 6. Три характерных пика соответствуют поглощению нейтронов в каждом из слоев сцинтиллятора при угле дифракции $2\theta = 90^\circ$, рассеяние нейтронов в световодах приводит к уширению пиков и появлению “фона” между ними. Тем не менее, разброс длин траекторий нейтронов внутри детектора не превышает 7 мм, а, следовательно, он пренебрежимо мал по отношению к пролетной базе реальных экспериментальных установок.

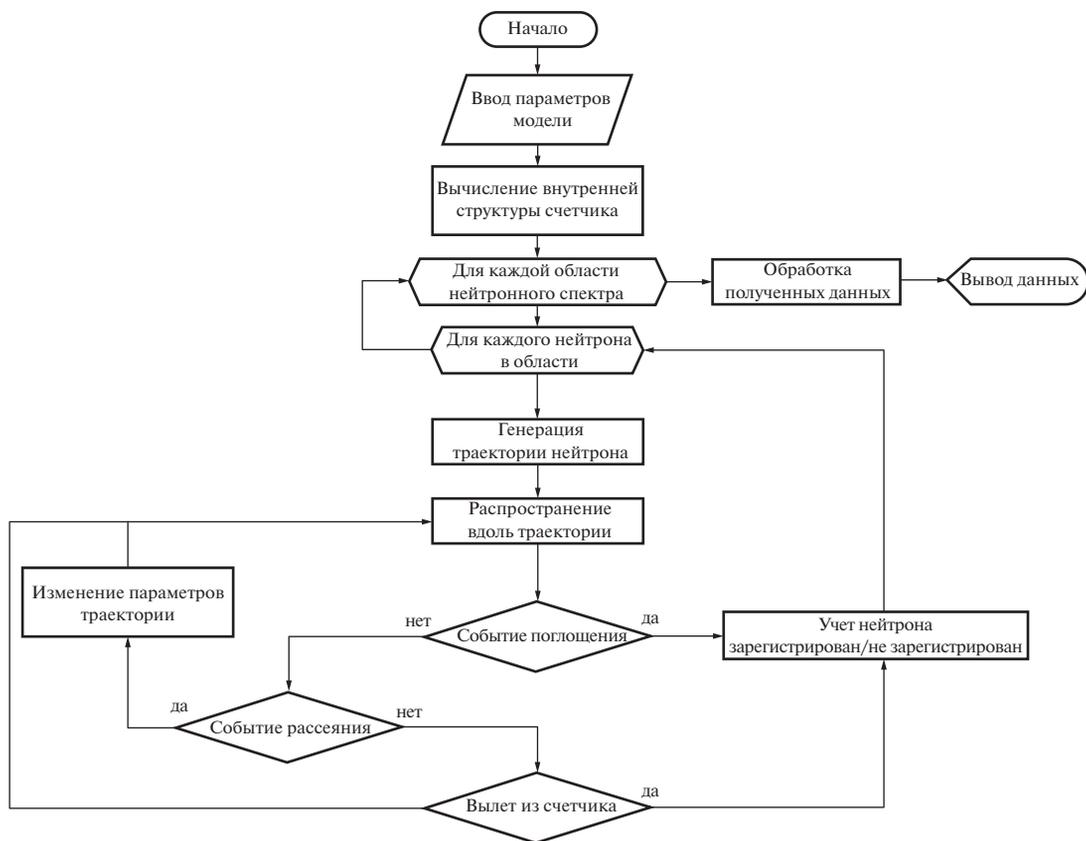


Рис. 5. Блок-схема моделирования прохождения нейтронов через счетчик программой на языке Python.

Разработанная модель учитывает два варианта расположения плоскостей сцинтиллятора: параллельно и перпендикулярно оси падающего на образец пучка нейтронов. В ходе серии симуляций проведено их сравнение при длинах волн нейтронов 0.7–4.7 Å (рис. 7). Можно видеть, что ориентация плоскостей не оказывает существенного влияния на эффективность регистрации нейтронов в окрестностях углов дифракции 45° и 135°, что обусловлено изотропным рассеянием нейтронов в слоях световода при прохождении через счетчик. При этом диапазон углов, в котором эффективность практически не зависит от ориентации счетчика, растет по мере увеличения энергии детектируемых нейтронов.

