

Министерство науки и высшего образования Российской Федерации
ФЕДЕРАЛЬНОЕ ГОСУДАРСТВЕННОЕ БЮДЖЕТНОЕ УЧРЕЖДЕНИЕ НАУКИ
ИНСТИТУТ ЯДЕРНЫХ ИССЛЕДОВАНИЙ РОССИЙСКОЙ АКАДЕМИИ НАУК
(ИЯИ РАН)

УДК 539.1, 539.12, 539.14, 539.17
Per. № 125071608536-6
Per. №



УТВЕРЖДАЮ

И.о. директора ИЯИ РАН,
чл.-кор. РАН

М.В. Либанов

«30» декабря 2025 г.

ОТЧЕТ
О НАУЧНО-ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКОЙ РАБОТЕ

ИССЛЕДОВАНИЯ КОНДЕНСИРОВАННЫХ СРЕД И ЯДЕРНО-ФИЗИЧЕСКИХ
ПРОЦЕССОВ НА НЕЙТРОННЫХ ИСТОЧНИКАХ
(промежуточный за 2025, этап 1)

ФЦП

Руководитель НИР,
гл. науч. сотр.,
д-р. физ.-мат. наук

30.12.2025 Э.А. Коптелов

подпись, дата

Москва 2025

СПИСОК ИСПОЛНИТЕЛЕЙ

Руководитель НИР,
гл. науч. сотр.,
д-р физ.-мат. наук



« 30 » декабря 2025 г
подпись, дата

Э.А. Коптелов
(введение, разделы 1-4, заключение)

Исполнители:
Вед. науч. сотр.,
канд. физ.-мат. наук



« 30 » декабря 2025 г

Р.А. Садыков
(раздел 1,2)

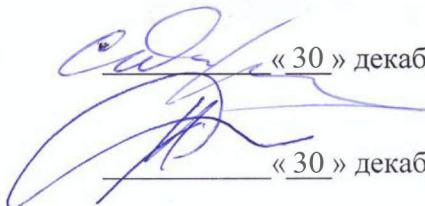
Вед. науч. сотр.,
канд. физ.-мат. наук



« 30 » декабря 2025 г

С.Ф. Сидоркин
(раздел 3,4)

Вед. науч. сотр.,
д-р. физ.-мат. наук



« 30 » декабря 2025 г

Р.М. Джилкибаев

(раздел 4)

Ст. науч. сотр.,
канд. физ.-мат. наук



« 30 » декабря 2025 г

А.А. Семенов
(общая редакция)

Нормоконтроль



« 30 » декабря 2025 г

О.Н. Либанова

РЕФЕРАТ

Отчет 66 с., 1 кн., 34 рис., 51 источн., 1 прил.

НЕЙТРОНОГРАФИЧЕСКИЕ, ЯГР И РЕНТГЕНОВСКИЕ ИССЛЕДОВАНИЯ, КОНДЕНСИРОВАННЫХ СРЕД, МОДЕЛИРОВАНИЕ УСТАНОВОК, НЕЙТРОННЫЙ СЦИНТИЛЛЯЦИОННЫЙ ДЕТЕКТОР, МЕТОД МОНТЕ-КАРЛО, АВТОМАТИЗАЦИЯ ЭКСПЕРИМЕНТОВ, АДДИТИВНЫЕ ТЕХНОЛОГИИ, ДЕТЕКТОРЫ НЕЙТРОНОВ, ВКЛЮЧАЯ ПОЗИЦИОННО-ЧУВСТВИТЕЛЬНЫЕ, ИМПУЛЬСНЫЕ ИСТОЧНИКИ НЕЙТРОНОВ, НЕЙТРОНОВОД, ФАЗОВЫЕ ПЕРЕХОДЫ

В отчёте представлены результаты фундаментальных и прикладных работ, проведённых по Государственному заданию в соответствии с планом научных исследований ИЯИ РАН на 2025 год.

Работы выполнялись по программе фундаментальных научных исследований в Российской Федерации на долгосрочный период, (2021 - 2030 годы), подпрограмма 2 "Фундаментальные и поисковые научные исследования". Область научных знаний:

1. Естественные науки. 1.3. Физические науки. 1.3.2. Физика конденсированных сред и физическое материаловедение. 1.3.3. Ядерная физика и физика элементарных частиц.

Представленный отчет отражает основные результаты, полученные сотрудниками Института в 2025 году по теме «Исследования конденсированных сред и ядерно-физических процессов на нейтронных источниках».

Основные усилия были направлены на развитие исследований на основе нейтронных источников ускорительного типа; совершенствование методов исследования конденсированных сред при комплексном воздействии на материалы разных физических условий экспериментов; развитие методов регистрации нейтронов и заряженных частиц, в том числе на импульсных источниках нейтронов ИЯИ РАН с протонным драйвером: ИН-06, РАДЭКС, СВЗ-100. Проводилось математическое моделирование взаимодействия частиц с веществом, включая ядерные реакции; были получены новые данные о нейтрон-ядерных взаимодействиях, развивались нейтронные и комплементарные методы экспериментальных исследований структуры и свойств конденсированных сред.

Перечисленный комплекс работ предполагает дальнейшее развитие.

СОДЕРЖАНИЕ

СПИСОК ИСПОЛНИТЕЛЕЙ.....	2
РЕФЕРАТ	3
СОДЕРЖАНИЕ.....	4
ВВЕДЕНИЕ.....	6
1. Развитие экспериментальной базы импульсного нейтронного источника ИН-06 ИЯИ РАН для исследования конденсированных сред	10
1.1. Разработка программного обеспечения для системы накопления данных	10
1.2. Разработка оптимального нейтроновода для установки МНС на II канале источника ИН-06	11
1.3. Развитие технологии изготовления сцинтилляционных детекторов	14
1.3.1. Разработка высокоэффективного многослойного сцинтилляционного детектора нейтронов	15
1.4. Способ повышения эффективности сцинтилляционных детекторов	17
1.4.1. Стенд для тестов сцинтилляционных детекторов	19
2. Исследования структур перспективных материалов, в том числе при экстремальных нагрузках (высоких давлениях, низких температурах, сильных магнитных полях).....	21
2.1. Антиферромагнитное упорядочение спиновой плотности на диамагнитных атомах Sn, перенесенных из Gd в сплав $GdCuSn_{0.85}Ge_{0.15}$	22
2.2. Разработка программного обеспечения для автоматизации исследований кристаллической структуры, электронных и магнитных свойств веществ	23
2.2.1. Программное обеспечение для пакетной обработки осциллограмм сцинтилляционного детектора нейтронов “Peak analyses”	24
2.2.2. Разработка программного обеспечения для проведения измерений сопротивления диэлектриков при криогенных температурах в камерах высокого давления “Dielectric measure”	25
2.3. Исследования в области сцинтилляционных детекторов, включая исследования материалов, возможных для использования при создании детекторов, тестирования различных вариантов сцинтилляционных детекторов и оптимизации их параметров	26
2.3.1. Программа расчёта эффективности и моделирования оптических параметров сцинтилляционных детекторов нейтронов с пластиковым световодом “SC_PMMA_Model”	27
2.4. Исследование особенностей фононных спектров в водородосодержащих материалах	27
2.5. Радиационное материаловедение	27
3. Поддержание и развитие нейтронных источников (ИН-06, РАДЭКС, СВЗ-100) и разработка новых	30
3.1. Проблема создания компактного импульсного источника нейтронов	30

3.2. Поддержка и совершенствование программного обеспечения для моделирования параметров нейтронных источников, расчетные работы по моделированию процессов	31
3.2.1. Моделирование компактного источника нейтронов для протонных ускорителей.....	32
4. Исследования по физике деления и нейтрон – ядерных взаимодействий.....	37
4.1. Времяпролетный спектрометр установки ИНЕС	37
4.1.1. Система сбора и обработки данных установки	38
4.1.2. Калибровочные измерения потока нейтронов, попадающих в образец	38
4.2. Использование регуляризирующей процедуры для обработки спектров нейтронных реакций, полученных методом СВЗ, с целью получения более точных сведений о характеристиках атомных	42
4.2.1 Преодоление недостатка метода СВЗ (слабое энергетическое разрешение) путём использования Ф.О. спектрометра и компьютерных технологий. Метод итераций для решения некорректных задач	43
4.2.2 Решение задачи восстановления спектров.....	43
4.2.3 Формирование функции отклика спектрометра СВЗ-100	46
4.3. Создание комплекса программ на основе ранее развитой в ИЯИ РАН модели SMM (статистическая модель мультифрагментации) для расчета образования ядерных фрагментов в реакциях инициированных лептонами, адронами, и ядрами средних и высоких энергий.....	47
4.4. Развитие новых методов ядерно-физических исследований (совместно с ОИЯИ).....	47
4.4.1. Исследование низколежащих р-волновых нейтронных резонансов	48
4.4.2. Разработка методики измерения и обработки времяпролетных и амплитудных спектров гамма квантов в р-волновых резонансах	50
ЗАКЛЮЧЕНИЕ.....	53
СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ.....	57
ПРИЛОЖЕНИЕ А Список публикаций исполнителей отчета за 2025 г.	63

ВВЕДЕНИЕ

1. Задача «Развитие экспериментальной базы импульсного нейтронного источника ИН-06 ИЯИ РАН для исследования конденсированных сред»

Проект направлен на развитие экспериментальной базы импульсного нейтронного источника ИН-06, позволяющее расширить спектр исследований, возможных к реализации на спектрометрах источника ИН-06 ИЯИ РАН, и создающее перспективы для исследований, имеющих потенциальное применение в материаловедении, энергетике, обработке материалов и других отраслях. В отчетном году выполнен ряд работ для реализации поставленной цели.

В ходе исследования структур конденсированных сред с использованием рассеяния нейтронов в изучаемых образцах происходит накопление большого массива экспериментальных данных. Для повышения информативности измерений и ускорения обработки результатов необходима современная система накопления и обработки информации. Одновременно, предъявляются всё возрастающие требования к качеству и эффективности работы регистрирующих детекторов.

Рассмотрена возможность повышения интенсивности нейтронного пучка на образце Многофункционального нейтронного спектрометра (МНС). Цель работы – разработка оптимального нейтроновода на втором канале источника ИН-06.

Продолжается комплекс работ по созданию высокоэффективных сцинтилляционных детекторов нейтронов, принципы действия которых подтверждены патентами. На основе метода Монте-Карло проведено моделирование улучшенного нейтронного дифрактометра на источнике эпитепловых нейтронов «РАДЭКС».

2. Задача «Исследования структур перспективных материалов, в том числе при экстремальных нагрузках (высоких давлениях, низких температурах, сильных магнитных полях)»

Цель – экспериментальные исследования новых перспективных материалов на нейтронных дифрактометрах и на рентгеновских лабораторных установках Института, а также теоретические исследования структуры и свойств веществ, получаемых в экстремальных условиях – при высоких температурах и давлениях.

В задачу также входит разработка камер высокого давления с алмазными наковальнями для проведения исследований в экстремальных условиях высоких давлений, высоких и низких температур, сильных магнитных полей на синхротронных и нейтронных источниках коллективного пользования и на ядерно-физических и рентгеновских

лабораторных установках, экспериментальные исследования свойств веществ и синтез новых материалов при высоких и сверхвысоких давлениях.

Проект направлен на разработку программного обеспечения для автоматизации измерений и обработки больших объёмов данных, получаемых с различных детекторов нейтронного излучения

В рамках данной работы проводятся исследования, включая моделирование методом Монте-Карло, направленные на оптимизацию геометрических параметров и выбора материалов при проектировании сцинтилляционных детекторов нейтронов. Применение численного моделирования позволяет существенно сократить время разработки и обеспечить количественную оценку характеристик исследуемых материалов.

Приведены данные структурных исследований сплава $\text{GdCuSn}_{0.85}\text{Ge}_{0.15}$ и водородосодержащих материалов.

Продолжена работа по исследованию кинетики радиационного повреждения металлов в условиях нейтронного облучения. Материалы с высокой плотностью нейтральных стоков точечных дефектов способны обеспечить долгосрочную стабильность эволюции микроструктуры металлов при радиационном повреждении. Границы зерен традиционно считаются эффективными нейтральными стоками для точечных дефектов, генерируемых облучением. Исследован не получивший ранее рассмотрения механизм усиления вакансионного распухания в областях, прилегающих к границам зерен.

3. Задача «Поддержание и развитие нейтронных источников (ИН-06, РАДЭКС, СВЗ-100) и разработка новых»

Объектами исследования являются импульсные источники нейтронов на основе сильноточных протонных ускорителей и инфраструктура нейтронного комплекса

Цели проекта:

- оценка возможностей развития нейтронных исследований в перспективе за счет использования компактного источника тепловых и холодных нейтронов.

Продолжены работы по определению и уточнению основных характеристик прототипа компактного импульсного источника тепловых и холодных нейтронов с большим сроком службы.

- обеспечение эффективности синхронной работы ускорителя, систем мишенных узлов нейтронных источников, а также исследовательских установок. Совершенствование систем контроля и диагностики Нейтронного комплекса. Продолжены работы по созданию и совершенствованию системы контроля и визуализации процессов в системе охлаждения нейтронного комплекса ИЯИ РАН и его инфраструктуры.

- моделирование компактного относительно недорогого источника нейтронов для прикладных целей (совместно с ФИАН).

Полученные данные позволили оптимизировать рассмотренную конструкцию замедлителя и мишени.

4. Задача «Исследования по физике деления и нейтрон – ядерных взаимодействий»

- Модернизация элементов установки ИНЕС по измерению полных и парциальных (n , γ) нейтронных сечений в области ядерных реакторов и ядерной астрофизики позволит повысить точность измерений параметров известных резонансов, провести измерение спорных резонансов и обнаружить новые резонансы.

Установка ИНЕС использует времяпролетную (TOF) методику для измерения сечений и состоит из сцинтилляционного γ -детектора (8 секций), мониторинговых (4 счетчика) и пучковых (4 счетчика) нейтронных ^3He счетчиков.

В 2025 г. проводились работы по созданию пакета программ для реконструкции сечений радиационного захвата нейтронов ядром. Проводились работы по модернизации системы сбора и обработки данных. Измерен энергетический спектр импульсного источника нейтронов РАДЭКС и проведено сравнение с результатами моделирования. Разработан черенковский монитор протонного пучка. Описана процедура определения формы импульса нейтронов от времени на базе измеренной формы импульса протонного пучка, с учетом замедления нейтронов в мишени. Проведено измерение спектра нейтронов на импульсном источнике нейтронов РАДЭКС центра коллективного пользования (ЦКП) ИЯИ РАН с образцом золота ^{197}Au . Разработана процедура определения зависимости фона от времени.

- Обработка аппаратурных спектров нейтронных реакций, зарегистрированных на нейтронном спектрометре по времени замедления в свинце (СВЗ-100) с целью получения лучшего энергетического разрешения.

Разработан программный комплекс, позволяющий путём большого количества приближающих итераций добиться получения энергетических спектров с лучшим разрешением чем аппаратурные спектры, полученные в эксперименте.

- Создание комплекса программ на основе ранее развитой в ИЯИ РАН модели SMM (статистическая модель мультифрагментации) для расчета образования ядерных фрагментов в реакциях инициированных лептонами, адронами и ядрами средних и высоких энергий.

Работа направлена на анализ выполненных и планируемых в ОИЯИ экспериментов для изучения распада горячей расширяющейся ядерной материи.

- Развитие новых методов ядерно-физических исследований (совместно с ОИЯИ).

1. Развитие экспериментальной базы импульсного нейтронного источника ИН-06 ИЯИ РАН для исследования конденсированных сред

Одной из целей данного проекта является разработка оборудования для сбора данных при проведении измерений на нейтронном пучке методом времени пролета (Time-of-Flight, ToF). Основным оборудованием, используемым в измерениях, является время-цифровой преобразователь (ВЦП, англ. TDC). Сложность проектирования такого оборудования заключается в необходимости накопления временных гистограмм, синхронизированных с моментом генерации нейтронов. Для этой цели применяется аппаратная реализация накопления гистограмм на базе ПЛИС, которая позволяет точно регистрировать множество независимых каналов и строить времяпролетный нейтронный спектр.

Существующее коммерческое оборудование, например, от компании CAEN, используется преимущественно в физике высоких энергий, где требуется разрешение во временных гистограммах на уровне пикосекунд [1]. В случае ToF-экспериментов временные интервалы между рождениями и регистрацией нейтронов лежат в диапазоне микросекунд, что существенно упрощает проектирование оборудования. Это позволяет использовать более дешёвые ПЛИС и снижает требования к программному обеспечению системы накопления данных. Таким образом, разработка собственного устройства на FPGA может существенно уменьшить стоимость установки и оптимизировать её под характеристики конкретного импульсного источника нейтронов, в частности ИН-06. Также это позволяет оптимизировать систему измерения под конкретный детектор и интегрировать дополнительный функционал (например, управление порогами детектора).

1.1. Разработка программного обеспечения для системы накопления данных

В рамках этой задачи было разработано программное обеспечение для ПЛИС, которое реализует накопления гистограмм при проведении экспериментов на источнике ИН-06. Исходный код оптимизирован для автоматической генерации любого количества измерительных каналов. Память гистограмм реализована на внутренней памяти типа BRAM. Частота записи в память равна четырехкратной частоте работе процессора, что позволяет снизить время на запись данных в память и уменьшить мертвое время. Для подключения к ПК реализован UART интерфейс и при использовании USB-UART преобразователя скорость может достигать до 12 Мбит. Максимальная загрузка составляет 10^6 событий в секунду. В программе реализовано управление задержкой синхроимпульса (от 100 нс до 8 мкс) и шириной канала (от 100 нс до 32 мкс). В программе реализована

возможность подключения мониторных детекторов, а также интерфейс SPI, по которому возможно отправлять команды на внешние устройства, что позволяет одним устройством управлять порогами предусилителей детекторов либо любым другим исполнительным устройством. Программа написана на языке Verilog и поддерживает семейства ПЛИС фирмы Xilinx. На код программы получено свидетельство о регистрации программы [2].

1.2. Разработка оптимального нейтроновода для установки МНС на II канале источника ИН-06

Установка МНС (многофункциональный нейтронный спектрометр) на II-канале источника ИН-06 была спроектирована более 30 лет назад [3] исходя из технических и финансовых возможностей того периода. За это время получили развитие зеркальные нейтроноводы, повысились требования к нейтронографическим установкам касательно плотности потока нейтронов. Также серьезное развитие получили методы Монте-Карло моделирования, позволяющие улучшить характеристики установки (интенсивность, разрешающая способность) путем оптимизации. При проектировании данной установки Монте-Карло моделирование не применялось.

Идея установки заключается в объединении на одном пучке нейтронов спектрометров неупругого и упругого рассеяния, включая дифрактометр малоуглового рассеяния, для одновременного определения динамических и структурных параметров исследуемых материалов. В настоящее время в составе многофункционального нейтронного спектрометра действуют два блока обратного рассеяния нейтронов. Каждый блок, предназначенный для порошковой дифрактометрии, содержит пакет пропорциональных счетчиков нейтронов СНМ-18 на основе ^3He , сфокусированных по времени пролета и расположенных в геометрии обратного рассеяния под углами $2\theta = 156^\circ - 165^\circ$. Актуальная схема установки МНС [1] приведена на рисунке 1.1. В установке используется нейтроновод длиной 12 м с зеркальным каналом внутренним сечением 60×110 мм, изготовленным из полированной нержавеющей стали с $m=0,85$. Кожух нейтроновода вакуумируется. Расстояние от источника до входа в нейтроновод составляет 8 м, причем без вакуума. Приблизив нейтроновод к источнику можно повысить интенсивность нейтронного пучка на образце и минимизировать рассеяние и поглощение нейтронов воздухом. Моделирование было проведено с помощью пакета VITESS 3.4 [4], предназначенного для моделирования нейтронографических установок. Были рассмотрены 4 варианта нейтроновода:

- 1) существующий, с расстоянием от источника до входа 8 м,
- 2) тот же нейтроновод на 3,5 м ближе к источнику,

- 3) нейтроновод с покрытием из никеля ($m = 1$) на расстоянии 4,5 м от источника,
- 4) нейтроновод с суперзеркальным каналом ($m = 2$) на расстоянии 4,5 м от источника.

Приближение нейтроновода на 3,5 м было выбрано, поскольку это расстояние минимальное, при котором может функционировать шибер (на рисунке 1.1 не показан).

