

№ 121111900090-5



УТВЕРЖДАЮ

Директор института

В.Г. Трубников

13 » января 2024 г.

## О Т Ч Е Т

о выполненных работах по реализации исследовательской  
программы (проекта)

по теме:

РАЗРАБОТКА И СОЗДАНИЕ ЭЛЕМЕНТОВ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫХ  
СТАНЦИЙ НА ИСТОЧНИКАХ НЕЙТРОНОВ ИМПУЛЬСНОГО ИЛИ  
ПОСТОЯННОГО ТИПА

(промежуточный)

Этап 3

Федеральная научно-техническая программа развития синхротронных и нейтронных исследований и исследовательской инфраструктуры на 2019 – 2027 годы

Соглашение о предоставлении из федерального бюджета гранта в форме субсидии от 13 октября 2021 г. № 075-10-2021-115 (внутренний номер СиН.21.0021)

Руководитель исследовательской программы (проекта),

Начальник ОНИРКС ЛНФ ОИЯИ,  
д-р физ.-мат. наук

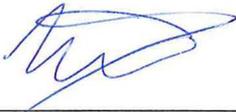
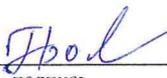
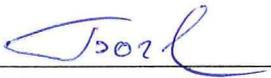
подпись, дата 23.01.2024

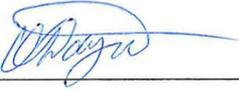
А.В. Белушкин

Дубна 2024

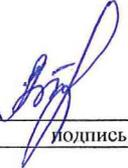
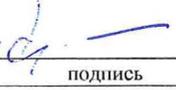
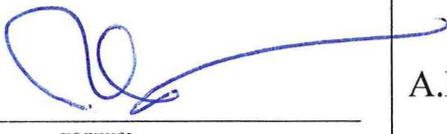
## СПИСОК ИСПОЛНИТЕЛЕЙ

<p>Руководитель исследовательской программы (проекта), д-р физ.-мат. наук</p>	 _____ подпись	<p>А.В. Белушкин</p>
<p>Исполнитель проекта, старший научный сотрудник</p>	 _____ подпись	<p>А.А. Богдзель</p>
<p>Исполнитель проекта, Начальник отдела НЭОКС ИБР-2, к-т физ.-мат. наук</p>	 _____ подпись	<p>В.И. Боднарчук</p>
<p>Исполнитель проекта, директор ЛНФ ОИЯИ, д-р физ.-мат. наук</p>	 _____ подпись	<p>Е.В. Лычагин</p>
<p>Исполнитель проекта, старший инженер</p>	 _____ подпись	<p>А.Г. Колесников</p>
<p>Исполнитель проекта, начальник сектора, к-т физ.-мат. наук</p>	 _____ подпись	<p>В.М. Милков</p>
<p>Исполнитель проекта, м.н.с.</p>	 _____ подпись	<p>В.В. Садилов</p>

Исполнитель проекта, с.н.с.	 _____	А.В. Чураков
Исполнитель проекта, нач. группы, к-т физ.- мат. наук	 _____	Т.Е. Еник
Исполнитель проекта, инженер	 _____	В.В. Баутин
Исполнитель проекта, Научный сотрудник	 _____	К.М. Саламатин
Исполнитель проекта, В.н.с., д-р физ.-мат. наук	 _____	Б.Ж. Залиханов
Исполнитель проекта, секретарь-референт	 _____	Т.В. Милкова
Исполнитель проекта, ст.инженер	 _____	А.В. Алтынов
Исполнитель проекта, мнс	 _____	М.О. Петрова
Исполнитель проекта, лаборант	 _____	Н.Н. Богомолова
Исполнитель проекта, лаборант	 _____	О.Н. Богомолова

Исполнитель проекта, ведущий инженер	 _____	А.П. Буздавин
Исполнитель проекта, ст.инженер	 _____	В.В. Булавина
Исполнитель проекта, начальник КБ	 _____	К.В. Булатов
Исполнитель проекта, ведущий конструктор	 _____	Ф.М. Котлыков
Исполнитель проекта, лаборант физ.лаб.	 _____	О.В. Володин
Исполнитель проекта, инженер	 _____	О. Даулбаев
Исполнитель проекта, ведущий инженер	 _____	В.А. Дроздов
Исполнитель проекта, лаборант	 _____	О.В. Ермолаева
Исполнитель проекта, ведущий инженер	 _____	В.В. Журавлев
Исполнитель проекта, инженер	 _____	Н.Д. Зернин
Исполнитель проекта, к-т физ.-мат. наук, начальник группы	 _____	А.С. Кирилов

Исполнитель проекта, инженер	 _____ <small>подпись</small>	П.А. Кислицын
Исполнитель проекта, лаборант физ. лаб.	 _____ <small>подпись</small>	И.В. Ковалев
Исполнитель проекта, научный сотрудник, к-т физ.-мат. наук	 _____ <small>подпись</small>	А.К. Курилкин
Исполнитель проекта, снс, к-т физ.-мат. наук	 _____ <small>подпись</small>	Е.И. Литвиненко
Исполнитель проекта, старший инженер	 _____ <small>подпись</small>	Г.Е. Малькова
Исполнитель проекта, ведущий инженер	 _____ <small>подпись</small>	И.А. Морковников
Исполнитель проекта, инженер-программист 1 кат.	 _____ <small>подпись</small>	С.М. Мурашкевич
Исполнитель проекта, инженер-программист 1 кат.	 _____ <small>подпись</small>	Т.Б. Петухова
Исполнитель проекта, мнс, к-т физ.-мат. наук	 _____ <small>подпись</small>	М.М. Подлесный
Исполнитель проекта, ВНС	 _____ <small>подпись</small>	В.И. Приходько

Исполнитель проекта, инженер	 подпись	А.В. Семечкин
Исполнитель проекта, лаборант	 подпись	А.Ч. Сопубекова
Исполнитель проекта, ведущий инженер	 подпись	Г.А. Сухомлинов
Исполнитель проекта, инженер-электроник	 подпись	М.В. Тихонов
Исполнитель проекта, старший инженер	 подпись	Л.А. Трунтова
Исполнитель проекта, старший лаборант	 подпись	Ф.А. Червяков
Исполнитель проекта, снс	 подпись	А.Н. Черников
Исполнитель проекта, инженер-электроник	 подпись	В.В. Швецов
Исполнитель проекта, инженер	 подпись	Н.В. Швецов
Исполнитель проекта, инженер-электроник 1 кат.	 подпись	В.К. Широков

Исполнитель проекта, начальник группы	 _____	А.И. Куклин
Исполнитель проекта, лаборант	 _____	В.Ю. Егоров
Исполнитель проекта, старший лаборант	 _____	А.А. Евсеев
Исполнитель проекта, инженер-электроник	 _____	А.А. Козляковская
Исполнитель проекта, помощник главного инженера	 _____	С.В. Козырев
Исполнитель проекта, МНС	 _____	А.О. Колесников
Исполнитель проекта, начальник сектора	 _____	Н.В. Горбунов
Исполнитель проекта, СНС	 _____	А.В. Красноперов
Исполнитель проекта, начальник группы	 _____	В.В. Терещенко
Исполнитель проекта, инженер	 _____	С.В. Терещенко

## СПИСОК СОИСПОЛНИТЕЛЕЙ

№	Название организации	Реквизиты договора с головной организацией	Руководитель работ
1.	Государственный университет «Дубна»	Договор №15-106у от 07.06.2023 г.	<b>О.И. Пискунова</b> Директор Инженерно-физического института Государственного университета «Дубна», кандидат технических наук
2.	Федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования «Казанский (Приволжский) федеральный университет»	Договор №69 от 04.10.2023 г.	<b>М.Р. Гафуров</b> Директор Института физики, доктор физико-математических наук
3.	Федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования «Московский физико-технический институт (национальный исследовательский университет)»	Договор № 400/1984/3 от 13.06.2023 г.	<b>А.В. Рогачев</b> Ведущий научный сотрудник, Кандидат физико-математических наук
4.	Федеральное государственное бюджетное учреждение «Петербургский институт ядерной физики им. Б.П. Константинова Национального исследовательского центра «Курчатовский институт»	Договор № 148-100-1/2023г. от 23.06.2023 г.	<b>Е.В. Алтынбаев</b> И.О. Зам. Зав. ОДНИ ИЦ НТ, кандидат физико-математических наук
5.	Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт ядерных исследований Российской Академии наук	Договор № 400-01513 от 30.06.2023 г.	<b>Р.А. Садыков</b> И.О. Зав. Сектора конденсированных сред, ЛНИ, ведущий научный сотрудник, кандидат физико-математических наук
6.	Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт физики металлов имени М.Н. Михеева Уральского отделения Российской академии наук	Договор №13/2023 от 28.06.2023 г.	<b>Е.А. Кравцов</b> Главный научный сотрудник, доктор физико-математических наук

## РЕФЕРАТ

Отчет содержит 102 страницы, 57 рисунков, 4 таблицы, 27 источника, 105 приложений.

Сцинтилляционный счетчик, позиционно-чувствительный детектор, одномерный детектор, сцинтиллятор, прототип счетчика, твердотельный конвертор, газоразрядный модуль, магнетронное напыление, Монте-Карло моделирование, нейтронный фильтр, нейтронное рассеяние, поляризованные нейтроны, нейтроновод, прерыватель пучка, дифрактометрия, рефлектометрия, малоугловое рассеяние, высокопоточный источник нейтронов, метод времени-пролета, сверхрешетка, намагниченность, характеристика тонких пленок, фотоумножитель, контроллер-управления, наноструктуры, световод, фазовая проблема, вторичное излучение, гамма-излучение

В отчете содержатся сведения о проведенных исследованиях, работах и процессе подготовки молодых специалистов, согласно плану-графику работ 3-го этапа исследовательского Проекта «Разработка и создание элементов экспериментальных станций на источниках нейтронов импульсного или постоянного типа» Отчет содержит описание результатов выполнения работ по каждому пункту плана-графики 3-го этапа реализации Проекта со списком приложений, содержащих подтверждающие документы. В выполнении 3-го этапа Проекта принимали участие 7 научных и образовательных организаций:

1. Международная межправительственная организация Объединенный институт ядерных исследований – головная организация проекта
2. Федеральное государственное бюджетное учреждение «Петербургский институт ядерной физики им. Б.П. Константинова Национального исследовательского центра «Курчатовский институт»
3. Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт ядерных исследований Российской Академии наук
4. Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт физики металлов имени М.Н. Михеева Уральского отделения Российской академии наук
5. Государственный университет «Дубна»
6. Федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования «Казанский (Приволжский) федеральный университет»
7. Федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования «Московский физико-технический институт (национальный исследовательский университет)».

## СОДЕРЖАНИЕ

ПЕРЕЧЕНЬ УСЛОВНЫХ ОБОЗНАЧЕНИЙ	14
ВВЕДЕНИЕ	15
ОСНОВНАЯ ЧАСТЬ	17
3.1.1 Создание и испытание многослойных детекторов нейтронов с твердотельным борным конвертером.	17
3.1.2 Изготовление и испытания механического прерывателя пучка нейтронов с временной фокусировкой.	22
3.1.3 Расчет конфигурации нейтронотводной системы рефлектометра для импульсного источника нейтронов моделированием методом Монте-Карло с применением программного пакета VITESS Mc Stas. Разработка математической модели нейтронотводной системы рефлектометра.	24
3.1.4 Создание прототипа регистрирующего газоразрядного модуля с твердотельным конвертером с активной площадью не менее 100x100 мм <sup>2</sup> , пространственным разрешением не хуже 1.5x1.5x0.05 мм <sup>3</sup> (совместно с НИЦ «Курчатовский институт» – ПИЯФ) и проведение его испытаний.	30
3.1.5 Разработка программного решения для определения координаты конверсии нейтрона на площади двумерного позиционно-чувствительного детектора нейтронов на основе сцинтилляторов ZnS/6LiF и твердотельных фотоэлектронных умножителей (совместно с НИЦ «Курчатовский институт» – ПИЯФ).	33
3.1.6 Создание двумерной позиционно-чувствительной многопроволочной камеры с апертурой не менее 200x200 мм <sup>2</sup> с пространственным разрешением не менее 2x2 мм <sup>2</sup> с поканальной регистрацией сигнала (совместно с НИЦ «Курчатовский институт» – ПИЯФ).	33
3.1.7 Калибровка детекторов от радиоизотопного источника (совместно с ИЯИ РАН).	36
3.1.8 Проведение тестирования параметров детекторов на источнике нейтронов (совместно с ИЯИ РАН).	37
3.1.9 Нейтронные рефлектометрические и дифрактометрические исследования процессов отражения, прохождения нейтронов и генерации вторичного излучения от многослойных наноструктур на основе гадолиния и бора (совместно с ИФМ УРО РАН).	37
3.1.10 Разработка ускорительной и реакторной технологии. Разработка технологии нанесения покрытий на основе карбида бора В <sub>4</sub> С на полимерные пленки с высокой температурой плавления - полиимид (kapton) и лавсан (maylar) для дальнейшего использования в качестве конвертера нейтронного излучения в детекторах на ускорительных и реакторных источниках нейтронов.	51

3.1.11 Совместные с АО НИИТФА исследования характеристик образцов модернизированных детекторов нейтронов на основе конвертеров с тонкопленочным покрытием из карбида бора $^{10}\text{B}_4\text{C}$ , изготовленных АО НИИТФА. Подготовка предложений по повышению эффективности детекторов нейтронов для применения на предприятиях РосАтом.	61
3.1.12 Проведение экспериментальных исследований прототипа двумерного позиционно-чувствительного счетчика нейтронов на основе сцинтилляторов $\text{ZnS}/6\text{LiF}$ и твердотельных фотоэлектронных умножителей с апертурой не менее $100 \times 100 \text{ мм}^2$ (совместно с НИЦ «Курчатовский институт» – ПИЯФ).	62
3.1.13 Калибровка одиночных детекторов нейтронов входящих в состав детекторной системы нейтронного дифрактометра «СФЕРА» от радиоизотопного источника (совместно с ИЯИ РАН).	64
3.1.14 Проведение тестирования параметров одиночных детекторов нейтронов входящих в состав детекторной системы нейтронного дифрактометра «СФЕРА» на источнике нейтронов (совместно с ИЯИ РАН).	65
3.1.15 Приобретение комплектующих и оборудования, изготовление стендов, подготовка помещений, необходимых для создания прототипа двумерной позиционно-чувствительной многопроволочной камеры с апертурой не менее $200 \times 200 \text{ мм}^2$ с пространственным разрешением не менее $2 \times 2 \text{ мм}^2$ (совместно с НИЦ «Курчатовский институт» – ПИЯФ).	66
3.2.1 Реализация 4-й очереди создания опытно-экспериментального участка (ОЭУ) по нанесению тонкопленочных борсодержащих покрытий. Поставка оборудования (часть 1).	67
3.2.2 Реализация 4-й очереди создания опытно-экспериментального участка (ОЭУ) по нанесению тонкопленочных борсодержащих покрытий. Поставка оборудования (часть 2).	68
3.3.1 Реализация дополнительной профессиональной программы повышения квалификации «Проведение синхротронных и нейтронных исследований» для специалистов естественно-научного профиля (совместно с К(П)ФУ).	69
3.3.2 Реализация дополнительной профессиональной программы повышения квалификации «Проведение синхротронных и нейтронных исследований» для специалистов биомедицинского профиля (совместно с К(П)ФУ).	71
3.3.3 Реализация дисциплины "Проведение синхротронных и нейтронных исследований" образовательной программы высшего образования магистратуры 03.04.02 "Физика" и раздела «Синхротронное и нейтронное излучения» дисциплины «Радиационная физика в биомедицине» образовательной программы высшего образования бакалавриата 12.03.04 "Биотехнические системы и технологии" для студентов естественнонаучного профиля (совместно с К(П)ФУ)	71

<p>3.3.4 Реализация раздела "Применение синхротронного и нейтронного излучения в практической медицине и в области биологических наук" дисциплин "Общая и медицинская радиобиология. Физические основы лучевой диагностики и терапии», "Ядерная медицина" образовательных программ высшего образования специалитета 30.05.01 "Медицинская биохимия", 30.05.02 "Медицинская биофизика" для студентов биомедицинского профиля (совместно с К(П)ФУ).</p>	72
<p>3.3.5 Разработка образовательной программы высшего образования «Проведение синхротронных и нейтронных исследований» для студентов археологического профиля (совместно с К(П)ФУ).</p>	73
<p>3.3.6 Актуализация перечня на 2023/2024 учебный год научно-исследовательских работ и руководителей научно-исследовательских практик студентов и аспирантов, реализуемых в рамках работы научно-образовательной лаборатории (совместно с МФТИ).</p>	73
<p>3.3.7 Ресурсное и инфраструктурное обеспечение в 2023 г. научно-образовательной лаборатории для реализации выполнения научно-исследовательских практик студентов и аспирантов, реализуемых в рамках работы научно-образовательной лаборатории (совместно с МФТИ).</p>	75
<p>3.3.8 Реализация в 2023 г. научно-исследовательских работ (практик) студентов и аспирантов в рамках работы научно-образовательной лаборатории (совместно с МФТИ).</p>	77
<p>3.3.9 Реализация в 2023 г. для подготовки специалистов в области разработки, проектирования и строительства источников синхротронного и нейтронного излучения, а также научных кадров для проведения синхротронных и нейтронных исследований (разработок) в целях получения результатов мирового уровня:  Модуль 6 «Синхротронные и нейтронные исследования для изучения биологически активных веществ, синтетических и природных полимеров»;  Модуль 7 «Использование нейтронных детекторов в анализе объектов окружающей природной среды»;  Модуль 8 «Радиационная безопасность».  (совместно с университетом «Дубна»).</p>	86
<p>3.3.10 Проведение в 2023 г. практической подготовки по образовательной программе «Автоматизация экспериментов в области нейтронной физики» (совместно с университетом «Дубна»).</p>	96

<p>3.3.11 Проведение итоговой аттестации по 4 курсам повышения квалификации (Модуль 6 «Синхротронные и нейтронные исследования для изучения биологически активных веществ, синтетических и природных полимеров», Модуль 7 «Использование нейтронных детекторов в анализе объектов окружающей природной среды», Модуль 8 «Радиационная безопасность», «Автоматизация экспериментов в области нейтронной физики») с выдачей документов о повышении квалификации по каждому курсу. (совместно с университетом «Дубна»).</p>	99
<p>3.3.12 Проведение в 2023 г. конференции обучающихся и исследователей в возрасте до 39 лет по тематике исследований (совместно с ИФМ УО РАН).</p>	100
<p>3.3.13 Реализация дополнительной профессиональной программы повышения квалификации «Проведение синхротронных и нейтронных исследований» для специалистов археологического профиля (совместно с К(П)ФУ).</p>	101
<p>ЗАКЛЮЧЕНИЕ</p>	102

## ПЕРЕЧЕНЬ УСЛОВНЫХ ОБОЗНАЧЕНИЙ

BM	- Вибрационная магнитометрия
BMP	- Высоковакуумное магнетронное распыление
КД	- конструкторская документация
мкм	- микрометр, 1 мкм = 0,001 мм
ММН	- Многослойные магнитные наноструктуры
ОПЧД	- одномерный позиционно-чувствительный детектор
ПГ	- план-график
ПМ	- программа и методики испытаний
ПНР	- Рефлектометрия поляризованных нейтронов
ПО	- программное обеспечение
РД	- Рентгеновская дифрактометрия
РЗМ	-Редкоземельный металл
РР	- Рентгеновская рефлектометрия
ТЗ	- техническое задание
XPS	- Фотоэлектронная спектроскопия
ILL	- Институт Лауэ-Ланжевена
Å	- ангстрем, внесистемная единица длины, равная 0.1 нм
$\lambda$	- длина волны, измеряется в ангстремах

## ВВЕДЕНИЕ

Ключевые слова: сцинтилляционный счетчик, позиционно-чувствительный детектор, одномерный детектор, сцинтиллятор, прототип счетчика, твердотельный конвертор, газоразрядный модуль, магнетронное напыление, Монте-Карло моделирование, нейтронный фильтр, нейтронное рассеяние, поляризованные нейтроны, нейтроновод, прерыватель пучка, дифрактометрия, рефлектометрия, малоугловое рассеяние, высокопоточный источник нейтронов, метод времени-пролета, сверхрешетка, намагниченность, характеристика тонких пленок, фотоумножитель, контроллер-управления, наноструктуры, световод, фазовая проблема, вторичное излучение, гамма-излучение.

Цель работы – проведение синхротронных и нейтронных исследований (разработок), необходимых для решения принципиально новых фундаментальных и крупных прикладных задач, в том числе: поддержка научных и научно-технических проектов, выполняемых организациями, в том числе совместно с организациями, действующими в реальном секторе экономики, представителями международного научного сообщества, а также проектов исследователей в возрасте до 39 лет; поддержка разработки и трансфера прорывных технологий, созданных с использованием результатов синхротронных и нейтронных исследований, а также ускорительных, реакторных и ядерных технологий, в том числе в рамках развития ядерной медицины. Подготовка специалистов в области разработки, проектирования и строительства источников синхротронного и нейтронного излучения, а также научных кадров для проведения синхротронных и нейтронных исследований (разработок) в целях получения результатов мирового уровня, в том числе: разработка и реализация образовательных программ высшего образования и дополнительных профессиональных программ, направленных на создание прорывных технологических решений с применением синхротронных и нейтронных источников; организация и проведение научных конференций, школ и семинаров для исследователей и обучающихся по направлениям реализации Федеральной программы в возрасте до 39 лет.

Третий этап проекта «Разработка и создание элементов экспериментальных станций на источниках нейтронов импульсного или постоянного типа» являлся ключевым и самым ответственным этапом выполнения поставленных задач. На третьем этапе помимо решения отдельных задач, рассчитанных на выполнение в течение года, проходило завершение масштабных проектов, на реализацию которых были потрачены усилия всех трех этапов. По итогам третьего этапа можно констатировать, что он стал самым результативным во всех аспектах данного проекта. В течение третьего года выполнения проекта решились научные, инженерно-технические, и образовательные задачи. Значительные усилия и ресурсы были потрачены на развитие научно-технической инфраструктуры, которая станет основой для дальнейшего развития приборной базы экспериментальных станций на источниках нейтронов.

В ходе выполнения задач третьего этапа были реализованы проекты создания уникальных детекторов тепловых нейтронов, параметры которых превосходят параметры детекторов, используемых на станциях нейтронного рассеяния научных центров Российской Федерации. При этом были разработаны детекторы разного типа: на базе сцинтиллятора  $ZnS/{}^6LiF$  разработаны и протестированы счетчики и позиционно-чувствительные детекторы. Разработка новых детекторов позволила запустить новый дифрактометр «СФЕРА» на источнике тепловых нейтронов ИИ-06 в ИИИ РАН. На основе тонкопленочного конвертера из карбида бора  $B_4C$  разработаны позиционно-чувствительные детекторы типа «строу-трубок», создан механический фильтр нейтронного пучка, способный значительно улучшать фоновые условия нейтронного эксперимента, особенно на источнике нейтронов импульсного типа. Выполнены научно-исследовательские работы по изучению свойств тонкопленочных структур, которые являются основой для создания нейтронных детекторов в рамках проекта. Разработана технология нанесения покрытий на основе карбида бора  $B_4C$  на полимерные пленки с высокой температурой плавления – полиимид и лавсан, позволившая реализовать новый тип детекторов типа «строу-трубка», которые ранее не использовались на станциях нейтронного рассеяния.

Во время реализации третьего этапа был закончен крупный инфраструктурный проект создания опытно-экспериментального участка (ОЭУ) по нанесению тонкопленочных борсодержащих покрытий. Были переоборудованы почти 500 кв. м. площадей под создание современной лаборатории, оснащенной передовым оборудованием для создания детекторов тепловых нейтронов на основе конвертера из тонкопленочного карбида бора В<sub>4</sub>С. ОЭУ включает в себя чистые помещения с напылительной установкой магнетронного типа, помещения для подготовки подложек, комнаты для проведения тестовых измерений с портативным источником тепловых нейтронов. В 2023 г. ОЭУ был введен в эксплуатацию, и в 2024 г. должны начаться работы по изготовлению детекторов как исследовательских целях, так и по заказам от различных нейтронных центров Российской Федерации.

Третий этап отличался масштабной образовательной деятельностью. Была проведена 3-я научно-практическая конференция для молодых ученых «Задачи и методы нейтронных исследований конденсированных сред». Конференция хорошо зарекомендовала себя за время реализации проекта, и есть все основания считать, что она продолжит свою деятельность и в будущем, уже после завершения проекта. На базе образовательных организаций, участвующих в проекте, были реализованы курсы повышения квалификации, образовательные курсы, по которым прошли обучение в общей сложности более 140 человек. На базе научно-экспериментального отдела комплекса спектрометров ИБР-2 Лаборатории нейтронной физики им. И.М. Франка был организован курс практических занятий для студентов Государственного университета «Дубна», который пошли более 100 учащихся. Занятия вызвали живой интерес у студентов, многие из которых выразили желание выбрать в качестве своей специализации технику нейтронного эксперимента. Это является лучшим показателем качества выполнения поставленных задач в рамках выполнения проекта по привлечению молодых кадров в область наук, связанных с исследованиями нейтронными и синхротронными. Кроме этого было проведено переоснащение учебных лабораторий новым оборудованием и техникой, что серьезно повысит качество подготовки специалистов.

Было продолжено плодотворное сотрудничество с предприятием реального сектора экономики с АО НИИТФА, входящей в Госкорпорацию «Росатом». Используя разработанную технологию напыления пленок карбида бора на алюминиевые поверхности совместно со специалистами АО НИИТФА были изготовлены счетчики нейтронов. Было проведено сравнительное исследование чувствительности пропорциональных счетчиков тепловых нейтронов с покрытием катода, выполненным по двум технологиям: нанесения суспензии бора аморфного (используемого в НИИТФА), а также магнетронного нанесения карбида бора. Предприятие выразило заинтересованность в дальнейшем сотрудничестве и использовании детекторов нейтронов, изготовленных по разработанным в рамках проекта технологиям в производственных целях.

Подводя итоги третьего этапа можно сказать, что он оказался успешным и высоко продуктивным, все поставленные задачи были выполнены. Полученные результаты послужат хорошей основой для последующего развития приборной базы станций нейтронного рассеяния на источниках нейтронов в Российской Федерации и для привлечения молодых кадров, имеющих мотивацию в развитии карьеры в области наук, связанных с рассеянием нейтронного и синхротронного излучений.

### 3.1 Мероприятия по проведению синхротронных и нейтронных исследований (разработок), необходимых для решения принципиально новых фундаментальных и крупных прикладных задач

#### 3.1.1 Создание и испытание многослойных детекторов нейтронов с твердотельным борным конвертером

В ЛНФ, Научно-экспериментальный отдел комплекса спектрометров (НЭОКС) ИБР-2, изготовлен и испытан многослойный детектор медленных нейтронов с твердотельным конвертером из карбида бора  $B_4C$  на полимерной пленке.

Был разработан, изготовлен и протестирован многослойный детектор, чувствительная зона которого состоит из 6-ти строу-трубок с напылением  $B_4C$  для регистрации тепловых нейтронов. Для изготовления строу-трубок слой  $B_4C$  наносился на полимерную пленку методом вакуумного осаждения. Каждая строу-трубка сварена с помощью ультразвука и имеет диаметр 10 мм. Сварка осуществляется из полоски пленки, которую закрепляют на специально подготовленном стержне с отверстиями необходимыми для удержания пленки с помощью вакуума и формирования нахлеста для сварки. Процесс сварки происходит за счет акустических колебаний головки – сонотрода. Колебания головки воздействуют на свариваемые пленки, собранные внахлест, с перекрытием порядка 1 мм, что делает трубку практически однослойной. После сваривания трубки вакуум отключается; в стержень, на котором происходила сварка, подается избыточное давление. За счет попадания воздуха между стержнем и трубкой, изготовленная трубка легко снимается. Фото такой трубки представлено на рис. 2.1.1.1. Трубка изготовлена из металлизированного лавсана (20 мкм) с нанесенным на алюминиевую подложку слоем  $B_4C$  с толщиной 550 нм. Толщина напыления  $PET/AL/B_4C$  была исследована методом эллипсометрии.



Рисунок 3.1.1.1. Сварной шов трубки из лавсана с покрытием  $B_4C$  на внутренней стороне цилиндра.

Для строу детектора был изготовлен корпус, который обеспечил закрепление трубок и анодных 30 мкм. проволоки. Корпус обеспечивает газовый проток рабочей смеси, а также подвод высокого напряжения и считывание сигналов (рис. 3.1.1.2).

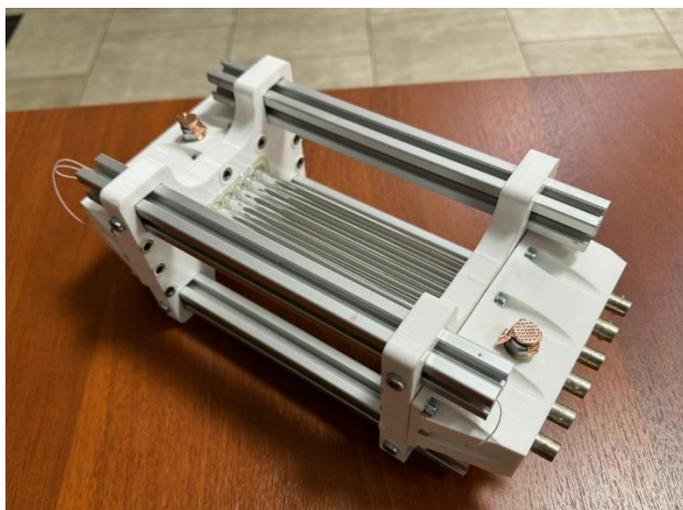


Рисунок 3.1.1.2. Многослойный строу детектор в сборе.

Целью измерений являлась проверка работоспособности детектора и оценка эффективности по сравнению с  $^3\text{He}$  счетчиком (He-13/120-8.0), который использовался в качестве эталона. Измерения проводились с источником нейтронов  $^{252}\text{Cf}$ , в качестве рабочего газа была использована смесь Ar/CO<sub>2</sub> в двух пропорциях (90/10% и 70/30%) в проточном режиме. Поток нейтронов от источника  $^{252}\text{Cf}$ , помещенного в полиэтиленовый куб (18×18×18 см<sup>3</sup>), был перекрыт листом кадмия (Cd) толщиной 1мм с окном размерами 1×6 см<sup>2</sup> ориентированным горизонтально. Лист кадмия был закреплен таким образом, чтобы центр окна находился в горизонтальной плоскости с источником  $^{252}\text{Cf}$ . Строу детектор был расположен на подложке из блоков свинца, полиэтилена и кадмия толщиной 2 мм (рис. 3.1.1.3). Высота подложки была подобрана таким образом, чтобы строу-трубки полностью перекрывали окно в кадмиевом листе, перекрывающем поток от источника нейтронов и плоскость 6-ти строу трубок была горизонтальна (рис. 3.1.1.4).



Рисунок 3.1.1.3. Блок с замедлителем и место расположения детектора.

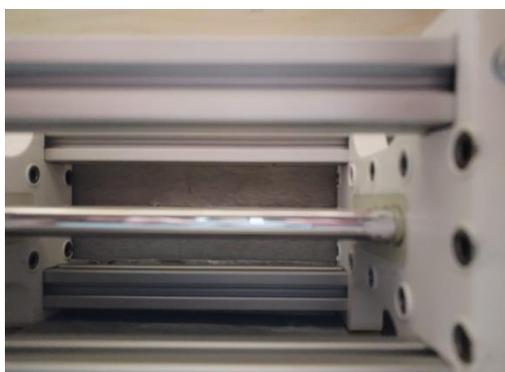


Рисунок 3.1.1.4. Расположение детектора относительно окна в кадмиевом листе. Окно перекрыто полностью.

Детектор в составе экспериментальной установки представлен на рис. 3.1.1.5. Детектор обернут в кадмиевый лист для дополнительной защиты от фона.



Рисунок 3.1.1.5. Детектор в составе экспериментальной установки.

Детектор работает в проточном режиме. Перед началом измерений, с помощью системы подачи и отвода газовой смеси (рис. 3.1.1.6) было задано процентное отношение  $\text{Ar}/\text{CO}_2$  - 90/10 и скорость потока  $40 \text{ см}^3/\text{час}$ . Регуляторы расхода газа позволяют точно задать процентное соотношение между компонентами смеси и скорость потока при подаче на них соответствующего напряжения. Работа системы показала стабильность, что наблюдалось по равномерности скорости образования пузырьков в масляном затворе. После этого в систему подачи и отвода газовой смеси был подключен детектор и продувался в течение 17 часов. Скорость образования пузырьков не изменилась существенно, продувка детектора оставалась равномерной в течении всего времени проведения исследований.

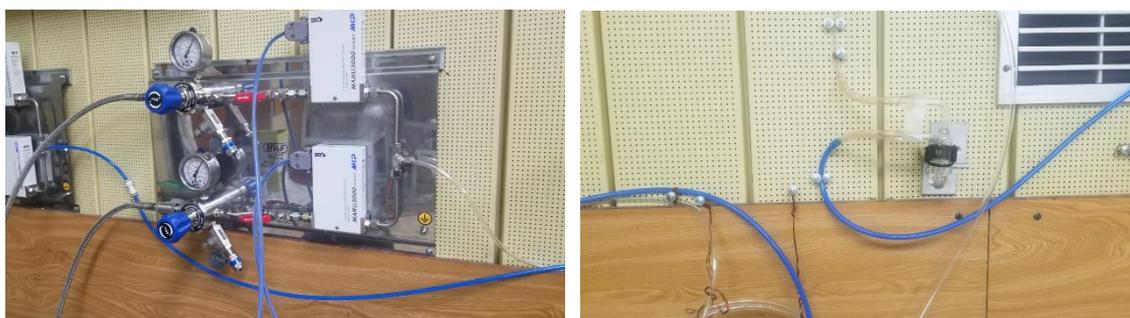


Рисунок 3.1.1.6. Система подачи и отвода газовой смеси: слева -газовый пульт, справа — масляный затвор.

После того как продувка завершилась, детектор был подключен в систему сбора и накопления данных. Система сбора и накопления данных включает в себя: 6-ти канальный зарядочувствительный предусилитель (коэффициент усиления  $5\text{V}/\text{pQ}$ ), 8-ми канальный модуль дигитайзера CAEN N6730 с программным обеспечением COMPASS. Дигитайзер был подключен к компьютеру через оптический интерфейс оптика USB 3.0. На предусилитель подавалось высоковольтное и низковольтное питание. Блоки питания и дигитайзер включены в крейт NIM (рис. 3.1.1.7).

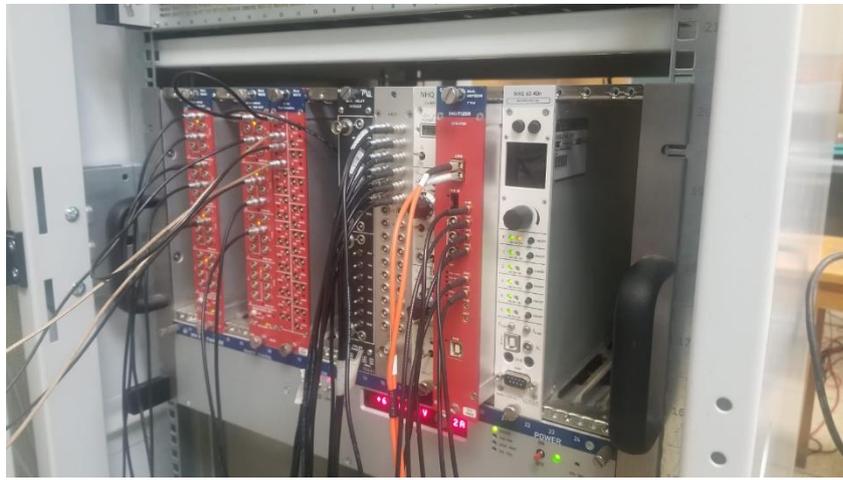


Рисунок 3.1.1.7. Крейт NIM с блоками питания и 8-ми каналным модулем дигитайзера CAEN N6730.

Перед набором данных детектор выводился в рабочий режим путем постепенного повышения высокого напряжения до рабочего ( $U=908\text{В}$ ) с контролем уровня амплитуды сигнала и отсутствием пробоев в детекторе. Набор данных был приведен при двух рабочих смесях с процентным отношением  $\text{Ar}/\text{CO}_2$  — 90/10% и 70/30%. С каждой строу-трубки детектора сигнал снимался индивидуально. Полученные в результате испытания детектора измеренные амплитудные спектры показаны на рис. 3.1.1.8 и 3.1.1.9. Счетчики пронумерованы в порядке удаления от источника нейтронов  $^{252}\text{Cf}$ . В амплитудном спектре, полученном со строу-трубок, четко выделяются пики, соответствующие полной потере кинетической энергии продуктов реакции конверсии в газовом объеме. Подложки слева от пиков обусловлены стеночным эффектом.

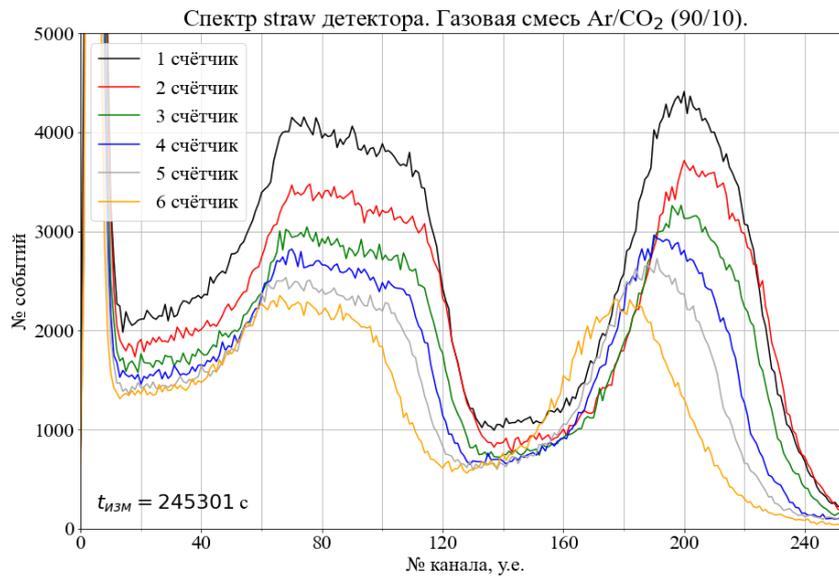


Рисунок 3.1.1.8. Амплитудные спектры детектора с газовой смесью  $\text{Ar}/\text{CO}_2$  (90/10%).

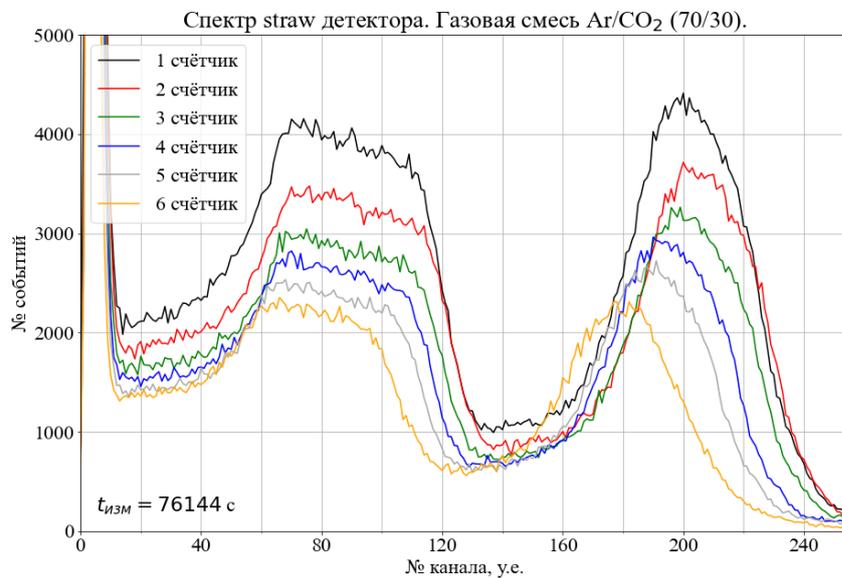


Рисунок 3.1.1.9. Амплитудные спектры детектора с газовой смесью Ar/CO<sub>2</sub> (70/30%).

Для оценки эффективности детектора были проведены измерения с <sup>3</sup>He счетчиком (He-13/120-8.0), который использовался в качестве эталона. Следует отметить/ что чувствительные области детекторов различаются почти в 2 раза (~1.3×6 см<sup>2</sup> для He-13 и 1×15 см<sup>2</sup> для строу-детектора) и конструкция детектора не позволяет провести измерения непосредственно у окна в кадмиевом листе, поэтому в настоящий момент возможно только качественная оценка эффективности детектора. Счетчик был помещен в положение, которое приблизительно соответствует положению строу-трубки № 1. Счетчик был подключен к системе сбора и накопления данных и набран амплитудный спектр при рабочем напряжении согласно его паспортным данным (рис. 3.1.1.10).

