

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, 539.125

Рег. № АААА-А16-116022510111-7

Рег. №



УТВЕРЖДАЮ
Директор ИЯИ РАН,
профессор РАН

М.В. Либанов

«31» января 2021 г.

ОТЧЕТ
О НАУЧНО-ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКОЙ РАБОТЕ

АААА-А16-116022510111-7

ФИЗИКА КОНДЕНСИРОВАННЫХ СРЕД, МАТЕРИАЛОВЕДЕНИЕ, В
ТОМ ЧИСЛЕ РАДИАЦИОННОЕ МАТЕРИАЛОВЕДЕНИЕ, НЕЙТРОННАЯ
ФИЗИКА, ФИЗИКА И ТЕХНИКА ИСТОЧНИКОВ НЕЙТРОНОВ

(промежуточный за 2020 год, 2 этап)

ФЦП

Руководитель НИР,
д.ф.-м.н.

Э.А. Коптелов
«31» января 2021г.

Москва 2021 г.

СПИСОК ИСПОЛНИТЕЛЕЙ

Руководитель НИР,
Зав. лаб., д.ф.-м.н.



31.01.2021

подпись, дата

Э.А. Коптелов
(введение, заключение,
раздел 1)

Исполнители:
в.н.с., к.ф.-м.н., и.о. зав СКС
ЛНИ



31.01.2021

подпись, дата

Р.А. Садыков
(введение, заключение,
разделы 3, 4, 6)

в.н.с., к.ф.-м.н., и.о. зав СНИ
ЛНИ



31.01.2021

подпись, дата

С.Ф. Сидоркин
(введение, заключение,
раздел 2,5,6)

зав. ЛАЯ, к.ф.-м.н.

31.01.2021

подпись, дата

Е.С. Конобеевский
(введение, заключение,
раздел 5)

в.н.с. ОЭФ, д.ф.-м.н.



31.01.2021

подпись, дата

Р.М. Джилкибаев
(заключение, раздел 2)

РЕФЕРАТ

Отчёт содержит: 57 с., 24 рис., 2 табл., 8 источн., 0 прил.

Ключевые слова: ТРАНСПОРТНЫЙ КОД, МАТЕМАТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ, МОНТЕ-КАРЛО, ЯДЕРНЫЕ РЕАКЦИИ, ЛИНЕЙНЫЙ УСКОРИТЕЛЬ, ОБЛУЧЕНИЕ МАТЕРИАЛОВ, АКТИВАЦИЯ, ДОЗИМЕТРИЯ НЕЙТРОНОВ, ГИПЕРЯДРА, МУЛЬТИФРАГМЕНТАЦИЯ, КОСМИЧЕСКИЙ АППАРАТ, КОСМИЧЕСКОЕ ИЗЛУЧЕНИЕ, ПОГЛОЩЕННАЯ ДОЗА, ЭКВИВАЛЕНТНАЯ ДОЗА, ТОРМОЗНАЯ СПОСОБНОСТЬ, НЕЙТРОННЫЙ РЕФЛЕКТОМЕТР, МАЛОУГЛОВОЕ РАССЕЯНИЕ НЕЙТРОНОВ, ДЕТЕКТОРЫ НЕЙТРОНОВ, НЕЙТРОННЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ, НЕЙТРОННЫЙ ДЕТЕКТОР, СЦИНТИЛЛЯТОР, ЛАВИННЫЙ ДИОД, КРЕМНИЕВЫЙ ФОТОУМНОЖИТЕЛЬ, ТОМОГРАФИЯ, РАДИОГРАФИЯ, ПЧД ДЕТЕКТОР, НЕЙТРОНЫ, ВРЕМЯ ЖИЗНИ НЕЙТРОНА, МЕТОД ВРЕМЕНИ ПРОЛЕТА, ВРЕМЯПРОЛЕТНЫЕ СПЕКТРЫ НЕЙТРОНОВ, ИМПУЛЬСНЫЕ ИСТОЧНИКИ НЕЙТРОНОВ, ФОТОНЕЙТРОННЫЙ ИСТОЧНИК, АКТИВАЦИОННО-ИЗМЕРИТЕЛЬНЫЙ КОМПЛЕКС, РАДИАЦИОННЫЙ ЗАХВАТ НЕЙТРОНА ЯДРОМ, ВЫСОКИЕ ДАВЛЕНИЯ, ФАЗОВЫЕ ПЕРЕХОДЫ, СВЕРХПРОВОДИМОСТЬ, СИНТЕЗ НОВЫХ ФУНКЦИОНАЛЬНЫХ МАТЕРИАЛОВ.

В отчёте представлены результаты фундаментальных и прикладных работ, проведённых по государственному заданию в соответствии с планом научных исследований ИЯИ РАН на 2020 год.

Выполнялись работы по программе фундаментальных научных исследований государственных академий наук на 2013-2020 годы, пункт 15.

Представленный отчет отражает основные результаты, полученные сотрудниками Института в рамках работ по выполнению Государственного задания 2020 года по теме «Физика конденсированных сред, материаловедение, в том числе радиационное материаловедение, нейтронная физика, физика и техника источников нейтронов». Основная деятельность направлена на разработку и оснащение научным оборудованием импульсного источника тепловых нейтронов ИН-06 (spallation типа) на основе сильноточного линейного ускорителя ионов водорода, разработку и реализацию программы фундаментальных и прикладных исследований на базе Нейтронного комплекса (включая облучательное устройство мишенно-ловушечного узла на прямом канале протонов – установку РАДЭКС, импульсный нейтронный источник ИН-06, спектрометр по времени замедления в свинце СВЗ-100).

Представлены результаты работ по созданию интенсивного W-Be-фотонейтронного источника на основе серийного промышленного электронного

ускорителя ЛУЭ-8-5 ИЯИ РАН, вольфрамовой тормозной мишени, фотонейтронной бериллиевой мишени и замедлителя быстрых нейтронов.

Получен ряд результатов по основным направлениям исследований на базе нейтронных источников ИЯИ РАН, выделенных в конкретные задачи. Использовались как методы нейтронной спектроскопии по времени пролета, так и комплементарные методы исследований структуры и свойств перспективных материалов, выполнены работы по компьютерному моделированию ядерно-физических процессов в веществе. Ряд данных носит предварительный характер и требует продолжения измерений. Результаты экспериментов обрабатываются, готовятся к публикации и частично опубликованы. В конце Отчета приведен список публикаций по результатам работ.

СОДЕРЖАНИЕ

СПИСОК ИСПОЛНИТЕЛЕЙ.....	2
РЕФЕРАТ	3
СОДЕРЖАНИЕ.....	5
ВВЕДЕНИЕ.....	7
1. Задача «Развитие и применение транспортного кода SHIELD (http://www.inr.ru/shield/ , http://www.shieldhit.org) как инструмента математического моделирования взаимодействия частиц с веществом, включая развитие моделей ядерных реакций».....	15
1.1. Монте-Карло моделирование потоков нуклонов и активации в экспериментальных установках ИЯИ РАН с целью их оптимизации.	15
1.2. Оценка радиационных условий в космических миссиях под действием галактического и солнечного космического излучения.	16
1.3. Развитие динамических и статистических моделей образования и распада нуклонной и гиперъядерной материи.....	16
2. Задача «Исследования по физике деления и нейтрон-ядерных взаимодействий».....	17
2.1 Восстановление спектров нейтронных реакций полученных с использованием методики спектрометрии по времени замедления нейтронов в свинце.....	17
2.1.1. Формирование регуляризирующего оператора преобразующего аппаратный спектр, полученный методом СВЗ, в "истинный".	17
2.1.2. Разработка методов анализа и сравнения спектров нейтронных реакций с использованием математических метрик "С" и "L ₂ ".	17
2.1.3. Применение метода регуляризации к спектрам тестовых образцов с целью получения более точных результатов по нейтронным реакциям.	17
2.2. Измерение нейтронных сечений, установка ИНЕС на источнике РАДЭКС	17
3. Задача «Развитие экспериментальной базы импульсного нейтронного источника ИН-06 ИЯИ РАН для исследования конденсированных сред»	21
3.1. Разработка и тестирование прототипов позиционно-чувствительного детектора тепловых нейтронов на основе сцинтилляторов и лавинных диодов	22
3.2 Разработка и тестирование новой системы сбора и накопления данных детекторной системы.....	23
3.3. Оптимизация работы системы нейтронных детекторов.....	24
4. Задача «Исследование структуры перспективных материалов, в том числе при экстремальных нагрузках (высоких давлениях, низких температурах, сильных магнитных полях)».....	25
4.1. Исследование структуры жаропрочных сплавов методом МУРН	25
4.2. Исследование материалов при высоких давлениях и низких температурах.....	28
4.3. Радиационное материаловедение.....	32

5. Задача: «Моделирование процессов, инициированных пучком протонов линейного ускорителя в установках Нейтронного комплекса ИЯИ, с целью улучшения и оптимизации параметров установок»	33
5.1 Расчетно-теоретические исследовательские работы по размножающим мишеням на основе Нептуния 237 – Плутония 239, по вольфрамовому нейтронному источнику».....	33
5.2 Разработка и физическое обоснование перспективных источников с плотностью потока тепловых нейтронов на поверхности замедлителей, сопоставимых с Европейским проектом (ESS) (совместно с ОИЯИ)	34
6. Задача «Развитие новых методов исследований на нейтронных источниках»	34
6.1 Адаптация метода нейтронной радиографии и томографии для диагностики промышленных изделий и объектов культурного наследия	35
6.2 Развитие новых методов исследования фундаментальных взаимодействий при низких энергиях нейтронов.....	35
6.2.1 Разработка нового метода измерения времени жизни нейтрона.....	35
6.2.2 Исследование характеристик временных и фоновых характеристик	36
ГЭК-1 реактора ИБР-2.	36
6.2.3 Разработка токового метода регистрации времяпролетных спектров.	36
6.3. Создание интенсивного W-Be-фотонейтронного источника на основе серийного промышленного электронного ускорителя ЛУЭ-8-5 ИЯИ РАН	39
6.3.1. Изучение спектра тепловых нейтронов W-Be фотонейтронного источника.....	40
6.3.2. Эффективность и энергетическое разрешение детектора быстрых нейтронов с ¹⁰ B-конвертером.....	48
СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ К ЗАДАЧЕ 6.3.	51
ЗАКЛЮЧЕНИЕ.....	53
ПУБЛИКАЦИИ.....	57

ВВЕДЕНИЕ

1. Задача «Развитие и применение транспортного кода SHIELD (<http://www.inr.ru/shield/>, <http://www.shieldhit.org>) как инструмента математического моделирования взаимодействия частиц с веществом, включая развитие моделей ядерных реакций».

Подзадачи, входящие в работы по программе фундаментальных научных исследований:

1.1. Монте-Карло моделирование потоков нуклонов и активации в экспериментальных установках ИЯИ РАН с целью их оптимизации.

Проект посвящен изучению потоков запаздывающих нейтронов фотоделения ^{238}U в экспериментальном зале импульсного линейного ускорителя электронов ЛУЭ-8-5 ИЯИ РАН, см. работу [1].

Цель работы — интерпретация экспериментальных данных о потоках быстрых нейтронов в экспериментальном зале ускорителя ЛУЭ-8-5 ИЯИ РАН, Монте-Карло моделирование переноса нейтронов в экспериментальном зале ускорителя ЛУЭ-8-5 с использованием транспортного кода SHIELD <https://www.inr.ru/shield/>.

В результате НИР продемонстрировано отсутствие быстрых нейтронов в экспериментальном зале ускорителя ЛУЭ-8-5 через 5 мкс по окончании импульса пучка ускорителя.

Результаты работы [1] обеспечивают надежность интерпретации результатов дальнейших экспериментов на ускорителе ЛУЭ-8-5.

1.2. Оценка радиационных условий в космических миссиях под действием галактического и солнечного космического излучения.

Проект посвящен изучению роли альфа-частиц (^4He) в контексте радиационной защиты экипажей космических миссий, а также адронной терапии в онкологии, см. работу [2].

Цель работы — обзор массива экспериментальных данных и средств математического моделирования, отвечающих указанным выше приложениям на современном уровне.

Исчерпывающий на данный момент обзор, представленный ведущими экспертами.

В результате НИР обоснована важность измерения дважды дифференциальных сечений вторичных легчайших ядер; указаны доступные источники сечений легчайших ядер в разных диапазонах энергий ^4He и для разных мишеней; перечислены требования к аппаратуре для прецизионного измерения сечений; указаны базы полных и парциальных

сечений реакций, индуцированных ^4He ; сопоставлены результаты расчетов с использованием известных транспортных кодов.

Обзор [2] является руководством по планированию экспериментов и математическому моделированию процессов, инициированных альфа-частицами высоких энергий.

1.3. Развитие динамических и статистических моделей образования и распада нуклонной и гиперъядерной материи.

Проект посвящен изучению процессов образования и распада возбужденной гиперъядерной и нормальной ядерной материи в столкновениях тяжелых ионов, см. работы [3-7].

Цель работы — развитие моделей образования и распада возбужденной ядерной и гиперъядерной материи. Сравнение расчетов с имеющимися экспериментальными данными.

В работах [3-7] представлен прогресс в развитии моделей образования (динамическая стадия) и распада (статистическое описание) возбужденной гиперъядерной и нормальной ядерной материи. Описание процессов испарения, Ферми-развала, деления и мультифрагментации обобщается на гиперъядра. Развиваются методы извлечения энергии связи гиперонов в ядрах. Результаты расчетов по образованию гиперъядер сравниваются с имеющимися экспериментальными данными.

В результате достигнут прогресс в развитии теории образования и распада гиперъядер в столкновениях тяжелых ионов.

Результаты работ [3-7] развивают теоретическую основу изучения процессов образования гиперъядер и их свойств.

2. Задача «Исследования по физике деления и нейтрон-ядерных взаимодействий».

2.1. Восстановление спектров нейтронных реакций полученных с использованием методики спектрометрии по времени замедления нейтронов в свинце.

2.1.1. Формирование регуляризирующего оператора преобразующего аппаратурный спектр, полученный методом СВЗ, в "истинный".

Объектом исследования является матрица, переводящая аппаратурный спектр, полученный в физическом эксперименте, в спектр пригодный для анализа физических свойств атомных ядер.

2.1.2. Разработка методов анализа и сравнения спектров нейтронных реакций с использованием математических метрик "С" и "L2".

Объектом исследования является метод сравнения восстановленных спектров нейтронных реакций и выбор из них оптимального, исходя из дополнительных физических соображений.

2.1.3. Применение метода регуляризации к спектрам тестовых образцов с целью получения более точных результатов по нейтронным реакциям.

Объектом исследования является процесс восстановления спектров тестовых (хорошо изученных) нейтронных реакций, с целью проверки корректности процедуры.

Работа направлена на разработку методов обработки экспериментальных данных в экспериментах на нейтронном спектрометре по времени замедления нейтронов в свинце СВЗ-100.

2.2. Измерение нейтронных сечений, установка ИНЕС на источнике РАДЭКС

Объектом исследований на установке ИНЕС, являются нейтрон-ядерные взаимодействия. Установка ИНЕС позволит повысить точность измерений нейтронных сечений радиационного захвата в области ядерных реакторов и ядерной астрофизики. Цель работы заключается в разработке и изготовлении электроники, предназначенной для работы с различными детекторами в условиях высокого уровня электрических помех. В качестве детекторов рассматриваются: кристаллы NaI, CsI, лавинные фотодиоды (APD), фото-электронные умножители (ФЭУ) и нейтронные газовые He³ счетчики. Разработка программного обеспечения по реконструкции сечений радиационного захвата нейтронов ядром.

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

Импульсные источники нейтронов, использующие каскадно-испарительные (spallation) реакции, являются на сегодняшний день наиболее перспективными, т. к. способны обеспечить наиболее интенсивные пучки нейтронов. Кроме того, эти источники более безопасны, т. к. не имеют делящихся материалов. В настоящее время на источнике нейтронов ИН-06 создан комплекс нейтронографических установок: нейтронного рефлектометра-малоуглового спектрометра «Горизонт», дифрактометров «Геркулес» и «Кристалл», многофункционального нейтронного спектрометра «МНС». Усовершенствование детекторной системы дифрактометров, в частности увеличение телесного угла детекторов позволит сократить время измерений (даже при существующей мощности пучка), а следовательно, повысить эффективность использования нейтронных пучков.

Целью данной работы являлось проведение работ по оснащению нейтронографических установок «ИН-06» («Горизонт», «Геркулес», «Кристалл») современной аппаратурой, проведение отладки оборудования, проведение измерений, а также разработка методических рекомендаций по выбору оптимальных условий экспериментов.

С помощью Монте-Карло моделирования, основанном на данных тестовых

измерений, получены оценки разрешающей способности установки «Горизонт» и спектры пучка нейтронов на образце при различной коллимации. Проведен анализ работы зеркального нейтронновода, выработаны рекомендации по его усовершенствованию.

Выполнение задания осуществлялось в рамках следующих подпунктов:

3.1. Разработка и тестирование прототипов позиционно-чувствительного детектора тепловых нейтронов на основе сцинтилляторов и лавинных диодов

Объектом исследования являются разработка и тестирование прототипов позиционно-чувствительного детектора тепловых нейтронов на основе сцинтилляторов и лавинных диодов.

Цель работы – создание тестового сцинтилляционного детектора с возможностью определения координаты падения нейтрона.

3.2. Разработка и тестирование новой системы сбора и накопления данных детекторной системы

Объектом исследования являются новые подходы к созданию высокопроизводительной системы обработки потока экспериментальных данных с детектирующей аппаратуры нейтронных спектрометров.

Цель работы – оснащение установок нейтронного комплекса электронными системами с повышенными характеристиками.

3.3. Оптимизация работы системы нейтронных детекторов

Объектом исследования является проверка параметров системы кольцевых детекторов и оптимизация параметров кольца и размеров счетчиков.