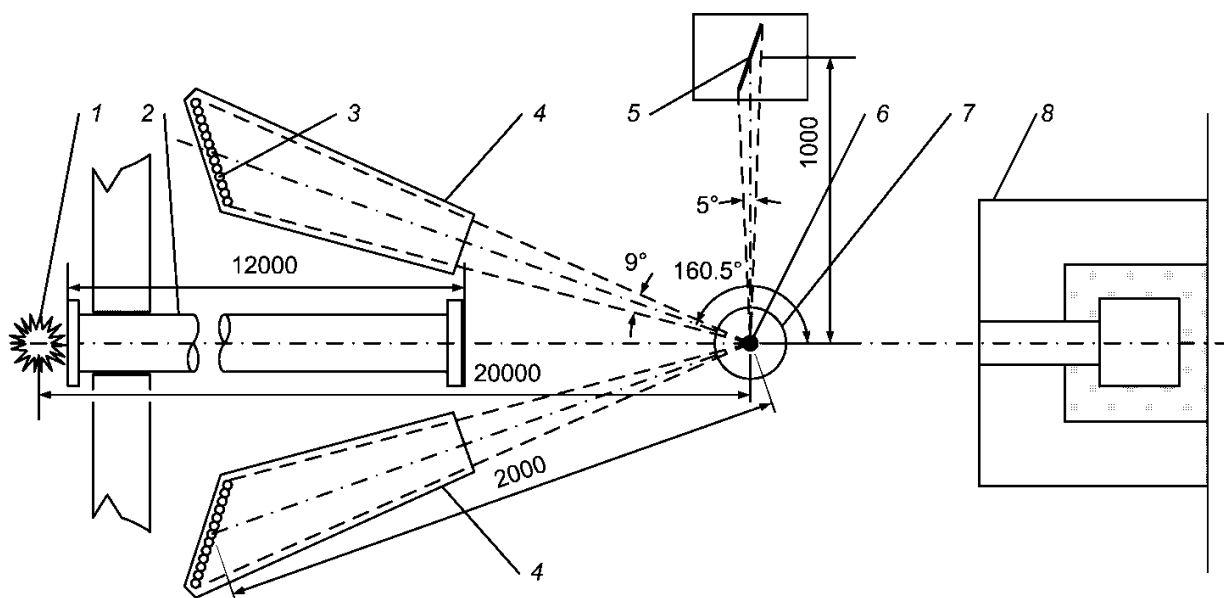


Рисунок 1.1 – Схема установки МНС: 1 – источник нейтронов, 2 – нейтроновод, 3 – ^3He -детекторы, 4 – корпус блока обратного рассеяния; 5 – пластина детекторов на основе ZnS(Ag)/LiF , сфокусированных по времени пролета, 6 – образец, 7 – стол образца, 8 – ловушка пучка

Полученные спектры нейтронов, нормированные на спектры пучка в позиции образца без нейтроновода (коэффициенты усиления) приводятся на рисунке 1.2. Видно, что вариант 2 дает существенный выигрыш в интенсивности (более 15 %) только для холодных нейтронов (с длиной волны λ больше 4А). Вариант 3 дает выигрыш уже 40 % при $\lambda > 4\text{А}$, а вариант 4 – в 3 раза уже при $\lambda > 2\text{А}$. Кроме того, в приведенных оценках не учитывался выигрыш за счет уменьшения потерь нейтронов на воздухе, который при уменьшении пробега в воздухе на 3,5 м составляет не менее 15%.

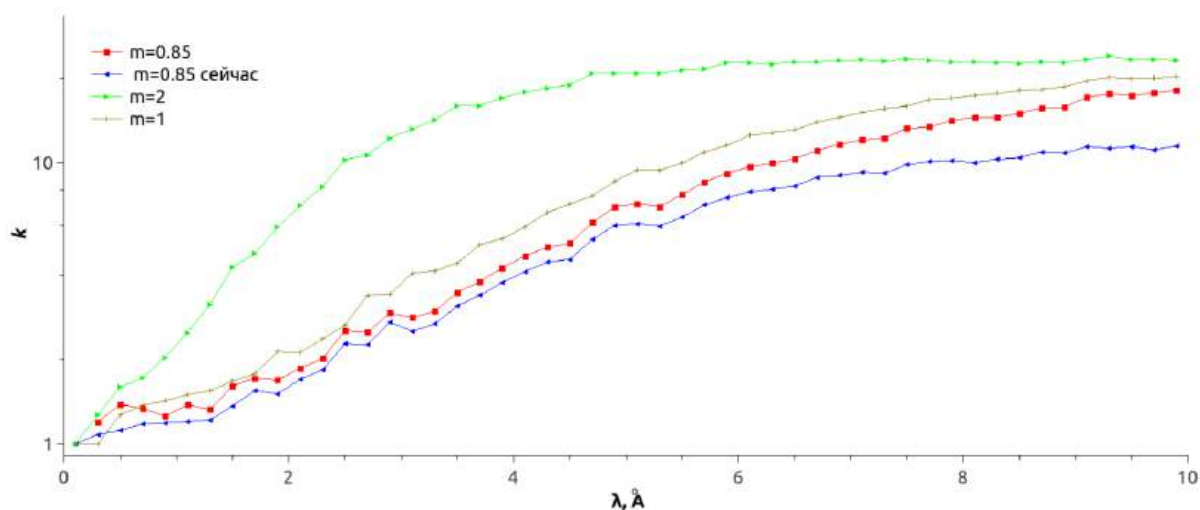


Рисунок 1.2 – Коэффициенты усиления потока нейтронов для различных вариантов нейтроновода: синий – существующий вариант, красный – тот же нейтроновод на 3,5 м ближе к источнику, коричневый – нейтроновод с $m = 1$, зеленый – с $m = 2$

Кроме того в данной модели был рассмотрен возможный выигрыш от удаления коллиматора длиной 1,5 м с окном 100×150 мм, расположенного сразу на выходе из источника (на рисунке 1.1 не показан). Графики для 4-го варианта приводятся на рисунке 1.3.

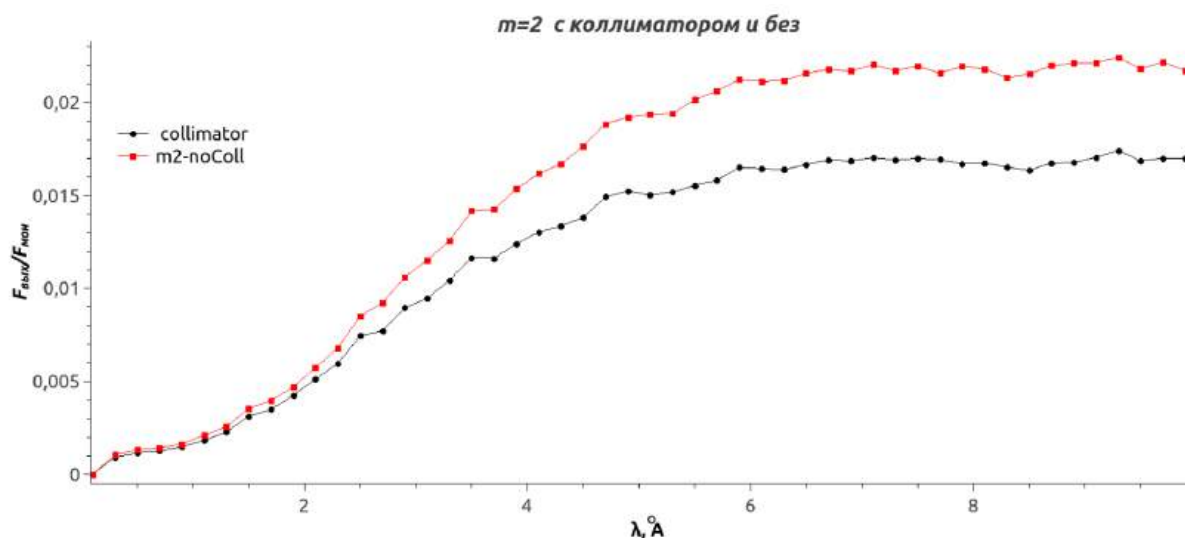


Рисунок 1.3 – Влияние коллиматора на коэффициенты усиления нейтроновода с $m = 2$: черный – с коллиматорами, красный – без коллиматоров. Интенсивность указана относительно монитора перед коллиматором

Выигрыш от удаления коллиматора даже при использовании нейтроновода с $m = 2$ (вариант 4) не превышает 25% даже для холодных нейтронов с $\lambda > 6$ Å. Следует заметить, что удаление коллиматора неизбежно приведет к повышению фона в области образца и детектора. Поэтому, исходя из полученных оценок удаления коллиматора нерационально.

1.3. Развитие технологии изготовления сцинтилляционных детекторов

Развитие технологий изготовления сцинтилляционных детекторов является ключевым направлением в области регистрации и спектрометрии нейтронного излучения. Современные требования к нейтронным экспериментам, включая исследования в ядерной физике, материаловедении, радиационной медицине и нейтронно-транспортных установках, предъявляют всё более высокие требования к чувствительности, стабильности, компактности и стоимости детекторных систем. Сцинтилляционные материалы, в частности сцинтиллятор $\text{ZnS(Ag):}^6\text{LiF}$ [5], прочно занимают лидирующие позиции в задачах регистрации тепловых нейтронов.

В последние годы кремниевые фотоумножители (SiPM) стали важной альтернативой традиционным вакуумным фотоумножителям (ФЭУ) [6]. SiPM-структуры обладают рядом преимуществ: компактность, низкое рабочее напряжение, нечувствительность к магнитным полям, высокая механическая стойкость, возможность интеграции в массовые детекторные массивы и низкое энергопотребление. Эти свойства делают их особенно перспективными для создания масштабируемых модульных детекторных систем и оборудования, работающего в условиях ограниченного пространства или в портативном формате. Тем не менее, интеграция SiPM со сцинтилляторами требует решения ряда задач, таких как оптимизация оптического контакта, минимизация потерь света, подавление шумов темновых токов, выбор подходящей геометрии и конструкции световода.

Целью данного проекта является совершенствование методов разработки и изготовления сцинтилляционных детекторов нейтронов, направленное на улучшение ключевых параметров – прежде всего эффективности регистрации тепловых нейтронов, стабильности работы и повторяемости параметров при массовом производстве. Важной задачей является также снижение стоимости производства детекторных модулей, что позволит существенно расширить объём детекторных массивов на исследовательских установках без значительного роста бюджета. Это становится особенно актуальным в условиях модернизации источников нейтронов и увеличения числа научных задач, требующих многоканальных детекторных систем высокой эффективности.

В рамках проекта рассматриваются такие направления, как разработка новых методов формирования световодов, оптимизация оптических свойств детекторного модуля, а также исследования способа повышения эффективности подобных типов детекторов. Особое внимание уделяется поиску технологических решений, позволяющих минимизировать потери светового сигнала и повысить однородность распределения светового потока на поверхности чувствительного элемента SiPM.

1.3.1. Разработка высокоэффективного многослойного сцинтилляционного детектора нейтронов

Развитие современных сцинтилляционных детекторов тесно связано с совершенствованием оптических элементов, обеспечивающих эффективный сбор и транспортировку сцинтилляционного излучения. Одним из ключевых компонентов таких систем являются световоды, назначение которых состоит в минимизации потерь фотонов и формировании оптимального светового сигнала на фотоприёмнике. Традиционные технологии изготовления световодов обладают рядом ограничений. К ним относятся сложность получения элементов нетипичной формы, высокая трудоёмкость постобработки и ограниченные возможности по интеграции световодов со сложными геометриями сцинтилляторов.

В последние годы значительный интерес привлекают аддитивные технологии, открывающие новые перспективы в производстве оптики для детекторных систем. Метод аддитивной печати позволяет формировать световоды сложной трёхмерной конфигурации непосредственно по цифровой модели, обеспечивая высокую воспроизводимость, гибкость в проектировании и уменьшение количества технологических стадий. Кроме того, 3D-печать предоставляет возможность локального варьирования оптических свойств материала, оптимизации формы канала светопередачи и интеграции световодов с корпусными и функциональными элементами сцинтилляционного детектора.

Использование аддитивных методов в изготовлении световодов является особенно актуальным для компактных и специализированных детекторных систем, применяемых в радиационном мониторинге, нейтронографии и медицинской визуализации. Исследования показывают, что современные фотополимерные и композитные материалы, совместимые с технологиями стереолитографии (SLA), цифровой световой проекции (DLP) и двухфотонной литографии (2PP), обладают достаточной прозрачностью и низким светорассеянием в видимом диапазоне для использования в качестве элементов светосбора.

Таким образом, аддитивная печать представляет собой перспективное направление для разработки световодов сцинтилляционных детекторов, объединяя технологическую гибкость, экономичность и возможность создания элементов сложной формы.

В рамках работы проведена разработка высокоэффективного детектора тепловых нейтронов на основе световода, изготовленного методом SLA, и сцинтиллятора на основе $\text{ZnS(Ag):}^6\text{LiF}$ (толщина 0,45 мм). Схема размещения сцинтиллятора в детекторе представлена на рисунке 1.4

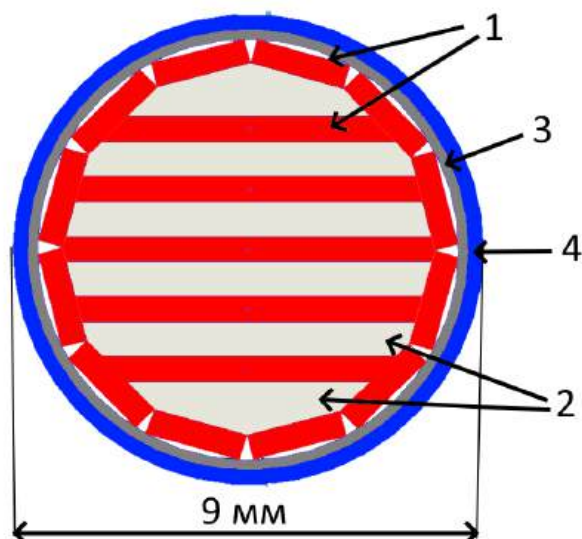


Рисунок 1.4 – Схема размещения сцинтиллятора в объёме и на поверхности световода: 1 – пластины сцинтиллятора, 2 – световод, 3 – диффузно-отражающее покрытие, 4 – светоотражающее покрытие

На рисунке 1.5 представлена разработанная модель световода. В качестве материала световода используется смола Anycubic High Clear UV Resin. Для съема фотонов используется два кремниевых фотоумножителя NDL EQR1511-3030D-S.

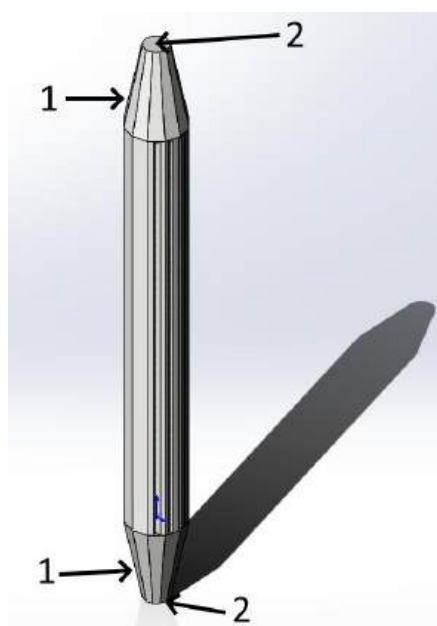


Рисунок 1.5 – Модель световода: 1 – фокусирующая призма, 2 – место размещения световода

Печать модели проводилась на принтере Elegoo Saturn 4 Ultra 16K. Разрешение принтера составляет 14×19 мкм что позволяет с достаточно детализовкой произвести печать прорезей для размещения сцинтиллятора. После печати заготовки подвергались

мойке от остатков смолы и последующей полимеризации УФ излучением порядка 20 минут. После проводилось клейка пластин сцинтиллятора в объеме и на поверхности детектора, а также кремниевых фотоумножителей. Пластины фиксировались клеем EJ-510, который обладает близким коэффициентом преломления к материалу световода. Это позволяет создать однородную среду для транспортировки фотонов к кремниевым фотоумножителям. В двух световодах дополнительно размещали пластины сцинтиллятора на поверхности фокусирующей призмы для оценки влияние на общую эффективность полученного детектора. Детектор покрывался диффузно-отражающим покрытием на основе PTFE, в качестве светоотражающего покрытия использована алюминиевая фольга толщиной 50 мкм. На рисунке 1.6 слева представлен внешний вид световода непосредственно после печати. Справа – внешний вид собранных детекторов.



Рисунок 1.6 – Внешний вид световода и детектора, слева – заготовки сцинтиллятора, справа – собранный детектор нейтронов

По предварительной оценке, эффективность регистрации тепловых нейтронов разработанного детектора близка к 100%. На втором этапе работ планируется измерение параметров детектора и оптических параметров световода. Использование аддитивной печати для изготовления световода позволила создать достаточно сложную геометрию, что недоступна при использовании других методов изготовления. Это позволило снизить стоимость и сложность производства световода и улучшить параметры сцинтилляционных детекторов нейтронов.

1.4. Способ повышения эффективности сцинтилляционных детекторов

В проектируемых и уже сооруженных экспериментальных установках ИЯИ РАН для исследования вещества методами нейтронографии используются разработанные ранее в ИЯИ РАН линейные счетчики нейтронов [7] на основе сцинтилляторов и $\text{ZnS(Ag)}^6\text{LiF}$ и световодов из органического стекла (ПММА). В рамках работы был разработан метод увеличения эффективности сцинтилляционных детекторов. Метод основан на размещении

пластины из пластика непосредственно после детектора. Суть метода основана на том, что нейтроны, проходящие объём детектора без взаимодействия с сцинтиллятором, при попадании в объём отражающей пластины могут испытать дополнительное рассеивание и вернуться в объём детектора. Таким образом можно повысить эффективность регистрации нейтронов. Для подтверждения теории проведено моделирование трассировки нейтронных траекторий методами Монте-Карло. Целью моделирования являлась оценка вклада пластины-отражателя в эффективность регистрации тепловых нейтронов. Были рассмотрены 2-х и 3-х слойные варианты конструкций детектора. Схематическое изображение различных конфигураций счетчика приведено на рисунке 1.7.

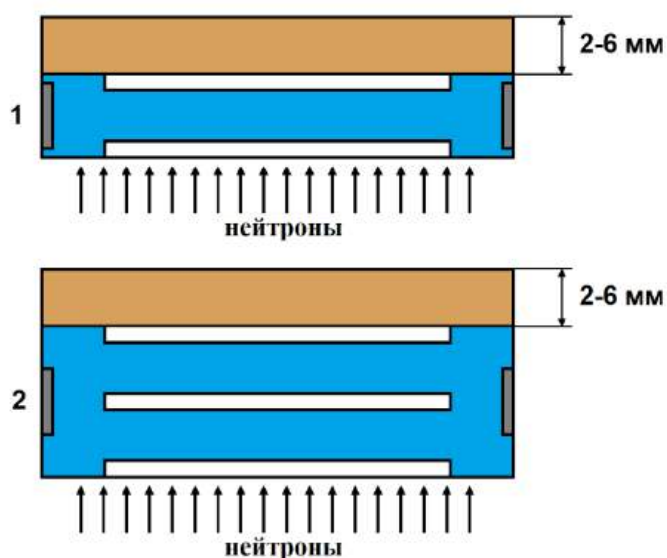


Рисунок 1.7 – Различные конфигурации линейных счетчиков нейтронов с дополнительной ПММА-пластиной в роли тылового отражателя нейтронов толщиной 2-6 мм: 1 – двухслойный счетчик с возможностью использования пластин оригинального сцинтиллятора (эффективность регистрации нейтронов одиночной пластиной 42%), либо его альтернативы с пониженной эффективностью (21%), например, трехслойный счетчик с пластинами пониженной эффективности 2

Предложена конфигурация счетчика с добавлением тыловой пластины-рассеивателя из ПММА. ПММА-пластина выступает в качестве дополнительного отражателя прошедших сквозь счетчик нейтронов обратно в слой сцинтиллятора, повышая тем самым эффективность регистрации нейтронов устройством без значительного увеличения стоимости его производства. В ходе численного анализа построена градация эффективности регистрации нейтронов в различных конфигурациях нейтронного счетчика, в зависимости от использованных сцинтилляторов, их количества и наличия тыловой пластины. Результаты моделирования приведены на рисунке 1.8.

При этом использовались два варианта $\text{ZnS(Ag)}/^6\text{LiF}$ пластин, различающихся по эффективности поглощения нейтронов, которая составляла 42% и 21% для потока нейтронов, перпендикулярного поверхности пластины. Толщина отражающей пластины варьировалась от 2 до 6 мм. Как показано на рисунке 1.8 толщина пластины более 2 мм не оказывает существенного влияния на эффективность счетчика. Дальнейшее увеличение толщины пластины ограничивается тем фактором, что она работает также как замедлитель быстрых нейтронов, что увеличивает чувствительность детектора к быстрым нейтронам. Для каждой отдельной конструкции счетчика добавление пластины-отражателя повышает эффективность на 7-12% относительно изначального значения для длины волны 1А. При этом разность в эффективности убывает с увеличением длины волны регистрируемых нейтронов, что соответствует повышению вероятности их поглощения сцинтилляторами и снижению нейтронного потока сквозь счетчик.

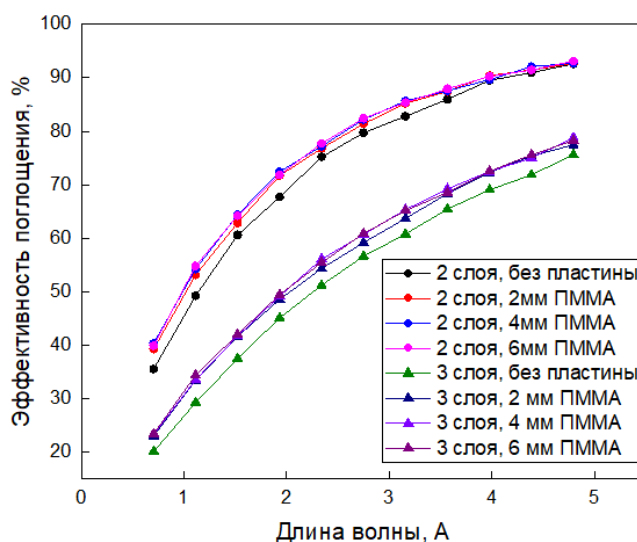


Рисунок 1.8 – График зависимости эффективности от количества слоев сцинтиллятора и толщины пластины

Таким образом, отражатель дает заметный прирост эффективности регистрации тепловых нейтронов, особенно при длине волны менее 1 А, без необходимости увеличения количества сцинтиллирующих слоев. По результатам работы опубликованы тезисы [8].

