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, чл.-корр. РАН Л.В. Кравчук «31» января 2020 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 2019 год)

Руководитель НИР, д.ф-м.н.

Э.А. Коптелов «31» января 2020 г.

Москва 2020 г.

СПИСОК ИСПОЛНИТЕЛЕЙ

Руководитель НИР, Зав. лаб., д.ф.-м.н. 31.01.2020 Э.А. Коптелов (введение, заключение, подпись, дата раздел 1) Исполнители: в.н.с., к.ф.-м.н., и.о. зав СКС 31.01.2020 ЛНИ Р.А. Садыков подпись, дата (введение, заключение, разделы 3, 4, 5) в.н.с., к.ф.-м.н., и.о. зав СИНИ 31.01.2020 ЛНИ С.Ф. Сидоркин подпись, дата (введение, заключение, раздел 2) зав. ЛАЯ, к.ф.-м.н. 31.01.2020 Е.С. Конобеевский (введение, заключение, подпись, дата раздел 5) Р.М. Джилкибаев в.н.с. ОЭФ, д.ф.-м.н. 31.01.2020 подпись, дата (введение, заключение, раздел 2)

Отчёт содержит: 56 с., 16 рис., 0 табл.

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 НЕЙТРОННЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ, НЕЙТРОННЫЙ НЕЙТРОНОВ. 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 2019 год.

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

Основные усилия были направлены на решение перечисленных ниже задач.

 1. Задача «Развитие и применение транспортного кода SHIELD (<u>http://www.inr.ru/shield/,</u>

 <u>http://www.shieldhit.org</u>)
 как инструмента математического моделирования

 взаимодействия частиц с веществом, включая развитие моделей ядерных реакций».

 Подзадачи, входящие в работы по программе фундаментальных научных исследований:

1.1 Моделирование процессов, инициированных пучком протонов линейного ускорителя в установках Нейтронного комплекса ИЯИ, с целью уточнения и оптимизации параметров установок, планирования новых экспериментов и приложений. Монте-Карло моделирование потоков нуклонов и активации в экспериментальных установках ИЯИ РАН с целью их оптимизации.

Объектом исследования является стенд для облучения изделий электроники и материалов на пучке линейного ускорителя протонов ИЯИ РАН. Цель работы - выбор

оптимальных условий облучения изделий и оценка радиационных условий в помещении стенда и за внешней защитой.

1.2. Моделирование детектора нейтронов высоких энергий на основе He3счётчика.

Объектом исследования является предложенная авторами конструкция дозиметра нейтронов высоких энергий для применения на ускорителях тяжелых ионов, в частности в проекте NICA (ОИЯИ, Дубна). Цель работы - оптимизация геометрии и других параметров конструкции дозиметра.

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

Объектом исследования являются потоки частиц и ядерных фрагментов за защитой космических аппаратов и создаваемые ими дозовые поля. Цель работы - обзор достижений в изучении космической радиационной среды и её воздействия на экипажи и электронику космических аппаратов за последние 10 лет. Расчетно-теоретический анализ потоков частиц и мощности дозы для простых реалистических моделей защиты космического аппарата в рамках детерминистического и Монте-Карло подходов к расчету переноса.

1.4. Развитие статистических и динамических моделей образования и распада нуклонной и гиперъядерной материи. Развитие новых теоретических подходов для описания экзотических ядер и ядерной материи со странностью и чармом.

Объектом исследования является процесс образования и распада возбужденной гиперядерной и нормальной ядерной материи. Цель работы - развитие моделей образования и распада возбужденной ядерной материи. Теоретический анализ образования гиперядер с высокими значениями странности. Сравнение расчетов с доступными экспериментальными данными.

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

2.1. Математические модели девозбуждения атомных ядер, включая гиперядра.

Объектом исследования являются механизмы девозбуждения атомныхядер. Цель работы - совершенствование моделей девозбуждения атомных ядер и их верификация путем сравнения с экспериментальными данными.

На основе существующих данных о физике нейтрон-ядерных взаимодействий и ядерно-физических процессов в материалах генерирующих нейтронных мишеней

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

Объектом исследования является импульсный размножающий источник нейтронов на основе 237Np – 239Pu применительно к пучку сильноточного ускорителя протонов ИЯИ РАН. Цель работы – выбор оптимальной конфигурации мишени с целью многократного увеличения плотности потока тепловых нейтронов на поверхности замедлителей и поиск перспективных вариантов дальнейшего развития нейтронных источников ИЯИ РАН

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

Объектом исследования является один из вариантов перспективного импульсного нейтронного источника, призванного в будущем заменить реактор ИБР-2М в ОИЯИ. Цель работы – исследование возможности создание *размножающего* источника нейтронов на основе ускорителя протонов с мощностью пучка ~ 100-200 кВт, с плотностью потока тепловых нейтронов, сопоставимых с ESS.

2.4. Измерение нейтронных сечений, установка ИНЕС на источнике РАДЭКС

Объектом исследований являются нейтрон-ядерные взаимодействия. 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), фотоэлектронные 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»

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.

Проведена модернизация нейтронного рефлектометра-малоуглового спектрометра «Горизонт», полностью автоматизирован процесс измерения. Это позволит более эффективно использовать нейтронный источник. Также проведены тестовые измерения на образцах нейтронных суперзеркал. На установке «Горизонт» планируется проводить аттестацию суперзеркал, изготавливаемых для оснащения нейтроноводами реактора «ПИК».

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 рассеянния 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 сплавов 40ХНЮ 40ХНЮ (Ni-основной, 38-41% Cr, 3.3-3.8% Al) и MoTiC (Мо — основной, Ti — 10%, C — 3%). Установлено, что последний обладает сечением МУРН на 2 порядка слабее, чем 40ХНЮ.

4.2. Исследование материалов при высоких давлениях и низких температурах

Получены результаты экспериментальных исследований следующих объектов:

4.2.1. Влияние давления на электронные, структурные и вибрационные свойства слоистого дихалькогенида 2H-MoTe₂.

Целью данной работы являлось изучение влияния высокого давления на электронные, структурные и вибрационные свойства слоистого дихалькогенида 2H-MoTe₂. По результатам измерений построена P-T фазовая диаграмма при высоких давлениях и низких температурах в области электронного S-M перехода [1]

4.2.2. Концентрация воды в монокристаллическом (Al, Fe) -содержащем бриджманите, выращенном из водного расплава: последствия для дегидратационного плавления в верхнем слое нижней мантии.

Целью данной работы являлось изучение влияния высокого давления на содержание воды в монокристаллическом (Al, Fe) -содержащем бриджманите, выращенном из водного расплава. Наши результаты показывают, что нижний мантийный бриджманит может содержать относительно большое количество воды [2].

4.2.3. Структурный переход под действием давления в полярную фазу в GdFe₃(BO₃)₄.

Цель данной работы исследование структурного перехода в GdFe₃(BO₃)₄ под действием высокого давления. Было обнаружено, что в результате структурного перехода GdFe₃(BO₃)₄ превращается в полярную фазу [3].

4.2.4. Синтез и сверхпроводимость гексагидрида иттрия Im3m-YH6.

Цель. данной работы является синтез и исследование электронных свойств полигидридов иттрия. В результате данной работы методом лазерного нагрева при высоких давлениях в алмазных наковальнях был синтезирован полигидрид иттрия YH₆ с кубической структурой Im3m, который показал очень высокую температуру сверхпроводящего перехода TC~230 K [4].

5.Задача « Развитие новых методов исследований на нейтронных источниках.

Подзадачи, входящие в работы по программе фундаментальных научных исследований:

5.1. 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

5.2 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

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

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

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

5.4. Развитие новых методов исследования фундаментальных взаимодействий при низких энергиях нейтронов

Подзадачи, входящие в работы по программе фундаментальных научных исследований:

5.4.1 Разработка нового метода измерения времени жизни нейтрона.

Авторами предложено выполнить измерения времени жизни нейтрона методом времени пролета.

Цель работы - закрыть проблему нейтронной аномалии, принципиальное различие во временах жизни нейтрона, полученных экспериментально пучковым методом и методом хранения ультрахолодных нейтронов.

5.4.2 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.

5.4.3 Разработка токового метода регистрации времяпролетных

спектров.

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

5.5. Создание интенсивного W-Be-фотонейтронного источника

Цель работы – создание 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.

В результате работы создан W-Be-фотонейтронный источник и запущен на пучке электронов линейного ускорителя ЛУЭ-8-5 ИЯИ РАН. Источник обеспечивает поток тепловых нейтронов порядка 10⁷ – 10⁸ нейтрон/см²·с, что сравнимо с параметрами реакторных источников нейтронов, нейтронных генераторов и микротронов. Данный источник может быть использован в дополнение к источникам ИЯИ РАН на базе ускорительного комплекса для отработки методик, а также для некоторых прикладных исследований, например нейтронного активационного анализа.

Рассмотрены возможности вывода пучка тепловых нейтронов из фотонейтронного источника. Измерены распределения плотности потока тепловых нейтронов относительно центра W-Be-фотонейтронного источника и оси выводного нейтронного канала. Получено пространственное распределение тепловых нейтронов в горизонтальной плоскости относительно оси выводного канала фотонейтронного источника. Разработан четырехслойный газовый детектор для определения интенсивности и энергии электронов и других заряженных частиц. Представлены результаты измерений.

СОДЕРЖАНИЕ

СПИСОК ИСПОЛНИТЕЛЕЙ	2
РЕФЕРАТ	.3
СОДЕРЖАНИЕ	10
ВВЕДЕНИЕ	13

1.1. Моделирование процессов, инициированных пучком протонов линейного ускорителя в установках Нейтронного комплекса ИЯИ, с целью уточнения и оптимизации параметров установок, планирования новых экспериментов и приложений.

 1.2.
 Моделирование детектора нейтронов высоких энергий на основе He3

 счётчика.
 15

 1.3.
 Оценка радиационных условий в космических миссиях под действием

 галактического и солнечного космического излучения
 15

1.4. Развитие статистических и динамических моделей образования и распада нуклонной и гиперядерной материи.