На рис. 8–10 изображены полученные в ходе моделирования спектральные эффективности регистрации нейтронов счетчиком на различных углах рассеяния с учетом оптимального варианта ориентации плоскостей сцинтиллятора. При углах, близких к $2\theta = 90^\circ$, вклад третьего слоя сцинтилляционного материала незначителен из-за упругого рассеяния распространяющихся в его направлении нейтронов обратно в предыдущие два слоя, либо вне детектора. В связи с этим была опробована альтернативная упрощенная конструкция счетчика, которая использует два слоя

сцинтиллятора толщиной 0.5 мм, разделенные ПММА-световодом толщиной 4 мм. Тем не менее, даже вблизи угла $2\theta = 90^\circ$ полученная в ходе симу-

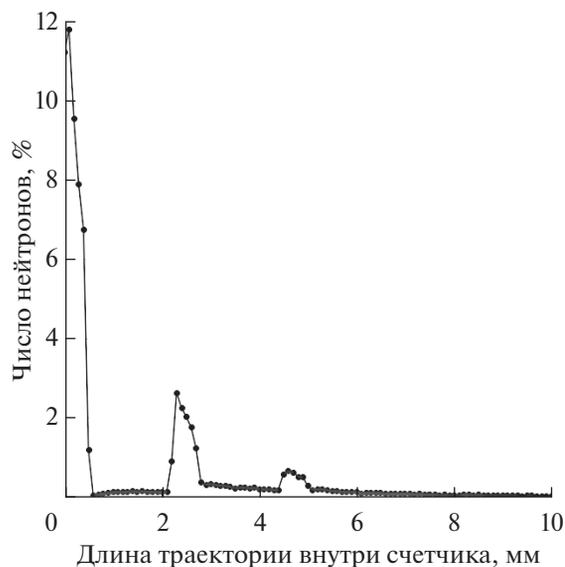


Рис. 6. Распределение длин траекторий нейтронов внутри сцинтилляционного счетчика (Угол дифракции $2\theta = 90^\circ$, расстояние образец–детектор $R = 30$ см).

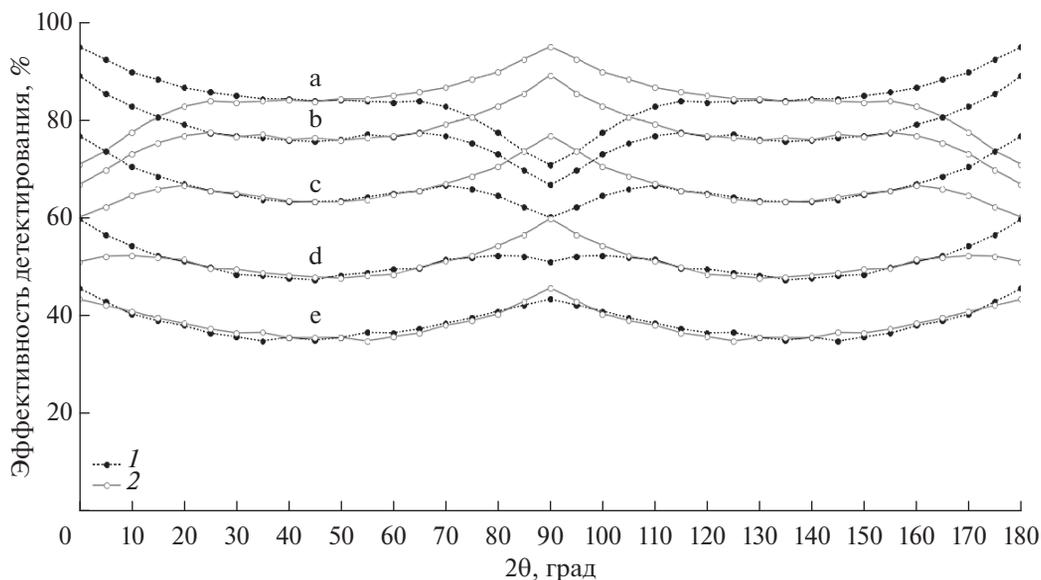


Рис. 7. Зависимость от угла дифракции 2θ эффективности регистрации нейтронов счетчиками с перпендикулярной (1) и параллельной (2) оси пучка ориентацией плоскостей сцинтиллятора для нейтронов с длиной волны $\lambda = 4.7$ (а), 3.1 (b), 1.9 (c), 1.1 (d), 0.7 Å (e) (расстояние образец–детектор $R = 30$ см).