1.4.1. Стенд для тестов сцинтилляционных детекторов

Разработан и изготовлен портативный демонстрационный стенд для показа и обработки данных от сцинтилляционных счетчиков тепловых нейтронов нового типа. Стенд предназначен для обучения студентов физических ВУЗов работы со счетчиками на нейтронных пучках. На нем можно наблюдать как счет импульсов от нейтронов, так и при наличии импульсного источника нейтронов дифракцию при использовании время

пролетной методики. Таким образом имеется портативный демонстрационный стенд для показа и обработки данных от сцинтилляционных счетчиков тепловых нейтронов нового типа.

Стенд рассчитан на работу с новым типом детекторов тепловых нейтронов. Чувствительность счетчиков к гамма квантам 10-6, что упрощает работу стенда с тепловыми нейтронами (не нужно дополнительной защиты от гамма квантов).

Напряжение питания счетчиков не более 35 В, поэтому можно применять в любых помещениях и лабораториях. Стенд имеет удаленный блок счетчиков что позволяет безопасно работать как с нейтронным источником ^{252}Cf , так и с нейтронным пучком.

Стенд содержит несколько блоков в своем составе:

- 1) блок сцинтилляционных счетчиков тепловых нейтронов.
- 2) Блок многостоповых время-цифровых преобразователей (ВЦП) и контроллера управления порогами счетчиков.
- 3) Ноутбук.

Работа доложена на конференции РНИКС-2025: тезисы 6 Приложения А4.

2. Исследования структур перспективных материалов, в том числе при экстремальных нагрузках (высоких давлениях, низких температурах, сильных магнитных полях)

Настоящий проект направлен на исследование свойств, фазовых превращений и новых эффектов в простых и сложных материалах, возникающих при изменении межионных расстояний под воздействием сверхвысоких давлений (вплоть до 2-3 Мегабар), высоких температур (вплоть до 3000-5000 К), криогенных температур (2-300К), и сильных магнитных полей (до 9 Тесла). Такие давления и температуры создаются в камерах высокого давления с алмазными наковальнями. Это позволит решать важные прикладные и фундаментальные задачи материаловедения, задачи синтеза новых веществ, а также фундаментальные задачи геофизики, включая проблемы сильно коррелированных электронных систем (высокотемпературная сверхпроводимость, микроэлектроника, спинтроника, мультиферроики, нанотехнологии), синтез новых метастабильных фаз лёгких элементов с уникальными свойствами, изучение свойств и структуры кристаллов в условиях мантии и ядра Земли. Наряду с лабораторными методиками будут использованы многообразные синхротронные методы для анализа функциональных свойств сильно сжатых материалов.

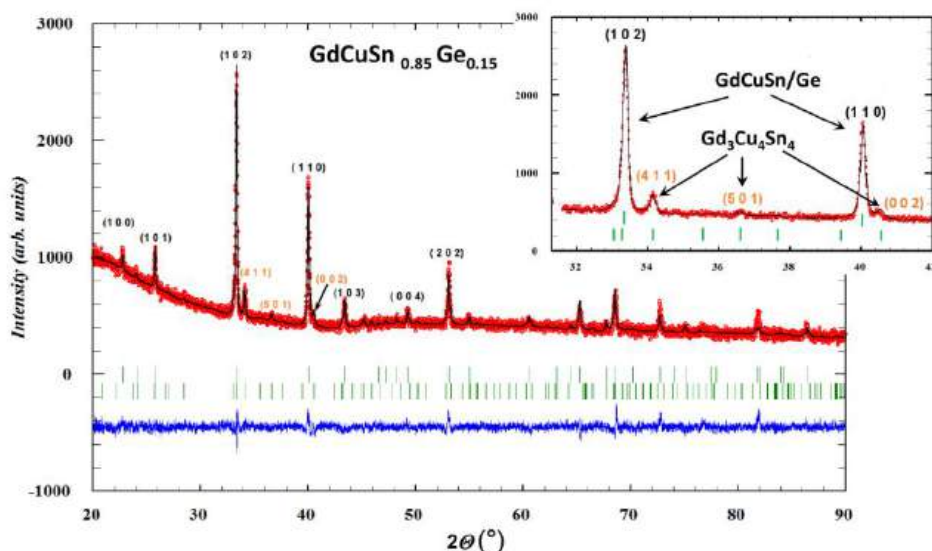
Предлагаемые исследования обеспечат развитие теоретической и прикладной базы для создания различных классов материалов, имеющих потенциальное применение в новой микроэлектронике, энергетике, обработке материалов и других отраслях индустрии. Часть этих исследований тесно связана с новой бурно развивающейся областью физики магнитных материалов – спинтроникой. Выяснение свойств и взаимодействий между магнитной и электронной подсистемами при изменении межатомных расстояний обеспечит теоретический и прикладной базис для оптимизации свойств и параметров материалов для создания спинтронных устройств. Изучение параметров синтеза и свойства новых материалов на основе лёгких элементов в экстремальных условиях является одной из приоритетных мировых проблем.

Решение этих задач должно обеспечить возможность создания принципиально новых продуктов, прорывных технологий и услуг, и содействовать прогрессу в решении научных задач, поставленных в ходе реализации Федеральных целевых программ.

Целью данной работы являются синтез и исследование кристаллической и магнитной структуры, электронных и магнитных свойства тройного интерметаллического соединения на основе редкоземельных металлов $\text{GdCuSn}_{0.85}\text{Ge}_{0.15}$ при низких температурах с гигантским магнитокалорическим эффектом (МКЭ) [9].

2.1. Антиферромагнитное упорядочение спиновой плотности на диамагнитных атомах Sn, перенесенных из Gd в сплаве $\text{GdCuSn}_{0.85}\text{Ge}_{0.15}$

Тройные интерметаллические соединения на основе редкоземельных металлов привлекают большое внимание благодаря обнаруженному в них гигантскому магнитокалорическому эффекту (МКЭ), что открывает перспективы их применения в устройствах магнитного охлаждения. Среди таких соединений особый интерес представляют GdCuGe и GdCuSn , поскольку металлический гадолиний имеет одно из самых высоких значений МКЭ при комнатной температуре. В данной работе исследовался сплав $\text{GdCuSn}_{0.85}\text{Ge}_{0.15}$, синтезированный методом дуговой плавки. Рентгеноструктурный фазовый анализ (РФА) (рисунки 2.1 и 2.2) выявил доминирующую фазу $\text{GdCu}(\text{Sn}/\text{Ge})$, относящуюся к гексагональной структуре с пространственной группой $\text{P}_{63\text{mc}}$. В синтезированном образце также обнаружена небольшая примесь второй фазы $\text{Gd}_3\text{Cu}_4\text{Sn}_4$ с орторомбической структурой (пр. гр. $\text{I4}/\text{mmm}$).



фазах $\text{Gd}_3\text{Cu}_4\text{Sn}_4$. Анализируя кристаллическую и магнитную структуру сплава, а также механизм формирования магнитного поля $^{\text{Sn}}\mathbf{H}_{\text{hf}}$ на олове, установлено, что индуцированные гадолинием магнитные моменты M_{Sn} на диамагнитных атомах олова образуют антиферромагнитную структуру [9]. Основные результаты исследований – температурная зависимость сверхтонких взаимодействий на ядрах ^{119}Sn , магнитная восприимчивость $\chi(T)$, а также кристаллическая и магнитная структуры основной фазы в сплаве $\text{GdCuSn}_{0.85}\text{Ge}_{0.15}$ – приведены на рисунке 2.2.

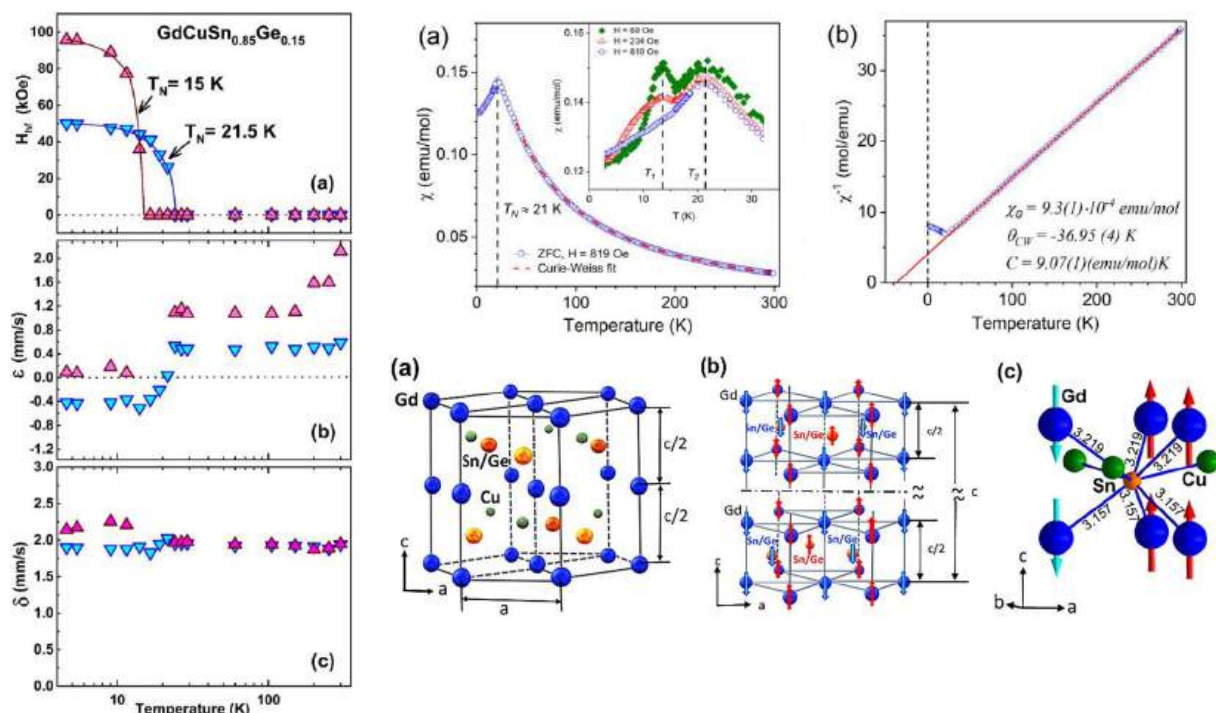


Рисунок 2.2 – Сверхтонкие взаимодействия (эффект Мёссбауэра, ^{119}Sn); магнитная восприимчивость $\chi(T)$ для двух позиций олова: Site-1 (синий) и Site-2 (розовый); кристаллическая и магнитная структуры основной фазы в сплаве $\text{GdCuSn}_{0.85}\text{Ge}_{0.15}$

2.2. Разработка программного обеспечения для автоматизации исследований кристаллической структуры, электронных и магнитных свойств веществ

Одной из целей данной задачи является разработка программного обеспечения для автоматизации измерений, в частности, определение параметров сцинтилляционных детекторов нейтронов. Современные сцинтилляционные детекторы нейтронов широко применяются в ядерной физике, радиационном контроле, нейтронной спектроскопии и физических экспериментах различного масштаба. Для исследования их характеристик и регистрации поведённых частиц используются метод амплитудно-широтного анализа (Pulse shape Discrimination) [10], позволяющий определять время прихода нейтрона, амплитуды сцинтилляционного импульса, формы сигнала и других параметров, необходимых для калибровки, оптимизации и диагностики работы детектора. В частности,

данный метод активно используется для выделения гамма-вклада в сцинтилляционных детекторах [11].

2.2.1. Программное обеспечение для пакетной обработки осциллограмм сцинтилляционного детектора нейтронов “Peak analyses”

Современные детекторы нейтронов обладают достаточно высокой эффективностью регистрации нейтронов. В связи с этим при тестировании и исследовании параметров различных детекторов возрастает объём экспериментальных данных и возникает необходимость в автоматизации обработки сигналов для анализа длительности вспышки, определения типа частицы и других параметров детектора. Ручной анализ осциллограмм становится крайне трудоёмким и неэффективным, особенно при проведении длительных измерений или при работе многоканальных детекторных систем. Кроме того, высокая вариативность форм сигналов, наличие шумовых и паразитных компонент, необходимость идентификации пиков различного происхождения требуют применения специализированных алгоритмов обработки и надёжных методов выделения информативных признаков. Это обуславливает потребность в создании программных инструментов, обеспечивающих стабильную, быструю и воспроизводимую обработку больших массивов измерительных данных.

Автоматизированная обработка обеспечивает возможность классификации импульсов, выделения параметров пиков, фильтрации шумов, построения статистических распределений и интеграции полученных данных с калибровочными и моделирующими процедурами. Особенно актуально это для нейтронных сцинтилляционных детекторов, где временная структура сигналов несёт информацию не только о событиях взаимодействия, но и о механизмах поглощения и передачи фотонов.

В рамках настоящей работы разработано программное обеспечение “Peak analyses”, предназначенное для автоматизации анализа осциллограмм сцинтилляционного детектора. Программа обеспечивает пакетную обработку больших наборов данных, включает алгоритмы поиска и параметризации пиков, оценки времени нарастания и спада сигнала и других параметров осциллограммы. Полученные данные параметризации импульса позволяют проводить анализ сигнала для разделения гамма и нейтронного излучения, а также анализ полученного объёма данных для оценки параметров световода и сцинтиллятора, в том числе и с использованием искусственного интеллекта. Программа написана на языке LabView и доступна возможность интеграции в существующую систему измерения и в проведения анализа в реальном времени. На данную программу получено свидетельство о регистрации программы [12].

2.2.2. Разработка программного обеспечения для проведения измерений сопротивления диэлектриков при криогенных температурах в камерах высокого давления “Dielectric measure”

Измерение электрического сопротивления диэлектриков представляет собой одну из фундаментальных методик, обеспечивающих понимание механизмов проводимости, локализации зарядов, присутствия дефектов и особенностей фазовых переходов. В отличие от металлов или полупроводников, исследование диэлектрических материалов требует использования высокочувствительных методов регистрации токов малой величины, применения прецизионных измерительных схем и строгого контроля условий эксперимента – температуры, электрического поля, частотного диапазона и геометрии образца [13]. Погрешности, связанные с паразитными токами, поверхностной проводимостью и емкостными эффектами, требуют сложных алгоритмов коррекции, что делает автоматизацию процесса особенно значимой.

Сложность проведения измерения сопротивления диэлектриков в камерах высокого давления связана с особенностью размещения образца в объеме камеры [14]. Для измерения образца используется классический четырехточечный метод. При подводе контактов к образцу в камере высокого давления они пересекают металлическую гasketу, которая изолирована от контактов тонким слоем диэлектрика. Этот слой может давать как паразитное шунтирующее сопротивление, так и является конденсатором, который может вносить погрешности в измерение. Таким образом, при проведении измерения нужно проводить варьирование различных параметров, таких как время подачи напряжения, полярность, менять местами контакты, использовать контакт на гasketе для коррекции, а также, в случае необходимости, менять схему измерения на двухточечную.

Разработана программа, которая реализует алгоритм измерения сопротивления диэлектриков при криогенных температурах. Данная программа осуществляет поддержку источника тока Keithley 6221, нано вольтметра Keithley 2182A и контроллера температуры Lakeshore 335. Обеспечивает автоматизацию измерения сопротивления, управление током и компрессором криостата. Возможно подключение внешнего переключателя контактов. Программа обеспечивает также измерение сопротивления при постоянном токе и постоянный контроль и управление температурой для минимизации возможности повреждения камеры. На рисунке 2.3 представлен внешний вид программы. На данную программу получено свидетельство о регистрации программы [15].

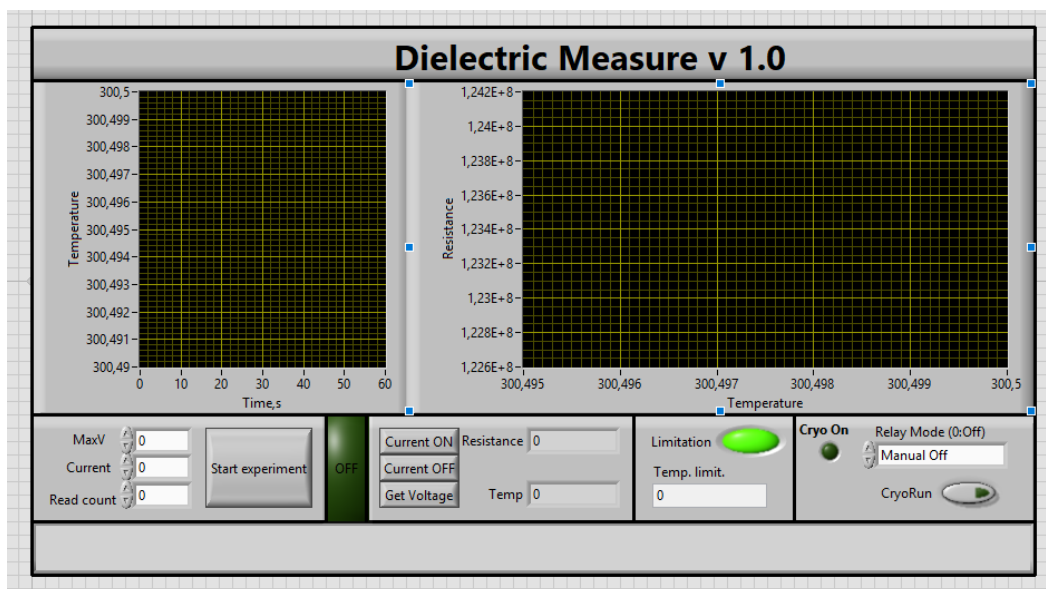


Рисунок 2.3 – Внешний вид главного окна программы

2.3. Исследования в области сцинтилляционных детекторов, включая исследования материалов, возможных для использования при создании детекторов, тестирования различных вариантов сцинтилляционных детекторов и оптимизации их параметров

В рамках данной задачи проводятся исследования и оптимизация материалов, используемых для изготовления различных сцинтилляционных детекторов, и оценка их влияния на параметры детекторов на их основе. Тестирование различных вариантов сцинтилляционных детекторов и оптимизация их параметров являются неотъемлемой частью разработки высокоэффективных детекторов. Однако проведение широкого спектра экспериментальных исследований часто требует значительных ресурсов и временных затрат. В этих условиях развитие современных методов компьютерного моделирования предоставляет мощный инструмент для анализа и оптимизации сцинтилляционных детекторов. Использование подходов, основанных на моделировании оптических и ядерных взаимодействий, позволяет существенно ускорить процесс разработки, снизить количество полноразмерных экспериментов и повысить точность оценок параметров будущих детекторов [16].

В рамках данной работы проводится исследование и оптимизация материалов, предназначенных для изготовления различных сцинтилляционных детекторов, а также оценка их влияния на ключевые характеристики детекторных систем. Особое внимание уделяется моделированию процессов генерации и переноса оптического излучения, возникающего в результате взаимодействия нейтронов и заряженных частиц со

сцинтиллятором. Применение специализированных программных инструментов позволяет проанализировать влияние состава сцинтиллятора, его толщины, структуры, а также геометрии световода на эффективность регистрации нейтронов.

2.3.1. Программа расчёта эффективности и моделирования оптических параметров сцинтилляционных детекторов нейтронов с пластиковым световодом “SC_PMMA_Model”

Проведена разработка программы на основе пакета GEANT4 [17]. Пакет GEANT4 позволяет проводить моделирования взаимодействия нейтрона с веществом, а также различные оптические параметры и распространение фотонов в объёме световода. Разработанная программа представляет необходимые инструменты для проведения симуляции взаимодействия нейтрона со сцинтиллятором, и расчет траекторий вторичных фотонов в объёме пластикового световода. Программа рассчитывает эффективность сцинтиллятора, оценку выхода фотонов из объёма световода. В программе можно задавать материалы и размеры сцинтиллятора и световода что позволяет проводить оценку различных комбинаций и оптимизировать геометрию детектора. На программу получено свидетельство о регистрации программы [18].

2.4. Исследование особенностей фоновых спектров в водородосодержащих материалах

Природа фононного триплета деформационных ОН-мод в области растяжения в материалах с водородными связями часто объясняется взаимосвязью мод растяжения и комбинаций и обертонов ОН-мод изгиба. Чтобы прояснить оба вклада в KH_2PO_4 (KDP), мы сравнили зависимость деформационных ОН-мод изгиба и растяжения от давления, полученную в результате *ab initio* расчетов и измерений методом неупругого рассеяния нейтронов (НРН). *Ab initio* расчеты предсказывают ужесточение деформационных мод изгиба и смягчение мод растяжения с ростом давления. В то же время измерения НРН в области ОН-мод растяжения указывают на ужесточение фононного триплета вместе с изгибными модами. Это означает, что этот триплет в измерениях НРН обусловлен в основном комбинациями и обертонами деформационных ОН-мод изгиба, в то время как интенсивность ОН-мод растяжения, по-видимому, относительно низкая. Этот вывод может быть применим и к другим материалам с водородными связями [19].