Цель работы – получить оптимизированные данные для изготовления и модернизации существующих кольцевых детекторов

4. Задача «Исследование структуры перспективных материалов, в том числе при экстремальных нагрузках (высоких давлениях, низких температурах, сильных магнитных полях)»

4.1 Исследование структуры жаропрочных сплавов методом МУРН

Объектом исследования являются новые материалы, а именно: жаропрочные сплавы, в том числе ультрадисперсные.

Целью данной работы являлось исследование структуры жаропрочных сплавов методом малоуглового рассеяния нейтронов (МУРН), поиск материалов, оптимальных для изготовления камер высокого давления, которые могут использоваться в МУРН, т. е. обладающих минимальным сечением малоуглового рассеяния нейтронов. Получены спектры МУРН на сплавах 40ХНЮ (Ni-основной, 38-41% Cr, 3.3-3.8% Al), 38ХНЮ и МоТiС (Мо — основной, Ti — 10%, С — 3%) и БрБ2.

4.2 Исследование материалов при высоких давлениях и низких температурах

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. В рамках этой проблемы, можно отметить такие сверх важные задачи:

- 1) синтез металлического водорода и high- T_C полигидридов,
- 2) синтез полимарных фаз азота – нового экологически чистого энергонасыщенного материала,
- 3) синтез новых сверхтвёрдых материалов,
- 4) синтез новых высокотемпературных сверхпроводников.

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.

Цели:

(1) Целью данной работы является изучение характерных черт сверхпроводимости в водородосодержащих материалах на примере полигидридов иттрия и лантана. Работа лежит в плоскости проблемы металлического водорода. Важно чтобы металлический водород был «легирован» добавленными в него элементами, в этом случае резко понижается давление перехода данной системы в сверхпроводящее состояние и растёт T_c [1].

(2) Целью данной работы являлось изучение влияния высокого давления на вибрационные, и электрические транспортные свойства слоистого дихалькогенида $2H-TaS_2$ [2].

(3) Цель данной работы - исследование магнитных, структурных и электронных свойства мультиферроика $Ba_3NbFe_3Si_2O_{14}$ под действием высокого давления и низкой температуры [3].

(4) Целью данной работы является синтез и исследование магнитных, электронных свойств и структуры поли гидридов европия [4].

4.3 Радиационное материаловедение

Объектом исследования являются радиационные повреждения в облучаемых металлах при температурах вакансионного распухания.

Цель работы – теоретическое исследование влияния одномерно движущихся междоузельных атомов, непрерывно генерируемых облучением в каскадах межатомных столкновений, на пространственные характеристики ансамбля вакансионных пор в облучаемых металлах.

5. Задача: «Моделирование процессов, инициированных пучком протонов линейного ускорителя в установках Нейтронного комплекса ИЯИ, с целью улучшения и оптимизации параметров установок»

5.1 Расчетно-теоретические исследовательские работы по размножающим мишеням на основе Нептуния 237 – Плутония 239, по вольфрамовому нейтронному источнику.

Объектом исследования являются размножающие источники нейтронов для физических исследований.

Цель работы – повышение плотности потока тепловых нейтронов на поверхности замедлителя в несколько раз по сравнению с не размножающим источником нейтронов на основе вольфрамовой мишени с использованием существующих технологий.

5.2 Разработка и физическое обоснование перспективных источников с плотностью потока тепловых нейтронов на поверхности замедлителей, сопоставимых с Европейским проектом (ESS) (совместно с ОИЯИ)

Объектом исследования являются - размножающие источники нейтронов для физических исследований на основе сильноточных протонных ускорителей и возможная модификация исследовательского реактора типа ИБР-2.

Цель работы – Достижение максимально возможной плотности потока тепловых нейтронов на поверхности замедлителя сопоставимой с ожидаемой на ESS на основе апробированных реакторных технологий.

6. Задача «Развитие новых методов исследований на нейтронных источниках.»

Подзадачи, входящие в работы по программе фундаментальных научных исследований:

6.1 Адаптация метода нейтронной радиографии и томографии для диагностики промышленных изделий и объектов культурного наследия.

Объектом исследования является адаптация метода нейтронной радиографии и томографии для диагностики промышленных изделий и объектов культурного наследия. Цель работы получить параметры пучка и требуемые параметры детектора для использования при диагностике промышленных изделий и объектов культурного наследия для оптимизации радиографических и томографических экспериментов на нейтронных источниках ИЯИ РАН.

6.2 Развитие новых методов исследования фундаментальных взаимодействий при низких энергиях нейтронов

Подзадачи, входящие в работы по программе фундаментальных научных исследований:

6.2.1 Разработка нового метода измерения времени жизни нейтрона.

Авторами предложено выполнить измерения времени жизни нейтрона методом времени пролета.

Цель работы - закрыть проблему экспериментальной нейтронной аномалии, заключающейся в принципиальном различии во временах жизни нейтрона, полученных экспериментально пучковым методом и методом хранения ультрахолодных нейтронов.

6.2.2 Исследование характеристик временных и фоновых характеристик ГЭК-1 реактора ИБР-2.

Объектом исследования являются времяпролетные спектры нейтронов на различных пролетных базах и фоновые условия на них.

Цель работы - изучение характеристик ГЭК-1 реактора ИБР-2 и создания прототипа установки для измерения времени жизни нейтрона времяпролетным методом.

6.2.3 Разработка токового метода регистрации времяпролетных спектров.

Цель работы – разработка метода регистрации времяпролетных спектров интенсивных нейтронных потоков.

6.3 Создание интенсивного W-Be-фотонейтронного источника на основе серийного промышленного электронного ускорителя ЛУЭ-8-5 ИЯИ РАН

Цель работы – создание интенсивного W-Be-фотонейтронного источника , вольфрамовой тормозной мишени, фотонейтронной бериллиевой мишени и замедлителя быстрых нейтронов.

6.3.1 Изучение спектра тепловых нейтронов W-Be фотонейтронного источника

Целью работы является использование полученных экспериментальных данных с активационных детекторов для восстановления спектра источника.

6.3.2 Эффективность и энергетическое разрешение детектора быстрых нейтронов с ^{10}B -конвертером

Цель работы – разработка детектора быстрых нейтронов с конвертером на основе бора.

1. Задача «Развитие и применение транспортного кода SHIELD (<http://www.inr.ru/shield/>, <http://www.shieldhit.org>) как инструмента математического моделирования взаимодействия частиц с веществом, включая развитие моделей ядерных реакций»

1.1. Монте-Карло моделирование потоков нуклонов и активации в экспериментальных установках ИЯИ РАН с целью их оптимизации.

Как известно, для описания реактивности критических систем важны данные о запаздывающих нейтронах после акта деления. В статье [1] описана процедура регистрации запаздывающих нейтронов от фотоделения ^{238}U тормозными гамма-квантами с энергией до 10 МэВ на импульсном линейном ускорителе электронов ЛУЭ-8-5 ИЯИ РАН во временном интервале (1–5) мс после импульса пучка ускорителя. При этом большой фон γ -квантов и нейтронов от импульса пучка электронов и наводки от элементов оборудования в экспериментальном зале могут вносить существенные искажения в работу спектрометра нейтронов при их регистрации.

Фактически в экспериментальном зале присутствуют нейтроны разного происхождения. С одной стороны, это запаздывающие нейтроны от распадов ядер-осколков фотоделения. С другой стороны, это нейтроны, образованные пучком электронов в фотоядерных реакциях, которые при их перемещениях по экспериментальному залу могут вызывать ядерные реакции, в том числе с образованием γ -квантов.

В работе [1] методом Монте-Карло рассчитана временная зависимость потока быстрых нейтронов в экспериментальном зале. Расчет проводился по программе переноса нейтронов LOENT (Low Energy Neutron Transport), входящей в состав транспортного кода SHIELD <https://www.inr.ru/shield/>. В расчете учтена реальная геометрия экспериментального зала: прямоугольный объем, толщина стен 60 см бетона. Источником нейтронов является мишень ускорителя ЛУЭ-8-5, которая представлена в расчете точечным изотропным источником нейтронов с энергией 3 МэВ. Регистрировалось число нейтронов с энергиями выше 0.1 МэВ, влетающих внутрь сферы радиусом 5 см, окружающей точечный источник. Расчет показал, что через ~5 мкс после запуска первичного нейтрона с энергией 3 МэВ в экспериментальном зале практически не остается быстрых нейтронов с энергией выше 0.1 МэВ.

1.2. Оценка радиационных условий в космических миссиях под действием галактического и солнечного космического излучения.

Альфа-частицы (4He) в потоке галактических космических лучей уступают по множественности только протонам и вносят значительный вклад в общее облучение экипажей космических миссий. Ионы 4He также желательны для применения в ионной терапии, т.к. они дают меньшую фрагментацию снаряда, чем ионы углерода (^{12}C), и меньшее поперечное уширение пучка, чем протоны. Для приложений космической радиационной защиты и ионной терапии необходимы надежные модели ядерных реакций и коды расчета переноса высокоэнергичных частиц в веществе. Нейтроны и легкие ионы (1H , 2H , 3H , 3He и 4He) - важнейшие вторичные частицы, образующиеся в ядерных реакциях в контексте космической радиации и ионной терапии; эти частицы проникают на большую глубину и вносят значительный вклад в эквивалентную дозу. Поскольку нейтроны и легкие ионы могут рассеиваться под большими углами, для транспортных кодов требуются двойные дифференциальные сечения, описывающие распространение радиационных полей через радиационную защиту и ткани человека. В работе [2] обосновывается важность 4He -снарядов для радиационной защиты в космосе и для ионной терапии, а также дается подробный исчерпывающий обзор текущего состояния измерений и моделирования поперечных сечений образования нейтронов и легких ионов под действием ионов 4He с учетом будущих потребностей.

1.3. Развитие динамических и статистических моделей образования и распада нуклонной и гиперъядерной материи.

Работы [3-7] отражают прогресс в развитии моделей образования (динамическая стадия) и распада (статистическое описание) возбужденной гиперъядерной и нормальной ядерной материи. Дано обобщение процессов испарения, Ферми-развала, деления и мультифрагментации на гиперъядра. Проводится теоретический анализ новых закономерностей образования гиперъядер в реакциях при средних и высоких энергиях сталкивающихся тяжелых ионов. Развиваются методы извлечения энергии связи гиперонов в ядрах исходя из статистической закономерности их выхода в реакциях. Дано сравнение с доступными экспериментальными данными по образованию гиперъядер.

2. Задача «Исследования по физике деления и нейтрон-ядерных взаимодействий».

2.1 Восстановление спектров нейтронных реакций полученных с использованием методики спектрометрии по времени замедления нейтронов в свинце.

Часть атомных ядер существует в очень малом количестве, экзотические ядра, короткоживущие, полученные искусственным путём. Для их исследования наиболее подходит методика спектрометрии по времени замедления нейтронов в свинце как обладающая наиболее высокой чувствительностью. Но эта методика имеет недостаток -- низкое разрешение. Работа направлена на преодоление этого недостатка.

2.1.1. Формирование регуляризирующего оператора преобразующего аппаратурный спектр, полученный методом СВЗ, в "истинный".

С использованием матрицы функции отклика спектрометра по времени нейтронов замедления в свинце сформирована матрица восстанавливающая спектр нейтронной реакции из спектра полученного в эксперименте (аппаратурного спектра). Визуализация функции отклика спектрометра в трёхмерном пространстве позволила дать наглядность процедуре восстановления "истинного" спектра нейтрон-ядерных реакций.

2.1.2. Разработка методов анализа и сравнения спектров нейтронных реакций с использованием математических метрик "С" и "L₂".

Используя методы численного моделирования, создан компьютерный модуль, позволяющий сравнивать аппаратурные спектры между собой, восстановленные спектры со спектрами, полученными различными методиками. Использовались принятые методики сравнения математических функций адаптированные к физическим условиям.

2.1.3. Применение метода регуляризации к спектрам тестовых образцов с целью получения более точных результатов по нейтронным реакциям.

Определено влияние набранной статистики на качество (точность) процедуры восстановления спектра, с использованием спектров от тестовых образцов. Выявлена связь между статистикой аппаратурного спектра и разрешением резонансов в восстановленном спектре.

2.2. Измерение нейтронных сечений, установка ИНЕС на источнике РАДЭКС

Развитие атомной энергетики и технологии реакторов на быстрых нейтронах ставит актуальную задачу по измерению нейтронных сечений новых конструкционных и топливных материалов с высокой точностью (2-3%) в области энергий быстрых нейтронов

0.1 - 100 кэВ. Установка ИНЕС по измерению полных и парциальных (n,γ) нейтронных сечений позволит повысить точность измерений до необходимых 2-3%.

В 2020 г. проводились работы по разработке метода определения стартового импульса для времяпролетной методики, основанный на регистрации нескольких γ -квантов (>3) от нейтронного источника в узком временном интервале. Данный метод не зависит от временной нестабильности синхроимпульса протонного пучка. Этот метод имеет, по сравнению с методом привязки к сигналу от индукционного датчика тока (ИДТ) протонного пучка, следующие преимущества: не зависит от флуктуаций тока пучка и временной нестабильности цифровой задержки сигнала ИДТ. Проведено измерение основных характеристик γ -детектора на импульсном источнике нейтронов РАДЭКС центра коллективного пользования (ЦКП) ИЯИ РАН. Проведен один сеанс установки ИНЕС с импульсным протонным пучком, имеющим следующие параметры: частота 50 Гц, импульсный ток 5 мА, энергия протонов 267 МэВ, длительность протонного пучка 0.3 мкс.

Работа время-пролетного спектрометра установки ИНЕС, по измерению сечений, существенно зависит от точности привязки стартового импульса относительно протонного пучка. Энергия нейтронов определяется по времени пролета нейтронов в установке. Время пролета нейтронов равно разнице времени регистрации гамма-квантов в детекторе от процесса радиационного захвата нейтронов ядром и времени образования нейтронов в протонной мишени РАДЭКС. Нейтронные каналы источника РАДЭКС направлены на вольфрамовую мишень и расположены близко к оси протонного пучка. Поэтому в каналы попадают первичные гамма кванты и высокоэнергичные нейтроны, образованные протонами в мишени. Регистрация вспышки от гамма-квантов и непрерывная запись цифровой информации с гамма-детектора каждые 100 нсек позволяет, при обработке TOF данных off-line, получить время начала сброса протонов на мишень с точностью ~ 100 нсек, в каждом импульсе протонного пучка.

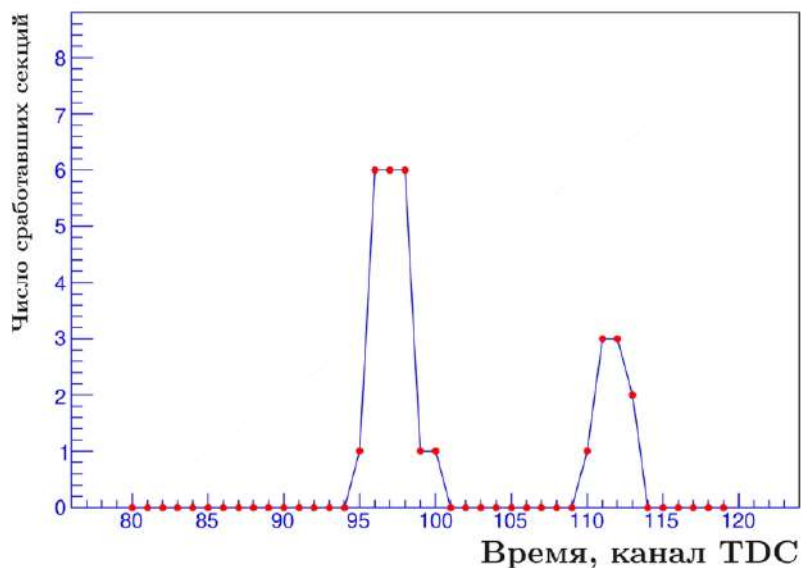


Рисунок 2.1 – гистограмма начальной части одного импульса, для числа сработавших (СУ) секций гамма детектора во временном окне длительностью 300 нсек в зависимости от времени начала окна.

При этом синхроимпульс протонного пучка играет второстепенную роль и служит для относительной временной привязки. Таким образом, интенсивная вспышка гамма-квантов с длительностью, равной длительности протонного пучка (0.3 мкс) позволяет получить независимый от синхроимпульса протонного пучка, стартовый сигнал для ТОФ измерений в каждом импульсе.

Временная гистограмма числа сработавших секций гамма детектора, во временном окне длительностью 300 нсек, в зависимости от времени начала этого окна, для одного протонного импульса, показана на рис.2.1. При этом вся информация в импульсе длительностью 19.66 мсек проходит для дальнейшей обработки, если число сработавших элементов гамма детектора больше трех и стартовый сигнал принимается равным времени начала окна. Для протонного импульса, показанного на рис. 9, стартовый сигнал равен 9.6 мкс (96 канал TDC).

На рис. 2.2 показаны измеренный и расчетный времяпролетный спектр реакции (n,γ) в мишени Au в заданном временном диапазоне 250 ÷ 315 мкс. Этот временной диапазон эквивалентен интервалу по энергии 129.7 ÷ 206.4 эВ. Расчетный спектр вычисляется для пяти известных резонансов, представленных в Таблице 2.1 и попадающих в заданный диапазон энергий, с учетом измеренного спектра нейтронов, функции временного разрешения установки, фоновой составляющей и Доплеровского

уширения резонансов. При этом фон аппроксимируется линейной зависимостью от времени.