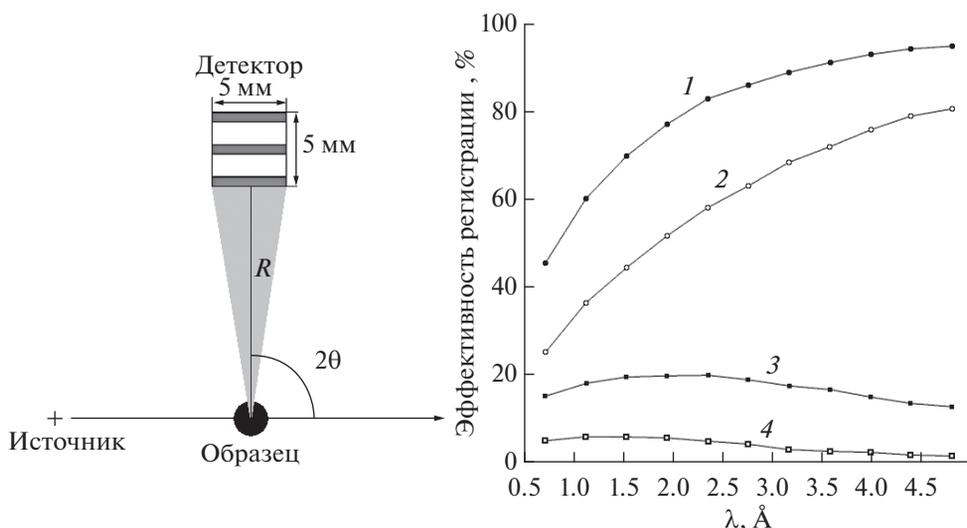


Рис. 8. Спектральная эффективность регистрации нейтронов на угле рассеяния $2\theta = 90^\circ$ и расстоянии образец–детектор $R = 30$ см, плоскости сцинтиллятора параллельны оси нейтронного пучка (1 – эффективность всего счетчика, 2–4 – эффективность отдельных пластин сцинтиллятора).

лации эффективность двухслойной конструкции детектирующих слоев заметно уступает трехслойной (рис. 11). Данное обстоятельство можно объяснить увеличением толщины рассеивающего ПММА-слоя между пластинами сцинтилляционного материала, в результате чего увеличивается доля нейтронов, выходящих из детектора через боковую поверхность до попадания в слой ZnS(Ag)/LiF.

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ ПРОВЕРКА ЭФФЕКТИВНОСТИ

Для исследования зависимости эффективности счетчика от угла дифракции были проведены тестовые измерения на радиоизотопном источнике. В эксперименте использовался пучок нейтронов от радиоизотопного источника Cf-252 с 20-ти сантиметровым замедлителем из D_2O . Пу-

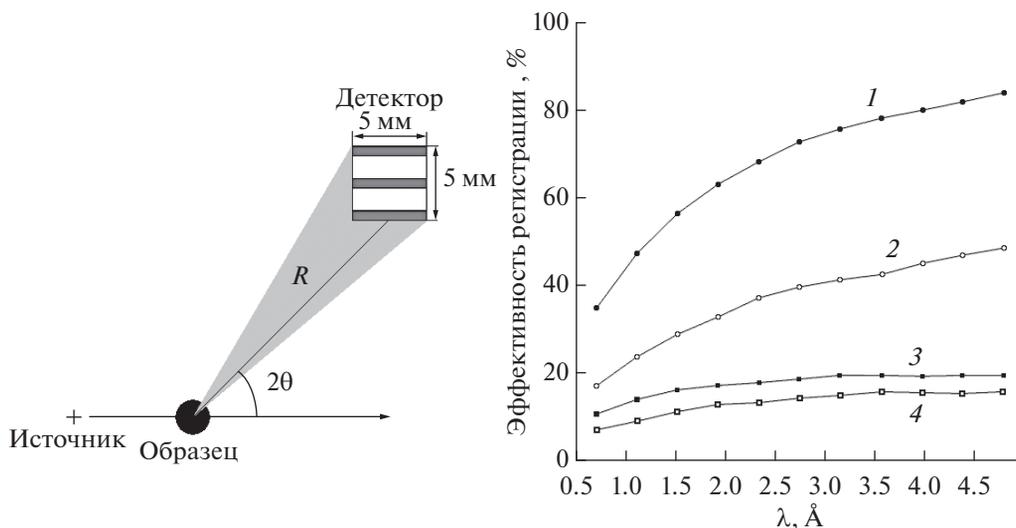


Рис. 9. Спектральная эффективность регистрации нейтронов на угле рассеяния $2\theta = 45^\circ$ и расстоянии образец–детектор $R = 30$ см, плоскости сцинтиллятора параллельны оси нейтронного пучка (1 – эффективность всего счетчика, 2–4 – эффективность отдельных пластин сцинтиллятора).