2.5. Радиационное материаловедение

Материалы с высокой плотностью нейтральных стоков точечных дефектов способны обеспечить долгосрочную стабильность эволюции микроструктуры металлов при радиационном повреждении. Границы зерен традиционно считаются эффективными

нейтральными стоками для точечных дефектов, генерируемых облучением. Потребность в передовых радиационно-стойких материалах для современных ядерных энергетических реакторов приводит к увеличению числа исследований, в которых изучается влияние границ зерен при радиационном облучении [20]. С другой стороны, хорошо известным примером крупномасштабной пространственной неоднородности в микроструктуре повреждений, развивающейся при каскадном облучении, является усиленное распухание пор вблизи границ зерен в чистых металлах [21-25].

При повышенных температурах облучения T эмиссия вакансий из термически неустойчивых первичных вакансионных кластеров (ПВК) приводит к отжигу подавляющего большинства первичных междоузельных кластеров (ПМК), также генерируемых в каскадах столкновений. Неподвижные ПМК, сокращаясь до некоторого минимального размера, обретают подвижность, и, таким образом, в пространственно-неоднородном случае становится возможным дисбаланс между их оттоком из любого конечного объема и соответствующим притоком из соседних областей пространства, что особенно актуально вблизи границ зерен. Избыток вакансий, обусловленный в указанных условиях эффективным оттоком междоузлий из определенного слоя вблизи границы зерна, приводит к усилению распухания пор в данном слое. В этом случае для наблюдаемого усиления не требуются ни традиционное дислокационное предпочтение, ни одномерный диффузионный перенос малых ПМК вдоль плотноупакованных атомных направлений. В настоящей работе исследуется и обсуждается действие этого, не получившего ранее рассмотрения, механизма усиления вакансионного распухания в областях, прилегающих к границам зерен. Результаты расчетов, выполненных в рамках предложенного физического механизма, представлены на рисунке 2.4.

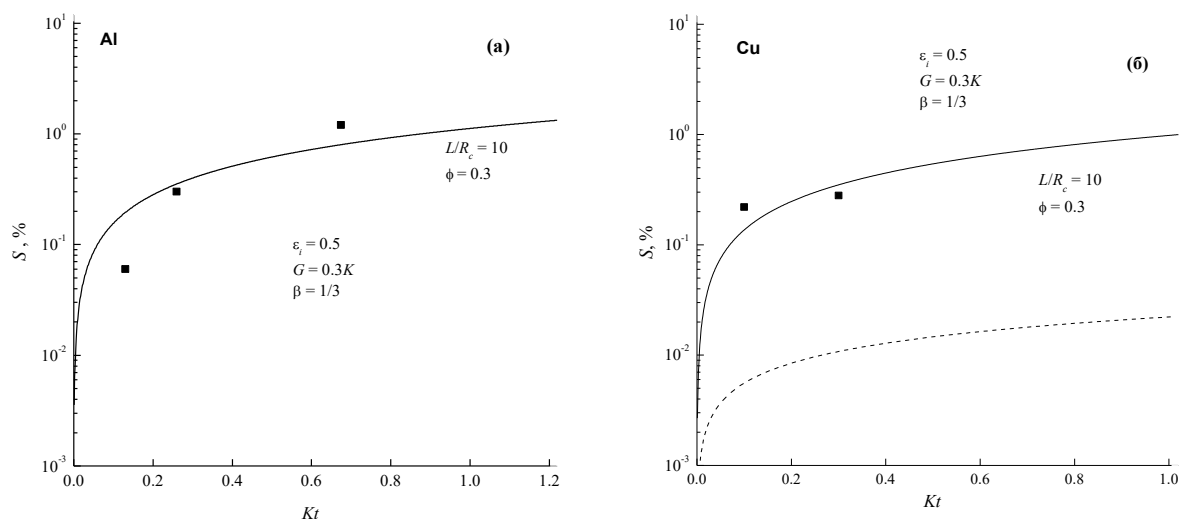


Рисунок 2.4 – Распухание пор S вблизи границ зерен как функция дозы Kt в алюминии (а) и меди (б). Экспериментальные точки (■) для алюминия ($T = 393$ К) и меди ($T = 523$ К) взяты из работ [21] и [23] соответственно. Здесь K – номинальная скорость генерации дефектов (сна/с). Пунктирная линия на рисунке 6(б) показывает величину пространственно-однородного распухания

Из рисунка видно, что существует разумное согласие между расчетным и экспериментально измеренным распуханием пор вблизи границы зерна. Полученные результаты, указывающие на связь между усилением распухания пор и шириной зоны непосредственно у границы, которая свободна от них, также соответствуют экспериментальным наблюдениям. Чем шире зона, тем обычно значительнее усиление распухания пор в прилегающей области [24].

По результатам работы подготовлена статья, которая находится в печати в журнале «Поверхность».

3. Поддержание и развитие нейтронных источников (ИН-06, РАДЭКС, СВЗ-100) и разработка новых

Задача поддержания и развития существующих источников нейтронов и создания новых в настоящее время более чем актуальна в связи с их явным недостатком для проведения исследований в области физики конденсированного состояния и создания новых материалов.

3.1. Проблема создания компактного импульсного источника нейтронов

Для создания компактных импульсных источников нейтронов на основе сильнооточного протонного пучка с энергией частиц ~ 13 МэВ используются материалы с низкой энергией связи нейтрона в ядре (Be9 , Li7) – преимущественно бериллий, который быстро разрушается из-за накопления водорода в материале (блистеринг) [26] - [28].

Для преодоления этой проблемы была предложена и обоснована тонкая вращающаяся бериллиевая мишень с горизонтальной осью вращения с водным охлаждением при низком давлении воды. Такое сочетание позволило использовать бериллиевую мишень толщиной ~ 1 мм, заведомо ниже длины ионизационного пробега протона с его остановкой непосредственно в воде, охлаждающей мишень (что снизило накопление водорода в теле мишени), и увеличить площадь мишени более чем на порядок по сравнению с площадью поперечного сечения пучка за счет вращения. Эти два фактора позволили увеличить расчетный срок службы мишени с двух недель до пяти лет. Скорость вращения подбиралась так, чтобы каждый импульс протонов попадал на мишень рядом с предыдущим не перекрывая друг друга, что обеспечило низкую тепловую нагрузку на мишень. Основным определяющим фактором стал нагрев материала за время импульса и связанные с ним термомеханические напряжения. Для снижения давления воды внутри вращающегося элемента мишени на верхней и нижней торцевой поверхности мишени расположены специальные лопасти (которые одновременно выполняют роль ребер жесткости), обеспечивающие втягивание и выталкивание теплоносителя. При этом вращающийся элемент одновременно выполняет роль своеобразного насоса, обеспечивая низкое давление теплоносителя в камере. Расчетно-техническое обоснование позволило приступить к созданию прототипа компактного источника нейтронов с горизонтальной осью вращения.

Проводятся исследования по увеличению энергии протонов до 30 – 70 МэВ и использованию иных материалов, обладающих высокой скоростью диффузии водорода для снижения блистеринга.

Исходя из опыта разработки и создания импульсного источника нейтронов ИЯИ РАН [29,30], предложена схема компактного источника тепловых и холодных нейтронов с вращающейся мишенью с касательным расположением замедлителей и отражателей, обеспечивающая низкий фон от промежуточных, быстрых нейтронов и гамма-квантов. Замедлители и отражатели вынесены за пределы вакуумной камеры для удобства эксплуатации, замены и изменения их конфигурации в случае необходимости. Для снижения толщины стенок вакуумной камеры и других технологических стенок, с целью сокращения захвата нейтронов, предложена специальная конструкция, обеспечивающая разгрузку тонкостенных конструкций и их устойчивость.

Расчеты нейтронных потоков проводились с помощью программных комплексов MCNPX, SHIELD [28], которые достаточно хорошо коррелируют друг с другом. Работоспособность конструкции была подтверждена также тепловыми и гидродинамическими расчетами.

Ведутся работы по отработке и поддержанию в рабочем состоянии системы диагностики мишеней и разработке дополнительных методов контроля первого и второго контуров охлаждения интенсивных импульсных источников нейтронов ИЯИ РАН, в том числе работы по подготовке диагностики возможных протечек теплоносителя и внутренней разгерметизации теплообменников с помощью ядерно-физических методов. Проводятся исследования по изучению спектров гамма-активности водного теплоносителя и его отличия от спектров исследовательских водоохлаждаемых реакторов с помощью существующих гамма-спектрометров и дозиметров.

3.2. Поддержка и совершенствование программного обеспечения для моделирования параметров нейтронных источников, расчетные работы по моделированию процессов

Одной из целей этой задачи является моделирование процессов генерации нейтронов при взаимодействии протонов (или других частиц) с мишенью и замедлителем. Это позволяет провести оптимизацию материала мишени, геометрии замедлителя, энергетического спектра и интенсивности пучка. Для этого используются специализированные пакеты Монте-Карло, такие как GEANT4, FLUKA и MCNP.

Эти программы позволяют проводить детальное моделирование рождения, транспорта и взаимодействия нейтронов, включая ядерные реакции и многокомпонентные каскады частиц. Например, в литературе показано, что GEANT4, MCNP6 и FLUKA активно применяются для моделирования гамма-излучения, индуцированного протонами [31], [32].

Использование современных методов моделирования позволяет упростить оптимизацию параметров мишени и установок для генерации нейтронов и снизить стоимость за счет уменьшения времени и оптимального подбора материалов.

3.2.1. Моделирование компактного источника нейтронов для протонных ускорителей

Целью данной работы является моделирование относительно недорогого компактного источника нейтронов, который позволит создавать замедленные нейтронные пучки на протонных ускорителях, проверять и исследовать эффективность комбинированной нейтрон-протонной терапии, и при этом может быть легко применен в любом онкологическом центре, где есть протонный ускоритель. Данная работа проводилась совместно с ФИАН. Моделирование проводилось в пакете GEANT4 [17].

На первом этапе работы проведено моделирование параметров мишени. В качестве материалов мишени использовались W и Be. Интенсивность пучка протонов составляла 10^9 протонов за импульс ускорителя. Время между импульсами составляло 2 с. Энергия пучка протонов 30 МэВ. На рисунке 3.1 проводятся зависимости количества нейтронов и протонов на расстояние 10 см от мишени диаметром 40 мм детектором 10×10 см перпендикулярно прямого падающему пучку протонов.

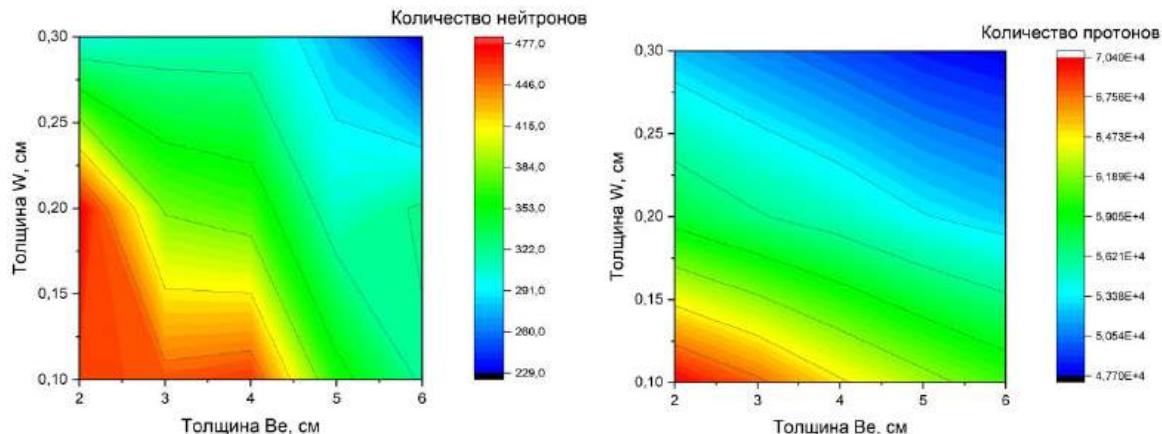
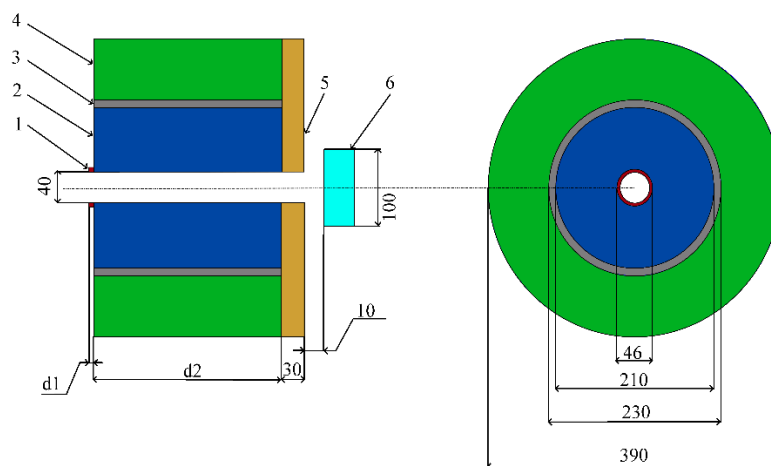


Рисунок 3.1 – Оптимизация параметров комбинированной W-Be мишени, слева количество нейтронов, справа количество протонов

Поскольку требуется комбинированный нейтрон-протонный пучок и при этом минимизировать вторичное гамма, в качестве мишени для дальнейших расчетов решено использовать кольцо из чистого бериллия с внутренним диаметром 40 мм и внешним 46 мм. Толщину мишени (d_1) оптимизируем с учетом результатов дальнейшего моделирования установки в целом. В качестве модели принята конфигурации стенда, изображенная на рисунке 3.2.



d1 – толщина мишени, d2 – толщина замедлителя и боковой защиты, 1 – мишень, 2 – Материал А (Замедлитель), 3 – Материал Б (Отражатель), 4 – Материал В (Биологическая защита), 5 – Материал Г (Биологическая защита)

Рисунок 3.2 – Конфигурация для расчета Монте-Карло

В качестве замедлителя используется Материал А, состоящий из воды. В качестве отражателя нейтронов Материал Б, состоящий из свинца. В качестве биологической защиты использованы два материала: Материал В – материал Wiki 2, состоящей из связующего вещества (0,42%)+Карбид бора(0,26%) + SiO₂(0,32%). Связующее вещество в свою очередь состоит из С – 0,532%, Н-0,0532%, О – 0,1748, Вг – 0,24%. Итоговая плотность 0,6 г/см³. И Материал Г - эпоксиретановое связующее (42%), полиэтилен (32%), ферробор (26%). Эпоксиретановое связующее (C₅H₂₀O₅N₂) плотностью 1,20 г/см³. Полиэтилен (C₂H₄) плотностью 0,94 г/см³, ферробор (FeB) плотностью 7,1 г/см³.

На рисунке 3.3 показана зависимость количества нейтронов, регистрируемых детектором, от толщины мишени.

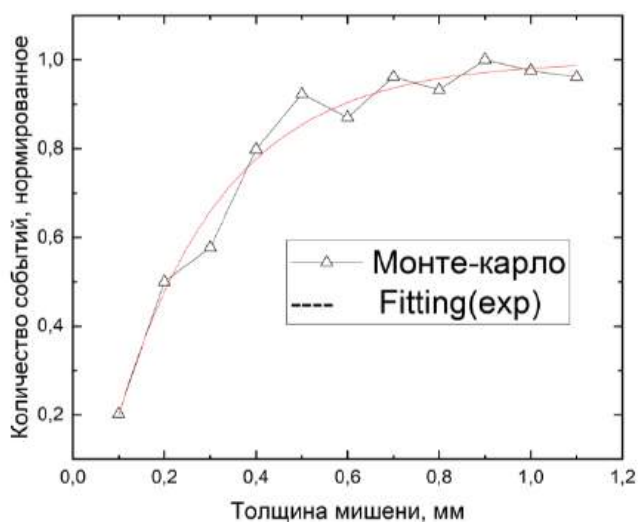


Рисунок 3.3 – Зависимость количества нейтронов на выходе из канала от толщины мишени

На втором этапе проведена оптимизация нейтронного спектра в зависимости от толщины замедлителя (d2 на рисунке 3.2). Варьируя толщину замедлителя, произведена оценка количества тепловых, эпитепловых и быстрых нейтронов на выходе из канала в зависимости от толщины замедлителя. На рисунке 3.4 показана зависимость доли нейтронов различных энергий от толщины. Энергия тепловых нейтронов - от 0,005 эВ до 0,5 эВ, эпитепловых - от 0,5 эВ до 1 МэВ, быстрых – выше 1 МэВ. Холодные нейтроны не учитываем, т.к. их доля менее $10^{-4}\%$ от общего количества событий.

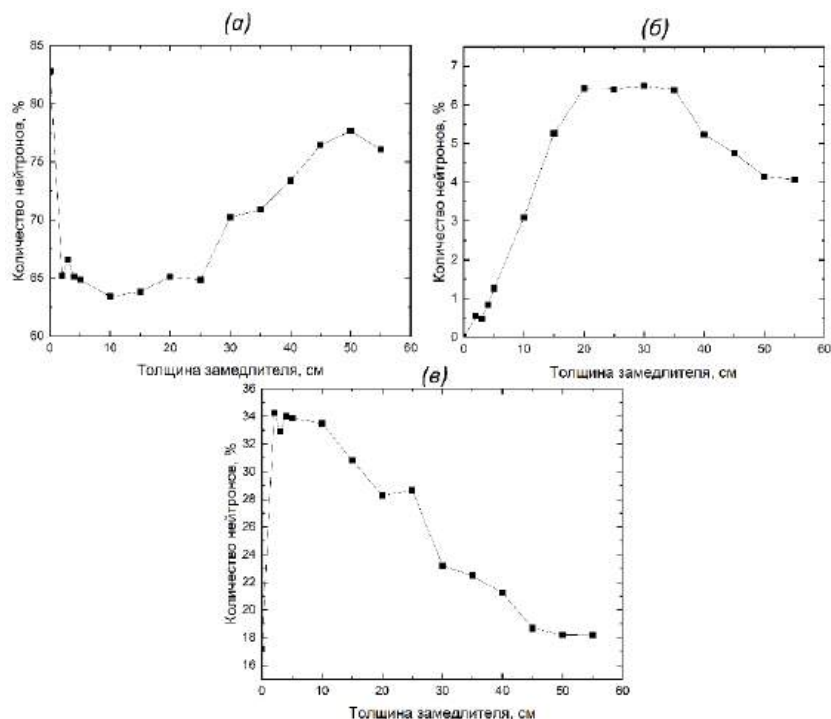


Рисунок 3.4 – Количество нейтронов различных энергий на выходе установки в зависимости от толщины d2, где а – быстрые нейтроны, б – тепловые нейтроны, в – эпитепловые

За счет того, что центр канала не имеет замедлителя и мишени, часть протонов, не поглощенных и рассеянных в мишени, попадают на выход канала (рисунок 3.5).

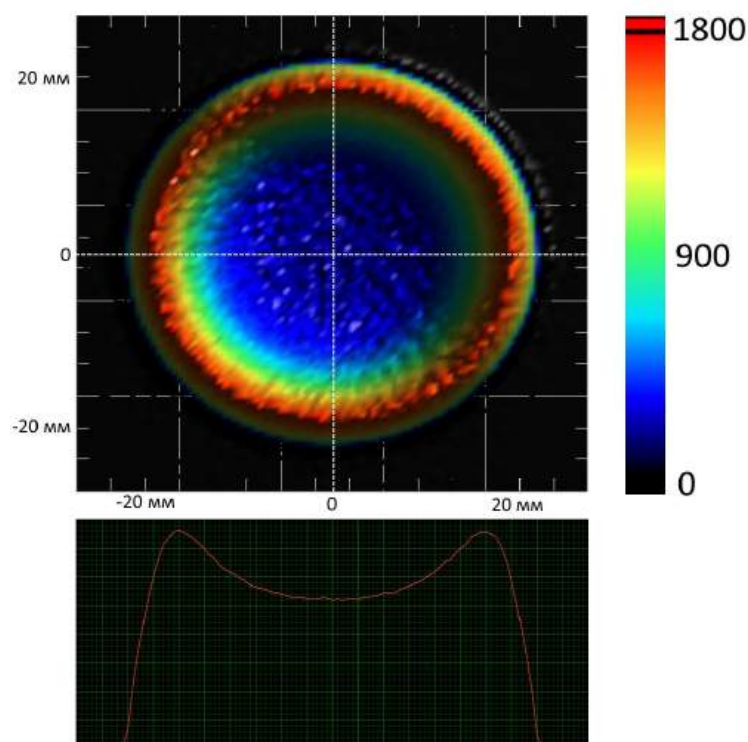


Рисунок 3.5 – Профиль протонов на выходе канала

На рисунке 3.6 показан спектр нейтронов на выходе канала, на рисунке 3.7а сравнение спектра на выходе канала и от голой мишени, а на рисунке 3.7б профиль эпитепловых и тепловых нейтронов на выходе из канала.