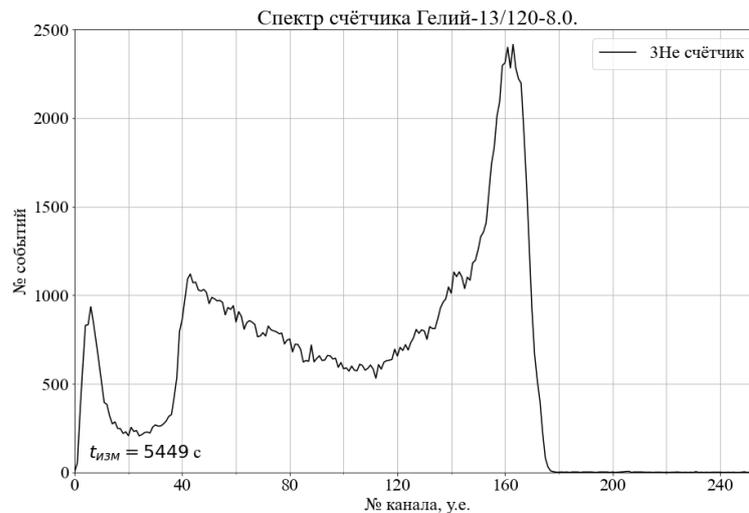


Рисунок 3.1.1.10. Амплитудный спектр счетчика He-13/120-8.0.

На рис. 3.1.1.11 показана нормированная на время измерения скорость счета для каждой трубки строу-детектор, а также скорость счета счетчика He-13, которая составила 24.82 нейтрона/с. Общая скорость счета строу-детектора составляет порядка 11-12 нейтронов/с. Таким образом, относительная чувствительность к тепловым нейтронам составляет 42 % при работе в газовой смеси 90%Ar/10%CO<sub>2</sub> и 46 % при работе в газовой смеси 70%Ar/30%CO<sub>2</sub> по сравнению с чувствительностью счетчика He-13.

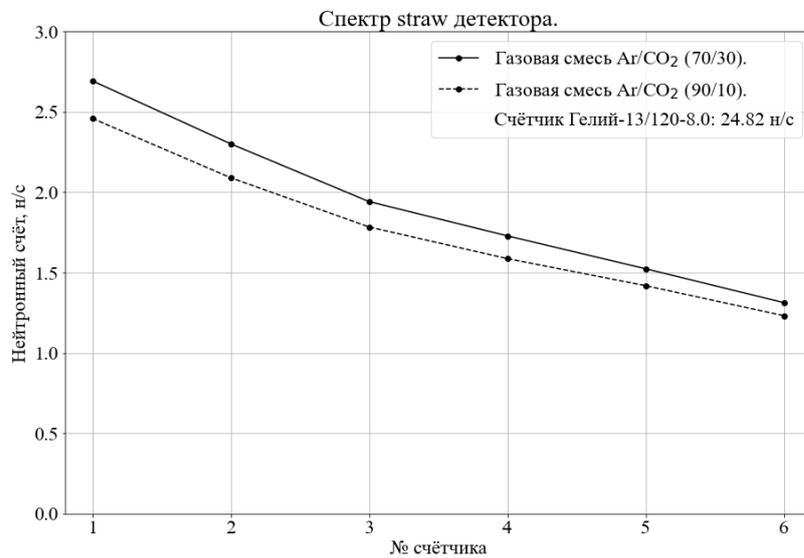


Рисунок 3.1.1.11. Нормированная по времени скорость счета нейтронов различными строу-трубками детектора.

Проведенные испытания показывают, что эффективность многослойного строу детектора нелинейно увеличивается, достигая насыщения, в зависимости от числа слоев и толщины слоя В<sub>4</sub>С. В амплитудном спектре пики, соответствующие полной потере кинетической энергии продуктов реакции конверсии в газовом объеме, хорошо видны и легко отделяются от гамма-фона путем установления порога. Согласно расчетам, дальнейшее усовершенствование конструкции детектора путем увеличения количества трубок и толщины слоя конвертера В<sub>4</sub>С, приведет к созданию детекторов с высокой эффективностью к тепловым нейтронам. Так, для строу детектора с количеством трубок в слое вдоль пучка 15 и толщине напыления 1.5 мкм эффективность детектора составит порядка 58% для нейтронов с длиной волны 1.8А.

#### ПРИЛОЖЕНИЯ

- Техническое задание на многослойные детекторы. ФАЙЛ: [Прил. ПГ 3.1.1 Техническое задание.pdf](#)
- Программа и методика испытаний. ФАЙЛ: [Прил. ПГ 3.1.1 Программа и методика испытаний.pdf](#)
- Акт испытаний. ФАЙЛ: [Прил. ПГ 3.1.1 Акт испытаний.pdf](#)
- Протокол испытаний. ФАЙЛ: [Прил. ПГ 3.1.1 Протокол испытаний.pdf](#)
- Конструкторская документация. ФАЙЛ: [Прил. ПГ 3.1.1 Конструкторская документация.pdf](#)
- Акт изготовления. ФАЙЛ: [Прил. ПГ 3.1.1 Акт изготовления.pdf](#)

### 3.1.2 Изготовление и испытания механического прерывателя пучка нейтронов с временной фокусировкой

Определяющим фактором качества получаемых экспериментальных данных является отношение сигнал-шум. Поэтому в любом эксперименте вопрос подавления посторонних шумов или фона является принципиальным. В экспериментах по нейтронному рассеянию, где источником нейтронов служит реактор, одним из главных инструментов подавления фона является механический прерыватель пучка. Его основная задача состоит в открытии канала распространения пучка нейтронов на строго определенное время, которое позволит пропустить нейтроны требуемого спектрального диапазона, и излученных в определенном временном интервале. Канал пучка для всех остальных нейтронов должен перекрываться поглощающим материалом прерывателя. Такой способ формирования пучка нейтронов используется на установках на импульсном реакторе ИБР-2. Как правило, это вращающийся вокруг своей оси полнотелый цилиндр из поглощающего нейтроны материала с вырезанным каналом или поглощающий нейтроны диск с вырезанным

сектором. Фаза вращения прерывателя строго коррелирована с импульсами реактора, и, таким образом, характеристики пучка нейтронов остаются постоянными для всех импульсов реактора. Спектр нейтронного излучения от замедлителя реактора в каждый момент времени охватывает весь диапазон энергий, согласно распределению Максвелла. Интенсивность излучения зависит от значения мощности реактора, которая в случае реактора ИБР-2 не опускается до нуля даже между импульсами мощности. На импульсных источниках нейтронов наиболее удобной методикой проведения измерений является метод времени пролета, в котором скорость нейтронов определяется по времени пролета расстояния от источника до детектора с началом отсчета времени в момент импульса. Для определения скорости нейтронов с хорошим разрешением важно, чтобы в канал распространения пучка не попали нейтроны, излученные в моменты времени за пределами временной ширины импульса источника, иначе такие нейтроны будут смешиваться с нейтронами, излученными в период длительности импульса, и будут вносить искажения в определение величины скорости зарегистрированных нейтронов. Задача прерывателя как раз и состоит в поглощении нейтронов, родившихся вне импульса источника.

Принцип работы прерывателя легко проиллюстрировать с помощью временной диаграммы, на которой по оси абсцисс откладывается время, а на оси ординат – пролетная база (рис. 3.1.2.1а). Окно прерывателя позволяет нейтронам из импульса с диапазоном скоростей от  $v_{pulse\ min}$  до  $v_{pulse\ max}$  и всем нейтронам излученным во временном интервале  $\Delta t$  пройти, остальные же будут поглощены. Как видно из диаграммы, прерыватель типа, изображенного на рис. 3.1.2.1а открывает довольно широкое временное окно  $\Delta t$ , в которое пролетают нейтроны вне импульса.

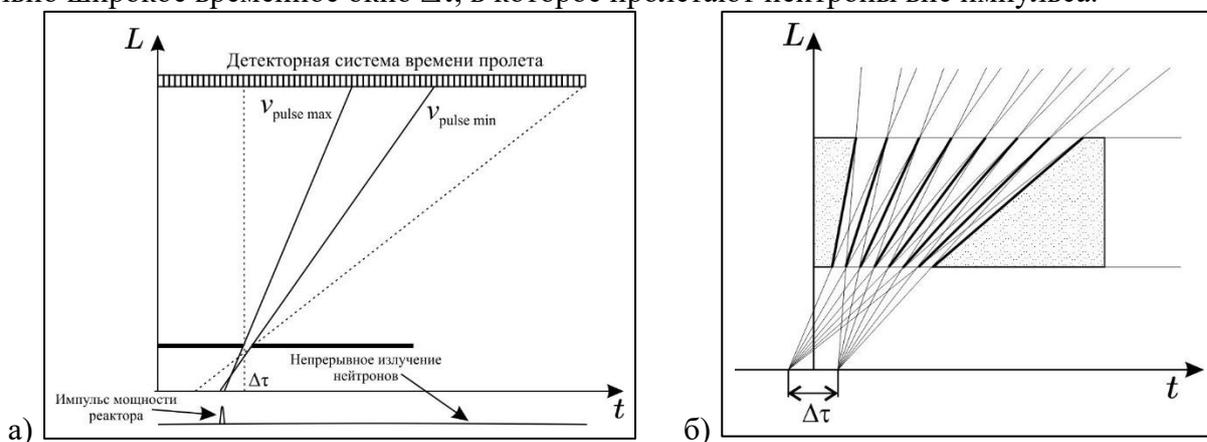


Рисунок 3.1.2.1. Времяпролетные диаграммы механических прерывателей пучка. а) диаграмма, демонстрирующая принцип работы дискового(барабанного) прерывателя. На расстоянии от источника расположен детектор, который накапливает количество нейтронов в узких временных каналах. Отдельный временной канал соответствует определенному диапазону скоростей  $\Delta v$ . Сплошные линии указывают на спектральный диапазон от самого импульса, пунктирные линии показывают весь спектральный диапазон нейтронов, который пропустит прерыватель. б) Диаграмма, демонстрирующая принцип работы изобретения. Никакие нейтроны, кроме тех, что были излучены в интервале времени  $\Delta t$  не смогут попасть в детектор.

Предложенная конструкция (рис. 3.1.2.2) позволяет уменьшить временное окно видимости источника  $\Delta t$  и тем самым убрать из пучка нейтроны, излученные вне импульса источника. Достигается это тем, что прерыватель имеет форму цилиндра и его окно представляет собой набор узких расходящихся каналов без прямой видимости, каждый из которых может пропустить строго определенный диапазон скоростей нейтронов лишь в требуемом диапазоне времени (Рис. 3.1.2.1б). Величина этого интервала и его положение на временной оси будет определяться конкретными характеристиками конструкции. Для реактора ИБР-2, очевидно таким интервалом должен быть выбран импульс реактора. Более того размеры каналов можно подобрать таким образом, что отношение  $\Delta v/v$  будет постоянным для всего спектрального интервала.

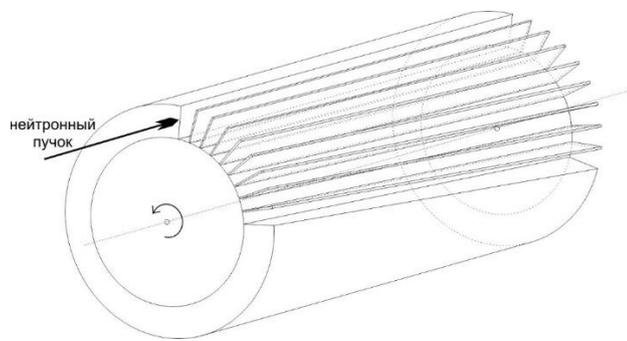


Рисунок 3.1.2.2. Механический фильтр нейтронного пучка с временной фокусировкой. Конфигурация каналов может быть подобрана таким образом, чтобы нейтроны, излученные в определенный интервал времени, могли проходить через каналы фильтра, остальные же поглощались.

Кроме того, данное изобретение может быть применено на постоянных источниках нейтронов для организации времяпролетной методики измерений.

На основании изложенной концепции был спроектирован и изготовлен механический фильтр нейтронной пучка.

#### ПРИЛОЖЕНИЯ

- Протокол испытаний. ФАЙЛ: [Прил. ПГ 3.1.2 Протокол испытаний.pdf](#)
- Программа и методика испытаний. ФАЙЛ: [Прил. ПГ 3.1.2 Программа и методика испытаний.pdf](#)
- Акт испытаний. ФАЙЛ: [Прил. ПГ 3.1.2 Акт испытаний.pdf](#)
- Акт изготовления. ФАЙЛ: [Прил. ПГ 3.1.2 Акт изготовления.pdf](#)

### 3.1.3 Расчет конфигурации нейтронной системы рефлектометра для импульсного источника нейтронов моделированием методом Монте-Карло с применением программного пакета VITESS Mc Stas. Разработка математической модели нейтронной системы рефлектометра.

#### Введение

В нейтронной рефлектометрии цель эксперимента заключается в том, чтобы измерить коэффициент отражения  $R$  нейтронов от образца в зависимости от переданного импульса  $q$ . Характерная величина для этого коэффициента имеет в среднем величину  $10^{-3}$ . На современных установках эта величина может достигать уровня  $10^{-5}$  и ниже. Поэтому особое внимание должно быть уделено проблеме фонового излучения и проведение оптимизаций для его уменьшения. В связи с этим, должна быть решена задача по поиску оптимального размера замедлителя (или окна, через которое нейтроны вылетают из замедлителя). Если размер или его окно будет превышать область, из которой нейтроны гарантировано попадают в место установки образца, то такие нейтроны будут рассеяны на разных узлах инструмента, что с большой вероятностью приведет к их попаданию в детекторную систему. Часть этих нейтронов будет поглощена с выделением гамма излучения, которое также может быть задетектировано системой набора данных, хоть и с малой эффективностью. Но если брать во внимание требуемый для измерения уровень коэффициента отражения  $10^{-5}$ , то и это может быть источником искажений, получаемых данных.

#### Оптимизация параметров нейтронной системы рефлектометра

Для определения оптимального размера окна замедлителя требуется выяснить геометрические параметры и покрытие нейтронной оптики, расстояние от замедлителя до ее начала. В свою очередь параметры оптики должны быть определены из размеров образца, требуемого спектра пучка нейтронов и его расходимости.

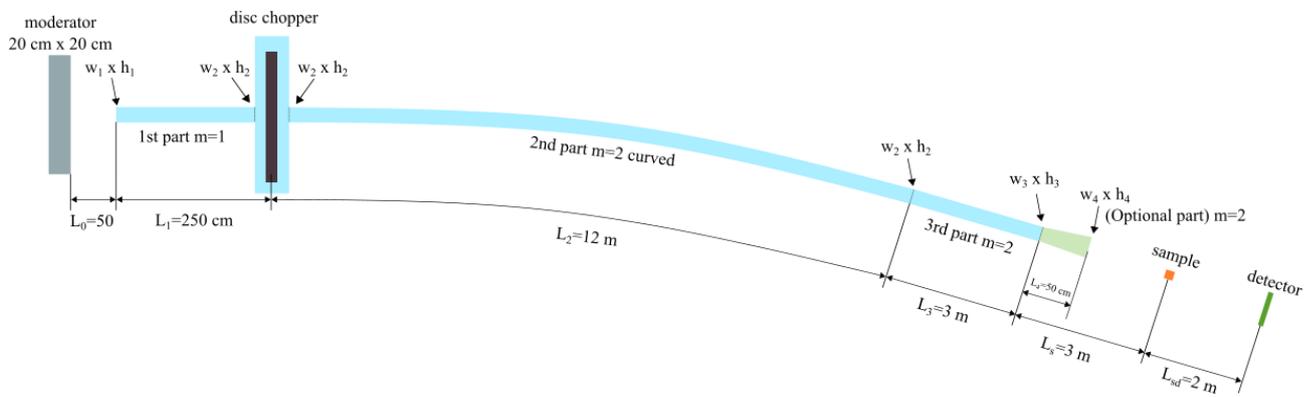


Рисунок 3.1.3.1. Общая схема рефлектометра. Вид сверху. Нейтронная система состоит из трех частей: линейная с  $m = 1$ , изогнутая  $m = 2$ , линейная  $m = 2$ . Линейные части используются для получения равномерного пучка вдоль горизонтальной плоскости. Зеленым цветом в окончании оптики изображена дополнительная (опциональная) секция для измерений с меньшим угловым разрешением.

Для определенности будем рассматривать рефлектометр в вертикальной геометрии (плоскость образца располагается вертикально, отражение происходит в горизонтальной плоскости) (рис. 3.1.3.1). В таком случае пучок должен быть узким, вытянутым по вертикали. Образец для нейтронной рефлектометрии может быть абсолютно разных размеров ( $25 \times 25 \text{ мм}^2$ ,  $5 \times 50 \text{ мм}^2$ ,  $70 \times 100 \text{ мм}^2$ ), разной формы. Поэтому имеет смысл взять некий средний размер, допустим квадрат со стороной  $s = 50 \text{ мм}$ . Ширина падающего пучка должна определяться из угла скольжения нейтронов и ширины образца. Опять же, угол скольжения в конкретном эксперименте может быть разным: от единиц миллирадиан до десятков и даже сотен, поэтому необходимо взять некое типичное значение. Предположим угол скольжения  $\theta = 30 \text{ мрад}$ , угловое разрешение 5%, соответственно расходимость пучка  $\theta_{res} = \pm 1.5 \text{ мрад}$  вдоль плоскости отражения. Таким образом для того, чтобы падающий пучок нейтронов полностью попадал на образец, его размер по горизонтали должен быть 1.5 мм. Если падающий на образец пучок нейтронов будет шире, то будет происходить рассеяние нейтронов на держателе образца и (или) системы окружения образца, что определенно приведет к повышению фонового излучения, попадающего в детектор.

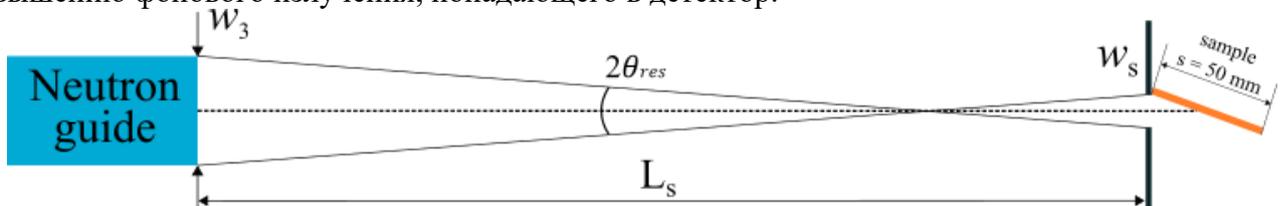


Рисунок 3.1.3.2. Ширина выходного окна зависит от размера образца и требуемого углового разрешения.

На пути нейтронов от окончания нейтронной оптики до образца могут быть установлены другие элементы установки: спин-флиппер, анализатор поляризации пучка, коллимационные щели, и др. Для этого расстояние от окончания оптики до положения образца  $L_s$  будет иметь величину 3 метра. Будем считать, что расходимость пучка будет задаваться с помощью двух щелей: первая установлена вблизи окончания оптики, вторая вблизи исследуемого образца. Очевидно, что для минимизации возможного фона от перерассеянных или поглощенных нейтронов размер щелей должен соответствовать размерам ширины нейтронвода  $w_{NG}$  и эффективной ширины образца (foot print)  $w_s$  (рис. 3.1.3.2). И их размеры должны соответствовать требованиям к расходимости пучка  $\theta_{res}$ :

$$\frac{w_3 + w_s}{2L_s} = \theta_{res}. \quad (3.1.3.1)$$

Таким образом оптимальная ширина выходного окна нейтронвода будет определяться как:

$$w_3 = 2L_s\theta_{res} - w_s. \quad (3.1.3.2)$$

При параметрах, предложенных ранее,  $w_3$  имеет величину 7.5 мм. Высоту выходного окна предлагается определить через критический угол отражения (рис. 3.1.3.3). Центральная часть нейтроновода будет изогнутой в горизонтальной плоскости, для того чтобы избавиться от прямой видимости поверхности замедлителя и быстрых нейтронов (менее 1 Ангстрема). В качестве внутренней отражающей поверхности предлагается использование суперзеркал с качеством отражающей поверхности  $m = 2$ . В этом случае для нейтронов 1 ангстрем критический угол отражения  $\gamma_{crit} = 3.46$  мрад. То есть после прохождения изогнутой части нейтроновода, оставшиеся нейтроны будут гарантировано отражаться от стенок при углах скольжения, не превышающих  $\gamma_{crit}$  (в зависимости от длины волны). Тогда высота выходного окна нейтроновода будет определяться следующим образом:

$$h_3 = 2\gamma_{crit}L_s + h_s. \quad (3.1.3.3)$$

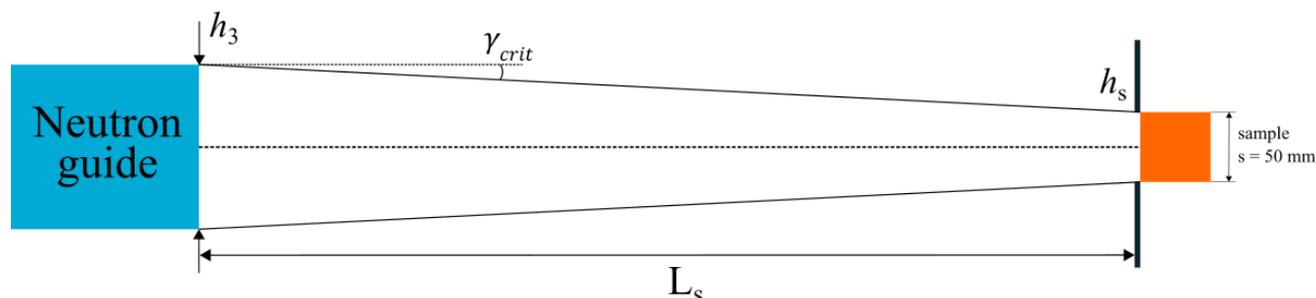


Рисунок 3.1.3.3. Высота выходного окна зависит от размера образца и качества покрытия  $m$ . Характеристическая длина волны нейтроновода  $\approx 1$  ангстрем.

Теперь, зная размеры выходного окна нейтроновода можно проводить дальнейшую оптимизацию системы методом Монте-Карло, изменяя его геометрию. Для этого можно использовать два варианта дальнейшего моделирования:

- 1) Установить источник нейтронов в месте расположения образца и использовать метод обратных лучей. Таким образом, меняя конфигурацию нейтроновода и отслеживая пятно пучка нейтронов и его интенсивность в области замедлителя можно определить оптимальный размер замедлителя (окна замедлителя) и конфигурацию нейтроновода.
- 2) Установить источник нейтронов там, где он и предполагается на установке. Меняя конфигурацию нейтроновода отслеживать интенсивность потока нейтронов на образце, определяя при каких параметрах достигается максимальное значение.

Однако, оба перечисленных варианта содержат в себе большое количество параметров, которыми будет описываться геометрия нейтроновода. Например, его сечение может быть варьировемым, геометрия отражающей поверхностью в некоторых областях или полностью может иметь разные формы: параболическая, эллиптическая, сходящаяся и т.д. Тем не менее, размер замедлителя должен зависеть от размера входного окна оптической системы. Оптимальный размер замедлителя с точки зрения минимизации количества нейтронов, которые будут поглощены нейтроноводом предлагается определить через критический угол для характеристической длины волны нейтроновода.

Второй способ может быть также полезен для оценки потока нейтронов, который попадает «мимо» образца, в держатель образца или другие узлы, составляющие общую систему окружения образца. В таком случае будет полезно определить в каком отношении соотносятся попадающий на образец пучок и пролетающий «мимо», переходящий потом в фоновое излучение, ухудшая статистический набор данных.

*Моделирование методом Монте-Карло с применением программного пакета VITESS*

Общая пролетная база замедлитель – детекторная система должна иметь величину около 23 метров (рис. 3.1.3.1). Предполагается, что минимально доступное расстояние, на котором можно установить нейтронный оптический канал будет иметь величину 50 см. На таком расстоянии от

источника нейтронов затруднительно использовать суперзеркальные секции в силу высокой интенсивности радиационного излучения, которое за непродолжительное время приведет в негодность такие секции. Возможным вариантом может быть использование цельнометаллических полированных секций, например, из никеля. В этом случае качество отражающей поверхности будет иметь величину  $m \approx 1$ . Дискретный прерыватель пучка расположен на расстоянии 3 метра от поверхности замедлителя. Затем следует изогнутая часть нейтронвода длиной 12 метров и качеством отражающей поверхности  $m = 2$ . Использование изогнутой части приводит к «прижиманию» пучка к внешней стенке, то есть пучок становится неравномерным в горизонтальной плоскости. Поэтому должна быть установлена линейная часть после изогнутой для выравнивания интенсивности пучка вдоль горизонтальной плоскости. Длина такой линейной части 3 метра с качеством отражающей поверхности  $m = 2$ . Входные и выходные окна линейной частей нейтронвода могут иметь разные размеры, что в определенных случаях может приводить к увеличению выходной интенсивности на выходе. Используемые размеры окон разных частей нейтронвода указаны в таблице 3.1.3.1. Используемые обозначения отображены на рис. 3.1.3.1.

Вариант	$L_0$ , см	$w_1 \times h_1$ , мм <sup>2</sup>	$L_1$ , м	$w_2 \times h_2$ , мм <sup>2</sup>	$L_2$ , м	$R_{curv}$ , м	$L_3$ , м	$w_3 \times h_3$ , мм <sup>2</sup>	Опционально (разрешение 10%) $L_4$ , см	Опционально (разрешение 10%) $w_4 \times h_4$ , мм <sup>2</sup>
1	50	7.5×70	2.5	7.5×70	12	2400	3	7.5×70	50	13.5×70
2	50	9×70	2.5	9×70	12	2000	3	7.5×70	50	13.5×70
3	50	9×80	2.5	9×80	12	2000	3	7.5×80	50	13.5×80
4	50	10×80	2.5	10×80	12	1800	3	7.5×80	50	13.5×80
5	50	12×90	2.5	12×90	12	1500	3	7.5×90	50	13.5×90
6	50	20×110	2.5	12×90	12	1500	3	7.5×90	50	13.5×90

Таблица 3.1.3.1. Параметры различных конфигураций нейтронводной системы. Зеленым цветом обозначены опциональные варианты. Желтым выделена конфигурация, в которой первая линейная часть нейтронвода имеет входное окно больше выходного.

Всего было смоделировано 12 различных конфигураций способом №2. Результаты проведенного моделирования представлены на рис. 3.1.3.5. Опционально предлагается использовать дополнительную линейно расходящуюся 4 часть нейтронвода с возможностью быстрого монтажа для измерений с меньшим угловым разрешением. В таблице 3.1.3.1 параметры этой части нейтронвода отображены в зеленых клетках. В таком случае расстояние от выхода нейтронвода до образца сокращается с  $L_s = 3$  метров до  $L_s' = 2.5$  и итоговое угловое разрешения будет следующим:

$$\frac{w_4 + w_s}{2L_s'} = \theta'_{res}. \quad (3.1.3.4)$$

При  $w_4 = 13.5$  мм и  $w_s = 1.5$  мм,  $\theta'_{res} = 3$  мрад, что составляет величину 10% для угла скольжения образца  $\theta = 30$  мрад.

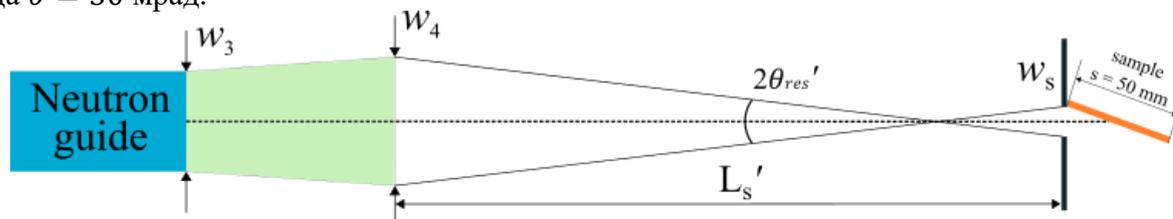


Рисунок 3.1.3.4. Схема окончания нейтронводной системы с дополнительной секцией для измерений с меньшим угловым разрешением.

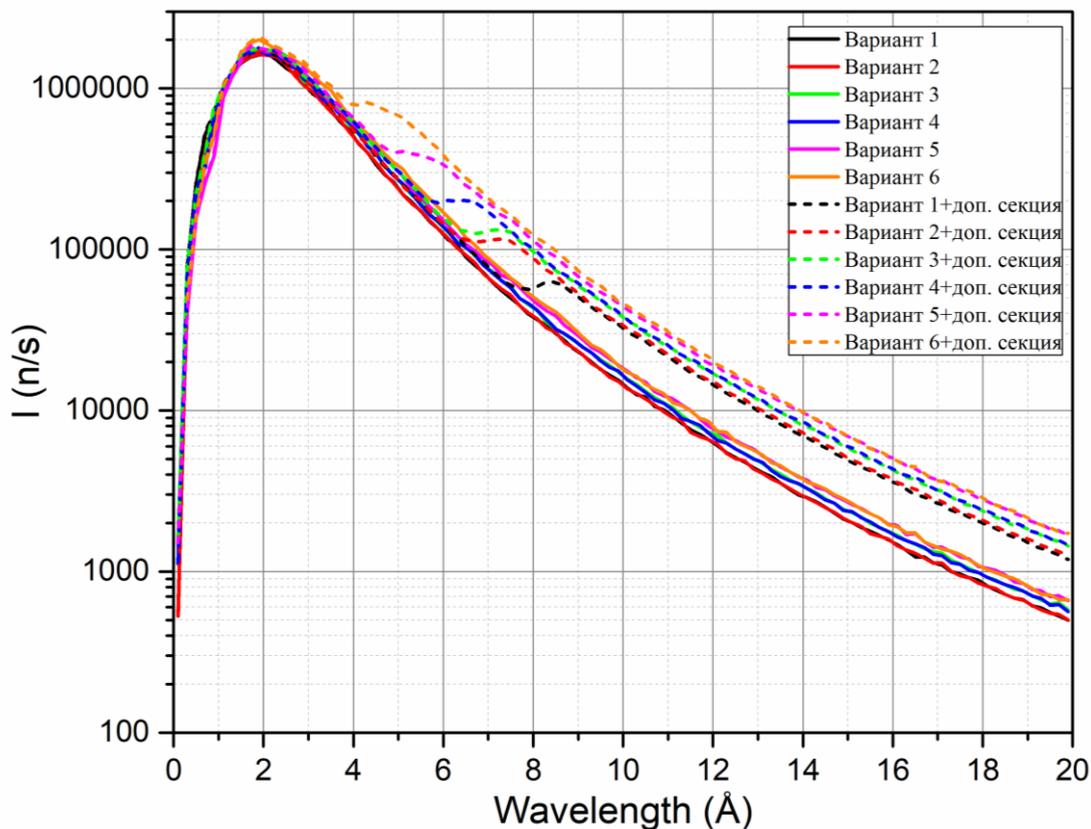


Рисунок 3.1.3.5. Результат Монте-Карло моделирования нейтронной системы при различных параметрах (табл. 3.1.3.1). Измерение интенсивности проводилось в месте установки образца и с площади, соответствующей полному перекрытию пучка образцом (foot print).

Также было проведено измерение интенсивности пучка нейтронов, который пролетает мимо образца. Отношение интенсивностей пучка, формирующего в дальнейшем фон (не попадающего на образец) и пучка, попадающего на образец представлено на рис. 3.1.3.6. В таблице 3.1.3.2 представлены интегральные значения интенсивности для обоих пучков.

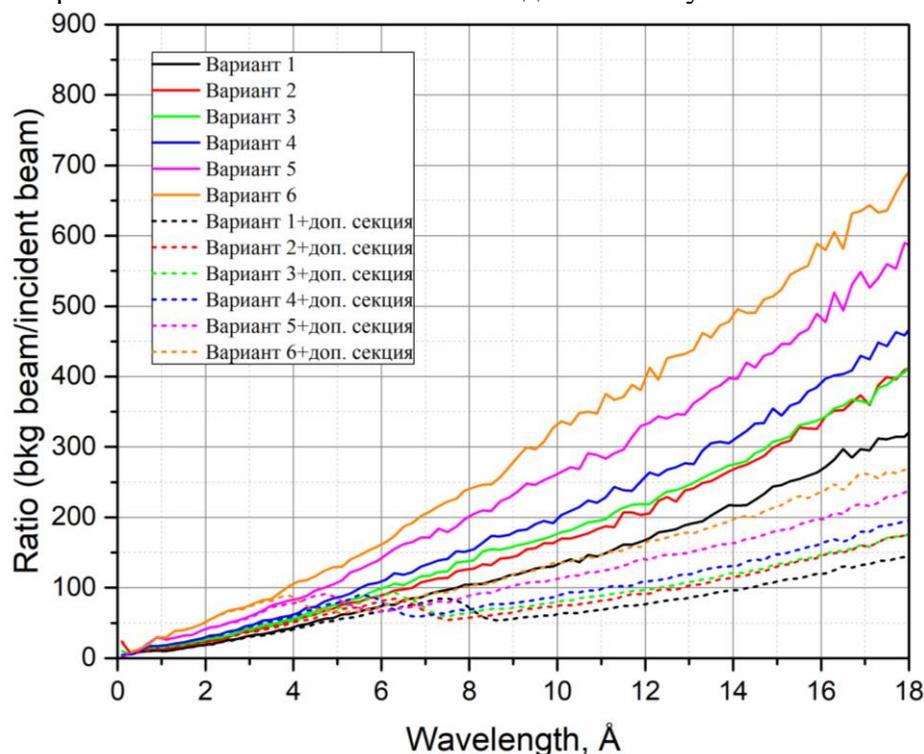


Рисунок 3.1.3.6. Полученные отношения интенсивностей пучков, падающих на образец (incident beam) и пролетающих мимо (bkg beam) в результате Монте-Карло моделирования нейтронной системы при различных параметрах (табл. 3.1.3.1). Измерение интенсивности проводилось в месте установки образца, с вычетом той области, которую перекрывает образец.

	Интенсивность падающего на образец пучка, н/с	Относительная интенсивность падающего на образец пучка (по отношению к Вар. №1), %	Интенсивность пучка, вне образца, н/с	Относительная интенсивность пучка вне образца (по отношению к падающему на образец пучку)
Вариант 1	2.26e7	100	6.84e8	30.03
Вариант 1 + доп. секция	2.47e7	109.3	7.07e8	28.62
Вариант 2	2.25e7	99.6	8.35e8	37.11
Вариант 2 + доп. секция	2.49e7	110.2	8.63e8	34.66
Вариант 3	2.4e7	106.2	9.9e8	41.25
Вариант 3 + доп. секция	2.65e7	117.3	1.02e9	38.50
Вариант 4	2.37e7	104.9	1.11e9	46.84
Вариант 4 + доп. Секция	2.66e7	99.6	1.14e9	42.86
Вариант 5	2.42e7	107.1	1.55e9	64.05
Вариант 5 + доп. Секция	2.81e7	124.3	1.6e9	56.94
Вариант 6	2.67e7	118.1	2.09e9	78.28
Вариант 6 + доп. Секция	3.28e7	145.1	2.15e9	65.55

Таблица 3.1.3.2. Интенсивности пучков, при различных конфигурациях нейтронной системы.

### Результаты

Полученные результаты моделирования в целом демонстрируют выигрыш от увеличения размера сечения нейтронной оптики и использования линейно сходящихся/расходящихся секций (до 45% в случае варианта 6 с дополнительной секцией и варианта 1). Однако в следствие таких изменений конфигурации нейтронной системы, увеличивается количество нейтронов, пролетающих мимо образца, ухудшая фоновые условия для измерений. Причем количество этих нейтронов увеличивается сильнее, чем тех, которые попадают на образец. Например, в случае варианта 6 с дополнительной секцией и варианта 1, интенсивность пучка, пролетающего мимо образца, увеличивается более чем в два раза, а выигрыш падающего на образец пучка составил около 45 процентов. Поэтому, необходимо определить их допустимое соотношение. Также было бы не лишним оценить возможный поток перерассеянных нейтронов в область измерения отраженного пучка. Данные оценки позволяют грамотно спроектировать систему защиты от фоновых нейтронов, которая позволит добиться измерений образцов с уровнем коэффициента отражения  $10^{-5}$  и ниже.

### 3.1.4 Создание прототипа регистрирующего газоразрядного модуля с твердотельным конвертером с активной площадью не менее $100 \times 100 \text{ мм}^2$ , пространственным разрешением не хуже $1.5 \times 1.5 \times 0.05 \text{ мм}^3$ (совместно с НИЦ «Курчатовский институт» – ПИЯФ) и проведение его испытаний

В ходе работ по проекту на третьем этапе проведены работы для создания прототипа регистрирующего газоразрядного модуля с твердотельным конвертером с активной площадью не менее  $100 \times 100 \text{ мм}^2$ , пространственным разрешением не хуже  $1.5 \times 1.5 \times 0.05 \text{ мм}^3$ .

Цель выполнения работы: создать прототип регистрирующего газоразрядного модуля с твердотельным конвертером с активной площадью не менее  $100 \times 100 \text{ мм}^2$ , пространственным разрешением не хуже  $1.5 \times 1.5 \times 0.05 \text{ мм}^3$ .

Прототип регистрирующего газоразрядного модуля с твердотельным конвертером с активной площадью не менее  $100 \times 100 \text{ мм}^2$ , пространственным разрешением не хуже  $1.5 \times 1.5 \times 0.05 \text{ мм}^3$  был создан на основании разработанного комплекта конструкторской документации с учетом требований стандартов ЕСКД ГОСТ 2.102-2013.

Комплект КД представлен в документации промежуточного отчета 3 этапа в составе:

- сборочный чертеж;
- чертеж общего вида;
- габаритный чертеж;
- ведомость покупных изделий для сборки детекторной системы;
- пояснительная записка;
- чертежи деталей прототипа.

Изготовление прототипа регистрирующего газоразрядного модуля с твердотельным конвертером с активной площадью не менее  $100 \times 100 \text{ мм}^2$ , пространственным разрешением не хуже  $1.5 \times 1.5 \times 0.05 \text{ мм}^3$  подтверждается Актом изготовления, который входит в состав документации промежуточного отчета 3 этапа. На рис. 3.1.4.1 представлен прототип регистрирующего газоразрядного модуля в собранном виде.

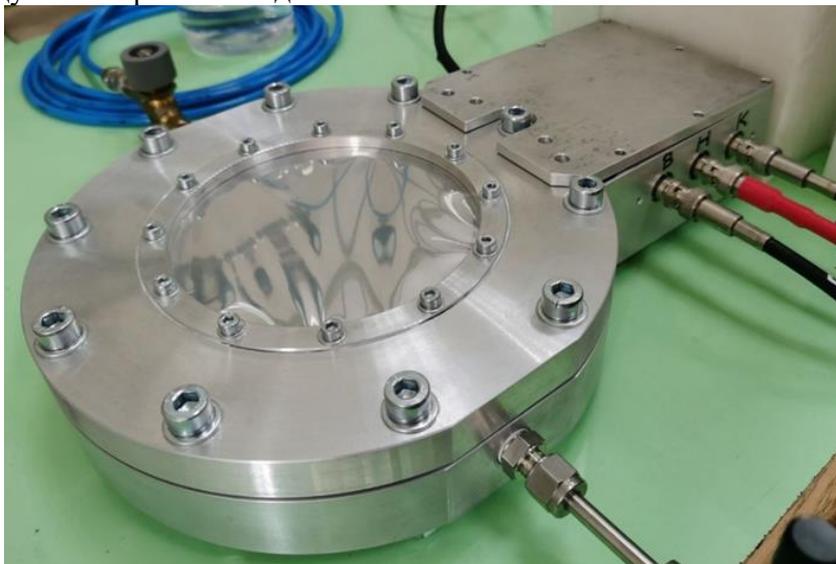


Рисунок 3.1.4.1. Прототип газоразрядного модуля с активной площадью  $100 \times 100 \text{ мм}^2$ .

Была проведена проверка параметров прототипа регистрирующего газоразрядного модуля с твердотельным конвертером в соответствии с Программой испытаний и методикой испытаний ПРГМ.01.00.00.000 ПМ, представленной в составе документации промежуточного отчета 3 этапа.

Для проверки работоспособности прототипа газоразрядного модуля с твердотельным конвертером были проведены испытания на гамма источнике  $^{55}\text{Fe}$  и альфа источнике  $^{234}\text{U}$  для прототипа с размером активной площади  $100 \times 100 \text{ мм}$ . Для наполнения прототипа использовалась газовая смесь  $90\% \text{Ar} + 10\% \text{CO}_2$ . В результате проведенных испытаний были получены

энергетические спектры (рис. 3.1.4.2, 3.1.4.3), подтверждающие работоспособность конструкции прототипа, что позволит обеспечить требуемое пространственное разрешение  $1.5 \times 1.5 \times 0.05$  мм.