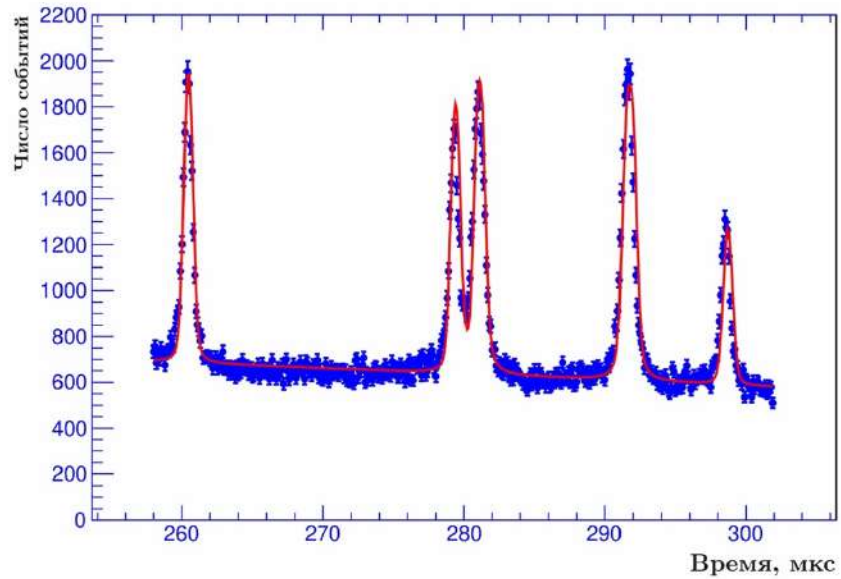


Рисунок 2.2 – измеренный и расчетный времяпролетный спектр реакции (n,γ) в мишени Au в диапазоне 250 ÷ 315 мкс.

Число отсчетов N_i расчетного спектра (рис. 2.2) в i -ом бине выражается следующим образом:

$$N_i = \Phi(E) \cdot dE \cdot \varepsilon_\gamma \cdot T_m \cdot \int R(E, E') \cdot w(E') \cdot dE'; \quad R(E, E') = \frac{1}{W_c \cdot \sqrt{\pi}} \cdot \exp\left(-\frac{(E - E')^2}{W_c^2}\right),$$

$$w(E) = \frac{\sigma_{n\gamma}}{\sigma_t} (1 - \exp(-n \cdot \sigma_t(E) \cdot \psi(\Gamma / \Delta, x))); \quad \sigma_{n\gamma} = \frac{\sigma_{th} \sqrt{0.0253}}{\sqrt{E}} + \sum_i \frac{\pi}{k^2} \frac{g_i \cdot \Gamma_n^i \cdot \Gamma_\gamma^i}{(E - E_i)^2 + \Gamma_i^2 / 4}$$

где функция $w(E)$ – описывает вероятность радиационного захвата нейтрона ядром с учетом поглощения в образце, E – энергия нейтрона, $\Phi(E)$ – поток нейтронов падающих на мишень измеряется мониторными счетчиками ^3He , ε_γ – эффективность гамма детектор, T_m – время набора статистики, функция разрешения $R(E, E')$ учитывает временной разброс вылета нейтронов из мишени источника, обусловленный прямоугольным импульсом (0.4 мкс) протонного пучка, W_c – дисперсия временного разброса протонного пучка, функция $\psi(\Gamma/\Delta, x)$ – учитывает тепловое движение атомов в образце, Δ – Доплеровская ширина, $\Gamma = \Gamma_n + \Gamma_\gamma$ – полная ширина резонанса, Γ_n и Γ_γ – нейтронная и радиационная ширины, $\sigma_{n\gamma}$ – сечение радиационного захвата, $x = 2(E - E_i)/\Gamma$, E_i – энергия резонанса, σ_t – полное сечение, σ_{th} – сечение радиационного захвата тепловых нейтронов

(98.6 барн), k – волновое число нейтрона, g_i – статистический вес, зависящий от спина ядра и полного момента резонанса.

Таблица 2.1. Параметры резонансов ^{197}Au в диапазоне энергий 130 ÷ 206 эВ.

E_i , эВ	$2g_i\Gamma_n$, мэВ	Γ_γ , мэВ	J
144.2	6.7 ± 0.3	120 ± 10	1
151.2	27.6 ± 1.0	95 ± 15	2
162.9	37.4 ± 1.8	130 ± 9	1
164.9	11.6 ± 0.6	109 ± 13	2
189.9	36.0 ± 3.0	126 ± 12	1

Измеренный и расчетный времяпролетный спектр для пяти известных резонансов (рис. 2.2) хорошо согласуются между собой. Следует отметить, что в расчетном спектре используется один свободный параметр, связанный с полным потоком нейтронов.

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

Развитие экспериментальной базы импульсного источника ИН-06 ИЯИ РАН для исследования конденсированных сред является неотъемлемой частью развития ЦКП ИЯИ РАН. Развитие преследует цель расширения списка доступных исследований на ИН-06, а также качественное улучшения получаемых результатов исследований.

В рамках этого развития происходит:

- Создание новых и модернизация существующих камер высокого давления
- Создание и модернизация детекторной системы
- Создание и модернизация электронных систем для проведения эксперимента

С помощью Монте-Карло моделирования с использованием программного пакета VITESS была получена зависимость расходимости и спектров нейтронного пучка от геометрических параметров коллимирующей системы рефлектометра и выработаны рекомендации для обеспечения оптимального режима измерений. Были проведены испытания установки, получены экспериментальные спектры нейтронов. На основании данных Монте-Карло моделирования и тестового эксперимента была получена оценка разрешения установки по переданному импульсу в режиме рефлектометра, составляющая 5% при высоте щелей 0.45 мм и расстоянии между щелями 2385 мм. Ожидаемая

интенсивность нейтронов на образце в режиме рефлектометра — до $2,5 \times 10^5 \text{ см}^2 \cdot \text{с}^{-1}$. Проведены тестовые эксперименты по рефлектометрии на зеркалах с известными характеристиками. Характеристики совпадают с данными производителя в пределах погрешности, полученной из моделирования — с точностью 5%. Результаты моделирования и тестовых измерений представлены в статье [1].

Проведена закупка материалов для изготовления детекторов на установку “ГЕРКУЛЕС” и “КРИСТАЛЛ”. На основе этих материалов будет произведено дооснащение установки “ГЕРКУЛЕС” дополнительными детектора. Проведена разработка и тестирования нового оборудования для накопления данных как с времяпролетного спектра, так и на постоянной длине волны.

В отчете отражены подзадачи, которые соответствуют этому направлению.

3.1. Разработка и тестирование прототипов позиционно-чувствительного детектора тепловых нейтронов на основе сцинтилляторов и лавинных диодов

Разработан метод получения координаты при использовании детекторов на основе сцинтиллятора и лавинного диода. Метод основан на частичном поглощении фотонов проходящих через органический световод. Анализируя полученные амплитуды либо заряда на лавинных диодах становится возможно определить координату захвата нейтрона.

Для этих целей была разработана и протестирована новая электроника для анализа данных, получаемых с детектора. Сам детектор, используемый для тестов, использовался стандартной конструкции за исключением что электрически необходимо разделить два лавинных диода.

Тестирование детектора происходило от источника нейтронов Cf-252. Перед детектором стояла пластина из кадмия толщиной 5мм с щелью шириной 3 мм. Пластины кадмия при тестировании возможно передвигать вдоль детектора. Это позволило оценить как саму возможность анализа амплитуды, так и возможное разрешение позиционно-чувствительного детектора.

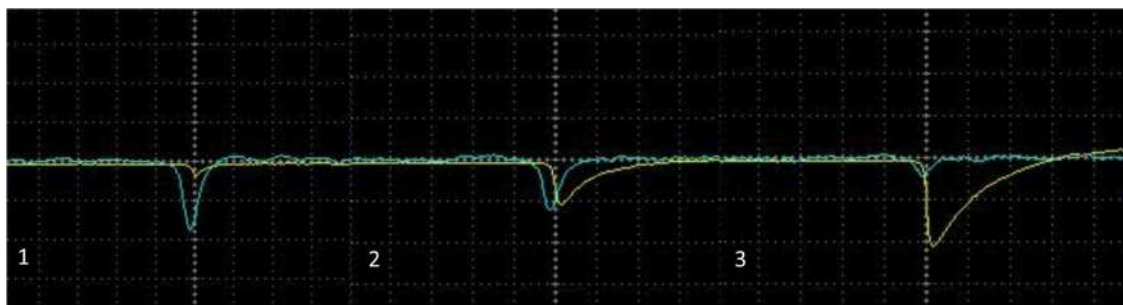


Рисунок 3.1 – Сравнение амплитуды пика в зависимости от координаты, 1- левый край, 2-центр, 3 – правый край.

В результате анализа результатов тестирования была доработана электроника (добавлена схема совпадения для полного исключения шума). Расчетные параметры по разрешению - около 5 мм. В дальнейшем планируется разработать электронику для анализа координат и создать полностью схему использования позиционно-чувствительного детектора, начиная с самого детектора – заканчивая электроникой и программным обеспечением.

3.2 Разработка и тестирование новой системы сбора и накопления данных детекторной системы

В данной работе проведена разработка новой системы накопления данных детекторной системы на основе ПЛИС и/или микроконтроллера. Было разработано две системы накопления данных, одна используется при измерении на постоянной длине волны нейтронов, а вторая используется для накопления спектров на времяпролетном нейтронном спектре.

В рамках работы разработан полный комплекс необходимый для работы, начиная с электроники и заканчивая управляющим программным обеспечением.

Для измерения на постоянной длине волны разработана плата на основе микроконтроллера, имеющая 16 входных каналов и выходной интерфейс CANBUS. Система служит для подключения к ней различных вариантов счетчиков, в частности мониторинговых, и позволяет встроить ее в существующую систему для сбора и накопления данных.

Для измерения на времяпролетном спектре создана система на основе ПЛИС Xilinx имеющая 20 входных каналов, вход для синхроимпульса и выходной интерфейс USB. Система позволяет производить накопления времяпролетных спектров в реальном времени. Благодаря использованию ПЛИС удалось добиться максимального быстродействия.

Система разрабатывалась для замены существующей устаревшей системы на основе КАМАК. Система объединяет все необходимые модули для работы в одной ПЛИС и имеет настольный формат что позволит легко произвести установку и настройку данной системы при модернизации.

Также разработана управляющее программное обеспечение для работы с обоими система. Программное обеспечение написано на языке программирования NI LABVIEW и позволяет производить накопление, хранение и обработку данных.

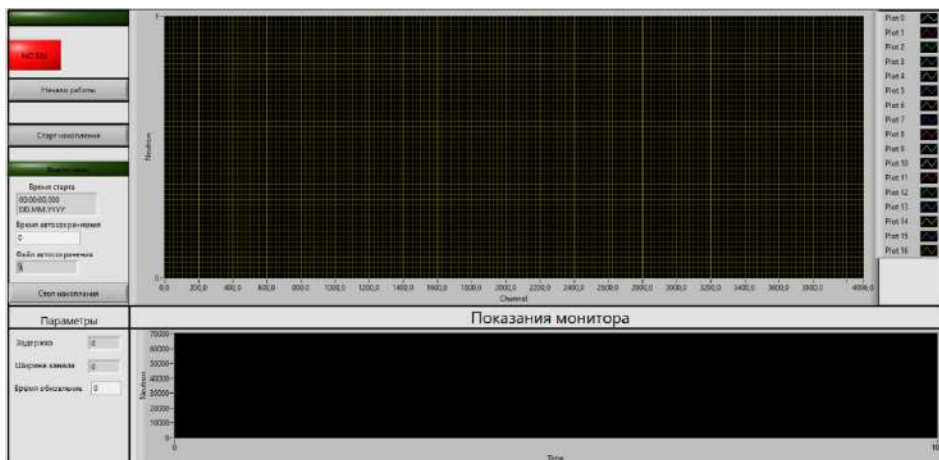


Рисунок 3.2 – Внешний вид программы

Разработка новых систем накопления данных позволяет заменить устаревшие системы на основе КАМАК на более современные, быстрые и простые в работе. А использование программного обеспечения на основе NI LABVIEW позволит в дальнейшем унифицировать все используемое оборудование и легко настраивать программу под требования эксперимента.

3.3. Оптимизация работы системы нейтронных детекторов

Для оптимизации работы системы нейтронных детекторов были установлены дополнительные сцинтилляционные детекторы на установке МНС ИЯИ РАН. Дополнительные детекторы установлены под углами близкими к 90 градусам.

Существующий массив детекторов установлен на малых углах и позволяет получать данные высокого разрешения. Добавление детекторов под углами к 90 градусам, позволяет расширить диапазон исследования по длине волны нейтронов, и получать данные для более качественного анализа.

4. Задача «Исследование структуры перспективных материалов, в том числе при экстремальных нагрузках (высоких давлениях, низких температурах, сильных магнитных полях)»

4.1. Исследование структуры жаропрочных сплавов методом МУРН

Представляет интерес поиск немагнитных сплавов, которые могут быть использованы для изготовления нейтронографических устройств, например камер высокого давления, предназначенных для исследований в магнитных полях методом МУРН. Выбор сплава для этих целей обусловлен как прочностными характеристиками, так и минимальным сечением рассеяния.

Методами нейтронной дифракции и МУРН исследована структура немагнитных жаропрочных сплавов на основе Ni, Mo и Cu: 40XНЮ (Ni — основной, 38-41% Cr, 3.3-3.8% Al), 38XНВЮ (Ni — основной, Cr — 36-39%, W—5,5-6,5%, Al — 3.0-3.8%), и MoTiC (Mo — основной, Ti — 10%, C — 3%) и БрБ-2 (Cu — основной, Be — 1,8-2,1% и др.) — см. рис. 4.1-4.2. Из сравнения данных спектров следует, что наименьшим сечением рассеяния нейтронов в диапазоне 0,02-1,5 А-1 обладает сплав MoTiC (Mo — основной, Ti — 10%, C — 3%), БрБ2 рассеивает нейтроны в 3,5 раза сильнее, а 40XНЮ — в 173 раза сильнее, чем данный сплав.

В рамках данной работы был исследован перспективный сплав 38XНЮ для использования при создании камера высокого давления. Данный сплав близок по параметрам к ранее исследованному сплаву 40XНЮ, но обладает рядом отличий.

Измерение образца сплава проводилось на установке “Геркулес” и “МНС” источника ИН-06 ИЯИ РАН. Были полученные времяпролетные спектры образца из которых планируется установить объёмный фазовый состав и объёмную концентрацию примесей.

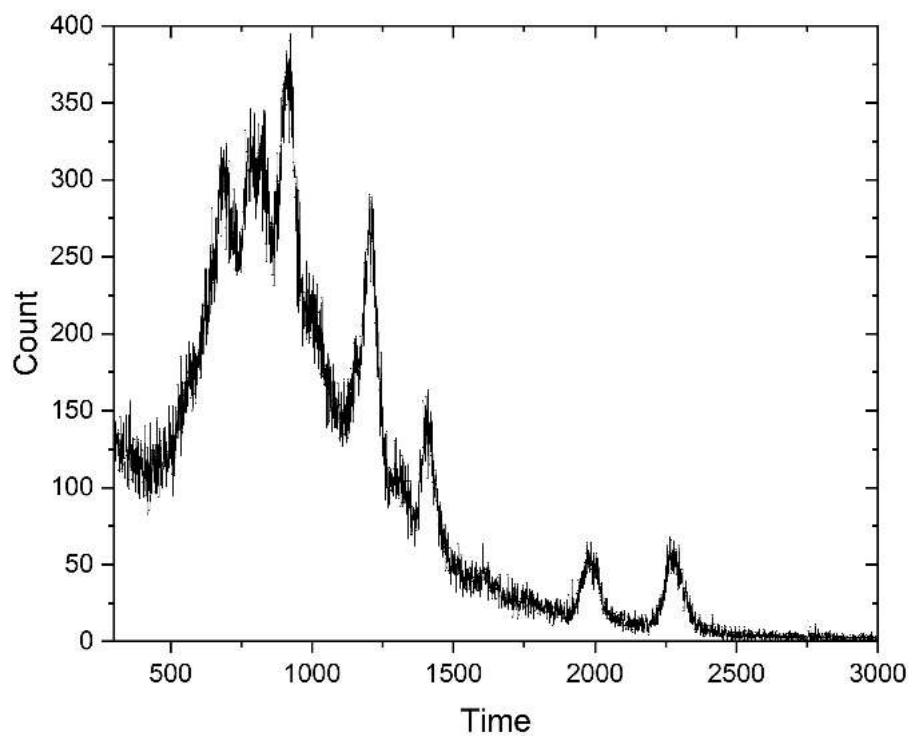


Рисунок 4.1 – Времяпролетный спектр 38XНЮ, установка “ГЕРКУЛЕС”

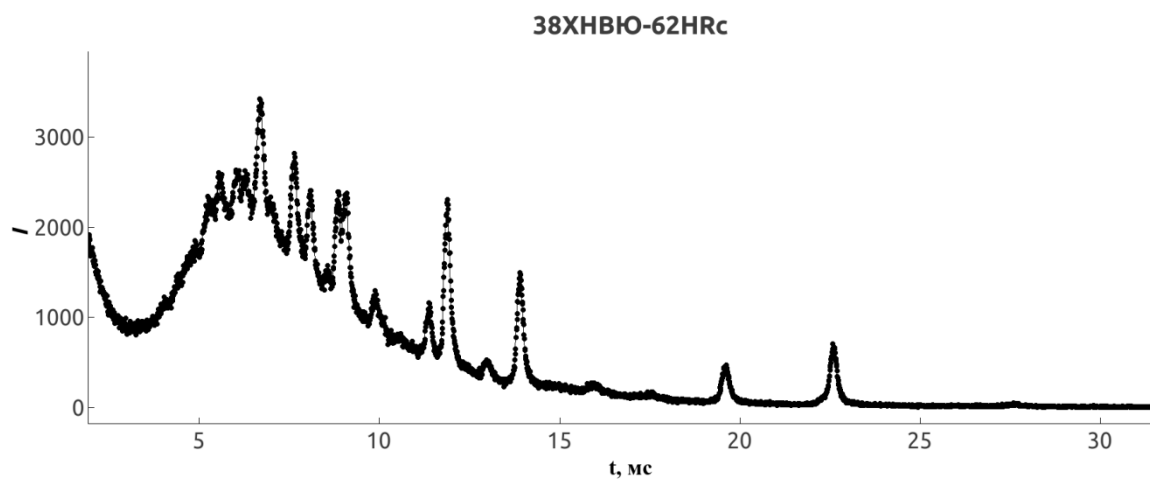


Рисунок 4.2 - Нейтронная дифрактограмма, полученная на образце сплава 38XНВЮ с твердостью 62HRC. Измерения проведены на дифрактометре высокого разрешения установки МНС на источнике ИН-06.