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

2.4. Измерение нейтронных сечений, установка ИНЕС на источнике РАДЭКС.....18

3.1. Модернизация установки «Горизонт», измерение спектров отражения тестовых образцов, подготовка к созданию малоуглового спектрометра на базе установки МНС...21

4.1. Исследование структуры жаропрочных сплавов методом МУРН23

4.2. Исследование материалов при высоких давлениях и низких температурах..24

7

4.2.4. Синтез и сверхпроводимость гексагидрида иттрия Im3m-YH₆......28

5. Задача «Развитие новых методов исследований на нейтронных

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

5.3 Разработка и тестирование прототипов позиционно-чувствительного

 5.4
 Развитие новых методов исследования фундаментальных взаимодействий

 при низких энергиях нейтронов.
 31

5.4.1	Разработка нового метода измерения времени жизни нейтрона32
5.4.2	Исследование характеристик временных и фоновых характеристик ГЭК-1
реактора	ИБР-2
5.4.3	Разработка токового метода регистрации времяпролетных спектров33
5.5.	Создание интенсивного W-Be-фотонейтронного источника34
5.5.1.	Исследование пространственного распределения тепловых нейтронов
выведенн	ого пучка фотонейтронного источника34
5.5.2.	Четырехслойный газовый детектор для определения интенсивности и энергии
электроно	ов

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

ТУБЛИКАЦИИ

введение

Для долгосрочного развития и обеспечения конкурентоспособности отечественных технологий необходимо наличие комплекса установок, предназначенных для диагностики новых материалов, способствующих разработке материалов с заданными свойствами. Нейтронные методы исследования являются эффективными и неразрушающими и могут применяться в таких областях как физика конденсированного состояния, химия, материаловедение, археология и палеонтология. В настоящее время в России наблюдается дефицит нейтронных источников, способных удовлетворить потребности современной науки и техники. Развития методик исследования с помощью рассеяния нейтронов требует создание новых детекторов нейтронов с высокой эффективностью регистрации, высокими загрузками, обладающих координатным и временным разрешением.

В ИЯИ РАН ведется работа над созданием импульсных нейтронных источников на базе сильноточного линейного ускорителя, развитие нейтронографических установок, в частности разработка и изготовление новых детекторов, совершенствование нейтронных методик, таких как нейтронная дифракция, рефлектометрия, малоугловое рассеяние нейтронов, нейтронная радиография и томография. Также проводятся исследования в области физики конденсированных сред, комплиментарными к нейтронным методами, такими как рентгеновская дифракция и рассеяние синхротронного излучения, мессбауэровская и рамановская спектроскопия.

В рамках данной работы решаются пять основных задач.

1. Задача «Развитие и применение транспортного кода SHIELD как инструмента математического моделирования взаимодействия частиц с веществом, включая развитие моделей ядерных реакций»

Компьютерное моделирование процесса взаимодействия адронов и ядер со сложными макроскопическими мишенями является необходимым этапом широкого круга исследований в фундаментальной и прикладной ядерной физике.

При планировании, подготовке и интерпретации результатов экспериментов в физике атомного ядра, элементарных частиц и ядерной астрофизике на ускорителях, в подземных экспериментах, на спутниках и орбитальных станциях, необходимо компьютерное моделирование экспериментальной установки с целью предсказания фоновых условий, вклада конкурирующих процессов, отклика детекторов и т. п.

Ряд важных научно-технических проблем включает, как необходимый этап их решения, расчетно-теоретические исследования физики ядерно-каскадного процесса.

Расчеты генерации нейтронов, тепловыделения и образования нуклидов в протяженных тяжелых мишенях под действием пучка ускорителя ("spallation"-процесс) необходимы в контексте проблем электроядерного бридинга, трансмутации отходов ядерной энергетики, при разработке интенсивных импульсных источников нейтронов. Можно указать и другие не менее важные приложения, такие как пучковая терапия в онкологии, радиационное материаловедение, радиационная безопасность на ускорителях и в космосе, где компьютерное моделирование взаимодействия частиц с веществом играет важную роль.

Основным методом теоретического описания взаимодействия частиц высоких энергий со сложными мишенями является статистическое компьютерное моделирование (метод Монте-Карло). Поэтому универсальные программы, т.н. адронные транспортные коды, предназначенные для такого моделирования, являются обязательной частью современного инструментария в физике ядра и элементарных частиц. Одним из таких кодов является транспортный код SHIELD, разработанный в ИЯИ РАН.

Возможности адронного транспортного кода существенно зависят от качества генератора неупругих ядерных взаимодействий. В коде SHIELD применяется генератор MSDM (Multy Stage Dynamical Model), который включает известные отечественные модели ядерных реакций, разработанные в ОИЯИ (Дубна) и ИЯИ РАН. Последние усовершенствования моделей, включенных в MSDM, отражены в настоящем отчете.

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

Для создания источников нейтронов, отвечающих современным требованиям, требуется проведение научно-исследовательских работ по развитию нейтронных мишеней. В ИЯИ РАН ведется совершенствование моделей девозбуждения атомных ядер, которая необходима в том числе для описания перспективных мишенией для нейтронных источников.

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 по Измерению НЕйтронных Сечений (ИНЕС) на импульсном источнике нейтронов «РАДЭКС» позволяет проводить измерения полных и парциальных (п, γ) нейтронных сечений позволит повысить точность измерений до необходимых 2-3%.

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.

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 В отчете отражены подзадачи которые соответствуют этому направлению.

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

В данной главе приводятся результаты исследований свойств конструкционных материалов, фазовых превращений и новых эффектов в простых и сложных материалах, возникающих при изменении межионных расстояний под воздействием сверхвысоких давлений (вплоть до 2-3 Мбар), высоких температур (вплоть до 3000-5000 К), криогенных температур (2-300К), и сильных магнитных полей (до 9 Тесла).

Сплав 40ХНЮ является немагнитным и в то же время не уступает по прочности стали (его твердость по Роквеллу достигает 60 ед.). Этот сплав хорошо зарекомендовал себя как материал для камер высокого давления для экспериментов в магнитных полях. Однако, нами было установлено, что данный сплав обладает высоким сечение рассеяния нейтронов в диапазоне переданных импульсов Q = 0,005-0,05 Å⁻¹, из-за чего его использование для

МУРН-экспериментов практически невозможно. Представляет интерес поиск других немагнитных сплавов, которые могут быть использованы для этих целей.

Результаты исследований вещества в экстремальном состоянии, которые проводятся в нашей лаборатории, позволит решать важные прикладные и фундаментальные задачи материаловедения, задачи синтеза новых веществ, а также фундаментальные задачи проблемы коррелированных геофизики. включая сильно 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 важные задачи:

- 1. синтез металлического водорода и high-T_C полигидридов,
- 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.

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

В данной главе приводятся результаты работ, направленных на развитие на работающих в ИЯИ РАН источниках нейтронов новых методов исследования в таких областях как физика элементарных частиц, физика конденсированного состояния, неразрушающая диагностика новых материалов (нанодиагностика), исследования объектов культурного наследия. Предложен новый пучковой метод определения времени жизни нейтрона. Приводятся результаты работ по развитию метода нейтронной радиографии и томографии для неразрушающей диагностики деталей машин и элементов конструкций (в основном металлических), археологических, геологических и палеонтологических объектов.

Точное определение времени жизни нейтрона (ВЖН) очень важно для физики частиц и астрофизики. Известны два типа экспериментов измерения ВЖН: первые из них – пучковые, вторые – эксперименты по хранению УХН в материальных и магнитных ловушках. Начиная с 2005 года, было выполнено 8 работ по измерению ВЖН, в основном методом хранения УХН и только одна – пучковым методом. Интрига состоит в том, что средневзвешенное значение времени жизни нейтрона, измеренное пучковым методом и методом хранения УХН, отличаются на ($8,4 \pm 2,2$) с и расхождение составляет 3,8 σ . Предложен новый метод измерения ВЖН на импульсных источниках нейтронов, основанный на изменении спектра нейтронов за время их пролета достаточно большой пролетной базы, за счет их распада.

Развитие нейтронографических установок и нейтронных методов исследования вещества и дефицит нейтронных источников требует наличия новых, современных, универсальных, компактных, мобильных и, в то же время, достаточно экономичных источников нейтронов как для методических работ (например тестирования детекторов), так и для широкого круга прикладных задач (например нейтронно-активационный анализ). В связи с этим в качестве экономичных и компактных источников нейтронов, дополняющих большие источники, представляют интерес фотонейтронные источники на базе промышленных низкоэнергетических линейных ускорителей электронов на энергии 6 – 10 МэВ. В ИЯИ РАН создан W-Be-фотонейтронный источник нейтронов ИН-ЛУЭ на базе линейного ускорителя электронов ЛУЭ-8-5.

1. Задача «Развитие и применение транспортного кода SHIELD как инструмента математического моделирования взаимодействия частиц с веществом, включая развитие моделей ядерных реакций»

Выполнено запланированное развитие транспортного кода SHIELD, а также проведены расчеты для решения возникших актуальных задач.

Программа расчета тормозной способности вещества для адронов и ионов «STP_Had_Ion» [1] предназначена для решения задач в области радиационной защиты, а также используется как вспомогательный инструмент в составе транспортного кода SHIELD.

В статье [2] обсуждаются вопросы метрологической аттестации пучков тяжелых ионов и протонов высоких энергий, предназначенных для исследования и испытаний на радиационную стойкость перспективных продуктов полупроводниковой микроэлектроники, твердотельной СВЧ-электроники и микромеханики. Выполнена серия расчетов взаимодействия указанных снарядов с различными материалами с использованием кода SHIELD и других транспортных кодов.

В работе [3] выполнено моделирование экрана специальной формы для защиты от нейтронов криогенной установки, используемой при охлаждении лазерных мишеней класса МЈ.

1. Задача «Развитие и применение транспортного кода SHIELD как инструмента математического моделирования взаимодействия частиц с веществом, включая развитие моделей ядерных реакций»

1.1. Моделирование процессов, инициированных пучком протонов линейного ускорителя в установках Нейтронного комплекса ИЯИ, с целью уточнения и оптимизации параметров установок, планирования новых экспериментов и приложений. Монте-Карло моделирование потоков нуклонов и активации в экспериментальных установках ИЯИ РАН с целью их оптимизации.

В работе [4] представлены результаты разработки, монтажа и испытаний экспериментальной установки для облучения различных изделий и материалов на линейном ускорителе ИЯИ РАН. С использованием транспортного кода SHIELD оценены потоки вторичных нейтронов и протонов в экспериментальном зале, на облучаемом объекте, и в окружающем пространстве за внешней защитой ускорителя. Рассчитана активация и остывание элементов установки и облучаемого объекта. Полученные данные

использовались при выборе безопасных режимов эксплуатации установки и оптимальных условий облучения.

1.2. Моделирование детектора нейтронов высоких энергий на основе Не3счётчика.

В работе [5] предложена конструкция дозиметра нейтронов на основе цилиндрического полиэтиленового замедлителя со свинцовыми и кадмиевыми вставками и 3 He-счетчика для измерения амбиентной дозы нейтронов с энергией от 10^{-4} МэВ до 1 ГэВ. При проектировании дозиметра применялось Монте-Карло моделирование на основе программ Geant4 и SHIELD. Дозиметр предназначен для радиационного контроля нейтронных полей на ускорителях тяжелых ионов высоких энергий, в частности в проекте NICA (ОИЯИ, Дубна). Проведено сравнение характеристик дозиметра с зарубежными аналогами.

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

Обзор [6] демонстрирует прогресс в изучении космической радиационной среды и её воздействия на экипажи и электронику космических аппаратов, достигнутый исследователями NASA и других организаций за последние 10 лет. Отмечается важность вычислительных инструментов, включающих в себя модели космической радиационной среды, описание геометрии космических аппаратов, модели адрон-ядерных и ядро-ядерных взаимодействий, а также транспортные коды для расчета поля излучения в интересующем месте космического аппарата или среды обитания.