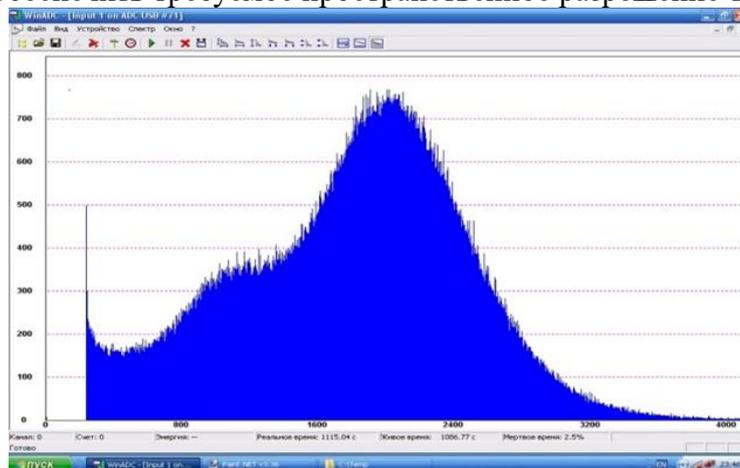


Рисунок 3.1.4.2. Энергетический спектр на гамма источнике  $^{55}\text{Fe}$  для газовой смеси 90%Ar+10%CO<sub>2</sub>.

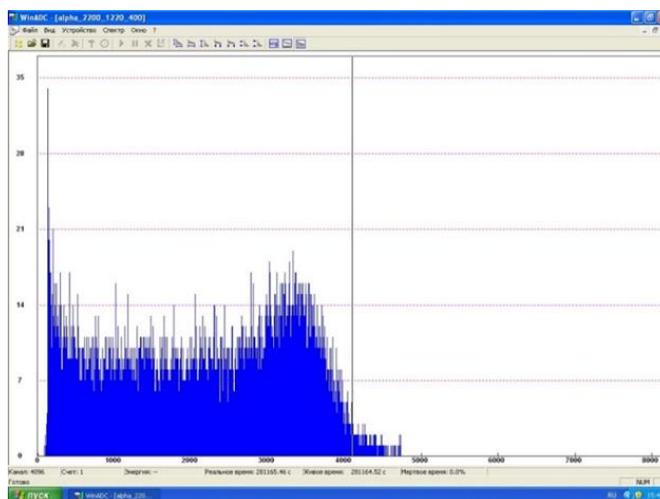


Рисунок 3.1.4.3. Энергетический спектр на альфа источнике  $^{234}\text{U}$  для газовой смеси 90%Ar+10%CO<sub>2</sub>.

Измерения на прототипе газоразрядного модуля  $100 \times 100$  мм проводились в соответствии со следующим алгоритмом:

1) Измерялся энергетический спектр гамма источника с энергией фотонов 5.9 Кэв  $^{55}\text{Fe}$  на газовой смеси 90%Ar+10%CO<sub>2</sub>. Выбрана оптимальная рабочая газовая смесь по максимальному амплитудному разрешению.

2) Регистрировался сигнал на аноде, находящемся под нулевым потенциалом через сопротивление 100 кОм. Ориентировочные напряжения на дрейфовом катоде -2000, на котором на сторону, обращенную к верхней плоскости THGEM (-) нанесен конвертер 10В<sub>4</sub>С толщиной 1 мкм; верхняя плоскость THGEM (-) -1500 В, нижняя плоскость THGEM (+) -400 В.

3) Измерялось парное разрешение по координатам и абсолютные координаты в плоскостях X, Y на источнике  $^{55}\text{Fe}$ .

4) Измерялось парное разрешение по координатам и абсолютные координаты в плоскостях X, Y на источнике тепловых нейтронов.

В результате испытаний на источнике тепловых нейтронов было выявлено, что если координатное разрешение в горизонтальной плоскости требуется лучше, чем заявленное  $1.5 \times 1.5$  мм, то в этом случае следует использовать конвертор, нанесенный на дрейфовый катод на основе 10В<sub>4</sub>С, с напыленным титаном (Ti) на внешнюю поверхность конвертора, обращенную к верхней плоскости THGEM (-). На рис. 3.1.4.4 демонстрируется улучшение пространственного разрешения в

горизонтальной плоскости в зависимости от толщины слоя напыления Ti на конвертер  $^{10}\text{B}_4\text{C}$ , нанесенного на дрейфовый катод и обращенного к верхней плоскости THGEM (-).

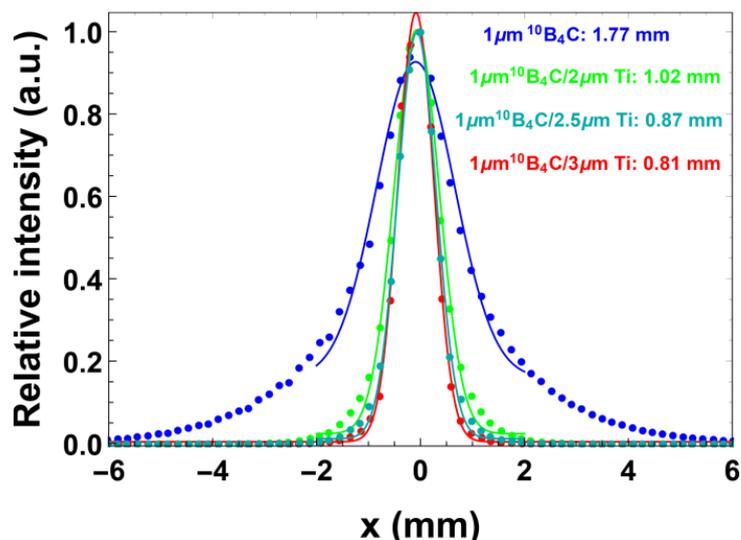


Рисунок 3.1.4.4. Улучшение пространственного разрешения в зависимости от увеличения толщины слоя напыления Ti на конвертер  $^{10}\text{B}_4\text{C}$ .

Испытания прототипа регистрирующего газоразрядного модуля с твердотельным конвертером с активной площадью не менее  $100\times 100\text{ мм}^2$ , пространственным разрешением не хуже  $1.5\times 1.5\times 0.05\text{ мм}^3$ , проведенные согласно пунктам Программы испытаний и методики испытаний, подтверждают, что изделие является работоспособным и может использоваться для проведения исследовательских работ.

Было установлено, что объект испытания прототип регистрирующего газоразрядного модуля с твердотельным конвертером с активной площадью не менее  $100\times 100\text{ мм}^2$ , пространственным разрешением не хуже  $1.5\times 1.5\times 0.05\text{ мм}^3$  соответствует параметрам, обозначенным в Техническом задании, а именно:

- прототип собран согласно требованиям конструкторской документации на прототип регистрирующего газоразрядного модуля с твердотельным конвертером с активной площадью не менее  $100\times 100\text{ мм}^2$ , пространственным разрешением не хуже  $1.5\times 1.5\times 0.05\text{ мм}^3$ ;
- активная площадь прототипа составляет  $100\times 100\text{ мм}^2$ ;
- пространственное разрешение прототипа не хуже  $1.5\times 1.5\times 0.05\text{ мм}^3$ .

#### ПРИЛОЖЕНИЯ

- Комплект конструкторской документации с учетом требований стандартов ЕСКД ГОСТ 2.102–201, включающий сборочный чертеж, чертеж общего вида, габаритный чертеж, ведомость покупных изделий для сборки детекторной системы, пояснительную записку, чертежи деталей прототипа. ФАЙЛ: [Прил. ПГ 3.1.4. Комплект констр докум.pdf](#)
  - Программа испытаний и методика испытаний. ФАЙЛ: [Прил. ПГ 3.1.4. Программа и методика испытаний.pdf](#)
- а также в составе документов, представленных в заключительном отчете 3 этапа:
- Акт изготовления. ФАЙЛ: [Прил. ПГ 3.1.4. Акт изготовления.pdf](#)
  - Акт испытаний. ФАЙЛ: [Прил. ПГ 3.1.4. Акт испытаний.pdf](#)
  - Протокол испытаний. ФАЙЛ: [Прил. ПГ 3.1.4. Протокол испытаний.pdf](#)

### **3.1.5 Разработка программного решения для определения координаты конверсии нейтрона на площади двумерного позиционно-чувствительного детектора нейтронов на основе сцинтилляторов ZnS/<sup>6</sup>LiF и твердотельных фотоэлектронных умножителей (совместно с НИЦ «Курчатовский институт» – ПИЯФ)**

В ходе работ по проекту на третьем этапе была проведена разработка программного решения для определения координаты конверсии нейтрона вдоль одномерного позиционно-чувствительного счетчика нейтронов на основе сцинтилляторов ZnS/<sup>6</sup>LiF и твердотельных фотоэлектронных умножителей, а также режекции гамма-фона с целью обеспечения существенного улучшения сигнал/шум.

Цель выполнения работы: разработать программное обеспечение, позволяющее определить координаты конверсии нейтрона вдоль одномерного позиционно-чувствительного счетчика нейтронов на основе сцинтилляторов ZnS/<sup>6</sup>LiF и твердотельных фотоэлектронных умножителей, а также программную документацию. Работа выполнена согласно п. 3.1.5 ПГ и п. 2.2, п. 3.2.2 ТЗ.

#### **ПРИЛОЖЕНИЯ**

- Текст программы по ГОСТ 19.401-78. ФАЙЛ: [\*Прил. ПГ 3.1.5. Текст программы.pdf\*](#)
- Описание применения. ФАЙЛ: [\*Прил. ПГ 3.1.5. Описание применения.pdf\*](#)
- Руководство системного программиста по ГОСТ 19.505-79. ФАЙЛ: [\*Прил. ПГ 3.1.5. Руководство системного программиста.pdf\*](#)
- Руководство оператора по ГОСТ 19.505-79. ФАЙЛ: [\*Прил. ПГ 3.1.5. Руководство оператора.pdf\*](#)

### **3.1.6 Создание двумерной позиционно-чувствительной многопроволочной камеры с апертурой не менее 200×200 мм<sup>2</sup> с пространственным разрешением не менее 2×2 мм<sup>2</sup> с поканальной регистрацией сигнала (совместно с НИЦ «Курчатовский институт» – ПИЯФ)**

В рамках выполнения проекта на третьем этапе были проведены работы по созданию прототипа двумерной позиционно-чувствительной многопроволочной камеры с апертурой не менее 200×200 мм<sup>2</sup> с пространственным разрешением не менее 2×2 мм<sup>2</sup> с поканальной регистрацией сигнала.

Цель выполнения работы: создать прототип двумерной позиционно-чувствительной многопроволочной камеры с апертурой не менее 200×200 мм<sup>2</sup> с пространственным разрешением не менее 2×2 мм<sup>2</sup> с поканальной регистрацией сигнала.

Прототип двумерной позиционно-чувствительной многопроволочной камеры с апертурой не менее 200×200 мм<sup>2</sup> с пространственным разрешением не менее 2×2 мм<sup>2</sup> с поканальной регистрацией сигнала был создан в соответствии с разработанным комплектом конструкторской документации с учетом требований стандартов ЕСКД ГОСТ 2.102-2013.

Комплект КД представлен в документации отчета 3 этапа в составе:

- сборочный чертеж;
- чертеж общего вида;
- габаритный чертеж;
- чертежи сборочных единиц;
- чертежи деталей;
- пояснительная записка.

Изготовление прототипа двумерной позиционно-чувствительной многопроволочной камеры с апертурой не менее 200×200 мм<sup>2</sup> с пространственным разрешением не менее 2×2 мм<sup>2</sup> с поканальной регистрацией сигнала подтверждается Актом изготовления, который входит в состав документации отчета 3 этапа. На рис. 3.1.6.1 представлен прототип двумерной позиционно-чувствительной многопроволочной камеры в собранном виде.

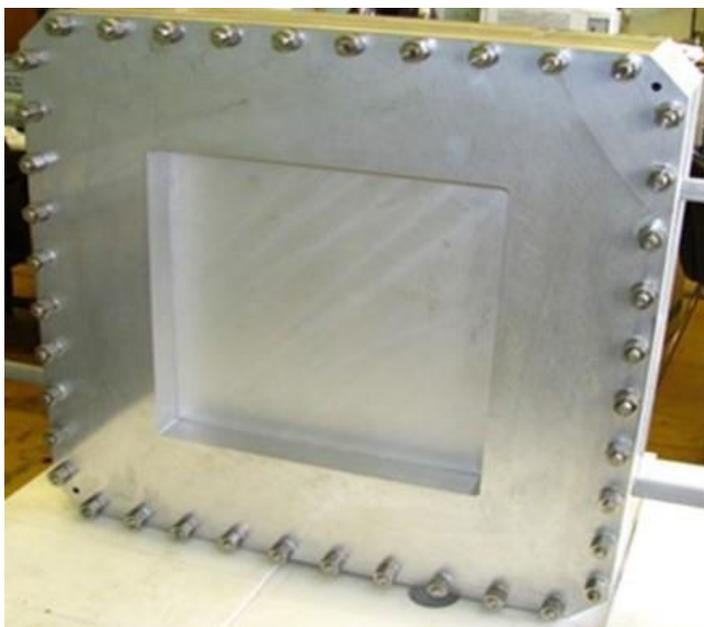


Рисунок 3.1.6.1. Прототип двумерной позиционно-чувствительной многопроволочной камеры.

Для предварительной подготовки прототипа двумерной позиционно-чувствительной многопроволочной камеры к работе были осуществлены следующие действия:

1. Промывка рамок пакета электродов в ультразвуковой ванне в дистиллированной воде при температуре  $60^{\circ}\text{C}$ .
2. Сушка пакета электродов в термовакуумной камере при температуре  $60^{\circ}\text{C}$  и давлении  $1\text{E-}2$  мбар.
3. Установка пакета электродов в корпус детектора с закорачиванием всех стрипов на «землю».
4. Наполнение камеры чистым азотом, продув 6 объемов камеры, далее постепенная подача высокого напряжения для выгорания мелкой фракции. После окончания процесса происходит падение тока. Для определения предела по высокому напряжению для азота производилось резкое увеличение темнового тока и фиксирование параметра. Затем высокое напряжение было сброшено и проведено переключение на рабочий газ.
5. Продув рабочим газом  $70\%\text{Ar}+30\%\text{CO}_2$  6 объемов камеры.
6. Измерена зависимость темнового тока от высокого напряжения на аноде. Определено максимальное допустимое высокое напряжение для рабочей газовой смеси. Выставлена рабочая точка по высокому напряжению.
7. При облучении удаленным источником рентгеновского излучения  $^{55}\text{Fe}$  проведена проверка одноканальным усилителем формирователем сигналов на каждом из 32-х стрипов. Нерабочие стрипы были закорочены на «землю».
8. Съем энергетических спектров на каждом из 32-х рабочих стрипов. Если спектры идентичные, прототип находится в рабочем состоянии и готов к поканальному съему сигналов.

После подготовки прототипа двумерной позиционно-чувствительной многопроволочной камеры была проведена проверка его параметров в соответствии с Программой испытаний и методикой испытаний ДПЧМК.01.00.00.00.000 ПМ, представленной в составе документации отчета 3 этапа.

Для проверки работоспособности прототипа двумерной позиционно-чувствительной многопроволочной камеры были проведены испытания с использованием источника рентгеновского излучения изотопа железо-55 ( $^{55}\text{Fe}$ ). Для наполнения прототипа использовалась газовая смесь  $70\%\text{Ar}+30\%\text{CO}_2$ . В результате проведенных испытаний был получен энергетический спектр (рис. 3.1.6.2), подтверждающий работоспособность конструкции прототипа, что позволит обеспечить требуемое пространственное разрешение  $2\times 2$  мм.

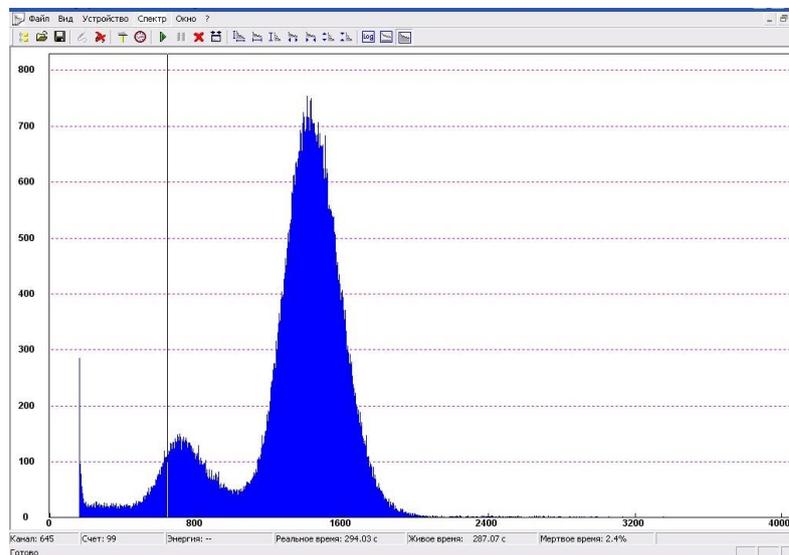


Рисунок 3.1.6.2. Энергетический спектр для прототипа многопроволочной камеры.

Измерения на прототипе двумерной позиционно-чувствительной многопроволочной камеры проводились в соответствии со следующим алгоритмом:

1. Для поканального съема сигналов со стрипов с каждого из 32-х стрипов по 16 по плоскостям X-Y снимался сигнал отдельно на каждый канал многоканального усилителя-формирователя.
2. С выходов усилителей-формирователей подавались сигналы канал в канал на входы 32-х АЦП.
3. Засвечивался центр чувствительной зоны 16×16 стрипов коллимированным источником  $^{55}\text{Fe}$ . Диаметр коллиматора был ~ 0.9 мм.
4. В результате обработки специализированной программой по координатам X-Y был получен гауссовый сигнал по амплитуде от наведенного источника, центр тяжести является координатой, а сигма распределения – точностью определения координаты.

Испытания прототипа двумерной позиционно-чувствительной многопроволочной камеры с апертурой не менее  $200 \times 200 \text{ мм}^2$  с пространственным разрешением не менее  $2 \times 2 \text{ мм}^2$  с поканальной регистрацией сигнала, проведенные согласно пунктам Программы испытаний и методики испытаний ДПЧМК.01.00.00.000 ПМ, подтверждают, что изделие является работоспособным и может использоваться для проведения исследовательских работ.

Было установлено, что объект испытания прототип двумерной позиционно-чувствительной многопроволочной камеры с апертурой не менее  $200 \times 200 \text{ мм}^2$  с пространственным разрешением не менее  $2 \times 2 \text{ мм}^2$  с поканальной регистрацией сигнала соответствует параметрам, обозначенным в Техническом задании, а именно:

- прототип собран согласно требованиям конструкторской документации на прототип двумерной позиционно-чувствительной многопроволочной камеры с апертурой не менее  $200 \times 200 \text{ мм}^2$  с пространственным разрешением не менее  $2 \times 2 \text{ мм}^2$  с поканальной регистрацией сигнала;
- активная площадь прототипа составляет  $200 \times 200 \text{ мм}^2$ ;
- пространственное разрешение прототипа не менее  $2 \times 2 \text{ мм}^2$ .

#### ПРИЛОЖЕНИЯ

- Комплект конструкторской документации с учетом требований стандартов ЕСКД ГОСТ 2.102–201. ФАЙЛ: [Прил. ПГ 3.1.6 Комплект констр докум.pdf](#)
- Акт изготовления. ФАЙЛ: [Прил. ПГ 3.1.6 Акт изготовления.pdf](#)
- Программа испытаний и методика испытаний. ФАЙЛ: [Прил. ПГ 3.1.6 Программа и методика испытаний.pdf](#)
- Акт испытаний. ФАЙЛ: [Прил. ПГ 3.1.6 Акт испытаний.pdf](#)

- Протокол испытаний. ФАЙЛ: [Прил. ПГ 3.1.6 Протокол испытаний.pdf](#)

### 3.1.7 Калибровка детекторов от радиоизотопного источника (совместно с ИЯИ РАН)

Цель калибровки – нормирование детекторов, находящихся на одном кольце для правильной работы дифрактометра в режиме определения текстуры.

Калибровка проводится следующим образом:

- Производится подача питающего напряжения на детекторы и систему измерения.
- Записываются индивидуальные параметры порогов в предусилители для устранения темнового шума детекторов.
- Производится накопление данных в течении 1 минуты для получения параметров темнового шума.
- На месте образца размещается источник нейтронов  $^{252}\text{Cf}$ .
- Производится измерения счетов детекторов в течении 10 мин.

Дальнейшая обработка данных состоит в поиске детектора с максимальным счетом на каждом кольце, и расчете корректирующего коэффициента для каждого детектора по формуле (1).

$$K = \frac{N_{max}}{N_{det}} \quad (1)$$

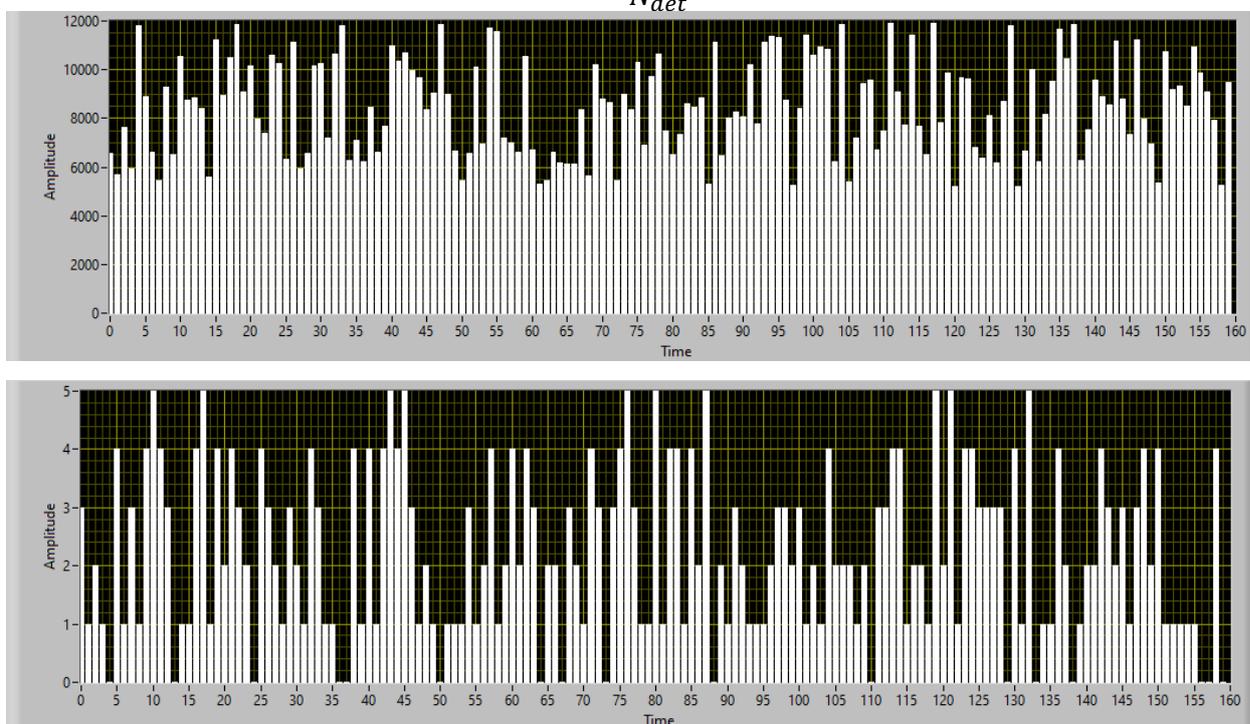


Рисунок 3.1.7.1. Регулирование порогов.

Средний порог составляет 15 мВ. Также по результатам тестирования можно сделать вывод что отклонения эффективности одиночных детекторов составляют максимум 11 %. Это позволяет сделать вывод что детекторы имеют хорошую повторяемость и разброс связан только с неоднородностью сцинтилляционного листа.

#### ПРИЛОЖЕНИЯ

- Акт калибровки. ФАЙЛ: [Прил. ПГ 3.1.7 Акт калибровки Калибровка детекторов от радиоизотопного источника.pdf](#)

### 3.1.8 Проведение тестирования параметров детекторов на источнике нейтронов (совместно с ИЯИ РАН)

Также было проведено тестирования параметров детекторов на источнике нейтронов и параметров одиночных детекторов нейтронов входящих в состав детекторной системы нейтронного дифрактометра “СФЕРА”. Для проведения тестирования разработана программа ЛНИ.Э000 ПМ.

Также, в рамках работ по улучшения и тестированию параметров дифрактометра проведено моделирования оптических параметров подобного типа детекторов, и метода определения координаты, основанного на анализе амплитуды сигналов. На рис. 3.1.8.1 показаны моделированные значения количества фотонов, полученных с противоположных кремниевых фотоумножителей для двух рассмотренных оптических моделей [3.1.8.1]. Результаты моделирования показали, что метод позволяет определять координату и его использование в детекторах дифрактометра СФЕРА позволит значительно улучшить вертикальное разрешение.

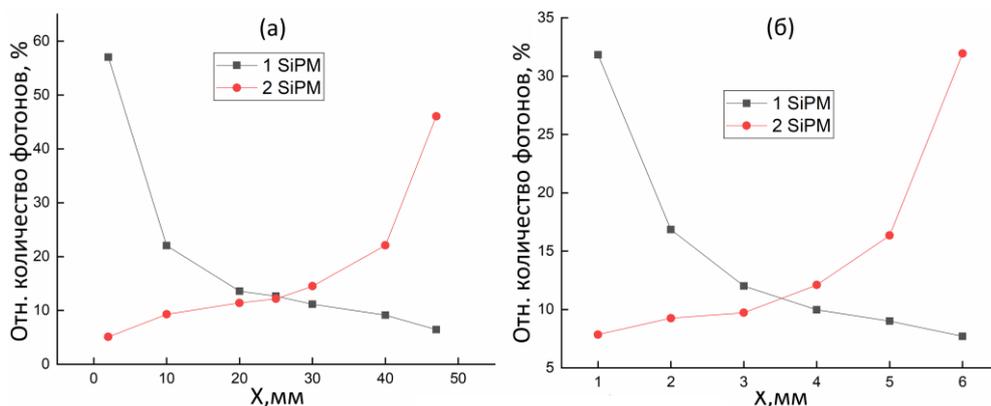


Рисунок 3.1.8.1. Процентное соотношение зарегистрированных фотонов от общего количества фотонов. (а) – первая модель, (б) – вторая модель.

#### СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

[3.1.8.1] Моделирование оптических параметров сцинтилляционных позиционно-чувствительных детекторов с органическим световодом / Д. Н. Трунов, В. Н. Марин, Р. А. Садыков [и др.] // Поверхность. Рентгеновские, синхротронные и нейтронные исследования. – 2023. – № 4. – С. 71-76. – DOI 10.31857/S1028096023040209. – EDN JIJXYR.

#### ПРИЛОЖЕНИЯ

- Протокол тестирования. ФАЙЛ: [Прил. ПГ 3.1.8 Протокол тестирования.pdf](#)
- Программа тестирования. ФАЙЛ: [Прил. ПГ 3.1.8 Программа тестирования.pdf](#)
- Акт проведения тестирования. ФАЙЛ: [Прил. ПГ 3.1.8 Акт проведения тестирования.pdf](#)

### 3.1.9 Нейтронные рефлектометрические и дифрактометрические исследования процессов отражения, прохождения нейтронов и генерации вторичного излучения от многослойных наноструктур на основе гадолиния и бора (совместно с ИФМ УРО РАН)

#### Теоретическое исследование отражения нейтронов от тонких пленок и слоистых наноструктур, содержащих сильнопоглощающие нейтроны изотопы гадолиния и бора

Важное, активно развивающееся в последнее время направление исследований – использование сильнопоглощающих нейтроны изотопов для создания твердотельных детекторов нейтронов. Такие устройства представляют большой интерес для применения ввиду дефицита изотопа  $^3\text{He}$ , на основе которого обычно изготавливаются газовые детекторы нейтронов. Изотопы с сильным резонансным поглощением нейтронов предоставляют также уникальную возможность -

плотность длины рассеяния нейтронов можно изменять контролируемым образом прямо в ходе эксперимента, варьируя длину волны нейтронов. Это можно использовать для решения фазовой проблемы, вводя в исследуемые образцы опорный слой, содержащий изотопы с резонансным поглощением.

Практически во всех веществах поглощение тепловых нейтронов незначительно, но для некоторых изотопов оно существенно. Например, два изотопа гадолиния,  $^{155}\text{Gd}$  и  $^{157}\text{Gd}$  имеют очень большие сечения захвата тепловых нейтронов. Благодаря присутствию этих изотопов в природном гадолинии, его сечение захвата также значительно. Большие величины сечений связаны с наличием в ядрах упомянутых изотопов состояний, с характерной энергией перехода, лежащей в диапазоне энергий тепловых нейтронов. В результате возникает резонансное взаимодействие ядра с тепловым нейтроном, следствием которого является очень высокая вероятность поглощения нейтрона ядром с последующим испусканием гамма-кванта. Это обусловило широкое применение гадолиния в ядерной энергетике, как экранирующего выгорающего поглотителя нейтронов.

Возможно применение этого уникального свойства гадолиния и в научных исследованиях, где применяются тепловые нейтроны, в частности, в нейтронной рефлектометрии. Изучение поглощения нейтронов одновременно с отражением и генерацией вторичного излучения существенно расширяет возможности диагностики и, потому, представляет большой интерес. Но процессы распространения нейтронов в сильнопоглощающих средах слабо изучены и работ по этой тематике не очень много. Группа из Петербургского института ядерной физики (г. Гатчина) исследовала поглощающие свойства гадолиния в целях оптимизации суперзеркал на их основе [3.1.9.1]. В Объединенном институте ядерных исследований (г. Дубна) также проводились теоретические и экспериментальные исследования взаимодействия медленных нейтронов с гадолинием, определена постоянная составляющая действительной части длины рассеяния [3.1.9.2]. Франк [3.1.9.3] получил общее выражение для комплексного показателя преломления нейтронов в средах с поглощением. Также было предсказано необычное поведение эффективного сечения взаимодействия при уменьшении скорости падающих нейтронов [3.1.9.4]. К сожалению, эти результаты не получили широкой известности.

Две независимые группы из Национального института стандартов и технологий (NIST) [3.1.9.5] и Делфтского технологического университета (Нидерланды) [3.1.9.6] показали возможность решения фазовой проблемы в нейтронной рефлектометрии путем введения в исследуемый образец опорного слоя, характеристики которого можно изменять в процессе измерений. В этих исследованиях использовался магнитный опорный слой, его характеристики изменялись путем приложения магнитного поля, но сам образец не должен быть магнитным, иначе его характеристики также изменятся.

В дальнейшем этот подход был модифицирован – в качестве материала опорного слоя использовался природный гадолиний. Благодаря резонансному поглощению в слоях гадолиния, его нейтронооптические характеристики можно изменить, меняя длину волны нейтронного пучка. При комнатной температуре гадолиний парамагнитен, что позволяет исследовать образцы с приложением магнитного поля, так как оно не меняет длины рассеяния нейтронов в слоях гадолиния. Методика была апробирована как путем теоретических расчетов [3.1.9.7], так и экспериментально [3.1.9.8].

Сильнопоглощающие вещества, типа Gd или соединений бора, обогащенных изотопом  $^{10}\text{B}$ , могут быть использованы в качестве материалов для твердотельных детекторов нейтронов. В настоящее время детекторы наполняются изотопом  $^3\text{He}$ . При попадании в него нейтрона происходит реакция с образованием заряженных частиц - тритона и протона - которые регистрируются газовым счетчиком. Но гелий-3 - достаточно дорогой изотоп, его запасы в мире малы. Поэтому во многих нейтронных центрах, например, институте Лауэ-Ланжевена, сейчас возникает интерес к твердотельным детекторам на основе материалов с сильным поглощением тепловых нейтронов [3.1.9.9]. Гадолиний может быть достаточно перспективным веществом для развития данного направления. Зависимость поглощения от длины волны, вероятно, может быть использована для создания энергодисперсионного детектора.

Кроме того, тонкие пленки гадолиния используются и в нейтронных поляризаторах и учет процессов поглощения нейтронов необходим для точного расчета параметров таких устройств. В Объединенном институте ядерных исследований (г. Дубна) были проведены эксперименты по определению длины когерентного рассеяния в Gd [3.1.9.10], но точность этих данных может быть повышена путем проведения одновременных измерений отражения и поглощения в структурах с гадолинием. Сильнопоглощающие вещества типа гадолиния необходимы и для реализации метода нейтронной рефлектометрии с регистрацией вторичного излучения [3.1.9.11].

Соответственно, актуальность исследований сильнопоглощающих систем предопределяется востребованностью результатов как для создания приборной базы для нейтронных инструментов, так и для развития методов анализа экспериментальных данных. Резонансное поглощение нейтронов, например, изотопами гадолиния, сопровождается генерацией вторичного излучения, детектирование которого открывает новые возможности в развитии методов нейтронной нанодиагностики.

В данном разделе приводятся результаты изучения процессов отражения и прохождения нейтронов, а также генерации вторичного излучения в многослойных системах, содержащих слои из сильнопоглощающих веществ (природный гадолиний или карбид бора  $B_4C$ ). Метод фазово-амплитудных функций адаптирован для расчета коэффициента прохождения нейтронов, что дает возможность сразу определить коэффициент поглощения и плотность вероятности обнаружения нейтронов на различных глубинах. Все расчеты можно проводить и в случае рассеяния поляризованных нейтронов магнитными наноструктурами. Для анализа различных ситуаций используются модельные численные эксперименты. Полученные результаты дадут возможность оптимального выбора сильнопоглощающих систем для различных задач, как прикладных, так и научных.

### Теория

Метод фазово-амплитудных функций является подходом для решения широкого круга квантово-механических задач. В его основе лежит представление о так называемой фазовой функции  $\alpha(r)$ , которая имеет простой и наглядный физический смысл [3.1.9.12]. При заданном центральном потенциале значение этой функции в некоторой точке  $r$  является фазой рассеяния на части потенциального барьера, заключенного в сфере радиуса  $r$ . Фаза рассеяния  $\alpha$  на всем потенциальном барьере определяется как предел  $\alpha = \lim_{r \rightarrow \infty} \alpha(r)$ . Фазовая функция удовлетворяет дифференциальному уравнению Риккати, которое называется фазовым уравнением. Фазовая функция характеризует эффект действия потенциала и равна нулю, если равен нулю потенциал.

Задача описания отражения нейтронов от металлических пленок представляет собой вариант одномерной задачи о взаимодействии частицы (нейтрона) с потенциальным барьером (ядерной структурой отражающего слоя). Волновое уравнение в этом случае имеет вид:

$$\frac{d^2}{dx^2} \psi(x) + [k^2 - V(x)]\psi(x) = 0. \quad (3.1.9.1)$$

Волновая функция представляется в виде суперпозиции падающей  $A(x)$  и отраженной  $B(x)$  волн:

$$\psi(x) = A(x)[\exp(ikx) + B(x)\exp(-ikx)]. \quad (3.1.9.2)$$

Подставляя это выражение в уравнение (3.1.9.2) и проведя преобразования [3.1.9.12], можно получить уравнение для амплитуды отраженной волны  $B(x)$ , имеющее форму фазового уравнения:

$$\frac{d}{dx} B(x) = -\frac{1}{2ik} V(x)[\exp(ikx) + B(x)\exp(-ikx)]^2. \quad (3.1.9.3)$$

Граничное условие  $B(0) = 0$ , соответствует отсутствию отраженной волны за потенциальным барьером.

Это уравнение не зависит от амплитуды прошедшей волны, поэтому в ряде задач коэффициент прохождения можно не рассчитывать, экономя вычислительные ресурсы. В отличие от исходного уравнения Шредингера, фазовое уравнение является уравнением первого порядка, хотя и нелинейным. Оно не имеет аналитического решения для произвольной функции  $V(x)$ , но численно решается быстрее и проще, чем уравнение (3.1.9.1). В настоящей работе для решения уравнения (3.1.9.3) использовался неявный метод Рунге-Кутты второго порядка.

В связи с тем, что функция  $B(x)$  обладает свойствами фазовой функции из квантовой механики, но, фактически, описывает амплитуду отраженной волны, ее называют фазово-амплитудной функцией.

При непосредственном рассмотрении уравнения (3.1.9.3) предполагают нормальное падение волны на потенциальный барьер, то есть, поток нейтронов должен падать на пленку перпендикулярно ее поверхности. На самом деле рефлектометрия имеет дело со скользящими углами падения. В этом случае в отражении от барьера участвует лишь нормальная составляющая волнового вектора. Тогда в уравнении (3.1.9.3)  $k = 2\pi/\lambda \sin \theta$ , где  $\theta$  – угол падения, отсчитанный от поверхности пленки,  $\lambda$  – длина волны нейтронов. Вводя обозначение  $k_0 = 2\pi/\lambda$ , получим  $k = k_0 \sin \theta$ . В рефлектометрии также часто используют величину  $q = 2k$ , которая имеет смысл нормальной компоненты изменения волнового вектора при отражении. В дальнейшем будем использовать именно такую нотацию.

Потенциал взаимодействия  $V(x)$  связан с плотностью длины рассеяния следующим соотношением [3.1.9.13]:

$$V(x) = 4\pi[\delta(x) + i\beta(x)]. \quad (3.1.9.4)$$

Здесь

$$\begin{aligned} \delta(x) &= \text{Re}[N(x)b(x)] \\ \beta(x) &= \text{Im}[N(x)b(x)], \end{aligned} \quad (3.1.9.5)$$

где  $b(x)$  – длина ядерного рассеяния нейтронов на глубине  $x$ ,  $N(x)$  – число частиц в единице объема на глубине  $x$ . Величина  $\delta(x)$  описывает преломление и отражение нейтронов в веществе,  $\beta(x)$  – поглощение. Их численные значения для различных материалов и длин волн могут быть найдены в справочных таблицах или на интернет-ресурсах [3.1.9.14], а также рассчитаны самостоятельно. Для большинства веществ  $\beta(x) \approx 0$  и потенциал можно рассматривать, как действительный. Но для сильнопоглощающих изотопов величина  $\beta(x)$  становится существенной, а потенциал взаимодействия – комплексным. Поэтому в дальнейшем будем считать  $V(x)$  только комплексной величиной.

При определении начального условия к уравнению (1.3) предполагали, что слева и справа от потенциального барьера находится вакуум. В случае рефлектометрии это соответствовало бы изолированной пленке. К сожалению, такие пленки слишком тонки, чтобы они могли существовать сами по себе. Их всегда синтезируют на подложках, очень толстых ( $\sim 10^{-3}$  м) по сравнению с характерными толщинами пленок ( $\sim 10^{-9}$ – $10^{-8}$  м), и их можно рассматривать как полубесконечную среду с одной стороны пленки. Это приводит к тому, что за исследуемой структурой пленки тоже возникает отраженная от подложки волна, и именно ее амплитуда должна быть взята в качестве граничного условия для уравнения (3.1.9.3).

Амплитуда отражения от поверхности среды описывается формулой Френеля [3.1.9.13]:

$$r_F(k) = \frac{k - \sqrt{k^2 - V(0)}}{k + \sqrt{k^2 - V(0)}}. \quad (3.1.9.6)$$

Тогда начальное условие в уравнении (1.3) для заданного  $k$  будет иметь вид  $B(k, 0) = r_F(k)$ , если отсчет координаты начинается от нуля.

Уравнение для амплитуды прошедшей волны выводится аналогично уравнению (3.1.9.3) и имеет вид:

$$\frac{d}{dx}A(x) = -\frac{1}{2ik}V(x)A(x)[\exp(ikx) + B(x)\exp(-ikx)]. \quad (3.1.9.7)$$

В отличие от (1.3) это уравнение линейно, и можно записать формальное решение для произвольного вида функций  $V(x)$  и  $B(x)$  через неопределенный интеграл. Но численное решение методом Рунге-Кутты оказывается проще.

В отсутствие подложки граничное условие имеет простой вид  $A(0) = 1$ . При ее наличии, амплитуда прошедшей волны уменьшается на величину амплитуды многократно отраженной волны на интерфейсе «пленка-подложка». Граничное условие в этом случае выглядит следующим образом:

$$A(k, 0) = 1 - |B(k, 0)|^2. \quad (3.1.9.8)$$

Коэффициенты отражения и прохождения для всей пленки (значения, измеряемые в эксперименте) выражаются через значения функций  $A$  и  $B$  на поверхности пленки:

$$R(k) = |B(k, x_N)|^2, T(k) = |A(k, x_N)|. \quad (3.1.9.9)$$

Зная вид функций  $A(k, x)$  и  $B(k, x)$ , можно восстановить волновую функцию в зависимости от глубины и волнового числа, используя соотношение (3.1.9.2). Это дает возможность рассчитать плотность вероятности обнаружения нейтрона на любой глубине и решать иные квантовомеханические задачи. Таким образом, метод фазово-амплитудных функций очень удобен для анализа процессов распространения нейтронов в конденсированных средах. Простота используемых уравнений обеспечивает высокую скорость и точность расчетов. В среднем, расчет происходит в 2-3 раза быстрее, чем при использовании других методов: алгоритма Парратта [3.1.9.15], формализма оптических матриц [3.1.9.16], рекуррентных соотношений, предложенных В. К. Игнатовичем [3.1.9.17]

В отличие от ядерного рассеяния нейтронов, взаимодействие поляризованных нейтронов с магнитными моментами атомов является более сложной задачей многоканального рассеяния. Возникает два канала рассеяния – для нейтронов со спином «вверх» и для нейтронов со спином «вниз» (направления выбраны условно). Для упрощения дальнейших выкладок введем обозначения: канал нейтронов со спином «вверх» обозначим знаком «+» (плюс); канал нейтронов со спином «вниз» знаком «-» (минус). Кроме того, имеется перемешивание каналов – нейтроны могут изменить направление спина в момент рассеяния на образце.