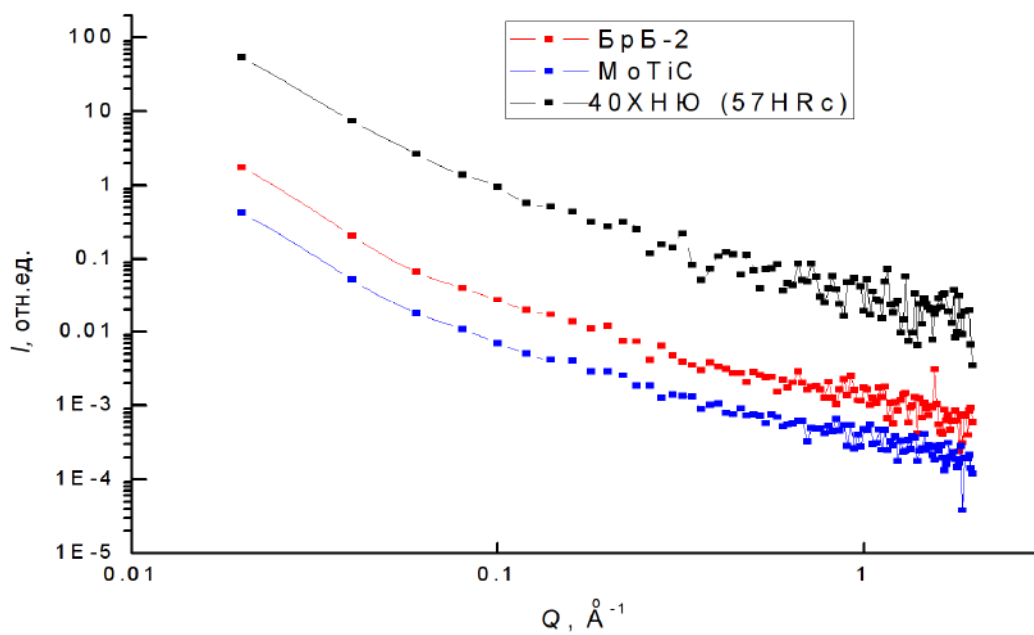


Рисунок 4.3 - Спектры МУРН на сплавах 40ХНЮ, MoTiC (Mo — основной, Ti — 10%, С — 3%) и БрБ2

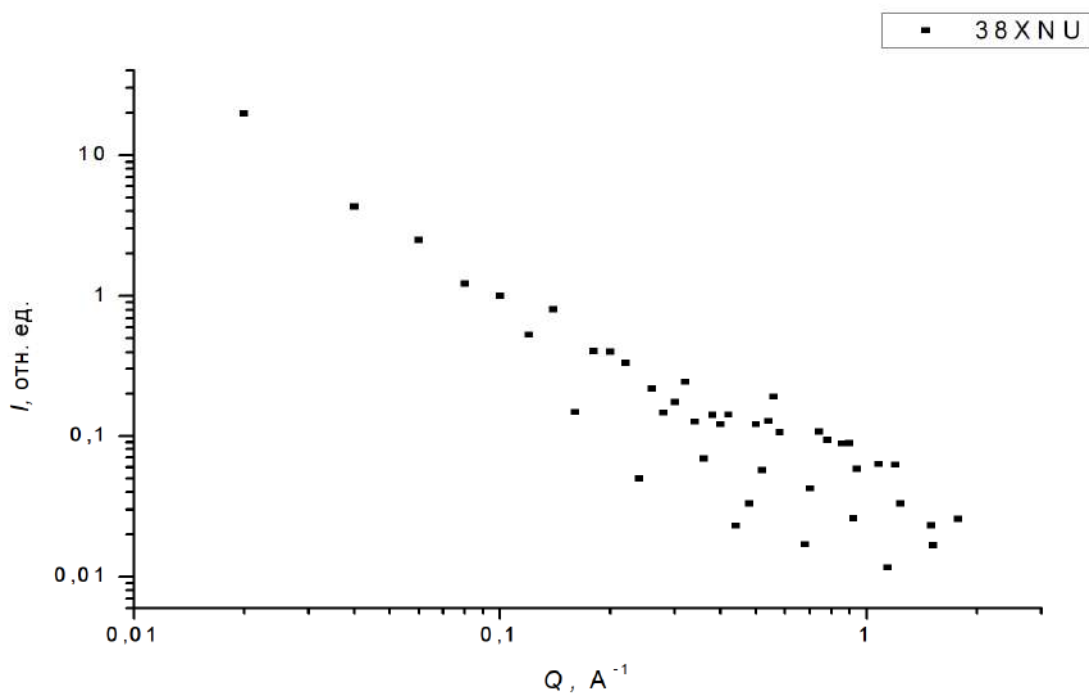


Рисунок 4.4 - Спектры МУРН на сплавах 38ХНЮ.

Результаты измерений были представлены на конференциях [1-2].

4.2. Исследование материалов при высоких давлениях и низких температурах

Основное содержание выполненных исследований:

(1) Сверхпроводимость в гидридах La и Y: оставшиеся вопросы для эксперимента и теории. Недавние результаты по наблюдению сверхпроводимости в гидридах двух разных семейств (ковалентная решетка, как в полигидриде серы SH_3 , и H-ячейки клатратного типа, содержащие атомы La и Y, как в полигидридах LaH_{10} и YH_6) открыли новые семейства высокотемпературных материалов с T_c , близкими к значениям комнатной температуры. Эти открытия подтвердили прежние ожидания, что полигидриды могут иметь очень высокие T_c из-за того, что легкие атомы водорода (H) имеют очень высокие частоты колебаний, приводя к высоким значениям T_c в рамках обычного фононного механизма сверхпроводимости Бардина – Купера – Шриффера. Однако, как указано Ашкрофтом, важно чтобы металлический водород был «легирован» с добавленными в него элементами. Эта концепция металлического сплава, содержащего высокие концентрации металлоподобных атомов водорода, сыграла важную роль в поиске новых высокотемпературных супергидридов. Эти новые супергидриды - сверхпроводники «комнатной температуры» стабилизируются только при очень высоких давлениях, выше 100 ГПа, что делает экспериментальный поиск их сверхпроводящих свойства очень сложным. Мы систематизировали текущие экспериментальные и теоретические результаты для супергидридов LaH_{10-x} и YH_{6-x} . [1].

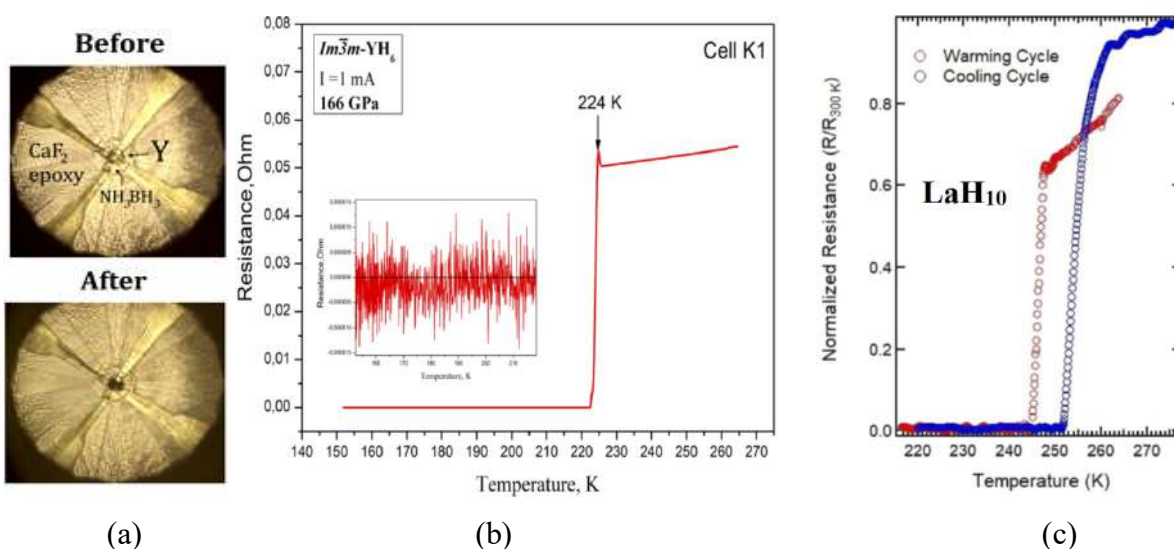
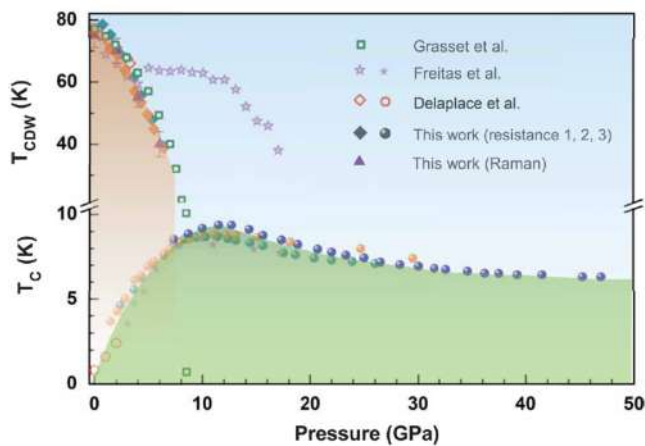
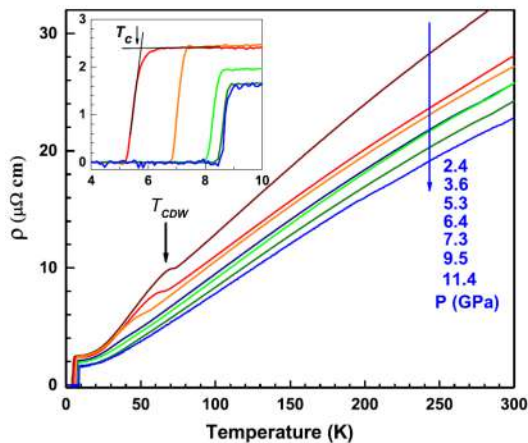


Рисунок 4.5 - (a) Характерные фотографии сборки эксперимента по измерению сопротивления в супергидридах при высоких давлениях. На примере YH_6 . Верхняя фотография – до синтеза полигидрида YH_6 , нижняя – после. (b) Температурная зависимость сопротивления YH_6 при давлении 166 ГПа. Среда участвующая в синтезе YH_6 и передающая давление – NH_3BH_3 .

(с) Температурная зависимость сопротивления LaH_{10} при давлении $\sim 170\text{-}180$ ГПа. Среда, участвующая в синтезе LaH_{10} и передающая давление – NH_3BH_3 .

(2) Влияние давления на волну зарядовой плотности и сверхпроводимость в 2H-TaS_2 . Вибрационные, и электрические транспортные свойства 2H-TaS_2 были исследованы при высоких давлениях и криогенных температурах. Коллапс волны зарядовой плотности (CDW – charge density wave) при давлениях выше 7.3 ГПа подтверждается измерениями комбинационного рассеяния, удельного сопротивления и коэффициента Холла. Для давления выше критического ~ 7.3 ГПа, температура сверхпроводящего перехода растёт и достигает своего максимального значения при ~ 11.5 ГПа, подразумевая, что это не простая конкуренция между состоянием волны зарядовой плотности и сверхпроводимостью. Исходя из вида температурной зависимости удельного сопротивления в нормальном состоянии (выше T_c), было получено, что снижение T_c при повышении давления до 47.2 ГПа обусловлено уменьшением силы взаимодействия между носителями и увеличением их рассеяния на примесях. Эти результаты очень важны для понимания механизма сверхпроводимости дихалькогенидов переходных металлов. [2].



(a)

(b)

(c)

Рисунок 4.6 - (а) Удельное электрическое сопротивление TaS_2 как функция температуры при давлениях до 11.4 ГПа T_{CDW} (температура перехода в состояние CDW). На вставке область сверхпроводящего перехода при низких температурах и критерий определения T_c .

(б) Фазовая диаграмма 2H-TaS₂. Сплошные ромбы представляют T_{CDW} из измерений удельного электрического сопротивления, сплошные кружки соответствуют T_c ; три независимых измерения отмечены разными цветами. Треугольники обозначают T_{CDW} из комбинационного рассеяния света. Экспериментальные данные из других работ приведены для сравнения.

(3) Спиновый кроссовер, индуцированный давлением, и магнитные свойства мультиферроика $\text{Ba}_3\text{NbFe}_3\text{Si}_2\text{O}_{14}$. В последнее время железосодержащий кристалл типа лангасита $\text{Ba}_3\text{NbFe}_3\text{Si}_2\text{O}_{14}$ привлекает большое внимание как новый магнитный мультиферроик. В данной работе магнитные, структурные и электронные свойства мультиферроика $\text{Ba}_3\text{NbFe}_3\text{Si}_2\text{O}_{14}$ исследованы несколькими методами, в том числе синхротронной рентгеновской дифракцией, спектроскопией комбинационного рассеяния света и методом синхротронной мессбауэровской спектроскопии при высоких квазигидростатических давлениях (до 70 ГПа), создаваемых в камерах с алмазными наковальнями. При комнатной температуре, обнаружены два структурных перехода при давлениях около 3.0 и 17.5 ГПа. Мессбауэровские исследования при высоких давлениях выявили радикальное изменение магнитных свойств при структурных переходах. При давлениях выше 18 ГПа кристалл превращается в две магнитные фазы, в одной из которых температура Нееля (T_N) увеличивается примерно в четыре раза по сравнению со значением T_N в исходной фазе (от 27 до 115 К). При давлениях выше 50 ГПа происходит спиновый кроссовер, когда часть ионов железа Fe^{3+} в кислородных октаэдрах переходит из высокоспинового (HS, $S = 5/2$) в низкоспиновое (LS, $S = 1/2$) состояние. Это приводит к новому изменению магнитных свойств. Была измерена температура магнитного упорядочения LS подрешетки (оказалась около 22 К), и были исследованы магнитные корреляции между HS и LS подрешетками [3].

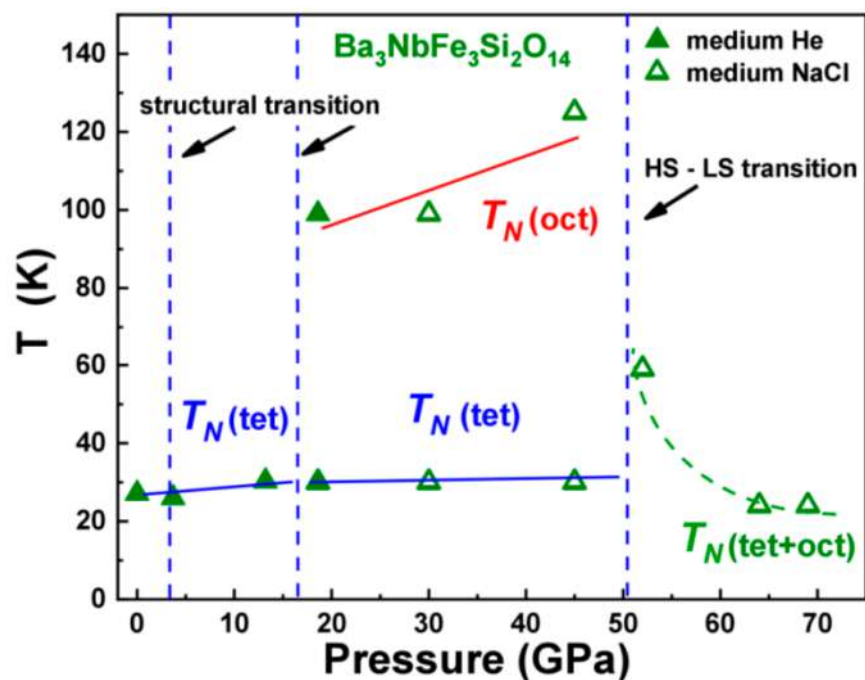


Рисунок 4.7 - Магнитная P-T фазовая диаграмма лангсита $Ba_3NbFe_3Si_2O_{14}$ демонстрирует наличие трех магнитных фаз с разными значениями T_N в разных интервалах давления. Сплошные линии соответствуют температурам Нееля и отдельным магнитным состояниям железа в тетраэдрическом и октаэдрическом окружениях. Пунктирная зеленая линия соответствует магнитному поведению соединения в низкоспиновом (LS, $S = 1/2$) состоянии. Вертикальные пунктирные линии разделяют различные фазы и электронные состояния кристалла.

(4) Синтез сильнокоррелированных полигидридов европия при высоких давлениях.

При высоких давлениях методом лазерного нагрева в алмазных наковальнях синтезированы поли- гидриды европия: EuH_9 - кубической и гексагональной симметрии, и клатратная фаза Eu_8H_{46} . Методом компьютерного моделирования были предсказаны магнитные структуры и исследовано уравнение состояния. Предсказанное уравнение состояния хорошо согласуется с экспериментальными данными из синхротронной рентгеновской дифракции. Электрон-фононное взаимодействие слабое во всех исследованных гидридах, а их магнитное упорядочение исключает s-волновую сверхпроводимость, за исключением возможно, для искаженной псевдогексагональной EuH_9 фазы. Уравнения состояния предсказаны в рамках подхода DFT + U (разности $U - J$ были найдены в рамках теории линейного отклика) и находятся в хорошем соответствии с экспериментальными данными. Эта работа показывает большое влияние атомного

радиуса на нарушение симметрии кристаллических структур исследуемых гидридов и на их термодинамическую стабильность [4].

