

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 2019 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 2018 год)

Руководитель НИР,
д.ф.-м.н

Э.А. Коптелов

«31» января 2019 г.

Москва 2019 г.

СПИСОК ИСПОЛНИТЕЛЕЙ

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



31.01.2019

подпись, дата

Э.А. Коптелов
(все разделы)

Исполнитель, Зав. лаб.,
д.ф.-м.н.



31.01.2019

подпись, дата

Э.А. Коптелов
(все разделы)

РЕФЕРАТ

Отчёт содержит: 40 с., 19 рис., 0 табл.

Ключевые слова: фотон, нейтрон, ускоритель электронов

В отчёте представлены результаты фундаментальных и прикладных работ, проведённых по государственному заданию в соответствии с планом научных исследований ИЯИ РАН на 2018 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 импульсных источников нейтронов в ИЯИ РАН».

Подзадачи, входящие в работы по программе фундаментальных научных исследований:

1.1. Развитие Нейтронного комплекса ИЯИ РАН, приборного парка и средств математического моделирования для исследований по физике деления, нейтрон-ядерных взаимодействий.

Проведено исследование характеристик импульсного нейтронного источника «ИН-06» на одной из пролётных баз, в зависимости от длительности и величины импульсного тока протонного пучка ускорителя.

1.2. Модернизация детекторной системы установки «Геркулес» на импульсном источнике ИН-06.

Установка «Геркулес» предназначена для исследований методом нейтронной дифракции образцов под давлением *in situ*. Проводится оснащение установки нейтронными детекторами нового типа с использованием твердотельных фотоумножителей и увеличение телесного угла, охватываемого детекторами. Создание герметичного безопасного бокса для наводораживания и нейтронных исследований. Исследование структуры образцов клатратов под давлением газов до 10 кбар.

1.3. Выполнение монтажно-пусковых работ и ввод в работу установки для исследований образцов с помощью метода нейтронной радиографии и томографии.

На импульсном источнике ИН-06 создается установка для нейтронной радиографии и томографии, которая позволит проводить измерения по времяпролётной методике, т. е. Получать серию изображений при различных длинах волн. На пучках источника были успешно получены радиографические изображения тестовых образцов.

1.4. Пуск мониторингового 2х-координатного газового детектора на установке Горизонт.

Благодаря оснащению нейтронного рефлектометра-малоуглового спектрометра «Горизонт» монитором нейтронного пучка появилась возможность исследовать структуру наноматериалов методом малоуглового рассеяния нейтронов, а также измерять абсолютный коэффициент отражения нейтронов от пленочных образцов. Последнее необходимо для определения качества нейтронных суперзеркал, которые изготавливаются для оснащения нейтронографических установок реактора «ПИК».

1.5. Создание и развитие нейтронных детекторных кольцевых систем на основе сцинтилляторов.

Установка «Кристалл» была оснащена кольцевыми детекторами нейтронов на основе сцинтилляторов. Такой детектор может сразу регистрировать все кольцо Шеррера либо серию рефлексов монокристалла под одним углом рассеяния 2θ .

1.6. Создание условий для исследования с применением низкотемпературных устройств и систем высокого давления.

Разработана и изготовлена компактная зажимная ячейка высокого давления типа поршень-цилиндр для спектроскопии малоуглового рассеяния нейтронов и нейтронного спинового эха с давлением до 1,5 ГПа (на 5 мм образцах).

1.7. Развитие экспериментальной техники для исследования материалов тепловыми и эпитепловыми нейтронами. Разработка спектрометров неупругого рассеяния нейтронов. Разработка основных узлов времяпролетных спектрометров прямой и обратной геометрии на источнике нейтронов ИН-06. Разработка спектрометра на эпитепловых нейтронах на импульсном источнике РАДЭКС. Разработка основных узлов дифрактометра на эпитепловых нейтронах на источнике нейтронов ИН-06. Разработка первой очереди низкотемпературной нейтронографической установки с использованием новых твердотельных детекторов на импульсном источнике РАДЭКС.

На нейтронных источниках «РАДЭКС» и «ИН-06» создаются спектрометры неупругого рассеяния и дифрактометры на эпитепловых нейтронах. Измерены спектры нейтронов на всех горизонтальных каналах источника «РАДЭКС». Получены диффрактограммы тестового образца, из которых сделаны оценки разрешающей способности дифрактометров на 20-ти и 50-метровых пролетных базах источника.

1.8. Исследования структур перспективных материалов.

Использование методов рассеяния нейтронов, рентгеновского и гамма излучения для исследования структуры и динамики конденсированных сред.

1.8.1. Исследование новых наночастиц - скирмионов в MnSi под давлением и низких температурах 4-20 К совместно с ILL(France).

Разработана и изготовлена компактная зажимная ячейка высокого давления для спектроскопии малоуглового рассеяния нейтронов и нейтронного спинового эха (NSE), которая может создавать давление до 1,5 ГПа. С помощью этой ячейки исследованы образцы монокристаллического MnSi.

1.8.2. Исследование физических свойств, особенностей структуры и кинетики отжига немагнитного сплава NiCrAl.

Структура в субмикронном масштабе и кинетика упрочняющего отжига немагнитного сплава NiCrAl были исследованы на двухкристальном нейтронном спектрометре, совместно с НИЦ Курчатовский институт. Установлено, что упрочняющий отжиг приводит к измельчению частиц фаз сплава.

1.8.3. Анализ структурных свойств, фазового состава высокотвердых сплавов методами нейтронной и рентгеновской дифракции.

Методами нейтронной и рентгеновской дифракции исследована структура и фазовый состав сплава MoTiC в зависимости от соотношения компонентов.

1.8.4. Исследования особенностей кристаллической структуры, физических свойств и фазового состава магнитных соединений.

Методом синхротронной мёссбауэровской спектроскопии (NFS) была исследована электронная и магнитная структура элементного железа (Fe-57) в широком диапазоне температур 10-300 К и давлений 50-240 ГПа. Установлено, что железо в данном диапазоне давлений является диамагнетиком. Этот результат важен для понимания магнетизма земли.

1.8.5. Исследование структурных, магнитных и электронных свойств в соединениях переходных металлов под давлением. Мёссбауэровские исследования магнитных свойств функциональных материалов при низких температурах.

Была исследована природа изменения структурных свойств в области перехода изолятор-металл в NiO. Установлено, что и в гидростатических условиях имеется скачок

объёма в области близкой к переходу изолятор-метал. Скачок объёма составляет порядка 1.5%.

1.9. Расчётно-исследовательские работы по размножающим мишеням на основе Нептуния 237 – Плутония 239.

Цель: Расчетно-теоретическое обоснование конфигураций нейтронных мишеней spallation-типа. Математическое моделирование процессов, инициированных пучком протонов линейного ускорителя в установках Нейтронного комплекса ИЯИ, с целью уточнения и улучшения параметров установок, планирования новых экспериментов и приложений.

Ведутся расчетно-аналитические работы по поиску оптимальной конфигурации комбинированной мишени с высоким выходом нейтронов на основе нептуния-237 и плутония-239 с целью компенсации увеличения объема мишени на основе только нептуния-237. Рассматриваются основные физико-технические особенности этих мишеней.

1.10. Исследования нейтрон-ядерных взаимодействий методом времени пролёта на различных установках.

На импульсном источнике «РАДЭКС» планируется создание установки для исследования нейтрон-ядерных взаимодействий методом времени пролета. На импульсном реакторе ИБР-2М проведено тестирование детекторов будущей установки.

1.11. Подготовка эксперимента по прямому измерению нейтрон-нейтронного рассеяния.

На импульсном источнике «РАДЭКС» исследована форма и длительность нейтронной вспышки при коротком протонном импульсе. Исследован гамма-фон. Были разработаны математические методы обработки экспериментальных данных на установках по времени пролёта.

2. Задача «Разработка источника медленных нейтронов на базе ЛУЭ-8».

Цель работы: Разработка источника медленных нейтронов на базе ЛУЭ-8 МэВ ИЯИ РАН. Исследование фотонейтронных реакций, в том числе с образованием запаздывающих нейтронов и гамма – квантов в области энергий от порога до 10 МэВ. Изучение возможности определения микропримесей в материалах на измерительно-активационном комплексе на базе фотонейтронного источника. Приведены новые результаты, полученные в 2018 году в лаборатории фотоядерных реакций по созданию и использованию источника

тепловых нейтронов на базе ЛУЭ-8 ИЯИ РАН. На этой основе развивались прикладные исследования с использованием фотоядерных методов для создания систем безопасности, детектирования взрывчатых веществ и делящихся материалов, медицинской диагностики и др. Основное внимание уделено разработке метода наведенной активности для определения микропримесей в различных материалах.

СОДЕРЖАНИЕ

| | |
|---|----|
| РЕФЕРАТ | 3 |
| СОДЕРЖАНИЕ | 8 |
| ВВЕДЕНИЕ | 10 |
| 1. Развитие импульсных источников нейтронов в ИЯИ РАН | 13 |
| 1.1. Развитие Нейтронного комплекса ИЯИ РАН, приборного парка и средств математического моделирования для исследований по физике деления, нейтрон-ядерных взаимодействий | 13 |
| 1.2. Модернизация детекторной системы установки Геркулес на импульсном источнике ИН-06. | 17 |
| 1.3. Выполнение монтажно-пусковых работ и ввод в работу установки для исследований образцов с помощью метода нейтронной радиографии и томографии..... | 18 |
| 1.4. Пуск мониторингового 2х-координатного газового детектора на установке Горизонт..... | 18 |
| 1.5. Создание и развитие нейтронных детекторных кольцевых систем на основе сцинтилляторов | 21 |
| 1.6. Создание условий для исследования с применением низкотемпературных устройств и систем высокого давления | 22 |
| 1.7. Развитие экспериментальной техники для исследования материалов тепловыми и эпитепловыми нейтронами. Разработка спектрометров неупругого рассеяния нейтронов. Разработка основных узлов времяпролетных спектрометров прямой и обратной геометрии на источнике нейтронов ИН-06. Разработка спектрометра на эпитепловых нейтронах на импульсном источнике РАДЭКС. Разработка основных узлов дифрактометра на эпитепловых нейтронах на источнике нейтронов ИН-06. Разработка первой очереди низкотемпературной нейтронографической установки с использованием новых твердотельных детекторов на импульсном источнике РАДЭКС..... | 23 |
| 1.8. Исследования структур перспективных материалов | 25 |
| 1.8.1. Исследование новых наночастиц - скирмионов в MnSi под давлением, совместно с ILL (France)..... | 25 |
| 1.8.2. Исследование физических свойств, особенностей структуры и кинетики отжига немагнитного сплава NiCrAl | 26 |
| 1.8.3. Анализ структурных свойств, фазового состава высокотвердых сплавов методами нейтронной и рентгеновской дифракции. | 27 |
| 1.8.4. Исследования особенностей кристаллической структуры, физических свойств и фазового состава магнитных соединений совместно с ИК РАН | 28 |
| 1.8.5. Исследование структурных, магнитных и электронных свойств в соединениях переходных металлов под давлением. Мёссбауэровские исследования магнитных свойств функциональных материалов при низких температурах..... | 30 |

| | |
|--|----|
| 1.9. Расчётно-исследовательские работы по размножающим мишеням на основе Нептуния-237 и Плутония-239. | 31 |
| 1.10. Исследования нейтрон-ядерных взаимодействий методом времени пролёта на различных установках. | 31 |
| 1.11. Подготовка эксперимента по прямому измерению нейтрон-нейтронного рассеяния. | 31 |
| 2. Разработка источника медленных нейтронов на базе ЛУЭ-8 | 34 |
| ЗАКЛЮЧЕНИЕ..... | 35 |
| ПУБЛИКАЦИИ | 37 |

ВВЕДЕНИЕ

1. Задача «Развитие импульсных источников нейтронов в ИЯИ РАН»

Интерес к получению нейтронных данных остается значительным, связанным в основном с потребностью данных при разработке ядерных реакторов нового поколения. Поэтому и получение нейтронных данных, их анализ и систематизация остаются актуальными.

