

ОБЪЕДИНЕННЫЙ ИНСТИТУТ ЯДЕРНЫХ ИССЛЕДОВАНИЙ  
ЛАБОРАТОРИЯ ЯДЕРНЫХ ПРОБЛЕМ им. В. П. ДЖЕЛЕПОВА

*На правах рукописи*

*Зимин*

**Зимин Илья Юрьевич**

**Гетерогенный сцинтиллятор на основе литиевого стекла для  
регистрации тепловых нейтронов**

Специальность 1.3.2 – «Приборы и методы экспериментальной физики»

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание ученой степени  
кандидата физико-математических наук

Дубна – 2024

Работа выполнена в Лаборатории ядерных проблем им. В. П. Дзелепова  
Объединенного института ядерных исследований

- Научный руководитель** – *Кузьмин Евгений Сергеевич, кандидат физико-математических наук, младший научный сотрудник, старший инженер научно-экспериментального отдела множественных адронных процессов ЛЯП ОИЯИ*
- Официальные оппоненты** – *Лобко Александр Сергеевич, доктор физико-математических наук, доцент, зам. директора по научной работе НИУ "Институт ядерных проблем" Белорусского государственного университета*
- Тетерин Петр Евгеньевич, кандидат физико-математических наук, доцент, старший научный сотрудник кафедры 40 физики элементарных частиц Национального исследовательского ядерного университета «МИФИ»*

С электронной версией диссертации можно ознакомиться на официальном сайте Объединенного института ядерных исследований в информационно-телекоммуникационной сети «Интернет» по адресу: <https://dissertations.jinr.ru>. С печатной версией диссертации можно ознакомиться в Научно-технической библиотеке ОИЯИ (г. Дубна, Московская область, ул. Жолио-Кюри, д. 6).

Ученый секретарь диссертационного совета  
доктор физико-математических наук

Г. А. Карамышева

## ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

**Актуальность проблемы.** Техника детектирования нейтронов является важной задачей в нейтронных исследованиях. Одни из самых популярных детекторов – это счетчики на основе  $^3\text{He}$ . Они обладают рядом преимуществ: таких как высокая эффективность детектирования нейтронов, ограниченная чувствительность к гамма-квантам, высокое быстродействие (минимальное “мертвое время”  $t_{\text{min}} = 0,43$  мкс) [1]. Однако, в последнее десятилетие стоимость газа  $^3\text{He}$  резко выросла. Данное обстоятельство стимулирует поиск новых технологий регистрации нейтронов.

Существующие детекторы обладают недостаточно хорошими характеристиками, чтобы полноценно заменить гелиевые счетчики. Например, детектор тепловых нейтронов на основе композита, составленного из кристаллов  $^6\text{LiF}$  и  $\text{ZnS (Ag)}$ , имеет плохую прозрачность. Это связано с большой разницей коэффициентов преломления кристаллов  $^6\text{LiF}$  ( $n = 1,4$ ) и  $\text{ZnS (Ag)}$  ( $n = 2,4$ ), поэтому такой сцинтиллятор используется в виде тонких слоев около 0,5 мм [2-6]. Минимальное “мертвое время” такого сцинтиллятора равно  $t_{\text{min}} = 8$  мкс. EJ-420 и EJ-426 являются примерами сцинтилляторов представленных в серийном производстве [7-8] (см. Таблица 1). Недавно изготовленный новый нейтронный сцинтиллятор, имеют высокую стоимость, а также есть ограничения по его размеру [9].

Таблица 1. Сравнение характеристик современных сцинтилляторов предназначенных для регистрации тепловых нейтронов.

	Гамма - чувствительность	Эффективность регистрации нейтронов при толщине	Быстрая компонента	Загрузочная способность	Послесвечение
Гетерогенный сцинтиллятор	$10^{-6}$	55%, 2 мм	15 нс	$2 \cdot 10^6$	500 нс
Литиевое стекло NE 912	$10^{-4}$	91%, 2 мм	15 нс	$2 \cdot 10^6$	500 нс
EJ-420	$10^{-7}$	55%, 6,5 мм	200 нс	$10^5$	до 10 мкс
EJ-426	$10^{-7}$	31%, 0,5 мм	200 нс	$10^5$	до 10 мкс

Еще один хорошо известный сцинтиллятор, предназначенный для регистрации нейтронов – это литиевое стекло (см. Таблица 1) [10]. Из его преимуществ можно отметить прозрачность, высокую эффективность регистрации нейтронов и малое “мертвое время”. Серьезным минусом этого сцинтиллятора является высокая чувствительность к гамма-квантам (см. Рисунок 1). Из Рисунка 1 видно, что при работе детектора при высоком гамма-фоне в счетном режиме с установленным порогом, будет значительное число гамма-квантов, ложно принятых за нейтроны. Изменение значения порога не приведет к улучшению ситуации.

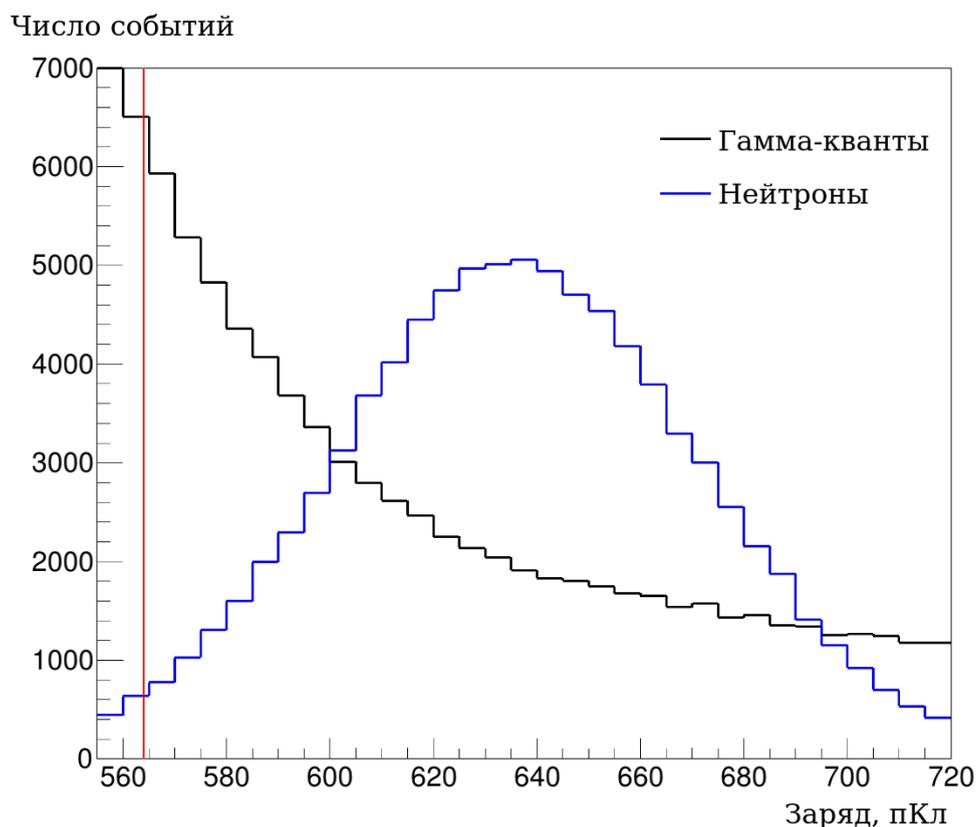


Рисунок 1. Спектры событий, зарегистрированных от источника  $\gamma$ -квантов  $^{60}\text{Co}$  и от тепловых нейтронов в литиевом стекле NE 912. На один нейтрон попавший сцинтиллятор приходится  $10^4$  гамма-квантов.

Существуют два основных подхода по снижению гамма-чувствительности. Первый заключается в создании сцинтилляторов с гетерогенной структурой (композитов) на основе литиевого стекла. Второй – это нейтрон/гамма дискриминация посредством аналогового или цифрового анализа сигнала.

В предлагаемой диссертационной работе представлены результаты разработки детектора на основе гетерогенного сцинтиллятора (см. Таблица 1). С помощью Монте-Карло моделирования были оптимизированы параметры структуры композита. Испытания созданного детектора на пучках тепловых нейтронов и гамма-квантов показали, что он обладает характеристиками, позволяющими успешно решать задачи регистрации нейтронов в присутствии гамма-фона. На Рисунке 2 продемонстрировано снижение чувствительности детектора к гамма-фону при использовании гетерогенного сцинтиллятора.