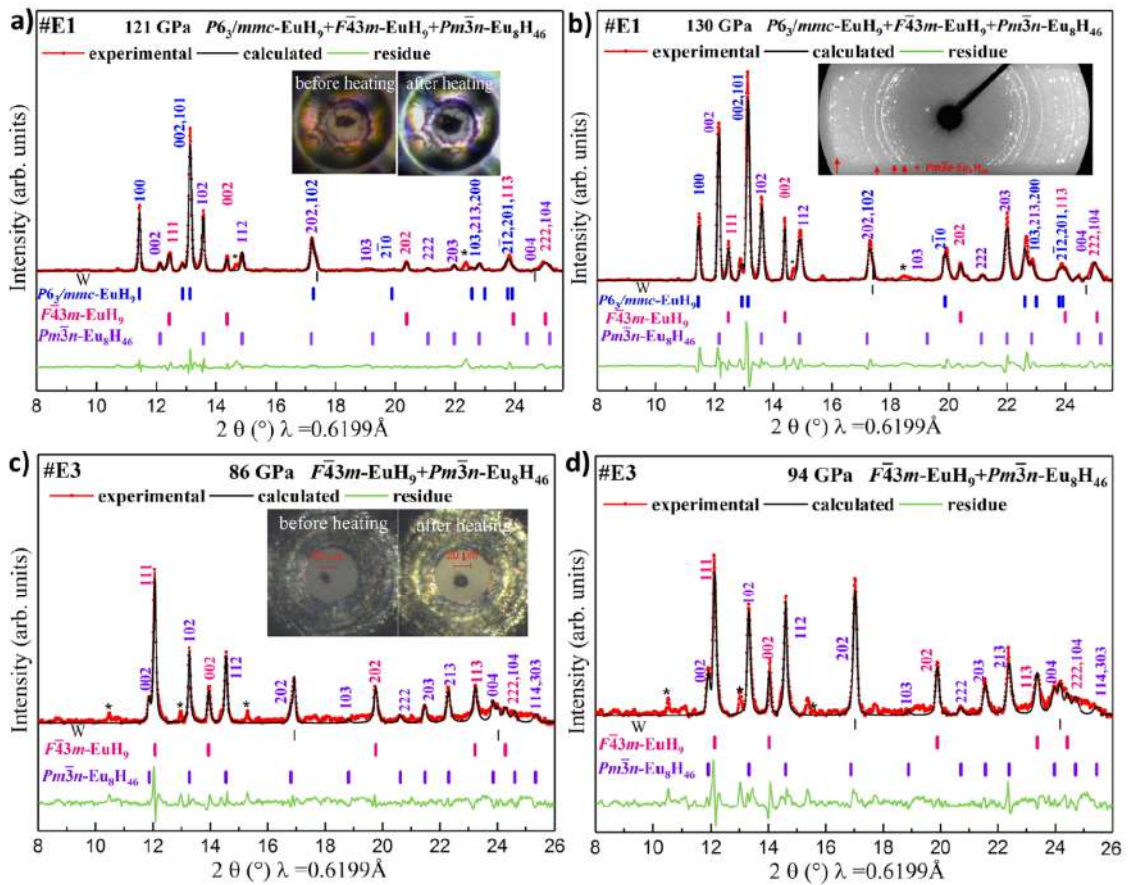


Рисунок 4.8 -. Экспериментальные дифрактограммы и уточнение по Ле Бейлу гидридов Eu. Уточнения Ле Бейла для $F\bar{4}3m-EuH_9$, $P6_3/mmc-EuH_9$ и $Pm\bar{3}n-Eu_8H_{46}$ при 121 ГПа (a) и 130 ГПа (b). Вставка в подрисунок (b) – экспериментальная рентгенограмма (ячейка высокого давления E1). Экспериментальные данные, подгонка и разность показаны красным, черным и зеленым цветом соответственно. Неопределённые отражения (возможно, $I4/mmm-EuH_4$) отмечены звездочками. Параметры сходимости для $F\bar{4}3m-EuH_9$, $P6_3/mmc-EuH_9$ и $Pm\bar{3}n-Eu_8H_{46}$ при 121 ГПа составляют $R_p = 21,4\%$ и $R_{wp} = 35,6\%$; при 130 ГПа, $R_p = 25,3\%$ и $R_{wp} = 34,6\%$. Уточнения Ле Бейла для $F\bar{4}3m-EuH_9$ и $Pm\bar{3}n-Eu_8H_{46}$ при (c) 86 ГПа и (d) 94 ГПа для ячейки высокого давления E3. Вставки в подрисунки (a) и (c) – ячейки высокого давления E1 и E3 с образцами до и после лазерного нагрева соответственно.

4.3. Радиационное материаловедение

В работе рассматривались как зарождение, так и последующий рост вакансионных пор. В отличие от предыдущих исследований насыщения распухания за счет присутствия

одномерно движущихся междоузлий не предполагалось. Впервые показано, что первоначально зародившиеся поры могут отжигаться уже тогда, когда пространственно-упорядоченные поры составляют лишь небольшую долю ансамбля. Более того, несмотря на непрерывную генерацию каскадами столкновений микроскопических зародышей пор в случайных пространственных положениях, развитие популяции пор, случайно расположенных в пространстве, полностью подавляется стохастическими флуктуациями, когда пространственно-упорядоченные поры основные стоки для точечных дефектов, а доля одномерно движущихся междоузлий не является пренебрежимо малой.

5. Задача: «Моделирование процессов, инициированных пучком протонов линейного ускорителя в установках Нейтронного комплекса ИЯИ, с целью улучшения и оптимизации параметров установок»

5.1 Расчетно-теоретические исследовательские работы по размножающим мишеням на основе Нептуния 237 – Плутония 239, по вольфрамовому нейтронному источнику»

Было показано

- 1) что сочетание сравнительно небольшого протонного ускорителя типа ISIS (без сверхпроводимости и прочих усложнений) со средним током пучка $200 \div 250$ мкА и глубоко подкритической размножающей мишени с коэффициентом умножения ~ 20 позволяет на порядок увеличить плотность потока нейтронов по сравнению с источником на основе вольфрамовой мишени. Это позволяет выйти на параметры ESS;
- 2) умножение 20 снижает фон между импульсами и, соответственно, требование к глубине модуляции реактивности или позволит вообще отказаться от модулятора. Нейтронный фон между импульсами будет минимальным при использовании нептуниевой мишени;
- 3) вращающаяся мишень кардинально позволяет увеличить среднее время жизни мишени с ~ 2 лет до 15, что сопоставимо со сроком службы реактора ИБР-2.

Результаты опубликованы и докладывались на международных семинарах

5.2 Разработка и физическое обоснование перспективных источников с плотностью потока тепловых нейтронов на поверхности замедлителей, сопоставимых с Европейским проектом (ESS) (совместно с ОИЯИ)

Рассматривалось дальнейшее развитие реактора типа ИБР-2 на основе существующих реакторных технологий. Было показано, что использование более тонких тепловыделяющих элементов, используемых в реакторе БОР-60, а также сокращение промежутка между активной зоной и внешними водяными замедлителями за счет переноса органов СУЗ внутрь активной зоны значительно сокращает геометрический фактор и увеличивает теплонапряженность активной зоны. Вследствие этого, предложенный концептуальный вариант реактора ИБР-4 позволяет:

- 1) реализовать этот вариант в относительно короткие сроки при минимальных затратах на НИОКР, разработку и реализацию всего проекта по сравнению со всеми другими вариантами высокопоточных нейтронных источников;
- 2) увеличить до $5,8 \cdot 10^{13} \text{ см}^{-2} \cdot \text{с}^{-1}$ плотности потоков тепловых нейтронов на поверхности замедлителей, т.е. - в 10 раз по сравнению с ИБР-2М;
- 3) вышесказанное сделает ИБР-4 конкурентно способным с создаваемыми лучшими зарубежными установками и позволит ОИЯИ оставаться одним из мировых центров по нейтронным исследованиям.

Основные результаты будут опубликованы в статье.

КОНЦЕПЦИЯ ИМПУЛЬСНОГО РЕАКТОРА ПЕРИОДИЧЕСКОГО ДЕЙСТВИЯ

ИБР-4 Ю.Н.Пепельшев, А.В. Виноградов, А.Д.Рогов, С.Ф.Сидоркин

Письма в ЭЧАЯ. 2021. Т. 18, № 1(233). С. 98–112

А также докладывались на семинарах и опубликованы в препринте ОИЯИ [P13-2020-14](#)

6. Задача «Развитие новых методов исследований на нейтронных источниках»

Подзадачи, входящие в работы по программе фундаментальных научных исследований:

6.1 Адаптация метода нейтронной радиографии и томографии для диагностики промышленных изделий и объектов культурного наследия

В продолжение совместной работы с НИЦ “Курчатовский институт” в области томографии проводилась оптимизация системы перемещения образца. Целью работы было оптимизировать как программное обеспечение, так и электронную часть.

Важность оптимизации заключается в том, что при проведении эксперимента до половины времени эксперимента тратится на позиционирование образца для съемки кадра, а при габаритных объектах время перемещения может занимать до 80% времени эксперимента. Таким образом при оптимизации можно значительно сократить время эксперимента и значительно увеличить количество исследуемых образцов, что особенно важно диагностике.

В рамках этой работы были заменена электроника стола образца, используемого на установке, ДРАКОН реактора ИР-8 и оптимизированно программное обеспечение. По расчетам это позволит сократить время перемещения до 2х раз от существующей.

6.2 Развитие новых методов исследования фундаментальных взаимодействий при низких энергиях нейтронов

Работы по развитию новых методов исследования фундаментальных взаимодействий при низких энергиях нейтронов ведутся совместно с ЛНФ ОИЯИ, согласно Протоколу № 4940-4-20/22 о выполнении совместной научно-исследовательской работы.

Предложен новый метод (ВЖН) на импульсных источниках нейтронов, основанный на изменении спектра нейтронов за время их пролета достаточно большой пролетной базы, за счет их распада. Предложенный метод имеет свои достоинства и недостатки.

Достоинство предложенного метода в том, что в нем используются относительные измерения. Измерения (ВЖН) на реакторе ИБР-2 имеют свои трудности, связанные с очень большой импульсной плотностью потока нейтронов и большой величиной фона запаздывающих нейтронов.

6.2.1 Разработка нового метода измерения времени жизни нейтрона.

Измерение времени жизни нейтрона времяпролетным методом требует решения ряда сложных экспериментальных задач:

А) Необходимость сформировать пучок нейтронов, имеющий определенный спектральный состав.

- Б) Разработать метод измерения фона запаздывающих нейтронов.
- В) Разработка токового метода регистрации времяпролетных спектров.

6.2.2 Исследование характеристик временных и фоновых характеристик ГЭК-1 реактора ИБР-2.

Создана первая очередь прототипа установки для измерения времени жизни нейтрона с помощью спектрометрии по времени пролета.

Выполнены вакуумные испытания прототипа.

Выполнены исследования временных характеристик времяпролетного спектрометра, установленного на 1-ом канале реактора ИБР-2.

Практически вся мощность реактора, 93%, вырабатывается во время импульса мощности. Оставшиеся 7% часть мощности реактора связаны с запаздывающими нейтронами. Мощность реактора (P) во время паузы слабо зависит от времени из-за зависимости от времени реактивности реактора во время паузы:

$$P(t) = -P_0 \cdot \beta / \varepsilon(t) \quad (1).$$

Здесь P_0 – мощность импульса, β – доля запаздывающих нейтронов, $\varepsilon(t)$ – реактивность реактора во время паузы. Реактивность реактора во время паузы слегка периодически меняется при прохождении основного подвижного отражателя мимо активной зоны реактора или не периодически при работе стержня автоматического регулятора или блока компенсирующего отражателя. Количество нейтронов, рождаемых в реакторе, пропорционально его мощности. Таким образом, запаздывающие нейтроны дают заметный и не устранимый вклад в фон при измерениях по времени пролета.

Для точного измерения сечения любой ядерной реакции важно так же точно знать величину фона. Выполнены первые измерения фона запаздывающих нейтронов в тепловой области энергий, обнаружена сильная зависимость фона запаздывающих нейтронов от времени. В осенне-зимних циклах работы реактора ИБР-2 выполнены измерения спектров пропускания с образцами Ta, In, и Sm. На рисунке 6.1 представлены спектры пропускания, черная и голубая линии – в пучке Sm, In и Cd, красная и лиловая линии – в пучке Ta. В данных измерениях пучок нейтронов был перекрыт 15 см свинца, чтобы уменьшить интенсивность падающих на детектор нейтронов.

6.2.3 Разработка токового метода регистрации времяпролетных спектров.

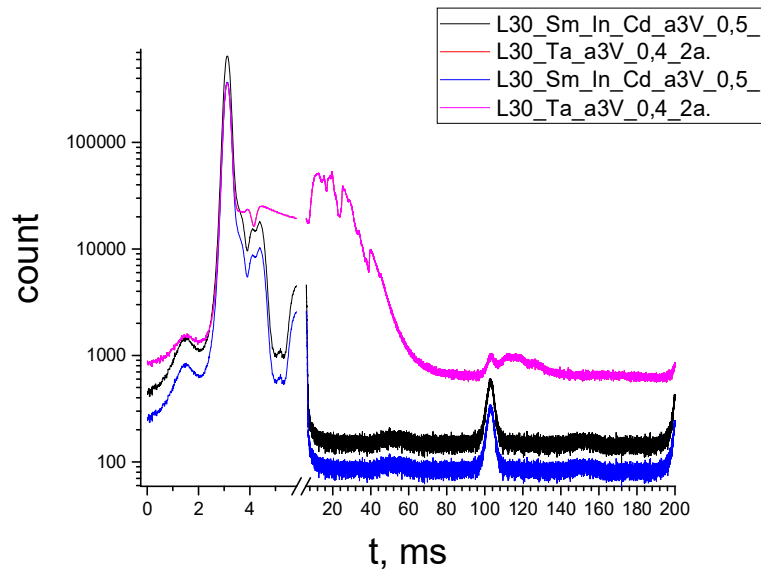


Рисунок 6.1 - Фон запаздывающих нейтронов с энергией большей 0,4 эВ и в черных резонансах In и Sm.

На рисунке прекрасно видно изменение фона запаздывающих нейтронов в зависимости от положения основного и дополнительного отражателей реактора ИБР-2.

Предварительные результаты обработки представлены на рисунках 6.2 и 6.3. Из рисунка видно, что спектр запаздывающих нейтронов имеет сложную структуру, связанную с модулируемой реактивностью реактора. Ширины пиков сателлитов в десятки раз превосходят ширину импульса мощности реактора.

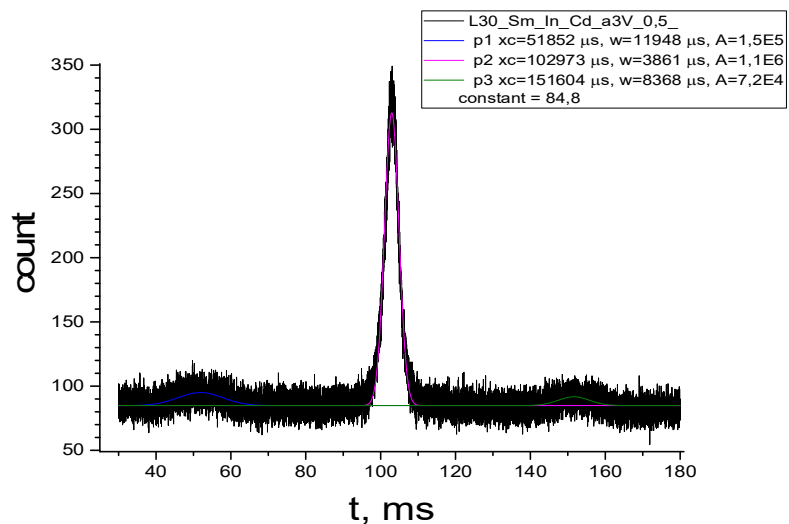


Рисунок 6.2 - Черная линия – фрагмент времяпролетного спектра пропускания нейтронов через самарий, кадмий и индий. Голубая, лиловая и зеленые линии – результаты аппроксимации Гауссом сателлитов.

Если вырезать сателлиты из времяпролетного спектра нейтронов, мы должны увидеть спектр запаздывающих нейтронов, трансформированный реактивностью реактора. На рисунке 6.2 представлены результаты определения параметров распадного спектра запаздывающих нейтронов, образованных во время импульса мощности реактора. Видно, что в пределах погрешности измерений и симуляции, параметры спектров совпадают.

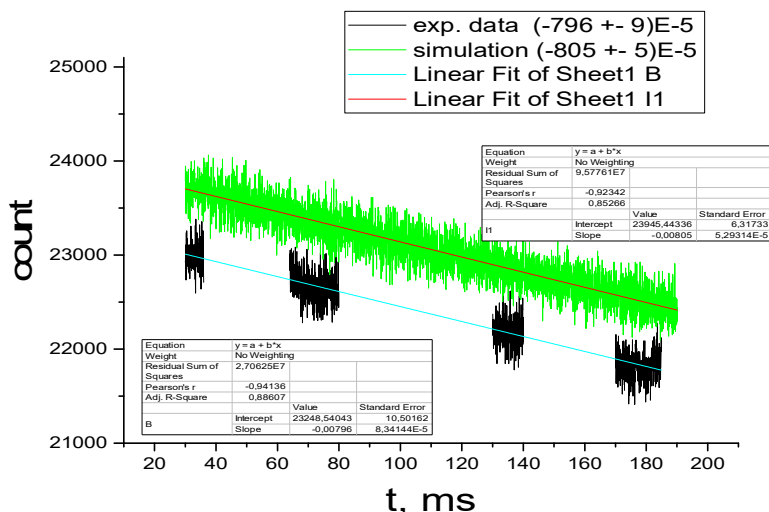


Рисунок 6.3 - Черная линия – фрагменты времяпролетного спектра запаздывающих нейтронов, зеленая линия – симуляция распадного спектра запаздывающих нейтронов, образованных во время импульса мощности реактора.