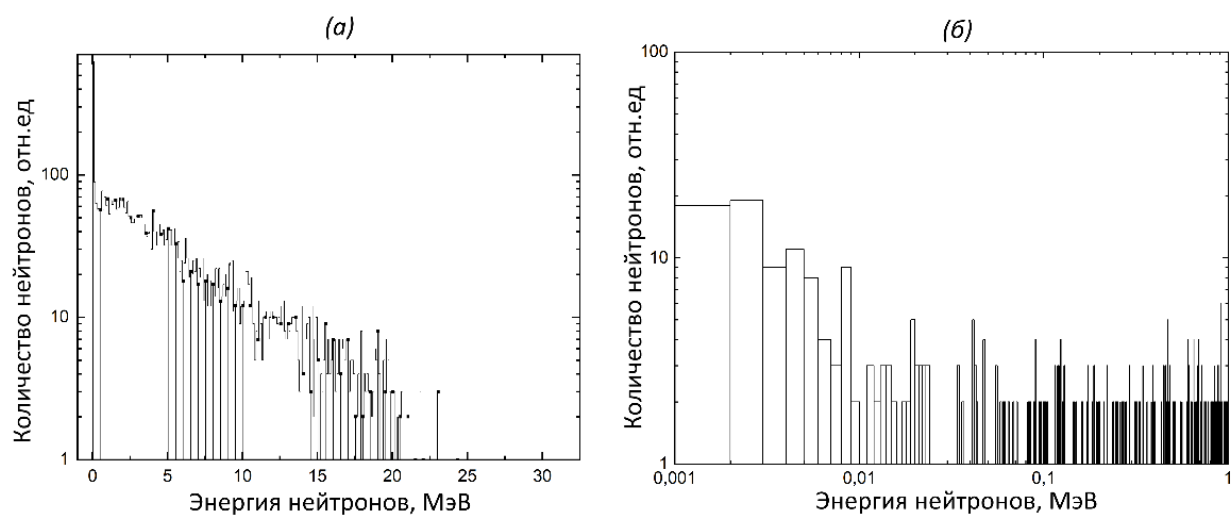


Рисунок 3.6 – Спектр нейтронов на выходе канала, *а* – до 30 МэВ, *б* – до 1 МэВ

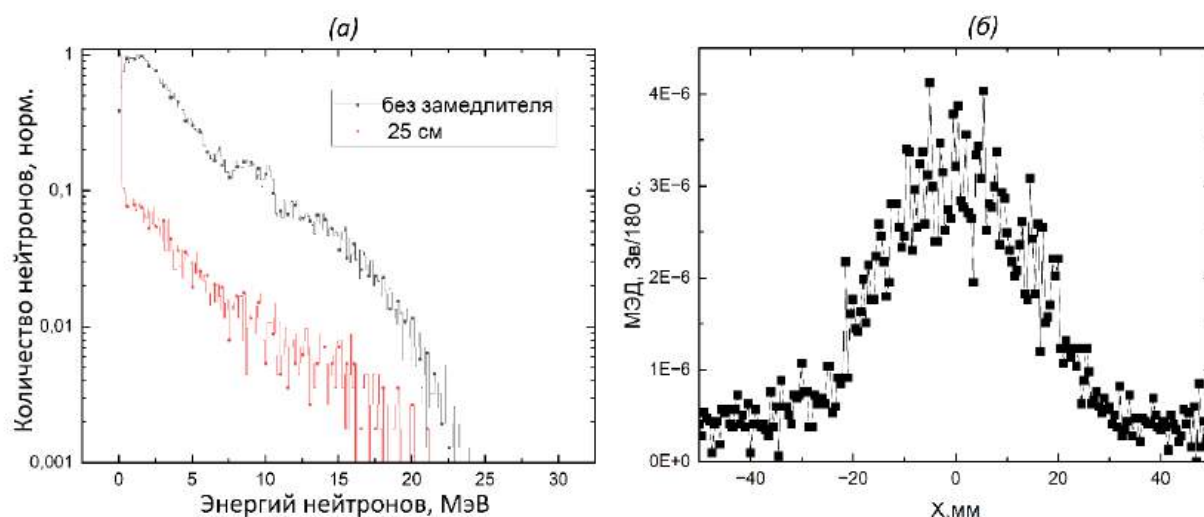


Рисунок 3.7 – Спектры на выходе канала, *а* – сравнение нейтронного спектра с замедлителем и без, *б* – профиль эпитепловых и тепловых нейтронов на выходе из канала

Полученные данные позволили оптимизировать конструкцию замедлителя и мишени, а также увеличить количество тепловых и эпитепловых нейтронов при проведении комбинированной нейтронно-протонной терапии. Результаты работы представлены в докладе на конференции [33] и опубликованы в статье [34].

4. Исследования по физике деления и нейтрон – ядерных взаимодействий

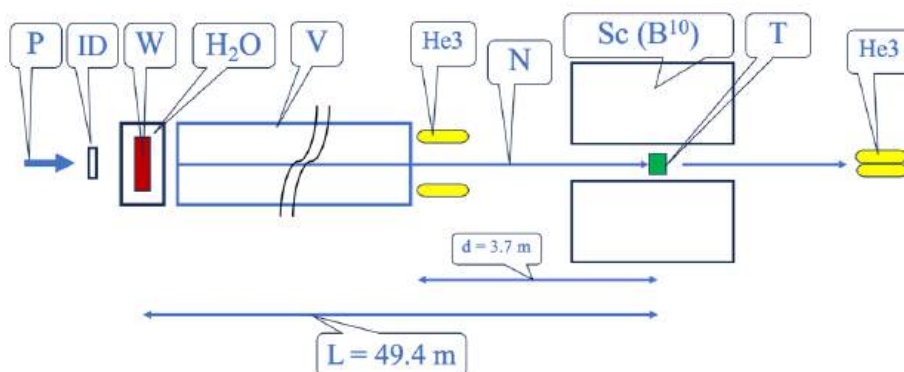
Модернизация элементов установки ИНЕС [35, 36] по измерению полных и парциальных (n , γ) нейтронных сечений в области ядерных реакторов и ядерной астрофизики позволит повысить точность измерений параметров известных резонансов, провести измерение спорных резонансов и обнаружить новые резонансы. Установка ИНЕС использует времяпролетную (TOF) методику для измерения сечений и состоит из сцинтилляционного γ -детектора (8 секций), мониторных (4 счетчика) и пучковых (4 счетчика) нейтронных ^3He счетчиков.

В 2025 г. проводились работы по созданию пакета программ для реконструкции сечений радиационного захвата нейтронов ядром. Проводились работы по модернизации системы сбора и обработки данных. Измерен энергетический спектр импульсного источника нейтронов РАДЭКС и проведено сравнение с результатами моделирования. Разработан черенковский монитор протонного пучка. Описана процедура определения формы импульса нейтронов от времени на базе измеренной формы импульса протонного пучка, с учетом замедления нейтронов в мишени. Проведено измерение спектра нейтронов на импульсном источнике нейтронов РАДЭКС центра коллективного пользования (ЦКП) ИЯИ РАН с образцом золота ^{197}Au . Разработана процедура определения зависимости фона от времени.

4.1. Времяпролетный спектрометр установки ИНЕС

Установка ИНЕС (см. рисунок 4.1) использует времяпролетную (TOF) методику и состоит из мониторных ^3He счетчиков нейтронов [35], восьми секций сцинтилляционных детекторов γ -квантов [36], монитора протонного пучка и системы регистрации и обработки данных. Импульсный источник нейтронов РАДЭКС использует вольфрамовую мишень с водяным охлаждением для образования нейтронов импульсным протонным пучком. Протонный пучок имеет энергию 267 МэВ, импульсный ток 5 - 7 мА, длительность 0,3 мкс с частотой импульсов 50 Гц. Энергия нейтронов определяется по времени пролета, измеряемое многоканальным TDC кодировщиком с непрерывной записью сигналов от γ -детектора каждые 100 нсек в течение 19,66 мсек, который запускается синхроимпульсом протонного пучка. Время пролета нейтрона T [мкс] определяется пролетной базой установки L [м] и энергией нейтрона E [эВ] следующим образом: $T = 72,3 L E^{-1/2}$. Пролетная база установки L определяется расстоянием от мишени (W) источника до измеряемого образца, и равна 49,4 м. Относительная погрешность в измерении энергии нейтрона зависит от временной неопределенности δT и равна $\delta E/E = 2,77 E^{1/2} \delta T/L$ (%) [36]. Основной вклад

во временную неопределенность δT вносит длительность протонного пучка равная $\sim 0,3$ мкс. Можно оценить время пролета и относительную ошибку в измерении энергии для нейтрона с энергией 100 эВ, которые равны 357 мкс и 0,17%, соответственно.



База установки измеряется от вольфрамовой (W) нейтронной мишени источника до измеряемого образца (T) и составляет величину равную 49,4 м. Протонный пучок (P) взаимодействует с водо-охлаждаемой мишенью (W). Две группы нейтронных He3 счетчиков расположены до и после сцинтилляционного гамма-детектора (Sc). Индукционный датчик тока (ID) измеряет форму импульса протонного пучка.

Вакуумированный канал (V) длиной 44 м

Рисунок 4.1 – Схематическое изображение времяпролетного спектрометра установки ИНЕС на нейтронном канале (N) источника РАДЭКС

4.1.1. Система сбора и обработки данных установки

Система состоит из электроники детекторов (усилители и формирователи сигналов, 16-канальный временной кодировщик (TDC) с USB интерфейс) и C++ программы по обработке и сжатию цифровой информации. Цифровые сигналы с гамма-детектора (8 каналов) и ^3He счетчиков (8 каналов) поступают на 16-канальный временной кодировщик (TDC) с возможностью обработки цифровой информации (2 байта) с частотой 10 МГц (каждые 100 нсек) со скоростью 20 МВ/сек. Предварительная обработка и сжатие информации позволяет сократить объем данных для записи на диск в 650 раз. Типовой набор данных с установки за время 7 часов составляет ~ 800 МВ. Аналоговые сигналы обрабатываются выборочно 16-канальным АЦП CAEN DT5742 (waveform digitizer). Текущий счет детекторов установки и графики работы детекторов за предыдущие сутки выводятся на website установки <http://ines.inr.ru:1880/ui>.

4.1.2. Калибровочные измерения потока нейтронов, попадающих в образец

Экспериментально измеренную вероятность радиационного захвата нейтрона ядром образца Au, можно выразить следующим образом [37]:

$$Y_{exp}(t) = (C_{Au}(t) - B(t)) / (\epsilon \cdot f \cdot \Phi(t)), \quad (4.1)$$

где $C_{Au}(t)$ – экспериментально измеренный времяпролетный спектр радиационного захвата нейтрона ядром образца, t – время пролета нейтрона, $B(t)$ – спектр фона, полученный на основе измерений без образца и аппроксимации спектра $C_{Au}(t)$ между резонансами, $\Phi(t)$ – поток нейтронов в районе образца, ε – эффективность детектора гамма-квантов, f – часть нейтронного потока, попадающая в образец.

Для измерения потока нейтронов, прошедших через образец, использовался метод абсолютной калибровки эффективности детекторов гамма-квантов и мониторов нейтронного потока. Этот метод основан на измерении известного насыщенного резонанса с большим сечением ($> 10^4$ барн). Резонанс в золоте при 4,9 эВ хорошо известен, и имеет в максимуме полное сечение равное $3,03 \times 10^4$ барн и $2,73 \times 10^4$ барн для радиационного захвата. При таком подходе можно переписать выражение для $Y_{exp}(E)$ (4.1) следующим образом:

$$Y_{exp}(E) = (C_{Au}(E) - B(E)) / C_n \Phi(E) \quad (4.2)$$

где C_n – числовой параметр потока нейтронов, нормализующий вероятность захвата $Y_{exp}(E)$ ядром образца Au относительно известного насыщенного резонанса 4,9 эВ. В этом подходе неизвестные параметры полного потока нейтронов и эффективности детекторов сводятся к одному параметру C_n , который определяется процедурой аппроксимации экспериментального спектра резонанса 4,9 эВ. Нейтроны с энергией в районе максимума резонанса 4,9 эВ практически полностью поглощаются ядром образца с вероятностью равной $\sigma_\gamma / \sigma_t (1 - \exp(-n\sigma_t))$, которая составляет величину равную $\sim 90\%$. Сечение σ_γ радиационного захвата нейтрона ядром и полное σ_t сечение вычисляются по одноуровневым формулам Брейт-Вигнера с учетом доплеровского уширения резонансов. Приведенная толщина Au образца $n = 6,29 \cdot 10^{-3} \text{ 1/barn}^2$. Нейтроны в образце, либо не испытывают (0), либо испытывают многократное (1, 2, ...) упругое рассеяние до процесса радиационного поглощения ядром (см. рисунок 4.2a). При каждом упругом рассеянии нейтроны с энергией E теряют энергию в среднем порядка $\Delta E \sim 2E/A$, где A – атомный вес ядра. Вышеприведенная формула, $\sigma_\gamma / \sigma_t (1 - \exp(-n\sigma_t))$, для вероятности взаимодействия нейтрона с образцом корректна для варианта с нулевым многократным рассеянием до радиационного поглощения нейтрона ядром.

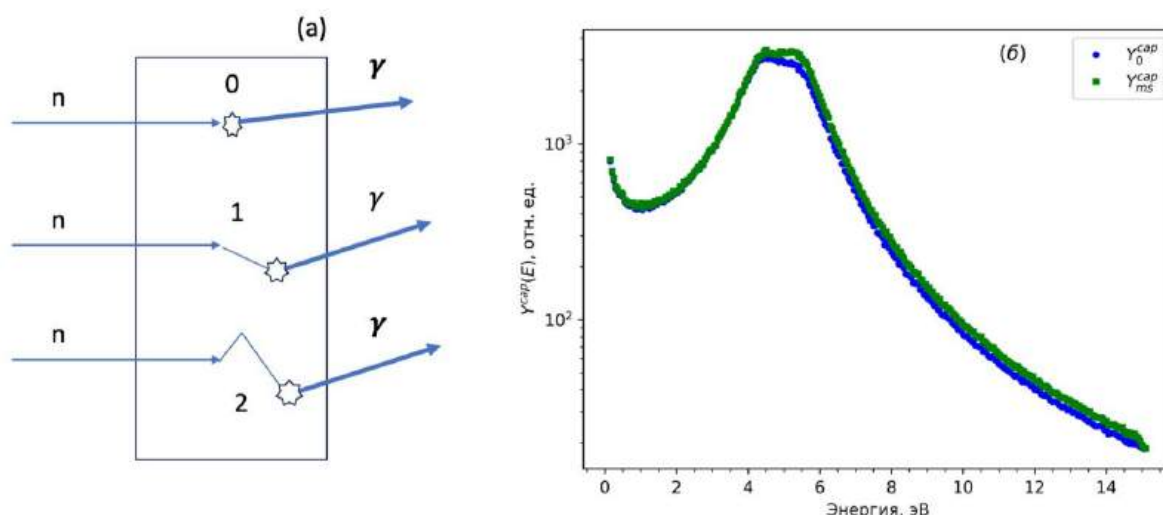


Рисунок 4.2 – (а) – Пример взаимодействия нейтрона в образце с упругим многократным (0, 1, 2) рассеянием до радиационного поглощения ядром. (б) – Гистограмма весов вероятности захвата нейтрона ядром $Y^{\text{cap}}(E)$ от энергии для двух вариантов процесса: $Y_0^{\text{cap}}(E)$ – без многократного упругого рассеяния; $Y_{\text{ms}}^{\text{cap}}(E)$ – с многократным упругим рассеянием

В наших измерениях используется сравнительно толстый образец золота (1,065 мм), поэтому необходимо учитывать эффект, связанный с изменением энергии нейтрона от многократного (1, 2, ...) упругого рассеяния в образце. Для этого использовался метод Монте-Карло, моделирующий процесс взаимодействия нейтрона с образцом в области каждого резонанса с использованием сечений библиотеки ENDF/B-VIII.0. Для каждого резонанса разыгрывалось несколько миллионов событий взаимодействия нейтрона с образцом Au. На примере резонанса 4,9 эВ опишем кратко процедуру моделирования на основе метода весов. Для этого определим следующие величины на i -ом шаге взаимодействия нейтрона в образце: вес события W_i ; энергия нейтрона E_i ; длина L_i^{max} равна расстоянию от точки взаимодействия $(x, y, z)_i$ до поверхности образца в направлении полета нейтрона с углами $(\theta, \varphi)_i$; обратная длина взаимодействия нейтрона $\mu_i(E_i) = \rho \sigma_i(E_i)$, где ρ плотность образца; $W_\gamma = \sigma_\gamma(E_i)/\sigma_t(E_i)$; $\lambda_i(E_i)$ длина свободного пробега нейтрона. Моделирование каждого события состоит из следующих этапов:

- 1) задание начальных значений $W_0 = 1$, $L_0^{\text{max}} = \Delta t$ толщина образца, $(x, y, z)_0 = (0, 0, 0)$, $(\theta, \varphi)_0 = (0, 0)$, розыгрыш энергии нейтрона E_0 равномерно от 0,1 до 15,1 эВ;
- 2) вычисление длины свободного пробега нейтрона $\lambda_i(E_i)$ в пределах от 0 до L_i^{max} и координаты i -ой вершины $(x, y, z)_i$ траектории нейтрона;

3) вычисление нового веса события с $w_i = w_i(1 - \exp(-\mu_t(E_i)L_i^{\max}(E_i)))$, вычисление веса вероятности захвата нейтрона ядром $Y_i^{\text{cap}} = w_i W\gamma(E_i)$, вычисление энергии E_i , вычисление $(\theta, \varphi)_i$, сохранение данных ($i_{\text{ev}}, i, E_i, x, y, z, \theta, \varphi, Y_i^{\text{cap}}$);

4) вычисление нового веса события $w_i = w_i(1 - W\gamma)$ для следующего шага моделирования;

5) повторение процесса начиная с пункта 2) если вес события $W_i > 10^{-6}$ и остановка процесса если $W_i < 10^{-6}$.

На рисунке 4.2б показан результат моделирования взаимодействия нейтрона в образце Au в области резонанса 4,9 эВ для двух вариантов процесса: $Y_0^{\text{cap}}(E)$ - без многократного упругого рассеяния; $Y_{\text{ms}}^{\text{cap}}(E)$ - с многократным упругим рассеянием. Следует отметить, что вариант процесса без многократного упругого рассеяния описывается формулой $Y_0^{\text{cap}}(E) = \sigma_\gamma(E)/\sigma_t(E)(1 - \exp(-n\sigma_t(E)))$. Поправочная функция $G_{\text{ms}}(E)$, учитывающая изменение энергии нейтрона, вследствие многократного упругого рассеяния в образце, определяется следующим образом $G_{\text{ms}}(E) = Y_{\text{ms}}^{\text{cap}}(E)/Y_0^{\text{cap}}(E)$. На рисунках 4.3а и 4.3б представлена поправочная функция $G_{\text{ms}}(E)$ для области резонанса 4,9 эВ и в более широкой области энергий до 280 эВ, соответственно.

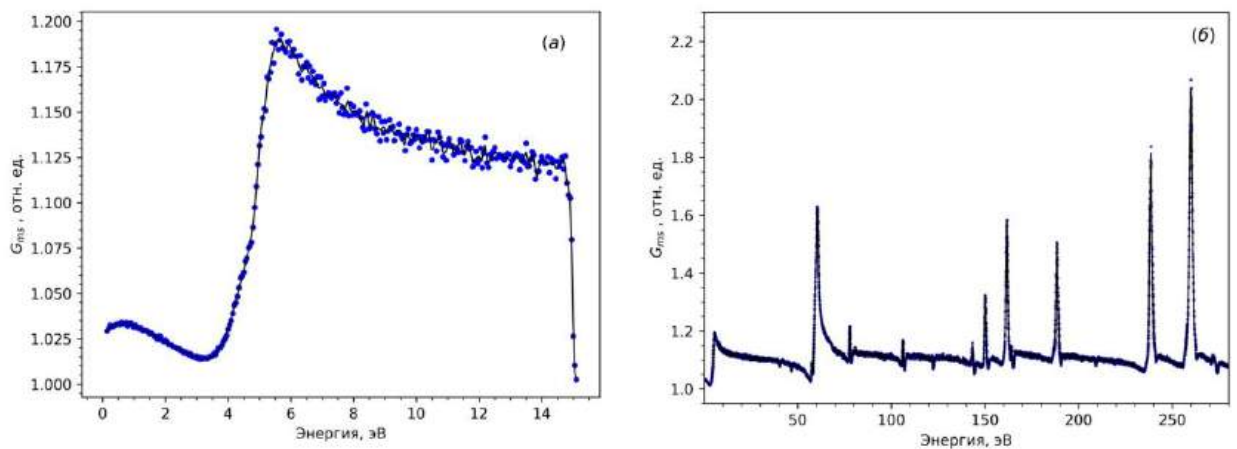


Рисунок 4.3 – (а) – Поправочная функция $G_{\text{ms}}(E)$, учитывающая изменение энергии нейтрона, вследствие многократного упругого рассеяния в образце в области резонанса 4,9 эВ. (б) – Функция $G_{\text{ms}}(E)$ для резонансов с энергией меньше 280 эВ

Измеренный $C_{\text{Au}}^{\text{exp}}$ и расчетный $C_{\text{Au}}^{\text{th}}$ времяпролетный спектр реакции (n, γ) для резонанса 4,9 эВ в образце Au показаны на рисунках 4.4а и 4.4б. Расчетный спектр $C_{\text{Au}}^{\text{th}}$ (см. рисунок 4.4а) вычисляется с учетом поправочной функции $G_{\text{ms}}(E)$, учитывающей изменение энергии нейтрона, вследствие многократного упругого рассеяния в образце. На рисунке 4.4б показан расчетный спектр $C_{\text{Au}}^{\text{th}}$ без учета функции $G_{\text{ms}}(E)$.