Известно, что вторичные нейтроны и легкие ионы, образующиеся в защите под действием космического излучения, вносят значительный вклад в эквивалентную дозу. Поэтому программы переноса космического излучения должны включать модули, обеспечивающие точные расчеты дважды дифференциальных сечений легких ионов. В работе [7] сравниваются аналитические и Монте-Карло модели расчета Лоренцинвариантных дважды дифференциальных сечений между собой, а также - с доступными экспериментальными данными. Обнаружено удовлетворительное согласие всех этих данных между собой, что позволяет прогнозировать надежность расчета переноса как детерминистическим кодом HEZTRN (NASA), так и транспортным кодом SHIELD.

В докладе [8] представлены результаты моделирования потоков частиц и поглощенной дозы в водном фантоме за защитными экранами из алюминия и пластика в сферической геометрии. Мишень облучалась потоком галактических космических лучей (ГКЛ) текущего 24-го солнечного цикла согласно модели НИИЯФ МГУ (2017). Следует отметить два факта: (1) защита из пластика 15 г/см² практически не уступает защите из

алюминия 27 г/см² по снижению мощности дозы, хотя масса пластика в 1.8 раза меньше; (2) при облучении протонами ГКЛ потоки заряженных пионов в фантоме добавляют 10-12% к потоку протонов.

В препринте [9] описаны модели и алгоритмы расчёта тормозных способностей в транспортном коде SHIELD. Функции dE/dX(E) вычисляются для снарядов от протона до тяжелых ионов, а также для заряженных пионов, каонов и антипротонов, при энергиях от 1 кэВ/нуклон до 1 ТэВ/нуклон. В качестве иллюстрации представлены графики тормозной способности воды для снарядов ГКЛ при энергии до 100 ГэВ/нуклон в контексте задач радиационной защиты в космосе.

1.4. Развитие статистических и динамических моделей образования и распада нуклонной и гиперъядерной материи. Развитие новых теоретических подходов для описания экзотических ядер и ядерной материи со странностью и чармом.

В работах [10-12] отражен прогресс в развитии моделей образования (динамическая стадия) и распада (статистическое описание) возбужденной гиперъядерной и нормальной ядерной материи. Даётся самосогласованное обобщение процессов испарения, Фермиразвала, деления и мультифрагментации на гиперядра. Проводится теоретический анализ новых закономерностей образования гиперядер с высокими значениями странности в реакциях при средних и высоких энергиях. Исследуются свойства экзотических ядер и развиваются методы извлечения энергии связи гиперонов в ядрах используя статистическую закономерность их выхода в реакциях. Дано сравнение с имеющимися экспериментальными данными по образованию гиперядер.

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

2.1. Математические модели девозбуждения атомных ядер, включая гиперядра

Работа [13] содержит дальнейшее развитие моделей испарения и деления возбужденных ядер, обобщение этих моделей на случай гиперядер. Проведены тестовые расчеты и сравнение с экспериментом. Выполнен анализ выхода нейтронов и нейтроноизбыточных изотопов в ядерных реакциях при промежуточных энергиях.

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

Исследуется вопрос о возможности использования 237Np в качестве основного материала для размножающего нейтронного источника. Основные преимущества – низкая эффективная доля запаздывающих нейтронов и короткое время жизни мгновенных нейтронов деления, что обуславливает низкий фон нейтронов между импульсами и короткую длительность импульса быстрых нейтронов. Показано что в подкритическом

режиме использование делящего материала с низкой долей запаздывающих нейтронов полностью безопасно, в отличии от реакторного режима. Кроме того, 237Np позволяет кардинально снизить долю оружейных материалов, таких как 235U и 239Pu, в активной зоне нейтронного источника.

Проводятся верификационные расчеты для подтверждения расчетных кодов и констант экспериментальным данным.

Выявлены ограничения на использования 237Np – высокое остаточное тепловыделения изза накопления 238Pu и положительный пустотный эффект реактивности при потере теплоносителя.

Разработаны пути преодоления этих негативных эффектов.

Показано, что геометрические параметры позволяют разместить такой нейтронный источник в существующем нейтронном комплексе ИЯИ РАН на месте вольфрамовой мишени.

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

Действующий в Лаборатории нейтронной физики Объединенного института ядерных исследований (ОИЯИ, г. Дубна, Россия) источник нейтронов на базе импульсного реактора ИБР-2М с плотностью потока тепловых нейтронов на уровне ~10¹³ н/(см² с) исчерпает свой ресурс и будет остановлен к 2034 г. Оптимизация этого реактора с целью получения более высоких потоков нейтронов практически невозможна. Поэтому вместо реактора ИБР-2М предлагается рассмотреть подкритический импульсный источник нейтронов, управляемый ускорителем протонов. В настоящее время в мире преимущественно используются не размножающие источники нейтронов на основе сильноточных протонных ускорителей, например, SNS или ESS с мощностью пучка соответственно 3 и 5 МВт. В работах [15, 16] приведены расчетные сравнения различных категорий импульсных источников нейтронов, управляемых сильноточными пучками протонов с целью выбора наиболее оптимальных решений. Показано, что перспективным вариантом может быть подкритический одно зонный бустер с мишенью на основе вольфрама и с активной зоной из двуокиси плутония. Для такого источника возможно получение средней плотности потока тепловых нейтронов на уровне более 2 10¹⁴ н/(см² с) при мощности протонного пучка 0.1-0.2 MBт и мощность 8 MBт. Источник с указанными параметрами, представленными достаточно безопасен, реализуем и попадает в категорию высокопоточных как на сегодняшний день, так и на перспективу.

2.4. 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 2019 г. проводились работы по исследованию дрейфа синхро-импульса ускорителя относительно протонного пучка и измерению характеристик нейтронных счетчиков на импульсном источнике нейтронов РАДЭКС центра коллективного пользования (ЦКП) ИЯИ РАН. Проведено два сеанса 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 сцинтилляционном детекторе, в реакции радиационного захвата нейтронов ядром и времени образования нейтронов в протонной мишени РАДЭКС. Система сбора и регистрации установки работает следующим образом: после появления стартового импульса производится запись, с последущим сжатием, 16 бит состояния детекторов установки (сработал - не сработал) каждые 100 нс в течении 19.6 мс. Таким образом, временной разброс, связанный с регистрцией детекторами установки, определяется интервалом равным 0.1 мкс. Основной вклад в ощибку определения времени пролета нейтронов в установке вносит длительность протонного пучка 0.3-0.4 мкс и точность временной привязки синхро-импульса ускорителя к импульсу протонного пучка. На рис. 1 а показана осцилограмма импульса индукционного датчика тока с последующим калибровочным импульсом (2.5 мА) для определения величины импульсного тока протонного пучка. Зависимость задержки сигнала от индукционного датчика тока (ИДТ) относительно синхро-импульса (чоппер) ускорителя показана на рис. 2 б. Дрейф синхроимпульса относительно импульса ИДТ для набора статистики m400 в десятки раз превышает длительность протонного пучка и составляет величину – 10 мкс. Величина дрейфа синхро-импульса сильно меняется от набора к набору и находится в интервале от 3 до 10 мкс.



Рис. 1. **а** – сигнал от индукционного датчика тока (ИДТ); **б** – зависимость задержки ИДТ сигнала относительно синхро-импульса (чоппер) ускорителя: по горизонтале – время измерения сигнала (мин) в сеансе, набор m400, по вертикале – время задержки в мкс.

На рис. 2 а и б показаны спектры для мишени Au-197 (run m400) со стартовым сигналом от синхро-импульса (чоппер) ускорителя и стартовый сигналом от индукционного датчика тока (ИДТ), соответственно. Измеренный спектр существенно улучшается с увеличением точности привязки стартового импульса к импульсу протонного пучка, что можно видеть на рис. 3 (а,б) на примере размытия двойного пика в области энергий нейтронов 490 эВ.

Результаты будут опубликованы в ПТЭ [17]



a



Рис. 2. **а** – времяпролетный спектр Au-197 (run m400), стартовый сигнал от синхро-импульса (чоппер) ускорителя; **б** – времяпролетный спектр Au-197(run m400), стартовый сигнал от индукционного датчика тока (ИДТ). По вертикале показано число отсчетов во временном канале 0.1 мкс (без перенормировки), по горизонтали – энергия нейтрона (эВ). Сплошной кривой показано сечение реакции (n, γ) радиационного захвата нейтрона ядром Au197, National Nuclear Data Center, **http://nndc.bnl.gov/sigma**

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

3.1. Модернизация установки «Горизонт», измерение спектров отражения тестовых образцов, подготовка к созданию малоуглового спектрометра на базе установки МНС

Проведена модернизация установки «Горизонт», включающая в себя дооснащение

установки автоматизированной системой позиционирования детектора нейтронов. Таким образом исчезает необходимость захода персонала в экспериментальную зону, которая требует закрытия шибера. Следовательно, возрастает эффективность использования нейтронного источника «ИН-06». Также проведено оснащение монитора прямого пучка новым счетчиком с предустановкой с USB-интерфейсом, изготовленным в ЛНИ (взамен устаревших счетчиков с КАМАК-интерфейсом). Это позволит ускорить и упростить измерения, уменьшить нагрузку на персонал.

Проведена калибровка установки «Горизонт» по спектрам пропускания бериллия (рис. 1), что позволит более точно определять время пролета нейтронов. После модернизаци установки измерены спектры отражения (рефлектометрические кривые) для тестовых образцов — немагнитных нейтронных зеркал NiMo и многослойного суперзеркала NiMo/Ti (*m*=2) (рис. 2).

Для создания нейтронного рефлектометра и малоуглового спектрометра в составе многофункционального спектрометра нейтронов «МНС» разработано техзадание и приобретен двухкоординатный детектор нейтронов с чувствительной областью 200х200 мм.

Результаты представлены на российских и международных конференциях [18-23].



Рис. 1. Спектр пропускания Ве (нормированный на спектр падающего пучка), полученный на установке «Горизонт» при комнатной температуре. Толщина бериллия — 5 см (синий), и 10 см (сиреневый).



Рис. 2. Спектр отражения нейтронов зеркалом NiMo — прямоугольники и многослойного суперзеркала NiMo/Ti (m = 2) - точки, измеренные на установке «Горизонт».

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

Сплав 40ХНЮ является немагнитным и в то же время не уступает по прочности стали (его твердость по Роквеллу достигает 60 ед.). Этот сплав хорошо зарекомендовал себя как материал для камер высокого давления для магнитных измерений и экспериментах в магнитных полях. Однако, нами было установлено, что данный сплав обладает высоким сечение рассеяния нейтронов в диапазоне переданных импульсов Q = 0,005-0,05 Å⁻¹, из-за чего его использование для МУРН-экспериментов практически невозможно. Представляет интерес поиск других немагнитных сплавов, которые могут быть использованы для этих целей.