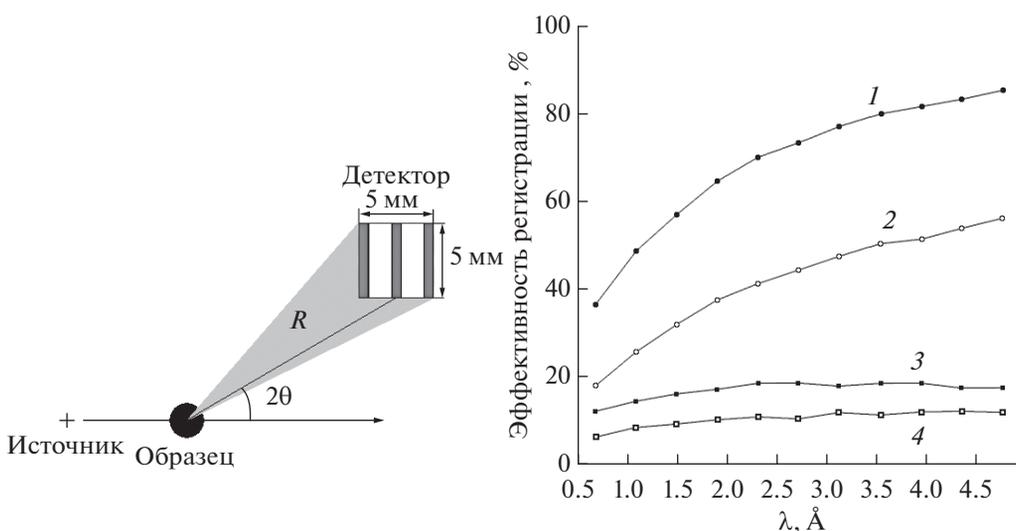


Рис. 10. Спектральная эффективность регистрации нейтронов на угле рассеяния $2\theta = 30^\circ$ и расстоянии образец–детектор $R = 30$ см, плоскости сцинтиллятора перпендикулярны оси нейтронного пучка (1 – эффективность всего счетчика, 2–4 – эффективность отдельных пластин сцинтиллятора).

чок замедленных нейтронов был сколлимирован с помощью бериллиевых пластин и кадмиевой щели. Таким образом, был сформирован пучок размером 10×100 мм. Счетчик находился на расстоянии 30 см от коллимирующей щели в вертикальном положении и вращался вокруг своей оси с помощью шагового двигателя. То есть, была воспроизведена геометрия рассматриваемого в работе дифрактометра, где функцию образца выполняет замедлитель. Кадмиевое соотношение для данных источника и детектора составило 1 : 30.

Измерения проводились с шагом в 5° с одинаковым временем экспозиции, при был совершен оборот счетчика на 180° .

Полученная в ходе эксперимента зависимость числа зарегистрированных нейтронов от угла счетчика приведена на рис. 12. Следует отметить, что в эксперименте был использован пучок с широким спектром с неизвестным максимумом, а не монохроматический, как в модели. Поэтому для корректного сравнения необходимо проведение измерений на монохроматических пучках или с