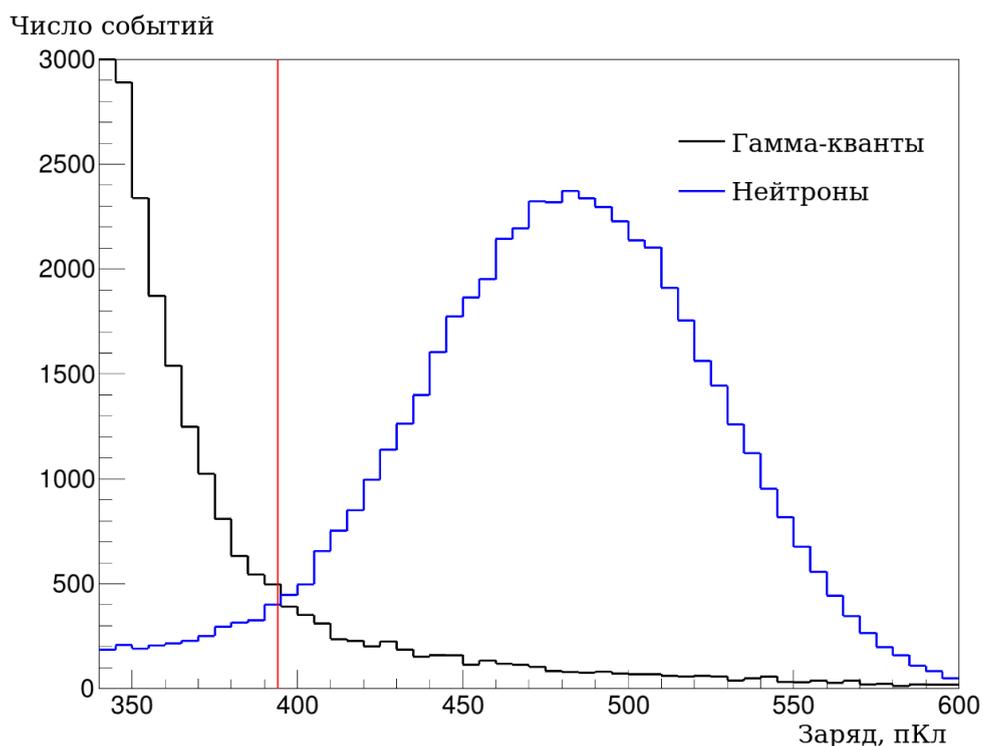


Рисунок 2. Спектры событий, зарегистрированных от источника  $\gamma$ -квантов  $^{60}\text{Co}$  и от тепловых нейтронов в гетерогенно сцинтилляторе на основе литиевого стекла NE 912. На один нейтрон попавший сцинтиллятор приходится  $10^4$  гамма-квантов.

**Цель и задачи.** Целью настоящей диссертации является разработка гетерогенного сцинтиллятора для регистрации тепловых нейтронов на основе литиевого стекла с выбором оптимальной структуры, позволяющей минимизировать гамма-чувствительность детектора при сохранении высокой эффективности к нейтронам. Для этой цели были решены следующие задачи:

1. Изготовлен детектор нейтронов на основе гомогенного литиевого стекла. Проведены эксперименты на пучках тепловых нейтронов (ИБР-2М) и с источником  $\gamma$ -квантов  $^{60}\text{Co}$ .
2. Создана Монте-Карло модель данного детектора. С помощью этой модели и экспериментальных результатов были уточнены параметры сцинтиллятора: световыход при захвате нейтрона, усредненный для продуктов реакции захвата нейтрона квантинг-фактор, временные параметры высвечивания.

3. Создана Монте-Карло модель детектора на основе гетерогенного сцинтиллятора. С ее помощью были определены оптимальные структурные параметры исследуемого материала, такие как размер фрагментов и их концентрация.
4. Разработаны и изготовлены образцы композитных сцинтилляторов с тремя различными связующими полимерами и тремя различными концентрациями литиевого стекла.
5. Проведены испытания образцов в составе детектора на пучке тепловых нейтронов и с источником гамма-квантов  $^{60}\text{Co}$ .
6. Определены эффективность регистрации тепловых нейтронов и гамма-чувствительность в сравнении с гомогенным стеклянным сцинтиллятором.

**Научная новизна** данного исследования заключается в создании быстрого гетерогенного сцинтиллятора (загрузочная способность  $2 \cdot 10^6$ ), у которого уровень чувствительности к гамма-квантам ниже на два порядка, чем у гомогенного литиевого стекла. При этом эффективность регистрации тепловых нейтронов не менее 50%.

**Практическая значимость.** Такая технология позволяет создавать дешевые детекторы нейтронов (малое количество стекла, отсутствие необходимости в создании оптических поверхностей) произвольной формы и больших объемов при использовании спектросмещающих волокон.

Применение данного детектора возможно в нейтронной трансмиссионной дифракции (neutron transmission diffraction), где потоки нейтронов могут достигать  $10^5$ - $10^6$  нейтронов/(с $^{-1}$  · см $^{-1}$ ) и присутствует высокий гамма-фон [11-13].

**Достоверность** полученных результатов подтверждается проверкой моделирования путем испытания реальных образцов в экспериментах на реакторе, с использованием стандартной аппаратуры высокой точности и проверенных методов обработки экспериментальных данных.

**Положения, выносимые на защиту:**

1. Созданы образцы композитных сцинтилляторов, с уровнем нейтрон/гамма-дискриминации на 2 порядка лучше, чем у гомогенного литиевого стекла.
2. Уточнены характеристики литиевого стекла NE 912: световыход при захвате нейтрона, усредненный для продуктов реакции захвата нейтрона квенчинг-фактор, временные параметры высвечивания.
3. С помощью Монте-Карло модели найдена оптимальная область параметров структуры композита, при которых достигаются лучшие характеристики сцинтиллятора.

**Личный вклад автора** диссертации включает в себя:

- Автор создал и работал с Монте-Карло моделями детекторов на основе гомогенного и гетерогенного стекла.
- Участвовал в испытаниях образцов на тепловых нейтронах и гамма-квантах.
- Создал программы для анализа данных, полученных при измерениях. Обработывал экспериментальные данные с их помощью.

**Апробация работы.** Основные результаты диссертационной работы были опубликованы в трех статьях журнала Приборы и техника эксперимента, а также докладывались автором на научных семинарах ЛЯП ОИЯИ.

**Публикации.** По теме диссертационной работы были опубликованы 3 научные работы [14-16] в рецензируемом издании, рекомендованном ВАК РФ.

**Объем и структура работы.** Диссертация состоит из введения, 4 глав, заключения и списка литературы. Полный объем диссертации составляет 83 страницы, включая 32 рисунка и 9 таблиц. Список использованных источников состоит из 93 наименований.

## СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

**Во Введении** представлены цели и задачи данной работы, актуальность, научная новизна, практическая значимость и достоверность, полученных

результатов. Приведены положения, выносимые на защиту, личный вклад автора и апробация работы. А также указаны структура и объем диссертации.

**В первой главе** поднята проблема поиска альтернативных детекторов вместо пропорциональных счетчиков на  $^3\text{He}$  [1]. Данная необходимость вызвана дефицитом этого газа. Одни из лучших претендентов на роль детектора нейтронов выступают детекторы на основе литиевых стёкол [17]. Из преимуществ этих сцинтилляторов можно отметить прозрачность, высокую эффективность регистрации нейтронов и малое “мертвое время”. Серьезным их минусом является высокая чувствительность к гамма-квантам.

В данной главе приведен обзор методов по снижению гамма-чувствительности, представленных в литературе. Основную часть подходов решения этой проблемы можно разделить на две большие группы. Первая группа – это поиск методов, которые на программном уровне разделяют импульсы нейтронов и гамма-квантов. Вторая группа – это создание сцинтилляторов, с нестандартной структурой, на основе литиевых стекол с разнообразными геометриями и оптическими характеристиками с целью уменьшения яркости вспышки от гамма-квантов.