Методами нейтронной дифракции и МУРН исследована структура жаропрочных сплавов немагнитных жаропрочных сплавов на основе Ni, Mo и Cu. Данные сплавы представляют интерес как материал для изготовления элементов нейтронографических устройств, например камер высокого давления системы поршень-цилиндр, предназначенных для исследований в магнитных полях методом МУРН. Измерение спектров МУРН на образцах сплавов необходимо для выбора оптимального материала для изготовления камер высокого давления.

Методом МУРН исследованы структуры сплавов 40ХНЮ (Ni-основной, 38-41% Cr, 3.3-3.8% Al) и МоТіС (Мо — основной, Ті — 10%, С — 3%) (рис. 3). Установлено, что для сплава 40ХНЮ упрочняющий отжиг приводит к образованию наночастиц и, как следствие, к увеличению интенсивности МУРН.



Рис. 3. Спектры МУРН сплавов 40ХНЮ (полсле упрочняющего отжига) — черный и MoTiC — красный, полученные на установке «Горизонт».

Из сравнения спектров на рис. 3. следует, что сплав МоТіС обладает сечением МУРН на 2 порядка слабее, чем 40ХНЮ, а следовательно — предпочтительнее для для изготовления элементов нейтронографических устройств, предназначенных для МУРН-исследований.

Результаты представлены в докладах на российских и международных коферекциях [20, 23], готовятся публикации в рецензируемых журналах.

4.2. Исследование материалов при высоких давлениях и низких температурах

4.2.1. Влияние давления на электронные, структурные и вибрационные свойства слоистого дихалькогенида 2H-MoTe₂.

Слоистые дихальхогениды молибдена отличаются от классического примера двухслойного графена своими уникальными электронными свойствами: приложение давления может непрерывно перестраивать электронную структуру, так как ширина запрещенной зоны контролируется тонким межслойным взаимодействием. Для изучения влияния давления на свойства 2H-MoTe₂ были проведены комбинированные исследования, включающие экспериментальные измерения Рамановского рассеяния, синхротронной рентгеновской дифракции, электропроводности и коэффициент Холла в сочетании с теоретическими расчётами методом функционала плотности. Комплексный подход на основе эксперимента и теоретических расчётов показывает, что в МоТе2 происходит непрерывный электронный переход полупроводник-металл (S-M) при давлениях выше 10 ГПа. В отличие от MoS₂, переход S-M обусловлен постепенной перестройкой электронной структуры и схлопыванием запрещенной зоны без структурного перехода. Приложенное давление также эффективно увеличивает проводимость и концентрацию носителей при одновременном снижении их мобильности, что делает MoTe₂ более подходящим для прикладных применений, чем большинство других дихальхогенидов переходных металлов и позволяют применять их в оптоэлектронных устройствах основанных на модуляции деформаций. По результатам измерений построена Р-Т фазовая диаграмма при высоких давлениях и низких температурах в области электронного S-M перехода [24].



Рис. 4. Измерение транспортных свойств МоТе₂ как функции давления. (а) электрическое сопротивление МоТе₂ как функция температуры при различных давлениях до 41.7 ГПа; (b) двумерная контурная диаграмма от температуры и давления, показывающая переходную область от полупроводника к металлу, полученную в результате экспериментальных измерений электропроводности; (c) барическая зависимость энергии активации, пунктирная линия - подгонка.

4.2.2. Концентрация воды в монокристаллическом (Al, Fe) -содержащем бриджманите, выращенном из водного расплава: последствия для дегидратационного плавления в верхнем слое нижней мантии.

Высококачественные монокристаллы $Mg_{0,88}Fe^{3+}_{0,065}Fe^{2+}0,035Al_{0,14}Si_{0,90}O_3$ (Al,Fe)содержащего бриджманита, размером в сотни микрон, были синтезированы при 24 ГПа и 1800 ° С в аппарате высокого давления типа "Каваи" из исходного водного расплава, содержащего ~ 6,7 мас.% воды. Анализ синтезированного бриджманита с использованием петрографической микроскопии, сканирующей электронной микроскопии и просвечивающей электронной микроскопии показывает, что кристаллы являются химически однородными и не содержат включений в пространственном разрешении от микрона до нанометра. Анализы масс-спектрометрии с нано-вторичными ионами (NanoSIMS) на выбранных образцах показывают ~ 1020 (\pm 70) ч / млн воды (водород). Высокая концентрация воды в структуре бриджманита была дополнительно подтверждена с помощью поляризованного и неполяризованного инфракрасного анализа с помощью Фурье спектрометра (FTIR) с двумя ярко выраженными стретч-полосами ОН при ~ 3230 и ~ 3460 см⁻¹. Наши результаты показывают, что нижний мантийный бриджманит может содержать относительно большое количество воды. Следовательно, для дегидратационного расплавдения в самом верхнем слое нижней мантии, вследствие нисходящего потока вещества переходной зоны, потребуется содержание воды, превышающее ~0,1мас.% [25].



Рис. 5. Сравнение концентраций воды в бриджманите с различным содержанием Fe и Al из этого исследования и работы Litasov et al. [2003]. Наборы данных в литературе [Bolfan □ Casanova et al., 2003; Inoue et al., 2010; Мураками и др., 2002; Panero et al., 2015] сведены в таблицу в таблице S2, но исключены на графике из-за возможных загрязнений и/или влияний сосуществующей фазы (фаз). (а) Концентрация воды как функция содержания Al (мол.%) в бриджманите; (б) концентрация воды как функция содержания Fe и Al (мол.%) в бриджманите; (с) Концентрация воды как функция содержания Fe и Al (мол.%) в мостике, рассчитанная как (Fe + Al) / (Mg + Fe + Si + Al). Кружки - это данные измерений FTIR, а квадраты - результаты измерений SIMS / NanoSIMS. Символы используются для различения эффектов Fe и Al в бриджманите: (а) открытые и сплошные символы не содержат Al и алюминий-содержащий бриджманит, соответственно; (б) открытыми и сплошными символами являются беаргманит, не содержащий железа и содержащий железо, соответственно; (с) открытые и сплошные символы представляют собой концевой член MgSiO3 и (Al, Fe) -бриджманит, соответственно.

4.2.3. Структурный переход под действием давления в полярную фазу в GdFe₃(BO₃)₄.

Кристалл GdFe₃(BO₃)₄ вызвал большой интерес как мультиферроик, индуцированный магнитным полем. В этой статье мы показываем, что свойства мультиферроика в этом кристалле могут быть вызваны высоким давлением. Структурные и

колебательные (фононные) свойства кристалла GdFe₃(BO₃)₄ были изучены при высоких давлениях до 50ГПа, созданных в ячейках с алмазными наковальнями. Структурный фазовый переход был обнаружен при 23-25 ГПа с помощью рамановской и синхротронной мессбауэровской (NFS) спектроскопии. Вначале были проведены основные расчеты динамики кристаллической решетки при давлениях ниже и выше структурного перехода. Было установлено, что при давлениях выше структурного перехода пространственная группа R32 GdFe₃(BO₃)₄ изменяется на полярную пространственную группу R3, и кристалл становится сегнетоэлектриком. При переходе R32 → R3 смещение иона бора B(2) и кислорода О приводит к образованию тетраэдров бор-кислород B(2)O₄ вместо плоских треугольников BO₃. Между тем треугольник кислородного окружения бора в узле B(1) остается неизменным. Ближайшее окружение иона гадолиния также существенно меняется. Вместо шести ионов кислорода в фазе R32 ближайшее окружение Gd в фазе R3 состоит из девяти ионов кислорода, образующих сложный многогранник. Большой гистерезис перехода указывает на то, что этот кристалл остается сегнетоэлектриком с понижением давления примерно до давления окружающей среды [26].



Рис. 6. Сравнительный вид треугольников $B(1)O_3$ и $B(2)O_3$ в фазе R32 и треугольник $B(1)O_3$ и тетраэдры $B(2)O_4$ в R3 фазе. В R3, треугольники $B(1)O_3$ остаются неизменными; B(2) тетраэдры O_4 и октаэдры FeO₆ образуют геликоидальные цепи. Также показан многогранник GdO₉.

4.2.4. Синтез и сверхпроводимость гексагидрида иттрия Im3m-YH6.

Здесь мы сообщаем о целенаправленном синтезе высокого давления гидридного сверхпроводника с высоким значением температуры сверхпроводящего перехода (T_C) Im3m-YH₆ с предсказанным T_C ~ 270-280 К и верхним критическим магнитным полем (\Box HC) вплоть до 75 Тесла. Согласно нашим экспериментам, кубический YH₆ может быть приготовлен в смеси I4/mmm-YH₄ и Imm2-YH₇ фаз при давлениях 160-180 ГПа посредством лазерного нагрева металлического иттрия в среде аммониевого борана при температуре свыше 2400 К. Сжатый Im3m-YH₆ демонстрирует ярко выраженный сверхпроводящий переход с T_C ~ 224 К при 166 ГПа, несколько ниже, чем это было теоретически предсказано (> 273 K). В настоящее время это вторая по величине критическая температура, которая была экспериментально достигнута в сжатых гидридах. Теоретически исследованы новые фазы, изучены их электронные, фононные, механические и сверхпроводящие свойства [27].



Рис. 7. Сверхпроводящие переходы в Im3m-YH₆: (а) Зависимость электросопротивления от температуры в образце K1. Вставка: сопротивление падает до нуля после охлаждения ниже T_C; (б) скачок зависимости сопротивления R (T) (увеличение в 9 раз) от температуры для образца M1. Вставка изменение цвета образца после лазерного нагрева (становится чёрным).

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

План работ на 2019 год выполнен полностью. Были получены следующие основные результаты:

Адаптирован метод нейтронной радиографии и томографии для диагностики промышленных изделий и объектов культурного наследия

5.1. Адаптация метода нейтронной радиографии и томографии для

диагностики промышленных изделий и объектов культурного наследия.

В совместной работе [28, 29] с НИЦ "Курчатовский институт" в области томографии проводились тестовые измерения на установке "ДРАКОН" ИР-8 промышленных изделий и объектов культурного наследия. Из результатов этих работ проведена адаптация метода нейтронной радиографии и томографии для использования на источнике ИН-06. В частности, удалось установить, что оптимальное отношение L/D (от которого зависит разрешение) должно быть не менее 80. При таком значение возможно получение качественных изображений внутренней структуры, что особенно важно при исследовании объектов культурного наследия.

Для возможности проведения экспериментов по томографии и радиографии планировалось использовать установку кристалл, но с учетом полученных данных максимальное L/D=14.4 при котором не удастся получить требуемое разрешение без установки дополнительного коллиматора.

5.2. Оптимизация работы системы нейтронных детекторов.

Для оптимизации работы системы нейтронных детекторов были проведены тестовые измерения аморфных образцов на источнике нейтронов "РАДЭКС" ИЯИ РАН. По результатам измерений. Для измерений использованы кольцевой детектор на основе сцинтиллятора и кремниевого фотоумножителя и система одиночных сцинтилляционных детекторов. По результатам измерений внесены измерения в электронную часть системы с целью увеличить загрузочную способность систем детекторов и рассчитаны оптимальные параметры расположения детекторов для аморфных образцов.