В рамках целевой программы по проекту РАДЭКС проводились работы, связанные с исследованием и улучшением технических и эксплуатационных характеристик на нейтронном времяпролетном спектрометре НСВП-ТРОНС ОЭФ ИЯИ РАН. На источнике планируется проводить прямые измерения n - n -рассеяния. Были разработаны математические методы обработки экспериментальных данных на установках по времени пролёта, таких как НСВП-ТРОНС ИЯИ РАН и ИБР-2М ОИЯИ, позволяющие повысить их разрешающую способность и эффективность.

Для более эффективного использования пучкового времени на нейтронных источниках «ИН-06» и «РАДЭКС» установки должны иметь высокую эффективность, надежность и, как правило, большой телесный угол. В настоящее время ведется оснащение наших установок новыми сцинтилляционными детекторами с использованием твердотельных фотоумножителей. Достоинства этих детекторов по сравнению с традиционными газонаполненными состоит в том, что они не требуют высокого напряжения и дорогостоящего гелия-3. Также для многих задач необходим помимо детекторов еще и монитор прямого пучка. В частности, он необходим для малоуглового рассеяния и для нейтронной рефлектометрии, если стоит задача получения абсолютного коэффициента отражения нейтронов, например для аттестации нейтронных зеркал. Нейтронный рефлектометр-малоугловой спектрометр «Горизонт» был оснащен таким монитором. Для монокристалльного дифрактометра «Кристалл» изготовлены и протестированы кольцевые детекторы нейтронов. Эти детекторы могут перемещаться с помощью автоматизированных подвижек, и, следовательно, имеется возможность детектировать рефлексы практически с любыми углами рассеяния. Также в нейтронных экспериментах часто требуется создание условий на образце: высоких давлений, высоких или низких температур. Это нужно, в частности, для исследования фазовых переходов. Для этих целей в ИЯИ РАН имеются гидравлические преса, в частности на установке «Геркулес» и разрабатываются специализированные ячейки для создания высокого давления на образце. Кроме того, данная установка снабжена герметичным сейфом, что позволяет проводить исследования с газами, в частности по наводораживанию образцов для водородной энергетики. Подготовлено оборудование для исследования структуры клатратов.

Исследования структур перспективных материалов.

Одним из перспективных направлений развития микроэлектроники является спинтроника. В некоторых соединениях полупроводников с металлами, например MgSi обнаружен новый вид наночастиц - скирмионы. Исследование фазовых переходов в этих веществах, вызванных высоким давлением, помогает понять природу скирмионов.

Исследование физических свойств, особенностей структуры и кинетики отжига немагнитного сплава NiCrAl. Данный сплав представляет интерес, т. к. является немагнитным и обладает твердостью стали (до 60 ед. по Роквеллу). Закаленные образцы сплава мягкие, а отжиг при температурах 450-650° С приводит к упрочнению. Сплав применяется нами для изготовления камер высокого давления системы поршень-цилиндр, которые успешно применялись для магнитных измерений.

Исследование магнитных свойств железа и его соединений при высоких давлениях представляет интерес, т. к. позволяет смоделировать процессы внутри планет, в частности понять природу земного магнетизма. Применение техники высоких давлений для изучения геофизики и особенностей внутреннего строения и динамики Земли, и других планет, представляется просто очевидным и единственно возможным экспериментальным методом. Также представляет интерес фазовый состав и влияние термообработки и концентрации компонентов на структуру высокопрочных сплавов MoTiC и MoTiCW.

Исследование структурных, магнитных и электронных свойств в соединениях переходных металлов под давлением. Мёссбауэровские исследования магнитных свойств функциональных материалов при низких температурах.

Изучение природы фазовых переходов в сильно коррелированных оксидах переходных металлов, их типы, их взаимосвязь, последовательность и взаимовлияние (т.е. изучение различных сценариев фазовых превращений) может прояснить ряд фундаментальных проблем физики твёрдого тела. В том числе ответить на вопросы, связанные с природой таких важных систем как ВТСП, систем с гигантским магнетосопротивлением, спинтронных материалов, мультиферроиков, а также кристаллов важных для понимания физики Земли. Изучение природы электронных и фазовых переходов при высоком давлении вообще имеет фундаментальную ценность как метод плавного изменения межионных расстояний и углов химсвязей в кристалле, что даёт возможность тонкой подстройки структуры к оптимальным или рекордным значениям параметров. Таких, например, параметров, как величина T_C в ВТСП, величина отклика в кристалле с гигантским магнетосопротивлением или восприимчивость в спинтронном материале или мультиферроике. Поэтому поиск новых материалов с рекордными

свойствами в области близкой к фазовому или электронному переходу с помощью техники высоких давлений представляется актуальной задачей.

Расчётно-исследовательские работы по размножающим мишеням на основе Нептуния 237 – Плутония 239. Данные работы представляют интерес, т. к. размножающие мишени имеют большую работу выхода.

2. Задача «Разработка источника медленных нейтронов на базе ЛУЭ-8».

За последние годы активационный анализ микропримесей активно развивается в мире, обеспечивая решение научных, экологических и социальных проблем. В лаборатории фотоядерных исследований ИЯИ РАН на базе линейного ускорителя электронов ЛУЭ-8 МЭВ ИЯИ РАН выполнен ряд работ в рамках указанной тематики.

1. Развитие импульсных источников нейтронов в ИЯИ РАН

1.1. Развитие Нейтронного комплекса ИЯИ РАН, приборного парка и средств математического моделирования для исследований по физике деления, нейтрон-ядерных взаимодействий

1) Проведено исследование характеристик импульсного нейтронного источника ИН-06 на одной из пролётных баз, в зависимости от длительности и величины импульсного тока протонного пучка ускорителя. Получены спектры прямых нейтронных пучков канала установки «Кристалл», расположенной на импульсном нейтронном источнике ИН-06. Исследования проводились для протонного пучка длительностью 60 мкс и 120 мкс. Использовался счётчик СНМ-20, с газом ВF₃, обогащённым бором. Использовался время-пролётный метод спектрометрии нейтронов. Проведено сравнение потоков нейтронов, вызванных протонным пучком с различными временными ширинами.

Получен гамма-спектр от мишенного узла в нейтронном канале физической установки "Кристалл" после окончания работы протонного ускорителя. На Рис.1 приводится тепловая часть спектра прямого пучка нейтронов, для различных длительностей протонного пучка, а на Рис.2 начальная часть, для различных длительностей протонного пучка, соответствующая быстрым нейтронам. На рис.3 приводится гамма-спектр от мишенного узла (замедлителя) нейтронного источника ИН-06.

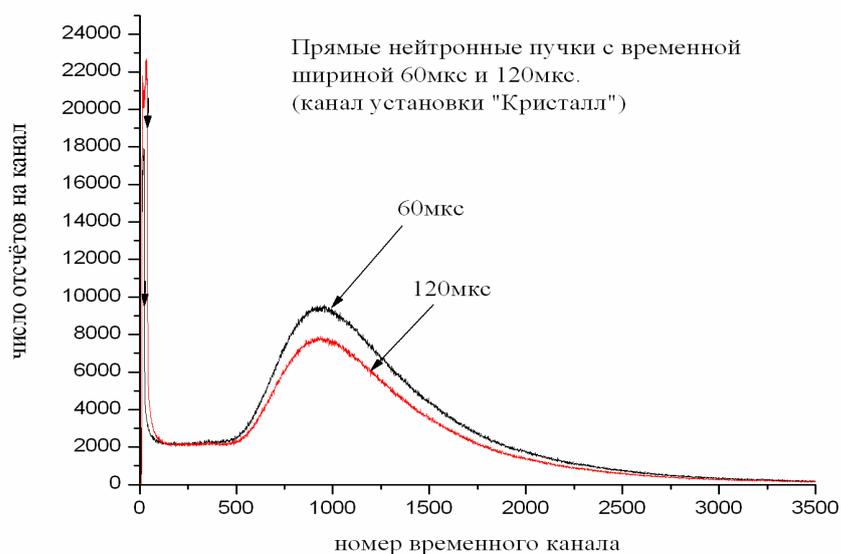


Рисунок 1. Тепловая часть спектра прямого пучка нейтронов с длительностью протонного импульса 60 мкс и 120 мкс

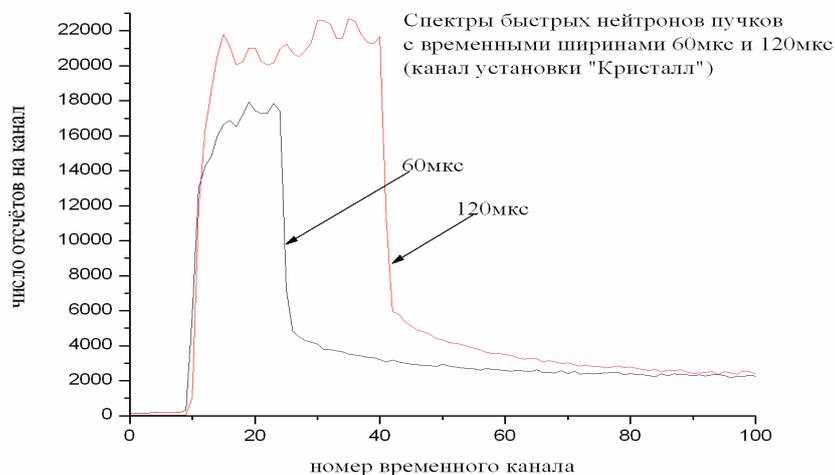


Рисунок 2. Начальная часть спектра прямого пучка нейтронов для длительностей протонного импульса 60 мкс и 120 мкс

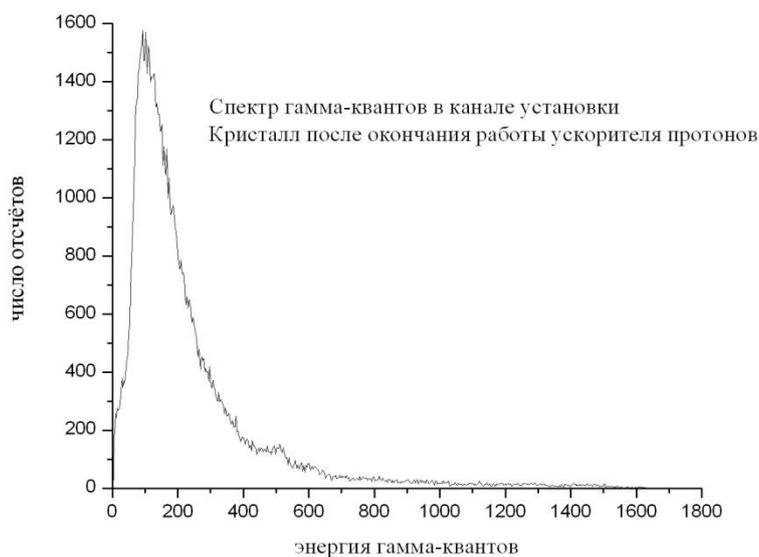


Рисунок 3. Спектр гамма-квантов от мишенного устройства ИН-06 в нейтронном канале установки "Кристалл".