В качестве электронных методов дискриминации гамма-квантов были рассмотрены:

- Регистрация на постоянном пороге [18].
- Селекция по форме импульса [19].

В группу методов по созданию специальных конфигураций сцинтиллятора вошли:

- Тонкие сцинтилляторы [20].
- Волокна из литиевого стекла [21].
- Метод антисовпадений [22].
- Композитные сцинтилляторы [23].

В данной диссертации более подробно рассмотрен метод создания композитного сцинтиллятора для регистрации тепловых нейтронов [15-16]. Общий принцип этого метода заключается в снижении гамма-чувствительности

детекторов на основе литиевого стекла путем уменьшения числа фотонов, рождающихся при облучении гамма-квантами.

Композит состоял из гранул литиевого стекла, которые были размещены в оптической матрице из несцинтиллирующего полимера.

Основной процесс взаимодействия теплового нейтрона с литиевым стеклом – это захват нейтрона на ядрах  ${}^6\text{Li}$  (сечение 940 б):



Основной процесс взаимодействия гамма-квантов с чувствительной частью детектора – это эффект Комптона. Длина пробега электрона в литиевом стекле порядка нескольких миллиметров. Длина пробега продуктов реакции захвата нейтрона на ядре  ${}^6\text{Li}$ , тритона и альфа-частицы, в сцинтилляторе соответственно равны 36 и 6 мкм. Это на порядки меньше, чем длина пробега электрона. Используя эти знания, можно выбрать так размер гранул сцинтиллятора, что электроны с высокой энергией будут покидать их объем и оставлять часть своей энергии в несцинтиллирующей матрице. Таким образом будет меньше образовываться фотонов и амплитуды импульсов от гамма-квантов уменьшаться. В то время как треки тритона и альфа-частицы будут по-прежнему полностью укладываться в сцинтилляторе, и соответственно яркость вспышки останется прежней.

**Во второй главе** описано устройство детектора нейтронов на основе гомогенного литиевого стекла. Проведена калибровка ФЭУ по спектру единичного фотоэлектрона. Детектор испытан на пучке тепловых нейтронов (ИБР-2М) и источнике  ${}^{60}\text{Co}$ . Уточнены характеристики высвечивания сцинтиллятора.

Схема детектора представлена на Рисунке 3. Основными элементами детектора были литиевое стекло марки NE 912 (Nuclear Enterprises) и ФЭУ XP 2262B (Photonis) с делителем напряжения S563/L (Philips). Гомогенный сцинтиллятор имел следующие размеры: диаметр 40 мм и толщину 2 мм. Сопряжение литиевого стекла и ФЭУ было осуществлено с помощью цилиндрического световода из оргстекла диаметром 40 и длиной 25 мм. Световод

со сцинтиллятором были окружены цилиндром из фторопласта. На поверхности сцинтиллятора было расположено входное окно детектора. Оно представляло из себя последовательно установленные диффузный и зеркальный отражатель общей толщиной  $0.08 \text{ г/см}^2$ .

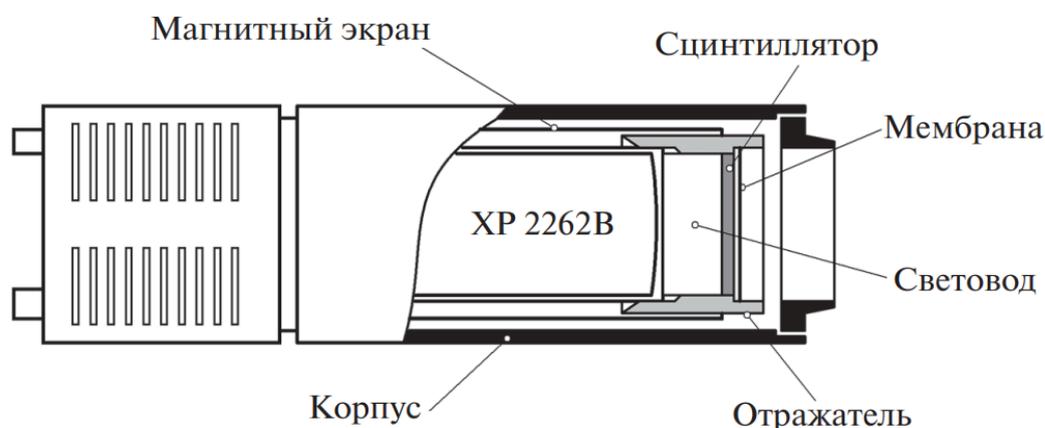


Рисунок 3. Схема детектора, использованного в измерениях. Отражатель изготовлен из фторопласта, световод – из оргстекла, корпус детектора – стальной, магнитный экран – из мю-металла, мембрана – из алюминия.

Для калибровки ФЭУ по спектру единичного фотоэлектрона был выбран метод, изложенный в работах [24-25]. На Рисунке 4 представлен полученный спектр единичного фотоэлектрона аппроксимированный функцией предложенной в работе [26]. Первый момент спектра был определен с точностью 0.4%.

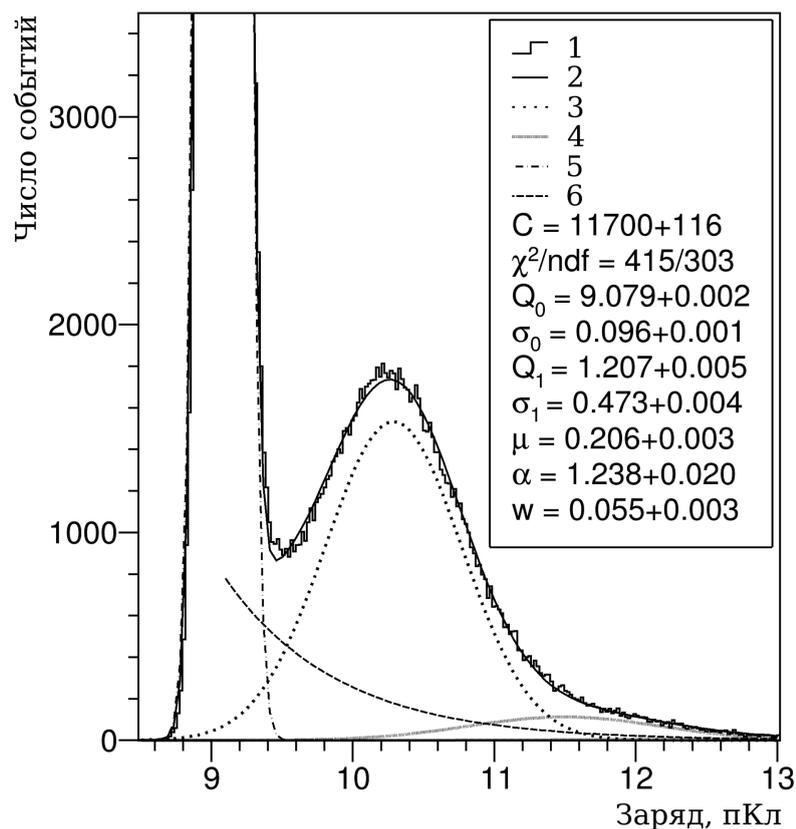


Рисунок 4. Спектр импульсов, зарегистрированный при калибровке ФЭУ: 1 – данные измерений; 2 – результат аппроксимации по формуле (1); 3 – распределение зарядов от единичного электрона; 4 – распределение зарядов от 2 и 3 фотоэлектронов; 5 – пьедестал; 6 – фоновые процессы второго типа.

Измерения с тепловыми нейтронами проводились на 13-ом канале реактора ИБР-2М [27-28]. Схема эксперимента представлена на Рисунке 5. Нейтронный пучок, выходящий из нейтроновода, помимо тепловых нейтронов содержал также и гамма-кванты на выходе нейтроновода. Для снижения количества фотонов, попадающих на детектор, было принято решение на пути пучка частиц установить мишень в виде стержня диаметром 20 мм из реакторного графита, в котором отсутствуют примеси изотопов бора, производящих  $\gamma$ -кванты при захвате тепловых нейтронов. Расстояние между мишенью и окном нейтроновода было 500 мм. Детектор был расположен под углом  $42^\circ$  к направлению пучка на расстоянии 1580 мм от мишени. В качестве дополнительной защиты от радиоактивного фона детектор был окружен защитой из свинца и борированного полиэтилена.