Все представленные результаты носят предварительный характер, так как некоторые результаты (декабрьские 2020 г.) находятся в обработке и анализируются.

Недостатком предложенного метода является маленькая величина измеряемого эффекта $\sim 10^{-5}$. Измерения (ВЖН) на реакторе ИБР-2, имеют свои трудности, связанные с очень большой импульсной плотностью потока нейтронов и большой величиной фона запаздывающих нейтронов.

Ранее авторы использовали интегрально-компенсационный метод измерения малых Р-нечетных эффектов в работах, выполненных на стационарных реакторах. В настоящее время мы развиваем интегрально-компенсационный метод измерения времяпролетных спектров на реакторе ИБР-2.

В декабрьском цикле реактора ИБР-2 были проведены испытания новой измерительной системы, использующей 8-ми каналный оцифровщик с частотой оцифровки 100 МГц предназначенный для измерения времяпролетных спектров нейтронов большой интенсивности. Результаты обрабатываются.

Подготовлена камера для работы на СВЗ на основе (n,α) -реакции

6.3. Создание интенсивного W-Be-фотонейтронного источника на основе серийного промышленного электронного ускорителя ЛУЭ-8-5 ИЯИ РАН

В ИЯИ РАН создан W-Be-фотонейтронный источник нейтронов ИН-ЛУЭ на базе линейного ускорителя электронов ЛУЭ-8-5. Источник обеспечивает поток тепловых нейтронов порядка $10^7 - 10^8$ нейтрон/см²·с, что сравнимо с параметрами реакторных источников нейтронов, нейтронных генераторов и микротронов при достаточно низком гамма-фоне и удовлетворительных размерах поля облучения. В целом ускоритель электронов ЛУЭ-8-5, W-Be-фотонейтронный источник нейтронов ИН-ЛУЭ и низкофоновая камера с детектором из сверхчистого германия (HPGe) образуют активационно-измерительный ускорительный комплекс для решения фундаментальных и прикладных задач. Ранее в работе [1] нами была описана методика проведения измерений и изложено описание метода нейтронно-активационного анализа. Так же в работе [1] описан метод обработки полученных экспериментальных данных и авторская методика восстановления спектра. Целью настоящей работы является использование полученных экспериментальных данных для восстановления независимым программным продуктом LOUNI из банка программ OECD Nuclear Energy Agency (NEA) [2].

Рассмотрена возможность восстановления спектра нейтронов фотонейтронного источника с использованием активационных детекторов. Показана возможность выбора активирующих реакций пригодных для восстановления нейтронных спектров. Восстановление проводилось с использованием программы LOUNI из банка программ Агентства по ядерной энергии (NEA). Подбор оптимальных весовых параметров членов в минимизируемом функционале проводился по данным, полученным с использованием модельного спектра нейтронов.

Изучены характеристики двухкоординатного ¹⁰B-детектора. При разработке позиционно-чувствительного ионизационного детектора быстрых нейтронов с энергиями выше 1 МэВ проведено моделирование событий эмиссии ядер ⁷Li и ⁴He из слоя ¹⁰B. Данный детектор дает возможность измерять направление вылета ядер за счет позиционно-чувствительных анода и пар катодов и сеток. Идентификация ядер и определение их энергий осуществляется по сигналам ионизации от газовых зазоров детектора. Энергия падающего нейтрона рассчитывается из кинематики реакции. Ожидаемое относительное разрешение по энергии нейтрона составляет ~6%, а эффективность детектора в диапазоне энергий от 1 до 7 МэВ меняется незначительно и

оценивается как $\sim 10^{-7}$. Таким образом показано, что детектор позволяет определять энергию и координаты нейтрона без измерения времени пролета.

Одним из основных элементов установки малоуглового рассеяния нейтронов является позиционно-чувствительный детектор (ПЧД). Подобный же детектор был использован для изучения пространственного распределения тепловых и быстрых нейтронов на выходе нейтронного канала фотонейтронного источника. На практике широко используются одно- и двухкоординатные газовые ПЧД, в которых конвертором нейтронов служат газы BF_3 и ^3He .

В ИЯИ РАН создан двухкоординатный ПЧД тепловых нейтронов на основе ^{10}B [7]. Испытания детектора в потоке медленных и быстрых нейтронов до энергии 7 МэВ показали, что спектр амплитуд вторичных ядер (^4He и ^7Li) в области энергий от 1 до 7 МэВ зависит от энергии нейтрона. Было найдено как расчетным способом, так и в эксперименте, что при высоком пороге регистрации для второго чувствительного газового зазора преимущественно регистрируются события с ядром ^7Li . В этом случае центр тяжести максимума в амплитудном спектре от первого газового зазора увеличивается с ростом максимальной энергии нейтронного потока. Низкая эффективность для быстрых нейтронов позволяет измерять высокую плотность и максимальную энергию потока таких нейтронов на малых расстояниях от центра источника нейтронов [8]. Однако, из-за неопределенности угла вылета ядра ^4He или ^7Li из ядерной реакции невозможно найти начальную энергию нейтрона. Целью настоящей работы является изучение возможности восстанавливать энергию падающего нейтрона в разных диапазонах энергий.

6.3.1. Изучение спектра тепловых нейтронов W-Be фотонейтронного источника

Создание W-Be-фотонейтронного источника нейтронов на базе линейного ускорителя электронов потребовало исследований характеристик фотонейтронного источника. Спектр нейтронов внутри источника может быть получен только решением обратной задачи восстановления с использованием ограниченного числа данных с активационных детекторов.

Целью настоящей работы является использование полученных экспериментальных данных с активационных детекторов для восстановления спектра источника независимым программным продуктом LOUHI из банка программ OECD Nuclear Energy Agency (NEA) [2].

Для определения плотности потока нейтронов использовался метод нейтронно-активационного анализа (НАА) [3]. Измерения плотности потока тепловых нейтронов

внутри и вне источника проводились методом НАА с использованием активационных детекторов из материалов с известными сечениями активации (n, γ)-реакций. Все измерения основаны на определении активности, наведенной нейтронами в веществе детектора. Подробно метод описан в [1, 4]. Кратко отметим, что в рамках НАА измеряемая площадь аналитического пика радионуклида в гамма-спектре i -го активированного детектора представляется в виде:

$$S_i = \frac{m_i g_i N_A p_i \varepsilon}{A_i \lambda_i} K_i J_i; \quad (1)$$

где S_i – число отсчетов в аналитическом пике изотопа i -го элемента (без фона); m_i – масса i -го элемента в детекторе; g_i – содержание аналитического изотопа i -го элемента в естественной смеси изотопов; N_A – число Авогадро; p_i – выход гамма-квантов на один распад образовавшегося радиоактивного изотопа; ε – эффективность регистрации излучения наведенной активности; A_i – атомный вес i -го элемента; λ – постоянная радиоактивного распада;

$$K_i = (1 - e^{-\lambda_i t_a}) e^{-\lambda_i t_b} (1 - e^{-\lambda_i t_m}) \quad (2)$$

и t_a – время активации; t_b – время выдержки после облучения; t_m – время измерения.

Здесь J_i – скорость i -ой реакции или интеграл свертки, который представляют в виде суммы свертки по m энергетическим точкам спектра:

$$J_i = \int_0^{\infty} \sigma_i(E) \varphi(E) dE \rightarrow \sum_{j=0}^m \sigma_i(E_j) \Phi(E_j); \quad (3)$$

$\sigma_i(E)$ – сечение активирующей ядерной реакции в зависимости от энергии нейтронов E ; $\varphi(E)$ – спектральная плотность потока нейтронов и $\Phi(E)$ – плотность потока нейтронов.

Суммарный интеграл свертки (3) по всем аналитическим реакциям детекторов в программе LOUHI представляется в виде функционала для минимизации:

$$Q = Q_0 + \gamma \sum_{k=1}^5 W_k Q_k. \quad (4)$$

Здесь члены Q_k имеют различные физические смыслы и позволяют использовать различные подходы к восстановлению спектров. В данной работе мы использовали некоторые из них: Q_0 – взвешенную квадратную сумму разностей измеренных и

рассчитанных решений, т.е. это фактически стандартный χ^2 и Q_3 – взвешенную сумму квадратов первых производных решения. Весовые коэффициенты γ и W_k позволяют задавать дополнительный вклад различных членов в общую сумму для минимизации. Подробное описание используемого математического аппарата представлено в описании программы [2].

При выборе активационного детектора мы воспользовались методикой, изложенной нами в работе [4]. Она заключается в том, что для НАА используются детекторы, имеющие избирательную чувствительность к нейтронам различных энергий с учетом характерных особенностей исследуемого спектра.

На рис. 6.4а показана энергетическая зависимость сечения реакции захвата (n, γ) на ядре ^{55}Mn [5] и модельный энергетический спектр нейтронов (рис. 6.4б), полученный в результате моделирования источника [6]. Спектр на рис. 6.4б можно условно разбить на три области: 1 – «тепловых» (10^{-2} –1 эВ), 2 – «промежуточных» (1 эВ–10 кэВ) и 3 – «быстрых» (более 10 кэВ) нейтронов. Здесь обозначение областей условное. Видно, что и сечение, и спектр имеют характерные особенности в разных участках энергетической зависимости. На рис. 6.4 также показаны суммы сечения (рис. 6.4в) и свертки (3) (рис. 6.4г) для областей 1 – 3 спектра на рис. 6.4б. Для ^{55}Mn видно, что, хотя вклады в сечение тепловой и промежуточных частей спектра существенны, но в сумму свертки дает вклад только тепловая область.

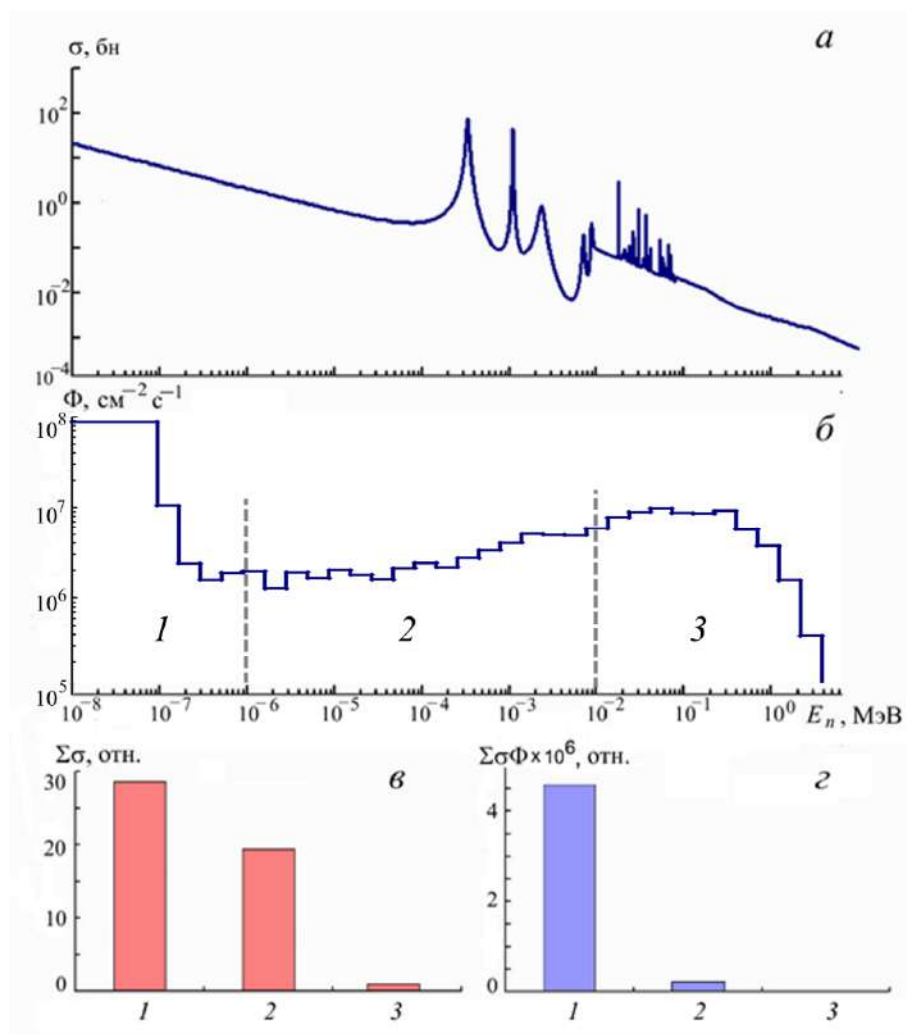


Рисунок 6.4 - Энергетическая зависимость сечения реакции захвата $^{55}\text{Mn} (n, \gamma)^{56}\text{Mn}$ [5] (a); модельный энергетический спектр (плотность потока Φ) нейтронов [б] внутри фотонейтронного источника и разбивка его на три области: область тепловых (1), промежуточных (2) и быстрых нейтронов (3) (б); суммы сечения (в) и свертки (z) для областей 1 – 3 спектра на рис. 6.4б.

Анализ для реакций захвата на разных ядрах показал, что можно подобрать ряд элементов для использования в качестве материалов активационных детекторов, которые будут чувствительны в основном к нейтронам из тепловой области.

Т.к. нас интересует именно тепловая и промежуточная области спектра и плотность потока тепловых нейтронов, то для удобства проведения измерений в качестве материалов активационных детекторов выбраны 8 элементов (Ag, Mg, Mn, Sb, Ti, As, Ga) из-за достаточных больших значений сечения σ_t и удобного для измерений периода полураспада. На рис. 6.5 показаны суммы свертки (z) для областей 1–3 спектра на рис.

6.4б. Для ^{26}Mg , ^{55}Mn , ^{50}Ti , ^{107}Ag видно, что в измеряемую сумму свертки (3) дает вклад только тепловая область спектра нейтронов, а для ^{69}Ga , ^{71}Ga , ^{75}As и ^{121}Sb сумма свертки чувствительна также и к промежуточной части спектра. Следует отметить также слабую чувствительность измеряемых данных для этих изотопов к нейтронам из «быстрой» части спектра. Измеренные данные J_i для указанных 8 детекторов использовались далее в программе LOUHI при восстановлении спектра нейтронов.

Как было сказано выше, функционал для минимизации в программе представлен в виде (4). Свободными параметрами при восстановлении являются весовые параметры γ перед Q_k при минимизации функционала Q .

Для выбора оптимальных значений γ при восстановлении нами сначала использовались в качестве «измеренных» значений активностей детекторов на основе Ag, Mn, Ti, Mg, Sb, As и Ga значения, рассчитанные на основе спектра, полученного в результате моделирования. Весовые параметры γ подбирались таким образом, чтобы получить восстановленный спектр наиболее близким к модельному и с наименьшими ошибками. Программа LOUHI позволяет использовать при восстановлении различные члены в минимизируемом функционале Q .

Были рассмотрены варианты минимизации функционалов Q_0 (рис. 6.6) и Q_0+Q_3 (рис. 6.7). При этом рассматривалось также влияние количества экспериментальных величин (числа используемых детекторов) на качество восстановления. На рис. 6.6–6.7 приведены результаты восстановления модельного спектра с использованием от 5 (Ag, Mn, Mg, Ti, Sb) до всех 8 (Ag, Mn, Mg, Ti, Sb, As, ^{69}Ga , ^{71}Ga) детекторов. Полученные результаты показывают хорошее воспроизведение модельного спектра в области чувствительности до 3 кэВ и уменьшение коридора ошибок и осцилляций в решении при увеличении числа детекторов. Минимизация также вкладов от первых (Q_3) производных приводит к сглаживанию и уменьшению осцилляций восстановленного спектра, а также к сужению коридора ошибок. Аналогичное поведение наблюдается и при увеличении участвующих в восстановлении экспериментальных данных. Минимизация одного функционала Q_0 не обеспечивает получение результата с приемлемой гладкостью решения и коридором ошибок. При этом можно наблюдать, что использование варианта минимизации Q_0+Q_3 дает результат с меньшим числом осцилляций. Следует отметить, что для обеспечения удовлетворительного восстановления спектра в области чувствительности до 3 кэВ достаточно использовать до 7 детекторов.