5.3. Разработка и тестирование прототипов позиционно-чувствительного

детектора тепловых нейтронов на основе сцинтилляторов и лавинных диодов.

Проведена разработка и тестирования сцинтилляционного детекторов высокого разрешение с возможностью ПЧД. Разработаны детекторы размеров 5х50 мм. Разработаны новые предусилители с повышенной загрузочной способностью.

Определение места попадания нейтрона осуществляется на основе сравнения амплитуд полученных с кремниевых фотоумножителей расположенных по краям детектора.

Новые детекторы были протестированы в сеансе на источнике ИН-06 установка ГЕРКУЛЕС.



Рис. 8. Тестовые испытания детектора ПЧД

5.4. Развитие новых методов исследования фундаментальных взаимодействий при низких энергиях нейтронов.

Предложенный новый метод измерения времени жизни нейтрона.

Достоинство предложенного метода в том, что в нем используются относительные измерения. С помощью моделирования эксперимента было рассмотрено влияние экспериментальных условий, фона, неидентичности детекторов и давления остаточного газа, на точность измерения времени жизни нейтрона. Эти систематические погрешности могут быть измерены экспериментально.

Недостатком предложенного метода является маленькая величина измеряемого эффекта ~10⁻⁵. Величину измеряемого эффекта можно увеличить примерно на порядок, используя холодный замедлитель. Измерения (ВЖН) на реакторе ИБР-2, имеют свои трудности связанные с очень большой импульсной плотностью потока нейтронов и большой величиной фона запаздывающих нейтронов.

В наших работах, выполненных на стационарных реакторах, использовался интегрально-компенсационный метод измерения малых Р-нечетных эффектов.

В настоящее время мы развиваем интегрально-компенсационный метод измерения времяпролетных спектров на реакторе ИБР-2.

Ведутся работы по разработке измерения фона запаздывающих нейтронов с точностью 0,1 %.

5.4.1 Разработка нового метода измерения времени жизни нейтрона с помощью спектрометрии по времени пролета.

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.

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

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:

(1).

$$P(t) = -P_0 \cdot \beta / \epsilon(t)$$

Здесь P_0 – мощность импульса, β – доля запаздывающих нейтронов, $\epsilon(t)$ – 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 с точностью 0,1 %.



Рис. 9. Фон запаздывающих нейтронов с энергией большей 0,4 эВ.

5.4.3 Разработка токового метода регистрации времяпролетных спектров.

Достоинство времяпролетного метода измерения (ВЖН) в том, что в нем используются относительные измерения. С помощью моделирования эксперимента было рассмотрено влияние экспериментальных условий, фона, неидентичности детекторов и давления остаточного газа, на точность измерения времени жизни нейтрона. Эти систематические погрешности могут быть измерены экспериментально.

Недостатком предложенного метода является маленькая величина измеряемого эффекта ~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.

5.5. Создание интенсивного W-Be-фотонейтронного источника

Сокращение парка больших и дорогостоящих ядерно-физических установок, таких как ядерные реакторы и нейтронные генераторы, диктует необходимость создания новых, современных, универсальных, компактных, мобильных и, в то же время, достаточно экономичных ядерно-физических установок для широкого круга современных задач. В связи с этим в качестве более экономичной замены, представляет интерес создание фотонейтронных источников на базе промышленных низкоэнергетических линейных ускорителей электронов на энергии 6 – 10 МэВ.

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 10⁷ – 10⁸ 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.

5.5.1. Исследование пространственного распределения тепловых нейтронов выведенного пучка фотонейтронного источника

Создание W-Be-фотонейтронного источника нейтронов на базе линейного ускорителя электронов потребовало исследований характеристик фотонейтронного источника при различных энергиях входного пучка электронов. Также расширились и требования к параметрам пучка ускорителя: диапазон энергий – 4-10 МэВ при средних токах от десятых долей мкА

до 200-300 мкА при высоких требованиях на надежность, стабильность и воспроизводимость условий эксперимента.

Созданный на базе линейного ускорителя электронов W-Be-фотонейтронный источник нейтронов [1, 2] (рис. 1) обеспечивает облучение различных образцов во внутренней полости источника с максимальной плотностью потока тепловых нейтронов $10^7 - 10^8$ нейтрон/см²·с. Для ряда задач необходимо иметь возможность вывода из источника пучка нейтронов различных энергий. Ранее в работе [3] нами была показана принципиальная возможность получения пучка тепловых нейтронов из фотонейтронного источника и исследованы некоторые его характеристики. Целью настоящей работы является подробное исследование пространственного распределения тепловых нейтронов вблизи выхода нейтронного канала фотонейтронного источника.

Схема фотонейтронного источника показана на рис. 1. Электроны ускорителя вызывают в вольфрамовом конвертере 1 поток тормозных фотонов с максимальной энергией до 9 МэВ. Тормозные гамма-кванты, попадая на фотонейтронную мишень 2, выполненную в виде двух блоков $10 \square 10 \square 10 \ cm^3$ из бериллия, вызывают образование быстрых нейтронов в реакции ⁹Ве(γ ,n). Нейтроны в полиэтиленовом замедлителе 4, окружающем фотонейтронные мишени, замедляются до тепловой энергии, при этом максимальная плотность потока тепловых нейтронов 10^7 – 10^8 нейтрон/см² с достигается в центре источника в объеме $10 \square 10 \square 10 \ cm^3$, расположенном между блоками бериллиевой мишени. Эта внутренняя область 6 обычно используется для облучения тепловыми нейтронами исследуемых образцов. Слои защиты из борированного полиэтилена 5 замедляют вышедшие из замедлителя быстрые нейтроны и поглощают медленные и тепловые нейтроны. Источник представляет собой куб с размерами $1 \square 1 \square 1 \ m^3$.



Рис. 1. Схема фотонейтронного источника: 1 – W-тормозная мишень-конвертер, 2 – Ве фотонейтронные мишени, 3 –выводной нейтронный канал, 4 – полиэтиленовый замедлитель, 5 – защита из борированного полиэтилена, 6 – полость для внутреннего облучения, 7 – активационные образцы KMnO4.

В слоях замедлителя и защиты выполнен канал 3 для вывода нейтронов из источника в виде коллиматора диаметром 3 см, расположенный под углом 67 относительно направления электронного пучка и выходящий из центра области 6 с максимальной плотностью потока тепловых нейтронов.

Для измерения плотности потока нейтронов в качестве активационных детекторов использовались образцы KMnO₄ весом ~3 г, в которых в результате активации тепловыми нейтронами в реакции ⁵⁵Mn(n,γ)⁵⁶Mn образуется изотоп ⁵⁶Mn с периодом полураспада 2.58 ч. Для изотопа ⁵⁵Mn характерно большое сечение реакции нейтронного захвата для тепловых нейтронов σ_T = 13.3 бн.

Образцы размещались на разных расстояниях от выхода нейтронного канала. Каждый набор (11 образцов) устанавливался горизонтально по линии, перпендикулярной оси коллиматора на расстоянии 1.5–3.5 м от центра источника. Облучение образцов проводилось при среднем токе электронов 50 мкА. Время облучения варьировалось от 60 до 180 мин.

После облучения образцы поочередно перемещались в низкофоновую камеру [35] и активационные γ-спектры образцов измерялись с помощью HPGe-спектрометра из особо чистого германия. Время измерения каждого спектра составляло 1000 с. В результате

обработки спектров вычислялась площадь аналитического пика с энергией 847 кэВ, соответствующего образованию изотопа ⁵⁶Mn. Далее с использованием известного сечения σ_T реакции ⁵⁵Mn(n,γ)⁵⁶Mn, времен облучения, выдержки и измерения и других известных параметров (эффективность детектора, масса элемента в детекторе, выход γ -квантов и др.) вычислялась плотность потока нейтронов в точках расположения детекторов.

Полученные экспериментальные значения плотности потока тепловых нейтронов в зависимости от смещения $\Box L$ от оси коллиматора при различных расстояниях R от центра источника представлены на рис. 2.

Представленные на рис. 2 экспериментальные распределения плотности потока тепловых нейтронов приведены для расстояний R = 1.5 м, 2 м, 2.5 м и 3 м от центра источника. Видно, что распределения имеют схожий характер и меняются подобным образом при изменении R. Поэтому их можно описать общей аппроксимационной кривой (кривые *3* на рис. 2), рассчитанной как сумма двух гауссианов, зависящих от смещения $\Box L$ от оси коллиматора:

$$\Phi = \Phi e^{-4\pi \left(\frac{\lambda}{\nu_1}\right)^2} + \Phi e^{-4\pi \left(\frac{\lambda}{\nu_2}\right)^2}, \qquad (1)$$

где параметры аппроксимации \Box_1 , \Box_2 – значения плотности потока на оси коллиматора, а w_1 , w_2 – ширины распределений FWHM (полная ширина на середине высоты). На рис. 2 кривая I в этом случае отражает наличие пучка тепловых нейтронов, а кривая 2 – фон источника. Параметры аппроксимации в свою очередь зависят от расстояний R от центра источника.



Рис. 2. Пространственные распределения плотности потока нейтронов в зависимости от смещения $\Box L$ от оси коллиматора при различных расстояниях R от центра источника: a - 1.5 м, 6 - 2 м, e - 2.5 м, e - 3 м. Точки – экспериментальные данные. Кривые: I - аппроксимация по первой части формулы (1), <math>2 - по второй части, 3 - суммарная кривая аппроксимации экспериментальных данных по формуле (1).

Полученные зависимости параметров были использованы для вычисления по формуле (1) значений плотности потока тепловых нейтронов в широком диапазоне расстояний от источника и оси нейтронного канала. Результат представлен на рис. 3 в виде контурной диаграммы пространственного распределения тепловых нейтронов в горизонтальной плоскости относительно оси выводного канала фотонейтронного источника. Сплошными линиями показаны линии уровней (изолинии) и приведены некоторые соответствующие значения плотности потока Φ. Полобные ИМ пространственные распределения могут быть построены отдельно по первой и второй частям формулы (1). При этом получаются, соответственно, распределение интенсивности в пучке тепловых нейтронов и распределение фона тепловых нейтронов вне источника.

Значения плотности потока Φ в центре источника и на выходе нейтронного канала получились равными, соответственно, 10^7 нейтрон/см² · с и 10^4 нейтрон/см² · с, что соответствует контрольным измерениям. При этом интенсивность (плотность потока) тепловых нейтронов на оси пучка составляет 600–150 нейтрон/см² · с на расстоянии 1.5–3 м от центра источника. Для увеличения интенсивности нейтронов на выходе нейтронного канала необходимы дополнительные исследования по оптимизации источника и выводного коллиматора.



Рис. 3. Контурная диаграмма пространственного распределения тепловых нейтронов в горизонтальной плоскости относительно оси выводного канала фотонейтронного источника. Сплошными линиями показаны линии уровней (изолинии) и приведены некоторые соответствующие им значения плотности потока Ф, нейтрон/см² · с.