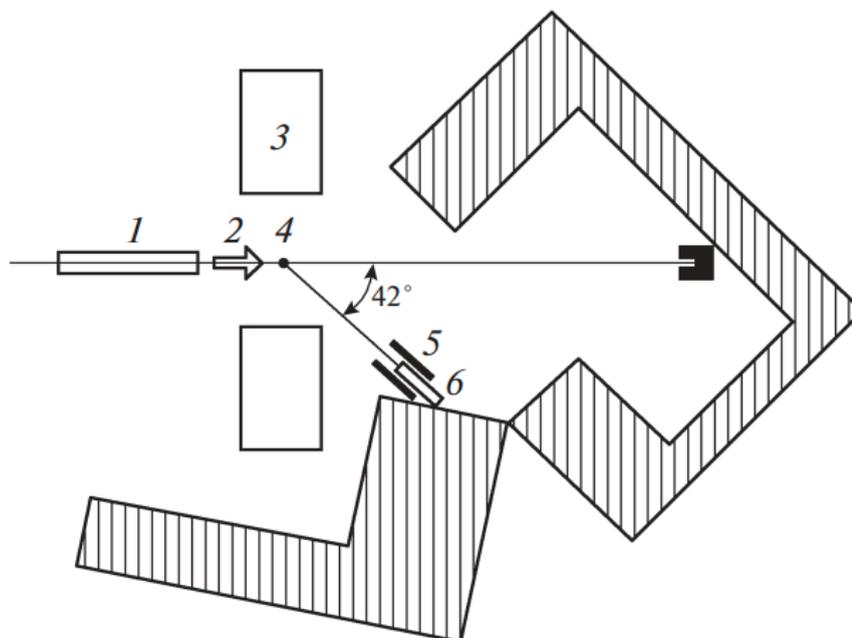


Рисунок 5. Схема эксперимента на пучке тепловых нейтронов. 1 – нейтронпровод; 2 – пучок тепловых нейтронов; 3 – вспомогательное оборудование; 4 – мишень из реакторного графита; 5 – защита детектора; 6 – детектор.

По аналогичной методике были проведены измерения с радиоактивным источником  $^{60}\text{Co}$ . Активность источника составляла 46,3 кБк. Он располагался на оси детектора так, что расстояние между ним и передней поверхностью сцинтиллятора составляло 16,0 мм. Конфигурация электроники и параметры регистрации были такими же, как и при измерениях с нейтронами.

В результате обработки были получены зарядовые спектры событий при регистрации нейтронов и гамма-квантов (см. Рисунок 6).

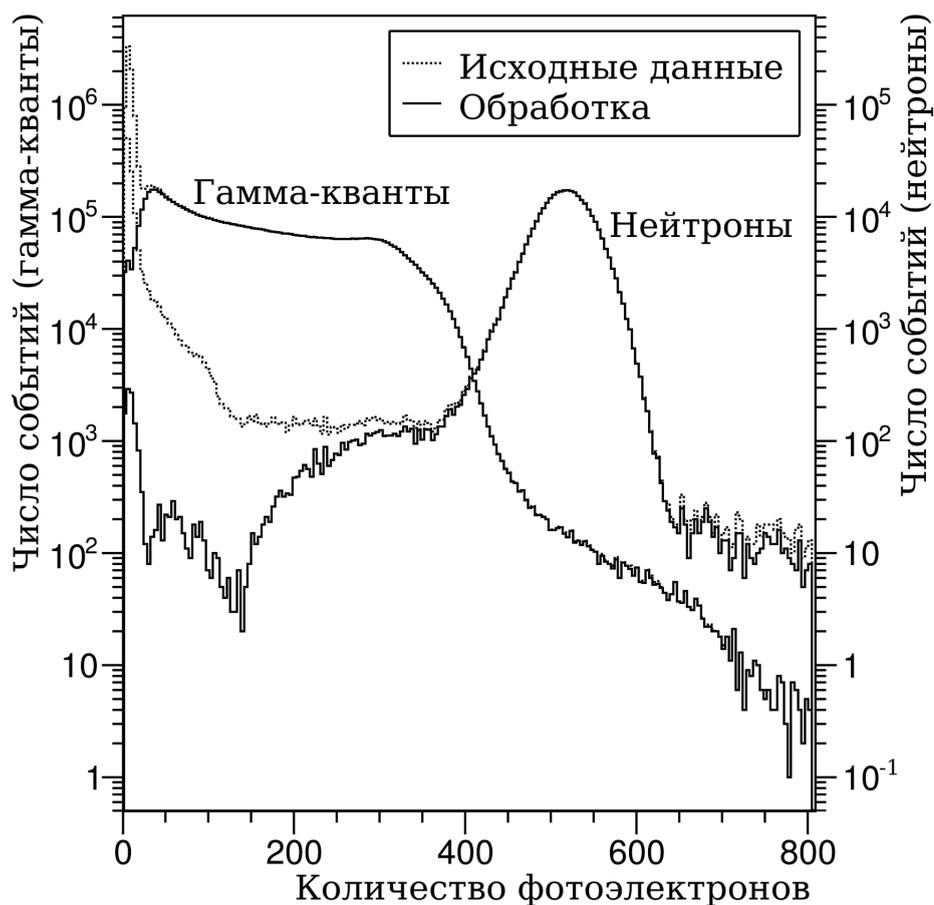


Рисунок 6. Спектры сигналов от  $^{60}\text{Co}$  и тепловых нейтронов до и после обработки, совмещенные на оси, прокалиброванные в единицах фотоэлектронов.

Для создания Монте-Карло модели и исследования возможностей разделения сигналов от различных частиц необходимо знать характеристики высвечивания сцинтиллятора. Поскольку эта информация только частично присутствовала в литературе [29], были проведены исследования, которые помогли определить недостающие данные.

На первом этапе для определения параметров высвечивания сцинтиллятора была построена усредненная форма импульса сцинтиллятора от нейтронов и гамма-квантов. На втором этапе эти импульсы аппроксимированы функцией предложенной в работе [30]. В Таблице 2 представлены результаты аппроксимации: значения времен высвечивания и амплитуд в сравнении с данными из литературы [29].

Таблица 2. Характеристики высвечивания сцинтиллятора NE 912 при возбуждении тепловыми нейтронами и гамма-квантами: эксперимент и работа [29].

Нейтроны			
Компонента	Быстрая	Медленная	Послесвечение
Амплитуда (эксперимент)	0,39	0,53	0,08
Время высвечивания, нс (эксперимент)	15	56	303
Время высвечивания, нс [29]	18	55	-
Гамма-кванты			
Компонента	Быстрая	Медленная	Послесвечение
Амплитуда (эксперимент)	0,54	0,43	0,03
Время высвечивания, нс (эксперимент)	40	84	867

**В первой части третьей главы** с помощью моделирования детектора на основе гомогенного литиевого стекла уточнялись характеристики этого материала такие как световыход при регистрации нейтронов и усредненный для продуктов реакции захвата нейтрона квантинг-фактор

Для моделирования работы детектора с гомогенным сцинтиллятором был выбран программный пакет Geant4 [31-33]. Производилось моделирование облучения детектора тепловыми нейтронами и гамма-квантами (источник  $^{60}\text{Co}$ ). Рассчитывались такие этапы как взаимодействие частицы с веществом, образование и распространение сцинтилляционного света, преобразование зарегистрированных фотонов в выходной сигнал, регистрируемый дигитайзером.

На Рисунке 7 представлено сравнение экспериментального спектра с результатами моделирования. При сравнении экспериментального и смоделированного спектров для гамма-квантов наблюдается достаточно хорошее общее согласие между ними. Исключением является область малых переданных энергий. Это незначительное для наших исследований несоответствие связано с упрощением модели по отношению к реальному детектору. Оно заключалось в том, что не участвовали в моделировании дополнительные детали детектора (корпус, заглушки, крепления и т. д), которые искажают поток частиц. Их учет значительно усложняет модель детектора и потребует мощные вычислительные ресурсы.