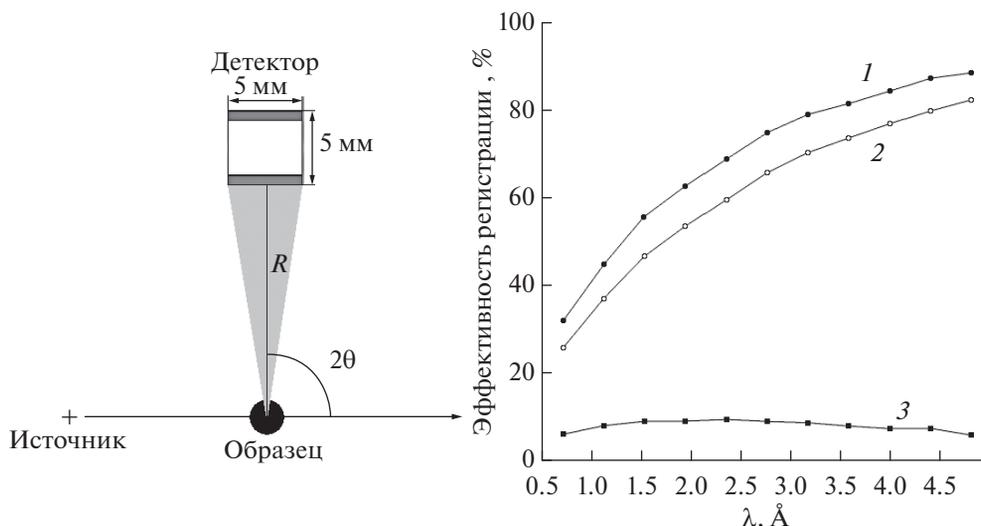


Рис. 11. Спектральная эффективность регистрации нейтронов в двухслойной конфигурации счетчика на угле рассеяния $2\theta = 90^\circ$ и расстоянии образец–детектор $R = 30$ см, плоскости сцинтиллятора параллельны оси нейтронного пучка (1 – эффективность всего счетчика, 2, 3 – эффективность отдельных пластин сцинтиллятора).

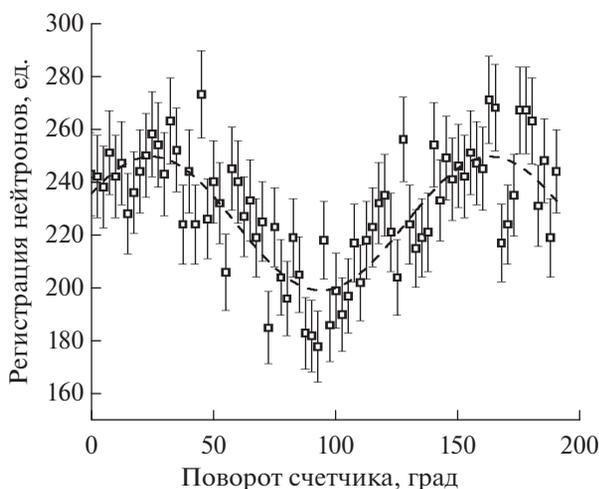


Рис. 12. Экспериментальная зависимость числа нейтронов, зарегистрированных трехслойным счетчиком.

использованием времяпролетной методики. Последний вариант может быть реализован на импульсных источниках ИЯИ РАН, и в дальнейшем планируется провести такие измерения.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В рамках данной работы были построены модели методом Монте-Карло для изучения эффективности нейтронного сцинтилляционного счетчика как элемента блока детекторов порошкового дифрактометра, а также разрешения самого дифрактометра. В модели, описывающей прохождение нейтронов через счетчик, установлено, что ориентация плоскостей сцинтиллятора при дли-

не волны нейтронов 2 \AA и менее оказывает существенное влияние на эффективность детектирования только при углах дифракции 2θ близких к 0° , 90° и 180° . Следовательно, использование счетчиков с ориентацией перпендикулярно падающему на образец пучку необходимо только для сегментов, регистрирующих рассеяние под большими или малыми углами. Кроме того, проведен анализ эффективности отдельных слоев сцинтилляционного материала и проведено сравнение двухслойной и трехслойной конфигурации счетчика. Анализ численных экспериментов показал, что эффективность трехслойного счетчика нейтронов (при одинаковых размерах всего счетчика) значительно выше эффективности двухслойного счетчика нейтронов (при одинаковых размерах всего счетчика). Разность эффективностей для этих двух вариантов составляет 5–20% в диапазоне 5–0.5 \AA соответственно.

Экспериментальная проверка полученной путем моделирования угловой зависимости эффективности счетчика подтверждает характер этой зависимости: минимальная при пучке нейтронов, параллельном сцинтиллятору, и максимальная при перпендикулярной ориентации. Разность между минимумом и максимумом составляет примерно 20%, как у модельных кривых для нейтронов с $\lambda = 0.7\text{--}1.9 \text{ \AA}$.

В результате численного эксперимента порошковой времяпролетной дифракции нейтронов источника РАДЭКС на образце поликристаллического алмаза получена оценка разрешения элементов блока детекторов, которое уменьшается от 2 до 7.6% при уменьшении угла рассеяния нейтронов от 150° до 30° градусов соответственно. Разрешающая способность на малых углах может

быть повышена путем увеличения у соответствующего им сегмента детектирующей системы расстояния образец–детектор.