Результаты опубликованы в статьях [33-35] и представлен в докладе [38].

5.5.2. Четырехслойный газовый детектор для определения интенсивности и энергии электронов

Целью настоящей работы являлось также создание многослойного газового пропорционального детектора, способного решать различные задачи. Такой детектор позволяет измерять ионизационные потери заряженных частиц в последовательных газовых зазорах, которые отделены друг от друга катодами, выполняющими одновременно роль поглотителей, что позволяет проводить идентификацию заряженных частиц и определение их энергий.

Схема четырехслойного газового детектора заряженных частиц представлена на рис. 4.



Рис. 4. Схема четырехслойного газового детектора: *1* – корпус; *2* – входное окно; *3* – проволочный катод; *4*, *6*, *8*, *10* – проволочные аноды; *5*, *7*, *9*, *11* – плоские катоды.

Детектор состоит из герметичного корпуса 1, который имеет входное окно 2 из полиимида толщиной от 20 до 70 мкм в зависимости от требований эксперимента. Внутри корпуса расположена сборка из четырех последовательных пропорциональных камер с зазорами 0.8 см заполненными газовой смесью Ar + 20% CO2 под давлением 1 атм. Первая камера содержит проволочный катод 3 из проволоки диаметром 50 мкм из покрытой золотом бериллиевой бронзы и сигнальный проволочный анод 4 из проволоки диаметром 20 мкм из покрытого золотом вольфрам-рениевого сплава. Остальные камеры содержат такие же, как и 4, сигнальные проволочные аноды 6, 8, 10 и плоские катоды 5, 7, 9, 11 из алюминиевой фольги толщиной 70 мкм. Все катоды подключены к высоковольтному питанию, а сигнальные аноды – к индивидуальным усилителям.

Заряженная частица, проходящая через тонкое окно, производит ионизацию в четырех последовательных газовых зазорах, разделенных поглотителями. Поглотители из 70 мкм алюминия для торможения частиц одновременно являются катодами системы из

четырех последовательных пропорциональных камер.

Сигналы с проволочных анодов поступают на усилители УЛБ-8, в которых 8 каналов усиления образуют 4 канала по 2 ступени с коэффициентом усиления ~400. Далее регистрация сигналов проводится с помощью сигнального процессора DT5720 фирмы САЕN под управлением сигнала от первой камеры детектора.

Детектор перед экспериментом наполнялся газом Аг + 20% CO₂ и использовался без протекания через него газа. Напряжение питания детектора составляло 2.6–2.7 кВ. Чтобы подавить случайные совпадения использовались временные ворота выделения полезных событий. Собственный шум детектора не превышал 2.6 соб. мин⁻¹.

Данный детектор может быть использован для измерения средней энергии электронов в сгустке пучка ускорителя. В этом случае оказывается невозможным измерить ионизационные потери отдельного электрона в сгустке, но измеряются потери в нескольких газовых зазорах, усредненные за сброс пучка ускорителя. На примере измерения граничной энергии бета-активного источника ⁸⁹Sr и энергии электронов линейного ускорителя электронов показана работоспособность такого детектора.

В процессе измерений детектор размещался на пучке электронов ускорителя ЛУЭ-8-5 при токе ~30 нА. Измеренные амплитуды сигналов зависели от интенсивности пучка, но их отношение зависит только от энергии. На рис. 5 представлены спектры отношения $A_{12} = A_1 / A_2$ для энергии электронов 7 МэВ, где A_1 – амплитуда сигнала, измеренного в 1-ом зазоре детектора, а A_2 –амплитуда сигнала, полученного во 2-ом зазоре.



Рис. 5. Спектры отношения амплитуд сигналов от 1-ого и 2-го зазора $A_{12} = A_1 / A_2$ для энергии электронов 7 МэВ: *а* – без поглотителя; *б* – с поглотителем из алюминия толщиной 5 мм.

На рис. 56 представлен спектр, полученный с поглотителем из алюминия толщиной 5 мм перед детектором, а на рис. 5*a* – без поглотителя.

Поглотитель перед детектором устанавливался для того, чтобы увеличить разницу в величинах отношений A_{12} , A_{13} и A_{14} для разных зазоров. При этом средняя энергия проникающих через поглотитель электронов уменьшалась, ионизационные потери увеличивались и чувствительность функций $A_{12}(E_e)$ и $A_{14}(E_e)$ также увеличивалась, как это показано на рис. 6*a* и 6*b*.



Рис. 6. Зависимости от энергии пучка электронов E_e отношений амплитуд сигналов $A_{12}(a)$, $A_{14}(\delta)$ и ширины $W_{12}(e)$ на половине высоты распределения A_{12} . Черными квадратами и сплошной линией обозначены данные и аппроксимация, полученные без поглотителя. Отрытыми кружками и пунктирной линией – с поглотителем.

В тоже время, другим параметром, зависящим от средней энергии электронов в сгустке, была ширина W_{12} на половине высоты распределения A_{12} (рис. 6*в*). Используя зависимости функций A_{12} , A_{14} и W_{12} от энергии на различных энергетических интервалах можно контролировать энергию пучка электронов.

Результаты опубликованы в статьях [36-37] и представлены в докладе [39].

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

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

План работ на 2019 год выполнен полностью. Были получены следующие основные результаты:

Выполнено запланированное развитие транспортного кода SHIELD, а также необходимых для этого математических моделей, включенных в код. Выполнены расчеты для решения возникших актуальных задач. Результаты представлены в публикациях [1-3].

1.1. Моделирование процессов, инициированных пучком протонов линейного ускорителя в установках Нейтронного комплекса ИЯИ, с целью уточнения и оптимизации параметров установок, планирования новых экспериментов и приложений. Монте-Карло моделирование потоков нуклонов и активации в экспериментальных установках ИЯИ РАН с целью их оптимизации.

Выполнено моделирование процессов, инициированных пучком линейного ускорителя протонов ИЯИ РАН в стенде для облучения изделий электроники и материалов, с целью выбора оптимальных условий эксплуатации стенда и оценки радиационных условий в помещении стенда и за внешней защитой. Результаты представлены в публикации [4].

1.2. Моделирование детектора нейтронов высоких энергий на основе Не3-счётчика.

Выполнено моделирование дозиметра нейтронов высоких энергий, предназначенного для радиационного контроля нейтронных полей на современных ускорителях тяжелых ионов, в частности для проекта NICA (ОИЯИ, ДУБНА) с целью оптимизация геометрии и других параметров конструкции дозиметра. Результаты представлены в публикации [5].

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

Опубликован обзор достижений в изучении космической радиационной среды и её воздействия на экипажи и электронику космических аппаратов за последние 10 лет. Выполнен расчетно-теоретический анализ потоков частиц и мощности дозы для простых реалистических моделей защиты космического аппарата в рамках детерминистического и Монте-Карло подходов к расчету переноса. Результаты представлены в публикациях [6-9].

1.4. Развитие статистических и динамических моделей образования и распада нуклонной и гиперядерной материи. Развитие новых теоретических подходов для описания экзотических ядер и ядерной материи со странностью и чармом.

Осуществлено развитие моделей образования и распада возбужденной гиперядерной и нормальной ядерной материи. Выполнен теоретический анализ образования гиперядер с высокими значениями странности. Проведено сравнение расчетов с доступными экспериментальными данными. Результаты представлены в публикациях [11-12].

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

План работ на 2019 год выполнен полностью.

2.1. Математические модели девозбуждения атомных ядер, включая гиперядра.

Выполнено развитие и совершенствование моделей девозбуждения возбужденных атомных ядер, а также верификация этих моделей путем сравнения с экспериментальными данными. Результаты представлены в публикации [13].

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

План работ на 2019 год выполнен полностью. Были получены следующие основные результаты:

Выполнено запланированное моделирование с помощью транспортного кода MCNPXS, а также необходимых для этого математических моделей. Выполнены расчеты параметров и верификационные расчеты. Выявлены основные преимущества и негативные моменты. Результаты готовятся к публикации. Описание вольфрамовых мишеней представлено в работе [14].

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

План работ на 2019 год выполнен полностью. Были получены следующие основные результаты:

Показано, что перспективным вариантом может быть подкритический одно зонный бустер с мишенью на основе вольфрама и с активной зоной из двуокиси плутония. Для такого источника возможно получение средней плотности потока тепловых нейтронов на уровне более 2 10¹⁴ н/(см² с) при мощности протонного пучка 0.1-0.2 МВт и мощность 8 МВт. Источник с указанными параметрами, представленными достаточно безопасен, реализуем и попадает в категорию высокопоточных как на сегодняшний день, так и на перспективу. Результаты представлены в публикациях [15, 16].

2.4. Измерение нейтронных сечений, установка ИНЕС на источнике РАДЭКС

План работ на 2019 год выполнен полностью.

Изготовлена система запуска стартового импульса от индукционного датчика тока протонного пучка. Проведены работы по измерению дрейфа синхро-импульса ускорителя относительно индукционного датчика тока и измерению характеристик нейтронных счетчиков 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»

План работ на 2019 год выполнен полностью. Были получены следующие основные результаты:

Проведена модернизация нейтронного рефлектометра-малоуглового спектрометра «Горизонт», полностью автоматизирован процесс измерения. Проведены тестовые измерения на образцах нейтронных суперзеркал, показана возможность проведения на установке «Горизонт» тестирования нейтронных суперзекал.

Разработаны и протестированы прототипы ПЧД тепловых нейтронов на основе сцинтиллятора и лавинных фотодиодов

Оптимизирована работа системы нейтронных детекторов

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

План работ на 2019 год выполнен полностью.

4.1. Исследование структуры жаропрочных сплавов методом МУРН

Получены спектры малоуглового рассеяния, на сплавах 40ХНЮ (Ni-основной, 38-41% Cr, 3.3-3.8% Al) и MoTiC (Mo — основной, Ti — 10%, C — 3%). Установлено, что сплав MoTiC обладает более слабым сечением МУРН,чем 40 ХНЮ, а следовательно предпочтительнее для для изготовления элементов нейтронографических устройств, предназначенных для МУРН-исследований.

4.2. 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:

4.2.1. Влияние давления на электронные, структурные и вибрационные свойства слоистого дихалькогенида 2H-MoTe₂.

План работ выполнен полностью. Построена Р-Т фазовая диаграмма слоистого дихалькогенида 2H-MoTe₂ при высоких давлениях и низких температурах в области электронного S-M перехода [24].

4.2.2. Концентрация воды в монокристаллическом (Al, Fe) -содержащем бриджманите, выращенном из водного расплава: последствия для дегидратационного плавления в верхнем слое нижней мантии.

План работ выполнен полностью. Было получено, что нижний мантийный бриджманит содержащий (Al, Fe) содержать относительно большое количество воды [25]. Что очень важно для оценки содержания воды в недрах Земли

4.2.3. Структурный переход под действием давления в полярную фазу в GdFe₃(BO₃)₄.