Спектры нейтронов хорошо согласуются в центральной части пика. Незначительные различия наблюдаются в области малых переданных энергий. По нашему мнению, это связано с неоднородностью конверсионной эффективности по объему сцинтиллятора.

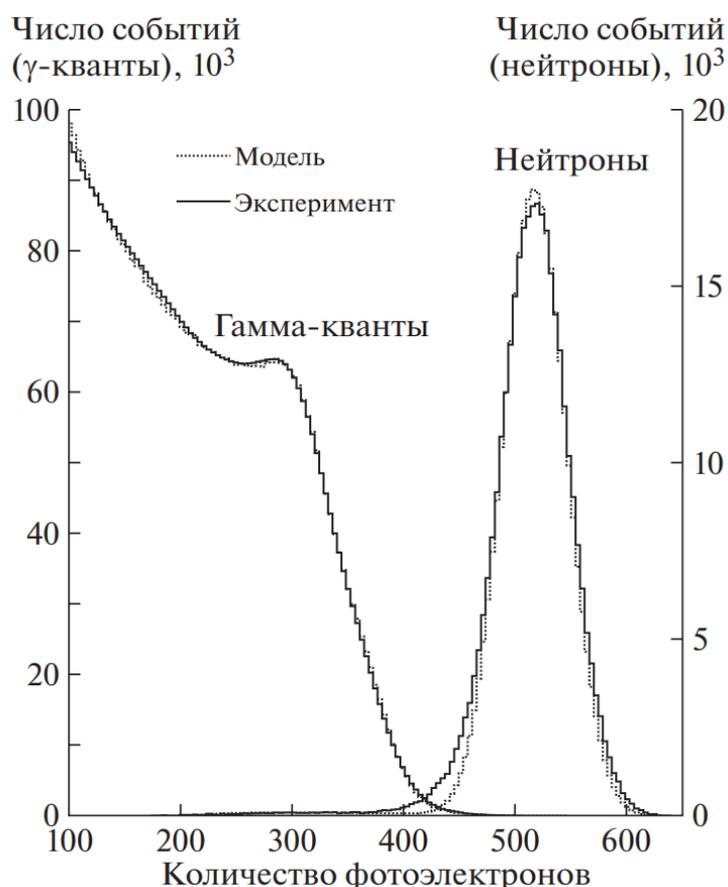


Рисунок 7. Сравнение модельного и экспериментального спектров событий от  $\gamma$ -квантов  $^{60}\text{Co}$  и тепловых нейтронов, совмещенных на оси, прокалиброванной в единицах фотоэлектронов.

Экспериментальные спектры нейтронов в центральной части хорошо описываются распределением Гаусса. Благодаря этому факту удалось, варьируя значение световыхода сцинтиллятора при регистрации нейтронов, найти лучшее согласование модельного и экспериментального спектров. При этом значение световыхода (конверсионная эффективность) составило  $L_n = 1048$  фотонов/МэВ. Вычисленное значение усредненного для продуктов реакции захвата нейтрона квенчинг-фактора при регистрации нейтронов, с использованием этих значений равно:  $QF = 0,32$ .

Также были смоделированы выходные сигналы детектора. Для определения сходства или различия между смоделированными сигналами и сигналами, полученными во время эксперимента, были использованы корреляционные коэффициенты Пирсона. Средние значения коэффициента корреляции для нейтронов и гамма-квантов 0,96 и 0,95 соответственно. Такой результат показывает высокую степень подобия модельных и зарегистрированных импульсов.

**Во второй части третьей главы** с помощью моделирования производилась оптимизация структуры гетерогенного сцинтиллятора.

Образцы гетерогенных сцинтилляторов разрабатывались в форме диска с диаметром 40 мм и толщиной 2 мм. Гомогенное стекло имело те же размеры, что позволило провести прямое сравнение характеристик образцов композита со стандартным стеклянным сцинтиллятором.

По структуре композит состоял из несцинтиллирующей оптической матрицы, в которую были помещены фрагменты сцинтиллятора. Фрагменты моделировались в форме кубиков из литиевого стекла NE 912. Расчеты проводились для кубиков с размерами граней от 200 до 800 мкм с шагом 100 мкм. Были рассмотрены различные концентрации литиевого стекла от 20 до 35% по отношению к общему объему гетерогенного сцинтиллятора. В качестве

оптического компаунда использовались: эпоксидная смола, силиконовый компаунд и акриловая смола. Выбор обусловлен тем, что коэффициенты преломления этих материалов близки к коэффициенту преломления литиевого стекла. Это обеспечило лучшую прозрачность образцов.

Поскольку изготовление образцов со всеми комбинациями параметров и их тестирование требует неоправданно много ресурсов, было принято решение произвести моделирование работы детектора с различными конфигурациями [15]. Целью моделирования было выделить область параметров, при которых достигается лучшие сочетания эффективности регистрации нейтронов и чувствительности к гамма-квантам.

Фрагменты располагались случайным образом в объеме образца. Этот аспект модели более соответствует реальному детектору, поскольку очень сложно изготовить детектор с четко упорядоченным расположением таких маленьких фрагментов. Нейтронный пучок равномерно падал на поверхность сцинтиллятора под прямым углом. Энергетическое распределение нейтронов имело форму Максвелла-Больцмана с температурой 0,025 эВ. В случае исследования с гамма-квантами точечный источник  $^{60}\text{Co}$  располагался на оси детектора на расстоянии 16 мм от передней грани сцинтиллятора. В данном моделировании было рассмотрено только выделение энергии заряженных частиц в материале сцинтиллятора. Образование сцинтилляционных фотонов, их распространение и отклик ФЭУ не рассматривались.

При моделировании эффективность регистрации нейтронов композитом определялась как отношение числа зарегистрированных нейтронов к полному числу нейтронов, упавших на сцинтиллятор. Зарегистрированным считался лишь тот нейтрон, треки продуктов реакции захвата которого полностью лежали во фрагменте сцинтиллятора. Этот подход обеспечил достоверную оценку снизу эффективности гетерогенного сцинтиллятора к нейтронам и позволил значительно экономить время, затрачиваемое на моделирование. Полученные результаты представлены на Рисунке 8.

Рисунок 8 показывает, что эффективность регистрации нейтронов имеет максимум при размере фрагментов литиевого стекла от 400–500 мкм. Уменьшение размера зерен приводит к падению эффективности по причине роста числа событий, при которых треки продуктов реакции захвата нейтрона лежат не полностью в фрагментах сцинтиллятора. Если рассматривать размеры более 500 мкм, то в связи с уменьшением количества гранул падает равномерность заполнения объема гетерогенного сцинтиллятора ими. Это приводит к образованию зон, в которых отсутствует литиевое стекло, и нейтрон может проходить чувствительный объем детектора не взаимодействуя с ядрами  ${}^6\text{Li}$ . Благодаря тому, что присутствует “плато” на графиках зависимости эффективности от размера зерна в диапазоне от 400 до 500 мкм, возникает возможность использовать для изготовления фрагментов стеклянного сцинтиллятора дробилку с последующей сортировкой с помощью сит.

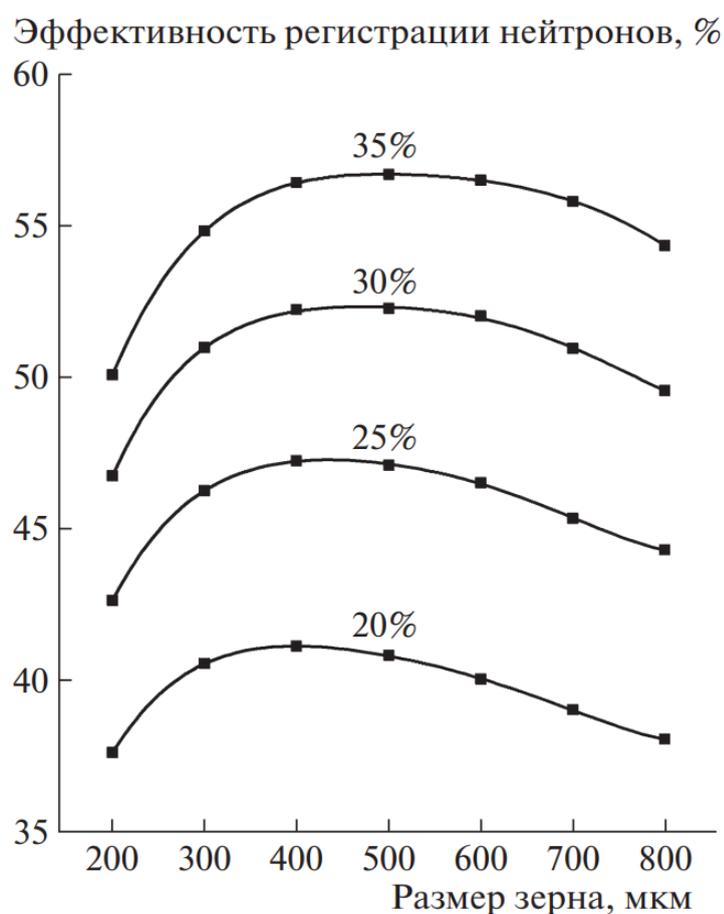


Рисунок 8. Зависимости эффективности регистрации нейтронов от размера зерен стеклянного сцинтиллятора при различных уровнях его концентрации (цифры у кривых).