2) Разработка математической модели спектрометра СВЗ-100 с использованием функции отклика

Разработана математическая (компьютерная) модель нейтронного спектрометра СВЗ-100 с функцией отклика представляющую собой прямоугольную матрицу (1801x1070). Проведено сравнение реального спектра, полученного на экспериментальной физической установке, со спектром, полученным с помощью виртуального спектрометра, см. Рис.4.

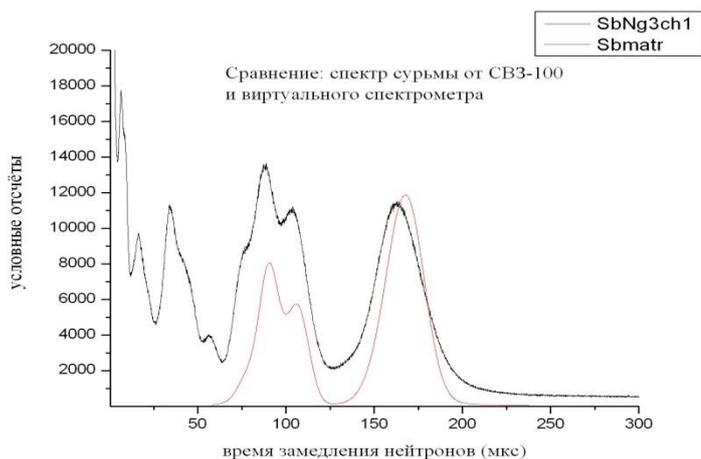


Рисунок 4. Сравнение спектров захвата нейтронов природной смесью изотопов сурьмы. Реальный спектрометр и виртуальный

3) Развитие и применение транспортного кода *SHIELD* как инструмента математического моделирования взаимодействия частиц с веществом, включая развитие моделей ядерных реакций.

Моделирование потоков нуклонов и активации в экспериментальных установках ИЯИ с целью их оптимизации. Исследование образования ядерных фрагментов и гиперфрагментов в реакциях с тяжёлыми ионами промежуточных и высоких энергий.

Адрон-ядерные и ядро-ядерные взаимодействия

Продолжалось развитие статистических и динамических моделей адрон-ядерных и ядро-ядерных взаимодействий, описывающих рождение частиц и дезинтеграцию возбужденных ядер, а также применение этих моделей в фундаментальных и прикладных исследованиях.

В работе [7] рассчитаны дважды дифференциальные сечения образования пионов в протон-ядерных и ядро-ядерных реакциях при высоких энергиях. Наблюдается хорошее согласие расчета с экспериментом. Эти данные важны для оценки влияния космического

излучения на экипажи космических кораблей, т.к. вторичные заряженные пионы вносят не менее 10% в поглощенную дозу.

Работы [8,9] посвящены разным аспектам изучения протон-ядерных и ядро-ядерных взаимодействий как при низких, так и при высоких энергиях.

Особое внимание уделялось актуальному направлению - исследованию роли странных частиц и гиперонов в ядро-ядерных взаимодействиях. В работах [10-15] изучается образование и свойства гиперядерной материи в экстремальных условиях.

Взаимодействие частиц и ядер с веществом

В ИЯИ РАН создан и развивается оригинальный отечественный транспортный код SHIELD (<http://www.inr.ru/shield/>), предназначенный для моделирования взаимодействия адронов и ядер со сложными макроскопическими мишенями. Код SHIELD включает известные российские модели ядерных реакций, разработанные в ОИЯИ и ИЯИ РАН. В течение длительного времени код SHIELD с успехом применяется в контексте различных актуальных приложений и в фундаментальных исследованиях.

В работах [16,17] представлены результаты моделирования стенда для облучения электронных плат, созданного в ИЯИ РАН на пучке протонов линейного ускорителя. Полученные данные позволяют выбрать безопасные режимы эксплуатации стенда и оптимальные условия облучения. Изучение воздействия протонного облучения на радиоэлектронную аппаратуру представляет интерес для различных приложений.

В работе [18] дается расчетно-теоретическое обоснование конструкции дозиметра нейтронов высоких энергий на основе полиэтиленового замедлителя со свинцовой и кадмиевой вставками и ^3He -детектора тепловых нейтронов. Прибор предназначен для радиационного контроля полей нейтронов высокоэнергетических ускорителей, в частности вокруг ускорительного комплекса NICA. Прибор радикально дешевле зарубежных аналогов, но имеет близкую функцию чувствительности.

Медицинская версия кода SHIELD-HIT (Heavy Ion Therapy) широко применяется в исследованиях по адронной терапии в онкологии. За 2002-2017 годы опубликовано более 20 статей в реферируемых журналах. Международный проект SHIELD-HIT12A имеет свой интернет-сайт <http://www.shieldhit.org>. Программа распространяется в соответствии с коммерческой и некоммерческой лицензиями. В отчетном 2018 году было выдано четыре некоммерческие лицензии, копии имеются.

В последние годы активно обсуждается проект международной космической станции на окололунной орбите. В 2013-2017 годах в Москве проходило несколько рабочих совещаний с участием представителей РосКосмоса, НАСА, ЕКА и ряда российских институтов, включая ИЯИ. В отчетном 2018 году транспортный код SHIELD был адаптирован для задач радиационной защиты от галактических и солнечных космических лучей. Интервал энергий первичных и вторичных частиц включает 8 порядков, от 10 кэВ/н до 100 ГэВ/н, причем при низких энергиях сохраняется «терапевтическая» точность.

4) Радиационное материаловедение.

Классическая теория зарождения новой фазы в пересыщенных твердых растворах переработана с учетом макроскопических градиентов химических потенциалов и концентраций веществ в исходной фазе. Соответствующая статья “Account of Nucleus Emission in the Classical Treatment of Homogeneous Nucleation” с изложением переработанной теории направлена для публикации в журнале Physical Review E.

В рамках построения пространственно-неоднородной теории зарождения и эволюции вакансионных пор в облучаемых металлах создана математическая модель для анализа пространственно-неоднородного распухания вблизи границ металлических зерен. Соответствующие количественные оценки, сделанные исходя из сформулированной математической модели, показывают непротиворечивость модели имеющимся экспериментальным данным.

1.2. Модернизация детекторной системы установки Геркулес на импульсном источнике ИН-06.

В ЛНИ был изготовлен новый дифрактометр, состоящий из двух секторов по восемь твердотельных сцинтилляционных счетчиков тепловых нейтронов в каждом. Счетчик имеет размеры 120 x 15 x 4 мм и собственную эффективность 60%. Дифрактометр был размещен на установке «Геркулес». В сеансе в декабре 2018 года была проведена калибровка дифрактометра на порошке технического алмаза и проведен анализ сплавов, в том числе и жаропрочного сплава. Были проведены исследования грузочной способности сцинтилляционных счетчиков и чувствительности к гамма квантам как гелиевых счетчиков, так и сцинтилляционных счетчиков.

Произведен монтаж и тестирования многодетекторных секторов на основе сцинтиллятора установки «Геркулес». Он имеет в своем составе 2 сектора по 8 счетчиков в

каждом. Счетчик имеет размеры 120x15x4 мм³ и собственную эффективность 60%. Произведены тестовые измерения образцов Карбонадо. Были проведены исследования фазового состава образцов жаропрочных сплавов на основе Mo-Ti на установке «Геркулес». Были проведены исследования нагрузочной способности сцинтилляционные счётчиков и чувствительности к гамма квантам. Ведется обработка результатов. Была восстановлена герметизация гейсера установки, что позволяет проводить исследования с газами, в частности по наводораживанию образцов для водородной энергетики. Подготовлено оборудование для исследования структуры клатратов: ячейки высокого давления, изготовленные из специального сплава с нулевой матрицей, обладающего минимальным когерентным рассеянием.

1.3. Выполнение монтажно-пусковых работ и ввод в работу установки для исследований образцов с помощью метода нейтронной радиографии и томографии.

Завершается выполнение монтажно-пусковых работ и ввод в работу системы юстировки образца для проведения томографических экспериментов. Выполнен расчет параметров высокоскоростного детектора на основе сцинтилляционного экрана и CMOS-камеры. Ведутся работы по изготовлению детектора на основе этих расчетов и написание программного обеспечения для проведения томографических и радиографических экспериментов на источнике ИН-06.

1.4. Пуск мониторингового 2х-координатного газового детектора на установке Горизонт.

На установке «Горизонт» на импульсном источнике нейтронов ИН-06 был смонтирован и протестирован мониторинговый счетчик нейтронов, который в также может применяться как двухкоординатный монитор для получения профилей нейтронного пучка, в том числе в зависимости от длины волны. Монитор необходим для экспериментов по малоугловому рассеянию нейтронов, в которых необходимы абсолютные значения сечений, а также для рефлектометрии, если необходимо определить абсолютные значения коэффициента отражения нейтронов.

Последнее необходимо при тестировании нейтронных зеркал. Монитор устанавливается перед образцом, чтобы регистрировать интенсивность и спектр падающего на образец пучка, при этом 96% нейтронов проходит через монитор без рассеяний. Схема подключения мониторингового счетчика нейтронов приводится на Рис. 5.

Сигналы с многопроволочной пропорциональной камеры, заполненной смесью на основе Ar с добавлением ^3He , усиленные встроенными усилителями, поступают на дискриминатор, далее сформированные сигналы с стандарте NIM регистрируются время-цифровым преобразователем (ВЦП). Стартовым сигналом ВЦП служит синхроимпульс с линейного ускорителя, а стоповыми — сигналы с монитора.

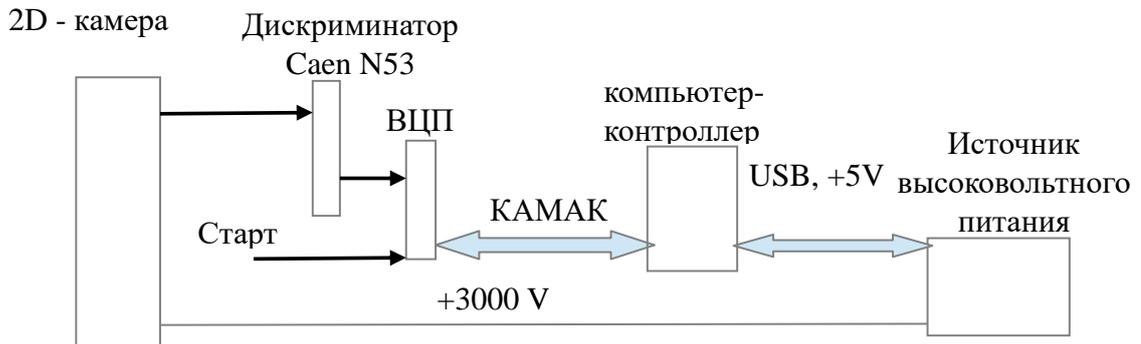


Рисунок 5. Схема нейтронного монитора на установке «Горизонт»

Спектр прямого пучка на установке «Горизонт», полученный с помощью данного монитора в сеансе в декабре 2018 г., приводится на Рис. 6. Следует отметить, что используемый в данной схеме источник высоковольтного питания (Мантигора HV6000p) вследствие недостатка конструкции оказался ненадежен - поэтому данный монитор не удалось использовать в тестировании нейтронных суперзеркал. Требуется заменить или усовершенствовать источник высоковольтного питания в данной схеме.