Перечисленные результаты позволяют сформулировать рекомендации при проектировании блоков детекторов, составленных из линейных сцинтилляционных счетчиков, разработанных в ИЯИ РАН, а также упростят интерпретацию данных, полученных в ходе тестовых экспериментов. В частности, для достижения максимальной эффективности разработанных нами счетчиков нейтронов, их необходимо размещать перпендикулярно пучку рассеянных на образце нейтронов.

БЛАГОДАРНОСТИ

Работа выполнена при финансовой поддержке Российской Федерации в лице Министерства науки и высшего образования, соглашение № 075-10-2021-115 от 13 октября 2021 г. (внутренний номер 15. СИН.21.0021).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Udby L., Willendrup P.K., Knudsen E., Niedermayer C., Filges U., Christensen N.B., Farhi E., Wells B.O.* // Nucl. Instrum. Methods. A. 2011. V. 634. P. 138. <https://doi.org/10.1016/j.nima.2010.06.235>
2. *Литвин В.С., Бучный Д.А., Ульянов В.А., Сыромятников В.Г., Булкин А.П., Столяров А.А., Трунов Д.Н., Аксенов С.Н., Поташев С.И., Садыков Р.А.* // Поверхность. Рентген., синхротр. и нейтрон. исслед. 2021. Т. 7. С. 3. <https://doi.org/10.31857/S1028096021070116>
3. *Kanaki K., Kittelmann T., Xiao C., Klinkby E., Knudsen E.B., Willendrup P., Hall-Wilton R.* // Physica B: Condensed Matter. 2018. V. 551. P. 386. <https://doi.org/10.1016/j.physb.2018.03.025>
4. *Павлова А.Е., Петрова А.О., Коник П.И., Павлов К.А., Григорьев С.В.* // Поверхность. Рентген., синхротр. и нейтрон. исслед. 2021. Т. 1. С. 80. <https://doi.org/10.31857/S102809602101012X>
5. *Klenø K.H., Lieutenant K., Andersen K.H., Lefmann K.* // Nucl. Instrum. Methods. A. 2012. V. 696. P. 75. <https://doi.org/10.1016/j.nima.2012.08.027>
6. *Павлов К.А., Коник П.И., Сыромятников В.Г., Москвин Е.В.* // Поверхность. Рентген., синхротр. и нейтрон. исслед. 2017. Т. 11. С. 82. <https://doi.org/10.7868/S0207352817110117>
7. *Hartwig Z.S., Gumplinger P.* // Nucl. Instrum. Methods. A. 2014. V. 737. P. 155. <https://doi.org/10.1016/j.nima.2013.11.027>
8. *Jaworski G., Palacz M., Nyberg J., G. de Angelis, G. de France, Di Nitto A., Egea J., Erduran M.N., Erturk S., Farnea E., Gadea A., Gonzalez V., Gottardo A., Huyuk T., Kownacki J., Pipidis A., Roeder B., Soderstrom P.-A., Sanchis E., Tarnowski R., Triossi A., Wadsworth R., Valiente Dobon J.J.* // Nucl. Instrum. Methods. A. 2012. V. 673. P. 64. <https://doi.org/10.1016/j.nima.2012.01.017>
9. *Кузьмин Е.С., Бокучава Г.Д., Зимин И.Ю., Круглов А.А., Кучинский Н.А., Малышев В.Л.* // Приборы и техника эксперимента. 2021. № 2. С. 25. <https://doi.org/10.31857/S0032816221010316>
10. *Bouchama L., Gromushkin D.M., Dmitrieva A.N.* // Scientific notes of the Moscow University Faculty of Physics. 2018. № 4. 1840202. eLIBRARY ID: 36928441
11. *Wechsler D., Zsigmond G., Streffer F., Mezei F.* // Neutron News. 2000. V. 11. №4. P. 25. <https://doi.org/10.1080/10448630008233764>
12. *Willendrup P.K., Lefmann K.* // J. Neutron Research. 2020. V. 22. P. 1. <https://doi.org/10.3233/JNR-190108>
13. *Woracek R., Penumadu D., Kardjilov N., Hilger A., Boin M., Banhart J., Manke I.* // Adv. Mater. 2014. V. 26. 4069. <https://doi.org/10.1002/adma.201400192>
14. *Ming H., Tao M., Jin C., Yan Z., Yong-yi H., Jing-jing Z., Jian W., Tie-kuang D.* // Chinese Astronomy and Astrophysics. 2016. V. 40. P. 474. <https://doi.org/10.1016/j.chinastron.2016.10.002>