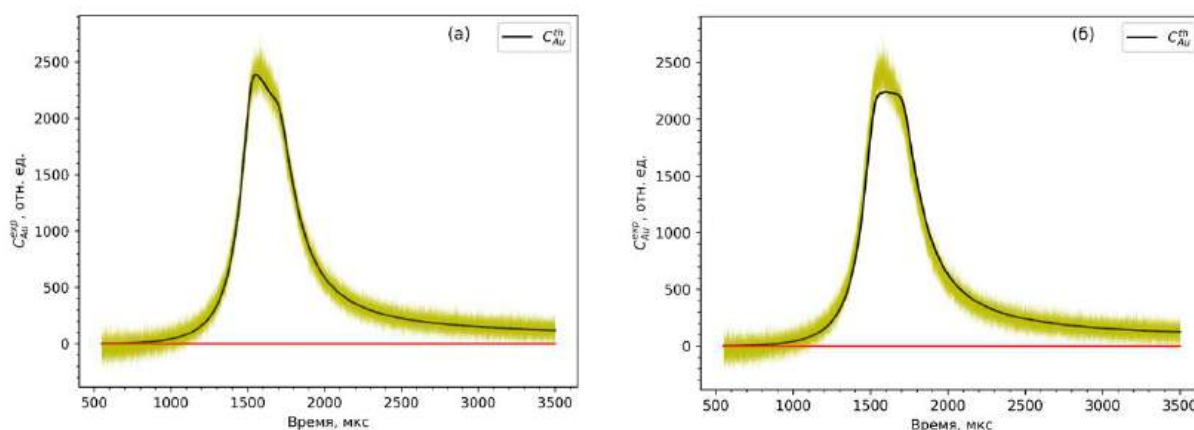


Рисунок 4.4 – (а) – Измеренный C_{Au}^{exp} спектр резонанса 4,9 эВ в диапазоне 500 ÷ 3500 мкс, расчетный C_{Au}^{th} спектр с учетом поправочной функции $G_{ms}(E)$. (б) – Измеренный C_{Au}^{exp} спектр резонанса 4,9 эВ, расчетный C_{Au}^{th} спектр без учета поправочной функции

Как видно из сравнения рисунка 4а и рисунка 4б, учет эффекта изменения энергии нейтрона вследствие многократного упругого рассеяния нейтронов в образце существенно улучшает согласие измеренного спектра с расчетным. Следует отметить, что моделирование эффекта изменения энергии нейтрона вследствие многократного упругого рассеяния нейтрона в образце и обработка данных эксперимента используют пакет ARPY (Analysis Resonances with PYthon) программ, разработанный для реконструкции сечений радиационного захвата нейтронов ядром. Пакет программ написан на языке python.

4.2. Использование регуляризирующей процедуры для обработки спектров нейтронных реакций, полученных методом СВЗ, с целью получения более точных сведений о характеристиках атомных

Физическая установка – спектрометр по времени замедления нейтронов в свинце (СВЗ-100) расположена в Экспериментальном комплексе Института ядерных исследований (ЭК ИЯИ РАН) и используется для исследования реакций взаимодействия нейтронов с ядрами изучаемых элементов. Преимуществом установки является высокая светосила, т.е. количество зарегистрированных событий на определённое количество испущенных нейтронов, например, этот показатель у метода СВЗ в 10000раз (4 порядка) выше, чем у метода времени пролёта (ВПМ).

Недостатком прибора является низкое разрешение, которое следует преодолеть. Используя функцию отклика спектрометра, можно решить задачу восстановления аппаратных спектров (обратная задача) до параметров близких к "истинным". Высокая светосила позволяет получать спектры с большим количеством зарегистрированных

событий за относительно небольшое время эксперимента. Чем больше статистика, тем с лучшей точностью восстанавливается сечение реакции.

Задача спектрометрии описывается уравнением Фредгольма 1-го рода. По известным последствиям (аппаратурный спектр) следует определить причину ("истинный" спектр), т.е. решить обратную задачу. В работе регистрировались спектры радиационного захвата нейтронов (n,γ) и спектры деления элементов под воздействием нейтронов (n,f) – аппаратурные спектры.

4.2.1 Преодоление недостатка метода СВЗ (слабое энергетическое разрешение) путём использования Ф.О. спектрометра и компьютерных технологий. Метод итераций для решения некорректных задач

В нашем случае обратная задача является некорректно поставленной, т.к. не выполняется требование устойчивости решения. Общий математический подход к решению подобных задач был разработан академиком Тихоновым А.Н. и называется методом регуляризации [38]. Конкретный способ, используемый в данной работе, называется методом итераций для нахождения приближённых решений, впервые обоснованный в [39]. Предложенный метод позволяет получить устойчивые решения задачи восстановления спектров нейтронных реакций.

4.2.2 Решение задачи восстановления спектров

Разработан программный комплекс, позволяющий путём большого количества приближающих итераций добиться получения энергетических спектров с лучшим разрешением, чем аппаратурные спектры, полученные в эксперименте, см. рисунок 4.5. На нём приводятся спектры радиационного захвата нейтронов ядрами сурьмы (естественная смесь изотопов), исходный спектр и восстановленный спектр. Как видно из графика, три неразрешённых резонанса после применения процедуры восстановления разделились. Энергетическое разрешение исходного спектра 35%, а восстановленного – 9%.

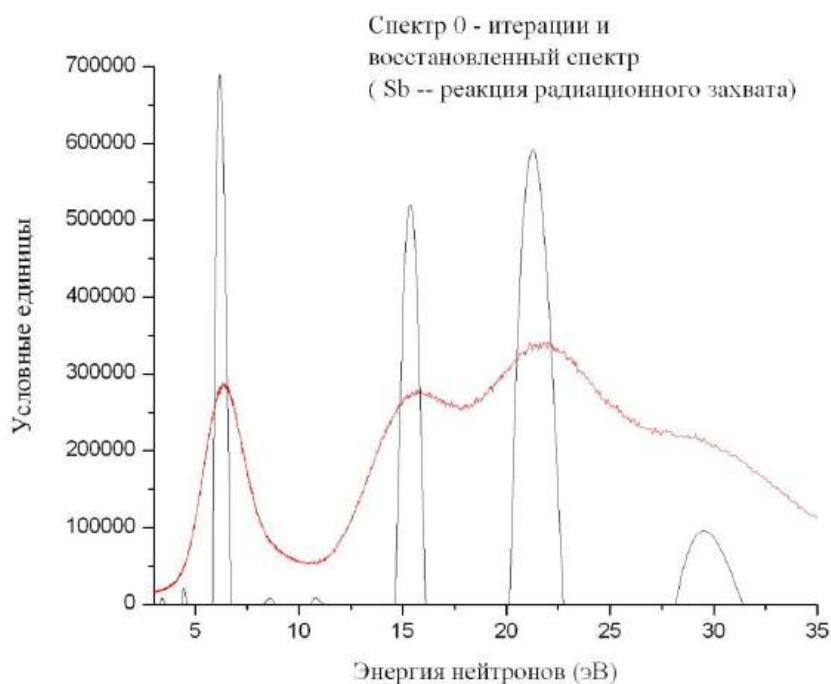


Рисунок 4.5 – Спектр 0-итерации (исходный спектр) и восстановленный методом итераций (Sb)

Проведено сравнение восстановленного спектра радиационного захвата нейтронов ядрами сурьмы с соответствующим спектром из базы данных JENDL [40], см. рисунок 4.6.

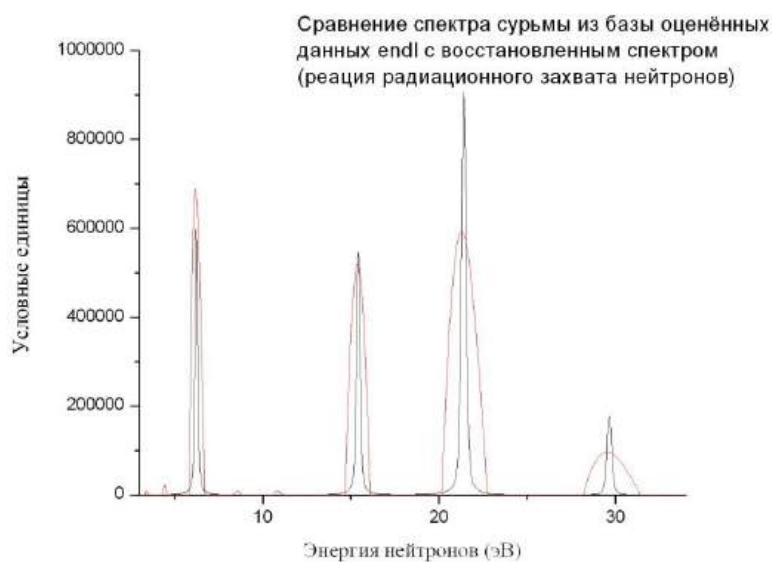


Рисунок 4.6 – Сравнение восстановленного спектра сурьмы и спектра из базы данных JENDL

Восстановлен спектр радиационного захвата нейтронов ядрами Ag (естественная смесь изотопов). Выполнена нормировка по резонансам базы оценённых данных ENDF/B [41], см. рисунок 4.7.

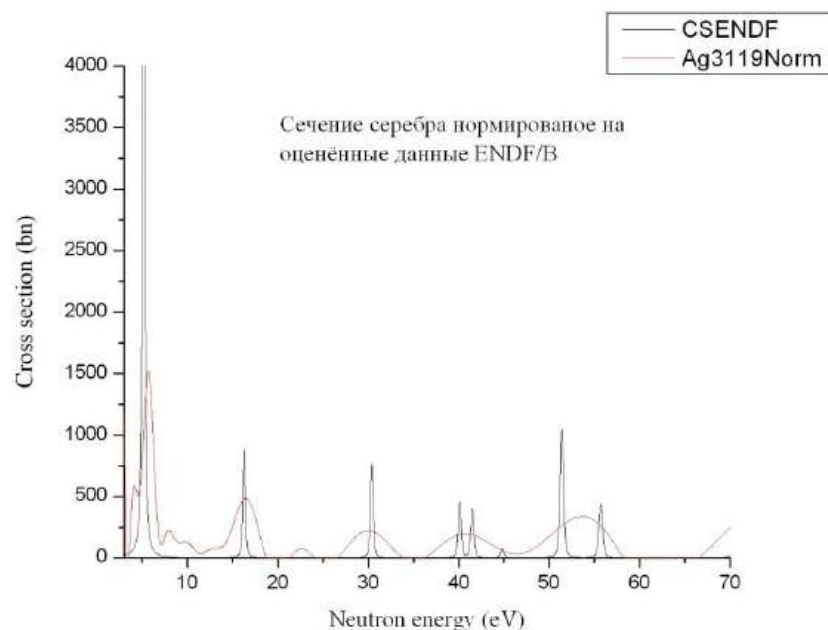


Рисунок 4.7 – Восстановленный спектр радиационного захвата нейтронов ядрами серебра, отнормированный по резонансам базы оценённых данных ENDF/B, в сравнении с оценёнными данными

Проведено сравнение спектра серебра, полученного методом СВЗ на установке ЭК ИЯИ РАН, с экспериментальным спектром, полученным методом ВПМ (время-пролётным методом (TOF - timeofflight)), взятым из международной базы экспериментальных данных EXFOR [42] (рисунок 4.8).

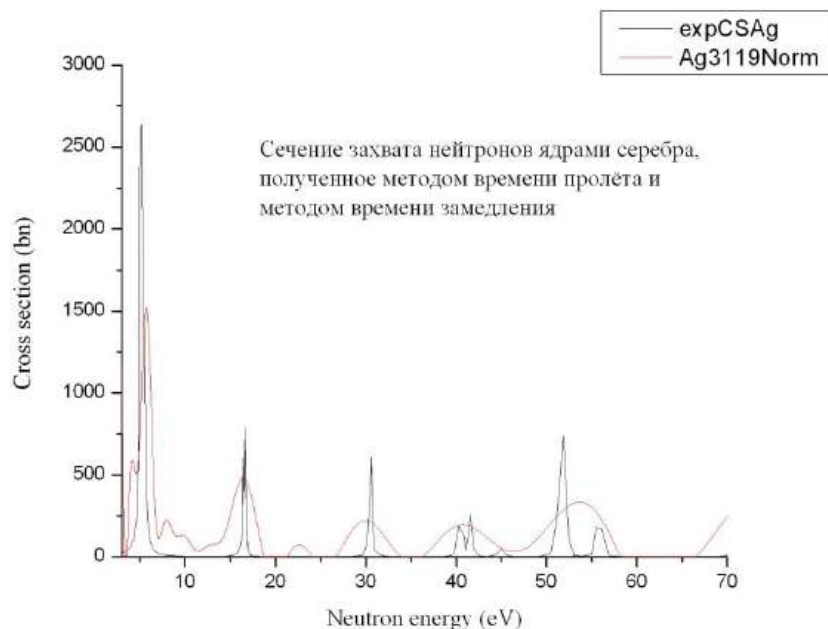


Рисунок 4.8 – Сравнение спектров радиационного захвата нейтронов ядрами серебра, полученных методами ВПМ и СВЗ

4.2.3 Формирование функции отклика спектрометра СВЗ-100

Функция отклика спектрометра (СВЗ-100), которая используется в программном комплексе, представляет собой квадратную матрицу (1901×1901) M_{tE} , характеризующую плотность вероятности зарегистрировать событие (акт деления или радиационного захвата) в момент времени t при энергии нейтрона равной E . Каждый столбец соответствует определённому времени, каждая строка соответствует определённой энергии.

Для формирования Ф.О. использовалась плотность потока нейтронов, которая определялась с использованием данных, полученных на детекторе с ${}^7_3\text{Li}$, расположенном в измерительном канале, а распределение нейтронов по энергиям в определённый момент времени определялось разложением Эджворта (квазигауссово приближение).

Вопрос определения плотности нейтронов в замедлителе с использованием детектирующих элементов, имеющих сечения реакций с нейтронами $1/V$, рассматривался в [43]. Из-за высокой светосилы нейтронного спектрометра СВЗ-100 требуются нейтронные счётчики, способные регистрировать сверхвысокие потоки частиц. Необходимо, чтобы детектор имел минимальные размеры, маленькую массу и высокое быстродействие.

Использовалась функция отклика СВЗ-100, где в качестве спектральной характеристики временного канала бралось разложение Эджворта с параметрами эксцесса и асимметрии, рекомендуемыми в работе [44].

На каждом шаге итерации вычислялся псевдоаппаратурный спектр исследуемого образца, и делалась поправка восстанавливаемого спектра на величину разницы между аппаратурным и вычисленным спектрами. Работу модуля вычислителя псевдоаппаратурного спектра можно проиллюстрировать рисунком 4.9.

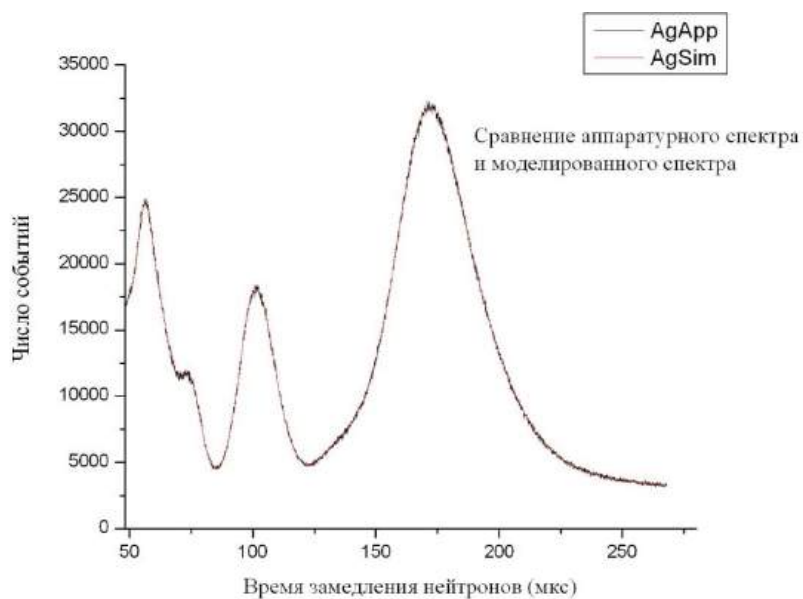


Рисунок 4.9 – Сравнение аппаратурного спектра (чёрный) с вычисленным (красный)

На нём аппаратный спектр и вычисленный спектр реакции радиационного захвата нейтрона ядрами естественной смеси элемента Ag. Как видно, графики хорошо совпадают за исключением начальной и конечной частей, где проявляются краевые эффекты функции отклика. Значение критерия согласия Пирсона, при погрешности на один временной канал в одно стандартное отклонение, в среднем на канал равно 2.

4.3. Создание комплекса программ на основе ранее развитой в ИЯИ РАН модели SMM (статистическая модель мультифрагментации) для расчета образования ядерных фрагментов в реакциях инициированных лептонами, адронами, и ядрами средних и высоких энергий

Продолжена работа, направленная на развитие моделей образования (динамическая стадия) и распада (статистическое описание) возбужденной гиперядерной и нормальной ядерной материи. Исследуются процессы испарения, Ферми-развала, деления и мультифрагментации с обобщением на гиперядра.

Для расчета образования (гипер-)ядерных фрагментов, протонов и нейтронов при девозбуждении ядер и распаде горячей расширяющейся ядерной материи был предложен новый теоретический подход [45,46]. Мы модифицировали развитую в ИЯИ РАН модель SMM (статистическая модель мультифрагментации) для описания фрагментации при быстром расширении материи и детально сравнили с фрагментацией в обычном состоянии, т.е., случаи локального и глобального химического равновесия в веществе [46]. Модель включает в себя расчет начального взаимодействия адронов с помощью динамических подходов (например, DCM - Дубненская Каскадная Модель) и впервые предлагает рассматривать образование фрагментов и нуклонов как результат локального взаимодействия в малых конечных системах в переходной области ядерного фазового перехода типа жидкость-газ. Было продемонстрировано убедительное описание имеющихся экспериментальных данных [45, 47, 48,49].

Такие фрагментационные процессы существуют во всех ядерных реакциях при промежуточных и высоких энергиях, включая ядро-ядерные столкновения на ускорителях ОИЯИ (Дубна). Недавно выполненные и планируемые в ОИЯИ эксперименты будут проанализированы: Сотрудничество с MPD, FASA и другими экспериментальными коллаборациями в ОИЯИ установлено. Результаты опубликованы в работе [46].

4.4. Развитие новых методов ядерно-физических исследований (совместно с ОИЯИ)

Нейтронные резонансы характеризуют состояния компаунд-ядра и для изучения этих состояний требуется знание параметров резонанса, полной и парциальных ширин,

спина и четности состояния, а также статистические свойства этих состояний (распределение расстояний между резонансами, распределение ширин).

Исследование Р-четных корреляций дает возможность определить парциальные нейтронные ширины р-волнового резонанса, знание которых позволяет точно рассчитать матричный элемент слабого нейтрон-ядерного взаимодействия. Исследование энергетической зависимости асимметрии вылета гамма квантов вперед-назад может быть применено для поиска нарушения Т-инвариантности.

4.4.1. Исследование низлежащих р-волновых нейтронных резонансов

Цель работы – исследование р-волновых резонансов, в том числе с целью определения парциальных нейтронных ширин и последующей проверки соответствия распределений этих ширин стандартным статистическим моделям, поиск Т-неинвариантных эффектов.

Работы по развитию новых методов исследования фундаментальных взаимодействий при низких энергиях нейтронов ведутся совместно с ЛНФ ОИЯИ согласно «Соглашению о сотрудничестве № 129» о выполнении совместной научно-исследовательской работы. Измерения ведутся на импульсном источнике нейтронов ИРЕН.

В процессе проведения пусконаладочных работ и предварительных измерений было выявлено искажение формы резонансов в результате захвата рассеянных нейтронов образцом. Для экспериментального измерения вклада этого процесса, установка была дополнена дополнительной пролетной базой, с целью одновременного измерения, как канала (n,y)-реакции, так и полного сечения взаимодействия нейтронов с исследуемыми ядрами.

В новом варианте прототипа установки «ГАММА» измерения ведутся одновременно на 11-ти метровой и 16-ти метровой пролетных базах.

На 11-ти метровой базе измерялся выход γ -квантов в зависимости энергии падающих нейтронов и от угла вылета γ -квантов, с помощью 6-ти BGO-сцинтилляционных детекторов, которые располагались на расстоянии 15 см от образца. Использование BGO-сцинтилляционных детекторов позволяет измерять амплитудные спектры γ -квантов.

На 16-ти метровой пролетной базе был установлен детектор нейтронов, который представлял собой смесь окислов редкоземельных элементов для конвертации нейтронов в γ -кванты, которые регистрировались двумя BGO-сцинтилляционными детекторами. Эффективность регистрации резонансных нейтронов составляла $\approx 40\%$.