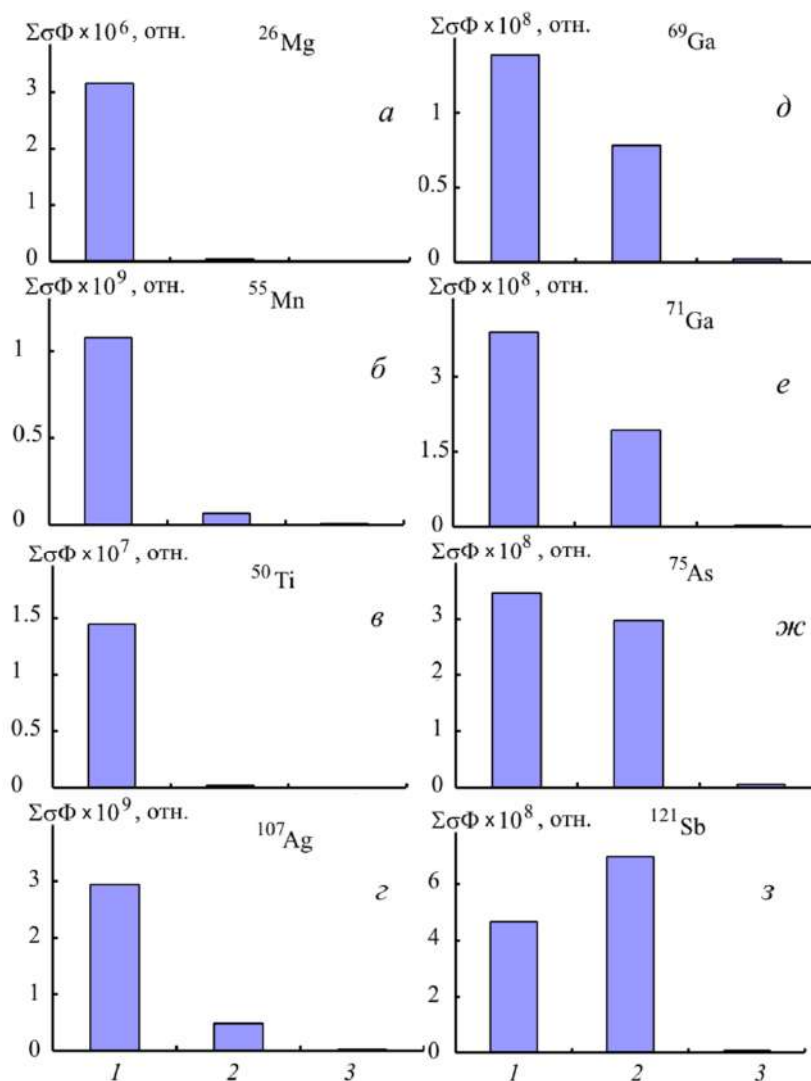


Рисунок 6.5 - Суммы свертки (3) для областей 1 – 3 спектра на рис. 6.4б: для реакции $^{26}\text{Mg}(n, \gamma)^{27}\text{Mg}$ (а), $^{55}\text{Mn}(n, \gamma)^{56}\text{Mn}$ (б), $^{50}\text{Ti}(n, \gamma)^{51}\text{Ti}$ (в), $^{107}\text{Ag}(n, \gamma)^{108}\text{Ag}$ (г), $^{69}\text{Ga}(n, \gamma)^{70}\text{Ga}$ (д), $^{71}\text{Ga}(n, \gamma)^{72}\text{Ga}$ (е), $^{75}\text{As}(n, \gamma)^{76}\text{As}$ (ж) и $^{121}\text{Sb}(n, \gamma)^{122}\text{Sb}$ (з).

К сожалению, программа LOUNI не обеспечивает в достаточной степени получение абсолютных значений получаемых плотностей потока тепловых нейтронов из-за используемых в качестве свободных параметров различных весовых факторов. При этом форма модельного спектра восстанавливается достаточно хорошо.

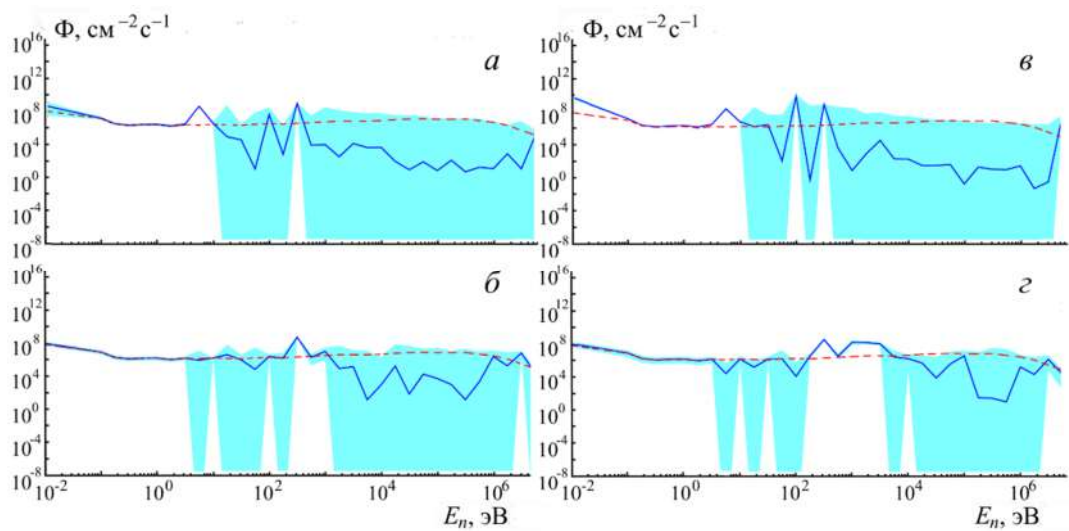


Рисунок 6.6 - Результат восстановления модельного спектра при минимизации функционала Q_0 при использовании: *a* – 5 (Ag, Mn, Mg, Ti, Sb), *б* – 6 (Ag, Mn, Mg, Ti, Sb, As), *в* – 7 (Ag, Mn, Mg, Ti, Sb, As, ^{69}Ga), *г* – 8 (Ag, Mn, Mg, Ti, Sb, As, ^{69}Ga , ^{71}Ga) детекторов. Штриховая линия – модельный спектр, сплошная – результат восстановления модельного спектра. Закрашенные области – коридор ошибок.

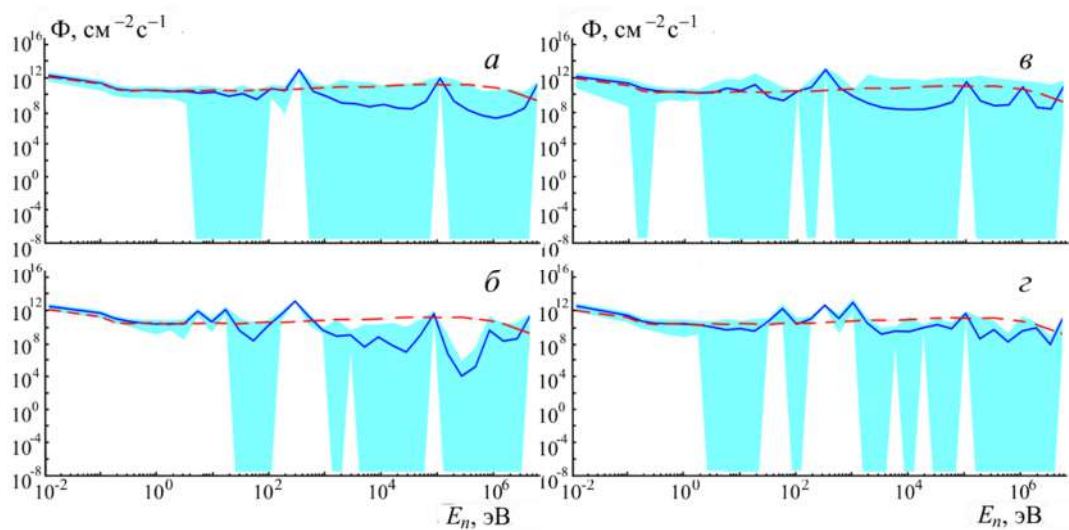


Рисунок 6.7 - Результат восстановления модельного спектра при минимизации функционала Q_0+Q_3 . Обозначения, как на рис. 6.6.

Полученные при восстановлении модельного спектра параметры γ использовались далее для восстановления спектра нейтронов по реальным экспериментальным данным. На рис. 6.8–6.9 приведены результаты восстановления экспериментального спектра с использованием, как различного числа экспериментальных данных (детекторов), так и различных вариантов функционалов минимизации при восстановлении спектра.

Полученные результаты также показывают уменьшение коридора ошибок в области чувствительности до 3 кэВ и числа осцилляций в решении при увеличении числа детекторов. Минимизация вкладов от первых (Q_3) производных также приводит к сглаживанию и уменьшению осцилляций восстановленного спектра и к сужению коридора ошибок. Аналогичное поведение наблюдается и при увеличении участвующих в восстановлении экспериментальных данных. Минимизация одного функционала Q_0 также не обеспечивает получение результата с приемлемой гладкостью решения и коридором ошибок. При этом можно наблюдать, что использование варианта минимизации Q_0+Q_3 также дает результат с меньшим числом осцилляций. Следует отметить, что для обеспечения удовлетворительного восстановления спектра в области чувствительности до 3 кэВ достаточно использовать 5–6 детекторов.

В целом программы LOUHI обеспечивает приемлемое качество и коридор ошибок восстановления формы спектра нейтронов фотонейтронного источника с использованием данных с активационных детекторов.

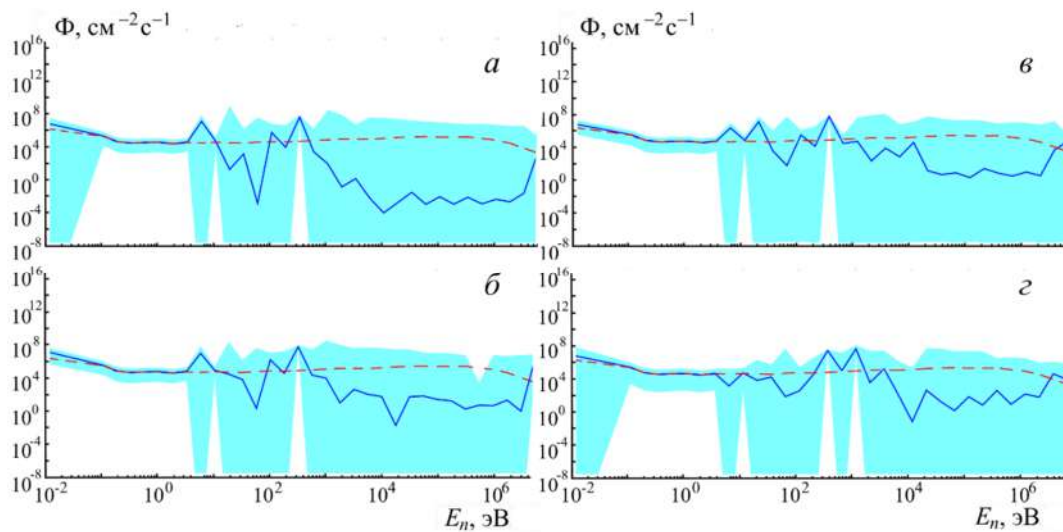


Рисунок 6.8 - Результат восстановления экспериментального спектра при минимизации функционала Q_0 . Обозначения, как на рис. 6.6. Сплошная линия – результат восстановления экспериментального спектра.

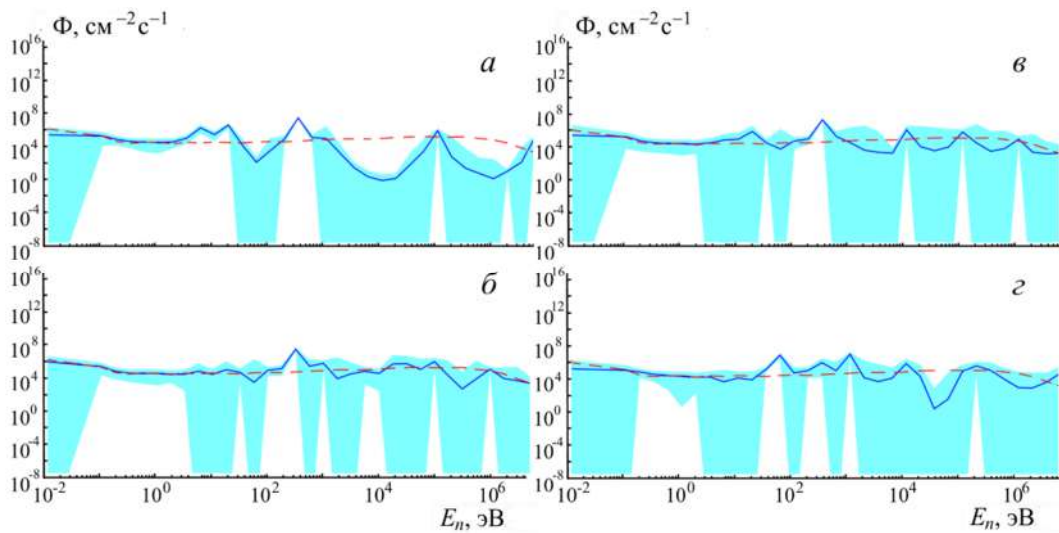
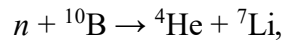


Рисунок 6.9 - Результат восстановления экспериментального спектра при минимизации функционала Q_0+Q_3 . Обозначения, как на рис. 6.6 и 6.8.

6.3.2. Эффективность и энергетическое разрешение детектора быстрых нейтронов с ^{10}B -конвертером

Для определения начальной энергии нейтрона в ИЯИ РАН разрабатывается детектор быстрых нейтронов с ^{10}B -конвертером. Принцип его работы основан на регистрации в ионизационной камере ядер ^4He и ^7Li , образующихся в реакции



которая является основной для быстрых нейтронов. В качестве конвертера выступает тонкий слой ^{10}B , а ионизационная камера, состоит из двух спаренных взаимно перпендикулярных катодов, между которыми располагается анод (рис. 6.10).

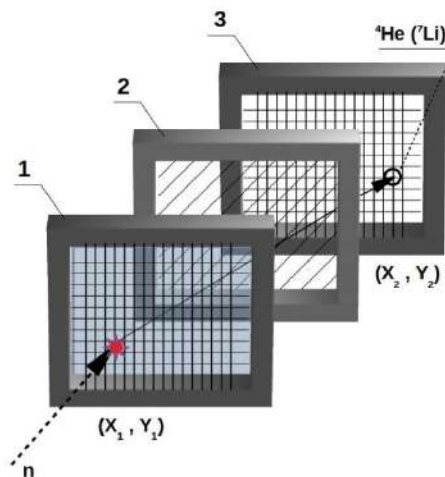


Рисунок 6.10 - Принцип регистрации и определения энергии нейтрона в ПЧД посредством измерения энергии и угла вылета одного из ядер ^4He или ^7Li : 1 – поверхность со слоем бора-10 и проволочный катод для измерения координат начальной точки трека

ядра; 2 – анод; 3 – проволочный катод для измерения координат конечной точки трека ядра.

Катоды и аноды представляют собой сетку из параллельных проволок с шагом 2 мм. Зазор между анодом и каждым катодом составляет 5 мм. Внутренний объем детектора заполнен смесью газов аргона и углекислоты.

Сигналы ионизации от газовых зазоров пропорциональны частичным и полным потерям ядер ${}^4\text{He}$ и ${}^7\text{Li}$. Из-за малых пробегов заряженных частиц и достаточно большой толщины, чтобы добиться полного поглощения регистрируемого ядра, данный детектор может быть использован как $\Delta E-E$ система, а, следовательно, вторичные ядра идентифицированы и определены их энергии. Направление частицы (угол вылета) измеряется по срабатыванию двух пар катодных взаимно перпендикулярных проволок. Погрешность в определении угла вылета составляет $\sim 5.7^\circ$.

Проведено Монте-Карло моделирование реакции $n + {}^{10}\text{B} \rightarrow {}^4\text{He} + {}^7\text{Li}$ в слое ${}^{10}\text{B}$ толщиной 3 мкм и регистрацией ядер ${}^4\text{He}$ и ${}^7\text{Li}$ с учетом сечения реакции и ионизационных потерь в газовых зазорах.

Таблица 6.1. Результаты моделирования реакции $n + {}^{10}\text{B} \rightarrow {}^4\text{He} + {}^7\text{Li}$.

E_n , МэВ	σ , барн	Эффективность реакции	Доля частиц ${}^4\text{He}$ во втором газовом зазоре	Доля частиц ${}^7\text{Li}$ во втором газовом зазоре	Эффективность регистрации ${}^4\text{He}$	Эффективность регистрации ${}^7\text{Li}$
0.5	0.886	$4.35 \cdot 10^{-6}$	0	0	0	0
1	0.1797	$4.35 \cdot 10^{-6}$	0.003135	0	$2.36 \cdot 10^{-8}$	0
2	0.4513	$1.89 \cdot 10^{-5}$	0.05646	0	$1.07 \cdot 10^{-6}$	0
3	0.3675	$1.54 \cdot 10^{-5}$	0.15912	0	$2.45 \cdot 10^{-6}$	0
4	0.2959	$1.24 \cdot 10^{-5}$	0.282535	0	$3.51 \cdot 10^{-6}$	0
5	0.10369	$4.35 \cdot 10^{-6}$	0.36597	0.00004	$1.59 \cdot 10^{-6}$	$1.74 \cdot 10^{-10}$
6	0.1257	$5.27 \cdot 10^{-6}$	0.40674	0.001635	$2.14 \cdot 10^{-6}$	$8.62 \cdot 10^{-9}$
7	0.11405	$4.78 \cdot 10^{-6}$	0.43189	0.00543	$2.07 \cdot 10^{-6}$	$2.59 \cdot 10^{-8}$

В табл. 1 для каждой энергии нейтрона показано сечение реакции на ${}^{10}\text{B}$, эффективность реакции, доля частиц ${}^4\text{He}$ и ${}^7\text{Li}$, которые дали сигнал во втором газовом зазоре при пороге 100 кэВ и эффективность регистраций каждого из ядер ${}^4\text{He}$ и ${}^7\text{Li}$. Малая

эффективность регистрации частиц ${}^4\text{He}$ ($\sim 10^{-6}$) и частиц ${}^7\text{Li}$ ($\sim 10^{-8}$) будет полезна для регистрации высоких потоков $>10^7$ нейтрон/см 2 ·с.

Регистрируя одну из заряженных частиц (зная ее энергию и угол вылета) мы можем восстановить энергию и угол вылета второй заряженной частицы решением уравнений законов сохранения энергии и импульса, а, следовательно, и энергию падающего нейтрона. Выбирая высокий порог сигнала, можно подавлять регистрацию ядер ${}^4\text{He}$, в этом случае для более тяжелого ядра ${}^7\text{Li}$ детектор становится детектором полного поглощения. В зависимости от типа регистрируемой частицы, мы можем восстанавливать энергию падающего нейтрона в разных диапазонах (табл. 1).

Для определения ожидаемого энергетического разрешения по энергии нейтронов было проведено кинематическое моделирование реакции $n + {}^{10}\text{B} \rightarrow {}^4\text{He} + {}^7\text{Li}$ при разных энергиях падающих нейтронов: 3 МэВ, 5 МэВ и 7 МэВ.