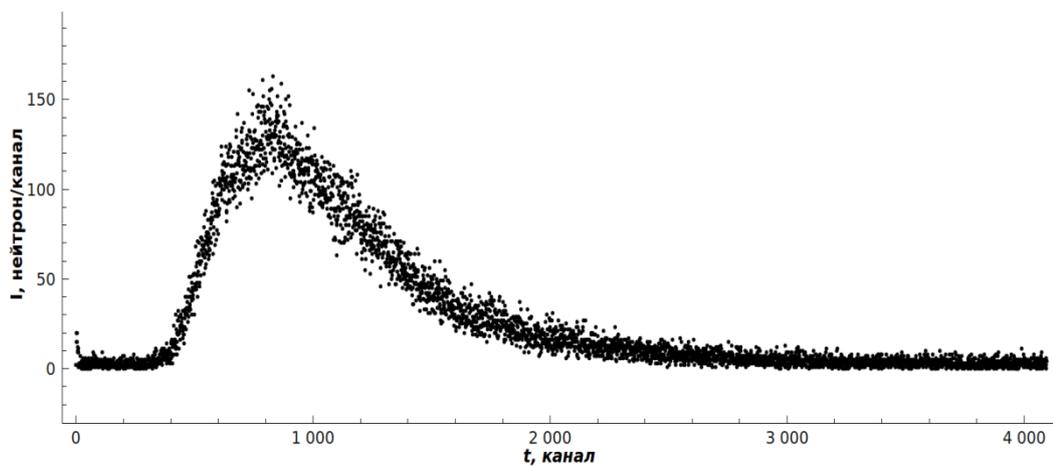


Рисунок 6. Спектр прямого пучка на установке «Горизонт»

Также на установке «Горизонт» в сеансе в декабре 2018 г с помощью двухкоординатного детектора нейтронов был измерен коэффициент отражения нейтронного суперзеркала (многослойное NiMo/Ti, $m=2$) методом нейтронной рефлектометрии (Рис. 7). Данные зеркала необходимы для создания нейтронных будущих установок реактора «ПИК».

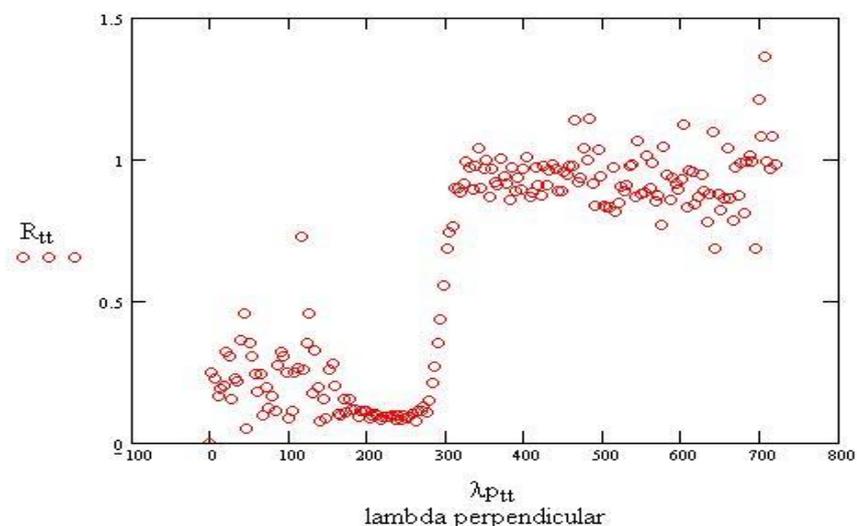


Рисунок 7. Коэффициент отражения нейтронов R (произвольные единицы) от суперзеркала NiMo/Ti ($m = 2$) как функция λ/θ (Å)

1.5. Создание и развитие нейтронных детекторных кольцевых систем на основе сцинтилляторов

На основе линейных сцинтилляционных детекторов, разработанных и изготовленных в ЛНИ ИЯИ РАН, был разработан кольцевой нейтронный детектор для времяпролетных дифрактометров с минимальными слепыми зонами [1]. В отличие от разработанного детектора, кольцевой детектор на основе газонаполненных пропорциональных счетчиков будет иметь до 25% слепых зон, так как данные счетчики имеют 15-25% слепых зон (согласно данным производителя). Для полного исключения слепых зон были разработаны нейтронные счетчики с трапециевидным световодом. Кольцевой детектор на основе трапециевидных счетчиков позволяет полностью исключить слепые зоны. (см. Рис. 8) [2-5]. На данную разработку получен патент [2], сделаны доклады [3-5].

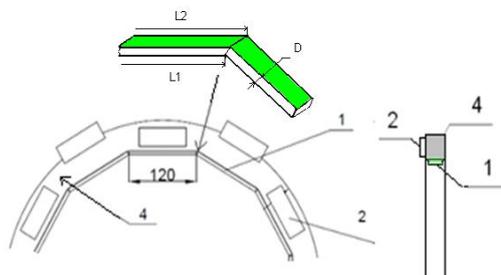


Рисунок 8. Схема кольцевого детектора нейтрона без слепых зон. 1 -линейные счетчики, 2 -усилители-дискриминаторы, 4 — каркас из борполиэтилена, обернутого кадмиевой фольгой

Ведется изготовление 2-х координатной системы позиционирования и юстировки нейтронных кольцевых детекторов.

1.6. Создание условий для исследования с применением низкотемпературных устройств и систем высокого давления

Разработана и изготовлена компактная зажимная ячейка высокого давления типа поршень-цилиндр для спектроскопии малоуглового рассеяния нейтронов (SANS) и нейтронного спинового эха (NSE). Ячейка может создавать давление на 5 мм образцах до 1,5 ГПа. Ячейка вмещает образцы объемом до 55 мм³ и имеет двухслойную геометрию: TiZr body (внешний слой) и aCuBe2 insert (внутренний слой), он немагнитный, дает достаточно низкий и ровный фон SANS с относительно хорошей передачей нейтронов и может использоваться в сочетании с поляризованными нейтронами. Его конструкция очень компактна и может быть использована внутри криомагнитов с диаметром отверстий более 30 мм.

Была создана крио-рефрижераторная установка для проведения мёссбауэровских экспериментов, в том числе и при высоких давлениях. На рисунке 2 приведена фотография данной установки.

1.7. Развитие экспериментальной техники для исследования материалов тепловыми и эпитепловыми нейтронами. Разработка спектрометров неупругого рассеяния нейтронов. Разработка основных узлов времяпролетных спектрометров прямой и обратной геометрии на источнике нейтронов ИН-06. Разработка спектрометра на эпитепловых нейтронах на импульсном источнике РАДЭКС. Разработка основных узлов дифрактометра на эпитепловых нейтронах на источнике нейтронов ИН-06. Разработка первой очереди низкотемпературной нейтронографической установки с использованием новых твердотельных детекторов на импульсном источнике РАДЭКС.

Спектр пучка нейтронов, падающих на образец, был измерен на всех трех горизонтальных каналах источника «РАДЭКС». Для регистрации прямого пучка использовался пропорциональный счетчик цилиндрической формы, наполненный газом ВF₃. Энергия максимума спектра в канале № 1 равна 1,1 Å, а в канале № 2 — 1,2 Å, т.е. эти значения близки друг к другу. Существенное отличие, как видно из графика (Рис. 9), проявляется в области малых длин волн. Канал № 1 имеет значительно меньшую долю быстрых и эпитепловых нейтронов, чем канал № 2. Это объясняется тем, что из канала № 1 "виден" только замедлитель, а из каналов № 2 и № 3 «видна» еще и область рождения нейтронов, и в эти каналы попадает большее количество незамедлившихся нейтронов. Спектры каналов № 2 и 3 одинаковы. Для исследований в области физики конденсированных сред и материаловедения предпочтительным является канал № 1, т.к. его спектр имеет большую долю тепловых нейтронов и при этом обогащен эпитепловыми нейтронами. Были проведены измерения с тестовыми образцами с использованием новых твердотельных сцинтилляционных детекторов нейтронов. Схема тестовых измерений приведена на Рис. 10. Сравнение новых твердотельных детекторов с гелиевыми счетчиками показало возможность их применения в дифрактометре на источнике «РАДЭКС». Кроме того, из дифрактограмм тестового образца карбонадо получены оценки разрешения дифрактометра при различных значениях времени пролета (Рис. 11). Разрешение, достигнутое на пролетной базе 20 м – 1,6-2,3 %. Результаты опубликованы в [6].

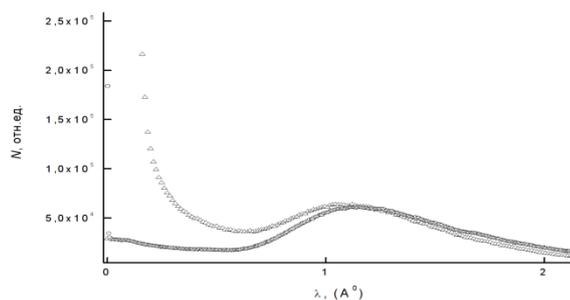


Рисунок 9. Спектр нейтронов прямых пучков источника «РАДЭКС», полученные на горизонтальном канале №1 (квадраты) и №2 (треугольники).

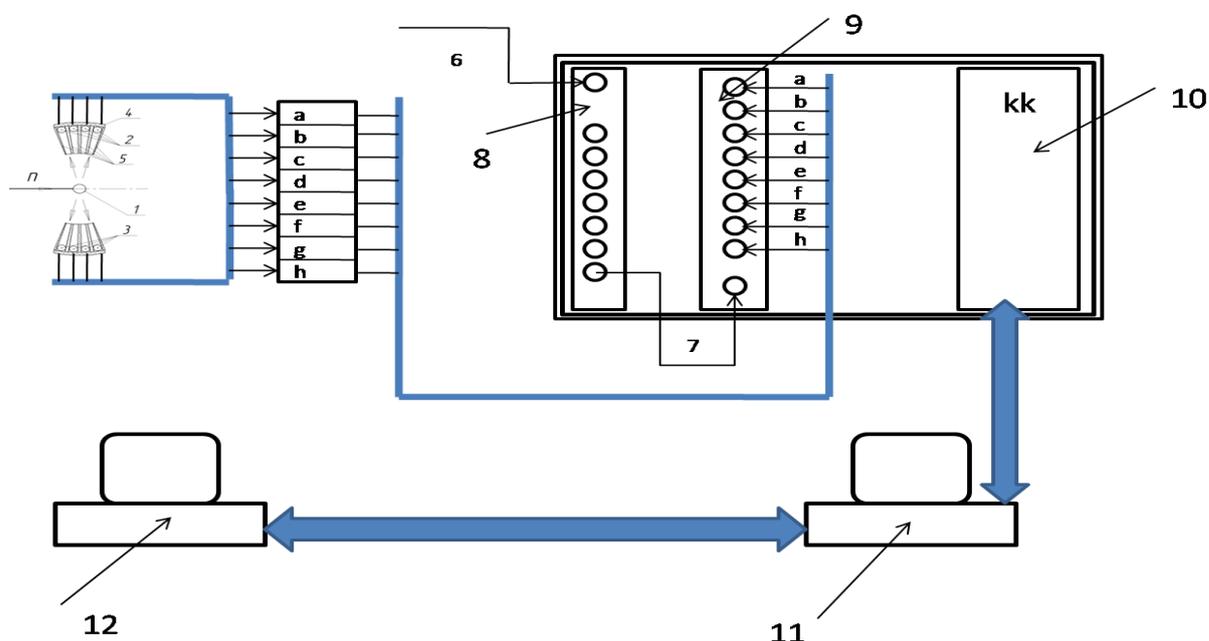


Рисунок 10. Схема дифракционного эксперимента на источнике «РАДЭКС». 1 — исследуемый образец, 2 — сцинтилляционные счетчики нейтронов, 3 — счетчики нейтронов, заполненные гелием-3, 4 — борполиэтиленовая защита детекторов, 5 — коллиматоры дифрактометра, 6 — синхроимпульс ускорителя, 7 — сигнал ворот от блока синхронизации, 8 — блок синхронизации, 9 – ВЦП с накоплением гистограмм, 10 — крейт - контроллер КАМАК, 11 — компьютер управления и сбора информации, 12 — компьютер для удаленного доступа.