План работ выполнен полностью. Было обнаружено, что в результате структурного перехода под давлением GdFe₃(BO₃)₄ превращается в полярную фазу [26]. Были изучены свойства новой фазы.

4.2.4. Синтез и сверхпроводимость гексагидрида иттрия Im3m-YH6.

План работ выполнен полностью. Методом лазерного нагрева при высоких давлениях в алмазных наковальнях был синтезирован полигидрид иттрия YH₆ с кубической структурой Im3m имеющий сверхпроводящие свойства с очень высокой температурой сверхпроводящего перехода T_C~230 K [27].

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

План работ на 2019 год выполнен полностью.

Были получены следующие основные результаты:

Адаптирован метод нейтронной радиографии и томографии для диагностики промышленных изделий и объектов культурного наследия

5.1 Адаптация метода нейтронной радиографии и томографии для

диагностики промышленных изделий и объектов культурного наследия.

Выполнена адаптация метода нейтронной радиографии и томографии для диагностики промышленных изделий и объектов культурного наследия с целью использования данного метода на источнике ИН-06 ИЯИ РАН.

5.2 Оптимизация работы системы нейтронных детекторов

Выполнена оптимизация работы системы нейтронных детекторов с целью качественного улучшения получения результатов

5.3 Разработка и тестирование прототипов позиционно-чувствительного

детектора тепловых нейтронов на основе сцинтилляторов и лавинных диодов. Выполнена разработка и тестирование прототипов позиционно-чувствительного детектора тепловых нейтронов на основе сцинтилляторов и лавинных диодов. Проведены тестовые испытания на установке ИН-06.

5.4. Развитие новых методов исследования фундаментальных взаимодействий при низких энергиях нейтронов.

План работ на 2019 год выполнен полностью. Были получены следующие основные результаты:

Выполнены проектно-конструкторские работы по разработке прототипа установки для измерения времени жизни нейтрона.

5.4.1 Разработка методики измерения времени жизни нейтрона с

помощью спектрометрии по времени пролета.

Проводится моделирование времяпролетных спектров нейтронов и фоновых условий в области детекторов нейтронов. Выполнены проектно-конструкторские работы по разработке прототипа установки для измерения времени жизни нейтрона.

5.4.2 Исследование характеристик временных и фоновых

характеристик ГЭК-1 реактора ИБР-2.

Обнаружено изменение времени вспышки реактора относительно старта. Измерено время замедления нейтронов в зависимости от длины волны нейтрона. Установлена зависимость полуширины рефлексов от длины волны нейтрона [30].

Разрабатывается методика измерения фона запаздывающих нейтронов, предварительные результаты представлены в работе [31].

5.4.3 Разработка токового метода регистрации времяпролетных спектров

Разрабатывается токовый метод регистрации времяпролетных спектров нейтронов. Впервые, токовым методом, измерены времяпролетные спектры пропускания в области низко лежащих резонансов индия и тантала. Предварительные результаты представлены в работе [32].

5.5.Создание интенсивного W-Be-фотонейтронного источника

План работ на 2019 год выполнен полностью.

Создан W-Be-фотонейтронный источник и запущен на пучке электронов линейного ускорителя ЛУЭ-8-5 ИЯИ РАН. Исследованы характеристики фотонейтронного источника

при различных энергиях входного пучка электронов. Использование метода нейтронноактивационного анализа для изучения распределения тепловых нейтронов вблизи выхода нейтронного канала фотонейтронного источника позволило получить пространственное распределение тепловых нейтронов в виде карты плотности потока. Полученное распределение имеет максимум на оси нейтронного канала, что свидетельствует о наличии реального пучка нейтронов. Интенсивность тепловых нейтронов в таком пучке составляет на выходе коллиматора 10^4 нейтрон/см² · с и 600 - 150 нейтрон/см² · с на расстоянии 1.5 - 3 м от центра источника. Для того чтобы в дальнейшем планировать физические задачи с использованием тепловых нейтронов, необходимо проведение дополнительных работ увеличению интенсивности пучка тепловых нейтронов и по оптимизации выводного коллиматора нейтронного канала. Также необходимы исследования пространственных распределений нейтронов более высоких энергий, чем тепловые. Результаты опубликованы в статьях [33-35] и представлен в докладе [38].

Разработан четырехслойный газовый детектор для определения интенсивности и энергии электронов и других заряженных частиц. Представлены результаты измерений с использованием разработанного детектора, показывающие возможность определения энергии заряженных частиц. На примере измерения граничной энергии бета-активного источника ⁸⁹Sr и энергии электронов линейного ускорителя электронов показана работоспособность такого детектора. Результаты опубликованы в статьях [36-37] и представлены в докладе [39].

ПУБЛИКАЦИИ

1. Задача «Развитие и применение транспортного кода SHIELD как инструмента математического моделирования взаимодействия частиц с веществом, включая развитие моделей ядерных реакций».

1. Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2019662443 Программа расчета тормозной способности вещества для адронов и ионов (STP_Had_Ion). Правообладатель: ФГБУН Институт ядерных исследований Российской академии наук (ИЯИ РАН) (RU). Авторы: Соболевский Н. М. (RU), Чуманова Л. Н. (RU). Заявка № 2019619732. Дата поступления 30 июля 2019 г. Дата государственной регистрации в реестре программ для ЭВМ 25 сентября 2019 г. Руководитель Федеральной службы по интеллектуальной собственности Г.П. Ивлиев.

2. Тютюнников С.И., Сыресин Е.М., Бутенко А.В., Титаренко Ю.Е., Павлов К.В., Рогов К.В., Батяев В.Ф., Титаренко А.Ю., Кулевой Т.В., Берлянд В.А., Берлянд А.В., Соболевский Н.М., Чумаков А.И., Сабуров В.О. Анализ проблем метрологического обеспечения испытательных стендов для проведения технических и биологических испытаний на стойкость к воздействию тяжелых ионов высокой энергии // Письма в ЭЧАЯ. - 2019. - Т. 16. - С. 522-534.

Rybakov A.S., Demikhov E.I., Kostrov E.A., Litvin V.S., Sobolevsky N.M., Latysheva L.N. and Borisenko N.G. Cryogenic setup for MJ class laser targets // Laser and Particle Beams. – 2019.
 -Vol. 37. - P. 25-29.

1.1. Моделирование процессов, инициированных пучком протонов линейного ускорителя в установках Нейтронного комплекса ИЯИ, с целью уточнения и оптимизации параметров установок, планирования новых экспериментов и приложений. Монте-Карло моделирование потоков нуклонов и активации в экспериментальных установках ИЯИ РАН с целью их оптимизации.

4. Bragin S., Feschenko A., Gavrilov S., Grekhov O., Kalinin Y., Kiselev Y., Latysheva L., Lebedev S.G., Melnikov A., Serov V., Sobolevskiy N., Titov A., Volodkevich O., Arbuznikov D., Podgornaya O., Prokhorov E., Razinkov S., Tsedrik P. and Tsibryaev S. Development of Proton Irradiation Facility at the INR Linac // J. Phys. Conf. Ser. - 2019. - Vol. 1238. - P. 012066.

1.2. Моделирование детектора нейтронов высоких энергий на основе Не3-счётчика.

5. Чан Нгок Тоан, Бескровная Л.Г., **Латышева Л.Н.**, **Соболевский Н.М.**, Тимошенко Г.Н. Дозиметр нейтронов с энергией от 10^{□4} МэВ до 1 ГэВ на основе гетерогенного замедлителя // Письма в ЭЧАЯ. - 2019. - Т. 16. - С. 66-75.

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

6. Norbury J.W., Slaba T.C., Aghara S., Badavi F.F., Blattnig S.R., Clowdsley M.S., Heilbronn L.H., Lee K., Maung K.M., Mertens C.J., Miller J., Norman R.B., Sandridge C.A., Singleterry R., Sobolevsky N., Spangler J.L., Townsend L.W., Werneth C.M., Whitman K., Wilson J.W., Xu S.X., Zeitlin C. Advances in Space Radiation Physics and Transport at NASA // Life Sciences in Space Research. - 2019. - Vol. 22. - P. 98-124.

7. Norbury J.W., Latysheva L., Sobolevsky N. Light ion double-differential cross section parameterization and results from the SHIELD transport code // Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section A. - 2019. - Vol. 947. - P. 162576.

8. Kuznetsov N.V., Latysheva L.N., Sobolevsky N.M. Simulation of particle fluxes and absorbed dose behind a shielding irradiated by GCR using the SHIELD transport code // Radiation Environment and Risk Analysis At and Near the Lunar Surface. Face-to-face Meeting № 6, February 18-19, 2019, Moscow.

9. Соболевский Н.М., Латышева Л.Н. Модели и алгоритмы расчёта тормозных способностей dE/dX(E) в транспортном коде SHIELD. - М.: ИЯИ РАН, 2019. - Препринт 1443/2019, 18 с.

1.4. Развитие статистических и динамических моделей образования и распада нуклонной и гиперядерной материи. Развитие новых теоретических подходов для описания экзотических ядер и ядерной материи со странностью и чармом.

10. Buyukcizmeci N., Botvina A.S., Ogul R., Ergun A., Bleicher M. Production of Lambdahypernuclei and evaluation of their binding energies via the double yield ratio // Eur. Phys. J. - 2019. - Vol. - A55. 11. **Botvina A.**, Bleicher M., Buyukcizmeci N. Formation of hypernuclei in relativistic ion, hadron and lepton collisions // AIP Conference Proceedings. - 2019. - Vol. 2130. - P. 040007.

12. **Botvina A.**, Bleicher M., Buyukcizmeci N. Production of hypernuclei and properties of hyper-nuclear matter // Proceedings of the 18th International Conference on Strangeness in Quark Matter (SQM2019), 10-15 June 2019, Bari, Italy. - 2019. arXiv: 1911.04556.

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

2.1. Математические модели девозбуждения атомных ядер, включая гиперядра.

13. Assimakopoulou A., Souliotis G.A., Bonasera A., **Botvina A.**, Nicolis N.G., Veselsky M.. Microscopic description of proton-induced spallation reactions with the constrained molecular dynamics (CoMD) model // J. Phys. G: Nucl. Part. Phys. - 2019. - Vol. 46. - P. 075104.

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

14. Сидоркин С.Ф., Алексеев А.А., Коптелов Э.А., Кравчук Л.В., Фещенко А.В. Импульсные источники нейтронов ИЯИ РАН // Микросимпозиум «Синхротронные и нейтронные исследования и инфраструктура для их реализации» в рамках VII Европейской Конференции по рассеянию нейтронов ECNS-2019. 3-4 июля 2019 г. / НИЦ-КИ.- Санкт-Петербург, 2019 г. - Сборник материалов. - С. 699.

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

15. Pepelyshev Yu. N., Rogov A. D., and Sidorkin S. F. Theoretical Optimization of Neutron and Physical Characteristics of a Multiplying Pulsed Neutron Source Basedon a Proton Accelerator // Physics of Particles and Nuclei Letters. - 2019. - Vol. 16. - № 6. - P. 933–951.