Было проведено аналогичное моделирование в котором вместо тепловых нейтронов использовался источник  $^{60}\text{Co}$ .

Как упоминалось во второй главе, спектры энерговыделения при регистрации нейтронов, полученные в эксперименте хорошо описываются распределением Гаусса со средним значением  $T_{ee}$  и среднеквадратическим отклонением  $\sigma$ . Обычно, значение порога регистрации нейтронов устанавливается на уровне среднего значения за вычетом нескольких среднеквадратических отклонений,  $L = T_{ee} - k\sigma$ , где  $2 \leq k \leq 4$ . Для детектора на основе гетерогенного стекла значение  $\sigma$  может варьироваться в зависимости от ряда параметров: оптических свойств материалов, характеристик фотоприемника, методов анализа сигнала и т. д. Для моделирования был выбран условный порог равный  $R = 0,8T_{ee} = 1,22 \text{ МэВ}$ . На Рисунке 9 приведена зависимость чувствительности к гамма-квантам гетерогенного сцинтиллятора от размера гранул и их концентрации.

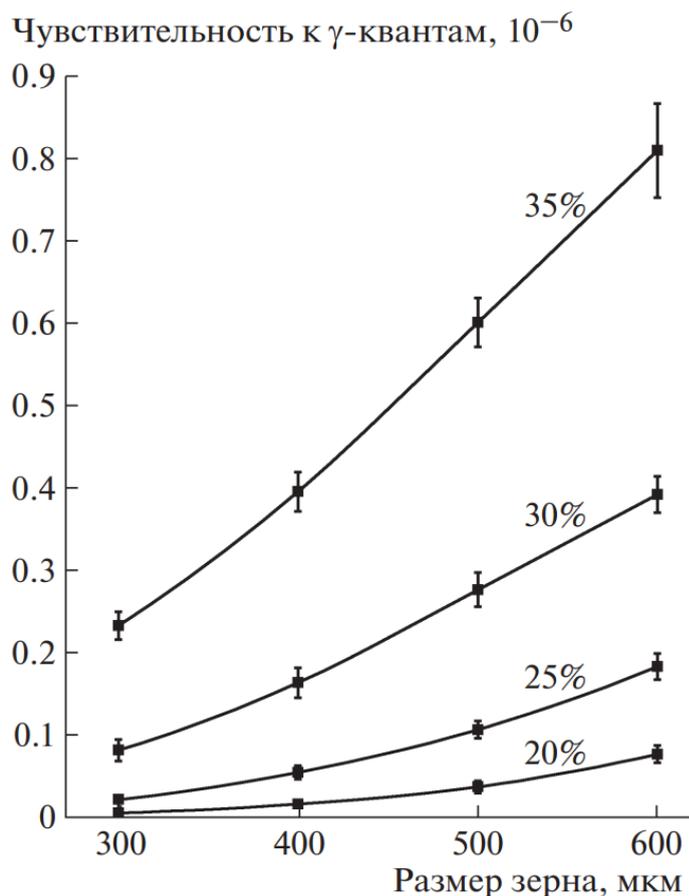


Рисунок 9. Зависимости чувствительности к гамма-квантам композитного сцинтиллятора с диаметром 40 и толщиной 2 мм от размера зерен стекла при различной его объемной концентрации (цифры у кривых).

На следующем этапе с помощью моделирования проводилось исследование влияния материала матрицы на эффективность регистрации нейтронов и гамма-чувствительность. Параметры гетерогенного сцинтиллятора были выбраны следующими: размер гранул 400 мкм и их концентрация 35%. В качестве оптических компаундов были рассмотрены силикон, акрил и эпоксидная смола. Результаты моделирования гетерогенных сцинтилляторов приведены в Таблице 3 в сравнении с гомогенным сцинтиллятором.

Моделирование показало, что в энергетическом приближении приведенные в данном исследовании компаунды не влияют на эффективность регистрации нейтронов. Практически отсутствует зависимость чувствительности детектора к гамма-квантам от компаунда. В итоге был сделан вывод, что основным фактором, влияющим на выбор, являются оптические характеристики материала. Для

принятия окончательного решения было необходимо создание физических прототипов и испытаний их на пучках нейтронов и гамма-квантов.

Таблица 3. Характеристики композитов с матрицами из различных материалов в сравнении со стеклянным сцинтиллятором

Материал	Эффективность к нейтронам, %	Гамма-чувствительность
Силиконовый компаунд	$56,1 \pm 0,2$	$(6,0 \pm 0,4) \cdot 10^{-7}$
Акрил	$56,3 \pm 0,2$	$(4,2 \pm 0,3) \cdot 10^{-7}$
Эпоксидная смола	$56,4 \pm 0,2$	$(4,3 \pm 0,3) \cdot 10^{-7}$
Стеклоанный сцинтиллятор	$91,5 \pm 0,1$	$(7,0 \pm 0,1) \cdot 10^{-5}$

Подавление гамма-чувствительности на два порядка при падении эффективности регистрации нейтронов с 91 до 56% подтверждают перспективность создания и тестирования физических прототипов.

**В первой части четвертой главы** описана структура и технология изготовления опытных образцов гетерогенных сцинтилляторов, их испытания. Рассчитана эффективность регистрации нейтронов и чувствительность к гамма-квантам.

Образцы гетерогенного сцинтиллятора имели форму диска размеры, которого соответствовали математической модели: диаметр 40 мм и толщина 2 мм. Пластина из литиевого стекла измельчалась с помощью дробилки до гранул размером не превышающим 500 мкм [16]. На следующем этапе с помощью сит выделялась фракция гранул в диапазоне от 350 до 500 мкм, где эффективность регистрации нейтронов максимальна [15]. Фрагменты для композитного сцинтиллятора были изготовлены из той же пластины, из которой ранее был вырезан гомогенный сцинтиллятор. Было выбрано три материала, которые выступили как оптические компаунды для прототипов: эпоксидная смола,

силиконовый компаунд, акриловая смола. На Рисунке 10 представлено схематическое изображение структуры композитного сцинтиллятора.

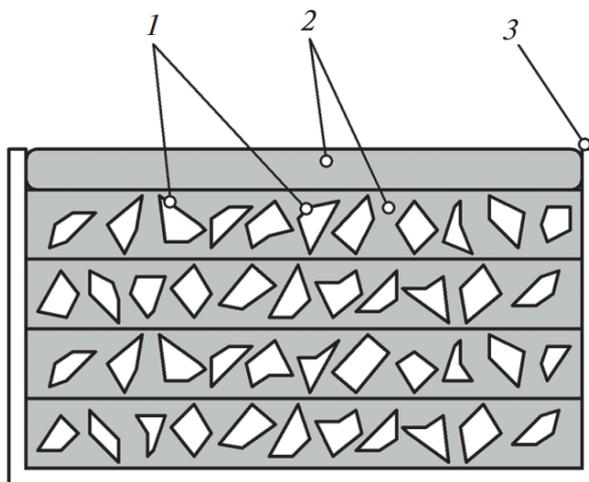


Рисунок 10. Структура образца гетерогенного сцинтиллятора. 1 – фрагменты стеклянного сцинтиллятора; 2 – полимер; 3 – корпус

Было произведено 9 прототипов, по три образца с разными концентрациями с каждым из трех оптических компаундов. Значения концентраций были  $25 \pm 1.5\%$ ,  $30 \pm 1.8\%$  и  $35 \pm 2.1\%$ . В качестве десятого образца использовалось гомогенное стекло. Оно было предназначено для сравнительной оценки характеристик гетерогенных сцинтилляторов.