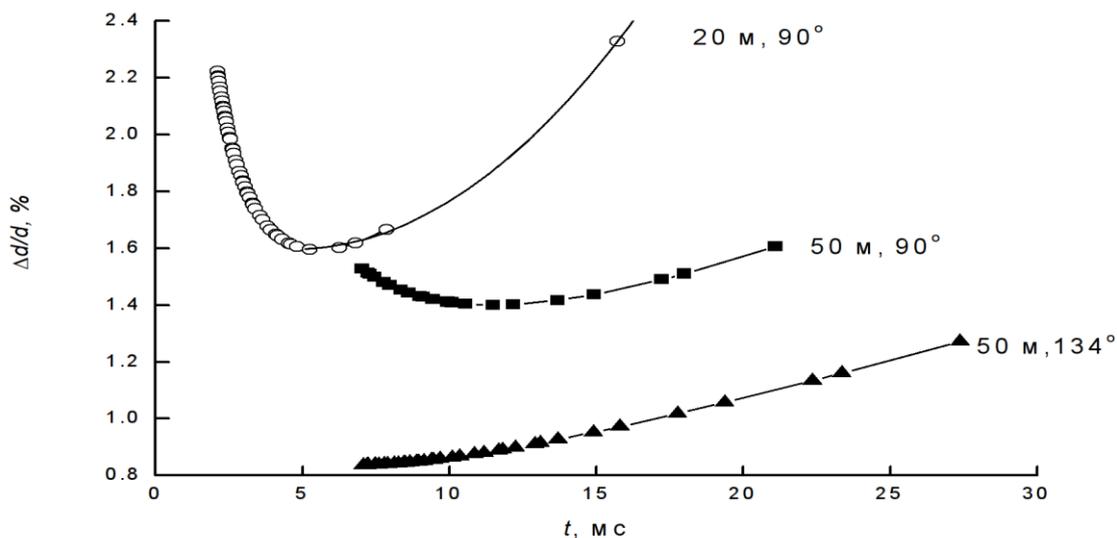


Рисунок 11. Зависимость разрешения дифрактометра 20-м пролетной базе, под углом 90° и на 50-м пролетной базе, под углами 90° и 134° от времени пролета.

1.8. Исследования структур перспективных материалов

Использование методов рассеяния нейтронов, рентгеновского и гамма-излучения для исследования структуры и динамики конденсированных сред. Анализ структурных свойств, фазового состава высокотвердых сплавов методами нейтронной и рентгеновской дифракции. Исследование структурных, магнитных и электронных свойств в соединениях переходных металлов под давлением. Мёссбауэровские исследования магнитных свойств функциональных материалов при низких температурах.

1.8.1. Исследование новых наночастиц - скирмионов в MnSi под давлением, совместно с ILL (France)

Было изготовлено устройство высокого давления и с помощью него были проведены исследования магнитных частиц и скирмионов. Была разработана и реализована компактная зажимная ячейка высокого давления типа поршень-цилиндр для спектроскопии малоуглового рассеяния нейтронов (SANS) и нейтронного спинового эха (NSE). Ячейка может создавать давление на 5 мм образцах до 1,5 ГПа. Он немагнитный, дает достаточно низкий и ровный фон SANS с относительно хорошей передачей нейтронов и может использоваться в сочетании с поляризованными нейтронами. Ячейка вмещает образцы объемом до 55 мм³ и имеет двухслойную геометрию: TiZr body (внешний слой) и aCuBe2 insert (внутренний слой). Его конструкция очень компактна и

может быть использована внутри криомагнитов с диаметром отверстий более 30 мм. Работа ячейки была протестирована с помощью серии экспериментов по рассеянию нейтронов на монокристаллическом MnSi. Результаты опубликованы в работе [24].

1.8.2. Исследование физических свойств, особенностей структуры и кинетики отжига немагнитного сплава NiCrAl

Изменения структуры сплава 40ХНЮ были исследованы с помощью нейтронного двухкристального спектрометра «Стоик» на реакторе «ИР-8» НИЦ Курчатовский институт. На Рис. 12 приводятся угловые распределения интенсивности нейтронов, прошедших через образец в двухкристальном эксперименте, полученные для образцов с различной термообработкой — после закалки, после 2-часового отжига при 450°С, а также после дополнительного 2-часового отжига при 500°С. Из сравнения этих кривых видно, что отжиг приводит к сужению пиков. Этот эффект можно объяснить измельчением микронеоднородностей — частиц фаз — до наноразмеров. Это предложение соответствует данным малоуглового рассеяния и электронной микроскопии и микродифракции.

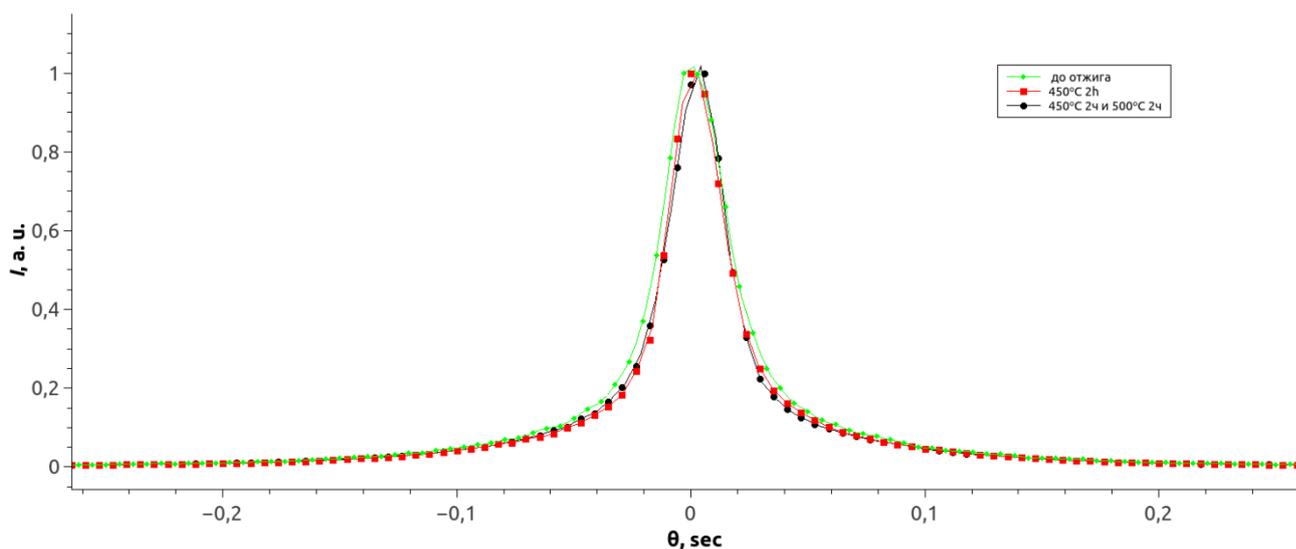


Рисунок 12. Угловые распределения интенсивности нейтронов, прошедших через образец в двухкристальном эксперименте, полученные для образцов с различной термообработкой

На 50-метровой пролетной базе импульсного источника «РАДЭКС» методом нейтронной дифракции исследована структура сплава 40ХНЮ в зависимости от термообработки. Обнаружено уменьшение параметра решетки γ -фазы (твердого раствора

на основе никеля) в результате упрочняющего отжига с $3.5719(6)\text{\AA}$ до $3.5603(4)\text{\AA}$. Результаты опубликованы в [6].

1.8.3. Анализ структурных свойств, фазового состава высокотвердых сплавов методами нейтронной и рентгеновской дифракции.

На рентгеновском дифрактометре ЛНИ STOE STADI MP ($\lambda=1.54\text{\AA}$), были получены дифрактограммы двух образцов высокотвердых сплавов, на основе Mo/Ti/C. В одном из образцов, предположительно, также присутствовал вольфрам W.