16. Vinogradov A.V., Pepelyshev Yu. N., Rogov A. D., and Sidorkin S. F. Proton-Accelerator Driven High-Flux Pulsed Neutron Source for Beam Research // Physics of Particles and Nuclei Letters. - 2019. - Vol. 16. - № 6. - P. 952–966.

2.4. Измерение нейтронных сечений, установка ИНЕС на источнике РАДЭКС

17. Джилкибаев Р.М., Хлюстин Д.В. Исследование формы сигналов в Не счетчике при регистрации нейтронов» (авторы И.А. Васильев, Р.М. Джилкибаев, Д.В.

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

- 18. Литвин В.С., Ульянов В.А., Сыромятников В.Г., Бучный Д.А., Столяров А.А., Трунов Д.Н., Аксенов С.Н., Поташев С.И., Садыков Р.А. Первые рефлектометрические эксперименты на установке «ГОРИЗОНТ» на импульсном источнике нейтронов ИН-06 ИЯИ РАН // сборник научных трудов V международной конференции «Лазерные, плазменные исследования и технологии» ЛАПЛАЗ-2019 / НИЯУ МИФИ. Москва, 2019. часть 1, С. 115.
- 19. Литвин В.С., Ульянов В.А., Сыромятников В.Г., Бучный Д.А., Столяров А.А., Трунов Д.Н., Аксенов С.Н., Поташев С.И., В.Н. Марин, Чураков А.А., Литвиненко Е.И., Садыков Р.А. Исследование многослойных пленочных наноструктур на нейтронном рефлектометре-малоугловом спектрометре «ГОРИЗОНТ» // Пятый междисциплинарный научный форум с международным участием "Новые материалы и перспективные технологии" 30 октября 1 ноября 2019 г. / Москва, 2019. Сборник материалов. том. 1., С. 697.
- 20. Литвин В.С., Ульянов В.А., Сыромятников В.Г., Бучный Д.А., Столяров А.А., Трунов Д.Н., Аксенов С.Н., Поташев С.И., В.Н. Марин, Чураков А.А., Литвиненко Е.И., Садыков Р.А. Исследования МУРН на жаропрочных немагнитных сплавах и аттестация суперзеркал на нейтронном рефлектометре-малоугловом спектрометре «ГОРИЗОНТ» // Микросимпозиум «Синхротронные и нейтронные исследования и инфраструктура для их реализации» в рамках VII Европейской Конференции по рассеянию нейтронов ECNS-2019. 3-4 июля 2019 г. / НИЦ-КИ.- Санкт-Петербург, 2019 г. Сборник материалов.- С. 697.
- 21. Litvin V.S., Ulyanov V.A., Syromyatnikov V.G., Buchnyi D.A., Trunov D.N., Axenov S.N., Potachev S.I., Sadykov R.A. Neutron reflectometry at spallation neutron source IN-06 of INR RAS // The book of abstract of VII European Conference on Neutron Scattering (ECNS 2019), Jun 30- Jul 5 2019 / NRC-KI.- Saint-Petersburg, Russia, 2019. - P. 489.
- 22. Бучный Д.А., Литвин В.С., Столяров А.А., Ульянов В.А., Сыромятников В.Г., Садыков Р. А. Аттестация нейтронных суперзеркал на нейтронном рефлектометре "Горизонт" (импульсный источник нейтронов ИН-06 РАН) // 62-ая научная конференция МФТИ, 18-23 ноября 2019 г. / МФТИ.- Долгопрудный, 2019.

23. Бучный Д.А., Литвин В.С., Столяров А.А., Ульянов В.А., Сыромятников В.Г., Садыков Р. А. Тестирование нейтронных суперзеркал и жаропрочных сплавов на нейтронном рефлектометре «Горизонт» на импульсном источнике ИН-06 // XVI Курчатовская междисциплинарная молодежная научная школа, 2 - 5 декабря 2019 г.- НИЦ-КИ.- г. Москва, 2019.

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

4.2. Исследование материалов при высоких давлениях и низких температурах

- Zhao Xiao-Miao, Liu Han-yu, Goncharov A.F., Zhao Zhi-Wei, Struzhkin V.V., Mao Ho-Kwang, Gavriliuk A.G., Chenld Xiao-Jia. Pressure effect on the electronic, structural, and vibrational properties of layered 2H-MoTe₂ // Phys. Rev. B. 2019. Vol. 99. № 2. P. 024111.
- 25. Fu S., Yang J., Karato Shun-Ichiro, Vasiliev A., Presniakov M.Yu., Gavrilliuk A.G.,
 Ivanova A.G., Hauri E.H., Okuchi T., Narangoo Purevjav, Lin Jung-Fu. Water Concentration in Single-Crystal (Al,Fe) Bearing Bridgmanite Grown From the Hydrous Melt: Implications for Dehydration Melting at the Topmost Lower Mantle // Geophysical Research Letters. 2019. Vol. 46. № 17-18. P. 10346-10357.
- Lyubutin I.S., Gavriliuk A.G., Andryushin N.D., PavlovskiyM.S., Zinenko V.I.,.
 Lyubutina M.V, Troyan I.A., Smirnova E.S. Pressure-induced structural transition to the polar phase in GdFe₃(BO₃)₄ // Crystal Growth & Design. 2019. Vol. 19. № 12. P. 6935-6944.
- 27. Troyan I.A., Semenok D.V., Kvashnin A.G., Ivanova A.G., Prakapenka V.B., Greenberg E., Gavriliuk A.G., Lyubutin I.S., Struzhkin V.V., Oganov A.R. Synthesis and Superconductivity of Yttrium Hexahydride Im3 m YH₆ // arXiv:1908.01534 [cond-mat.supr-con]. 2019. URL: <u>https://arxiv.org/abs/1908.01534</u>

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

- 28. Соменков В.А., Глазков В.П., Эм В.Т., Гуреев А.И., Мурашев М.М., Садыков Р.А., Аксенов С.Н., Трунов Д.Н., Столяров А.А., Алексеев А.А., Кравчук Л.В. Установка для комплексной радиационной диагностики "ДРАКОН" // Поверхность. Рентгеновские, синхротронные и нейтронные исследования. - 2019. - № 9. - С. 93-99
- 29. Trunov D., Marin V., Glazkov V., Altynbayev E., Sadykov R., Axenov S., Multichannel scintillation neutron detector for microsample research under high-pressure // The book of abstract of VII European Conference on Neutron Scattering (ECNS 2019), Jun 30- Jul 5 2019 / NRC-KI.- Saint-Petersburg, Russia, 2019. P.530

5.4 Развитие новых методов исследования фундаментальных взаимодействий при низких энергиях нейтронов».

30. Kuznetsov V.L, Kuznetsova E.V., Sedyshev P.V. The measurement of the neutron beam background of 1-st channel of the IBR-2 by means of transmission method. // Dubna, June 16-20, 2019. ISINN-27 (XXVII International Seminar on Interaction of Neutrons with Nuclei)

31. Kuznetsov V.L, Kuznetsova E.V., Sedyshev P.V. and Sirotin A.P. Investigation of the Characteristics of the Neutron Beam of the First Channel of the IBR-2 Reactor. // Journal of surface investigation: X-ray, Synchrotron and Neutron Techniques. - 2019. - Vol. 13. - No. 5. - P. 894-897.

32. Zeinalov Sh., Kuznetsov V., Kuznetsova E., Sedyshev P. Measurement of time-of-flight transmission spectra by the current method. // Dubna, June 16-20, 2019. ISINN-27 (XXVII International Seminar on Interaction of Neutrons with Nuclei

5.5. Создание интенсивного W-Be-фотонейтронного источника

33. Зуев С.В., Конобеевский Е.С., Мордовской М.В., Пономарев В.Н., Солодухов Г.В., Афонин А.А. Исследование характеристик выведенного пучка фотонейтронного источника Института ядерных исследований РАН // Физика элементарных частиц и атомного ядра. – 2019. – Т. 50. – Вып. 5. – С. 733-738.

34. Афонин А.А., Зуев С.В., Конобеевский Е.С. Изучение спектра тепловых нейтронов фотонейтронного W–Ве-источника ИЯИ РАН // Известия РАН. Серия физическая. – 2019. – Т. 83. – № 4. – С. 491-494.

35. 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 // Известия РАН. Серия физическая. – 2020. (в печати)

Potashev S., Burmistrov Yu., Zuyev S., Karaevsky S., Konobeevski E., Razin V., Afonin A. A four-layer gaseous detector allowing to measure the energy of charged particles // Journal of Physics: Conference Series. – 2019. – V. 1390. – P. 012120.

37. Поташев С.И., Афонин А.А., Бурмистров Ю.М., Драчев А.И., Зуев С.В., Караевский С.Х., Каспаров А.А., Конобеевский Е.С., Мешков И.В., Пономарев В.Н., Разин В.И., Солодухов Г.В. Измерение энергии заряженных частиц по ионизационным потерям в многослойном газовом детекторе // Известия РАН. Серия физическая. – 2020. (в печати) 38. Afonin A.A., Konobeevski E.S., Mordovskoy M.V., Ponomarev V.N., Solodukhov G.V., Zuyev S.V. Studying the distribution of thermal neutrons from the neutron channel of the W-Be photoneutron source of INR RAS // LXIX International Conference "NUCLEUS-2019" on Nuclear Spectroscopy and Nuclear Structure, Dubna, Russia, 1–5 July 2019. Book of Abstracts. – 2019. – P. 351.

39. Potashev S.I., Burmistrov Yu.M., Zuyev S.V., Karaevsky S.Kh., Kasparov A.A., Konobeevski E.S., Razin V.I., Afonin A.A. / Identification and energy measuring of charged particles using ionization loss in multiple layer gaseous detector // LXIX International Conference "NUCLEUS-2019" on Nuclear Spectroscopy and Nuclear Structure, Dubna, Russia, 1–5 July 2019. Book of Abstracts. – 2019. – P. 87.

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

Раздел 5.5. Создание интенсивного W-Ве-фотонейтронного источника

- Андреев А. В., Бурмистров Ю. М., Зуев С. В., Е. С. Конобеевский, М. В. Мордовской,
 В. Г. Недорезов / Возможности определения микропримесей в материалах на измерительно-активационном комплексе на базе фотонейтронного источника // Известия РАН. Серия физическая, 2017, т. 81, № 6, с. 824-827.
- Зуев С. В., Конобеевский Е. С., Мордовской М. В., Пономарев В. Н., Солодухов Г.В., Афонин А. А. / Исследование характеристик выведенного пучка фотонейтронного источника Института ядерных исследований РАН // Физика элементарных частиц и атомного ядра, 2019, т. 50, вып. 5, с. 733-738.
- Андреев А. В., Бурмистров Ю. М., Зуев С. В., Конобеевский Е. С., Мордовской М. В., Фирсов В. И. Низкофоновый гамма спектрометр с защитой на антисовпадениях от космического излучения // Ядерная физика и инжиниринг, 2016, т. 4, с. 879-882.