В результате мы получим четыре, различных в общем случае, коэффициента отражения: два основных, без изменения состояния («++» и «--»), и два с изменением состояния («+-» и «-+»). Из-за наличия взаимодействия каналов невозможно получить независимые уравнения для каждого коэффициента отражения. Фазовое уравнение принимает матричный вид, хотя схема его вывода остается аналогичной описанной в [3.1.9.12, 3.1.9.18, 3.1.9.19]:

$$\frac{d}{dx} B = (E^+ + BE^-)V(E^+ + BE^-). \quad (3.1.9.10)$$

Здесь  $B$  – матрица коэффициентов отражения:

$$B \equiv \begin{pmatrix} B_{++}(x, k) & B_{\pm}(x, k) \\ B_{\mp}(x, k) & B_{--}(x, k) \end{pmatrix}, \quad (3.1.9.11)$$

каждый элемент которой является коэффициентом отражения в определенном канале рассеяния и представляет собой функцию глубины  $x$  и волнового числа  $k$ .

Матрица  $V$  описывает потенциал взаимодействия в каждом канале:

$$V \equiv \begin{pmatrix} V_{++}(x) & V_{\pm}(x) \\ V_{\mp}(x) & V_{--}(x) \end{pmatrix}. \quad (3.1.9.12)$$

Чаще всего потенциал взаимодействия является функцией только глубины. Но для некоторых веществ, ядра которых резонансно взаимодействуют с тепловыми нейтронами, может возникнуть зависимость потенциала от длины волны и, следовательно, от волнового числа. Примером такого вещества является гадолиний.

Матрицы  $E^+$  и  $E^-$  связаны с падающей и отраженной волнами соответственно:

$$E^+ \equiv \begin{pmatrix} \frac{e^{ikx}}{\sqrt{-2ik}} & 0 \\ 0 & \frac{e^{ikx}}{\sqrt{-2ik}} \end{pmatrix}, E^- \equiv \begin{pmatrix} \frac{e^{-ikx}}{\sqrt{-2ik}} & 0 \\ 0 & \frac{e^{-ikx}}{\sqrt{-2ik}} \end{pmatrix}. \quad (3.1.9.13)$$

Все произведения в уравнении (3.1.9.10) являются матричными и в общем случае некоммутативны.

По аналогии с (1.5) введем обозначения для описания ядерного рассеяния:

$$\begin{aligned} \delta_n(x) &= \text{Re}[N(x)b_n(x)] \\ \beta_n(x) &= \text{Im}[N(x)b_n(x)], \end{aligned} \quad (3.1.9.14)$$

где  $b_n(x)$  – длина ядерного рассеяния нейтронов на глубине  $x$ ,  $N(x)$  – число частиц в единице объема на глубине  $x$ . Величина  $\delta_n(x)$  описывает преломление и отражение нейтронов в веществе,  $\beta_n(x)$  – поглощение.

Для магнитного рассеяния:

$$\begin{aligned}\delta_m(x) &= \mu(x)N(x)b_m(x) \\ \beta_m(x) &= 0,\end{aligned}\quad (3.1.9.15)$$

где  $b_m(x)$  – длина магнитного рассеяния нейтронов,  $\mu(x)$  – магнитный момент частиц на глубине  $x$  в магнетонах Бора. Мнимая часть длины рассеяния отсутствует, поскольку взаимодействие с магнитной подсистемой не приводит к поглощению нейтронов. Если в системе имеется некий эффективный канал убывания нейтронов вследствие магнитного рассеяния, то  $\beta_m(x) \neq 0$ . Это редкие случаи, поэтому в дальнейших выкладках этот вариант не рассматривается. Но, при необходимости,  $\beta_m(x)$  может быть учтена в потенциале взаимодействия.

Тогда элементы матрицы потенциала  $V$  могут быть представлены следующим образом [3.1.9.13]:

$$\begin{aligned}V_{++}(x) &= 4\pi[\delta_n(x) + \delta_m(x) \cos \alpha + i\beta_n(x)], \\ V_{--}(x) &= 4\pi[\delta_n(x) - \delta_m(x) \cos \alpha + i\beta_n(x)], \\ V_{+-}(x) &= V_{-+}(x) = 4\pi\delta_m(x) \sin \alpha.\end{aligned}\quad (3.1.9.16)$$

Здесь введена величина  $\alpha$  – угол между направлением магнитного момента падающих нейтронов и направлением магнитного момента частиц образца. Если в образце не ферромагнитное упорядочение, то  $\alpha$  различен в разных слоях. В геликоидальных системах с плавным поворотом магнитного момента угол является функцией глубины  $\alpha(x)$ .

В случае несимметричного взаимодействия каналов рассеяния  $V_{+-}(x) \neq V_{-+}(x)$ , но в рефлектометрии поляризованных нейтронов такие задачи не рассматриваются.

Матричное уравнение (3.1.9.10) может быть представлено и в виде системы из четырех связанных дифференциальных уравнений для каждого коэффициента отражения. Такая система является весьма громоздкой для записи и неудобной для численного решения, хотя может быть полезна для теоретического анализа частных случаев при определенных значениях и соотношениях между элементами потенциала. Например, используя систему, легко показать, что, если  $V_{+-}(x) = V_{-+}(x)$ , то и  $B_{+-}(x) = B_{-+}(x)$ . Но для расчетных задач предпочтительнее более компактная матричная форма.

Коэффициент поглощения нейтронов может быть рассчитан исходя из закона сохранения числа частиц. Нейтроны первичного пучка могут быть отражены от пленки, пройти сквозь нее или быть поглощенными в объеме пленки. Рассматривая общий случай поляризованных нейтронов и нормируя интенсивность первичного пучка на единицу, получим расчетные формулы для каналов:

$$\begin{aligned}a_+(k) &= 1 - R_{++}(k) - R_{\pm}(k) - T_{++}(k) - T_{\pm}(k), \\ a_-(k) &= 1 - R_{--}(k) - R_{\mp}(k) - T_{--}(k) - T_{\mp}(k).\end{aligned}\quad (3.1.9.17)$$

В случае неполяризованных нейтронов формула несколько упрощается:

$$a(k) = 1 - R(k) - T(k).\quad (3.1.9.18)$$

### Модельные численные эксперименты

Рассмотрим образец типа резонатора:  $\text{Al}_2\text{O}_3//\text{Ta}(100 \text{ \AA})/\text{V}(250 \text{ \AA})/^{10}\text{B}_4\text{C}(25 \text{ \AA})/\text{V}(250 \text{ \AA})/\text{Ta}(100 \text{ \AA})$ . Тантал выполняет роль сильноотражающих обкладок, которые формируют потенциальную яму. Ванадий имеет очень малую по модулю отрицательную плотность длины рассеяния нейтронов и хорошо подходит для заполнения внутреннего пространства ямы. Карбид бора, обогащенный изотопом  $^{10}\text{B}$ , является сильнопоглощающим слоем внутри потенциальной ямы, его мнимая часть плотности длины рассеяния  $\beta = 10^{-6} \text{ \AA}^{-2}$ , тогда, как для большинства веществ она на 2-3 порядка меньше. В резонаторе, в потенциальной яме, возникает стоячая нейтронная волна, что приводит к уменьшению интенсивности отражения (грубо это можно объяснить тем, что часть нейтронов захватывается потенциальной ямой и поглощается в расположенном там слое  $^{10}\text{B}_4\text{C}$ ). Подробно процессы возникновения стоячих нейтронных волн и явления, порождаемые ими рассмотрены в работе [3.1.9.20] На рис. 3.1.9.1 приведена область полного внешнего отражения для указанного выше образца. Хорошо виден резонансный минимум.

Значение  $q = 0.016 \text{ \AA}^{-1}$  является критическим значением изменения волнового вектора, после которого наблюдается значительное проникновение нейтронов в образец и спад интенсивности отражения.

Сильнопоглощающий слой (в рассматриваемом примере  $^{10}\text{B}_4\text{C}$ ) делает резонансный провал более выраженным. Если известна ширина потенциальной ямы (слоя V), то из анализа формы провала можно определить плотность длины рассеяния  $^{10}\text{B}_4\text{C}$ . Это делается путем уточнения параметров по алгоритму Левенберга-Марквардта.

Если использовать в качестве поглощающего слоя гадолиний, ядра изотопов которого резонансно взаимодействуют с тепловыми нейтронами, то можно еще больше увеличить глубину провала. Кроме того, его положение и форма зависят от угла падения, что показано на рис. 3.1.9.2. Тем не менее, поглощающий слой изменяет свойства резонатора, поэтому в общем случае возможно и уменьшение интенсивности сигнала.

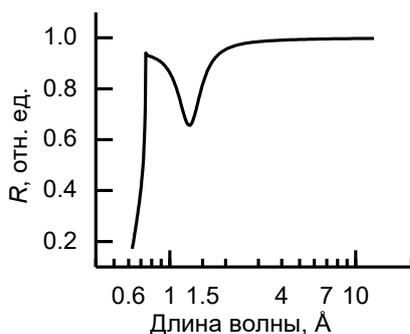


Рисунок 3.1.9.1. Резонансный минимум на полном внешнем отражении в системе  $\text{Al}_2\text{O}_3//\text{Ta}(100 \text{ \AA})/\text{V}(250 \text{ \AA})/^{10}\text{B}_4\text{C}(25 \text{ \AA})/\text{V}(250 \text{ \AA})/\text{Ta}(100 \text{ \AA})$ .

Приведенный расчет (и все последующие) соответствует времяпролетному рефлектометру, для угла падения 1 мрад. Определить непосредственно плотность длины рассеяния Gd в этом случае нельзя, поскольку она зависит от энергии нейтронов [3.1.9.21]. Но, также используя алгоритм Левенберга-Марквардта, можно определить энергетические характеристики резонансов Gd, а затем рассчитать плотность длины рассеяния, как функцию энергии нейтронов, используя формулу Брейта-Вигнера. В больших длинах волн мнимая часть плотности длины рассеяния Gd почти постоянна,  $\beta \approx 3 \cdot 10^{-6} \text{ \AA}^{-2}$ , что даже больше, чем у  $^{10}\text{B}_4\text{C}$ .

Возникающую в резонаторе стоячую волну можно визуализировать, если, используя приведенные выше алгоритмы, рассчитать волновую функцию нейтронов и построить квадрат модуля этой функции (рис. 3.1.9.3). На рисунке также приведена проекция поверхности в виде карты в оттенках серого.

Математический смысл поверхности, изображенной на рис. 3 – плотность вероятности обнаружить нейтрон с определенной энергией на некоторой глубине в образце. Перепад высот примерно по средней линии – поглощающий слой Gd, который уменьшает количество нейтронов за ним. «Долина»-минимум является узлом стоячей волны. Энергия, при которой узел «входит» в область потенциальной ямы, соответствует минимуму отражения. На рис. 3.1.9.4 показано поведение коэффициентов прохождения и поглощения образца вблизи минимума.

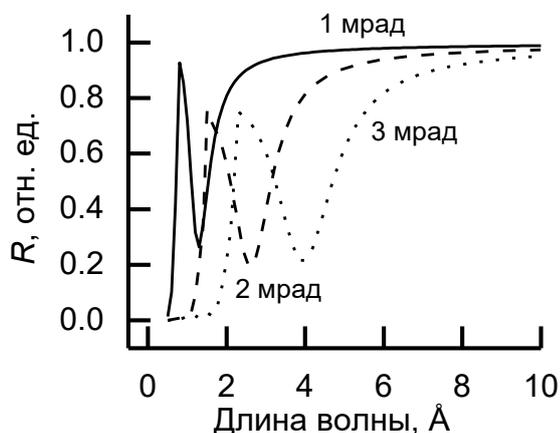


Рисунок 3.1.9.2. Резонансные минимумы на полном внешнем отражении в системе  $\text{Al}_2\text{O}_3//\text{Ta}(100 \text{ \AA})/\text{V}(250 \text{ \AA})/\text{Gd}(25 \text{ \AA})/\text{V}(250 \text{ \AA})/\text{Ta}(100 \text{ \AA})$  при углах падения 1 мрад (линия), 2 мрад (штрих) и 3 мрад (пунктир).

Видно, что коэффициент прохождения очень мал, и поведение коэффициента отражения полностью определяется коэффициентом поглощения. Следовательно, измерив рефлектометрическую кривую в данной области, что является более простым экспериментом, мы получим полную информацию о поглощении.

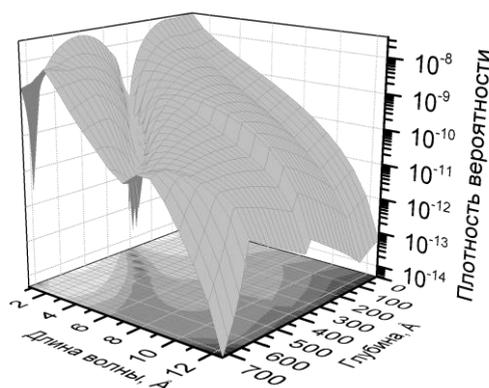


Рисунок 3.1.9.3. Плотность вероятности обнаружить нейтрон в системе  $\text{Al}_2\text{O}_3//\text{Ta}(100 \text{ \AA})/\text{V}(250 \text{ \AA})/\text{Gd}(25 \text{ \AA})/\text{V}(250 \text{ \AA})/\text{Ta}(100 \text{ \AA})$ . На проекции более темные цвета соответствуют меньшим значениям.

Если сделать потенциальную яму достаточно широкой, в ней может оказаться несколько узлов стоячей волны. Тогда в области полного внешнего отражения окажется столько же минимумов. На рис. 3.1.9.5 показано отражение для системы  $\text{Al}_2\text{O}_3//\text{Ta}(100 \text{ \AA})/\text{V}(1000 \text{ \AA})/\text{Gd}(25 \text{ \AA})/\text{V}(1000 \text{ \AA})/\text{Ta}(100 \text{ \AA})$ , в которой возникает 4 минимума, их порядки указаны на рисунке цифрами.

Такая сложная картина полного внешнего отражения позволяет с большей точностью определить энергетические характеристики резонансов гадолиния или плотность длины рассеяния карбида бора.

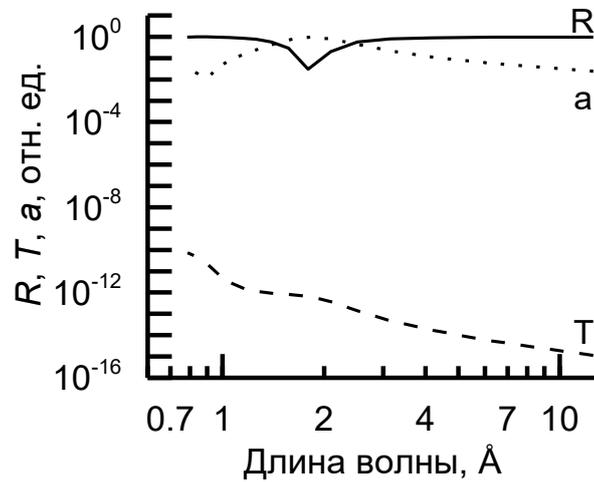


Рисунок 3.1.9.4. Коэффициенты отражения (линия), прохождения (штрих) и поглощения (пунктир) в области полного внешнего отражения.

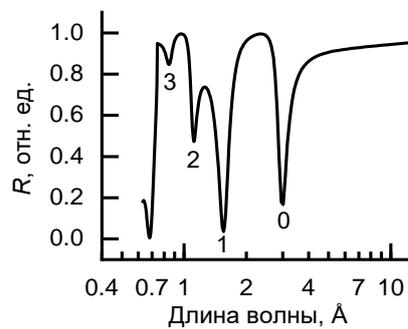


Рисунок 3.1.9.5. Коэффициент отражения для системы  $\text{Al}_2\text{O}_3//\text{Ta}(100 \text{ \AA})/\text{V}(1000 \text{ \AA})/\text{Gd}(25 \text{ \AA})/\text{V}(1000 \text{ \AA})/\text{Ta}(100 \text{ \AA})$  с большим количеством резонансных минимумов. Цифрами отмечены порядки резонансов.

*Оптимальные параметры сильнопоглощающих слоев для использования систем на их основе в конвертерах нейтронов*

Рассмотрим процессы поглощения нейтронов и генерация вторичного излучения в системах с толстым слоем сильнопоглощающего нейтроны вещества на стеклянной подложке. Цель – определить оптимальные конфигурации для получения высокого коэффициента поглощения образца ( $\mu \geq 0.9$ ) в достаточно широком диапазоне длин волн. Рассматриваемые образцы:

1.  $\text{SiO}_2//^{10}\text{B}_4\text{C}(t)$  – слой карбида бора, обогащенного изотопом  $^{10}\text{B}$ , толщины  $t=1, 3$  мкм.
2.  $\text{SiO}_2//\text{V}(50 \text{ \AA})/\text{Gd}(t)/\text{V}(50 \text{ \AA})$  – слой гадолиния, толщины  $t=1, 3$  мкм. Слои ванадия необходимы для защиты гадолиния от окисления при взаимодействии с подложкой и атмосферным воздухом.

На рис. 3.1.9.6 представлены зависимости коэффициенты поглощения для образца  $^{10}\text{B}_4\text{C}$  для двух указанных толщин в зависимости от длины волны  $\lambda$ , при нормальном падении нейтронного пучка.

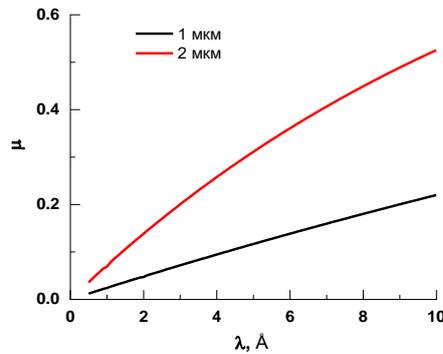


Рисунок 3.1.9.6. Коэффициенты поглощения слоев  $^{10}\text{B}_4\text{C}$  различной толщины.

Видно, что даже толщина в 3 мкм не обеспечивает желаемого значения коэффициента поглощения. Дальнейшее увеличение толщины покрытия является технологически сложным, но путь нейтронов в образце можно увеличить, повернув его на некоторый угол относительно падающего пучка. На рис. 3.1.9.7 представлено поведение коэффициента поглощения при повороте образца  $\text{SiO}_2//^{10}\text{B}_4\text{C}$  (3 мкм) на различные углы. Только при угле падения  $10^\circ$  величина  $\mu > 0.9$  достигается при  $\lambda > 5.5 \text{ \AA}$ . Коэффициент отражения при таком угле падения не превышает  $10^{-6}$  и не оказывает существенного влияния на прохождение нейтронов вглубь образца. При таких условиях интенсивность вторичного излучения совпадает с ходом коэффициента поглощения.

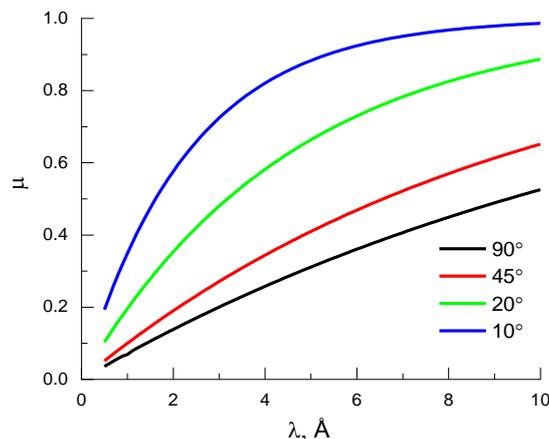


Рисунок 3.1.9.7. Коэффициенты поглощения образца  $\text{SiO}_2//^{10}\text{B}_4\text{C}$  (3 мкм) при различных углах падения нейтронного пучка.

На рис. 3.1.9.8 представлены зависимости коэффициента отражения от длины волны для образцов, содержащих слой Gd различной толщины, при нормальном падении нейтронного пучка. В состав природного гадолиния входят два изотопа,  $^{155}\text{Gd}$  и  $^{157}\text{Gd}$ , ядра которых взаимодействуют с тепловыми нейтронами резонансным образом. Это приводит к сильному поглощению нейтронов в Gd, сопровождающемуся генерацией вторичного гамма-излучения, и качественно иному поведению коэффициента поглощения в зависимости от длины волны. Особенностью коэффициента поглощения слоев Gd является очень быстрый рост в малых длинах волн. Но, в отличие от карбида бора, при длинах волн, меньших  $1 \text{ \AA}$ , коэффициент поглощения очень мал и практически не меняется с изменением толщины. Но на практике редко встречаются задачи, требующие работы с нейтронами таких длин волн.

Несмотря на быстрый рост с поглощения длиной волны, слой Gd толщиной 3 мкм также не может обеспечить желаемую величину коэффициента поглощения при нормальном падении. Поэтому был проведен расчет (рис. 3.1.9.9) для различных углов падения нейтронов на образец  $\text{SiO}_2/\text{V}(50 \text{ \AA})/\text{Gd}(3 \text{ мкм})/\text{V}(50 \text{ \AA})$ . Наиболее оптимальным выглядит угол падения  $10^\circ$ , при котором

наблюдается практически скачкообразный рост коэффициента поглощения в малых длинах волн и достижение значения  $\mu \approx 0.9$  при  $\lambda \approx 1.7 \text{ \AA}$ . При больших длинах волн коэффициент поглощения меняется очень слабо.

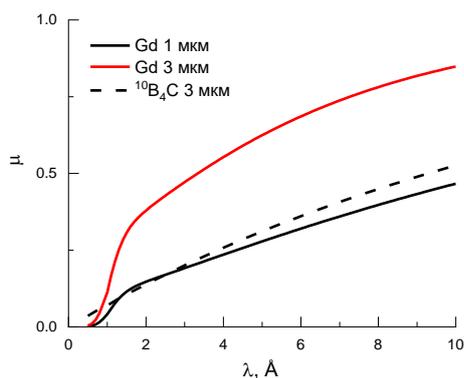


Рисунок 3.1.9.8. Коэффициенты поглощения слоев Gd различной толщины. Пунктиром, для сравнения, приведен коэффициент поглощения слоя  $^{10}\text{B}_4\text{C}$  толщиной 3 мкм.

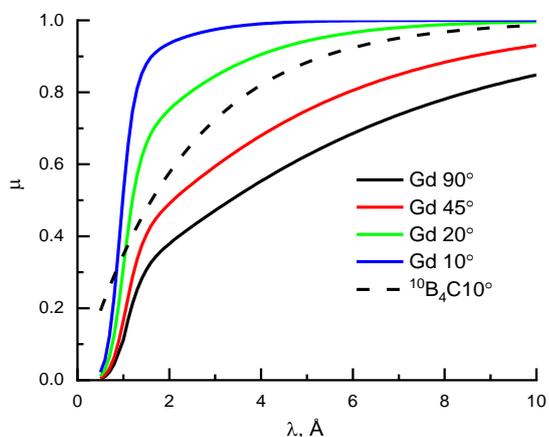


Рисунок 3.1.9.9. Коэффициенты поглощения образца  $\text{SiO}_2/\text{V}(50 \text{ \AA})/\text{Gd}(3 \text{ мкм})/\text{V}(50 \text{ \AA})$  при различных углах падения нейтронного пучка. Пунктиром, для сравнения, приведен коэффициент поглощения  $\text{SiO}_2/^{10}\text{B}_4\text{C}(3 \text{ мкм})$  при угле падения  $10^\circ$ .

Для очень малых длин волн  $\lambda \sim 0.5 \text{ \AA}$  поглощение практически отсутствует. При необходимости работать в этой области, можно рассмотреть использование комбинированной системы, например  $\text{SiO}_2/\text{V}(50 \text{ \AA})/\text{Gd}(1.5 \text{ мкм})/^{10}\text{B}_4\text{C}(1.5 \text{ мкм})$ . Ее сравнение с «чистыми» системами приведено на рис. 3.1.9.10. Коротковолновый «хвост» немного приподнимается, обеспечивая ненулевое поглощение при  $\lambda < 0.8 \text{ \AA}$ . При этом коэффициент поглощения незначительно падает в области  $1 \text{ \AA} < \lambda < 6 \text{ \AA}$ . Сравнение проводилось с системами  $\text{SiO}_2/\text{V}(50 \text{ \AA})/\text{Gd}(3 \text{ мкм})/\text{V}(50 \text{ \AA})$  и  $\text{SiO}_2/^{10}\text{B}_4\text{C}(3 \text{ мкм})$ , угол падения во всех случаях составляет  $10^\circ$ .

Показано, что при использовании слоев сильнопоглощающих веществ в качестве конвертора нейтронов (за счет эффекта вторичного излучения) необходимо обеспечивать угол падения первичного пучка примерно  $10^\circ$ . Тогда, за счет увеличения длины пути нейтрона в образце, существенно возрастает коэффициент поглощения, особенно при больших длинах волн. Следовательно, возрастает и процент конвертации. Использование гадолиния может быть более выгодно за счет большего коэффициента поглощения и более быстрого его возрастания в малых длинах волн. Но преимуществом карбида бора, несмотря на более слабое поглощение, является

вторичное излучение в виде альфа-частиц, которое гораздо проще детектируется по сравнению с гамма-излучением гадолиния.

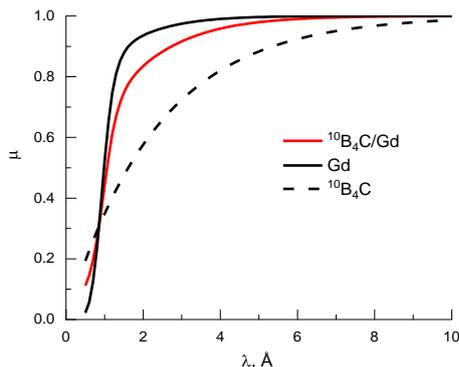


Рисунок 3.1.9.10. Коэффициент поглощения комбинированной системы  $\text{SiO}_2/\text{V}(50 \text{ \AA})/\text{Gd}(1.5 \text{ мкм})/^{10}\text{B}_4\text{C}(1.5 \text{ мкм})$ .

### Применение рефлектометрии поляризованных нейтронов к исследованию многослойных наноструктур, содержащих сильнопоглощающие нейтроны изотопы гадолиния

Рефлектометрия поляризованных нейтронов (РПН) эффективно применяется для исследования многослойных наноструктур, чтобы получить информацию о распределении по глубине ядерной и магнитной плотности. В применении РПН к исследованию редкоземельных наноструктур, содержащих гадолиний, серьезную проблему представляет поглощение нейтронов, причем наибольшие трудности возникают при исследовании систем, содержащих Gd, который отличается рекордными значениями сечения поглощения тепловых нейтронов. Важной задачей является определение параметров образцов, которые могут быть исследованы методом РПН. С этой целью были изучены 3 многослойных наноструктуры мы рассматриваем случай сверхрешеток  $[\text{Dy}(t_1)/\text{Gd}(t_2)]_{20}$  с разными соотношениями толщин слоев  $t_1$  и  $t_2$  (1:1, 2:1, 3:1) с целью выяснить, при каких условиях РПН может быть чувствительна к изменению внутрислойного магнитного упорядочения в сверхрешетках. Идея эксперимента в том, при различных соотношениях толщин  $t_1$  и  $t_2$  становятся запрещенными структурные рефлексы различного порядка от ядерной сверхрешеточной структуры (рефлексы второго порядка при соотношении толщин Dy и Gd 1:1, рефлексы третьего порядка при соотношении толщин 1:2 и т.д.). Однако, в случае, когда магнитная периодичность в сверхрешетке становится несоизмеримой со сверхрешеточной ядерной периодичностью, то можно ожидать детектирования запрещенных сверхрешеточных рефлексов магнитного происхождения. Хорошо известно, что в слоях Dy при температуре  $T = 10 \text{ К}$  формируется ферромагнитное упорядочение, а при  $T = 100 \text{ К}$  - геликоидальное магнитное упорядочение с периодом, несоизмеримым с толщиной слоев Dy. В первом случае магнитная периодичность в сверхрешетке будет совпадать с ядерной, во втором – магнитный период не совпадает с ядерным. Если удастся наблюдать запрещенные рефлексы во втором случае, то с помощью РПН можно получать информацию о магнитной структуре сверхрешеток, если нет – то РПН не чувствительна к магнитному упорядочению в слоях Dy. Измерения были выполнены с полным поляризационным анализом в магнитном поле 100 Э при температурах 10 К и 100 К, соответствующих ферромагнитному и геликоидальному магнитному упорядочению в объемном Dy. Магнитное состояние в сверхрешетках было приготовлено охлаждением в магнитном поле величиной 4.5 кЭ от комнатной до заданной температуры, после чего магнитное поле было уменьшено до 100 Э.

На Рис. 3.1.9.11 – 3.1.9.13 приведены кривые ПНР, измеренные при температурах  $T = 10 \text{ К}$  и 100 К от образцов  $\text{Dy}(9\text{нм})/\text{Gd}(3\text{нм})$ ,  $\text{Dy}(6\text{нм})/\text{Gd}(3\text{нм})$ ,  $\text{Dy}(6\text{нм})/\text{Gd}(6\text{нм})$ .

На нейтронных рефлектограммах для образцов  $\text{Dy}(9\text{нм})/\text{Gd}(3\text{нм})$ ,  $\text{Dy}(6\text{нм})/\text{Gd}(3\text{нм})$  видны сверхрешеточные рефлексы первого порядка. Мы не приводим кривые для спин-флип рассеяния,

т.к. рассеяния нейтронов с переворотом спина в экспериментах не было детектировано. Очевидно, что появление указанных пиков обусловлено наличием структурной периодичности ядерной длины рассеяния в сверхрешетке. Магнитная периодичность в этих сверхрешетках либо совпадает со структурной, либо слабо проявляется на нейтронограммах. Кроме того, в сверхрешетках наблюдается небольшая ферромагнитная компонента, причем нейтронные кривые, измеренные выше и ниже температуры Кюри Dy отличаются незначительно. Таким образом, в данном случае нейтронная рефлектометрия оказывается малочувствительной к изменению магнитного упорядочения в слоях Dy.

Иная ситуация наблюдается для образца Dy(60Å)/Gd(60Å). Поскольку соотношение толщин слоев Dy и Gd 1:1, то структурные сверхрешеточные рефлексы четных порядков запрещены. Действительно, на рефлектограмме присутствует сверхрешеточный пик первого порядка. На нейтронограммах, измеренных ниже температуры Кюри Dy при  $T=10$  К, сверхрешеточный пик второго порядка также отсутствует. Однако, сверхрешеточные рефлексы второго порядка наблюдаются на нейтронограммах при  $T = 100$  К (выше температуры Кюри но ниже температуры Нейля Dy). Вне всяких сомнений, природа данного пика чисто магнитного происхождения, т.к. его наличие и интенсивность зависит от температуры. Причина появления запрещенного магнитного сверхрешеточного пика – наличие в образце магнитной периодичности, отличающейся от структурной. Как известно, период геликоидального магнитного упорядочения несоизмерим с параметрами кристаллической решетки Dy и со сверхрешеточной структурной периодичностью. Характерно, что остальная часть нейтронных рефлектометрических кривых, измеренных при  $T=10$  К и 100 К, крайне незначительно отличается. Фактически, геликоидальное магнитное упорядочение в Dy проявляется только в возникновении запрещенного магнитного рефлекса «поверх» рефлектометрической кривой. Таким образом, для того, чтобы детектировать в редкоземельных сверхрешетках наличие несоизмеримого геликоидального магнитного упорядочения, необходимо оптимизировать слоистую структуру сверхрешеток, подбирая такое соотношение толщин, при котором становятся запрещенными некоторые сверхрешеточные рефлексы. Разумеется, такое искусственное формирование слоистой структуры исследуемых сверхрешеток ограничивает постановку физической задачи, но другой возможности детектирования геликоидального упорядочения в сверхрешетках методом рефлектометрии поляризованных нейтронов нет.

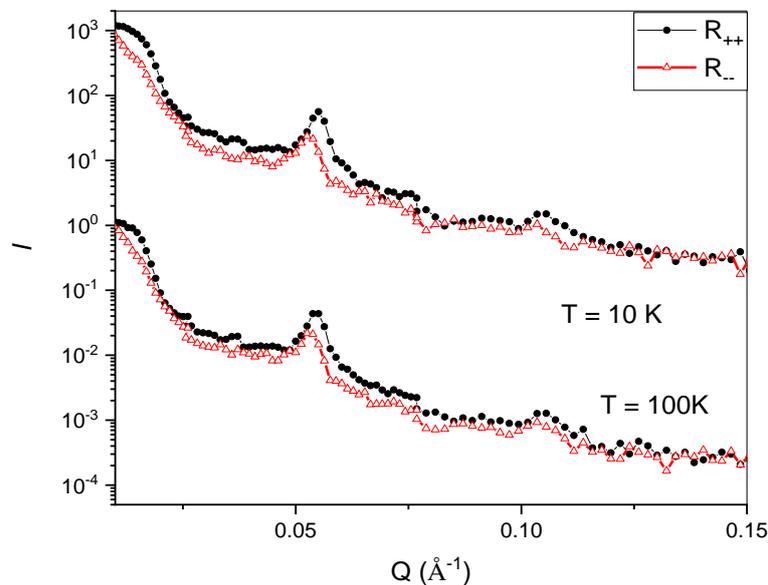


Рисунок 3.1.9.11. Кривые РПН от образца Dy(9нм)/Gd(3нм).

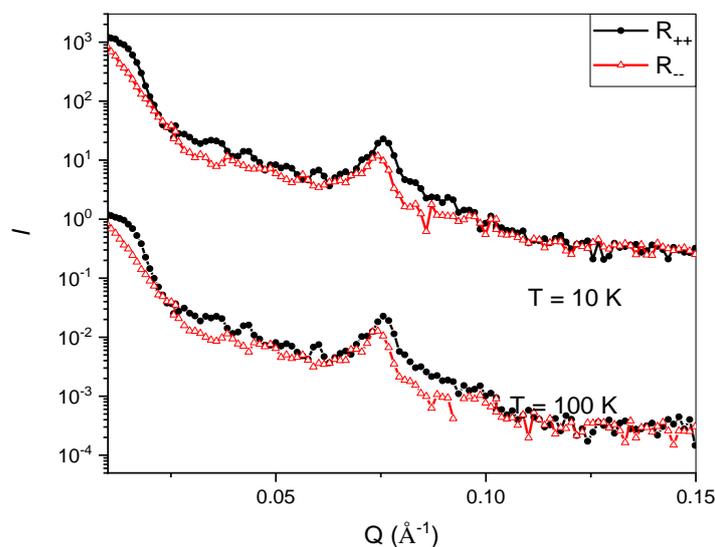


Рисунок 3.1.9.12. Кривые РПН от образца Dy(6нм)/Gd(3нм).

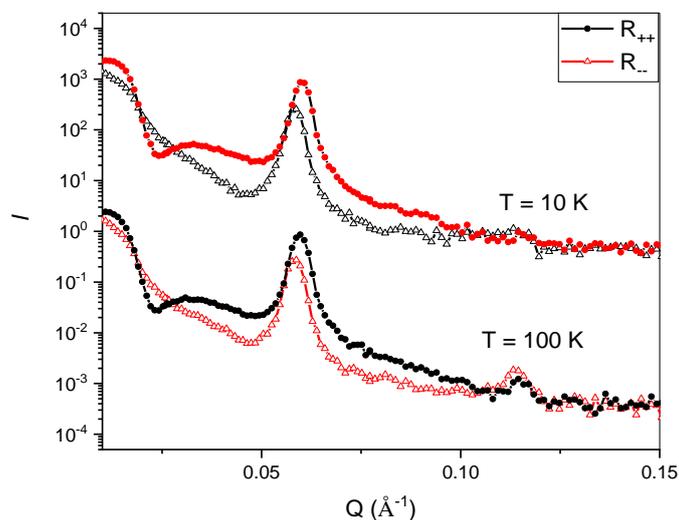


Рисунок 3.1.9.13. Кривые РПН от образца Dy(6нм)/Gd(6нм).

#### СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

- [3.1.9.1] Pleshanov N. K., Peskov B. G., Pusev V. M. et al. // Nucl. Instrum. Methods. Phys. Res. A. 2006. V. 560. 464. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.nima.2005.12.243>
- [3.1.9.2] Frank A. I., Bodnarchuk V. I., Geltenbort P. et al. // Phys. At. Nucl. 2003. V. 66, № 10, P. 1831. DOI: <https://doi.org/10.1134/1.1619495>
- [3.1.9.3] Франк И. М. // Усп. физ. наук. Т. 161. № 11. С. 109.
- [3.1.9.4] Gurevich A. I. and Lomonosov V. V. // Phys. At. Nucl. 1997. V. 60. P. 510
- [3.1.9.5] Majkrzak C. F., Berk N. F. // Phys. Rev. B. 1995. V. 52. № 15. P. 10827. DOI: <https://doi.org/10.1103/PhysRevB.52.10827>
- [3.1.9.6] De Haan V. O., Van Well A. A., Sacks P. E. et al. // Physica B. 1996. V. 221. P. 524. DOI: [https://doi.org/10.1016/0921-4526\(95\)00975-2](https://doi.org/10.1016/0921-4526(95)00975-2)
- [3.1.9.7] Nikova E. S., Salamatov Yu. A., Kravtsov E. A. et al. // Superlattices Microstruct. V. 109. P. 201. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.spmi.2017.05.013>

- [3.1.9.8] Никова Е. С., Саламатов Ю. А., Кравцов Е. А. и др. // ФММ. 2019. Т. 120, С. 913. DOI: 10.1134/S0015323019090109
- [3.1.9.9] Piscitelli F., Khaplanov A., Devishvili A. et al. // Proc. Math. Phys. Eng. Sci. 2016. V. 472. P. DOI: <https://doi.org/10.1098/rspa.2015.0711>
- [3.1.9.10] Франк А. И., Боднарчук В. И., Кулин Г. В. и др. О длине когерентного рассеяния естественного гадолиния. Дубна: Препринты Объединенного института ядерных исследований. 2002. P3-2002-288. 12 с.
- [3.1.9.11] В.Д. Жакетов, К. Храпко, А.В. Петренко и др. // Поверхность. Рентген., синхротр. и нейтрон. исслед. № 6. С. 10. DOI: <https://doi.org/10.31857/S1028096021060170>
- [3.1.9.12] Бабилов В.В. Метод фазовых функций в квантовой механике. М.: Наука, 1976. 288 с.
- [3.1.9.13] Lekner J. Theory of reflection of electromagnetic and particle waves. Dordrecht: Springer Science+Business Media, 281 p.
- [3.1.9.14] Neutron activation and scattering calculator: <https://www.ncnr.nist.gov/resources/activation/>
- [3.1.9.15] Parratt L.G. // Phys Rev. 1954. V. 95. № 2. P. 359. DOI: <https://doi.org/10.1103/PhysRev.95.359>
- [3.1.9.16] Abeles F. // Annales de Physique. 1950. Т. 12. № 5. P. 596. DOI: <https://doi.org/10.1051/anphys/195012050596>
- [3.1.9.17] Игнатович В.К. Нейтронная оптика. М.: Физматлит, 2006. 336 с.
- [3.1.9.18] Calogero F. Variable Phase Approach to Potential Scattering. N-Y: Academic Press Inc., 1967. 243 p.
- [3.1.9.19] Саламатов Ю.А., Кравцов Е.А. // Поверхность. Рентген., синхротр. и нейтрон. исслед. 2021. № 5. С. 3. DOI: 10.31857/S1028096021050174
- [3.1.9.20] Ю. В. Никитенко // ЭЧАЯ. 2009. Т. 40. №. 6. С. 1682.
- [3.1.9.21] Mughabghab S., Divadeenam M., and Holden N. E. Neutron Resonance Parameters and Thermal Cross Sections. N-Y: Brookhaven National Laboratory, 1981. 826 p.

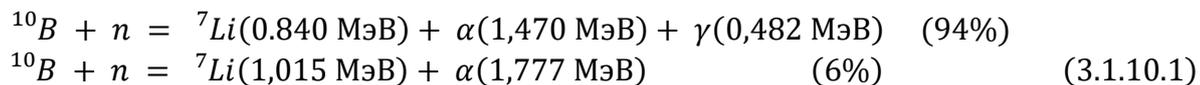
#### ПРИЛОЖЕНИЯ:

- Отчет о выполнении. ФАЙЛ: [Прил. ПГ 3.1.9 Отчет о выполнении.pdf](#)

### **3.1.10 Разработка ускорительной и реакторной технологии. Разработка технологии нанесения покрытий на основе карбида бора В<sub>4</sub>С на полимерные пленки с высокой температурой плавления -полиимид (картон) и лавсан (maylar) для дальнейшего использования в качестве конвертера нейтронного излучения в детекторах на ускорительных и реакторных источниках нейтронов.**

Важной и актуальной научной задачей является создание высокоэффективных детекторов большой площади для регистрации медленных нейтронов, конвертеры которых содержат изотоп бора <sup>10</sup>B. Такие детекторы смогут заменить существующие детекторы на основе <sup>3</sup>He во многих областях применения, причём для некоторых задач они могут иметь даже лучшие характеристики.