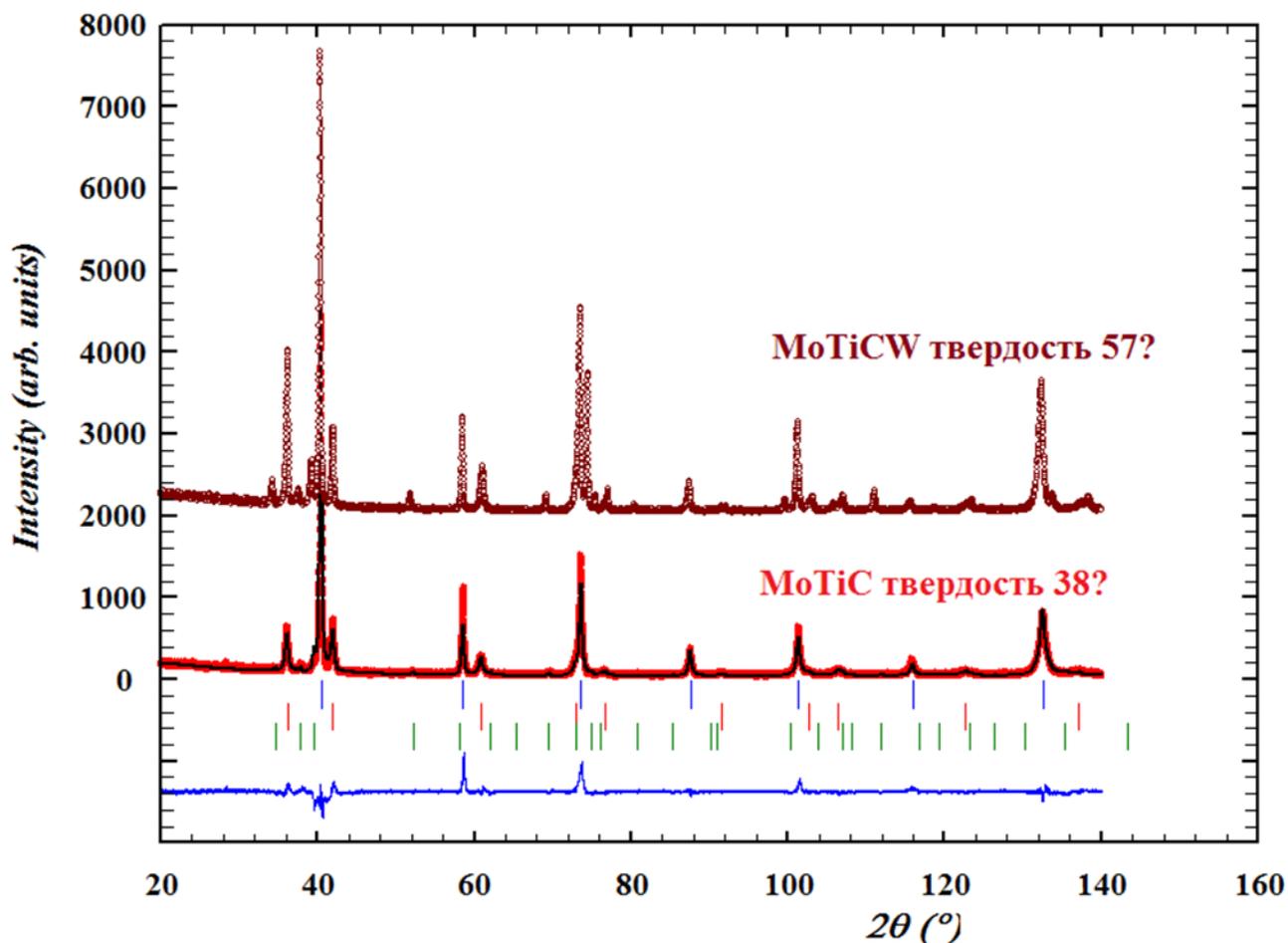


Рисунок 13. Полнопрофильный анализ данных рентгеновской дифракции, полученных на дифрактометре STOE STADI MP $\lambda=1.5406\text{\AA}$. Синие штрихи – брэгговские пики ОЦК молибдена, красные штрихи – пики ГЦК кубического карбида молибдена/титана, зеленые штрихи – дифракционные пики гексагональных карбидов

Проводился полнопрофильный анализ рентгеновских дифрактограмм методом Ритвельда с помощью программы FULLPROF. Был определен количественный фазовый состав образцов и параметры решетки кристаллических фаз. В обоих образцах было обнаружено по три кристаллических фазы: ОЦК молибден/твердый раствор на основе молибдена, ГЦК карбиды молибдена/титана (с кристаллической структурой типа NaCl) и ГПУ карбиды молибдена/вольфрама $\text{Mo}_2\text{C}/\text{W}_2\text{C}$.

1.8.4. Исследования особенностей кристаллической структуры, физических свойств и фазового состава магнитных соединений совместно с ИК РАН

Методом синхротронной мёссбаэровской спектроскопии (NFS – nuclear forward scattering) была исследована электронная и магнитная структура элементного железа (Fe-57) в широком диапазоне температур 10-300 К и давлений 50-240 ГПа. Было обнаружено, что изомерный сдвиг (IS) на ядрах Fe-57 сильно падает с ростом давления от значения при атмосферном давлении ~ 0 мм/сек до величины порядка ~ -0.8 мм/сек при 240 ГПа, а также растёт при понижении температуры. Непрерывное падение изомерного сдвига при росте давления обусловлено увеличением плотности s-электронов на ядре Fe-57, в то время как рост IS охлаждении можно объяснить эффектом изменения фактора Лэмба-Мёссбауэра. Из измерений отклика системы на внешнее магнитное поле было получено, что железо в этом диапазоне давлений-температур является диамагнетиком (или парамагнетиком с пренебрежительно малым магнитным моментом). Это очень важный результат как с фундаментальной точки зрения физики металлов и их магнетизма, а также с точки зрения физики Земли и земного магнетизма [19].

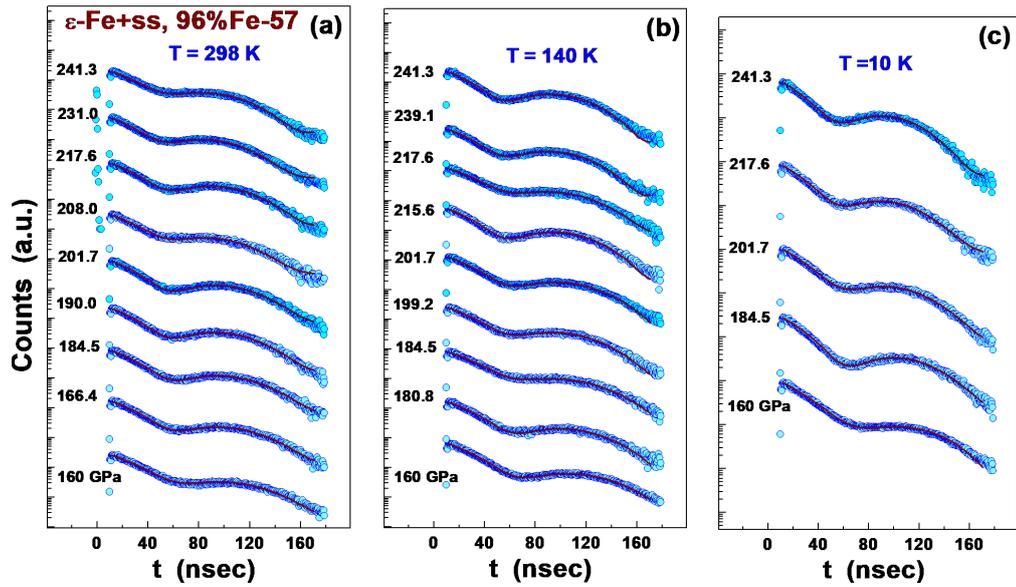


Рисунок 14. Эволюция NFS спектров с ростом давления для различных температур. В качестве репера использовалась фольга из нержавеющей стали толщиной 25 микрон

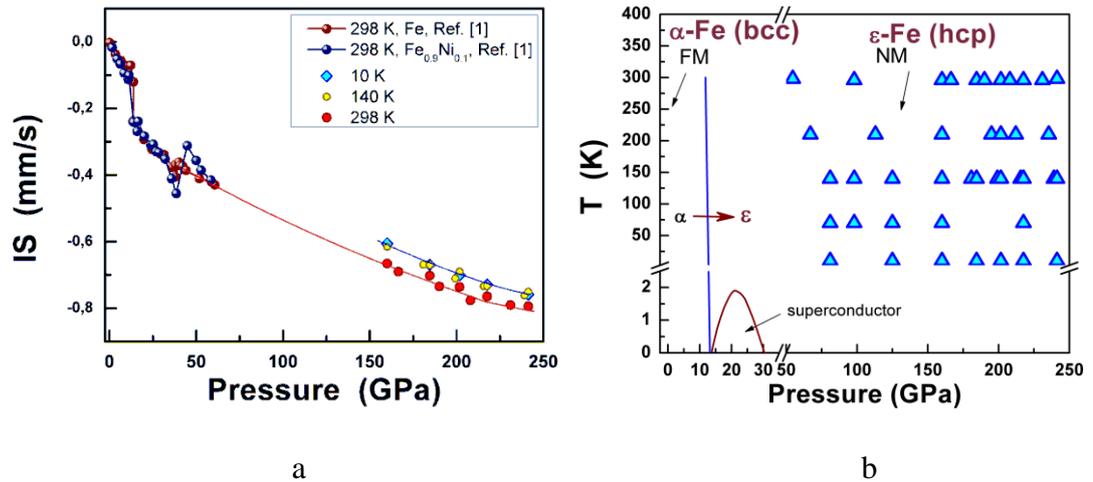


Рисунок 15. Зависимость от давления изомерного сдвига в железе для различных температур (a). Фазовая диаграмма железа (b): треугольными символами отмечены P-T точки в которых измерялись NFS спектры в нашем эксперименте. Во всех измеренных точках железо находится в диамагнитном состоянии (или в парамагнитном с стремящимся к нулю магнитным моментом).

1.8.5. Исследование структурных, магнитных и электронных свойств в соединениях переходных металлов под давлением. Мёсбауэровские исследования магнитных свойств функциональных материалов при низких температурах.

Была исследована природа изменения структурных свойств в области перехода изолятор-металл в NiO. На рисунке 16 приведено уравнение состояния NiO в гидростатических и квазигидростатических условиях. В качестве сред, в разных сканах, использовались Ne, ПЭС-5, NaCl.

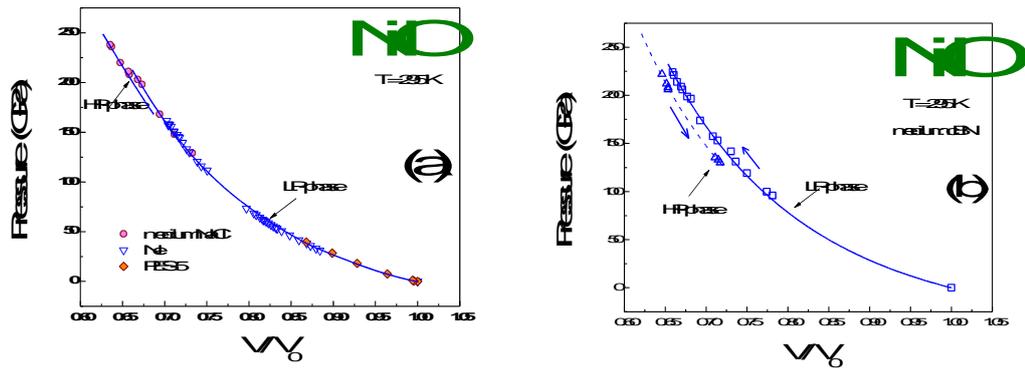


Рисунок 16. Уравнение состояния NiO при комнатной температуре. (а) В гидростатических условиях. (б) В негидростатических условиях. Символы – экспериментальные данные, линии - подгонка экспериментальных точек к уравнению состояния в форме Бёрча-Мурнагана (BM-EOS)

Эти среды достаточно мягкие, и условия существенно более гидростатические по сравнению с экспериментом, где в качестве среды использовался с-BN (см. Рис. 13b). Было обнаружено, что и в гидростатических условиях имеется скачок объёма в области близкой к переходу изолятор-металл. Скачок объёма составляет порядка 1.5%, что меньше скачка объёма в негидростатическом эксперименте 2.7%. На сегодняшний день выяснено, что фаза высокого давления метастабильна до давления 125 ГПа в негидростатическом эксперименте. Что касается структуры, то имеются большие сложности в подгонке рентгеновских дифрактограм к теоретическим моделям. Ясно, что структура является искажением исходной NaCl, но какая именно – требуется уточнение. По-видимому, расхождение в скачке объёма для негидростатического эксперимента связано с неточным её определением в гидростатическом эксперименте в области перехода [20].

1.9. Расчётно-исследовательские работы по размножающим мишеням на основе Нептуния-237 и Плутония-239.

Совместно с сотрудниками ЛНФ ОИЯИ проведены расчеты различных композиций нейтронных мишеней на основе нептуния. Предварительные результаты опубликованы в виде препринтов ОИЯИ и доложены на рабочих совещаниях в ОИЯИ.

1.10. Исследования нейтрон-ядерных взаимодействий методом времени пролёта на различных установках.