Было произведено два испытания прототипов с источником гамма-квантов и на пучке тепловых нейтронов. Устройство детектора было таким же, как и ранее при измерениях с гомогенным сцинтиллятором (см. вторая глава). Описание измерений с нейтронами и гамма-квантами совпадает с описанием во второй главе. Но для нейтронов было внесено одно изменение: рядом с детектором был установлен монитор нейтронного пучка. Этот счетчик конструктивно полностью повторял основной детектор и в нем был установлен гомогенный сцинтиллятор.

Каждый из образцов имел свою эффективность регистрации нейтронов и одной из целей эксперимента была ее определить. Для этого необходимо было знать сколько нейтронов в действительности упало на образец. Роль монитора состояла в измерении интенсивности потока нейтронов. Его эффективность регистрации нейтронов порядка 91%. Таким образом, исходя из количества

нейтронов, которое зарегистрировал монитор, корректировались относительные эффективности образцов.

В результате обработки экспериментальных данных были получены эффективности регистрации нейтронов по отношению к гомогенному сцинтиллятору для всех 9 образцов и представлены в Таблице 4. Статистические погрешности эффективностей регистрации нейтронов, представленных в Таблице 4, менее 1.5%.

Таблица 4. Эффективность регистрации нейтронов для различных образцов композита по отношению к стеклянному сцинтиллятору

Состав	Концентрация фрагментов стекла, %			
	25	30	35	100
Композит (силиконовый компаунд)	0,53	0,56	0,61	
Композит (эпоксидная смола)	0,52	0,57	0,60	
Композит (акриловая смола)	0,46	0,56	0,60	
Гомогенное стекло				1,00

Также для каждого из образцов рассчитывалась чувствительность к гамма-квантам и порог устанавливался точно тот же, как и при регистрации нейтронов. Для вычисления гамма-чувствительность определялось число событий с энергией выше порога регистрации, деленное на число гамма-квантов, упавших на поверхность сцинтиллятора. Данный результат умножался на  $10^6$  млн для удобства представления результатов.

Таблица 5 демонстрирует гамма-чувствительность для всех изученных образцов: гомогенный сцинтиллятор и 9 гетерогенных сцинтилляторов, а именно комбинации трех оптических компаундов и трех уровней концентраций гранул литиевого стекла.

Таблица 5. Значения гамма-чувствительности для гомогенного стекла и образцов композита с различными нейтральными связующими и уровнями концентрации фрагментов стекла

Состав	Концентрация фрагментов стекла, %			
	25	30	35	100
Композит (силиконовый компаунд)	$1,3 \pm 0,11$	$2,6 \pm 0,1$	$4,9 \pm 0,1$	
Композит (эпоксидная смола)	$9,2 \pm 0,1$	$13,3 \pm 0,2$	$22,5 \pm 0,2$	
Композит (акриловая смола)	$0,53 \pm 0,05$	$6,0 \pm 0,1$	$13,1 \pm 0,2$	
Гомогенное стекло				$142 \pm 5$

Во второй части четвертой главы рассмотрены и сравнены три метода нейтрон/гамма-дискриминации: регистрация на постоянном пороге, селекция по длительности и селекция по форме импульса.

Результаты рассмотрения различных методов нейтрон/гамма-дискриминации для детектора на основе гомогенного стекла представлены в Таблице 6.

Таблица 6. Гамма – чувствительность детектора при различных значениях электронной эффективности к нейтронам. Гомогенный сцинтиллятор.

Электронная эффективность к нейтронам	97%	~50%
Регистрация на постоянном пороге	$1,4 \cdot 10^{-4}$	$2,4 \cdot 10^{-5}$
Селекция по длительности	0,9	0,18
Селекция по форме импульса	0,94	0,3

Из Таблицы 6 видно, что регистрация на постоянном пороге является лучшим методом для сцинтиллятора данного типа.

При исследовании гетерогенного сцинтиллятора использовался только метод селекции на постоянном пороге. Здесь электронная эффективность детектора при концентрации стекла 25% также составляла ~98%, а полная эффективность по отношению к монолитному стеклу равна 0,53. При этом величина  $\gamma$ -чувствительности оказалась равной  $k = 1,6 \cdot 10^{-6}$ . Потеря эффективности к нейтронам в этом случае есть следствие уменьшения в 4 раза объема стекла в сцинтилляторе. Компенсировать такую потерю можно увеличением толщины сцинтиллятора. Таким образом, можно заключить, что при разработке специализированных детекторов нейтронов на гетерогенном сцинтилляторе можно добиться качества  $n/\gamma$  - разделения сигналов выше, чем с монолитным стеклом. При этом можно снизить требования к детекторной электронике, что может быть важно для экспериментов, где присутствует большое количество каналов регистрации нейтронов.

**В заключении** перечислены основные результаты работ, отраженных в диссертации:

1. Создан детектор для регистрации тепловых нейтронов на основе литиевого стекла NE 912. Проведены испытания на пучке тепловых нейтронов на 13 канале реактора ИБР-2М и источнике гамма-квантов  $^{60}\text{Co}$ .
2. Создана и верифицирована Монте-Карло модель этого детектора с использованием программного пакета Geant4. Смоделированные спектры от нейтронов и гамма-квантов хорошо согласуются с экспериментальными данными.
3. Используя модель и экспериментальные данные были определены характеристики сцинтиллятора: световыход при регистрации нейтронов, усредненный для продуктов реакции захвата нейтрона квенчинг-фактор, временные параметры высвечивания.

4. Создана Монте-Карло модель детектора тепловых нейтронов на основе гетерогенного сцинтиллятора с низкой гамма-чувствительностью. Сцинтиллятор представлял нейтральную матрицу, в которой размещены кубические гранулы литиевого стекла. В качестве материалов матрицы были рассмотрены: акриловая смолы, эпоксидная смола и силиконовый компаунд.
5. С помощью моделирования было показано, что оптимальные характеристики материала достигаются при размере гранул от 400 до 500 мкм и их концентрации порядка 35%. По сравнению с гомогенным стеклянным сцинтиллятором таких же размеров чувствительность к гамма-квантам гетерогенного сцинтиллятора может быть снижена на два порядка, до  $4 \cdot 10^{-7}$ , при этом эффективность регистрации нейтронов падает от 91 до 56%.
6. По результатам моделирования изготовлены образцы композитных сцинтилляторов. Размеры фрагментов литиевого стекла NE 912 находились в диапазоне  $0,35 \leq d \leq 0,5$  мм. Было создано 9 образцов с комбинациями трех концентраций (25, 30 и 35%) и трех оптических компаундов (силикон, эпоксидная и акриловая смолы).
7. Проведены испытания образцов в составе детектора на пучке тепловых нейтронов и с источником гамма-квантов  $^{60}\text{Co}$ . Были найдены значения эффективности регистрации тепловых нейтронов и гамма-чувствительности.
8. В данной работе было показано, что создание гетерогенной структуры сцинтиллятора и использование регистрация на постоянном пороге позволяет достигнуть лучшего уровня нейтрон/гамма дискриминации. Образец с матрицей из эпоксидной смолы и концентрацией литиевого стекла 25% эффективность регистрации принимает значение  $\sim 53\%$  и чувствительность к гамма-квантам  $9,2 \cdot 10^{-7}$ .

### **Основные публикации автора по теме диссертации:**

- 1) Монте-Карло модель сцинтилляционного детектора нейтронов на основе литиевого стекла / Е. С. Кузьмин [и др.] // Приборы и техника эксперимента – 2021. – № 2. – С. 25-31.
- 2) Кузьмин Е.С. Оптимизация структуры гетерогенного сцинтиллятора для регистрации тепловых нейтронов / Е.С. Кузьмин, И.Ю. Зимин // Приборы и техника эксперимента – 2021. – № 5. – С. 22-27.
- 3) Изготовление и характеристики композитных сцинтилляторов на основе литиевого стекла / Е. С. Кузьмин [и др.] // Приборы и техника эксперимента – 2022. – № 4. – С. 51-56.