Сечение взаимодействия изотопа бора <sup>10</sup>B с тепловыми нейтронами 0,025МэВ составляет 3800 барн. Медленные нейтроны взаимодействуют с ядрами изотопа бора <sup>10</sup>B с выделением 2,78МэВ. Энергия распределяется между ядром изотопа лития <sup>7</sup>Li, α-частицей и γ-квантом по двум каналам:



Природный (естественный) бор состоит из двух изотопов <sup>10</sup>B (18%) и <sup>11</sup>B (82%). Промышленность в настоящее время производит для нужд атомных электростанций аморфный бор, обогащённый по изотопу <sup>10</sup>B не менее 95%. Бор образует большое количество твёрдых соединений. Среди них наибольший интерес представляет карбид бора В<sub>4</sub>С, обладающий высокой износостойкостью, высокой температурой плавления и высокой химической стойкостью. В настоящее время доступно приобретение карбида бора, в состав которого входит более 95% изотопа <sup>10</sup>B.

Длина пробега тепловых нейтронов в карбиде бора  $^{10}\text{B}_4\text{C}$  до ослабления потока в  $e \approx 2,7$  раз составляет около 30 мкм. Длина пробега частиц распада в материале карбида бора, учитывая кинетические энергии частиц составляет 3,5 мкм для  $\alpha$ -частицы и 1,7 мкм для  $^7\text{Li}$ . С одной стороны, для уменьшения потерь энергии частиц при выходе из слоя карбида бора, толщина покрытия должна быть наименьшей. С другой стороны, для обеспечения большего числа захвата нейтронов, толщина покрытия должна быть наибольшей.

Оптимальная толщина однослойного покрытия для регистрации нейтронов с длиной волны 1,8Å по расчётам, выполненным используя методику Монте-Карло, составляет около 2,5 мкм. При этом эффективность регистрации составляет не более 6% [3.1.10.1]. Для повышения эффективности собирают многослойные детекторы. Лучшим решением для построения многослойного детектора, состоящего из более 30 слоёв, является конструкция, содержащая 0,5 мкм в первых 10 слоях, далее 0,85 мкм, и 1,5 мкм в последних 7 слоях. При этом эффективность регистрации нейтронов с длиной волны 1,8Å может достигать около 60%.

Значительных успехов в разработке детекторов тепловых нейтронов с конвертером на основе карбида бора  $^{10}\text{B}_4\text{C}$  удалось добиться учёным из детекторной группы строящегося в г. Лунд (Швеция) Европейского центра ESS (The European Spallation Source) [3.1.10.2]. Совместно с сотрудниками Линчёпингского университета разработана технология нанесения тонкоплёночных покрытий карбида бора  $^{10}\text{B}_4\text{C}$  на алюминиевые основания и алюминиевые листы большой площади толщиной не менее 0,5 мм. На базе этих конвертеров изготавливаются многослойные детекторы нейтронов для ESS «multi-blade» и «multi-grid», конструкция которых представляет собой многокамерный газовый детектор, содержащий параллельно установленные листы алюминия толщиной от 0,5 мм до 2 мм с тонкоплёночным покрытием  $^{10}\text{B}_4\text{C}$  толщиной от 0,5 мкм до 7 мкм. Технология основана на магнетронном распылении мишени из карбида бора  $^{10}\text{B}_4\text{C}$  и осаждении распылённого материала мишени на алюминиевые подложки, нагретые до 500°C.

Недостатком технологии является то, что эта технология не позволяет выполнять нанесение карбида бора на алюминиевую фольгу, так как температура плавления алюминия составляет 660°C, а от магнетрона идёт тепловое излучение, которое приводит к локальному перегреву тонкой подложки, что приводит к её деформированию. Кроме того, эта технология не позволяет наносить покрытия из карбида бора  $\text{B}_4\text{C}$  на полимерные покрытия, что является актуальным для создания новых детекторов нейтронов.

В ЛНФ ОИЯИ разработана технология низкотемпературного магнетронного нанесения тонкоплёночных покрытий из карбида бора  $\text{B}_4\text{C}$ , обогащённого изотопом  $^{10}\text{B}$ , на любые алюминиевые основания большой площади, в том числе и на фольгу, которое осуществляется при температурах оснований от 50°C до 200°C. Технология разработана в соответствии с пунктом 2.1.4 Плана-графика Договора между ОИЯИ и Министерством науки и высшего образования на выполнение ОИЯИ исследовательской программы (проекта) в рамках Соглашения № 075-10-2021-115 от 13 октября 2021г. (внутренний номер 15.СИН.21.0021). Отчёт по технологии нанесения покрытий на основе карбида бора  $\text{B}_4\text{C}$  на алюминиевые основания для дальнейшего использования в качестве конвертера нейтронного излучения в детекторах на ускорительных и реакторных источниках нейтронов представлен в отчёте за 2 этап выполнения Соглашения № 075-10-2021-115 от 13 октября 2021г.

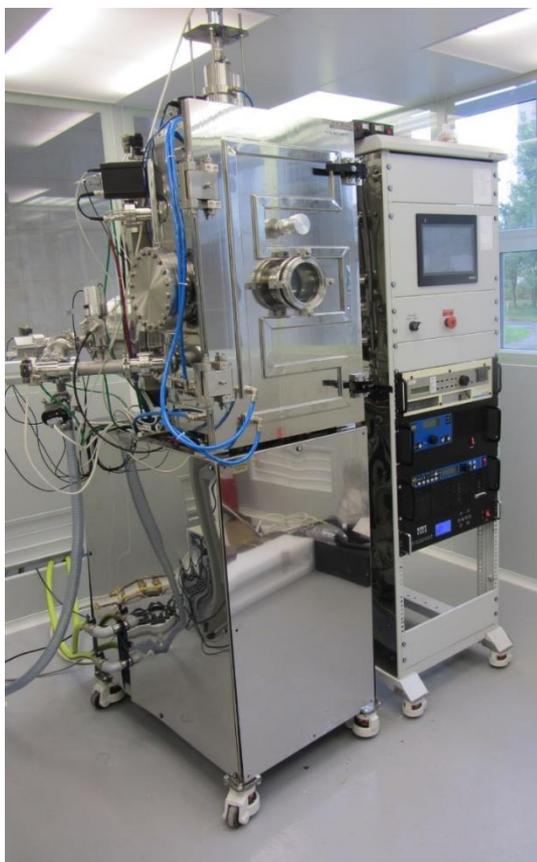


Рисунок 3.1.10.1. Фотография установки.

Новая технология нацелена на нанесение тонкоплёночных покрытий из карбида бора  $B_4C$ , обогащённого изотопом  $^{10}B$ , на радиационно-стойкие полимерные плёнки большой площади. К таким плёнкам относятся полиимидные (Karton) и полиэтилентерефтолатные (ПЭТФ, Лавсан, Mylar) плёнки. Новая технология учитывает особенности, связанные с ограничением нагрева подложек из полимерных плёнок. Для лавсановой плёнки важным условием является нагрев до температуры кристаллизации, которая составляет около  $150^{\circ}C$ . При нагреве до такой температуры начинается кристаллизация изначально аморфной прозрачной лавсановой плёнки, приводящая к появлению матовости в местах кристаллизации и деформации, приводящей к усадке. При магнетронном распылении присутствует радиационный нагрев подложки от плазменного разряда магнетрона, который необходимо ограничивать, чтобы не повысить температуру в вакуумной камере и на поверхности лавсановой подложки до  $110^{\circ}C$ . Оптимальная рабочая температура составляет  $50^{\circ}C$ .

Технология нанесения тонкоплёночных покрытий из карбида бора  $B_4C$ , обогащённого изотопом  $^{10}B$ , на радиационно-стойкие полимерные плёнки большой площади должна обеспечивать:

1. нанесение покрытий на подложки из полимерных плёнок большой площади при температуре подложек от  $50^{\circ}C$  до  $110^{\circ}C$ ;
2. нанесение покрытий с высокой адгезией к подложкам из полимерных плёнок;
3. получение покрытий площадью не менее  $200 \times 200 \text{ мм}^2$ ;
4. получение покрытий с высокой однородностью толщины по всей поверхности;
5. получение покрытий без примесей высокой чистоты.

Создание тонкоплёночных конвертеров на алюминиевых основаниях с требуемыми характеристиками является сложной технической и научной задачей.

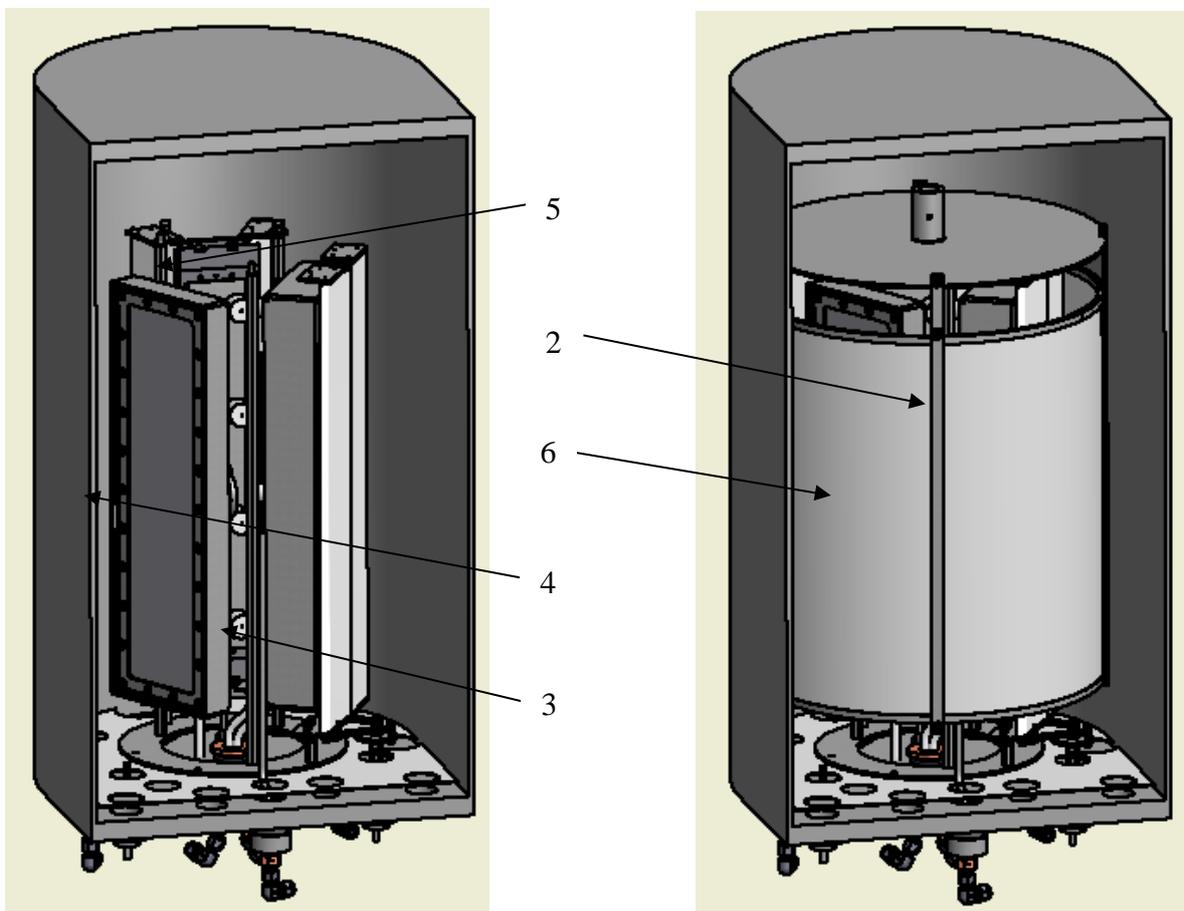


Рисунок 3.1.10.2. Схема вакуумной камеры установки.

(1) – ТЭН для нагрева камеры; (2) – крепление с подложками (6); (3) – магнетрон с мишенью  $^{10}\text{B}_4\text{C}$ ; (4) – магнетрон с мишенью Al; (5) – ионный источник.

Техническое решение получения тонкоплёночных покрытий из карбида бора  $^{10}\text{B}_4\text{C}$  при низких температурах заключается в формировании покрытий с применением магнетронного распыления мишени из карбида бора с применением ионного ассистирования. Работы по отработке технологии были выполнены на лабораторной вакуумной установке VSR-300 (сборка компании РОБВАК г. Фрязино), предназначенной для термического резистивного распыления. Технология нанесения тонкоплёночных покрытий из карбида бора  $\text{B}_4\text{C}$ , обогащённого изотопом  $^{10}\text{B}$ , на полимерные радиационно-стойкие плёнки с высокой температурой плавления площадью не менее  $200 \times 200 \text{ мм}^2$  является дальнейшим развитием технологии получения покрытий из карбида бора  $\text{B}_4\text{C}$  на алюминиевых подложках, описанной в работе [3.1.10.3]. Структура получаемых покрытий из карбида бора  $^{10}\text{B}_4\text{C}$  на полимерных подложках ничем не отличается от описанных в работе покрытий на алюминиевых подложках. Фотография установки представлена на рис. 3.1.10.1. На рис. 3.1.10.2 приведена схема вакуумной камеры установки. На рис. 3.1.10.3 приведена фотография подложки в виде рамки с закреплённой на ней металлизированной лавсановой плёнки.

Из-за особенности конструкции камеры VSR-300 U-образного типа размером  $400(\text{Ш}) \times 700(\text{В}) \text{ мм}^2$  два сбалансированных магнетрона (3 и 4) и ионный источник (5) размещены в центре камеры. Один магнетрон оснащён мишенью  $^{10}\text{B}_4\text{C}$ , второй – мишенью Al, обе мишени размером  $5 \times 100 \times 400 \text{ мм}^3$  имеют косвенное охлаждение водой. Ионный источник (5) замкнутого дрейфа, формирующий два параллельных ленточных луча шириной 2 мм и длиной 400 мм, используемый для очистки и ассистирования, размещён между магнетронами. Нанесение покрытия осуществляется на внутреннюю поверхность подложек (6), изогнутых с помощью крепления (2) до образования цилиндрического барабана, состоящего из четырёх подложек (6) размером  $400 \times 280 \text{ мм}^2$ . Для закрепления металлизированной алюминием лавсановой плёнки изготовлены жёсткие

подложки в виде рамки с отверстием  $210 \times 250$  мм<sup>2</sup>. Для решения технологической задачи было выполнено большое количество экспериментов с подбором режима работы магнетрона и ионного источника, температурного режима, подбора давления газовой среды и напряжения смещения, подаваемого на подложку. В результате отработана технология получения покрытия из карбида бора  $^{10}\text{B}_4\text{C}$  на полимерных плёнках.

На рис. 3.1.10.3 приведены фотографии закрепления металлизированной алюминием лавсановой плёнки на жёстких подложках в виде рамки с отверстием  $210 \times 250$  мм<sup>2</sup>. Покрытие из карбида бора  $^{10}\text{B}_4\text{C}$  наносится на алюминиевый металлизированный слой. На рис. 3.1.10.3а металлизированный слой покрыт слоем карбида бора  $^{10}\text{B}_4\text{C}$ .

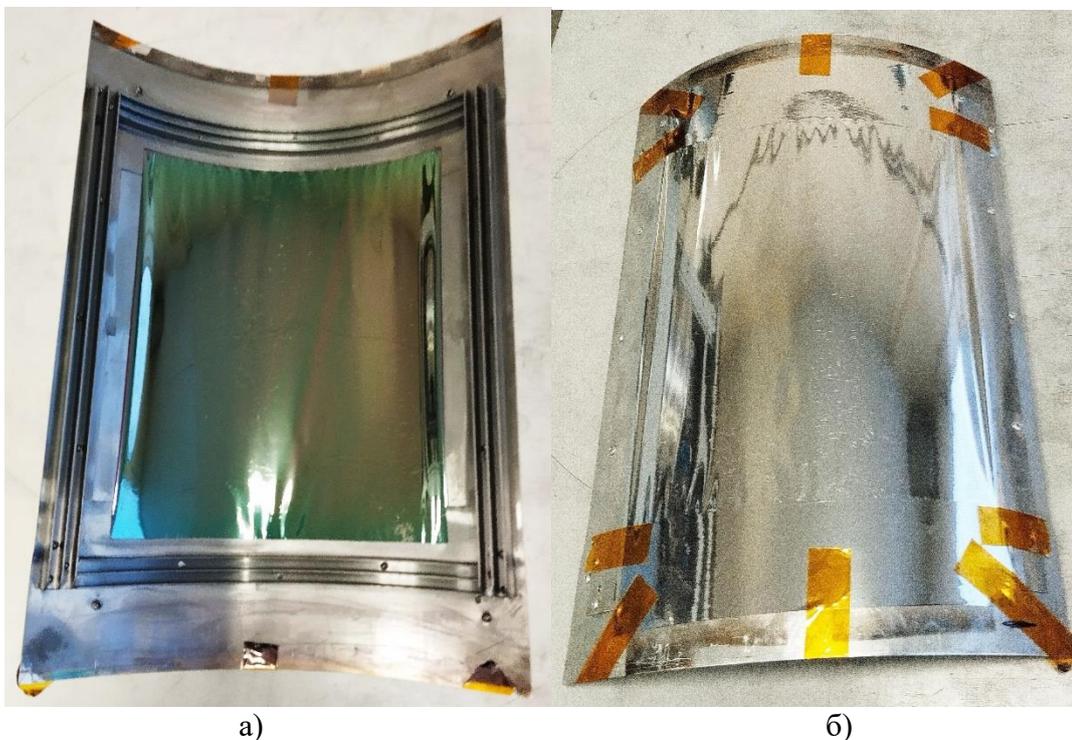


Рисунок 3.1.10.3. Фотографии закрепления металлизированной алюминием лавсановой плёнки.

### Экспериментальные результаты применения технологии

Для изготовления straw-трубок лавсановая плёнка толщиной 20 мкм с покрытием из карбида бора  $^{10}\text{B}_4\text{C}$  нарезается на полосы шириной 31 мм и длиной 250 мм. С помощью вакуумного прижима плёнка обжимает калиброванный стержень, позволяя выполнить ультразвуковую сварку плёнки внахлест. На рис. 3.1.10.4 приведена фотография станка для ультразвуковой сварки лавсановых straw-трубок диаметром 10 мм. На рис. 3.1.10.5а приведена микрофотография сварного шва.

Из полученных лавсановых straw-трубок изготавливаются газовые детекторы, содержащие позолоченную вольфрамовую проволоку толщиной 20 мкм, размещаемую вдоль оси трубки, продуваемой смесью рабочих газов. На рис. 3.1.10.5б приведена фотография составляющих частей прототипа детектора на основе одной лавсановой straw-трубки. На рис. 3.1.10.6 представлена фотография прототипа детектора с размещением straw-трубки в ряд, создавая многослойную конструкцию для увеличения эффективности регистрации нейтронов



Рис. 3.1.10.4. Фотография станка для ультразвуковой сварки лавсановых straw-трубок диаметром 10 мм.



а)



б)

Рисунок 3.1.10.5. Фотография составляющих частей прототипа детектора на основе одной лавсановой straw-трубки.



Рисунок 3.1.10.6. Фотография прототипа детектора.

### **Выводы экспериментального подтверждения технологии**

С помощью новой технологии получен новый тонкоплёночный функциональный материал на основе карбида бора  $^{10}\text{B}_4\text{C}$ . Поверхность осаждаемого при температуре  $50^\circ\text{C}$  материала с применением ионного ассистирования, отличается хорошей гладкостью. Плотная мелкозернистая структура даёт такие свойства как высокая прочность и высокая эластичность. Плёночное покрытие обладает высокой гибкостью. Формирование покрытий из карбида бора  $^{10}\text{B}_4\text{C}$  на полимерных радиационно-стойких лавсановых (maylar) и полиимидных (Kapton) плёнках толщиной 20 - 30 мкм значительно расширяет разнообразие создаваемых детекторов нейтронов.

В настоящее время на основе этой технологии выполнено масштабирование лабораторной установки VSR300 до промышленной установки линейного продольного сканирования ВАТТ 800 с площадью подложки  $700 \times 1200 \text{ мм}^2$ , устанавливаемой в Опытно-экспериментальном участке (ОЭУ) изготовления детекторов нейтронов. Кроме этого, выполнена модернизация вакуумной установки VSR300-1 под нанесение карбида бора на рулонные полимерные материалы.

Испытания изготовленных из полученных полимерных плёнок детекторов нейтронов показали их работоспособность и возможность изготовления современных детекторов нейтронов, не уступающих лучшим зарубежным аналогам.

### **Оценка готовности технологии**

Цель оценки готовности технологии – принятие решений в отношении дальнейшего развития технологии нанесения покрытий на основе  $\text{B}_4\text{C}$  на полимерные плёнки с высокой температурой плавления - полиимид (kapton) и лавсан (maylar).

#### *Описание процесса оценки*

Оценка готовности технологии (ОГТ) является структурированным, систематическим процессом, использующим уровень готовности технологии (УГТ) в качестве метрики, которая оценивает зрелость технологии или системы с её применением.

Оценка произведена в режиме самооценки. Для этого из числа сотрудников ОИЯИ была подобрана команда оценщиков из экспертов, обладающих знанием и опытом, и выполнен анализ на основании документов и имеющихся материалов. Оценка УГТ выполнена каждым оценщиком самостоятельно, исходя из уровня соответствия каждому пункту УГТ. Всего девять пунктов УГТ.

Расчет оценки соответствия по каждому пункту: 50%-85% частичное соответствие; 75%-100% полное соответствие. Общая оценка УГТ определяется единогласным решением по уровню полного соответствия.

*Определение уровня готовности технологии*

Определение уровня произведено исходя из заключения экспертов и сведено в таблицу 3.1.10.1.

Уровень готовности	Документация подтверждения	Оценка, %	комментарий
<p>УГТ1. Основные принципы технологии изучены и опубликованы.</p> <p>Сформулирована идея нанесения карбида бора <math>^{10}\text{B}_4\text{C}</math> на полимерные плёнки с высокой температурой плавления большой площади при низких температурах за счёт применения ионного ассистирования.</p>	<p>Техзадание на разработку технологии</p>	100	<p>Технология основана на результатах технологии нанесения карбида бора <math>^{10}\text{B}_4\text{C}</math> на алюминиевые листы большой площади при низких температурах</p>
<p>УГТ2. Сформулирована технологическая концепция.</p> <p>Обоснована необходимость и возможность создания новой технологии, в которой используется применение ионного ассистирования.</p>	<p>Техзадание на разработку технологии.</p> <p>Описание технологии и маркетинговое исследование, аналоги (в научной работе [3.1.10.3])</p>	100	<p>Концепция основана на дальнейшем развитии технологической концепции нанесения карбида бора <math>^{10}\text{B}_4\text{C}</math> на алюминиевые листы большой площади при низких температурах</p>
<p>УГТ3. Даны аналитические и экспериментальные подтверждения по важнейшим функциональным характеристикам выбранной концепции технологии.</p> <p>Собран макет установки нанесения карбида бора на базе лабораторной вакуумной установки VSR300. Проведена тестовая проверка работоспособности концепции новой технологии в первых экспериментах по нанесению покрытий из карбида бора <math>\text{B}_4\text{C}</math> на полимерные плёнки с высокой температурой плавления. Получены тестовые результаты.</p>	<p>Техзадание.</p> <p>Описание технологии и анализ тестовых результатов (в научной работе [3.1.10.3])</p> <p>Протокол проведения исследований образцов плёнок карбида бора <math>\text{B}_4\text{C}</math> (в отчёте за 2022г)</p>	100	

<p>УГТ4. Компоненты и/или макеты испытаны в лабораторных условиях.</p> <p>Разработаны, изготовлены и испытаны держатели подложек из полимерных плёнок с высокой температурой плавления и включены в комплекс оборудования вакуумной установки VSR300, представляющей собой рабочую модель вакуумной установки нанесения покрытий. Получены опытные образцы покрытий <math>^{10}\text{B}_4\text{C}</math> на полимерных плёнках с высокой температурой плавления и свидетелях. Исследованы характеристики покрытий <math>^{10}\text{B}_4\text{C}</math> по свидетелям.</p>	<p>Техзадание.</p> <p>Закуплены полиимидные плёнки и лавсановые плёнки, в том числе металлизированные алюминием (накладные)</p>	100	
<p>УГТ5. Компоненты и/или макеты испытаны в условиях, близких к реальным.</p> <p>На вакуумной установке VSR300 получены образцы конвертеров с покрытием <math>^{10}\text{B}_4\text{C}</math> на лавсановую (maular) плёнку размером 200x250мм толщиной 20мкм.</p> <p>Используя эти конвертеры сварены с помощью ультразвуковой сваркой строу-трубки диаметром 10 мм, изготовлены и испытаны газовые детекторы медленных нейтронов</p> <p>Создание прототипов строу-детекторов медленных нейтронов с твердотельным борным покрытием</p> <p>Создание многослойных детекторов нейтронов с твердотельным борным конвертером, состоящим из 6-</p>	<p>Техзадание.</p> <p>Отчёт по созданию прототипов строу-детекторов медленных нейтронов с твердотельным борным покрытием.</p> <p>Конструкторская документация.</p> <p>Акт изготовления.</p> <p>Акт испытаний.</p> <p>Отчёт по созданию и испытание многослойных детекторов нейтронов с твердотельным конвертером (состоящим из 6-ти строу-трубок с напылением <math>^{10}\text{B}_4\text{C}</math> на лавсановую плёнку).</p> <p>Конструкторская документация.</p>	100	

ти строу-трубок с напылением $^{10}\text{B}_4\text{C}$ на лавсановую плёнку.	Акт изготовления. Акт испытаний.		
УГТ6. Модель или прототип системы/подсистемы продемонстрированы в условиях, близких к реальным.  Разработана и изготовлена промышленная вакуумная установка ВАТТ 800 с площадью подложки до $700 \times 1200 \text{ мм}^2$	Техзадание.  Договор на выполнение работ (ФерриВатт).  Акт испытаний (ФерриВатт)	85	Оценка занижена вследствие отсутствия акта, подтверждающего работоспособность технологии на установке-ВАТТ800

Таблица 3.1.10.1. Уровень готовности технологии.

### Заключение

Командой оценщиков из экспертов, обладающих знанием и опытом, выполнена оценка уровня готовности технологии нанесения тонкоплёночных покрытий из карбида бора  $\text{B}_4\text{C}$  на полимерные плёнки с высокой температурой плавления - полиимид (картон) и лавсан (maular) на основании анализа документов и имеющихся материалов. Оценка УГТ выполнена каждым оценщиком самостоятельно, исходя из уровня соответствия каждому пункту УГТ. Предоставлено для оценки всего шесть пунктов УГТ. Расчет оценки соответствия по каждому пункту: 50%-85% частичное соответствие; 75%-100% полное соответствие. Общая оценка УГТ определяется единогласным решением по уровню полного соответствия.

Результат оценки уровня зрелости технологии – УГТ5.

### СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

- [3.1.10.1] Francesco Piscitelli «Boron-10 layers, Neutron Reflectometry and Thermal Neutron Gaseous Detectors» arXiv:1406.3133v1 [physics.ins-det] 12 Jun 2014
- [3.1.10.2] Høglund C. *et al.* J. Appl Phys, 2012, Vol. 111(10), 104908, <https://doi.org/10.1063/1.4718573>
- [3.1.10.3] А.Г. Колесников и др. Формирование тонких пленок карбида бора, обогащенного изотопом  $^{10}\text{B}$ , при низких температурах. НАНОИНДУСТРИЯ. 2022. Т. 15, № 5. С. 290–299. <https://doi.org/10.22184/1993-8578.2022.15.5.290.299>

### ПРИЛОЖЕНИЯ:

- Акт определения уровня готовности технологии. ФАЙЛ: [Прил. ПГ 3.1.10 Акт определения уровня готовности технологии.pdf](#)
- Отчет об оценке готовности технологии. ФАЙЛ: [Прил. ПГ 3.1.10 Отчет об оценке готовности технологии.pdf](#)
- Распоряжение для оценки УГТ. ФАЙЛ: [Прил. ПГ 3.1.10 Распоряжение для оценки УГТ.pdf](#)
- Распоряжение для разработки технологии. ФАЙЛ: [Прил. ПГ 3.1.10 Распоряжение для разработки технологии.pdf](#)
- Техническое задание на разработку технологии. ФАЙЛ: [Прил. ПГ 3.1.10 Техническое задание на разработку технологии.pdf](#)

### 3.1.11 Совместные с АО НИИТФА исследования характеристик образцов модернизированных детекторов нейтронов на основе конвертеров с тонкопленочным покрытием из карбида бора $^{10}\text{B}_4\text{C}$ , изготовленных АО НИИТФА. Подготовка предложений по повышению эффективности детекторов нейтронов для применения на предприятиях РосАтом.

В ЛНФ ОИЯИ выполнено изготовление комплекта конвертеров с тонкопленочным покрытием из карбида бора  $^{10}\text{B}_4\text{C}$  на подложки из алюминиевых листов размером 280x380 мм толщиной 0.5 мм. Покрытие выполнено с помощью магнетронного распыления мишени из карбида бора  $^{10}\text{B}_4\text{C}$ . Комплект подложек в количестве 6 (шесть) штук с разной толщиной покрытия – 0.5, 1.0, 1.5, 2.0, 2.5, 3.0 мкм, передан АО НИИТФА для проведения сравнительных испытаний. АО НИИТФА изготовлены 7 опытных образцов коронных счётчиков, а именно: 6 образцов из переданных материалов и один образец, принимаемый за контрольный, из материала, покрытие которого выполнено по технологии нанесения суспензии аморфного бора  $^{10}\text{B}$ , применяемой в АО НИИТФА. Силами АО НИИТФА проведены сравнительные исследования чувствительности образцов. На рисунке приведена схема экспериментальной установки. В качестве источника использовали источник тепловых нейтронов с выходом не менее  $1 \times 10^6$  нейтр/сек. Счётчик, принимаемый за контрольный, размещали в блоке замедлителя экспериментальной установки и измеряли количество импульсов за время 600 сек. Затем в блоке замедлителя размещали поочередно все 6 исследуемых образцов и производились замеры количества импульсов за это же время.

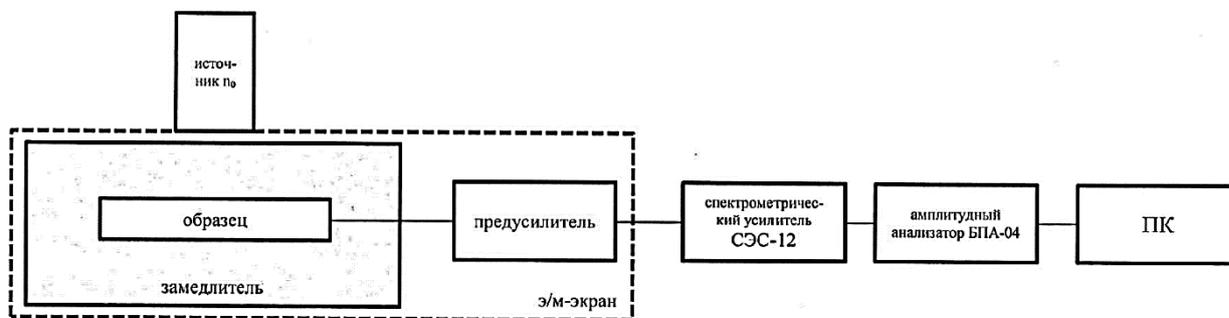


Рисунок 3.1.11.1. Схема экспериментальной установки.

Относительная чувствительность определялась по формуле:

$$\eta_{\text{отн}} = \frac{N_n}{N_{nk}}, \quad (3.1.11.1)$$

где  $\eta_{\text{отн}}$  – относительная чувствительность экспериментальных образцов;

$N_n$  – число зарегистрированных импульсов счётчика;

$N_{nk}$  – число зарегистрированных импульсов счётчика, принятого за контрольный.

В ходе испытаний установлено, что максимальный прирост чувствительности в сравнении с покрытием, применяемом в АО НИИТФА, составил 32%.

ЛНФ ОИЯИ и АО НИИТФА провели совместное обсуждение результатов испытаний и выработали предложения по использованию изготавливаемых в ЛНФ конвертеров нейтронов на основе тонкопленочных покрытий из карбида бора  $^{10}\text{B}_4\text{C}$  для применения на предприятиях РосАтом для изготовления детекторов нейтронов, имеющих более высокую эффективность регистрации нейтронов.

ЛНФ ОИЯИ и АО НИИТФА подготовили материалы для совместной публикации по результатам исследований.

ПРИЛОЖЕНИЯ:

- Протокол испытаний. ФАЙЛ: [Прил. ПГ 3.1.11 Протокол испытаний.pdf](#)

- Программа и методика испытаний. ФАЙЛ: [Прил. ПГ 3.1.11 Программа и методика испытаний.pdf](#)
- Акт испытаний и предложения. ФАЙЛ: [Прил. ПГ 3.1.11 Акт испытаний и предложения.pdf](#)

### 3.1.12 Работы исследователей в возрасте до 39 лет

**Проведение экспериментальных исследований прототипа двумерного позиционно-чувствительного счетчика нейтронов на основе сцинтилляторов ZnS/6LiF и твердотельных фотоэлектронных умножителей с апертурой не менее 100×100 мм<sup>2</sup> (совместно с НИЦ «Курчатовский институт» – ПИЯФ)**

В ходе работ по проекту на третьем этапе были проведены экспериментальные исследования прототипа двумерного позиционно-чувствительного счетчика нейтронов на основе сцинтилляторов ZnS/6LiF и твердотельных фотоэлектронных умножителей с апертурой не менее 100×100 мм<sup>2</sup>.

Цель выполнения работы: провести экспериментальные исследования прототипа двумерного позиционно-чувствительного счетчика нейтронов на основе сцинтилляторов ZnS/6LiF и твердотельных фотоэлектронных умножителей с апертурой не менее 100×100 мм<sup>2</sup>, разработанного и созданного на 2 этапе проекта.

В ходе проведенных исследований была осуществлена проверка рабочих параметров прототипа в соответствии с методикой испытаний ДПЧС.01.00.00.00.000 МИ. Прототип двумерного позиционно-чувствительного счетчика нейтронов на основе сцинтилляторов ZnS/6LiF и твердотельных фотоэлектронных умножителей с апертурой не менее 100×100 мм<sup>2</sup> в сборке представлен на рис. 3.1.12.1.



Рисунок 3.1.12.1. Прототип двумерного позиционно-чувствительного счетчика нейтронов.

Схема счетчика представлена на рис. 8. Принцип работы счетчика основан на оптическом ослаблении света. Нейтрон, падающий на сцинтиллятор, конвертируется в фотоны. Фотоны, попадающие в световод, распространяются во всех направлениях, и в зависимости от пройденного пути (L1, L2, L3, L4 на рис. 3.1.12.2) поглощаются. В конечном итоге за счет различного ослабления сигнала будут отличаться амплитуды сигналов, полученных с торцов световода.

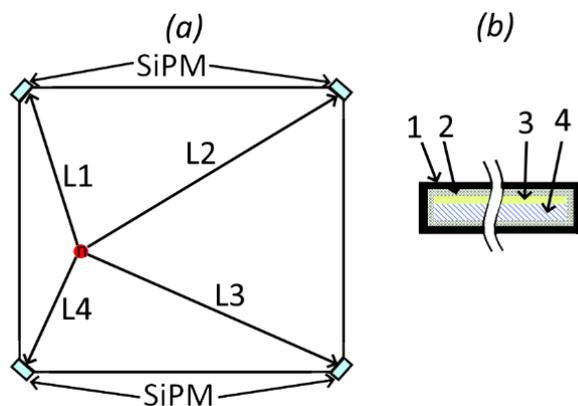


Рисунок 3.1.12.2. Схема двумерного позиционно-чувствительного счетчика нейтронов: а – схема размещения SiPM с направлениями движения фотонов; б – структура счетчика в разрезе, 1 – фторопластовая лента, 2 – светоотражающее покрытие, 3 – сцинтиллятор, 4 – световод.

Тестирование детектора производилось от источника нейтронов  $\text{Cf}^{252}$ . Быстродействие в данном исследовании определялось в первую очередь быстродействием усилителя, остальные составляющие на порядок меньше, чем время интегрирования усилителя. Исходя из времени интегрирования быстродействие составляет  $1 \times 10^6$  нейтронов/сек.

Для получения сигнала каждый кремниевый фотоумножитель подключался к предусилителю. В качестве предусилителя использовался интегрирующий усилитель с постоянной формирования 1 мкс, максимальная загрузка кремниевого фотоумножителя – 1 МГц. Сигналы с предусилителей попадали на 8-канальный приемник аналоговых сигналов MPSD-8+, который сохранял форму импульсов для дальнейшего анализа. На рис. 3.1.12.3 представлен пример формы импульсов, полученных с предусилителей.

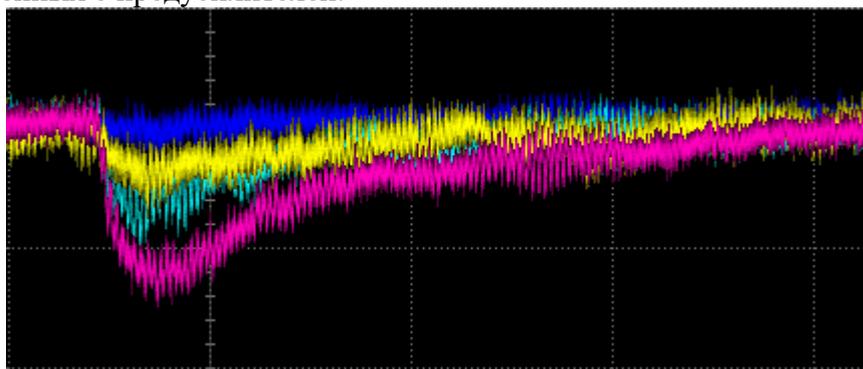


Рисунок 3.1.12.3. Пример формы импульсов, полученных с предусилителей.

На рис. 3.1.12.4 показано сравнение отношения амплитуд двух противоположных кремниевых фотоумножителей и сравнение их с модельными данными. Из экспериментальных данных получено разрешение около 7 мм по координате для счетчика  $100 \times 100 \text{ мм}^2$ .

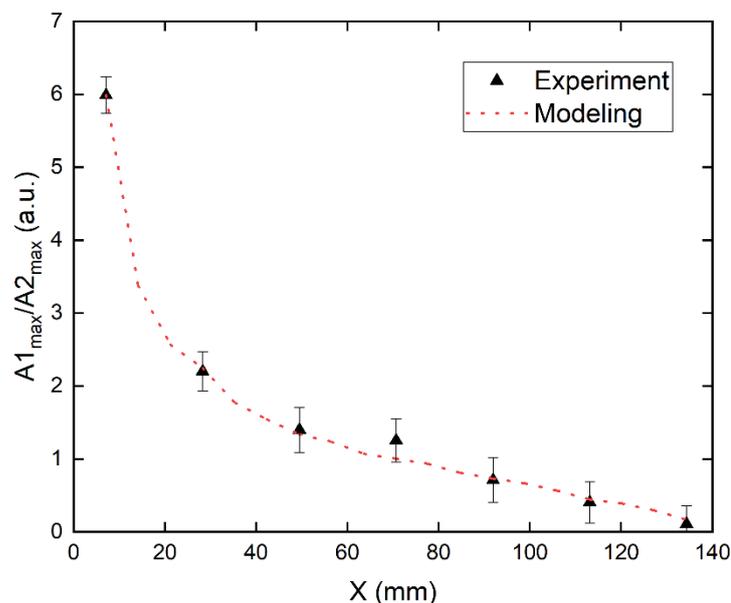


Рисунок 3.1.12.4. Сравнение экспериментальных и модельных спектров с двух противоположных кремниевых фотоумножителей.

В результате проведенных исследований было установлено, что объект исследований прототип двумерного позиционно-чувствительного счетчика нейтронов на основе сцинтилляторов ZnS/6LiF и твердотельных фотоэлектронных умножителей с апертурой не менее 100×100 мм<sup>2</sup>, соответствует параметрам, обозначенным в методике исследований.

Результат проделанной работы представлен в приложениях.

#### ПРИЛОЖЕНИЯ

- Методика исследований. ФАЙЛ: [Прил. ПГ 3.1.12 Методика исследований.pdf](#)
- Акт испытаний. ФАЙЛ: [Прил. ПГ 3.1.12 Акт испытаний.pdf](#)
- Протокол исследований. ФАЙЛ: [Прил. ПГ 3.1.12 Протокол исследований.pdf](#)
- Справка о выполнении работ до 39 лет. ФАЙЛ: [Прил. ПГ 3.1.12 Справка о выполнении работ до 39 лет.pdf](#)

#### 3.1.13 Работы, выполняемые за счет софинансирования из внебюджетных источников.

##### Калибровка одиночных детекторов нейтронов входящих в состав детекторной системы нейтронного дифрактометра «СФЕРА» от радиоизотопного источника (совместно с ИЯИ РАН)

Также было проведено тестирования параметров детекторов на источнике нейтронов и параметров одиночных детекторов нейтронов входящих в состав детекторной системы нейтронного дифрактометра «СФЕРА». Для проведения тестирования разработана программа ЛНИ.Э000 ПМ-2. Цель проведения тестирования – проверка параметров дифрактометра «СФЕРА», оценка эффективности и пороговых значений шумов, темнового шума и оценка параметров загрузки и максимальной скорости счета сборки детекторов.

Цель калибровки – оценка параметров разброса эффективности одиночных детекторов детекторной системы дифрактометра СФЕРА.

Калибровка проводится следующим образом:

- Производится подача питающего напряжение на детекторы и систему измерения.
- Записываются индивидуальные параметры порогов в предусилители для устранения темнового шума детекторов.