Работа выполняется совместно с ЛНФ ОИЯИ (согласно протоколу № 4659-4-17/19 о выполнении совместной научно-исследовательской работы). В 1-4 циклах реактора ИБР-2м группа в составе В.Л. Кузнецова, Е.В.Кузнецовой от ЛНИ ИЯИ РАН и П.В. Седышева, Ш. Зейналова от ЛНФ ОИЯИ выполнила исследования характеристик нейтронного пучка 1-го канала. Эксперименты были выполнены на различных пролетных базах 1-го канала реактора ИБР-2. В качестве детекторов нейтронов использовались счетчики СНМ-18 и камера деления со слоем урана-235.

1.11. Подготовка эксперимента по прямому измерению нейтрон-нейтронного рассеяния.

1) Во время сеанса работы с пучком на установке НСВП-ТРОНС в марте-апреле 2018 г. совместно с Отделом ускорительного комплекса ИЯИ РАН проводились работы по исследованию технических характеристик источника РАДЭКС, фоновые условия и стабильность работы оборудования по формированию микро-импульсов пучка протонов. В сериях независимых измерений были определены достижимые параметры установки при энергии пучка протонов, поступавших на мишень РАДЭКС, 209 МэВ, частоте 50 Гц и длительности импульсов 1 мкс и 0,5 мкс. Форма вспышки нейтронов и фон по γ -квантам в горизонтальном канале установки ТРОНС контролировались (n, γ) детекторами на основе NaI в сериях независимых экспериментов на мишенях из In и Ta. Форма вспышки нейтронов и фон по гамма-квантам представлены на Рисунке 17. Относительный уровень фонов по гамма-квантам составил 0,02-0,04 % (Рис. 25А). В отдельных сериях экспериментов наблюдалось повышение уровня фонов до 0,1-0,2 % предположительно вследствие неполного запираения пучка протонов (см. Рис. 25Б), что является допустимым при проведении большинства планируемых физических экспериментов.

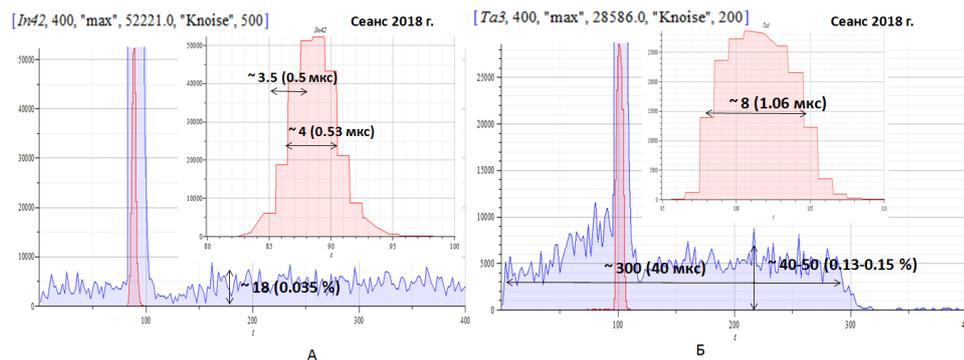


Рисунок 17. Форма вспышки нейтронов и фон по гамма-квантам в горизонтальном канале установки ТРОНС в сериях независимых экспериментов в сеансе апрель-март 2018 г.

2) В рамках проекта по созданию Центра коллективного пользования на базе физических установок Экспериментального комплекса ИЯИ РАН были разработаны рекомендации по организации зон коллективного пользования на базе импульсного источника нейтронов РАДЭКС. Разработано техническое предложение по модернизации оборудования регистрации, сбора, обработки и накопления экспериментальной информации с централизованным управлением и контролем, систем автоматизации, синхронизации, радиационной и быстрой аварийной защиты установок ТРОНС (совместно с ОУК ИЯИ РАН). Были разработаны предложения по созданию перспективных установок на базе НСВП-ТРОНС РАДЭКС. Проводилась разработка методики определения изотопного состава вещества методом времени пролёта и создания спектрометра изотопов на этой основе. Проводились исследования по возможности использования вертикального канала импульсного источника нейтронов РАДЭКС для проведения экспериментов по изучению гравитационных свойств нейтрона и волновых свойств нейтрона в гравитационных полях.

Были разработаны математические методы пошагового сдвига и его модификации для обработки экспериментальных данных на установках по времени пролёта, таких как НСВП-ТРОНС ИЯИ РАН и ИБР-2М ОИЯИ, с целью повышения их разрешающей способности и эффективности. Результаты реконструкции экспериментальных данных установки ТРОНС-НСВП, где модифицированным методом пошагового сдвига были устранены влияния после-импульсов во второй серии измерений, представлены на Рисунке 18.

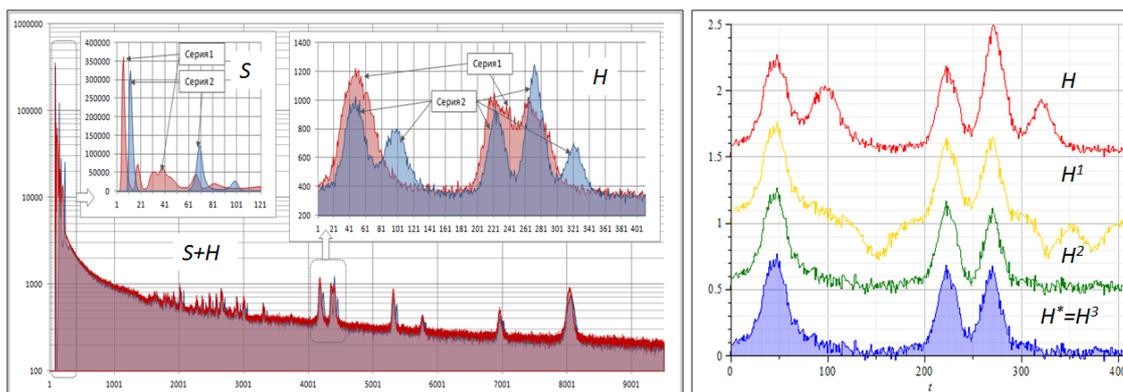


Рисунок 18. Форма вспышки нейтронов и фон по гамма-квантам в горизонтальном канале установки ТРОНС в сериях независимых экспериментов в сеансе апрель-март 2018 г.

Предложенные и разработанные в рамках темы методы математической реконструкции данных могут быть использованы для повышения разрешающей способности и эффективности любых измерительных систем, отклик которых описывается свёрткой с входным сигналом. К таким системам, в частности, относятся большинство систем статистического сбора информации.

Работа была включена в список наиболее значимых работ Института за 2018 г., имеющих инновационный потенциал.

2. Разработка источника медленных нейтронов на базе ЛУЭ-8

Изучены возможности определения микропримесей в материалах на измерительно-активационном комплексе на базе фотонейтронного источника, созданного на базе ЛУЭ МэВ ИЯИ РАН. Достигнуты следующие параметры нейтронного источника: плотность потока тепловых нейтронов в области облучения образцов $\sim 10^7 - 10^8$ нейтрон/см²·с при полном выходе нейтронов $\sim 10^9 - 10^{10}$ нейтрон/с.

Показано, что после облучения образцов с помощью регистрации наведенной активности можно определять содержание разных микропримесей. Достигнутая чувствительность метода по обнаружению разных микропримесей в мг/г показана на рисунке 19.

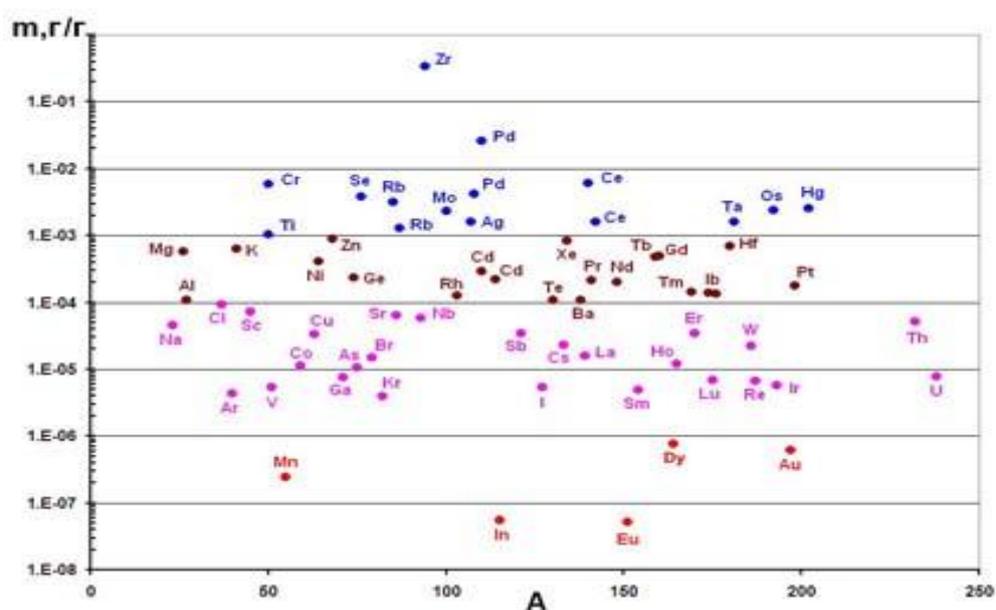


Рисунок 19. Чувствительность метода по обнаружению разных микропримесей в мг/г

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

1. Задача «Развитие импульсных источников нейтронов в ИЯИ РАН»

План работ на 2018 год выполнен полностью. Были получены следующие основные результаты:

1. Получены спектры прямых нейтронных пучков канала установки «Кристалл», расположенной на импульсном нейтронном источнике «ИН-06» при длительности протонного пучка 60 мкс и 120 мкс. Также получен спектр гамма-квантов от мишени источника «ИН-06».

2. Модернизирована детекторная система установки «Геркулес»

3. Разработана установка для нейтронной радиографии и томографии с разрешением по длине волны.

4. На нейтронном рефлектометре «Горизонт» запущен двухкоординатный монитор нейтронного пучка, который позволяет измерять абсолютные коэффициенты отражения нейтронов, а также проводить исследования методом малоуглового рассеяния нейтронов. Получена первая рефлектометрическая кривая на суперзеркале.

5. Разработан кольцевой детектор нейтронов для дифрактометров на основе сцинтилляторов и твердотельных фотоумножителей. Конструкция позволяет практически полностью исключить слепые зоны. Получен патент.

6. Разработана и изготовлена ячейка высокого давления, которая может создавать давление на 5 мм образцах до 1,5 ГПа. Ячейка вмещает образцы объемом до 55 мм³ и имеет двухслойную геометрию: TiZr body (внешний слой) и aCuBe2 insert (внутренний слой), он немагнитный, дает достаточно низкий и ровный фон

7. Получены спектры нейтронов в горизонтальных каналах источника «РАДЭКС». Энергия максимума спектра в канале № 1 равна 1,1 Å, а в канале № 2 и № 3 — 1,2 Å, т. е. Источник имеет спектр, обогащенный эпитепловыми нейтронами. Разрешение дифрактометра, достигнутое на пролетной базе 20 м – 1,6-2,3 %

8. Проведен эксперимент на монокристаллическом кремнии с камерой, обеспечивающей давление до 1,5 ГПа.

9. Обнаружено уменьшение параметра решетки γ -фазы немагнитного сплава 40ХНЮ (твердого раствора на основе никеля) в результате упрочняющего отжига с 3.5719(6)Å до 3.5603(4) Å.