Энергия и угол вылета ядра ${}^7\text{Li}$ разыгрывались с некоторыми неопределенностями, соответствующими энергетическому (ΔE) и угловому ($\Delta\Theta$) разрешениям детектора. Восстановление энергии падающего нейтрона проводилось решением уравнение законов сохранения энергии и импульса.

На рис. 6.11 показан восстановленный энергетический спектр падающего нейтрона при энергии 7 МэВ. При этом угловое разрешение бралось $\Delta\Theta=5.7^\circ$, а энергетическое разрешение $\Delta E=3\%$.

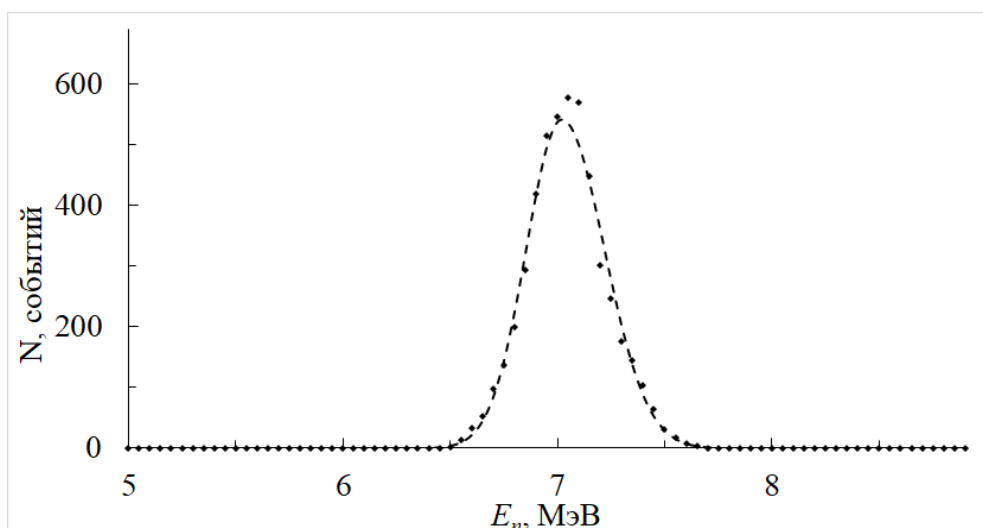


Рисунок 6.11 - Восстановленный энергетический спектр падающего нейтрона для энергии 7 МэВ при $\Delta E=3\%$ и $\Delta\Theta=5.7^\circ$.

Для определения энергетического разрешения по энергии нейтрона, данный спектр аппроксимировался ассиметричным гауссианом и определялась полная ширина на половине максимума (FWHM) амплитуды.

Для проектируемого детектора погрешности в определении угла регистрируемой частицы и ее энергии будут составлять $\sim 5.7^\circ$ и 3%, соответственно. На рис. 6.12 показана зависимость FWHM от энергии падающего нейтрона. Энергетическое разрешение составляет порядка 6% для каждой из трех энергий.

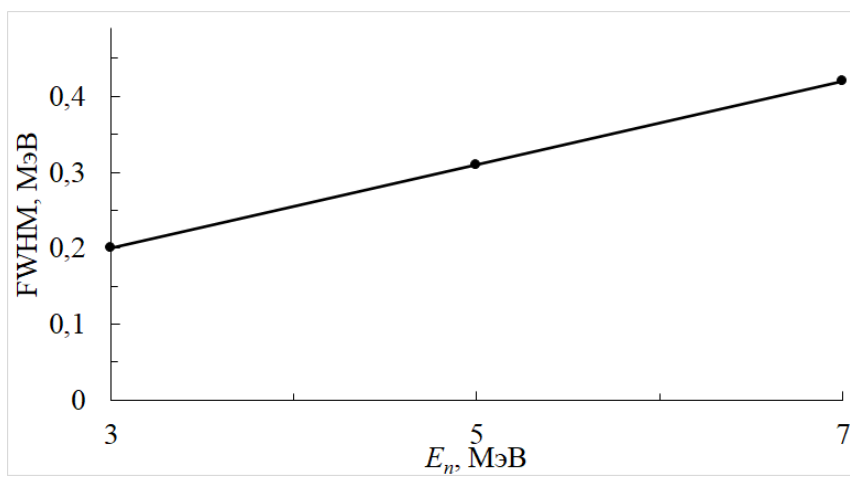


Рисунок 6.12 - Зависимость FWHM от энергии падающего нейтрона при $\Delta E = 3\%$ и $\Delta\Theta = 5.7^\circ$.

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ К ЗАДАЧЕ 6.3.

1. Афонин А.А., Зуев С.В., Конобеевский Е.С. / Возможность восстановления низкоэнергетической части спектра нейтронов фотонейтронного источника методом нейтронно-активационного анализа // Изв. РАН. Сер. физ. 2018. Т. 82. № 6. С. 814.
2. LOUHI, Generator Spectra Unfolding Program with Linear and Nonlinear Regularization // OECD Nuclear Energy Agency (NEA) Data Bank. Computer program services. NEA-1026 LOUHI82. <http://www.oecd-nea.org/tools/abstract/detail/nea-1026/>.
3. Гутько В.И. Активационный анализ. Минск: МГЭУ, 2008, 74 с.
4. Афонин А.А., Зуев С.В., Конобеевский Е.С., Мордовской М.В., Пономарев В.Н., Солодухов Г. В. / Изучение распределения тепловых нейтронов из выводного канала W-Be фотонейтронного источника // Изв. РАН. Сер. физ. 2020. Т. 84. № 8. С. 1075.
5. NGATLAS. Atlas of Neutron Capture Cross Sections. <https://www-nds.iaea.org/ngatlas2/>.

6. Andreev A., Burmistrov Yu., Gromov A., Ilić R., Konobeevsky E., Koptelov E., Latysheva L., Mordovskoi M., Ponomarev V., Potashev S., Rogov A., Sabinin S., Sidorkin S., Sobolevsky N., Solodukhov G., Tishin V., Zuyev S. / Mathematical modeling of neutron sources on the basis of fragmentation and spallation processes and (γ ,n) reactions // Fifth Int. Conf. on Nucl. Fragn. (NUFRA2015). Kemer. Oct. 2015.
https://vfs.fias.science/d/9148e25dc1/files/?p=/Sobolevsky_nufra2015.pdf.
7. Potashev S, Burmistrov Yu., Drachev A et al. // J.Phys.: Conf. Ser. 2017. V. 798. Art. no. 012160.
8. Potashev S, Drachev A, Burmistrov Yu. et al. // EPJ Web Conf. 2020. V. 231. Art. no. 05010.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

План работ на 2020 год выполнен полностью. Получены значимые научные результаты, обеспечивающие дальнейшее развитие экспериментальных исследований по ряду актуальных направлений, в том числе по следующим задачам Государственного задания:

1. Задача «Развитие и применение транспортного кода SHIELD (<http://www.inr.ru/shield/>, <http://www.shieldhit.org>) как инструмента математического моделирования взаимодействия частиц с веществом, включая развитие моделей ядерных реакций».

Проведено изучение энергетических и временных характеристик потоков быстрых нейтронов в экспериментальном зале импульсного линейного ускорителя электронов ЛУЭ-8-5 ИЯИ РАН. Потоки быстрых нейтронов включают как запаздывающие нейтроны фотоделения ^{238}U , так и нейтронный фон различного происхождения. Показано отсутствие в экспериментальном зале быстрых нейтронов с энергией выше 0.1 МэВ через 5 мкс после окончания импульса пучка ускорителя [1].

Представлен исчерпывающий на данный момент обзор [2], являющийся руководством по планированию экспериментов и математическому моделированию процессов, инициированных альфа-частицами высоких энергий в контексте задач радиационной защиты экипажей космических миссий, а также адронной терапии в онкологии.

Проведено дальнейшее развитие моделей образования и распада возбужденной гиперъядерной и нормальной ядерной материи. Достигнут прогресс в развитии теории образования и распада гиперъядер в столкновениях тяжелых ионов. Результаты работ [3-7] расширяют теоретическую основу изучения процессов образования гиперъядер и их свойств. Дано сравнение расчетов с доступными экспериментальными данными.

2. Задача «Исследования по физике деления и нейтрон-ядерных взаимодействий».

Восстановление спектров нейтронных реакций полученных с использованием методики спектрометрии по времени замедления нейтронов в свинце. Определена возможность получения спектров с лучшим разрешением нейтрон-ядерных резонансов, чем позволяет экспериментальный метод. Предложенная методика позволяет расширить использование метода СВЗ (спектрометрия по времени замедления нейтронов в свинце).

Представлены результаты исследования жидкостного сцинтилляционного γ -детектора. Разработана и изготовлена электроника, состоящая из предусилителя и усилителя-формирователя сигналов детектора. Разработан метод определения стартового

импульса для времяпролетной методики, основанный на регистрации нескольких γ -квантов (>3) от нейтронного источника в узком временном интервале. Данный метод не зависит от временной нестабильности синхроимпульса протонного пучка. Проведено сравнение энергетического разрешения секции γ -детектора с результатами моделирования при регистрации γ -квантов. Показаны возможности γ -детектора по измерению сечений радиационного захвата нейтрона ядром на импульсном источнике нейтронов РАДЭКС центра коллективного пользования (ЦКП) ИЯИ РАН.

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

Выполнена оптимизация работы системы нейтронных детекторов с целью качественного улучшения получения результатов. Продолжены разработка и тестирование прототипов позиционно-чувствительного детектора тепловых нейтронов на основе сцинтилляторов и лавинных диодов.

4. Задача «Исследование структуры перспективных материалов, в том числе при экстремальных нагрузках (высоких давлениях, низких температурах, сильных магнитных полях)».

Получены спектры нейтронной дифракции и малоуглового рассеяния нейтронов на немагнитных сплавах, применяемых для изготовления нейтронографических устройств — камер высокого давления.

В исследованиях материалов при высоких давлениях и низких температурах получены результаты экспериментальных исследований влияния давления на изменения свойств ряда перспективных материалов со сложной структурой, в том числе, изучены следующие объекты:

(1) Были систематизировали текущие экспериментальные и теоретические результаты для супергидридов LaH_{10-x} и YH_{6-x} [1].

(2) В 2H-TaS_2 при высоких давлениях и криогенных температурах подробно изучены коллективные состояния CDW (волна зарядовой плотности) и сверхпроводимость, и их конкуренция. Построена подробная P-T фазовая диаграмма [2].

(3) Магнитные, структурные и электронные свойства мультиферроика $\text{Ba}_3\text{NbFe}_3\text{Si}_2\text{O}_{14}$ были исследованы методами синхротронной рентгеновской дифракции, спектроскопии комбинационного рассеяния света, и синхротронной мессбауэровской спектроскопии при высоких квазигидростатических давлениях. Были изучены механизмы фазовых превращений в $\text{Ba}_3\text{NbFe}_3\text{Si}_2\text{O}_{14}$ и построена подробная фазовая диаграмма [3].

(4) При высоких давлениях методом лазерного нагрева в алмазных наковальнях были синтезированы полигидриды европия: EuH_9 - кубической и гексагональной

симметрии, и клатратная фаза Eu_8H_{46} . Методом компьютерного моделирования были предсказаны магнитные структуры и исследовано уравнение состояния. Экспериментальные результаты по синхротронной рентгеновской дифракции хорошо соответствуют теоретическим расчётам [4].

5. Задача: «Моделирование процессов, инициированных пучком протонов линейного ускорителя в установках Нейтронного комплекса ИЯИ, с целью улучшения и оптимизации параметров установок».

В результате проведенных расчетно-теоретических исследовательских работ по размножающим мишеням на основе Нептуния 237 – Плутония 239, по вольфрамовому нейтронному источнику определено направление повышения эффективности нейтронных мишеней, в том числе рассмотрены возможности концептуального варианта реактора ИБР-4 ОИЯИ на уровне, конкурентно способном с лучшими зарубежными источниками нейтронов.

6. Задача «Развитие новых методов исследований на нейтронных источниках».

Осуществлена адаптация метода нейтронной радиографии и томографии для диагностики промышленных изделий и объектов культурного наследия. Проведена оптимизация работы системы нейтронных детекторов

Выполнена работа, направленная на перспективное развитие новых методов исследования фундаментальных взаимодействий при низких энергиях нейтронов, в том числе по разработке нового метода измерения времени жизни нейтрона. Для адекватной интерпретации тонких эффектов нейтронных взаимодействий при малых энергиях проведен ряд измерений с целью исследования характеристик временных и фоновых характеристик ГЭК-1 реактора ИБР-2 (ОИЯИ). Проведены оценки перспективы разработки токового метода регистрации времяпролетных спектров.

Создан W-Be-фотонейтронный источник и запущен на пучке электронов линейного ускорителя ЛУЭ-8-5 ИЯИ РАН. Рассмотрена возможность восстановления спектра нейтронов фотонейтронного источника с использованием активационных детекторов. Показана возможность выбора активирующих реакций пригодных для восстановления нейтронных спектров. Восстановление проводилось с использованием программы LOUHI из банка программ Агентства по ядерной энергии (NEA). Подбор оптимальных весовых параметров членов в минимизируемом функционале проводился по данным, полученным с использованием модельного спектра нейтронов. Модельный спектр воспроизводится достаточно хорошо с в области чувствительности реакций от 0.01 эВ до 3 кэВ. С увеличением количества данных, используемых при восстановлении, уменьшаются осцилляции спектра и сужается коридор ошибок в области энергий выше 3 кэВ.

Восстановленный спектр по экспериментальным данным достаточно хорошо воспроизводит форму модельного спектра. С увеличением количества данных, используемых при восстановлении, также сужается коридор ошибок и уменьшаются осцилляции спектра в области энергий выше 3 кэВ. Показано, что минимизация одного функционала Q_0 , т. е. использование только минимизации χ^2 не обеспечивает получение результата с приемлемой гладкостью решения и коридором ошибок. Результат улучшается при дополнительной минимизации взвешенной суммы квадратов первых и вторых производных от решения. При этом достигается меньшее число осцилляций и более узкий коридор ошибок в решении.

В ИЯИ РАН разрабатывается детектор быстрых нейтронов ($E_n > 1$ МэВ) с ^{10}B -конвертером, принцип работы которого заключается в регистрации вторичных ядер ^4He и ^7Li . Моделирование показало, что разрабатываемый детектор имеет малую эффективность регистрации ($\sim 10^{-7}$) вторичных ядер ^4He и ^7Li , энергетическое разрешение детектора по энергии нейтронов оценивается $\sim 6\%$ и слабо зависит от энергии нейтронов (в области энергий 1 – 9 МэВ). В зависимости от типа регистрируемой частицы, можно восстанавливать энергию падающего нейтрона в двух диапазонах: >1 МэВ при регистрации ^4He ; >5 МэВ – для ^7Li .

ПУБЛИКАЦИИ

1. H.Imal, N.Buyukcizmeci, R.Ogul, A.S.Botvina Isospin dependence of fragment yields in peripheral heavy ion collisions, Eur. Phys. J. A 56, 110 (2020) <https://doi.org/10.1140/epja/s10050-020-00114-y>.
2. N.Buyukcizmeci, R.Ogul, A.S.Botvina and M.Bleicher On the survey of nuclei and hypernuclei in multifragmentation, Phys. Scr. 95 075311 (2020). <https://iopscience.iop.org/article/10.1088/1402-4896/ab978f>.
3. N.Buyukcizmeci, A.S.Botvina, R.Ogul, M.Bleicher Evaluation of hypernuclei in relativistic ion collisions, Eur. Phys. J. A 56, 210 (2020). <https://doi.org/10.1140/epja/s10050-020-00217-6>.
4. T.Pietrzak, A.S.Botvina, J.Brzychczyk, N.Buyukcizmeci, A.Le Fevre, J. Lukasik, P.Pawlowski, C.Sfienti, W.Trautmann, A.Wieloch The percolation phase transition and statistical multifragmentation in finite systems, Physics Letters B 809 (2020) 135763. <https://doi.org/10.1016/j.physletb.2020.135763>.
5. Viktor Struzhkin, Bing Li, Cheng Ji, Xiao-Jia Chen, Vitali Prakapenka, Eran Greenber, Ivan Troyan, Alexander Gavriliuk, Ho-kwang Mao, "Superconductivity in La and Y hydrides: remaining questions to experiment and theory", Matter and Radiation at Extremes 5, 028201 (2020). IF 4.11, (Q1)
6. Xiao-Miao Zhao, Kai Zhang, Zi-Yu Cao, Zhi-Wei Zhao, Viktor V. Struzhkin, Alexander F. Goncharov, Hai-Kuo Wang, Alexander G. Gavriliuk, Ho-Kwang Mao, and Xiao-Jia Chen, "Pressure tuning of the charge density wave and superconductivity in 2H-TaS₂", Phys. Rev. B 101, 134506 (2020). IF 3.72, (Q1)
7. Igor Lyubutin, Sergey Starchikov, Ivan Troyan, Yulia Nikiforova, Marianna Lyubutina, Alexander Gavriliuk, "Pressure Induced Spin Crossover and Magnetic Properties of Multiferroic Ba₃NbFe₃Si₂O₁₄", Molecules 25(7), 3808 (2020). IF 3.01, (Q2)
8. Dmitrii V. Semenok, Di Zhou, Alexander G. Kvashnin, Xiaoli Huang, Michele Galasso, Ivan A. Kruglov, Anna G. Ivanova, Alexander G. Gavriliuk, Wuhao Chen, Nikolay V. Tkachenko, Alexander I. Boldyrev, Ivan Troyan, Artem R. Oganov, Tian Cui, "Novel Strongly Correlated Europium Superhydrides", J. Phys. Chem. Lett. 2021, 12, 32-40. IF 7.33, (Q1)