- Производится накопление данных в течении 1 минуты для получения параметров темнового шума.
- На месте образца размещается источник нейтронов  $^{252}\text{Cf}$ .
- Производятся измерения счетов детекторов в течении 10 мин.

Дальнейшая обработка данных состоит в поиске детектора с максимальным счетом на каждом кольце, и расчете отклонений для каждого детектора по формуле

$$\varepsilon = 1 - \frac{N_{max}}{N_{det}}. \quad (3.1.13.1)$$

Полученные данные для коэффициентов показаны в прикрепленном приложении. Из них можно сделать вывод что отклонения эффективности одиночных детекторов составляют максимум 11%. Это позволяет сделать вывод что детекторы имеют хорошую повторяемость и разброс связан только с неоднородностью сцинтилляционного листа.

На рис. 3.1.13.1 показан внешний вид изготовленного дифрактометра.



Рисунок 3.1.13.1. Внешний вид изготовленного дифрактометра

На данную схему дифрактометра получен патент [3.1.13.1].

На выполнение работ по п. 3.1.13 израсходовано 255 310 рублей из внебюджетных источников.

#### СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

[3.1.13.1] Патент № 2796123 С1 Российская Федерация, МПК G01N 23/20. Широкодиапазонный кольцевой времяпролетный дифрактометр нейтронов с регулируемым разрешением: № 2022134286: заявл. 26.12.2022; опубл. 17.05.2023 / Д. Н. Трунов, В. Н. Марин, В. С. Литвин [и др.]; заявитель Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт ядерных исследований Российской академии наук.

#### ПРИЛОЖЕНИЯ

- Акт калибровки. ФАЙЛ: [Прил. ПГ 3.1.13 Акт калибровки Калибровка одиночных детекторов нейтронов входящих в состав детекторной системы нейтронного дифрактометра СФЕРА от радиоизотопного источника.pdf](#)

#### **3.1.14 Работы, выполняемые за счет финансирования из внебюджетных источников.**

##### **Проведение тестирования параметров одиночных детекторов нейтронов входящих в состав детекторной системы нейтронного дифрактометра «СФЕРА» на источнике нейтронов (совместно с ИЯИ РАН)**

В рамках работ 3 этапа была проведена калибровка детекторов от радиоизотопного источника. Цель калибровки – нормирование детекторов, находящихся на одном кольце для правильной работы дифрактометра в режиме определения текстуры, и оценка параметров разброса эффективности одиночных детекторов детекторной системы дифрактометра СФЕРА.

Для этого одиночные детекторы, входящие в состав дифрактометра “СФЕРА”, были установлены в установку ГЕРКУЛЕС источника ИН-06 ИЯИ РАН. В качестве образцов для исследования были использован сплав MoTiC. Полученные данные были обработаны методом Ритвельда. На рис. 3.1.14.1 показан пример обработанного спектра MoTiC. В результате исследования показано, что детекторы обладают высокой эффективностью, и позволяют получить достаточное разрешение для измерения реальных образцов [3.1.14.1].

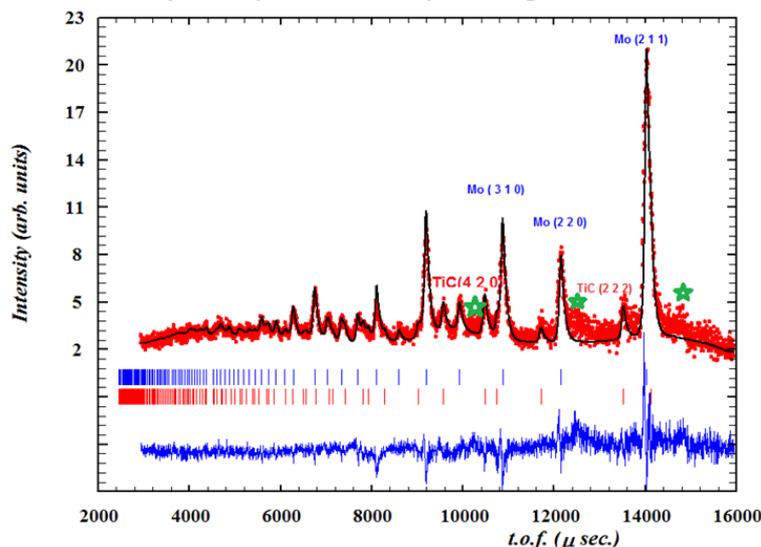


Рисунок 3.1.14.1. Пример спектра, обработанного методом Ритвельда сплава MoTiC.

На выполнение работ по п. 3.1.14 израсходовано 618 242,8 рублей из внебюджетных источников.

#### СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

[3.1.14.1] Трунов Д.Н. Исследование жаропрочных объемных композитов MoTiC и MoTiC-W / Д.Н. Трунов, С.Н. Аксенов, В.С. Литвин [и др.] // Международный научно-исследовательский журнал. — 2023. — №10 (136). — URL: <https://research-journal.org/archive/10-136-2023-october/10.23670/IRJ.2023.136.2> (дата обращения: 10.11.2023). — DOI: 10.23670/IRJ.2023.136.2

#### ПРИЛОЖЕНИЯ:

- Протокол тестирования. ФАЙЛ: [Прил. ПГ 3.1.14 Протокол тестирования.pdf](#)
- Программа тестирования. ФАЙЛ: [Прил. ПГ 3.1.14 Программа тестирования.pdf](#)
- Акт проведения тестирования. ФАЙЛ: [Прил. ПГ 3.1.14 Акт проведения тестирования.pdf](#)

#### 3.1.15 Работы, выполняемые за счет софинансирования из внебюджетных источников.

**Приобретение комплектующих и оборудования, изготовление стендов, подготовка помещений, необходимых для создания прототипа двумерной позиционно-чувствительной многопроволочной камеры с апертурой не менее 200×200 мм<sup>2</sup> с пространственным разрешением не менее 2×2 мм<sup>2</sup> (совместно с НИЦ «Курчатовский институт» – ПИЯФ).**

На третьем этапе проекта были проведены работы, направленные на приобретение комплектующих и оборудования, изготовление стендов, подготовку помещений, необходимых для создания прототипа двумерной позиционно-чувствительной многопроволочной камеры с апертурой не менее 200×200 мм<sup>2</sup> с пространственным разрешением не менее 2×2 мм<sup>2</sup>. На софинансирование данных работ были направлены средства из внебюджетных источников.

Цель выполнения работы: приобрести комплектующие и оборудование, изготовить стенды, подготовить помещения, необходимые для создания прототипа двумерной позиционно-чувствительной многопроволочной камеры с апертурой не менее  $200 \times 200 \text{ мм}^2$  с пространственным разрешением не менее  $2 \times 2 \text{ мм}^2$ .

В результате выполнения работ была осуществлена закупка комплектующих и оборудования на основании договоров Заказчика НИЦ «Курчатовский институт» - ПИЯФ с Поставщиком ООО «Кор-Сервис»: договор №0588 от 11.09.2023 г., договор №0587 от 11.09.2023 г., договор №0763 от 06.10.2023 г.

Также были проведены подготовительные работы в лабораторных помещениях для создания прототипа на основании договора Заказчика НИЦ «Курчатовский институт» - ПИЯФ с Поставщиком: ИП «Оськин В.В.», договор №0618 от 27.07.2023 г.

Отчетная документация по проведенным работам, включающая Акт выполненных работ, документацию на поставку комплектующих и оборудования для создания прототипа двумерной позиционно-чувствительной многопроволочной камеры и бухгалтерскую справку, представлена в составе Отчета 3 этапа к № 148-100-1/2023 от 23 июня 2023 г. в рамках Соглашения № 075-10-2021-115 от 13 октября 2021 г. согласно п. 6.6 Приложения №3 к Договору, п. 3.1.15 Плана-графика и п. 2.5, п. 3.2.5 ТЗ к Договору.

На выполнение работ по п. 3.1.15 израсходовано 3 400 000 рублей из внебюджетных источников.

#### ПРИЛОЖЕНИЯ:

- Дополнительное соглашение к договору. ФАЙЛ: [Прил. ПГ 3.1.15 Доп согл №1 к Дог на выполнение рем работ №0618.pdf](#)
- Договорный документ №0763. ФАЙЛ: [Прил. ПГ 3.1.15 Дог докум на поставку компл и оборуд №0763.pdf](#)
- Договорный документ №0588. ФАЙЛ: [Прил. ПГ 3.1.15 Дог докум на поставку компл и оборуд №0588.pdf](#)
- Договорный документ №0587. ФАЙЛ: [Прил. ПГ 3.1.15 Дог докум на поставку компл и оборуд №0587.pdf](#)
- Договорный документ №0618. ФАЙЛ: [Прил. ПГ 3.1.15 Дог докум на выполнение рем работ №0618.pdf](#)
- Акт выполненных работ. ФАЙЛ: [Прил. ПГ 3.1.15 Акт выполненных работ.pdf](#)

### **3.2.1 Реализация 4-й очереди создания опытно-экспериментального участка (ОЭУ) по нанесению тонкопленочных борсодержащих покрытий. Поставка оборудования (часть 1).**

В течение 3-го периода выполнения Проекта выполнялась реализация 4-й очереди создания опытно-экспериментального участка (ОЭУ) по нанесению тонкопленочных борсодержащих покрытий. Выполнены работы по оснащению вакуумной установки магнетронного напыления, установленной в помещении 102 корпуса 119 Лаборатории нейтронной физики магнетронными мишенями с повышенным содержанием изотопа бора  $^{10}\text{B}$ , что обеспечит увеличение эффективности детекторов нейтронов за счет повышенного содержания изотопа бора  $^{10}\text{B}$  в конвертерных слоях детекторов разного типа. В рамках этих работ решены следующие задачи:

1. Синтезировано соединение додекаборид алюминия ( $\text{AlB}_{12}$ ), имеющее повышенное содержание бора, используя природный аморфный бор с природным содержанием изотопа  $^{10}\text{B}$ , в виде гранулированного порошка в количестве 0,5 кг.
2. Из нитрида бора (BN) изготовлены пресс-формы диаметром 130 мм толщиной 30 мм в количестве 4 шт для высокотемпературного прессования заготовок мишеней.
3. Получены пресс-заготовка мишеней из  $\text{AlB}_{12}$  с природным содержанием изотопа  $^{10}\text{B}$  диаметром 130 мм толщиной 20 мм.
4. Выполнено высокотемпературное спекание в вакууме пресс-заготовки мишеней из  $\text{AlB}_{12}$ .

- Материал получен с содержанием примесей не более 0,8%. Плотность 1,7 г/см<sup>3</sup>.
5. Изготовлена наборная мишень AlB<sub>12</sub> размером 100x400x2 мм распилом заготовки на 8 пластин размером 100x50x2 мм.
  6. Синтезировано соединение додекаборид алюминия (AlB<sub>12</sub>), содержащего бор, обогащенный изотопом <sup>10</sup>B до 96%, в кол-ве 1 кг.
  7. Получены 2 шт. пресс-заготовки мишеней диаметром 130мм и толщиной 22 мм прессованием гранулированного порошка AlB<sub>12</sub>, обогащенного <sup>10</sup>B до 96%.
  8. Выполнено высокотемпературное спекание в вакууме пресс-заготовок мишеней из AlB<sub>12</sub>, обогащенного <sup>10</sup>B до 96%. Содержание примесей не более 0,8%. Плотность 1,72 г/см<sup>3</sup>.
  9. Изготовлена наборная мишень AlB<sub>12</sub> размером 100x400x5 мм распилом двух заготовок на 8 пластин размером 100x50x5 мм.
  10. Выполнен монтаж 2 комплектов составных мишеней 100x400 мм на соответственно две медные подложки магнетрона с применением в качестве бондажа (пайки) металлического индия. Крепление выполнено на подложки магнетронов установки магнетронного распыления, размещенной в корпусе 119 ЛНФ ОИЯИ.

#### ПРИЛОЖЕНИЯ:

- Договорная документация 400-02205 и акты сдачи приемки. ФАЙЛ: [Прил. ПГ 3.2.1 Договорная документация на выполнение работ 400-02205\(Изостер\) и Акты сдачи приемки.pdf](#)
- Договорная документация 400-01792 и акты сдачи приемки. ФАЙЛ: [Прил. ПГ 3.2.1 Договорная документация на выполнение работ 400-01792\(ИП Лежнин\) и Акт сдачи приемки.pdf](#)
- Договор поставки ЭВ-755-2023 и УПД. ФАЙЛ: [Прил. ПГ 3.2.1 Договор поставки ЭВ-755-2023\(Эрствак\) и УПД.pdf](#)
- Договор поставки 400-02246 и УПД. ФАЙЛ: [Прил. ПГ 3.2.1 Договор поставки 400-02246\(ПриСТ\) и УПД.pdf](#)
- Договор поставки 400-02078 и УПД. ФАЙЛ: [Прил. ПГ 3.2.1 Договор поставки 400-02078\(Пром медель\) и УПД.pdf](#)
- Договор поставки 400-02040, дополнительное соглашение и УПД. ФАЙЛ: [Прил. ПГ 3.2.1 Договор поставки 400-02040\(Элком\) Доп согл и УПД.pdf](#)
- Договор поставки 400-02012 и УПД. ФАЙЛ: [Прил. ПГ 3.2.1 Договор поставки 400-02012\(Норгау\) и УПД.pdf](#)

#### **3.2.2 Работы, выполняемые за счет финансирования из внебюджетных источников.**

**Реализация 4-й очереди создания опытно-экспериментального участка (ОЭУ) по нанесению тонкопленочных борсодержащих покрытий. Поставка оборудования (часть 2).**

В рамках реализации 4-й очереди создания опытно-экспериментального участка (ОЭУ) по нанесению тонкопленочных борсодержащих покрытий производилась закупка оборудования для комплектования инженерных систем ОЭУ. После проведения пуско-наладочных работ комиссией ЛНФ ОИЯИ Опытно-экспериментальный участок был принят в эксплуатацию.

На выполнение работ по п. 3.2.2 израсходовано 8 519 636 рублей из внебюджетных источников.

#### ПРИЛОЖЕНИЯ:

- Договор поставки 400-02320 и товарная накладная. ФАЙЛ: [Прил. ПГ 3.2.2 Договор поставки 400-02320\(ИП Савлюков\) и Товарная накладная.pdf](#)

- Договор поставки 400-02316, акт приема и товарная накладная. ФАЙЛ: [Прил. ПГ 3.2.2 Договор поставки 400-02316\(ИП Рябухин\) Акт приема и Товарная накладная.pdf](#)
- Договор поставки 400-02262 и товарная накладная. ФАЙЛ: [Прил. ПГ 3.2.2 Договор поставки 400-02262\(Техноальянс\) и Товарная накладная.pdf](#)
- Договор поставки 400-02024 и товарная накладная. ФАЙЛ: [Прил. ПГ 3.2.2 Договор поставки 400-02024\(Алюмика\) и Товарная накладная.pdf](#)
- Акт сдачи в эксплуатацию. ФАЙЛ: [Прил. ПГ 3.2.2 Акт сдачи в эксплуатацию.pdf](#)

### **3.3.1 Реализация дополнительной профессиональной программы повышения квалификации «Проведение синхротронных и нейтронных исследований» для специалистов естественно-научного профиля (совместно с К(П)ФУ)**

Реализована дополнительная профессиональная программа повышения квалификации «Проведение синхротронных и нейтронных исследований» для специалистов естественно-научного профиля. На программу зачислено 30 человек. Проведены учебные занятия в объеме 54 аудиторных часа (22 ч. лекционные, 28 ч. лабораторные, 4 ч. аттестация). Аттестовано 30 человек. Выданы удостоверения о повышении квалификации установленного образца.

Оповещение потенциальных слушателей программ ПК производилось путем размещения информации на сайте Института физики в разделе «Дополнительное образование» (<https://kpfu.ru/physics/dopolnitelnoe-obrazovanie-109398>), а также рассылкой информации по электронной почте руководителям профильных структурных подразделений К(П)ФУ и организаций Казани.

Открытие программ ПК осуществлялось на основании приказа проректора по образовательной деятельности, содержащего также информацию о сроках и стоимости обучения.

Запись на обучение осуществлялась по предоставлению письменного заявления и копий личных документов (паспорт, диплом о высшем образовании).

Очные лекционные занятия проводились в лекционных аудиториях Института физики (ул. Кремлевская, 16А). Для обеспечения возможности дистанционного участия слушателей и лекторов была организована онлайн-трансляция на платформе Яндекс 360. Оповещение участников образовательной программы о расписании, начале трансляции и ссылке для подключения осуществлялось посредством электронной почты на адреса, указанные обучающимися в заявлениях. Все необходимые материалы, оперативная информация, записи лекций размещены в папке «Синхротронные и нейтронные исследования», доступной по ссылке <https://disk.yandex.ru/d/QTpUipXiilmeXg> (рис. 3.3.1.1).

Презентации лекций, тесты текущей и итоговой аттестации размещены на портале дистанционного образования К(П)ФУ, курс «Проведение синхротронных и нейтронных исследований» (<https://edu.kpfu.ru/course/view.php?id=3289>). Доступ для сотрудников и обучающихся К(П)ФУ по корпоративному логину и паролю, сторонним лицам предоставлялся специальный доступ согласно утвержденному в К(П)ФУ порядку (рис. 3.3.1.2).

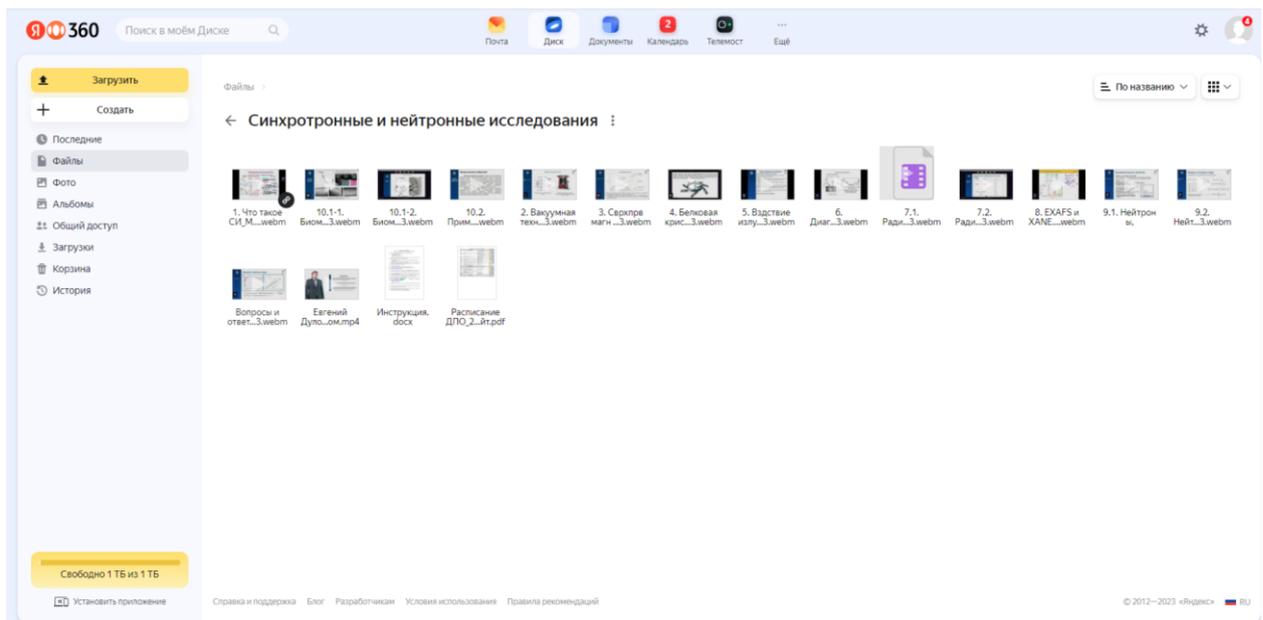


Рисунок 3.3.1.1. – Папка с материалами программ ПК на Яндекс диске.

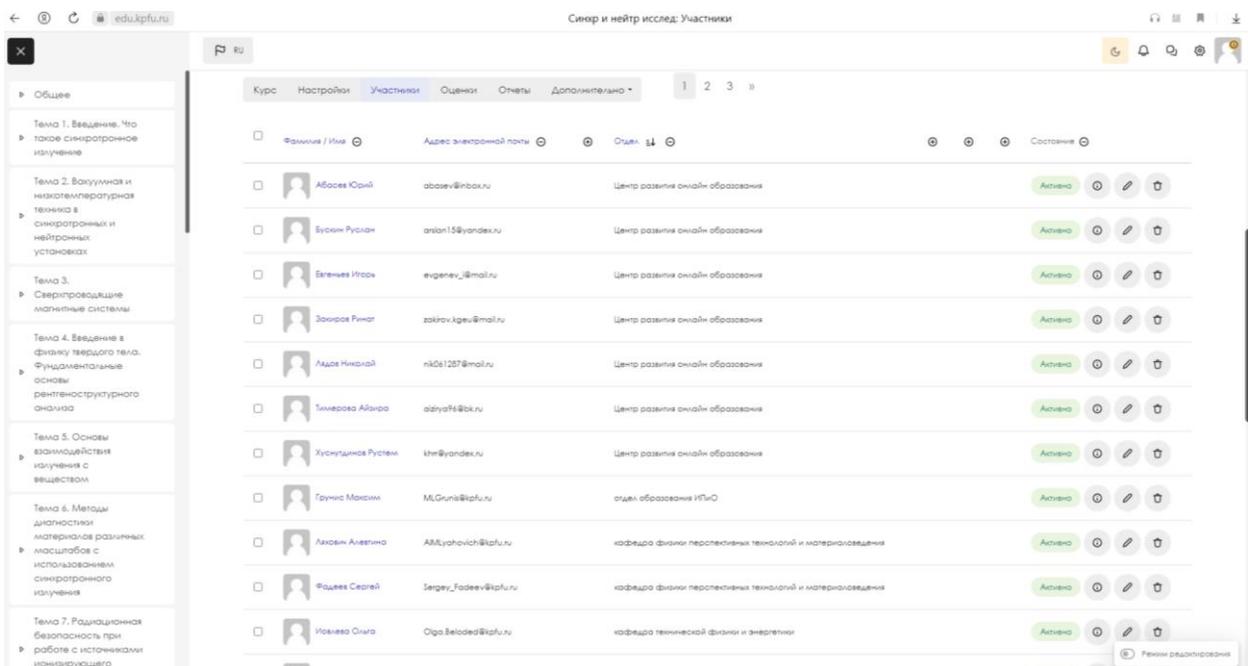


Рисунок 3.3.1.2. – Раздел «Участники» реализуемого курса ПК на платформе <https://edu.kpfu.ru> .

Лабораторные занятия проводились в учебных лабораториях Института физики: 603, 605, 606, 702, 703, 705, лаборатория ядерной физики. Отчеты о выполнении работ принимались и оценивались инженерами соответствующих лабораторий.

Итоговый контроль знаний по желанию обучающихся проводился дистанционно в автоматическом режиме на платформе <https://edu.kpfu.ru/> либо очно в письменном виде.

#### ПРИЛОЖЕНИЯ:

- Данные удостоверений и ведомости аттестации о повышении квалификации «Проведение синхротронных и нейтронных исследований» для естественно-научного профиля. ФАЙЛ: Прил. ПГ 3.3.1 Данные удостоверений и ведомости аттестации естественно-научного профиля.pdf

### **3.3.2 Реализация дополнительной профессиональной программы повышения квалификации «Проведение синхротронных и нейтронных исследований» для специалистов биомедицинского профиля (совместно с К(П)ФУ)**

Реализована дополнительная профессиональная программа повышения квалификации «Проведение синхротронных и нейтронных исследований» для специалистов биомедицинского профиля. На программу зачислено 4 человека. Проведены учебные занятия в объеме 54 аудиторных часа (22 ч. лекционные, 28 ч. лабораторные, 4 ч. аттестация). Аттестовано 4 человека. Выданы удостоверения о повышении квалификации установленного образца.

Организация оповещения, приема документов, процесса обучения и аттестации проведена аналогично п. 3.3.1.

ПРИЛОЖЕНИЯ:

- Данные удостоверений и ведомости аттестации о повышении квалификации «Проведение синхротронных и нейтронных исследований» для биомедицинского профиля. ФАЙЛ: [Прил. ПГ 3.3.2 Данные удостоверений и ведомости аттестации биомедицинского профиля.pdf](#)

### **3.3.3 Реализация дисциплины "Проведение синхротронных и нейтронных исследований" образовательной программы высшего образования магистратуры 03.04.02 "Физика" и раздела «Синхротронное и нейтронное излучения» дисциплины «Радиационная физика в биомедицине» образовательной программы высшего образования бакалавриата 12.03.04 "Биотехнические системы и технологии" для студентов естественнонаучного профиля (совместно с К(П)ФУ)**

В отчетном периоде разработан и утвержден новый учебный план образовательной программы магистратуры направления 03.04.02 «Физика», профиль «Физика перспективных материалов» приема 2023 года, куда в качестве факультативной была внедрена дисциплина «Проведение синхротронных и нейтронных исследований». Программа дисциплины разработана в соответствии с программой дисциплины ВО для естественно-научного профиля, подготовленной на 2-м этапе работ. Дисциплина реализована в первом (осеннем) семестре 2023-24 учебного года, обучено и аттестовано 15 человек.

Параллельно разработке программ, установленных требованиями Технического задания и Плана-графика 2-го и 3-го этапов работ, в качестве апробации разработанных типовых программ были модернизированы программы дисциплин, реализуемых в К(П)ФУ учебных планов образовательных программ высшего образования. Изменения связаны с внедрением в программы тематического раздела, соответствующего профилю образовательного направления обучающихся, объему выделяемых на дисциплину часов и достигаемым компетенциям. Итогом данной работы стала реализация в первом полугодии 2023 г. программы дисциплины «Радиационная физика в биомедицине» для направления подготовки бакалавриата 12.03.04 «Биотехнические системы и технологии» с включением раздела «Синхротронное и нейтронное излучения» для студентов естественно-научного профиля. Обучено и аттестовано 13 человек.

Всего в 2023 г. обучено и аттестовано 28 студентов естественнонаучного профиля.

Обе группы студентов были подключены к цифровому образовательному ресурсу «Проведение синхротронных и нейтронных исследований» (<https://edu.kpfu.ru/course/view.php?id=3289>), разработанному в рамках выполнения работ на предыдущих этапах.

ПРИЛОЖЕНИЯ:

- Программа дисциплины «Радиационная физика в биомедицине». ФАЙЛ: [Прил. ПГ 3.3.3 Программа дисциплины Рад физика в биомед.pdf](#)

- Программа дисциплины «Проведение синхротронных и нейтронных исследований». ФАЙЛ: [Прил. ПГ 3.3.3 Программа дисциплины Проведение синх и нейтр исследований.pdf](#)
- Ведомость дисциплины «Радиационная физика в биомедицине». ФАЙЛ: [Прил. ПГ 3.3.3 Ведомость Рад физика в биомед.pdf](#)
- Ведомость дисциплины «Проведение синхротронных и нейтронных исследований». ФАЙЛ: [Прил. ПГ 3.3.3 Ведомость Проведение синхр и нейтр исследований.pdf](#)

### **3.3.4 Реализация раздела "Применение синхротронного и нейтронного излучения в практической медицине и в области биологических наук" дисциплин "Общая и медицинская радиобиология. Физические основы лучевой диагностики и терапии», "Ядерная медицина" образовательных программ высшего образования специалитета 30.05.01 "Медицинская биохимия", 30.05.02 "Медицинская биофизика" для студентов биомедицинского профиля (совместно с К(П)ФУ).**

В качестве апробации разработанных на предыдущих этапах типовых программ для студентов биомедицинского направления нами были модернизированы программы дисциплин, реализуемых в К(П)ФУ учебных планов образовательных программ высшего образования. Изменения связаны с внедрением в программы тематического раздела, соответствующего профилю образовательного направления обучающихся, объему выделяемых на дисциплину часов и достигаемым компетенциям. Итогом данной работы стала реализация в 2023 г. следующих программ дисциплин для студентов биомедицинского профиля:

- «Общая и медицинская радиобиология. Физические основы лучевой диагностики и терапии» с включением раздела «Применение синхротронного и нейтронного излучения в практической медицине и в области биологических наук» для специалитета 30.05.02 «Медицинская биофизика» (прием 2020 г.); обучено и аттестовано 6 человек;

- «Общая и медицинская радиобиология. Физические основы лучевой диагностики и терапии» с включением раздела «Применение синхротронного и нейтронного излучения в практической медицине и в области биологических наук» для специалитета 30.05.01 «Медицинская биохимия» (прием 2021 г.) обучен и аттестован 1 человек;

- «Ядерная медицина» с включением раздела «Применение синхротронного и нейтронного излучения в практической медицине и в области биологических наук» для специалитета 30.05.02 «Медицинская биофизика» (прием 2018 г.) обучено и аттестовано 11 человек.

Всего в 2023 г. обучено и аттестовано 18 студентов биомедицинского профиля.

При проведении занятий и организации текущего контроля был задействован цифровой образовательный ресурс «Проведение синхротронных и нейтронных исследований» (<https://edu.kpfu.ru/course/view.php?id=3289>), разработанный нами в рамках выполнения работ по 2-му этапу проекта.

#### **ПРИЛОЖЕНИЯ:**

- Программа дисциплины «Ядерная медицина». ФАЙЛ: [Прил. ПГ 3.3.4 Программа дисциплины Ядерная медицина.pdf](#)
- Программа дисциплины «Общая и медицинская радиобиология. Физические основы лучевой диагностики и терапии» для специалитета 30.05.01 «Медицинская биохимия». ФАЙЛ: [Прил. ПГ 3.3.4 Программа дисциплины Общ и мед радиобиология \(Мед биохим\).pdf](#)
- Программа дисциплины «Общая и медицинская радиобиология. Физические основы лучевой диагностики и терапии» для специалитета 30.05.02 «Медицинская биофизика». ФАЙЛ: [Прил. ПГ 3.3.4 Программа дисциплины Общ и мед радиобиология \(Мед биофиз\).pdf](#)
- Копии локальных нормативных актов К(П)ФУ. ФАЙЛ: [Прил. ПГ 3.3.4 Копии локальных нормативных актов К\(П\)ФУ.pdf](#)
- Ведомость дисциплины «Ядерная медицина». ФАЙЛ: [Прил. ПГ 3.3.4 Ведомость Ядерная медицина.pdf](#)

- Ведомости дисциплины «Общая и медицинская радиобиология. Физические основы лучевой диагностики и терапии». ФАЙЛ: [Прил. ПГ 3.3.4 Ведомости Общ и мед радиобиология.pdf](#)

### **3.3.5 Разработка образовательной программы высшего образования «Проведение синхротронных и нейтронных исследований» для студентов археологического профиля (совместно с К(П)ФУ)**

Современные сложные физические методы исследования материалов все больше внедряются в сферы, кажущиеся весьма далекими от технических наук. Тем не менее именно такие методы позволяют разрешать задачи гуманитарных областей знаний, долгое время неподдающиеся решению профильным специалистам. К таковым относятся, например, исследования объектов культурного наследия. Ввиду этого наряду с повышением квалификации обязательным элементом образовательной программы высшего образования любого историко-культурного направления должен быть блок, дающий представление о технических инструментах исследований, стоящих на переднем крае науки.

Для реализации данной цели, учитывая специфику разработки учебных планов ОП ВО по направлениям магистратуры и предполагаемый круг решаемых выпускниками задач, разработана типовая программа для студентов археологического профиля на примере программы дисциплины «Проведение синхротронных и нейтронных исследований» для укрупненной группы направлений магистратуры 46.04.00 «История и археология». Программа предполагает очную форму обучения. Но в ней заложены элементы, позволяющие в части занятий при необходимости использовать дистанционные образовательные технологии.

#### **ПРИЛОЖЕНИЯ:**

- Образовательная программа «Проведение синхротронных и нейтронных исследований» для студентов археологического профиля. ФАЙЛ: [Прил. ПГ 3.3.5 Образовательная программа для студентов археологического профиля.pdf](#)

### **3.3.6 Актуализация перечня на 2023/2024 учебный год научно-исследовательских работ и руководителей научно-исследовательских практик студентов и аспирантов, реализуемых в рамках работы научно-образовательной лаборатории (совместно с МФТИ)**

В рамках поисковой научно-исследовательской работы лаборатории перспективных технологий мегасайенс МФТИ за время реализации проекта определены приоритетные тематики, по которым будет проводиться обучение перспективным технологиям моделирования и создания детекторов нейтронов (тонкостеночные дрейфовые трубки, детекторы ультрахолодных нейтронов, микроструктурные газоразрядные детекторы и др.), узлов ускорителей и источников нейтронов, разработке программного обеспечения моделирования и анализа данных для проектирования и работы на исследовательских станциях нейтронных источников. Осваиваемые обучающимися методы являются современными и универсальными и позволят выпускникам вовлекаться в научную работу исследовательских организаций уже на этапе работы над выпускными квалификационными работами бакалавриата и магистратуры, а также выстраивать траекторию научной карьеры, продолжив работу в выбранных направлениях в аспирантуре. К руководству научно-исследовательскими работами привлекаются ведущие ученые ОИЯИ, ведется работа по привлечению ученых и экспертизы ведущих исследовательских центров и коллабораций, которые внесут вклад в разработку перспективных технологий и решений применительно для исследований с использованием источников нейтронов (ESS, ILL, NA62, NA64, DONE, SHIP и др.).

Направление 1: Моделирование много-связанных физических систем с использованием классических подходов математической физики и методов глубокого обучения на архитектуре графических процессоров (GPU).

Рассматриваются так называемые связанные системы (couple problem), в математическом описании которых участвуют несколько постановок задач из различных областей физики. Например, обмотка с током в сверхпроводящем магните. Процесс охлаждения обмотки приводит к ее деформации (уравнение теплопроводности). Изменение геометрии обмотки приводит к перераспределению магнитного поля, которое она создает (уравнения Максвелла). Магнитное поле приводит к возникновению силы Ампера, которая дополнительно деформирует форму обмотки. В результате, возникает задача расчета напряженно-деформированного состояния. При этом весь процесс может являться нестационарным. Полученные результаты используются при моделировании процессов, происходящих в топливных элементах и узлах перспективных источников нейтронов.

Направление 2: Проектирование и разработка программных комплексов для моделирования и оптимизации нелинейных систем, описывающих динамику пучка заряженных частиц в ускорительных установках.

Создание и оптимизация современных ускорительных комплексов, таких как коллайдеры, синхротроны и циклотроны, требует предварительного математического моделирования с высокой степенью реалистичности. Достижение такой цели возможно путем построения математической и компьютерной модели с учетом как можно большего числа параметров и деталей проектируемой установки. Каждый узел установки требует создания для него своей математической модели, которая из-за высокой степени нелинейности уравнений, описывающих ее, требует многократного тестирования в различных режимах. Помимо детальной проработки каждого узла необходима комплексная оптимизация всей системы, то есть выполнение сквозных расчетов динамики пучка, проходящего от точки инжекции до системы вывода.

Направление 3: Интеграция современных систем распределенной обработки Больших Данных для экспериментов по высокоинтенсивному столкновению частиц.

Обработка и анализ экспериментальных, а зачастую и моделированных данных, являются неотъемлемой частью экспериментов на ускорительных установках. Для современных научных исследований характерно оперирование огромными объемами данных, регистрируемых в ходе высокоинтенсивных столкновений частиц в эксперименте, которые необходимо достаточно быстро обработать и своевременно получить физический результат, соответствующий поставленной цели. Современные вычислительные комплексы характеризуются гетерогенностью по программным и аппаратным ресурсам и географической распределенностью, в связи с чем в данной работе решается задача разработки и внедрения программного решения, базирующегося на современных системах обработки и управления Большими Данными, для распределенной обработки данных, получаемых на установке эксперимента. Комплексное решение поставленной задачи включает интеграцию системы распределенного запуска и управления задачами обработки Больших Данных, внедрение Каталога файлов с данными событий эксперимента, разработку сервиса автоматизации распределенной обработки потока данных эксперимента с учетом выбранных систем.

Направление 4: Разработка и развитие интерфейса системы электронного журналирования для операторов смен идущих сеансов физического эксперимента

Во время сеансов физических экспериментов важное значение для понимания регистрируемых событий имеют не только данные, собираемые с детекторов, но и записи в журналах операторами смен, описывающие текущие параметры и режимы работы различных систем и детекторов эксперимента во время сеансов и различные типы произошедших событий, а также проблемы и предпринятые действия. Для решения данной задачи разрабатывается система электронного журналирования, предоставляющая сотрудникам смен интерфейс для записи во время сеансов эксперимента данной информации, а также предназначенная для удобного просмотра, корректировки и поиска требуемой информации в журнале членами коллаборации эксперимента. Система электронного журналирования использует базу данных для хранения и работы с данными журнала эксперимента и обеспечения корректного многопользовательского доступа, согласованности, целостности данных и автоматического резервного копирования данных журнала на случай ошибок программного обеспечения или аппаратных сбоев. В рамках данной работы необходимо провести доработку реализованного прототипа интерфейса системы журналирования для внесения и предоставления другим членам эксперимента информации о режимах работы,

произошедших событиях и возникших проблемах во время работы, а также расширить функциональные возможности веб-приложения и связанных с ним сервисов и систем.

Направление 5: Разработка и внедрение современной системы визуализации и мониторинга событий столкновения частиц физического эксперимента

Графическое представление и мониторинг событий столкновения частиц, регистрируемых детекторными системами, являются важной частью и применяются во всех современных, крупных физических экспериментах. Такие системы визуализации событий используются на этапе проектирования и обработки полученных данных для проверки и отладки моделей, а также алгоритмов обработки данных, для визуализации данных реконструкции и физического анализа, а также требуются для мониторинга и контроля выборочных событий эксперимента в режиме онлайн, то есть во время идущего эксперимента. В рамках работы для решения данной задачи необходимо спроектировать и разработать систему визуализации и мониторинга событий столкновения частиц физического эксперимента, которая позволяет графически отображать и управлять геометрией детекторов, модельной информацией (точками, треками частиц) и реконструированными данными (хитами, треками, сработавшими башнями калориметров) как во время, так и после сеансов эксперимента. Данная система должна обеспечивать интерактивность: повороты, масштабирование, выбор и настройку отдельных объектов. Монитор событий физического эксперимента строится согласно клиент-серверной архитектуре с возможностью просмотра членами эксперимента данных событий посредством веб-браузера.

Направление 6: Проектирование и разработка сервиса мониторинга и автоматизированного восстановления функционирования программных систем обработки данных и информационных служб физического эксперимента.

Для современных физических экспериментов характерны большая длительность, высокая сложность и трудоемкость, огромная инфраструктура программного и аппаратного обеспечения, что повышает вероятность какого-либо сбоя во время работы подсистем эксперимента. Для минимизации времени реакции и восстановления различных программных и информационных систем в случае аппаратных или программных проблем важно следить за состоянием данных подсистем, что особенно критично во время проведения сеансов эксперимента. Для решения данной задачи необходима реализация сервиса мониторинга и восстановления, предназначенного для отслеживания состояния задействованных аппаратных узлов, информационных систем и других программных компонент, хранения и визуализации параметров их состояния на централизованном ресурсе, а в случае сбоев оперативного восстановления их работы. В разработке данного сервиса можно выделить два основных этапа. Первый – разработка подсистемы диагностики, которая непрерывно производит мониторинг работы аппаратных узлов, программных систем и служб эксперимента, собирает и визуализирует соответствующие статистические данные, а в случае не пройденных тестов высылает соответствующие уведомления об ошибке ответственному за систему персоналу. Второй этап – реализация подсистемы автоматизированного восстановления приведенным систем, то есть репликация и разворачивание реплицированной системы эксперимента на резервном узле в случае потери работоспособности основной.

Все представленные направления предложены обучающимся МФТИ для проведения научно-исследовательской работы в рамках созданной лаборатории.

ПРИЛОЖЕНИЯ:

- Перечень НИР 2023. ФАЙЛ: [Прил. ПГ 3.3.6 Перечень НИР 2023.pdf](#)

### **3.3.7 Ресурсное и инфраструктурное обеспечение в 2023 г. научно-образовательной лаборатории для реализации выполнения научно-исследовательских практик студентов и аспирантов, реализуемых в рамках работы научно-образовательной лаборатории (совместно с МФТИ)**

За период реализации проекта в рамках развития инфраструктуры научно-образовательной лаборатории приобретены материалы, комплектующие и оборудование, в том числе для

конструирования экспериментального стенда для тестирования тонкостеночных дрейфовых трубок, детекторов ультрахолодных нейтронов, микроструктурных газоразрядных детекторов и др. на космических мюонах, а также работ по разработке программного обеспечения моделирования и анализа данных (ROOT, Geant4, GARFIELD, FPGA и др.) для проектирования и работы на исследовательских станциях нейтронных источников.

Разрабатываемая система позволяет выполнять исследовательскую работу по разработке систем детектирования, в которых необходимо учитывать многие параметры, такие как выбор и оптимизация геометрии детекторов, их координатное разрешение и эффективность детектора заряженных частиц в магнитном поле, разрабатывать методы тестирования и отладки модулей детектирования, доказательства их радиационной стойкости и разработки считывающей электроники.