10. Методом синхротронной мёссбауэровской спектроскопии (NFS) была исследована электронная и магнитная структура элементного железа (Fe-57) в широком диапазоне температур 10-300 К и давлений 50-240 ГПа. Установлено, что железо в данном диапазоне давлений является диамагнетиком.

11. Была исследована природа изменения структурных свойств в области перехода изолятор-металл в NiO. Установлено, что и в гидростатических условиях имеется скачок объёма в области близкой к переходу изолятор-металл. Скачок объёма составляет порядка 1.5%.

12. В образцах сплава на основе Mo/Ti/C было обнаружено по три кристаллических фазы: ОЦК молибден/твердый раствор на основе молибдена, ГЦК карбиды молибдена/титана (с кристаллической структурой типа NaCl) и ГПУ карбиды молибдена/вольфрама Mo₂C/W₂C.

13. Проведены расчеты различных композиций нейтронных мишеней на основе нептуния.

14. Были проведены необходимые предпроектные исследования по созданию Центра коллективного пользования на базе физических установок Экспериментального комплекса ИЯИ РАН. Разработанные математические методы обработки экспериментальных данных на установках по времени пролёта были включены в список наиболее значимых работ Института за 2018 г., имеющих инновационный потенциал.

2. Задача «Разработка источника медленных нейтронов на базе ЛУЭ-8»

План работ на 2018 год выполнен полностью. Основное внимание уделено разработке метода определения микропримесей в материалах на измерительно-активационном комплексе. Достигнуты следующие параметры нейтронного источника:

плотность потока тепловых нейтронов в области облучения образцов $\sim 10^7 - 10^8$ нейтрон/см² с при полном выходе нейтронов $\sim 10^9 - 10^{10}$ нейтрон/с.

ПУБЛИКАЦИИ

1. Марин В.Н., Садыков Р.А., Трунов Д.Н., Литвин В.С., Аксенов С.Н. Кольцевой детектор нейтронов для времяпролетного дифрактометра, состоящий из линейных сцинтилляционных детекторов на основе кремниевых фотоумножителей. Приборы и техника эксперимента. 2018. № 1. С. 5-12.

2. Патент на полезную модель, RU 177857, «Кольцевой детектор тепловых нейтронов», авторы: Марин Виктор Николаевич, Садыков Равиль Асхатович, Литвин Василий Сергеевич, Аксенов Сергей Николаевич, Трунов Дмитрий Николаевич.

Зарегистрировано в Государственном реестре полезных моделей Российской Федерации 14 марта 2018г. Патентообладатель — ИЯИ РАН

3. В.С. Литвин, Д.Н. Трунов, В.Н. Марин, С.Н. Аксенов, Р.А. Садыков Кольцевой сцинтилляционный детектор нейтронов для времяпролетного дифрактометра «Геркулес» - IV Международная конференция Лазерные, плазменные исследования и технологии ЛаПлаз 2018, 30 января -1 февраля 2018 года, Москва, НИЯУ МИФИ.

4. R.A. Sadykov, V.N. Marin, V.S. Litvin, D.N. Trunov, S.N. Axenov and A.A. Stolyarov - A new ring scintillation detector without blind areas for neutron diffraction. IV International Conference on Particle Physics and Astrophysics. 22-26 October 2018, Moscow

5. LITVIN Vasily, SADYKOV Ravil, MARIN Viktor, TRUNOV Dmitry, AXENOV Sergey -A new linear and ring neutron scintillation detector based on SiPM and lightguides - Kremlin Workshop "Engineering for advanced neutron instrumentation and sample environment" - 13-16 May 2018, Peterhof, St.-Petersburg.

6. В. С. Литвин, А. А. Алексеев, Д. Н. Трунов, С. Н. Аксенов, Е. С. Клементьев, В. Н. Марин, С. И. Поташев, А. А. Столяров, Ю. Б. Лебедь, В. Л. Кузнецов, С. П. Кузнецов, И. В. Мешков, Р. А. Садыков Нейтронная дифракция и спектрометрия на импульсном нейтронном источнике "РАДЭКС" ИЯИ РАН. Поверхность. Рентгеновские, синхротронные и нейтронные исследования - 2019. № 3, с. 1–7

7. J.W.Norbury, N.Sobolevsky, C.M.Werneth. SHIELD and HZETRN Comparisons of Pion Production Cross Sections. Nucl.Instr.Meth. B418 (2018) 13-17.

<https://doi.org/10.1016/j.nimb.2017.12.009>

8. O.N.Libanova, E.S.Golubeva, S.V.Ermolaev, V.L.Matushko, and A.S.Botvina. Experimental cross sections of fission fragments of Thorium-232 irradiated with medium-energy protons. Physics of Particles and Nuclei Letters, v.15 (no.3), p. 284-297 (2018).

DOI: 10.1134/S1547477118030123

9. A.Botvina. Role of the fragment formation in relativistic ion collisions. Invited Talk, Physic Symposium (32th meeting), GSI Darmstadt, Germany. October 3, 2018.

<https://indico.gsi.de/event/7677/?view=static#20181003>

10. A.Botvina, M.Bleicher. Processes of hypernuclei formation in relativistic ion collisions. EPJ Web of Conferences, v. 171, 13001 (2018).

DOI: <https://doi.org/10.1051/epjconf/201817113001>

11. Y.L.Sun, A.S.Botvina, A.Obertelli, A.Corsi, M.Bleicher. Production of light hypernuclei with light-ion beams and targets. Phys. Rev. C, v.98, p.024903 (11 pages), 2018.

DOI: 10.1103/PhysRevC.98.024903

12. N.Buyukcizmeci, A.S.Botvina, R.Ogul. Investigation of Binding Energies of Lambda Hypernuclei. The Proceedings of the RILA IWNT37 Workshop. Nuclear Theory, Vol. 37, p.155, 2018. (Nuclear Theory Laboratory (INRNE-BAS): ISSN 1313-2822, edited by M. Gaidarov and N. Minkov. Heron Press, Sofia, 2018.)

http://ntl.inrne.bas.bg/workshop/2018/contributions/b17_Buyukcizmeci_2018.pdf

13. N.Buyukcizmeci, A.S.Botvina, A.Ergun, R.Ogul, M.Bleicher. Statistical production and binding energy of hypernuclei. Phys. Rev. C, v.98, p.064603 (10 pages), 2018.

DOI: 10.1103/PhysRevC.98.064603

14. A.Botvina. Formation of hypernuclei in relativistic ion collisions. Invited Talk at NuSPRASEN Workshop on Nuclear Reactions - ENSAR2. Warsaw, Poland, January 22-24, 2018. <http://slcj.uw.edu.pl/en/nusprasen/program/>

15. A.Botvina. Formation of hypernuclei in relativistic ion, hadron and lepton collision. Invited Talk at HYP2018: The 13th International Conference on Hypernuclear and Strange Particle Physics, Portsmouth (VA) USA, June 24-29, 2018.

<https://www.jlab.org/conferences/hyp2018/program.html#daysel>

16. S.A.Gavrilov, L.N.Latysheva, S.G.Lebedev, N.M.Sobolevsky, A.V.Feschenko. Stand for Studying the Effect of Proton Irradiation on Integrated Circuits: Estimation of Particle Fluxes, Activation, and Dose Rate. Journal of Surface Investigation: X-ray, Synchrotron and Neutron Techniques, 2018, Vol. 12, No. 5, pp. 1041–1046.

17. С.Е.Брагин, О.М.Володкевич, С.А.Гаврилов, О.В.Грехов, Ю.Ж.Калинин, Ю.В.Киселев, Л.Н.Латышева, С.Г.Лебедев, В.Л.Серов, Н.М.Соболевский, А.В.Фещенко (ИЯИ РАН, г. Москва); П.Н.Цедрик, О.Д.Подгорная, Д.Ю.Арбузников, С.В.Цибряев,

С.Ф.Разиньков, Е.Ю.Прохоров (ВНИИЭФ, г. Саров). Создание стенда протонного облучения на линейном ускорителе ИЯИ РАН. Доклад на IV Международной конференции Лазерные, плазменные исследования и технологии ЛаПлаз – 2018 30 января -1 февраля 2018 года, Москва, НИЯУ МИФИ. <http://conf.laplas.mephi.ru/> AIP Conference Series, in print.

18. 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, в печати, (Vol.16, No 1, 2019).

19. A. G. Gavriiliuk, I. A. Trojan, S. N. Aksenov, Pya Sergeev, Olaf Leopold, Hans-Christian Wille, A. A. Mironovich, I.S. Lyubutin, V. V. Struzhkin, "The P-T synchrotron mössbauer investigations of pure Fe at multimegabar pressures", EHPRG 2018, „Aveiro-Portugal, 2-7 September 2018, Conference Proceedings.

20. A. G. Gavriiliuk, V. V. Struzhkin, A. G. Ivanova, V. B. Prakapenka, A. A. Mironovich, S. N. Aksenov, I. A. Trojan, and W. Morgenroth, The first-order structural transition in NiO at high pressure, submitted to Appl. Phys. Lett., (2018).

21. V.L. Kuznetsov, E.V. Kuznetsova, P.V. Sedyshev. Measuring Neutron Lifetime on IBR-2 Pulsed Neutron Source. Physics of Particles and Nuclei Letters, 2018. Vol. 15, No. 6, pp. 678 – 684.

22. Sh.Zeinalov, V. Kuznetsov, P. Sedyshev, V. Shvetsov, O. Sidorova. Thermal neutron intensity measurement with fission chamber in current, pulsed and Campbell modes. 26-ой Международный Семинар по Взаимодействию Нейтронов с Ядрами 28 мая (ISINN-26, Xi'an, China, May 28th-June 1st, 2018 «Neutron Spectroscopy, Nuclear Structure and Related Topics»).

23. Е.В. Кузнецова, В.Л. Кузнецов, П.В. Седышев. Моделирование эксперимента по измерению времени жизни нейтрона времяпролетным методом. Конференция по использованию рассеяния нейтронов в конденсированных средах РНИКС-2018, 17-21 сентября 2018, Санкт-Петербург.

24. Ravil Sadykov, Catherine Pappas, Lars J. Bannenberg, Robert M. Dalgliesh, Péter Falusf, Christopher Goodway and Eddy Lelièvre-Bernaf. 1.5 GPa compact double-wall clamp cell for SANS and NSE studies at low temperatures and high magnetic fields. Journal of Neutron Research 20 (2018) 23–31 DOI 10.3233/JNR-180056 IOS Press

25. Новиков-Бородин А.В. Реконструкция экспериментальных данных спектрометров по времени пролёта методом пошагового сдвига – Приборы и техника эксперимента, 2018, № 6, с. 17–24. DOI:10.1134/S0032816218050269

26. Novikov-Borodin A.V. Reconstruction of TOF Spectrometer Experimental Data Using the Step-by-Step Shift Methods. - Instruments and Experimental Techniques, 2018, Vol. 61, No. 6, pp. 780–787. DOI:10.1134/S0020441218050226

27. О.Н. Либанова, Е.С. Голубева, С.В. Ермолаев, В.Л. Матушко, А.С. Ботвина. Экспериментальные сечения образования продуктов деления тория-232 при облучении протонами средних энергий. Письма в ЭЧАЯ. 2018. Т. 15, №3(215). С. 234-251.