Аналоговые сигналы с детекторов приходили на оцифровщик ЦРС-32 работающий с тактовой частотой 200 МГц. Оцифровщик управлялся программой “romana”, которая

могла оперативно представлять времяпролетные, амплитудные спектры и сохранять оцифрованные сигналы в памяти компьютера. В связи с появлением 16-ти метровой пролетной базы была выполнена модернизация программы “romana” (представление выхода реакции от энергии падающих нейтронов).

На рисунке 4.10 представлены фрагмент спектра выхода γ -квантов после вычитания фоновой подложки (черная линия) и фрагмент спектра пропускания после вычитания гладкой части сечения. Видно, что форма резонансов различна и максимумы сдвинуты.

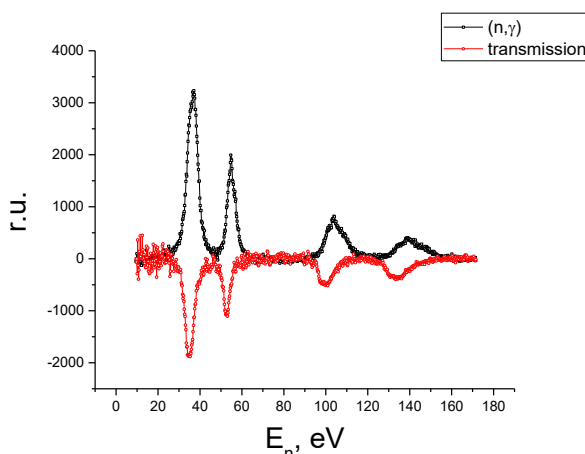


Рисунок 4.10 – Фрагмент спектра выхода γ -квантов после вычитания фоновой подложки (черная линия) и фрагмент спектра пропускания после вычитания гладкой части сечения

На рисунке 4.11 представлены экспериментально определенные энергии низколежащих резонансов ^{79}Br и ^{81}Br в зависимости от их табличных значений.

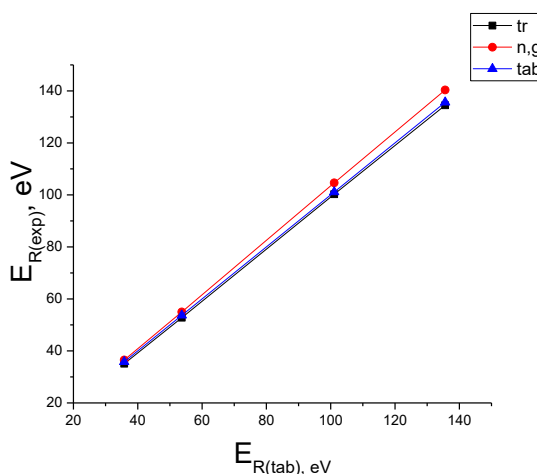


Рисунок 4.11 – Экспериментально определенные энергии низколежащих резонансов ^{79}Br и ^{81}Br в зависимости от их табличных значений (\blacktriangle – табличные значения положения резонансов, \blacksquare – значения положения резонансов, определенные в пропускании, \bullet – значения положения резонансов, определенные в (n,γ) -реакции)

Видно, что положения резонансов, определенные в измерениях пропускания практически совпадают с табличными значениями.

Отклонение положения резонансов, определенных в измерениях в (n,γ) -реакции, можно объяснить вкладом γ -квантов от захвата исследуемым образцом рассеянных нейтронов.

4.4.2. Разработка методики измерения и обработки времяпролетных и амплитудных спектров гамма квантов в р-волновых резонансах

Для развития методики измерения и обработки времяпролетных и амплитудных спектров гамма квантов в р-волновых резонансах нами был выбран хлор. Во первых, хлор имеет хорошо выделенный р-волновой резонанс при энергии 398 эВ, во вторых, на хлоре был обнаружен Р-нечетный эффект в (n,p) - и в (n,γ) -реакциях в области тепловых нейтронов и, в третьих, Р-четную асимметрию никто не наблюдал.

Общее время измерения для реакции $^{35}\text{Cl} (n,\gamma)$ составило около 25 часов. Использовалась порошковая мишень CaCl_2 размером $20 \times \varnothing 80$ мм³. Угловое распределение измерялось с помощью 6-ти сцинтилляционных детекторов на основе кристаллов BGO, установленных под углами 55°, 90°, 125°, 235°, 270° и 305° относительно импульса нейтрона. Эффективность регистрации γ -квантов с энергией 1,1 МэВ и 1,3 МэВ составила $5 \cdot 10^{-3}$. На рисунке 4.12 представлена типичная параболическая зависимость энергии гамма квантов от каналов.

Все детекторы были настроены так, чтобы измеряемые гамма спектры были одинаковы. Калибровка детекторов проводилась по линиям ^{137}Cs (661 кэВ), ^{60}Co (1173 кэВ и 1330 кэВ), ^{228}Th (2620 кэВ), линии 4430 кэВ и 7600 кэВ реакции $^{56}\text{Fe}(n,\gamma)^{57}\text{Fe}$. На рисунке 4.12 представлены результаты калибровки одного из детекторов.

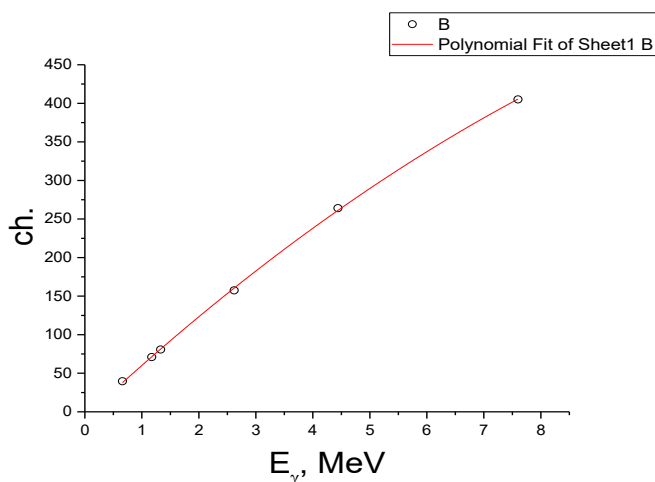


Рисунок 4.12 – Типичная калибровка зависимости канала от энергии гамма квантов

Каждый детектор был прокалиброван со своими коэффициентами, так чтобы амплитудные спектры всех детекторов совпадали.

Времяпролетный спектр гамма квантов (n,y)-реакции был переведен в спектр зависимости от энергии налетающих нейтронов. На рисунке 4.13 представлены амплитудные спектры гамма квантов. Черная линия – амплитудный спектр гамма квантов в области р-волнового резонанса (390 – 404 эВ), красная линия – амплитудный спектр гамма квантов в области энергий нейтронов ниже (378 – 389 эВ) и выше (403 – 413 эВ) р-волнового резонанса. Видно различие амплитудных спектров гамма квантов, особенно ярко выделена линия 2,23 МэВ (n, γ)-реакции на водороде. Именно по этой линии была сделана нормировка спектров так, чтобы интеграл полного поглощения этой линии был одинаков в обеих областях.

На рисунке 4.14 представлен спектр амплитуд гамма квантов (n,y)-реакции при захвате р-волновых нейтронов с энергией 398 эВ.

В отличие от измерений асимметрии вперед-назад и право-левой асимметрии в (n,y)-реакции на ядрах ^{117}Sn и ^{113}Cd в работе [50], где доминировала линия высоко энергичного E1 перехода, в (n,y)-реакции на ядрах ^{35}Cl такой линии нет. В работе [51] было показано в случае каскада гамма квантов, величина асимметрии вперед-назад случайным образом зависит от конечного состояния и в принципе может зануляться. Тем не менее, мы использовали для определения асимметрии вперед-назад переход 1959 кэВ.

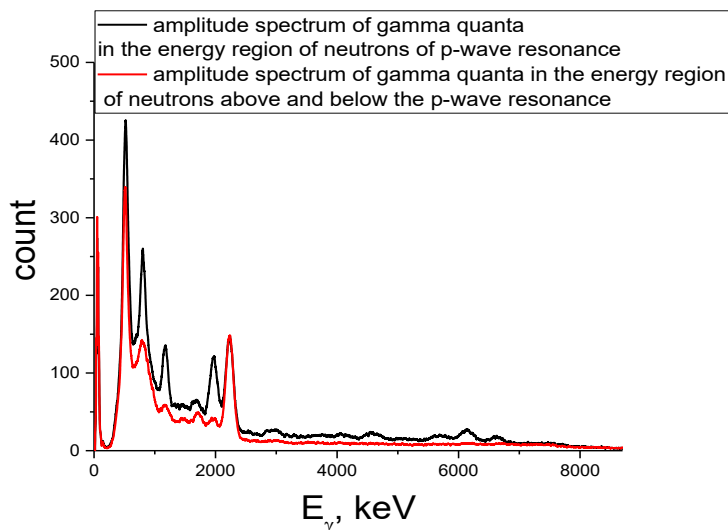


Рисунок 4.13 – Амплитудный спектр гамма квантов в области энергий нейтронов р-волнового резонанса

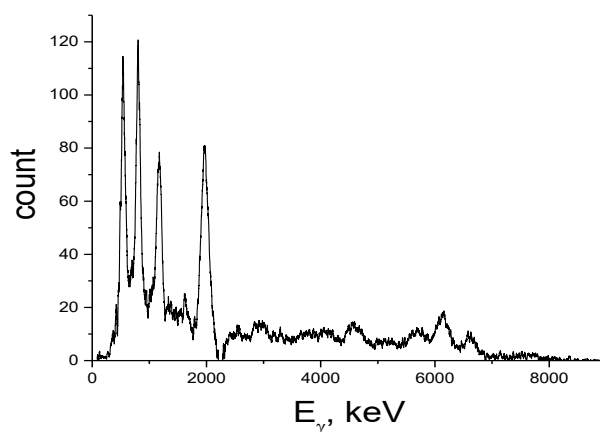


Рисунок 4.14 – Амплитудный спектр гамма квантов, связанный с захватом нейтронов р-волнового резонанса

Результаты измерений асимметрии вперед-назад представлены на рисунке 4.15.

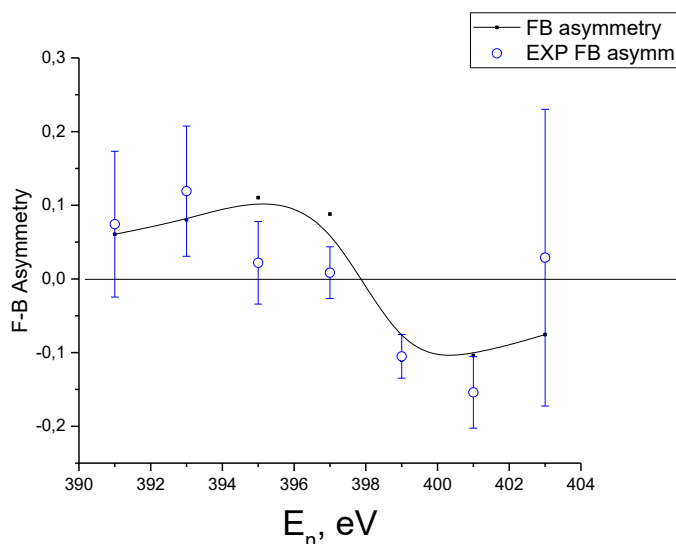


Рисунок 4.15 – В верхней части счет гамма квантов вперед и назад в зависимости от энергии нейтронов. В нижней части энергетическая зависимость коэффициента асимметрии вперед-назад

Видно, что асимметрия вперед-назад примерно в 3 раза меньше асимметрии, полученной в работе [50]. Это связано с плохим временным разрешением на 11-ти метровой пролетной базе.

Результаты работы представлены на ISINN-31: тезисы 10 - 12 Приложения А4.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

План работ на 2025 год выполнен полностью. Получены значимые научные результаты.

1. Задача «Развитие экспериментальной базы импульсного нейтронного источника ИН-06 ИЯИ РАН для исследования конденсированных сред»

Проведена разработка программного обеспечения, позволяющего создавать современные блоки TDC. Разработка ПО позволила ускорить разработку новых модулей TDC и обеспечить оптимизацию оборудования под конкретный эксперимент.

Построена цифровая модель эксперимента для оптимизации оптических параметров сцинтилляционного детектора нейтронов. Модель позволяет варьировать материалы и производить оценку параметров, а также ускорять разработку новых типов сцинтилляционных детекторов.

С помощью Монте-Карло моделирования проведен анализ вариантов оптимизации нейтронновода установки МНС на источнике ИН-06. Проведенные численные эксперименты показали, что приближение нейтронновода на 3,5 м дает повышение интенсивности на 15% при $\lambda > 4\text{А}$, использование никелевых зеркал дает выигрыш уже 40 % при $\lambda > 4\text{А}$, а с использованием суперзеркал с $m = 2 - 3$ раза уже при $\lambda > 2\text{А}$. Удаление же коллиматоров не дает существенного выигрыша.

Разработан высокоэффективный детектор тепловых нейтронов. Впервые применены аддитивные технологии для производства световода детекторов. Это позволило использовать множество слоев сцинтиллятора (7 шт.) и значительно повысить эффективность регистрации тепловых нейтронов, а также уменьшить сложность производства.

Разработан метод повышения эффективности регистрации нейтронов, основанный на использовании отражателя на основе пластика. Метод позволяет повысить эффективность регистрации детектора нейтронов без значительного усложнения конструкции.

Разработан высокоэффективный детектор тепловых нейтронов. Впервые применены аддитивные технологии для производства световода детекторов. Это позволило использовать множество слоев сцинтиллятора (7 шт.) и значительно повысить эффективность регистрации тепловых нейтронов, а также уменьшить сложность производства.

2. Задача «Исследования структур перспективных материалов, в том числе при экстремальных нагрузках (высоких давлениях, низких температурах, сильных магнитных полях)»

Показано, что мёссбауэровская спектроскопия ^{119}Sn является эффективным методом изучения особенностей магнитной структуры различных соединений. В магнитных кристаллах, содержащих диамагнитное олово, магнитное поле на ядрах ^{119}Sn возникает вследствие переноса спиновой плотности от магнитного атома к атомам Sn. Величина спиновой плотности и направления спинов хорошо контролируются мёссбауэровской спектроскопией ^{119}Sn . Исследование магнитных свойств сплава $\text{GdCuSn}_{0.85}\text{Ge}_{0.15}$ методом мёссбауэровской спектроскопии ^{119}Sn , а также методами измерения магнитной восприимчивости и рентгеновской дифракции, выявило особенности магнитной структуры и магнитных фазовых переходов как в основном соединении $\text{GdCu}(\text{Sn}/\text{Ge})$, так и в примесной фазе $\text{Gd}_3\text{Cu}_4\text{Sn}_4$ этого сплава. В результате анализа кристаллической и магнитной структуры сплава, а также механизма формирования магнитного поля $^{\text{Sn}}\mathbf{H}_{\text{hf}}$ на олове установлено, что спиновая плотность на атомах Sn упорядочена как антиферромагнитная структура.

Разработано программное обеспечение для обработки массивов данных получаемых при тестировании сцинтилляционных детекторов. Программное обеспечение позволяет существенно повысить производительность исследований, минимизировать влияние человеческого фактора и внедрить стандартизированные методы анализа, в том числе и использование искусственного интеллекта.

Разработано программное обеспечение для автоматизации измерения диэлектриков, в том числе и с использованием камер высокого давления. Программа реализует исследования зависимости сопротивления от температуры, позволяет установить пределы температуры для защиты камеры высокого давления от разрушения и автоматизировать измерения сопротивления.

С помощью рентгеновской дифракции охарактеризован образец сплава $\text{GdCuSn}_{0.85}\text{Ge}_{0.15}$, синтезированный методом дуговой плавки

Выяснена природа фононного триплета в области валентных мод ОН в материалах с водородными связями, которая часто объясняется взаимодействием валентных мод ОН, а также комбинаций и обертонов деформационных мод ОН.

3. Задача «Поддержание и развитие нейтронных источников (ИН-06, РАДЭКС, СВЗ-100) и разработка новых»

Продолжена работа по определению основных геометрических, тепловых, механических и нейтронных характеристик бериллиевой мишени с большим сроком службы для компактных импульсных источников тепловых и холодных нейтронов с низкими фонами от промежуточных, быстрых нейтронов и гамма-квантов. Продолжены исследования по изучению спектров гамма-активности водного теплоносителя и его отличия от спектров исследовательских водоохлаждаемых реакторов и диагностики возможных протечек.

Исследования выполнялись с использованием программных комплексов MCNPX, SHIELD и инженерных расчетов и имеющейся в наличии приборной базы. Продемонстрирована возможность создания долгоживущей бериллиевой мишени для компактных импульсных источников тепловых нейтронов с низким фоном промежуточных, быстрых нейтронов и гамма-квантов. Результаты использованы при разработке проектно-конструкторской документации прототипа вращающейся мишени с горизонтальной осью вращения и дальнейшего развития этого направления.

Проведено моделирование компактного источника нейтронов для протонных ускорителей. Моделирование позволило оптимизировать геометрию замедлителя и получить требуемый энергетический нейтронный спектр для медицинских применений

4. Задача «Исследования по физике деления и нейтрон – ядерных взаимодействий»

Подготовлена версия пакета ARPY (Analysis Resonances with PYthon) программ для реконструкции сечений радиационного захвата нейтронов ядром. Проведен один сеанс установки ИНЕС с образцами золота ^{197}Au и тантала ^{181}Ta на импульсном источнике нейтронов РАДЭКС центра коллективного пользования (ЦКП) ИЯИ РАН. Измерена зависимость в спектре нейтронов пучка от энергии. Определена функция разрешения TOF спектрометра, которая хорошо описывает форму резонансов. Разработана процедура определения зависимости фона от времени. Разработана Монте-Карло процедура для вычисления эффекта многократного рассеяния нейтронов в образце, которая существенно улучшает согласие измеренного спектра с расчетным.

Работа по использованию регуляризирующей процедуры для обработки спектров нейтронных реакций, полученных методом СВЗ-100, с целью извлечения более точных сведений о характеристиках атомных ядер выполнена с использованием программного комплекса, использующего функции отклика спектрометра (Ф.О.). Получены спектры

веществ со значительно лучшим энергетическим разрешением. Значения энергий уровней захвата нейтронов определены с повышенной точностью. С улучшением разрешения спектров нейтронных реакций возможно определение изотопного состава изучаемого микро-образца.

С помощью метода СВЗ, который имеет высокую чувствительность за счёт огромной светосилы, можно исследовать вещества в микроколичествах, ядерные реакции с малым сечением, а затем, путём применения регуляризирующей процедуры, получать результаты приемлемой точности.

В работе по созданию комплекса программ на основе ранее развитой в ИЯИ РАН модели SMM (статистическая модель мультифрагментации) для расчета образования ядерных фрагментов в реакциях инициированных лептонами, адронами и ядрами средних и высоких энергий были предложены модификации существующих программ для моделирования результатов столкновений тяжелых ядер при средних и высоких энергиях.

В работе по развитию новых методов ядерно-физических исследований модернизирован прототип установки для исследования низколежащих р-волновых нейтронных резонансов, на котором выполнены предварительные исследования р-волнового резонанса ^{35}Cl при энергии 398 эВ, указывающие на наличие асимметрии вперед-назад. Создана методика описания формы изолированного резонанса с учетом рассеяния нейтронов и с учетом функции разрешения.

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

1. Development of a 100 ps TDC based on a Kintex 7 FPGA for the high granular neutron time-of-flight detector for the BM@N experiment / D. Finogeev [et al.] // Nuclear Instruments and Methods in Physics Research: Section A. – 2024. – Vol. 1059. – P. 168952. – DOI: 10.1016/j.nima.2023.168952.
2. Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2025689369 Российская Федерация. Программное обеспечение для проведения эксперимента и накопления данных при измерениях методом Time-Of-Flight (TDC_Counter_Universal): № 2025687869: Заявл. 14.10.2025: Оpubл. 28.10.2025 / Д. Н. Трунов: Заявитель – Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт ядерных исследований Российской академии наук.
3. Многофункциональный нейтронный спектрометр для интенсивного импульсного источника нейтронов Московской Мезонной Фабрики / А.И. Исаков [и др.] // Препринт ФИАН №18. – М.: ФИАН, 1994. – 42 с.
4. VITESS. – URL: <http://www.helmholtz-berlin.de/vitess> (дата обращения 12.05.2021).
5. Enhanced high-sensitivity multi-layer neutron detector based on LiF:ZnS(Ag) scintillator / I.C. Zada [et al.] // Scientific Reports. – 2024. – Vol. 14. – P. 31446. – DOI: 10.1038/s41598-024-83129-5.
6. Nanoparticle ZnS:Ag/LiF – a new high count rate neutron scintillator with pulse shape discrimination / S. Mann [et al.] // Journal of Physics D: Applied Physics. – 2024. – Vol. 57. – DOI: 10.1088/1361-6463/ad5021.
7. Scintillation neutron detectors based on solid-state photomultipliers and lightguides / V.S. Litvin [et al.] // Crystallography Reports. – 2016. - Vol. 61. – P. 106 - 110.
8. Моделирование сцинтилляционного линейного нейтронного счетчика с органическим отражателем нейтронов / Д. А. Бучный [и др.] // Конференция по использованию рассеяния нейтронов в исследовании конденсированных сред «РНИКС-2025»: Тезисы докладов / г. Томск, (29 сентября — 3 октября 2025 г.). – г. Екатеринбург: ИФМ УрО РАН, 2025. – С. 60.
9. Antiferromagnetic ordering of the spin density at diamagnetic Sn atoms transferred from Gd in the alloy GdCuSn_{0.85}Ge_{0.15} / S. N. Aksenov [et al.] // Physica Scripta. – 2025. – V. 100. – P. 0759a1. – <https://doi.org/10.1088/1402-4896/ade20>.