Конструируемый экспериментальный стенд включает в себя следующие подсистемы:

- система запуска, состоящая из трех сцинтилляционных детекторов. Два из них с рабочей площадью  $145 \times 145 \text{ мм}^2$  считываются кремниевыми фотоумножителями (SiPM), третий уровень размером  $40 \times 40 \text{ см}^2$  считывается фотоэлектронным умножителем и находится за свинцовым фильтром толщиной 37 см;

- калориметр для повышения точности измерений и возможности оцифровки событий, инициированных энергией, интегрированный в общую систему сбора данных;

- высокоточный детектор силиконовой ленты с прямым основанием.

Разрабатываемый стенд использует для отладки систему сбора данных, отработанную на эксперименте VM@N (рис. 3.3.7.1). Система сбора данных включает в себя два шестидесяти четырехустьных время-цифровых преобразователя, подключенных к усилителям Strow-детектора, три аналогово-цифровых преобразователя в комплекте с секвенсором в качестве считывающей электроники микростриповых детекторов, модуль формирования триггера, крейт-контроллер, разветвитель триггерного сигнала, триггерный модуль и модуль управления набором данных.

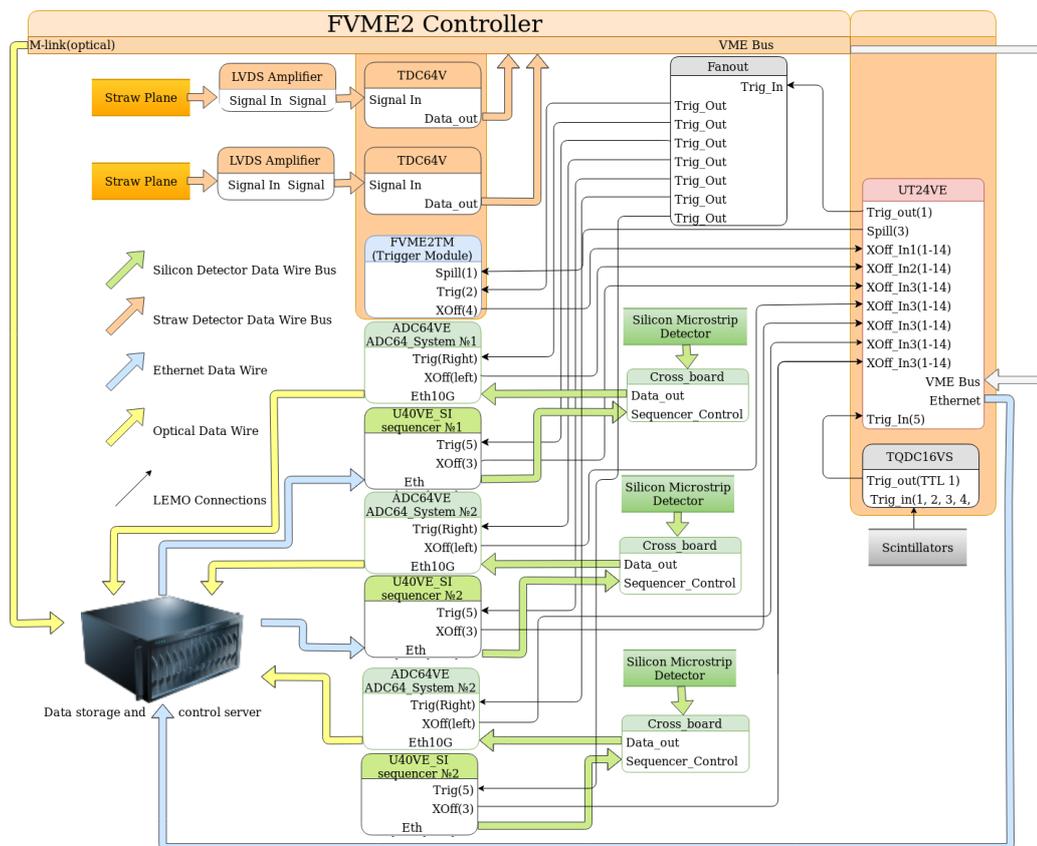


Рисунок 3.3.7.1. Структурная схема системы сбора данных стенда.

Разработанный стенд для тестирования тонкостеночных дрейфовых трубок, детекторов ультрахолодных нейтронов, микроструктурных газоразрядных детекторов и др. на космических мюонах, а также работ по разработке программного обеспечения моделирования и анализа данных представлен на рис. 3.3.7.2. В настоящее время стенд проходит наладку и тестирование на базе ЛФВЭ ОИЯИ. Работа со стендом будет включена в проектную деятельность студентов в рамках общеинститутского курса общей физики и специализированные курсы базового цикла обучения.

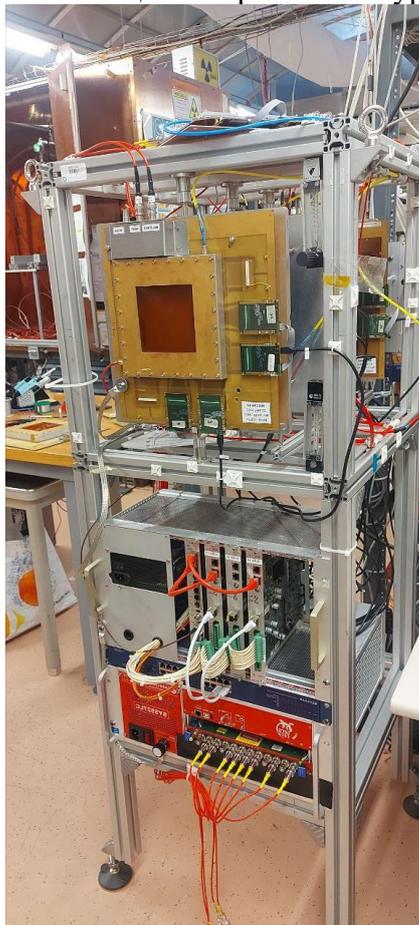


Рисунок 3.3.7.2. Экспериментальный стенд для тестирования тонкостеночных дрейфовых трубок, детекторов ультрахолодных нейтронов, микроструктурных газоразрядных детекторов и др. на космических мюонах.

#### ПРИЛОЖЕНИЯ:

- Сведения о затратах средств. ФАЙЛ: [Прил. ПГ 3.3.7 Сведения о затратах средств.pdf](#)

### **3.3.8 Реализация в 2023 г. научно-исследовательских работ (практик) студентов и аспирантов в рамках работы научно-образовательной лаборатории (совместно с МФТИ).**

За время реализации проекта в рамках развития образовательной деятельности сотрудником лаборатории д.ф.-м.н. Перепелкиным Евгением Евгеньевичем разработан курс «Параллельное программирование на графических процессорах в задачах теоретической и математической физики». Курс лекций рассчитан на широкий круг студентов, аспирантов и специалистов в различных областях математического моделирования и теоретической физики, для которых программирование не является основной специальностью, а используется ими как дополнительный инструмент в численном моделировании исследуемых задач. В курсе изложены базовые знания, необходимые, чтобы быстро и эффективно начать писать программы на графическом процессоре (GPU) без специальной подготовки в области программирования. Курс преследует цель изложить материал на простом доступном уровне, в первую очередь, пользователям, занимающимся прикладными задачами. Важным аспектом курса является включение в состав курса задач, в том

числе используемых при моделировании процессов, происходящих в топливных элементах и узлах перспективных источников нейтронов, а также ряда других прикладных задач моделирования узлов станций и источников нейтронов. Курс в формате факультатива читается студентам МФТИ в осеннем семестре 2022/2023 и 2023/2024 учебных годов.

В 2023 году в рамках проекта разработан онлайн-курс «Современные синхротроны и области их практического применения в материаловедении и структурной биологии».

Глобальной целью курса является его использование в образовательном процессе подготовки специалистов в области разработки, проектирования и строительства источников синхротронного и нейтронного излучения, а также научных кадров для проведения синхротронных и нейтронных исследований (разработок) в целях получения результатов мирового уровня, в том числе: разработка и реализация образовательных программ высшего образования и дополнительных профессиональных программ, направленных на создание прорывных технологических решений с применением синхротронных и нейтронных источников.

Курс знакомит обучающихся со свойствами синхротронного излучения, позволяющими проводить с его помощью исследования, недоступные для лабораторных рентгеновских установок.

В результате освоения дисциплины обучающиеся должны:

**Знать:** Возможности использования синхротронного излучения для изучения биологических и других образцов; Ограничения в достижимом пространственном и временном разрешении, связанные со свойствами используемых пучков излучения; Устройство экспериментальных станций на современных источниках синхротронного излучения и назначение их основных элементов

**Уметь:** Применять знания о возможностях использования синхротронного излучения для изучения биологических образцов для решения фундаментальных профессиональных задач; Творчески использовать в научной деятельности знания об ограничениях в достижимом пространственном и временном разрешении, связанных со свойствами используемых пучков излучения, для решения задач структурной биологии; Выделять и систематизировать основные идеи в научных текстах; Критически оценивать любую поступающую информацию, вне зависимости от источника; Генерировать новые идеи и методические решения; Осуществлять проектирование своей научной деятельности; Представлять свои научные результаты в устных докладах.

**Владеть:** Методами теоретического и экспериментального исследования; Навыками поиска (в том числе с использованием информационных систем и баз данных), обработки, анализа и систематизации информации; Навыками критического анализа и оценки современных научных достижений.

Курс состоит из 20 видеороликов, суммарной длительностью около 6.5 часов. Включает проверочные задания в виде задач к каждому видеоуроку, а также итоговый тест. Общая продолжительность курса составляет 6 недель.

Курс размещен на национальной платформе «Открытое образование» и доступен по ссылке <https://openedu.ru/course/mipt/synchrotron/>

Разработанный онлайн-курс является ресурсным обеспечением научно-образовательной лаборатории для реализации научно-исследовательских практик студентов и аспирантов, реализуемых в рамках работы научно-образовательной лаборатории для дальнейшего использования в научном и образовательном процессах.

Структура и содержание курса:

<b>Блок</b>	<b>Тема</b>	<b>Содержание</b>
1. Синхротронное излучение, его получение и свойства	1.1. Свойства и получение пучков рентгеновского излучения	<i>Введение. Основные свойства рентгеновского излучения. Диапазоны рентгеновского излучения.</i>
		<i>Геометрические параметры пучков излучения: размер источника, расходимость. Спектральная ширина. Яркость.</i>

	<i>Электромагнитное излучение осциллирующего заряда. Учет доплеровского эффекта в случае релятивистского заряда. Ондюлятор.</i>
1.2. Излучение электрона в кольцевом накопителе	<i>Устройство кольцевого накопителя заряженных частиц. Движение и излучение электрона в поворотном магните в нерелятивистском и релятивистском случае: циклотронное и синхротронное излучения.</i>
	<i>Диаграмма направленности синхротронного излучения: связь с релятивистским преобразованием координат. История открытия синхротронного излучения.</i>
1.3. Синхротронное излучение поворотного магнита	<i>Длительность импульса и спектр синхротронного излучения поворотного магнита. Критическая энергия. Использование синхротронного излучения поворотных магнитов в накопителях.</i>
	<i>Функциональная зависимость спектра синхротронного излучения поворотного магнита. Угловая плотность и яркость излучения.</i>
1.4. Синхротронное излучение ондулятора: спектральные свойства	<i>Ондулятор как основное устройство генерации синхротронного излучения на источниках 3-го и 4-го поколения. Спектр излучения ондулятора как интерференционная картина.</i>
	<i>Особенности спектра ондуляторного излучения: энергия, интенсивность и спектральная ширина гармоник. Связь с физическими параметрами ондулятора.</i>
	<i>Формулы для оценки спектральных параметров ондуляторного излучения. Особенности траектории электрона в ондуляторе, параметр ондуляторности.</i>
	<i>Управление спектром ондуляторного излучения.</i>
1.5. Синхротронное излучение ондулятора: пространственные свойства	<i>Пространственные характеристики ондуляторного излучения. Понятие центрального конуса монохроматического излучения ондулятора.</i>
	<i>Расходимость центрального конуса ондуляторного излучения. Размер источника и эмиттанс ондуляторного излучения в дифракционном пределе.</i>
1.6. Синхротронное излучение в реальных накопителях	<i>Ондуляторное излучение в реальных накопителях. Влияние эмиттанса электронного пучка на спектр ондуляторного излучения. Вигглеры. Поколения источников синхротронного излучения.</i>
	<i>Влияние эмиттанса электронного пучка на геометрические параметры пучков ондуляторного излучения. Понятие дифракционно ограниченного источника.</i>
1.7. Некоторые особенности ондуляторного излучения	<i>Четные гармоники в спектре ондулятора. Спектр ондуляторного излучения в случае конечной апертуры.</i>
	<i>Поляризация синхротронного излучения. Получение произвольно (линейно, эллиптически и циркулярно) поляризованных пучков на источниках синхротронного излучения.</i>

	1.8. Временная структура синхротронного излучения	<i>Особенности временной структуры синхротронного излучения в кольцевых накопителях: длительность и скважность импульсов, ограничения на временное разрешение экспериментов.</i>
	1.9. Источники синхротронного излучения 4-го поколения	<i>Конструктивные особенности накопителей для источников синхротронного излучения 4-го поколения.</i>
2. Рентгеновские лазеры на свободных электронах	2.1. Рентгеновские лазеры на свободных электронах	<i>Рентгеновские лазеры на свободных электронах: понятие когерентной эмиссии излучения электронным сгустком, механизм структурирования электронного сгустка.</i>
		<i>Устройство рентгеновского лазера на свободных электронах и спектральные особенности его излучения. Режимы самоусиленной спонтанной эмиссии (SASE) и усиления затравочного излучения.</i>
	2.2. Когерентные свойства синхротронного излучения	<i>Волновые свойства пучков синхротронного излучения. Понятия продольной и поперечной длин когерентности, степени когерентности. Дифракционно ограниченные пучки как полностью когерентные.</i>
3. Использование синхротронного излучения	3.1. Методы исследования вещества с помощью синхротронного излучения	<i>Разнообразие методик исследования вещества с помощью синхротронного излучения.</i>
		<i>Общая схема эксперимента с использованием пучка излучения/частиц.</i>
		<i>Классификация методов исследования вещества с использованием пучков излучения.</i>
		<i>Упругое рассеяние.</i>
		<i>Неупругое рассеяние.</i>
		<i>Понятие вектора переноса импульса.</i>
		<i>Сечения процессов рассеяния и поглощения на примере рентгеновского излучения.</i>
		<i>Процессы с испусканием вторичного излучения. Характеристическая рентгеновская эмиссия и Оже-процесс.</i>
	3.2. Понятие сигнала в методах исследования вещества с помощью синхротронного излучения	<i>Понятие сигнала в методах исследования вещества с помощью пучков излучения. Переменная сигнала.</i>
		<i>Примеры методик с разрешением сигнала в пространстве, по углу и по энергии: сканирующая рентгеновская микроскопия, рентгеновская дифракция, рентгеновская спектроскопия поглощения.</i>
3.3. Понятие разрешения в методах исследования вещества с помощью синхротронного излучения	<i>Ограничения методик, связанные с разрешением сигнала. Инструментальная функция, функция рассеяния точка.</i>	
	<i>Ограничения методик, связанные с разрешением сигнала по интенсивности. Статистика Пуассона.</i>	
	<i>Критерий Розе в методиках визуализации.</i>	

4. Методики рентгеновской микроскопии	4.1. Сканирующая и полнопольная рентгеновская микроскопия	<i>Сканирующая рентгеновская микроскопия и ее предельное пространственное разрешение.</i>
		<i>Полнопольная рентгеновская микроскопия и ее предельное пространственное разрешение.</i>
	4.2. Абсорбционный и фазовый контрасты в рентгеновской микроскопии	<i>Взаимодействие рентгеновского излучения с веществом в методах микроскопии. Комплексный показатель преломления.</i>
		<i>Контраст поглощения и минимальная экспозиция.</i>
		<i>Понятие фазового контраста в рентгеновской микроскопии. Преимущества фазового контраста и подходы к его получению: рентгеновская микроскопия Цернике, дифференциальный и осевой фазовый контраст.</i>
	4.3. Понятие необходимой и предельной дозы в рентгеновской микроскопии	<i>Томография.</i>
<i>Соотношения между предельно допустимой дозой и минимальной экспозицией в методиках визуализации биологических объектов.</i>		
5. Методики рентгеновской дифракции	5.1. Дифракционный подход к визуализации микрообъектов, когерентная дифракционная микроскопия	<i>Рентгеновская дифракция. Связь дифракционной картины с Фурье-образом объекта.</i>
		<i>Природа ограничения разрешения методик микроскопии с точки зрения Фурье-преобразования. Когерентная дифракционная рентгеновская микроскопия и алгоритм восстановления фаз.</i>
		<i>Инструментальные требования к методике когерентной дифракционной микроскопии.</i>
		<i>Использование методики для биологических объектов.</i>
6. Взаимодействие рентгеновского излучения с веществом	6.1. Взаимодействие рентгеновского излучения с веществом: рассеяние свободными электронами	<i>Отличие формализма взаимодействия излучения с веществом в методиках рентгеновской микроскопии и рентгеновской кристаллографии. Атомные факторы рассеяния.</i>
		<i>Связь атомных факторов рассеяния и показателя преломления вещества в рентгеновском диапазоне.</i>
	6.2. Взаимодействие рентгеновского излучения с веществом: рассеяние связанными электронами	<i>Рассеяние рентгеновского излучения связанным электроном. Резонансные поправки к атомным факторам рассеяния. Использование резонансной (аномальной) дифракции в исследования вещества.</i>
		<i>Связь резонансного рассеяния и мнимой части комплексного показателя преломления в рентгеновском диапазоне.</i>

Таблица 3.3.8.1. Структура и содержание курса.

Лаборатория за время реализации проекта активно участвует в подготовке мероприятий олимпиады и образовательного форума Всероссийской олимпиады студентов «Я – профессионал» по направлению «Физика и технологии уникальных научных установок класса «мегасайенс».

Всероссийская олимпиада студентов «Я – профессионал» проводится для студентов бакалавриата, магистратуры, специалитета российских вузов и направлена на проверку теоретических знаний и прикладных компетенций. Главная цель проекта – поддержка талантливых

студентов, которая позволит им продолжить обучение в ведущем российском вузе или начать карьеру.

«Я – профессионал» – один из флагманских проектов президентской платформы «Россия – страна возможностей». Проект реализуется при поддержке Министерства науки и высшего образования РФ. Олимпиада «Я – профессионал» проводится с 2017 года, в 2023/2024 учебном году проходит VII сезон.

73 предметных направления олимпиады объединены в 10 тематических групп:

- Естественные науки,
- Инженерные науки и технологии,
- Компьютерные науки,
- Педагогические науки,
- Искусство и гуманитарные науки,
- Медицина и здравоохранение,
- Социально-экономические науки,
- Агропромышленный комплекс и пищевые технологии,
- Вооружение и военная техника;
- Физическая культура.

МФТИ входит в число учредителей – членов Ассоциации организаторов студенческих олимпиад «Я – профессионал» наряду с другими лидирующими вузами (НИУ ВШЭ, Первый МГМУ им. И.М. Сеченова, УрФУ, Университет ИТМО, СПбПУ Петра Великого, ТюмГУ, НИЯУ МИФИ и РАНХиГС) и крупными объединениями и компаниями: Общероссийское объединение работодателей «Российский союз промышленников и предпринимателей», Сбербанк России, Трубная Металлургическая Компания, Банк ВТБ, Госкорпорация «Росатом».

Всего в организацию и проведение олимпиады в 2023/2024 учебном году вовлечены 35 вузов и более 500 российских компаний.

Для организации и проведения направлений олимпиады «Я – профессионал» Ассоциация организаторов студенческих олимпиад «Я – профессионал» проводит ежегодный конкурсный отбор вузов. 39 российских вузов направили заявки на организацию и проведение направлений олимпиады в 2023/2024 учебном году.

В 2023 году по итогам конкурсного отбора были определены 35 вузов, включая МФТИ, для организации и проведения направлений олимпиады «Я – профессионал». МФТИ получил право на проведение олимпиады по 4 направлениям:

- Физика;
- Физика и технологии уникальных научных установок класса “мегасайенс”;
- Математика;
- Искусственный интеллект.

Направление «Физика и технологии уникальных научных установок класса “мегасайенс”» было включено в перечень направлений олимпиады «Я – профессионал» в 2020 году по инициативе МФТИ и при поддержке работодателей, заинтересованных в будущих научных кадрах, – ОИЯИ и ФИАН.

В 2023/2024 учебном году МФТИ организует и проводит олимпиаду по направлению «Физика и технологии уникальных научных установок класса “мегасайенс”» с поддержкой ОИЯИ, ФИАН, ТРИНИТИ, НИЦ КИ – ИФВЭ, НИЦ КИ, ИК СО РАН и при участии вуза-соорганизатора НГУ.

После отборочного этапа олимпиады по направлению «Физика и технологии уникальных научных установок класса “мегасайенс”», прошедшего в конце 2022 года, в котором участвовали 403 студента, в марте 2023 года состоялся заключительный этап олимпиады. Для участия в заключительном этапе были приглашены студенты категории участия «бакалавриат» и категории участия «магистратура/специалитет», показавшие лучшие результаты в отборочном этапе.

В заключительном этапе участвовали 72 студента из вузов Москвы, Санкт-Петербурга, Томска, Новосибирска, Петропавловска-Камчатского, Воронежа, Ростова-на-Дону, Казани, Перми, Снежинска Челябинской области.

Для категории участия «бакалавриат» задания заключительного этапа состояли в письменном решении задач. Для категории участия «магистратура/специалитет» задания заключительного этапа состояли из двух частей: письменного решения задач и устного выступления с докладом.

Для проведения заключительного этапа олимпиады сотрудниками МФТИ, НГУ, ФИАН, НИЦ КИ – ИФВЭ, ОИЯИ и ТРИНИТИ были разработаны задания заключительного этапа по направлению «Физика и технологии уникальных научных установок класса “мегасайенс”» для категории участия «бакалавриат» и категории участия «магистратура/специалитет». Для подготовки студентов к заключительному этапу были разработаны демонстрационные версии заданий каждой категории участия.

Решение заданий заключительного этапа по направлению «Физика и технологии уникальных научных установок класса “мегасайенс”» состоялось дистанционно. На решение заданий было отведено 4 часа, для наблюдения за работой участников использовалась система прокторинга МФТИ. Для выступлений с докладами участников категории «магистратура/специалитет» использовалась система видеосвязи. Доклады были заслушаны комиссией, состоящей из научных сотрудников МФТИ, ФИАН, НИЦ КИ – ИФВЭ, ТРИНИТИ, ОИЯИ.

По итогам заключительного этапа были определены дипломанты направления «Физика и технологии уникальных научных установок класса “мегасайенс”» в категории участия «бакалавриат» и категории участия «магистратура/специалитет». Дипломы призеров, победителей и медалистов направления «Физика и технологии уникальных научных установок класса “мегасайенс”» получили 22 студента из НГУ, МИФИ, МФТИ, СпбГУ и ИТМО. Для каждой категории дипломантов предусмотрены льготы при поступлении в магистратуру и аспирантуру, возможность получить стажировку/работу в научной организации.

В следующем сезоне, по итогам регистрации, состоявшейся в период с 27 сентября по 14 ноября 2023 года, для участия в направлении «Физика и технологии уникальных научных установок класса “мегасайенс”» зарегистрировались 5011 студентов из 762 вузов, расположенных в 84 регионах России и за рубежом. Количество регистраций в 2023 году превысило аналогичный показатель 2022 года на 64%, что опережает среднее значение (38%) для VII сезона олимпиады «Я – профессионал».

77% зарегистрировавшихся студентов – 3854 – студенты бакалавриата. 1157 зарегистрировавшихся участников учатся в магистратуре или специалитете.

Наибольшую заинтересованность при регистрации на направление проявили студенты МФТИ – 239 студентов, НИЯУ МИФИ – 158 студентов, НИУ МЭИ – 102 студента, МГУ – 83 студента, ИТМО – 65 студентов, МГТУ им. Н.Э. Баумана – 64 студента, СПбПУ – 60 студентов, НИУ ВШЭ – 51 студент, МИСиС – 48 студентов, УрФУ – 40 студентов.

Для проведения отборочного этапа сотрудниками МФТИ и НИЦ КИ – ИФВЭ были разработаны задания отборочного этапа по направлению «Физика и технологии уникальных научных установок класса “мегасайенс”» для категории участия «бакалавриат» и категории участия «магистратура/специалитет».

Обновлена страница направления на сайте МФТИ: <https://lpr.mipt.ru/megascience> и продолжает работу телеграм-канал, публикующий актуальную и оперативную информацию для участников направления: <https://t.me/megascienceyaprofessional>.

Отборочный этап по направлению «Физика и технологии уникальных научных установок класса “мегасайенс”» проходит с 17 ноября до 3 декабря 2023 года. В течение этого периода участники могут выбрать день и время для того, чтобы приступить к решению задач. На решение отведено 8 часов. Отборочный этап проходит дистанционно с использованием онлайн-платформы Яндекс.Контест.

Итоги отборочного этапа будут подведены в конце декабря 2023 года – начале января 2024 года.

После подведения итогов отборочного этапа студенты, набравшие достаточно баллов в отборочном этапе, будут приглашены на заключительный этап, который состоится весной 2024 года. Заключительный этап олимпиады проводится очно или дистанционно с использованием технологий контроля поведения участников (прокторинг).

Для проведения заключительного этапа по направлению «Физика и технологии уникальных научных установок класса “мегасайенс”» сотрудниками МФТИ и организаций-партнеров будут разработаны задания для категории участия «бакалавриат» и категории участия «магистратура/специалитет». Для подготовки студентов к заключительному этапу будет организован и проведен образовательный вебинар.

Студентам категории «бакалавриат» на заключительном этапе предстоит решить более сложные задачи, чем задачи отборочного этапа. Студентов категории «магистратура/специалитет» на заключительном этапе ожидают два испытания: решение задач, а также подготовка научного доклада и выступление с ним перед жюри направления.

Весной 2024 года состоится проверка работ участников заключительного этапа, включающая рассмотрение апелляций. Итоги олимпиады будут подведены в мае 2024 года.

Участники направления приглашаются на образовательный форум олимпиады «Я – профессионал», который ежегодно проводит МФТИ. Форум включает значительную часть мероприятий (лекций, экскурсий, др.), посвященных физике нейтронов и синхротронного излучения и их применения, физике элементарных частиц, физике плазмы и управляемого термоядерного синтеза и других областей направления «Физика и технологии уникальных научных установок класса “мегасайенс”».

В апреле 2023 года в МФТИ состоялся Образовательный форум олимпиады «Я – профессионал».

На форум были приглашены студенты – участники направлений: «Физика и технологии уникальных научных установок класса “мегасайенс”» и «Физика», «Искусственный интеллект» и «Математика», олимпиаду по которым проводит МФТИ, и направлений естественно-научной и технической тематики, олимпиаду по которым проводят другие вузы – участники «Я – профессионал». В форуме участвовали более 200 студентов из 67 вузов, расположенных в 32 субъектах РФ.

Форум был проведен по двум секциям: секция для студентов, интересующихся современной физикой и перспективными мегасайенс-установками, и секция для студентов, интересующихся методами и технологиями искусственного интеллекта и приложениями математики. В рамках первой секции с лекциями выступили ученые НИЦ «Курчатовский институт» и ТРИНИТИ, для студентов были организованы экскурсии в НИЦ «Курчатовский институт», НИЦ КИ – ИФВЭ, ТРИНИТИ, ОИЯИ и ИЯИ РАН.

В рамках форума традиционно состоялись мероприятия, вошедшие в программу форумов МФТИ по инициативе ЛФИ МФТИ в 2022 году:

- Научный джем – неформальная встреча студентов и научных сотрудников. Студенты смогли свободно и откровенно поговорить с 19 научными сотрудниками, получить ответы на свои вопросы. В Научном джеме приняли активное участие сотрудники лаборатории перспективных технологий мегасайенс, а также ведущие ученые МФТИ, ОИЯИ, институтов РАН и других научных организаций и центров.
- ФизХакатон – командное соревнование студентов в решении физических задач, предполагающее теоретическую и экспериментальную части, презентацию решений задач, их защиту и оппонирование. Мероприятие методически и организационно поддержано кафедрой общей физики МФТИ.

Всероссийская олимпиада студентов «Я – профессионал» по направлению «Физика и технологии уникальных научных установок класса “мегасайенс”» позволяет студентам, заинтересованным в дальнейшей научной карьере, продолжить образование в МФТИ, НГУ и других вузах РФ, развивающих тематику исследований на установках «мегасайенс», и начать работу в составе научных коллективов таких организаций как ОИЯИ, ФИАН, ТРИНИТИ, НИЦ КИ, ИК СО РАН, ИЯИ РАН и др., а также в лабораториях МФТИ, НГУ и других университетов. Задания

олимпиады, составленные научными сотрудниками, дают возможность студентам познакомиться с актуальными исследовательскими проблемами и попробовать свои силы в решении не учебных, а реальных задач. Мероприятия образовательного форума в МФТИ развивают общий кругозор студентов в области их будущих возможностей, знакомят с работой российских установок класса «мегасайенс», с учеными и научными коллективами, их профессиональной деятельностью, текущими проектами и разработками, а также помогают развить навыки интеллектуального сотрудничества и командной исследовательской работы, необходимые для будущей карьеры ученого.

Всероссийская олимпиада студентов «Я – профессионал» по направлению Направление «Физика и технологии уникальных научных установок класса “мегасайенс”» позволяет студентам, заинтересованным в дальнейшей научной карьере, продолжить образование в МФТИ, НГУ и других вузах РФ, развивающих тематику исследований на установках «мегасайенс», начать работу в составе научных коллективов таких организаций как ОИЯИ, ФИАН, ТРИНИТИ, НИЦ КИ, ИК СО РАН, ИЯИ РАН и др., а также в лабораториях МФТИ, НГУ и других университетов. Задания олимпиады, составленные научными сотрудниками, дают возможность студентам познакомиться с актуальными исследовательскими проблемами и попробовать свои силы в решении не учебных, а реальных задач. Мероприятия форума развивают общий кругозор студентов в области их будущих возможностей, знакомят с работой российских установок класса «мегасайенс», с коллективами ученых, их профессиональной деятельностью, текущими проектами и разработками.

Во всех мероприятиях олимпиады и образовательного форума сотрудники лаборатории принимали активное участие, включая работу в составе организационного комитета.

Сотрудниками лаборатории перспективных технологий мегасайенс 28-29 августа 2023 года проведена научная конференция-семинар "Использование новых методов обработки данных физического эксперимента. Применение методов машинного обучения на комплексе NICA".

Это первый семинар для специалистов, аспирантов и студентов ведущих российских институтов, заинтересованных в применении новых методов получения, процессинга и обработки данных физических экспериментов класса МЕГА. Современные физические эксперименты, в особенности по фундаментальным исследованиям на больших установках, предоставляют все возрастающий объем данных и требуют все возрастающих компьютерных мощностей для обработки результатов. Поэтому, все чаще для работы на современных экспериментах начинают использоваться новые методы работы с данными, в том числе на основе методов машинного обучения.

Семинар направлен на обсуждение новых методов обработки данных современного физического эксперимента, выявление основных проблем, требующих решения и выработку дальнейшей стратегии. Будет рассмотрен опыт различных групп по внедрению методов ММО и ИИ на разных этапах обработки экспериментальных данных, а также мониторинга параметров детекторов и ускорительного комплекса во время набора данных.

Основные научные темы мероприятия включали:

- 1) Новые методы набора данных физического эксперимента, в том числе использование новых методик быстрого он-лайн триггера
- 2) Методы машинного обучения для анализа данных экспериментов на комплексе NICA
- 3) Опыт использования ИИ в подготовке к анализу данных
- 4) Опыт использования распределенных и грид технологий в анализе данных экспериментов Большого адронного коллайдера и перспективы для проекта NICA
- 5) Обработка отклика детекторов и построение треков частиц в детекторах с использованием методов машинного обучения

В мероприятии приняли участие 67 представителей научных организаций, включая значительную долю молодых участников из числа обучающихся университетов. Полученный опыт в 2024 году получит развитие в формате молодежной научной школы «Машинное обучение в анализе данных физических экспериментов класса мегасайенс», которую планируется провести на базе МФТИ.

В рамках направлений научных тематик лаборатории выполняются научно-исследовательские работы обучающихся по следующим темам:

- Моделирование отклика сцинтилляторов различной природы в пакете Geant4
- Времяразрешенное исследование мембранных белков на рентгеновском синхротронном источнике четвертого поколения
- Определение геометрии столкновений тяжелых ионов передними адронными калориметрами в экспериментах на ускорительном комплексе НИКА
- Поиск эффективного сцинтиллятора для регистрации быстрых нейтронов
- Разработка считывающей электроники для передних детекторов в ядро-ядерных экспериментах с фиксированной мишенью
- Детектор АСТРА Фурье-дифрактометра ФСД на импульсном реакторе ИБР-2
- Фазовые и структурные изменения в липидных системах различного морфологического состояния.
- Разработка прототипа сцинтилляционного детектора для мюнографии в скважинах
- Разработка систем управления и сохранения поляризации протонов и дейтронов в проекте "Новый Нуклотрон"

По результатам проделанной работы предоставляется отчет обучающихся о НИР, заверенный научным руководителем или руководителем образовательной программы.

ПРИЛОЖЕНИЯ:

- Отчеты обучающихся о НИР. ФАЙЛ: [Прил. ПГ 3.3.8. Отчеты обучающихся о НИР.pdf](#)

**3.3.9 Реализация в 2023 г. для подготовки специалистов в области разработки, проектирования и строительства источников синхротронного и нейтронного излучения, а также научных кадров для проведения синхротронных и нейтронных исследований (разработок) в целях получения результатов мирового уровня:**

**Модуль 6 «Синхротронные и нейтронные исследования для изучения биологически активных веществ, синтетических и природных полимеров»;**

**Модуль 7 «Использование нейтронных детекторов в анализе объектов окружающей природной среды»;**

**Модуль 8 «Радиационная безопасность».**  
**(совместно с университетом «Дубна»).**

Приказом № 2013к от 26 июня 2023 года (см. приложение) организован курс повышения квалификации с 17.07.2023 по 25.10.2023 по дополнительной профессиональной программе «Синхротронные и нейтронные исследования для изучения биологически активных веществ, синтетических и природных полимеров» в объеме 72 часа (см. приложение), утверждено расписание занятий, и зачислены 23 слушателя на места, финансируемые за счет средств гранта в форме субсидии.

Целью реализации программы является – формирование знаний, умений и навыков, необходимых для ведения нового вида профессиональной деятельности в сфере фундаментального и прикладного материаловедения.

Программа знакомит слушателей с основами теории и практики исследования вещества методами малоуглового рентгеновского и нейтронного рассеяния. В процессе обучения слушатели должны усвоить основной математический аппарат методов интерпретации данных малоуглового рассеяния, ознакомиться с возможностями и ограничениями методов и, на примере анализа реальных экспериментальных данных, изучить основные приемы исследования строения вещества на надатомном уровне.

Содержание дополнительной профессиональной программы «Синхротронные и нейтронные исследования для изучения биологически активных веществ, синтетических и природных

полимеров» и виды учебной деятельности разработаны в соответствии областям знаний и видам деятельности по направлениям реализации Федеральной программы, в частности, в области разработки, проектирования и строительства источников синхротронного и нейтронного излучения, области проведения синхротронных и нейтронных исследований. Результатом освоения программы является приобретение новых профессиональных компетенций в соответствии с профессиональным стандартом 24.078 «Специалист-исследователь в области ядерно-энергетических технологий», утвержден приказом Минтруда России от «16» марта 2018 г. №149н:

- ПК.1 Готовность применять в профессиональной деятельности углубленные знания о составе, строении и свойствах объектов (соединений, материалов) разной природы,
- ПК.2 Способность выбирать комплекс методов (методик), необходимых и достаточных для решения фундаментальных и прикладных задач в области химии и материаловедения, проводить эксперименты с обработкой и расчетом данных,
- ПК.3 Определять общую концепцию методологии исследования конденсированных сред, разрабатывать тактику и стратегию эксперимента с применением разных источников излучения.

Авторский коллектив дополнительной профессиональной программы «Синхротронные и нейтронные исследования для изучения биологически активных веществ, синтетических и природных полимеров»:

- Волков Владимир Владимирович – гл. науч. сотрудник Института кристаллографии им. А.В. Шубникова, ФНИЦ «Кристаллография и фотоника» РАН, д-р хим. наук;
- Давыдов Евгений Александрович, доц. кафедры фундаментальных проблем физики микромира, канд. физ.-мат. наук.

Объем программы 72 часа, из них аудиторных - 70 часа (36 лекции, 26 часов практические занятия) 8 часов - самостоятельная работа, 2 часа – итоговая аттестация. Программа и входящие в нее виды учебной деятельности реализована Соисполнителем самостоятельно, в том числе с использованием дистанционных образовательных технологий и электронного обучения. Для осуществления образовательного процесса использованы программно-аппаратные комплексы общего назначения (операционная система (операционные системы), офисные приложения, средства обеспечения информационной безопасности, архиваторы, программы для работы с графическими, видео- и аудиофайлами). Формирование электронной информационно-образовательной среды осуществлено с помощью программной системы дистанционного обучения Moodle (lms.uni-dubna.ru).

Образовательная программа содержит 8 разделов (тем) для последовательного освоения обучающимися:

Введение. Место малоуглового рентгеновского и нейтронного рассеяния среди других методов исследования строения вещества на надатомном уровне. Основные преимущества и ограничения метода. Направления развития метода.

#### 1. Основные принципы малоуглового рассеяния.

Рассеяние плоской волны веществом. Преобразование Фурье, свертка функций. Характеристическая функция. Рассеяние рентгеновских лучей на атомах. Рассеяние тепловых нейтронов на ядрах. Рассеяние на неупорядоченных структурах, растворы частиц. Понятие контраста. Влияние концентрации на интенсивность рассеяния. Изолированная однородная частица. Формула Дебая. Корреляционная функция. Интенсивность рассеяния монодисперсной системой на больших углах, инвариант Порода. Рассеяние сферическими частицами, сильно вытянутые частицы, сплюснутые частицы. Прямые и обратные задачи в структурном анализе. Ограничения в малоугловых структурных методах.

#### 2. Определения интегральных параметров частиц.

Структурные параметры, определяемые из кривой интенсивности малоуглового рассеяния. Полная длина рассеяния, интенсивность рассеяния в направлении первичного пучка. Радиус инерции однородной частицы. Инварианты. Корреляционная длина и максимальный размер частицы. Методы расчета геометрических и весовых параметров частиц. Точность расчета радиуса инерции. График Гинье и метод Глаттера. Определение молекулярной массы частиц, техника

проведения абсолютных измерений в малоугловом эксперименте. Определение максимального размера частиц. Влияние неоднородностей плотности частиц на кривую рассеяния.

### 3. Прямые методы определения структуры.

Задача восстановления трехмерной функции плотности по одномерной кривой малоуглового рассеяния, неоднозначность ее решения. Методы моделей. Рассеяния простыми телами. Методы моделирования структуры. Параметризация функции формы частицы. Использование системы ортогональных сферических волновых функций для параметризации, основные преимущества такого подхода. Информативность малоугловых данных, проблема однозначности восстановления функции формы по кривой рассеяния. Примеры восстановления формы по модельным и реальным данным. Учет типичных неоднородностей плотности внутри частицы. Использование вариации контраста для увеличения информативности малоугловых данных на примере изучения строения биополимеров в нативном состоянии.

### 4. Исследование строения полидисперсных систем.

Интенсивность рассеяния полидисперсной системой. Методы расчета распределения по размерам. Аналитические методы. Параметризация функции распределения по размерам. Функции распределения по размерам для частиц известной формы. Методы моделей. Учет априорной информации об объекте: вид распределения по размерам, тип форм-факторов и анизотропия. Анализ полидисперсности через корреляционную функцию.

### 5. Основы метода малоуглового рассеяния.

Основные узлы и особенности экспериментальных малоугловых лабораторных установок и синхротронных станций. Теоретические основы структурной диагностики безчастичных, полидисперсных и монодисперсных наносистем. Методы исследования монодисперсных систем. Структурные инварианты: радиус инерции, максимальный размер и объем наночастиц. Инвариант Порода. График Кратки. Определение трехмерной формы частицы по данным МУРР, анализ устойчивости решения. Определение формы частиц для комплексов белок-ДНК. Расчет интенсивности малоуглового рассеяния от атомных моделей биомонокромолекул. Построение четвертичной структуры многодоменного белка и/или белкового комплекса. Дистраивание неизвестных фрагментов макромолекул. Оценивание числа компонентов и олигомерного состава. Анализ подвижности макромолекул в растворе.

### 6. Методы исследования полидисперсных систем.

Определение функции распределения частиц по размерам. Сравнение алгоритмов и анализ устойчивости решения. Разделение компонентов смесей частиц разных размеров по данным гелехроматографии в сочетании с МУР.

Подготовка презентации на тему «Применение синхротронного излучения (или нейтронов) для изучения объектов в конкретной области практической деятельности методом малоуглового рентгеновского рассеяния».

### 7. Особенности метода малоуглового рассеяния нейтронов (МУРН).

Постановка задачи и предмет исследования. Особенности метода МУРН: вариация контраста, малоугловое рассеяние на магнитных неоднородностях, метод базисных функций, концентрированные системы, полидисперсные системы. Спектрометры малоуглового рассеяния: спектрометр МУРН на стационарном источнике, спектрометр МУРН на импульсном источнике нейтронов.