### **Список литературы**

- 1) Loaiza D. J. High-efficiency  $^3\text{He}$  proportional counter for the detection of delayed neutrons // Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section – 1999. – Vol. A422. – P. 43-46.
- 2) Detector for the FSD Fourier-diffractometer Based on  $\text{ZnS}(\text{Ag})/{}^6\text{LiF}$  Scintillation Screen and Wavelength Shifting Fiber Readout / E.S. Kuzmin [et al.] // Journal of Neutron Research – 2002. – Vol. 10. – P. 31-41.
- 3) Digital signal processing for a thermal neutron detector using  $\text{ZnS}(\text{Ag})/{}^6\text{LiF}$  scintillating layers read out with WLS fibers and SiPMs / J.-B. Mosset [et al.] // Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section – 2016. – Vol. A824. – P. 319-321.
- 4) The BC-704 Scintillation Screen with Light Readout by Wavelength Shifting Fibers as a Highly Efficient Neutron Detector / J. Iwanowska [et al.] // IEEE Nuclear Science Symposium Conference Record – 2011. – P. 423-426.
- 5) Study of the thermal neutron detector  $\text{ZnS}(\text{Ag})/\text{LiF}$  response using digital pulse processing / F. Pino [et al.] // Journal of Instrumentation – 2015. – Vol. 10. – T08005.

- 6) A study of ZnS(Ag)/<sup>6</sup>LiF with different mass ratios / C. Wu [et al.] // Radiation Measurements – 2013. – Vol. 58. – P. 128-132.
- 7) Thermal neutron detection EJ-420: [Электронный ресурс] // Eljen Technology. <https://eljentechnology.com/products/neutron-detectors/ej-420> (Дата обращения 11.01.2024).
- 8) Thermal neutron detection EJ-426: [Электронный ресурс] // Eljen Technology. <https://eljentechnology.com/products/neutron-detectors/ej-426> (Дата обращения 11.01.2024).
- 9) Optical and scintillation properties of pure and Ce<sup>3+</sup>-doped Cs<sub>2</sub>LiYCl<sub>6</sub> and Li<sub>3</sub>YCl<sub>6</sub>:Ce<sup>3</sup> crystals / С.М., Combes [et al.] // Journal of Luminescence – 1999. – Vol. 82. – P. 299-305.
- 10) Spowart A. R. Neutron scintillating glasses: Part 1: Activation by external charged particles and thermal neutrons // Nuclear Instruments and Methods – 1976. – Vol. 135. – P. 441-453.
- 11) Strain imaging by Bragg edge neutron transmission / J.R. Santisteban [et al.] // Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section – 2002. – Vol. A481. – P. 765–768.
- 12) / J.R. Santisteban [et al.] // Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section – 2012. – Vol. A680. – P. 27–34.
- 13) Нейтронный Фурье-стресс-дифрактометр FSS на реакторе ИБР-2: результаты модернизации и перспективы дальнейшего развития / Г. Д. Бокучава [и др.] // Поверхность. Рентгеновские, синхротронные и нейтронные исследования – 2022 – № 5 – с. 3-13.
- 14) Монте-Карло модель сцинтилляционного детектора нейтронов на основе литиевого стекла / Е. С. Кузьмин [и др.] // Приборы и техника эксперимента – 2021. – № 2. – С. 25-31.
- 15) Кузьмин Е.С. Оптимизация структуры гетерогенного сцинтиллятора для регистрации тепловых нейтронов / Е.С. Кузьмин, И.Ю. Зимин // Приборы и техника эксперимента – 2021. – № 5. – С. 22-27.

- 16) Изготовление и характеристики композитных сцинтилляторов на основе литиевого стекла / Е. С. Кузьмин [и др.] // Приборы и техника эксперимента – 2022. – № 4. – С. 51-56.
- 17) Development and characterization of a neutron detector based on a lithium glass–polymer composite / M. Mayer [et al.] // Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section – 2015. – Vol. A785. – P. 117-122.
- 18) Neutron detector based on Particles of  ${}^6\text{Li}$  glass scintillator dispersed in organic lightguide matrix / K.D. Ianakiev [et al.] // Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section – 2015. – Vol. A784. – P. 189-193.
- 19) Knoll G. F. Radiation Detection and Measurement, 3th ed. / G. F. Knoll – New York: John Wiley & Sons 2000. – P. 230-231.
- 20) Jensen G. L. Gamma-ray sensitivity of  ${}^6\text{Li}$ -glass scintillators / G. L. Jensen, J. B. Czirr // Nuclear Instruments and Methods in Physics Research – 1983. – Vol. 205. – P. 461-463.
- 21) Alternatives to  ${}^3\text{He}$  for Neutron Detection for Homeland Security / R. T. Kouzes [et al.] // Technical Report No. PNNL-18471. – Richland: PNNL, 2009.
- 22) New idea of a small-sized neutron detector with a plastic fibre / T. Matsumoto [et al.] // Radiation Protection Dosimetry – 2011. – Vol. 146. – P. 92–95.
- 23) Gardiner S. J. Neutron Detection Using Shards Of  ${}^6\text{Li}$  Glass Scintillator: Bachelor of Science, BUY, Provo, 2012, p. 8-13.
- 24) Absolute calibration and monitoring of a spectrometric channel using a photomultiplier / E.H. Bellamy [et al.] // Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section – 1994. – Vol. A339. – P. 468-476.
- 25) Test of long scintillation counters for supercollider detectors / E.H. Bellamy [et al.] // Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section – 1994. – Vol. A334. – P. 484-488.

- 26) Чириков-Зорин И.Е. Развитие методики сцинтилляционных и газоразрядных трековых детекторов для физики высоких энергий: дис. ... канд. физ.-мат. наук. ОИЯИ. Дубна, 2014.
- 27) FSS-a novel RTOF-diffractometer optimized for residual stress investigations / J.Schroder [et al.] // Journal of Neutron Research – 1994 – Vol. 2. – № 4. – P. 129-141.
- 28) Нейтронный фурье-стресс-дифрактометр FSS на реакторе ИБР-2: результаты модернизации и перспективы дальнейшего развития / Г.Д. Бокучава [и др.] // Приборы и техника эксперимента – 2022. – № 5. – С. 3-13.
- 29) Fairley E.J. Neutron scintillating glasses part III pulse decay time measurements at room temperature / Fairley E.J., Spowart A.R. // Nuclear Instruments and Methods – 1978. – Vol. 150. – P.159-163.
- 30) Pulse shape analysis of liquid scintillators for neutron studies / S. Marrone [et al.] // Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section – 2002. – Vol. A490. – P. 299-307.
- 31) Geant4 – a simulation toolkit / S. Agostinelli [et al.] // Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section – 2003. – Vol. A506. – P. 250-303.
- 32) Geant4 developments and applications / J. Allison [et al.] // IEEE Transactions on Nuclear Science – 2006. – Vol. 53. – P. 270-278.
- 33) Recent developments in Geant4 / J. Allison [et al.] // Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section – 2016. – Vol. A835. – P. 186-225.
- 34) Fabrication and characterization of a lithium-glass-based composite neutron detector / G.C. Rich [et al.] // Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section – 2015. – Vol. A794. – P. 15-25.
- 35) Development and characterization of a neutron detector based on a lithium glass-polymer composite / M. Mayer [et al.] // Nuclear Instruments

- and Methods in Physics Research Section – 2015. – Vol. A785. – P. 117-122.
- 36) Geometric optimization of a neutron detector based on a lithium glass–polymer composite / M. Mayer [et al.] // Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section – 2015. – Vol. A784. – P. 168-171.
- 37) Study of neutron response and n– $\gamma$  discrimination by charge comparison method for small liquid scintillation detector / J. Cerny [et al.] // Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section – 2004. – Vol. 527. – P. 512-518.
- 38) Wang, C. L. Improved neutron-gamma discrimination for a  $^6\text{Li}$ -glass neutron detector using digital signal analysis methods / C. L. Wang, R. A. Riedel // Review of Scientific Instruments – 2016. – Vol. 87. – P. 013301.