15. *Tain J.L., Agramunt J., Algora A., Aprahamian A., Cano-Ott D., Fraile L.M., Guerrero C., Jordan M.D., Mach H., Martinez T., Mendoza E., Mosconi M., Nolte R.* // Nucl. Instrum. Methods. A. 2015. V. 774. P. 17. <https://doi.org/10.1016/j.nima.2014.11.060>
16. *Hurd A.J., Kouzes R.T.* // The European Physical J. Plus. 2014. V. 129. № 10. P. 1. <https://doi.org/10.1140/epjp/i2014-14236-6>
17. *Pietropaolo A., Angelone M., Bedogni R., Colonna N., Hurd A.J., Khaplanov A., Murtas F., Pillon M., Piscitelli F., Schooneveld E.M., Zeitelhack K.* // Physics Reports. 2020. V. 875. P. 1. <https://doi.org/10.1016/j.physrep.2020.06.003>
18. *Cieślak M.J., Gamage K.A.A., Glover R.* // Crystals. 2019. V. 9. P. 480. <https://doi.org/10.3390/cryst9090480>
19. *Марин В.Н., Садыков Р.А., Трунов Д.Н., Литвин В.С., Аксенов С.Н., Столяров А.А.* // Письма в ЖТФ. 2015. Т. 41. №18. С. 96.
20. *Марин В.Н., Трунов Д.Н., Садыков Р.А., Литвин В.С., Аксенов С.Н.* // Научно-практическая конференция “Научное приборостроение – современное состояние и перспективы развития”. 2016. / ФАНО, Москва. сб. материалов. С. 188.
21. *Марин В.Н., Садыков Р.А., Трунов Д.Н., Литвин В.С., Аксенов С.Н.* // Приборы и техника эксперимента. 2018. Т. 1. С. 1. <https://doi.org/10.7868/S003281621801007X>
22. *Марин В.Н., Садыков Р.А., Литвин В.С., Трунов Д.Н.* Кольцевой детектор тепловых нейтронов. Патент на полезную модель № 177857. 2018. Заявка № 2017 143 247. Дата регистрации 11.12.2017.
23. *Zendler C., Lieutenant K., Nekrassov D., Fromme M.* // J. Phys.: Conf. Ser. 2014. V. 528. 012036. <https://doi.org/10.1088/1742-6596/528/1/012036>
24. *Литвин В.С., Алексеев А.А., Трунов Д.Н., Аксенов С.Н., Клементьев Е.С., Марин В.Н., Поташев С.И., Столяров А.А., Лебедь Ю.Б., Кузнецов В.Л., Кузнецов С.П., Мешков И.В., Садыков Р.А.* // Поверхность. Рентген., синхротр. и нейтрон. исслед. 2019. № 3. С. 25. <https://doi.org/10.1134/S0207352819030132>
25. *Knudsen E.B., Tranum-Rømer A., Willendrup P.K., Christiansen P., Lefmann K.* // J. Neutron Research. 2014. V. 17. № 1. P. 27. <https://doi.org/10.3233/JNR-130003>

Neutron Detection Efficiency and Resolution Simulation of a Scintillation Counter Based on ZnS(Ag):⁶Li

D. A. Buchnyy^{1, 2, *}, V. S. Litvin^{1, 3}, D. N. Trunov¹, V. N. Marin¹, S. N. Axenov¹, R. A. Sadykov¹

¹*Institute for Nuclear Research of the RAS, Moscow, 117312 Russia*

²*National Research Nuclear University MPhI, Moscow, 115409 Russia*

³*P.N. Lebedev Physical Institute of the RAS, Moscow, 119991 Russia*

**e-mail: dbuchnyy@yandex.ru*

Ring scintillation neutron detectors consisting of linear counters based on ZnS(Ag):⁶LiF were developed by INR RAS. In this paper a numerical analysis of the neutron detection efficiency and resolution of various linear counter configurations is performed in order to optimize them considering compactness and technical simplicity. A number of Monte Carlo simulations were carried out reflecting the process of neutron passage inside the counter as well as the registration of a neutron beam scattered on a polycrystalline sample.

Keywords: Monte Carlo simulation, scintillator, neutron detector, pulsed neutron source, neutron diffraction.