10. Nakhostin M. A General-Purpose Digital Pulse Shape Discrimination Algorithm // IEEE Transactions on Nuclear Science. – 2019. – Vol. 66. – No. 5. – P. 838 - 845. – DOI: 10.1109/TNS.2019.2910153.
11. Real time Pulse Shape Discrimination in nanoparticle ZnS:Ag/6LiF neutron detectors / Mann S. [et al.] // 2024 IEEE NSS/MIC/RTSD Conference Proceedings. Tampa, USA, 2024. DOI: 10.1109/NSS/MIC/RTSD57108.2024.10656390.
12. Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2025689178 Российская Федерация. Программное обеспечение для пакетной обработки осциллограмм сцинтилляционного детектора нейтронов (Peak analyses): № 2025687870: Заявл. 14.10.20254: Оpubл. 27.10.2025 / Д. Н. Трунов: Заявитель – Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт ядерных исследований Российской академии наук.
13. Yamane R. Technical Developments of High-Pressure Dielectric Measurement // The Review of High Pressure Science and Technology. – 2022. – Vol. 32. – No. 3. – P. 147–156. – DOI: 10.4131/jshpreview.32.147.
14. Accurate measurements of high pressure resistivity in a diamond anvil cell / C. Gao [et al.] // Review of Scientific Instruments. – 2005. – Vol. 76. – P. 083912. – DOI: 10.1063/1.2006347.
15. Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2025689440 Российская Федерация. Программное обеспечение для проведения измерений сопротивления диэлектриков при криогенных температурах в камерах высокого давления (Dielectric measure): № 20255687868: Заявл. 14.10.2025: Оpubл. 28.10.2025 / Д. Н. Трунов: Заявитель – Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт ядерных исследований Российской академии наук.
16. Geant4: A game changer in high-energy physics and related applicative fields / T. Basaglia [et al.] // Future Generation Computer Systems. – 2024. – Vol. 159. – P. 411–422. – DOI: 10.1016/j.future.2024.05.042.
17. Recent developments in Geant4 / Allison J. [et al.] // Nuclear Instruments and Methods in Physics: Research Section A. – 2016. – Vol. 835. – P. 186–225. – DOI: 10.1016/j.nima.2016.06.125.
18. Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2025689370 Российская Федерация. Программа расчёта эффективности и моделирования оптических параметров сцинтилляционных детекторов нейтронов с пластиковым световодом (SC_PMMA_Model): № 2025687871: Заявл. 14.10.2025: Оpubл. 28.10.2025 / Д.

Н. Трунов: Заявитель – Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт ядерных исследований Российской академии наук.

19. Hydrogen modes in KH_2PO_4 under pressure from ab initio calculations and inelastic neutron scattering / V.A. Abalmasov [et al.] // Physical Review. – 2025. – Vol. 112. – P. 214101. – <https://doi.org/10.1103/r9gl-4j51>.

20. Interplay between grain boundaries and radiation damage / Barr C.M. [et al.] // JOM. – 2019. – Vol. 71. – P. 1233.

21. Horsewell A., Singh B.N. Influence of grain and subgrain boundaries on void formation and growth in aluminum irradiated with fast neutrons // Radiation induced changes in microstructure: 13th International symposium, ASTM STP 955. / Ed. Garner F.A. [et al]. – Philadelphia: ASTM, 1987. – P. 220.

22. Foreman A.J.E., Singh B.N., Horsewell A. Diffusion mechanisms for enhanced vacancy accumulation near planar sinks // Materials science forum volumes. – 1987. – Vol. 15–18. – P. 895.

23. Singh B.N., Horsewell A. Effects of fission neutron and 600 MeV proton irradiations on microstructural evolution in OFHC-copper // J. Nucl. Mater. – 1994. – Vol. 212–215. – P. 410.

24. Chen C.W., Buttry R.W. Void formation and denudation in ion-irradiated nickel // Radiation Effects. – 1981. – Vol. 56. – P. 219.

25. Norris D.I.R. Voids in irradiated metals (part I) // Radiation Effects. – 1972. – Vol. 14. – P. 1.

26. Target-Moderator-Reflector system for 10–30 MeV proton accelerator-driven compact thermal neutron source: Conceptual design and neutronic characterization / B. Jeon [et al.] // Nuclear Engineering and Technology. – 2020. – Vol. 52. – №. 3. – P. 633–646. – <https://doi.org/10.1016/j.net.2019.08.019>.

27. Inada T., Kawachi K., Hiramoto T. Neutrons from thick target beryllium (d,n) reactions at 1.0 MeV to 3.0 MeV // Journal of Nuclear Science and Technology. – 1968. – Vol. 5. – №. 1. – P. 22–29. – <https://doi.org/10.1080/18811248.1968.9732391>.

28. Dementyev A.V., Sobolevsky N.M. SHIELD - universal Monte Carlo hadron transport code: scope and applications // Radiation Measurements. – 1999 – Vol. 30. – P. 553–557. – [https://doi.org/10.1016/S1350-4487\(99\)00231-0](https://doi.org/10.1016/S1350-4487(99)00231-0).

29. Сидоркин С.Ф., Коптелов Э.А. Импульсный источник нейтронов ИЯИ РАН для исследования конденсированных сред // Поверхность. Рентгеновские, синхротронные и нейтронные исследования. – 2013. – № 6. – С. 97-112.
30. Импульсные источники нейтронов ИЯИ РАН / С.Ф. Сидоркин [и др.] // Сборник трудов научно-технической конференции «Ядерные и электрофизические установки – источники мощных ионизирующих излучений» / г. Снежинск, (15 - 18 июня 2021 г.). – Снежинск: Издательство РФЯЦ – ВНИИТФ, 2022. – С. 64 - 80.
31. A comparative analysis of GEANT4, MCNP6 and FLUKA on proton-induced gamma-ray simulation / H. Freitas [et al.] // Medical Physics. – 2025. – Vol. 52. – No. 6. – P. 4862 - 4870. – <https://doi.org/10.1002/mp.17754>.
32. Моделирование источника нейтронов на основе ускорителей электронов в GEANT4 / А. В. Белоусов [и др.] // Известия вузов. Ядерная энергетика. – 2019. – № 1. – С. 230–237. – <https://doi.org/10.55176/2414-1038-2019-1-230-237>.
33. Сиксин В. В., Трунов Д. Н. Особенности моделирования источника нейтронов (КИНК) для протонных ускорителей и применение плазмонных наночастиц золота в комбинированных видах протонной и нейтронной терапии // Материалы VII Международной конференции «Математическое моделирование в материаловедении электронных компонентов (МММЭК–2025)» / г. Москва, (20 – 22 октября 2025 г.). – Москва: МАКС Пресс, 2025. – С. 178 – 180. – <https://doi.org/10.29003/m4760.MMMSEC-2025>.
34. Сиксин В.В., Трунов Д.Н. Моделирование компактного источника нейтронов для протонных ускорителей и его применение в терапии плазмонных наночастиц // Известия высших учебных заведений. Материалы электронной техники. – 2025. – Т. 28(3). – <https://doi.org/10.17073/1609-3577j.met202509.659>.
35. Васильев И.А., Джилкибаев Р.М., Хлюстин Д.В. Исследование формы сигналов в He3 счетчике при регистрации нейтронов // Приборы и техника эксперимента. – 2020. – №2. – С. 13 – 20. – <https://doi.org/10.1134/S0020441221010152>.
36. Васильев И.А., Джилкибаев Р.М., Хлюстин Д.В. Гамма-детектор установки ИНЕС для измерения нейтронных сечений // Приборы и техника эксперимента. – 2021. – № 1. – С. 56 – 65. - <https://doi.org/10.1134/S0020441220010236>.
37. ^{197}Au (n, γ) cross section in the resonance region / Massimi C. [et al.] // Physical Review C. – 2010. – № 81. – P. 044616. <https://doi.org/10.1103/PhysRevC.81.044616>.

38. Тихонов А.Н., Арсенин В.Я. Методы решения некорректных задач – М: Наука, 1979. – 284с.
39. Фридман В.М. Метод последовательных приближений для интегральных уравнений Фредгольма 1-го рода // УМН.– 1956.– 11.– №1.
40. База оценённых данных JENDL-4.0. –
URL: <https://www.ndc.jaea.go.jp/jendl/j40/j40>. (Дата обращения 2016.02.20).
41. База оценённых данных ENDFURL. –
URL: <https://www-nds.iaea.org/exfor/servlet/E4sMakeE4> (дата обращения 2025.11.19).
42. База экспериментальных данных EXFOR.URL: <https://www-nds.iaea.org/exfor/servlet/X4sMakeX4> (дата обращения 2025.11.19).
43. Илиева К.Д., Казарновский М.В. Нестационарный перенос нейтронов (теория и приложение). – София: Издательство болгарской академии наук, 1984. – 136 с.
44. Шорин В.С. Компьютерная модель спектрометра нейтронов по времени замедления в свинце // ВАНТ. Сер. Ядерные константы. – 2008. – Вып. 1-2. – С.60 – 86.
45. Buyukcizmeci N., Lebed Y. B., Botvina A. S. Dynamical and statistical simulations for the production of nuclei and hypernuclei at high energy ion collisions // Physics of Particles and Nuclei Letters. – 2024. – Vol. 21, №5. – P. 983 – 986. –
<https://doi.org/10.1134/S1547477124701516>.
46. Lebed Yu. B, Botvina A. S. Mechanism of statistical nucleosynthesis in rapidly expanding nuclear matter // Physics of Atomic Nuclei. – 2025. – V. 88. – P. 786 - 804. –
<https://doi.org/10.1134/S1063778825600551>.
47. Botvina A. Statistical mechanism of nucleation in rapidly expanding nuclear matter // 3rd International Workshop on Nuclear Theory (INTW2024) "Nuclei and hypernuclei in relativistic ion collisions": Invited talk / Kemer (Antalya), Turkey (September 29 - October 5, 2024). – <https://intw2024.selcuk.edu.tr/index.php/participants>.
48. Botvina A. Nucleosynthesis of exotic nuclei and hypernuclei in expanding nuclear matter after relativistic collisions // 14th MPD meeting: Invited talk / Dubna, Russia, (16 October, 2024). – <https://indico.jinr.ru/event/4806/timetable/#all.detailed>.
49. Botvina A. Statistical modeling of nuclei/hypernuclei in heavy-ion collisions // 5-th International Nuclear Theory Workshop, Educational seminars: Invited talk / Selcuk University. – Konya, Turkey (September 23 - 25, 2025).

50. Measurement of the angular distribution of prompt gamma-rays emitted in the $^{117}\text{Sn}(n, \gamma)$ reaction for a T-violation search / J. Koga [et al.] // EPJ Web Conf. – 2019. – Vol. 219. – P. 09004.
51. Flambaum V.V., Sushkov O.P. Angular and polarization correlations in the (b, γ) reaction // Nucl. Phys. A. – 1985. – Vol. 435. – P. 352.

ПРИЛОЖЕНИЕ А

Список публикаций исполнителей отчета за 2025 г.

А.1 Статьи в журналах из «Белого списка» на 2025 (протокол заседания Межведомственной рабочей группы по формированию и актуализации «Белого списка» научных журналов № ДС/17-пр от 15.05.2023 г.)

1. Antiferromagnetic ordering of the spin density at diamagnetic Sn atoms transferred from Gd in the alloy $\text{GdCuSn}_{0.85}\text{Ge}_{0.15}$ / S. N. Aksenov [et al.] // *Physica Scripta*. – 2025. – V. 100. – P. 0759a1. – <https://doi.org/10.1088/1402-4896/ade20>.
2. Hydrogen modes in KH_2PO_4 under pressure from ab initio calculations and inelastic neutron scattering / V.A. Abalmasov [et al.] // *Physical Review B*. – 2025. – Vol. 112. – P. 214101. – <https://doi.org/10.1103/r9gl-4j51>.
3. Сиксин В.В., Трунов Д.Н. Моделирование компактного источника нейтронов для протонных ускорителей и его применение в терапии плазмонных наночастиц // *Известия высших учебных заведений. Материалы электронной техники*. – 2025. – Т. 28(3). – <https://doi.org/10.17073/1609-3577j.met202509.659>.
4. Lebed Yu. B, Botvina A. S. Mechanism of statistical nucleosynthesis in rapidly expanding nuclear matter // *Physics of Atomic Nuclei*. – 2025. – V. 88. – P. 786 - 804. – <https://doi.org/10.1134/S1063778825600551>.
5. Джилкибаев Р.М., Хлюстин Д.В. Времяпролетный спектрометр установки ИНЕС // *Приборы и техника эксперимента*. – 2025. – № 2 – С.47 - 58. – <https://doi.org/10.1134/S0020441225700356>.
6. Вращающаяся мишень с водяным инжекторным охлаждением для компактного источника нейтронов / П. В. Шве́ц [и др.] // *Поверхность. Рентген., синхротр. и нейтрон. исслед.* – 2025. – № 5. – С. 29.
7. Intense resonance neutron source (IREN): determinations of resonance and thermal neutron fluxes, energy resolution function, and dependence of neutron flux on energy / S.B. Borzakov [et al.] // *Instruments and Experimental Techniques*. – 2025. – Vol. 68. – P. 543 - 551. – <https://doi.org/10.1134/S0020441225700745>.
8. Investigation of low-energy p-wave resonances in $^{93}\text{Nb}(n,\gamma)$ reaction at the IREN facility, JINR / A.M. Yergashov [et al.] // *Physics of Particles and Nuclei Letters*. – 2025. – Vol. 22. – P. 284 - 288. – <https://doi.org/10.1134/S1547477124702273>.

9. Семенов А.А., Коптелов Э.А. Усиление распухания пор вблизи границы зерна вследствие асимметрии генерации дефектов // Поверхность. Рентген., синхротр. и нейтрон. исслед. – 2025. – Supplement Volume.

А.2 Статьи в журналах из списка ВАК

1. Садыков Р.А. Магнитная фазовая диаграмма монокристалла гексаферрита бария типа-М $\text{BaFe}_8\text{Co}_2\text{Ti}_2\text{O}_{19}$ (на основе нейтронографического анализа) // Международный научно-исследовательский журнал. – 2025. – № 6. – С.1-7. – <https://doi.org/10.60797/IRJ.2025.156.40>.

А.3 Патенты на изобретения и полезные модели, свидетельства о регистрации программ, баз данных, иные РИД, имеющие официальную регистрацию

1. Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2025689369 Российская Федерация. Программное обеспечение для проведения эксперимента и накопления данных при измерениях методом Time-Of-Flight (TDC_Counter_Universal): № 2025687869: Заявл. 14.10.2025: Оpubл. 28.10.2025 / Д. Н. Трунов: Заявитель – Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт ядерных исследований Российской академии наук.

2. Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2025689178 Российская Федерация. Программное обеспечение для пакетной обработки осциллограмм сцинтилляционного детектора нейтронов (Peak analyses): № 2025687870: Заявл. 14.10.2025: Оpubл. 27.10.2025 / Д. Н. Трунов: Заявитель – Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт ядерных исследований Российской академии наук.

3. Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2025689440 Российская Федерация. Программное обеспечение для проведения измерений сопротивления диэлектриков при криогенных температурах в камерах высокого давления (Dielectric measure): № 2025687868: Заявл. 14.10.2025: Оpubл. 28.10.2025 / Д. Н. Трунов: Заявитель – Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт ядерных исследований Российской академии наук.

4. Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2025689370 Российская Федерация. Программа расчёта эффективности и моделирования оптических параметров сцинтилляционных детекторов нейтронов с пластиковым световодом (SC_PMMA_Model): № 2025687871: Заявл. 14.10.2025: Оpubл. 28.10.2025 / Д. Н. Трунов: Заявитель – Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт ядерных исследований Российской академии наук.

А.4 Другие публикации по теме

1. Моделирование сцинтилляционного линейного нейтронного счетчика с органическим отражателем нейтронов / Д. А. Бучный [и др.] // Конференция по использованию рассеяния нейтронов в исследовании конденсированных сред «РНИКС-2025»: Тезисы докладов / г. Томск, (29 сентября – 3 октября 2025 г.). – г. Екатеринбург: ИФМ УрО РАН, 2025. – С. 60. – URL: Сборник тезисов | РНИКС 2025 (uran.ru).
2. Сиксин В. В., Трунов Д. Н. Особенности моделирования источника нейтронов (КИНК) для протонных ускорителей и применение плазменных наночастиц золота в комбинированных видах протонной и нейтронной терапии // Материалы VII Международной конференции «Математическое моделирование в материаловедении электронных компонентов (МММЭК-2025)» / г. Москва, (20 – 22 октября 2025 г.). – Москва: МАКС Пресс, 2025. – С. 178 – 180. – <https://doi.org/10.29003/m4760.MMMSEC-2025>.
3. Выбор немагнитных материалов для камер высокого давления, применяемых в нейтронной рефлектометрии и мурн / В. С. Литвин [и др.] // Конференция по использованию рассеяния нейтронов в исследовании конденсированных сред «РНИКС-2025»: Тезисы докладов / г. Томск, (29 сентября – 3 октября 2025 г.). – г. Екатеринбург: ИФМ УрО РАН, 2025. – С. 39. – URL: Сборник тезисов | РНИКС 2025 (uran.ru).
4. Дифракционные исследования на импульсном источнике нейтронов ИН-06 ИЯИ РАН / Д.Н. Трунов [и др.] // Конференция по использованию рассеяния нейтронов в исследовании конденсированных сред «РНИКС-2025»: Тезисы докладов / г. Томск, (29 сентября – 3 октября 2025 г.). – г. Екатеринбург: ИФМ УрО РАН, 2025. – С. 126. – URL: Сборник тезисов | РНИКС 2025 (uran.ru).
5. Исследования при высоких давлениях на установках ЦКП ИЯИ РАН / С.Н. Аксенов [и др.] // Конференция по использованию рассеяния нейтронов в исследовании конденсированных сред «РНИКС-2025»: Тезисы докладов / г. Томск, (29 сентября — 3 октября 2025 г.). – г. Екатеринбург: ИФМ УрО РАН, 2025. – С. 184. – URL: Сборник тезисов | РНИКС 2025 (uran.ru).
6. Портативный демонстрационный стенд для показа и обработки данных от сцинтилляционных счетчиков тепловых нейтронов / С.Н. Марин [и др.] // Конференция по использованию рассеяния нейтронов в исследовании конденсированных сред «РНИКС-2025»: Тезисы докладов / г. Томск, (29 сентября — 3 октября 2025 г.). – г. Екатеринбург: ИФМ УрО РАН, 2025. – С. 208. – URL: Сборник тезисов | РНИКС 2025 (uran.ru).

7. Физико-технические особенности источников нейтронов на основе сильноточных протонных пучков / С.Ф. Сидоркин [и др.] // Доклад на международной научно-технической конференции «Ядерные и электрофизические установки – источники мощных ионизирующих излучений для фундаментальных и прикладных исследований», ФГУП «РФЯЦ-ВНИИЭФ» / г. Саров, Нижегородская область, (29 сентября – 03 октября 2025 г.).

8. Сидоркин. С.Ф. Мишенные сборки для нейтронных генераторов на основе протонных ускорителей // Курчатовский форум «Исследования с применением синхротронного излучения, нейтронов и электронов» / г. Москва, (21 – 25 октября 2025 г.).

9. Botvina A. Statistical modeling of nuclei/hypernuclei in heavy-ion collisions // 5-th International Nuclear Theory Workshop, Educational seminars: Invited talk / Selcuk University. – Konya, Turkey (September 23 - 25, 2025).

10. Investigation of properties of low-Level p-wave neutron resonances at the IREN facility (FLNP, JINR, Dubna) / Constantin Hramco [et al] // 31st International Seminar on Interaction of Neutrons with Nuclei (ISINN-31) / Exhibition International Hotel, Dongguan, China, (May 25-30, 2025). – Abstract Book ISINN-31. – P. 29. – URL: [book-of-abstracts.pdf\(ihep.ac.cn\)](http://book-of-abstracts.pdf(ihep.ac.cn))

11. Determination of partial neutron widths of p-wave resonance of ^{35}Cl nuclei at the 397,8 eV energy / V.L. Kuznetsov [et al.] // 31st International Seminar on Interaction of Neutrons with Nuclei (ISINN-31) / Exhibition International Hotel, Dongguan, China, (May 25-30, 2025). – Abstract Book ISINN-31. – P. 18. – URL: [book-of-abstracts.pdf\(ihep.ac.cn\)](http://book-of-abstracts.pdf(ihep.ac.cn)).

12. Parameters of extracted neutron beams of the IREN resonance neutron source at the FLNP, JINR / S.B. Borzakov [et al] // 31st International Seminar on Interaction of Neutrons with Nuclei (ISINN-31) / Exhibition International Hotel, Dongguan, China, (May 25-30, 2025). – Abstract Book ISINN-31. – P. 46. – URL: [book-of-abstracts.pdf\(ihep.ac.cn\)](http://book-of-abstracts.pdf(ihep.ac.cn)).