### 8. Методы обработки экспериментальных данных МУРН.

Задачи, решаемые на спектрометрах МУРН. Сравнительный анализ различных типов нейтронных источников. Сравнительный анализ различных схем малоугловых установок на нейтронных источниках. Метод изотопного замещения.

По итогам обучения слушатели, успешно выполнившие все требования образовательной программы и прошедшие итоговую аттестацию (ведомость итоговой аттестации в прикрепленном приложении), отчислены приказом от 25.10.2023 г. №3335к (см. приложение) с последующей выдачей удостоверений о повышении квалификации установленного образца (см. приложение).

*Реализация образовательной программы: Модуль 7 «Использование нейтронных детекторов в анализе объектов окружающей природной среды»*

Приказом № 1904к от 19 июня 2023 года (см. приложение) организован курс повышения квалификации с 10.07.2023 по 15.11.2023 по дополнительной профессиональной программе «Использование нейтронных детекторов в анализе объектов окружающей природной среды» в объеме 72 часа (см. приложение), утверждено расписание занятий, и зачислены 12 слушателей на места, финансируемые за счет средств гранта в форме субсидии.

Целью реализации программы является – освоение ядерно-физических методов обнаружения и определения содержания элементов в различных природных и техногенных материалах и объектах окружающей среды, в рамках решения производственных задач.

Содержание дополнительной профессиональной программы «Использование нейтронных детекторов в анализе объектов окружающей природной среды» и виды учебной деятельности разработаны в соответствии областям знаний и видам деятельности по направлениям реализации Федеральной программы, в частности, в области разработки, проектирования и строительства источников синхротронного и нейтронного излучения, области проведения синхротронных и нейтронных исследований. Результатом освоения программы является приобретение новых профессиональных компетенций в соответствии с профессиональным стандартом 24.078 «Специалист-исследователь в области ядерно-энергетических технологий», утвержден приказом Минтруда России от «16» марта 2018 г. №149н [1]:

- ПК.1 Подготовка исходных данных, наладка экспериментальных стендов и установок для обеспечения выполнения научных исследований,
- ПК.2 Проведение расчетных исследований и измерений физических характеристик на экспериментальных стендах и установках,
- ПК.3 Обработка и анализ результатов расчетных исследований и экспериментальных измерений и составление отчетов по выполненным этапам работ.

Авторский коллектив дополнительной профессиональной программы «Использование нейтронных детекторов в анализе объектов окружающей природной среды»:

- Каманина Инна Здиславовна – доцент кафедры экологии и наук о Земле, канд. биол. наук, доцент;
- Бадави Ваель Махмуд – ст. науч. сотр. Лаборатории нейтронной физики ОИЯИ, канд. биол. наук;
- Гроздов Дмитрий Сергеевич – начальник группы Лаборатории нейтронной физики ОИЯИ, канд. физ.-мат. наук.

Объем программы 72 часа, из них аудиторных - 64 часа (22 лекции, 42 часа практические занятия), 6 часов – самостоятельная работа, 2 часа – итоговая аттестация. Программа и входящие в нее виды учебной деятельности реализована Соисполнителем самостоятельно, в том числе с использованием дистанционных образовательных технологий и электронного обучения.

Для проведения лекционных занятий требуется специализированная аудитория, оснащенная компьютером, проектором, электронной доской.

Для проведения семинарских занятий требуется специализированный компьютерный класс, подключенный к сети Интернет и обеспечением доступа в электронную информационно-образовательную среду организации и к локальной сети университета, обеспечивающие доступ к инструментальным средствам и информации для проведения семинарских занятий.

Для проведения практических занятий слушатели направляются в специализированные лаборатории ЛНФ ОИЯИ, оснащенные необходимым оборудованием, а также на установку РЕГАТА на реакторе ИБР-2. Пневмотранспортная установка (ПТУ) РЕГАТА ИЯУ ИБР-2 предназначена для определения элементного состава исследуемых образцов используя метод нейтронного активационного анализа.

При применении дистанционных образовательных технологий, электронного обучения рабочее место педагогического работника и обучающегося должно быть оборудовано персональным компьютером и компьютерной периферией (веб-камерой, микрофоном, аудиоколонками и (или) наушниками).

В ходе изучения курса предусмотрено использование компьютера для выполнения измерений на специализированном программном обеспечении, поставленном в комплекте с приборами.

Для выполнения расчетных заданий предусмотрено использование офисного пакета МО, программа статистической обработки данных RStudio

Для подготовки презентаций – Power Point, Microsoft Office, информационно-библиотечная система MAPK SQL.

Для самостоятельной работы используются классы с доступом к ресурсу Интернет.

С целью соблюдения техники безопасности, а также повышения эффективности освоения навыков и умений и достижения планируемых результатов обучения практические занятия в лабораториях ЛНФ ОИЯИ и на установке РЕГАТА на реакторе ИБР-2 проводятся в малых группах по 5-6 человек.

Образовательная программа содержит 3 раздела с возможностью одновременного освоения обучающимися.

Раздел 1. Экологохимические исследования объектов окружающей среды.

1.1 Особенности химического состава объектов окружающей природной среды. Неравномерность распределения химических элементов в объектах природной среды. Геохимические аномалии: литохимические, гидрохимические, атмохимические и биогеохимические. Положительные и отрицательные биогеохимические аномалии. Техногенные геохимические аномалии;

1.2 Анализ почв. Контролируемые показатели химического состояния почв при почвенно-химическом мониторинге. Микроэлементы и тяжелые металлы в почвах. Формы соединений микроэлементов в почвах. Валовые, кислоторастворимые, подвижные (доступные) соединения микроэлементов и методы их определения. Методы очистки почв от загрязнения;

1.3 Анализ загрязнения атмосферного воздуха. Альтернативные методы анализа атмосферного воздуха. Анализ снежного покрова, как альтернативный метод измерения интегральных выпадений за зимний период;

1.4 Критерии оценки состояния объектов природной среды. Приоритетные контролируемые параметры природной среды;

1.5 Принципы оценки соответствия среды обитания человека оптимальным условиям его существования. Санитарно-гигиенические показатели. Предельно допустимые концентрации (ПДК) в воздушной среде, водной среде, почве. Эколого-геохимические показатели состояния окружающей среды (коэффициенты концентрации (Кс), суммарные показатели загрязнения (Zс)). «Эталоны» сравнения – кларки, фоновые концентрации;

1.6 Организация экологохимических исследований в лабораторных и натуральных условиях.

Раздел 2. Статистическая обработка геоэкологических данных.

2.1 Одномерный статистический анализ. Статистика. Данные. Типы анализа. Описательная статистика. Нормальное распределение. Прямоугольная диаграмма нормального распределения. Основные закономерности одномерного статистического анализа данных. Программа статистической обработки данных RStudio;

2.2 Двумерный статистический анализ. Основные закономерности двумерного статистического анализа данных. Диаграмма рассеяния. Корреляция. Коэффициент корреляции. Регрессия. Линейная регрессия. Полиномиальная регрессия;

2.3 Многомерный статистический анализ. Основные закономерности многомерного статистического анализа данных. Кластерный анализ. Исследовательский факторный анализ. Анализ основных компонентов. Собственные значения и собственные векторы;

2.4 Статистическая обработка экспериментальных данных. Статистический анализ экспериментальных геоэкологических данных в программе статистической обработки данных RStudio;

Раздел 3. Нейтронно-активационный анализ.

3.1 Введение в нейтронно-активационный анализ (НАА). Методы элементного анализа. Сравнение методов элементного анализа. Активация. Источники нейтронов. Распад. Измерение.

Вывод уравнения измерения. Затухание и измерение. Классификация НАА в соответствии с используемым химическим составом.;

3.2 Применение нейтронно- активационного анализа для решения задач экологии и материаловедения. Виды загрязнений окружающей среды. Пассивный биомониторинг. Активный биомониторинг. Мониторинг качества воды. Индексы опасности ТНQ и НI. Оценка загрязнения почвы и донных отложений. Биоремедиация почвы. Контроль качества и безопасности пищевых продуктов. Анализ лекарственных растений. Нанотоксикология. Разработка эксперимента. Культурное наследие. Челябинский метеорит;

3.3 Основы пробоподготовки для НАА. Схема процедур для НАА. Оборудование для пробоподготовки. Сушка. Гранулирование. Гомогенизация. Взвешивание;

3.4 Установка РЕГАТА на реакторе ИБР-2. Нейтронные приборы на реакторе ИБР-2. Реактор и радиоаналитический комплекс "РЕГАТА". РЕГАТА экспериментальной установки на реакторе ИБР-2;

3.5 Градуировка гамма-спектрометрического оборудования. Анализ образцов РТ (короткоживущих изотопов). Анализ образцов РТ (долгоживущих изотопов). Контейнеры для переупаковки образцов. Автоматизация гамма-спектрометрии;

3.6 Основы обработки гамма спектров. Методы, доступные в области нейтронно-активационного анализа и прикладных исследований. Атомно-эмиссионная спектроскопия и атомно-абсорбционная спектрометрия с индуктивно связанной плазмой. Гамма-спектрометрия с низким уровнем фона и альфа-спектрометрия;

3.7 Методы анализа данных. Подходы к анализу данных НАА. Активный биомониторинг в Улан-Баторе. Оценка данных о биосорбции. Биосорбция (Zn).

По итогам обучения слушатели, успешно выполнившие все требования образовательной программы и прошедшие итоговую аттестацию (ведомость итоговой аттестации в прикрепленном приложении), отчислены приказом от 15.11.2023 г. №3617к (см. приложение) с последующей выдачей удостоверений о повышении квалификации установленного образца (см. приложение).

#### *1.1.3 Реализация образовательной программы: Модуль 8 «Радиационная безопасность»*

Приказом № 1888к от 16 июня 2023 года (см. приложение) организован курс повышения квалификации с 03.07.2023 по 22.11.2023 по дополнительной профессиональной программе «Радиационная безопасность» в объеме 72 часа (см. приложение), утверждено расписание занятий и зачислены 33 слушателя на места, финансируемые за счет средств гранта в форме субсидии.

Целью реализации программы является – осмысление и систематизация теоретической и практической подготовки по вопросам дозиметрии и физики защиты, ознакомление с дозиметрическими характеристиками полей ионизирующего излучения и их размерности; ознакомление с различными расчетными и экспериментальными методами определения дозы излучения в различных средах и особенно в тканях живого организма; формирование современного представления о радиационной безопасности и радиационном контроле; усвоение принципов работы при соблюдении норм радиационной безопасности.

Объектами профессиональной деятельности в рамках изучаемой дисциплины являются: радиационные характеристики источников, процессы взаимодействия излучения с веществом, защитные свойства различных веществ, методы расчета защиты и ее оптимизации.

Содержание дополнительной профессиональной программы «Радиационная безопасность» и виды учебной деятельности разработаны в соответствии областям знаний и видам деятельности по направлениям реализации Федеральной программы, в частности, в области разработки, проектирования и строительства источников синхротронного и нейтронного излучения, области проведения синхротронных и нейтронных исследований. Результатом освоения программы является приобретение новых профессиональных компетенций в соответствии с профессиональным стандартом профессиональным стандартом 24.020 Специалист по радиационному контролю атомной отрасли (утвержден приказом Министерства труда и социальной защиты Российской Федерации от 04.02.2021 № 41н):

– ПК.1 Способен использовать профессиональные знания для участия в проведении экспериментов по тематике исследований по заданной методике, составлять описание проводимых

исследований, осуществлять анализ и обработку экспериментальных данных,

– ПК.2 Способен обеспечивать инструментальные измерения радиационных характеристик, проведение комплекса работ по мониторингу экологической и радиационной безопасности.

Авторский коллектив дополнительной профессиональной программы «Радиационная безопасность»:

– Мокров Юрий Владимирович – доцент кафедры биофизики, канд. техн. наук, ОРБ ОИЯИ, начальник группы метрологии и индивидуального контроля;

– Бескровная Людмила Григорьевна – ст. преподаватель, научный сотрудник ЛРБ ОИЯИ, отдел радиационных исследований, сектор радиационных исследований на базовых установках.

Объем программы 72 часа, из них аудиторных - 72 часа (26 лекции, 44 часа практические занятия), 2 часа – итоговая аттестация. Программа и входящие в нее виды учебной деятельности реализована Соисполнителем самостоятельно, в том числе с использованием дистанционных образовательных технологий и электронного обучения. Для осуществления образовательного процесса использованы программно-аппаратные комплексы общего назначения (операционная система (операционные системы), офисные приложения, средства обеспечения информационной безопасности, архиваторы, программы для работы с графическими, видео- и аудиофайлами). Формирование электронной информационно-образовательной среды осуществлено с помощью программной системы дистанционного обучения Moodle (lms.uni-dubna.ru).

Образовательная программа содержит 3 раздела для последовательного освоения обучающимися и 7 лабораторных работ:

#### Раздел 1. Дозиметрия ионизирующих излучений

1.1 Дозиметрия для радиационной безопасности. Основные величины и единицы: флюенс, средняя переданная энергия, поглощенная доза, линейная передача энергии, линейная энергия, распределение поглощенной дозы по ЛПЭ, фактор качества в точке ткани, эквивалент дозы, амбиентный эквивалент дозы, эквивалент дозы направления, индивидуальный эквивалент дозы. Особенности зависимости эффектов воздействия на организм ионизирующих излучений от поглощенной дозы и необходимость введения новых величин. Детерминированные и стохастические величины. Величина нормируемая. Операционная величина;

1.2 Величины для контроля радиационной безопасности. Величины и единицы для измерений и расчетов. Распределение поглощенной дозы по линейной передаче энергии. Величины эквивалента дозы. Коэффициент качества излучения. Эквивалент дозы. Операционные величины. Амбиентный эквивалент дозы. Направленный эквивалент дозы. Индивидуальный эквивалент дозы. Величины, основанные на средних значениях и используемые для целей ограничения облучений. Средняя поглощенная доза в определенном органе или ткани человеческого тела. Эквивалентная доза в органе или ткани. Эффективная доза. Эквивалентная доза. Эффективная (эквивалентная) годовая доза. Эффективная коллективная доза. Доза предотвращенная. Риск радиационный;

1.3 Дозиметрический контроль. Дозиметрический контроль внешнего профессионального облучения. Методы индивидуального дозиметрического контроля (ИДК). Индивидуальный фотоконтроль. Индивидуальный дозиметрический контроль с помощью ТЛД. Дозиметрический контроль внутреннего профессионального облучения. Контроль радиационной обстановки. Измерение активности;

#### Раздел 2. Физика защиты

##### 2.1 Радиационные характеристики источников ионизирующих излучений.

Классификация источников излучения. Флюенс от точечного источника. Радионуклиды как источники излучений. Радионуклиды как гамма-излучатели. Характеристики источников нейтронов. Источники нейтронов спонтанного деления. Источники нейтронов на основе ускорителей заряженных частиц. Источники нейтронов деления – наиболее мощные нейтронные источники;

##### 2.2 Взаимодействие ионизирующих излучений с веществом.

Взаимодействие фотонов с веществом. Основные закономерности взаимодействия нейтронов с ядрами. Пробег заряженных частиц;

### 2.3 Защита от ионизирующих излучений.

Классификация защит. Нейтроны  $E > 80$  Эв. Нейтроны  $E < 80$  Эв. Защита от фотонов;

### 2.4 Инженерные методы расчета защиты.

Радиационный контроль в окружающей среде, особенности методов измерений. Измерения радиоактивности проб почвы, воды, растительности и воздуха. Контроль радиоактивности на местности. Результаты дозиметрии в г. Дубна;

## Раздел 3. Инструментальные методы радиационной безопасности

### 3.1 Радиационная безопасность и радиационный контроль.

Структура и инструментальные методы контроля радиационной обстановки. Система обеспечения радиационной безопасности. Основные цели и задачи контроля радиационной обстановки. Основные объекты и структура контроля радиационной обстановки. Классификация радиационных объектов по степени их потенциальной опасности;

### 3.2 Основные принципы построения приборов радиационной безопасности.

Инструментальные методы мониторинга радиационной обстановки. Технические средства контроля. Классификация приборов по виду ионизирующего излучения, по назначению по эксплуатации, по временному характеру контроля. Основные понятия и величины в радиационной защите и безопасности;

### 3.3 Дозиметры и радиометры.

Дозиметры фотонного излучения. Мощность амбиентного эквивалента дозы. Амбиентный эквивалент дозы. Дозиметрия на основе газоразрядных счетчиков. Дозиметры на основе сцинтилляционных детекторов. Дозиметры на основе ионизационной камеры.

Радиометры аэрозолей и газов. Методы и приборы для измерения объемной активности радона. Сцинтилляционный метод измерения радона. Полупроводниковый метод измерения радона. Электростатический метод измерения радона. Ионизационный метод измерения радона. Трековый метод измерения радона.

Дозиметры и радиометры нейтронного излучения. Носимые радиометры-дозиметры. Сцинтилляционные детекторы, покрытые  $ZnS(Ag)$ . Радиометры на основе сцинтилляторов. Радиометры на основе газоразрядных счетчиков.

Индивидуальные дозиметры фотонного и нейтронного излучений. Индивидуальный эквивалент дозы внешнего облучения. Механизм радиотермолюминесценции. Термолюминесцентные индивидуальные дозиметры. ТЛД на основе  $LiF$ .

Радиометры жидкости и проб окружающей среды. Радиационный контроль питьевой воды. Расчет дозы внутреннего облучения за счет радона. Способы и методы удаления радона из питьевой воды. Требования к методам и средствам радиационного контроля воды. Методы и приборы для измерения объемной активности радона;

### 3.4 Контроль радиоактивного загрязнения поверхностей.

Приборы контроля радиоактивного загрязнения. Спектрометрические приборы. Германиевые гамма спектрометрические приборы для оценки загрязненных материалов. Масс-спектрометрия. Счетчики излучения человека. Контроль, прогнозирование и учета дозовых нагрузок персонала АЭС и населения. Эффективная доза;

### 3.5 Системы радиационного контроля.

Система контроля внутреннего облучения. Дозиметрия эквивалентных доз кожи и хрусталика. Мощность максимальной потенциальной эквивалентной дозы в хрусталике глаза и коже.

## Лабораторные работы

### 1. Ионизационные и сцинтилляционные дозиметры фотонного излучения.

В работе изучаются наиболее распространенные дозиметры фотонного излучения, которые работают на основе ионизационного и сцинтилляционного методов регистрации излучения. В данной работе внимание уделено инспекционным дозиметрам, т.е. дозиметрам, которые измеряют дозы облучения без присутствия в поле излучения человека. В процессе выполнения работы

слушатели изучают наиболее распространенные в практике радиационного контроля дозиметры фотонов по их Руководствам по эксплуатации, непосредственно работают с приборами по измерению доз фотонного излучения от радионуклидного источника цезия-137, расположенного в защитном контейнере. Результаты измерений обрабатываются в соответствии с концепцией неопределенности измерений. Проводится анализ показаний приборов различных типов и выясняются причины их различий (раздел 3.3).

2. Дозиметры нейтронов на основе детекторов тепловых нейтронов в водородсодержащих замедлителях.

В работе изучаются наиболее распространенные в практике радиационного контроля дозиметры нейтронов на основе водородсодержащих замедлителей. Работа таких дозиметров основана на замедлении падающих на дозиметр нейтронов широкого энергетического диапазона и последующей регистрации замедлившихся нейтронов датчиками тепловых нейтронов, расположенных внутри замедлителей. Дозиметры такого типа обладают рядом преимуществ в сравнении с дозиметрами других типов. В работе изучаются дозиметры двух типов: с одним замедлителем и с набором замедлителей. К первому относится дозиметр на основе борного счетчика в комбинированном замедлителе, который широко используется в радиационном контроле в ОИЯИ. К нему же относится ряд промышленных дозиметров, таких, как КДН-2 и ДН-А-1. Ко второму типу относится многошаровой дозиметр со сцинтилляционным детектором, в котором используется набор шаровых полиэтиленовых замедлителей разного диаметра.

В процессе выполнения работы слушатели изучают указанные выше дозиметры и проводят измерения доз излучения от радионуклидного Pu-Be источника нейтронов, расположенного в защитном контейнере (раздел 3.3).

3. Образцовый всеволновый счетчик нейтронов (радиометр) ОВС-3.

В работе изучается всеволновый счетчик нейтронов, то есть счетчик, который имеет постоянную чувствительность в широком диапазоне энергий нейтронов – от тепловых нейтронов до нейтронов с энергией до 14 МэВ. Объясняется принцип работы счетчика и особенности его конструкции, позволяющие ему иметь постоянную чувствительность в широком диапазоне энергий.

В процессе выполнения работы слушатели определяют с помощью ОВС-3М поток нейтронов от Pu-Be источника нейтронов, расположенного в защите из борированного полиэтилена. Сравняется полученное значение потока со значением, приведенным в свидетельстве о проверке источника. Объясняется причина различия этих значений (раздел 3.3).

4. Фотографические методы определения индивидуальных доз фотонного излучения.

Фотографический метод до недавних пор являлся одним из самых распространенных методов индивидуальной дозиметрии фотонов и применяется в настоящее время. Ему свойственны простота, универсальность, высокая чувствительность и документальность. В работе изучаются индивидуальные дозиметры ИФК-2,3, в которых используется фотографический метод с рентгеновской пленкой, и денситометры двух типов, которые служат для определения почернения пленок.

Слушатели измеряют на денситометре почернения облученных и проявленных пленок и с помощью построенных ранее градуировочных кривых определяют дозы облучения (раздел 3.3).

5. Индивидуальные дозиметры нейтронов на основе ядерных эмульсий.

Фотоэмульсионный метод дозиметрии нейтронов основан на использовании ядерной эмульсии типа МК-20 толщиной 20 микрон. Доза нейтронов определяется по числу треков в эмульсии, которые подсчитываются лаборантами с помощью микроскопа с увеличением до 1000 раз. Треки образуются в эмульсии протонами отдачи, которые возникают при взаимодействии нейтронов с ядрами азота и водорода, входящими в состав эмульсии. Использование данного метода дозиметрии нейтронов основано на использовании замедляющих свойств человеческого тела, на котором располагается дозиметр.

В процессе выполнения работы слушатели определяют с помощью микроскопа количество треков на траверсе длиной 15 мм эмульсии МК-20. По полученному числу треков определяется доза облучения сотрудника, использовавшего дозиметр с данной эмульсией. При этом используются результаты градуировки дозиметра на радионуклидном источнике нейтронов (раздел 3.3).

6. Комплекс индивидуального дозиметрического контроля АКЖДК-301.

Комплекс индивидуального дозиметрического контроля АКЖДК-301 является наиболее приемлемым отечественным промышленным комплексом ИДК. Он широко используется на многих российских предприятиях, таких, как атомные станции, НИИ и т.п. В этом комплексе используются термолюминесцентные детекторы (ТЛД) на основе фтористого лития, регистрирующие как нейтроны, так и фотоны. При этом для измерения доз нейтронов используются альбедные дозиметры, работа которых основана на регистрации замедлившихся в теле человека и вышедших из него нейтронов с помощью ТЛД, расположенных на поверхности тела.

При выполнении данной работы слушатели знакомятся с составом комплекса, с устройством индивидуального дозиметра ДВГН-01, входящего в состав комплекса. Каждый из них измеряет на считывателе СТЛ-100 с помощью дозиметра дозу облучения, которую он получил при выполнении работы на поверочной установке. После выполнения работы распечатывается протокол доз, полученных всеми слушателями (раздел 3.3).

7. Поверочные установки и поверка приборов радиационного контроля.

Все дозиметры, используемые в радиационном контроле, подлежат обязательной ежегодной поверке, в процессе которой определяется их пригодность к работе. Поверка дозиметров проводится на поверочных установках с использованием рабочих эталонов. В качестве рабочих эталонов применяются либо радионуклидные источники, либо дозиметры.

В процессе выполнения работы слушатели знакомятся с устройством и характеристиками двух поверочных установок, использующихся в ОИЯИ для поверки дозиметров.

Дозиметры фотонного излучения поверяются на поверочной установке типа УПГД. Основным элементом ее является коллимирующее устройство, в котором формируется коллимированный пучок фотонов, в котором располагаются поверяемые дозиметры.

Дозиметры нейтронов поверяются в условиях открытой геометрии с экранирующим конусом, который служит для учета вклада рассеянных в помещении нейтронов в показания дозиметров. В качестве рабочего эталона при этом используется дозиметр ДКС-96 с нейтронным датчиком.

В процессе проведения работы слушатели проводят поверку дозиметра фотонов ДРГ-01-Т1 в коллимированном пучке, создаваемым радионуклидным источником цезий-137. В результате они должны сделать заключение о пригодности прибора к работе (разделы 3.4, 3.5).

По итогам обучения слушатели, успешно выполнившие все требования образовательной программы и прошедшие итоговую аттестацию (ведомость итоговой аттестации в прикрепленном приложении), отчислены приказом от 22.11.2023 г. №3722к (см. приложение) с последующей выдачей удостоверений о повышении квалификации установленного образца (см. приложение).

ПРИЛОЖЕНИЯ:

- Образовательная программа Модуль 6 «Синхротронные и нейтронные исследования для изучения биологически активных веществ, синтетических и природных полимеров». ФАЙЛ: [Прил. ПГ 3.3.9 Раб программа Синхр и нейтр исследования для изучения БАВ синт и прир полимеров.pdf](#)
- Образовательная программа Модуль 7 «Использование нейтронных детекторов в анализе объектов окружающей природной среды». ФАЙЛ: [Прил. ПГ 3.3.9 Раб программа Использование нейтронных детекторов в анализе объектов окружающей природной среды.pdf](#)
- Образовательная программа Модуль 8 «Радиационная безопасность». ФАЙЛ: [Прил. ПГ 3.3.9 Раб программа Радиационная безопасность.pdf](#)
- Приказ № 2013к от 26.06.2023 о зачислении слушателей на обучение по образовательной программе «Синхротронные и нейтронные исследования для изучения биологически активных веществ, синтетических и природных полимеров». ФАЙЛ: [Прил. ПГ 3.3.9 Приказ о зачислении слушателей №2013к от 26.06.2023\(Синхр и нейтр исследования для изучения БАВ синт и прир полимеров\).pdf](#)

- Приказ № 1904к от 19.06.2023 о зачислении слушателей на обучение по образовательной программе «Использование нейтронных детекторов в анализе объектов окружающей природной среды». ФАЙЛ: [Прил. ПГ 3.3.9 Приказ о зачислении слушателей №1904к от 19.06.2023\(Использование нейтронных детекторов в анализе объектов окружающей природной среды\).pdf](#)
- Приказ № 1888к от 16.06.2023 о зачислении слушателей на обучение по образовательной программе «Радиационная безопасность». ФАЙЛ: [Прил. ПГ 3.3.9 Приказ о зачислении слушателей №1888к от 16.06.2023 \(Рад безопасность\).pdf](#)
- Приказ № 3335к от 25.10.2023 об отчислении слушателей с курса повышения квалификации «Синхротронные и нейтронные исследования для изучения биологически активных веществ, синтетических и природных полимеров». ФАЙЛ: [Прил. ПГ 3.3.9 Приказ об отчислении слушателей 3335к от 25.10.2023.pdf](#)
- Приказ № 3617к от 15.11.2023 об отчислении слушателей с курса повышения квалификации «Использование нейтронных детекторов в анализе объектов окружающей природной среды». ФАЙЛ: [Прил. ПГ 3.3.9 Приказ об отчислении слушателей 3617к от 15.11.2023.pdf](#)
- Приказ № 3722к от 22.11.2023 о зачислении слушателей на обучение по образовательной программе «Радиационная безопасность». ФАЙЛ: [Прил. ПГ 3.3.9 Приказ об отчислении слушателей 3722к от 22.11.2023.pdf](#)

### **3.3.10 Проведение в 2023 г. практической подготовки по образовательной программе «Автоматизация экспериментов в области нейтронной физики» (совместно с университетом «Дубна»)**

Приказом № 3108к от 09 октября 2023 года (см. приложение) организована практическая подготовка 09.10.2023 по 20.11.2023 по дополнительной профессиональной программе повышения квалификации «Автоматизация экспериментов в области нейтронной физики» в объеме 72 часа (см. приложение), утверждено расписание занятий и зачислены 34 слушателя на места, финансируемые за счет средств гранта в форме субсидии.

Целью реализации программы является – изучение передового опыта, получение теоретических знаний, приобретение практических умений и навыков в области автоматизации, получения и обработки данных в экспериментах по изучению свойств конденсированных сред с использованием рассеяния нейтронов на уникальном оборудовании быстрого импульсного реактора ИБР-2.

Содержание дополнительной профессиональной программы «Автоматизация экспериментов в области нейтронной физики» и виды учебной деятельности разработаны в соответствии областям знаний и видам деятельности по направлениям реализации Федеральной программы, в частности, в области разработки, проектирования и строительства источников синхротронного и нейтронного излучения, области проведения синхротронных и нейтронных исследований. Результатом освоения программы является приобретение новых профессиональных компетенций в соответствии с профессиональным стандартом профессиональным стандартом 24.078 «Специалист-исследователь в области ядерно-энергетических технологий», (утвержден приказом Минтруда России от «16» марта 2018 г. №149н)

- ПК.1 Подготовка исходных данных, наладка экспериментальных стендов и установок для обеспечения выполнения научных исследований,
- ПК.2 Проведение расчетных исследований и измерений физических характеристик на экспериментальных стендах и установках,
- ПК.3 Обработка и анализ результатов расчетных исследований и экспериментальных измерений и составление отчетов по выполненным этапам работ.

Авторский коллектив дополнительной профессиональной программы «Автоматизация экспериментов в области нейтронной физики»:

- Боднарчук Виктор Иванович – доцент кафедры ядерной физики, начальник отдела комплекса спектрометров ИБР-2, канд. физ.-мат. наук;

– Пискунова Оксана Ивановна – доцент кафедры проектирования электроники для установок «мегасайенс», директор Инженерно-физического института, канд. техн. наук;

– Давыдов Евгений Александрович – доцент кафедры фундаментальных проблем физики микромира, канд. физ.-мат. наук.

Объем программы 72 часа, из них аудиторных - 64 часа (20 лекции, 44 часа практические занятия), 6 часов – самостоятельная работа, 2 часа – итоговая аттестация. Программа и входящие в нее виды учебной деятельности реализована Соисполнителем самостоятельно, в том числе с использованием дистанционных образовательных технологий и электронного обучения.

Для проведения лекционных занятий требуется специализированная аудитория, оснащенная компьютером, проектором, электронной доской.

Для проведения практических занятий слушатели направляются в специализированные лаборатории ЛНФ ОИЯИ, оснащенные необходимым оборудованием, а также на реактор ИБР-2. ИБР-2 (IBR-2) – быстрый импульсный реактор с механической модуляцией реактивности подвижными отражателями. Реактор ИБР-2 является самым высокопоточным в мире импульсным источником. Включен в европейскую сеть ведущих нейтронных центров.

Для выполнения расчетных заданий предусмотрено использование офисного пакета МО. Для подготовки презентаций – Power Point, Microsoft Office, информационно-библиотечная система МАРК SQL. Для самостоятельной работы используются классы с доступом к ресурсу Интернет.

С целью соблюдения техники безопасности, а также повышения эффективности освоения навыков и умений и достижения планируемых результатов обучения практические занятия в лабораториях ЛНФ ОИЯИ и на реакторе ИБР-2 проводятся в малых группах по 5-6 человек.

Образовательная программа содержит 5 разделов с возможностью одновременного освоения обучающимися.

## Раздел 1. Вакуумная техника в нейтронном эксперименте

### 1.1. Системы вакуумирования нейтроноводов

Основные элементы используемые в построении вакуумных линий, их виды и назначение. Способы монтажа и соединения вакуумных линий. Виды уплотнений вакуумных соединений. Виды и типы вакуумной арматуры, ее назначение и применение, основные эксплуатационные характеристики. Виды и типов современных вакуумных насосов, принципы работы, устройство, особенности применения. Типы вакуумных клапанов и задвижек, особенности их конструкций, их возможности в автоматизации вакуумирования нейтроноводов. Обозначение элементов вакуумной системы на схемах и чертежах. Примеры схем вакуумных систем;

### 1.2. Датчики вакуума MKS925

Обзор основных типов вакуумных датчиков. Принцип работы датчика Пирани. Единицы измерения давления и их соотношения, практика в пересчете значений вакуума. Устройство датчика MKS925 на основе микроэлектромеханической системы. Цифровой и аналоговый режимы работы датчика, их отличия и особенности использования. Протоколы обмена данными RS232 и RS485 их особенности, сильные и слабые стороны, направления применения. Модуль преобразования интерфейса RS485 в USB ОВЕН АС4. Терминальная программа NuperTerminal для отправки команд управления на датчик, основные настройки параметров обмена данными по СОМ-порту. Синтаксис команд управления датчиком. Составление запросов к датчику и разбор полученных ответов;

### 1.3. Автоматизация управления вакуумом

Электромагнитные клапана их устройство типы и характеристики. Варианты исполнения и применения. Электромагнитный клапан XLS-25, варианты его исполнения и управления переменным или постоянным напряжением. Понятие тока открытия и тока удержания. Принцип работы твердотельных реле. Понятие «управляющего напряжения». Линейка релейных блоков управления ОВЕН МК и их основные параметры. Выбор оптимального варианта для задачи управления системой откачки нейтроновода. Программа конфигуратор ОВЕН, настройки связи ПК с релейным блоком через СОМ-порт по интерфейсу RS485.

## Раздел 2. Программное обеспечение нейтронных спектрометров

### 2.1 Современные тенденции и архитектуры систем управления экспериментом

Современные тенденции и архитектуры систем управления, системы EPICS и Tango. Основные форматы экспериментальных данных и наиболее популярные программы для их обработки. Система Sonix+, принятая на установки и ее особенности. Язык программирования Python и его применение в системах управления экспериментом;

## 2.2 Программное обеспечение спектрометров

Принципы организации и основные черты (ядро, пользовательский интерфейс и т.д.). Роль стандартизации и унификации. Наиболее популярные подходы EPICS и Tango. Основные виды и форматы данных (Nexus), платформы для программ обработки (Mantid);

## 2.3 Система Sonix+

Основные черты системы и состав. Универсальный графический интерфейс пользователя. Системы Журнал, WebSonix и центральное хранилище данных;

## 2.4 Язык Python

Особенности языка и его применение в системах управления спектрометрами. Способы работы на языке (IDE, notebook, web/cloud). Типы данных, индексы, списки и циклы. Классы: объекты, атрибуты, методы. Модули и пакеты для работы с данными и их визуализации (numpy, scipy, matplotlib). Примеры практических задач по обработке данных и визуализации результатов.

## Раздел 3. Моделирование нейтронных установок

### 3.1. Методы моделирования нейтронных установок

Метод Монте-Карло. Генератор случайных чисел. Оптические системы для нейтронных пучков. Фокусирующие и изогнутые нейтронотводы. Прерыватели нейтронного пучка. Импульсные и постоянные источники нейтронов. Нейтронная рефлектометрия. Оптимизация параметров нейтронной установки;

### 3.2. Инструмент для моделирования нейтронных установок

Программа моделирования нейтронных установок VITESS. Примеры результатов моделирования.

Раздел 4. Автоматизированные системы управления оборудованием нейтронного эксперимента

### 4.1. Механизмы перемещения и позиционирования

Механизмы перемещения и позиционирования. Определение оптимальных параметров движения исполнительных механизмов. Устройства регулирования температуры образца. Управление механическими системами;

4.2. Электроника управления и программное обеспечение для работы с устройствами позиционирования

Свойства и характеристики механизмов перемещения образцов. Электроника и исполнительные механизмы, отвечающие за позиционирование образцов в зоне вывода пучка нейтронов на спектрометрах реактора;

### 4.3. Методы регулирования температуры на образце

Основные принципы ПИД регулирования, принципы нахождения ПИД коэффициентов экспериментальным путем;

### 4.4. Системы управления фоновыми прерывателями

Свойства и характеристики механических систем, пропускающих на образец нейтроны в строго определенное время, синхронизация момента ввода окна диска фонового прерывателя в область нейтронного пучка с моментом пролета нейтронов определенной энергии, системы управления Фурье-прерывателями.

## Раздел 5. Методы термостатирования в нейтронном эксперименте

### 5.1. Криостаты

Азотные температуры. Гелиевые температуры. Специальные методы получения низких температур в области (300-77)К, (77-4.2)К, (4.2-0.1)К, (3-0.3)К, (0.7-0.05)К для применения в физическом эксперименте, нейтронном эксперименте;

### 5.2. Криокуллеры

Криокуллеры замкнутого цикла. Безжидкостные технологии получения низких температур. Криостаты на основе криокуллеров замкнутого цикла. Контроллеры температур. Получение высоких

магнитных полей с использованием ВТСП. Криостат с магнитом на основе ВТСП. Измерение магнитного поля, создаваемого сверхпроводящим магнитом;

### 5.3. Проведение низкотемпературного эксперимента

Этапы работы с криостатом. Охлаждение. Измерение магнитного поля.

Итоговая аттестация по программе «Автоматизация экспериментов в области нейтронной физики» предусматривает подготовку и защиту итогового письменного отчета по практической подготовке, подтверждаемого оценкой «отлично», «хорошо» или «удовлетворительно».

Отчет по практической подготовке оформляется в соответствии с установленными правилами и должен отражать в письменном виде результаты прохождения практической подготовки в соответствии с индивидуальным заданием. Отчет по практической подготовке должен содержать: тему индивидуального задания, исходные данные к работе, выполнение этапов индивидуального задания, анализ темы исследования, описание результатов исследования (описание исследуемых установок, результаты моделирования, результаты анализа полученных данных и т.п.), заключение (вывод).

По итогам обучения слушатели, успешно выполнившие все требования образовательной программы и прошедшие итоговую аттестацию (ведомости итоговой аттестации в прикрепленном приложении), отчислены приказом от 20.11.2023 г. №3681к (см. приложение) с последующей выдачей удостоверений о повышении квалификации установленного образца (см. приложение).

Отчеты по практической подготовке по программе «Автоматизация экспериментов в области нейтронной физики» представлены в прикрепленном приложении.

#### ПРИЛОЖЕНИЯ:

- Приказ № 3108к от 09.10.2023 о зачислении слушателей на обучение по образовательной программе «Автоматизация экспериментов в области нейтронной физики». ФАЙЛ: [Прил. ПГ 3.3.10 Приказ о зачислении слушателей №3108к от 09.10.2023.pdf](#)
- Отчеты по практической подготовке по образовательной программе «Автоматизация экспериментов в области нейтронной физики». ФАЙЛ: [Прил. ПГ 3.3.10 Отчеты по практической подготовке.pdf](#)
- Приказ № 3681к от 20.11.2023 об отчислении с курса повышения квалификации «Автоматизация экспериментов в области нейтронной физики». ФАЙЛ: [Прил. ПГ 3.3.10 Приказ об отчислении слушателей 3681к от 20.11.2023.pdf](#)
- Программа практической подготовки. ФАЙЛ: [Прил. ПГ 3.3.10 Программа практической подготовки.pdf](#)
- Списочный состав лиц, прошедших практическую подготовку. ФАЙЛ: [Прил. ПГ 3.3.10 Списочный состав лиц, прошедших практическую подготовку.pdf](#)

### **3.3.11 Проведение итоговой аттестации по 4 курсам повышения квалификации (Модуль 6 «Синхротронные и нейтронные исследования для изучения биологически активных веществ, синтетических и природных полимеров»),**

**Модуль 7 «Использование нейтронных детекторов в анализе объектов окружающей природной среды»,**

**Модуль 8 «Радиационная безопасность»,**

**«Автоматизация экспериментов в области нейтронной физики») с выдачей документов о повышении квалификации по каждому курсу.**

**(совместно с университетом «Дубна»).**

#### ПРИЛОЖЕНИЯ:

- Копии удостоверений о повышении квалификации по курсу повышения квалификации «Синхротронные и нейтронные исследования для изучения биологически активных веществ, синтетических и природных полимеров». ФАЙЛ: [Прил. ПГ 3.3.11 Копии удостоверений о ПК](#)

по курсу Синхротронные и нейтронные исследования для изучения биологически активных веществ, синтетических и природных полимеров.pdf

- Копии удостоверений о повышении квалификации по курсу повышения квалификации «Использование нейтронных детекторов в анализе объектов окружающей природной среды». ФАЙЛ: Прил. ПГ 3.3.11 Копии удостоверений о ПК по курсу Использование нейтронных детекторов в анализе объектов окружающей природной среды.pdf
- Копии удостоверений о повышении квалификации по курсу повышения квалификации «Радиационная безопасность». ФАЙЛ: Прил. ПГ 3.3.11 Копии удостоверений о ПК по курсу Радиационная безопасность.pdf
- Копии удостоверений о повышении квалификации по курсу повышения квалификации «Автоматизация экспериментов в области нейтронной физики». ФАЙЛ: Прил. ПГ 3.3.11 Копии удостоверений о ПК по курсу Автоматизация экспериментов в области нейтронной физики.pdf
- Копия ведомости итоговой аттестации по курсу повышения квалификации «Синхротронные и нейтронные исследования для изучения биологически активных веществ, синтетических и природных полимеров». ФАЙЛ: Прил. ПГ 3.3.11 Копия ведомости итоговой аттестации по курсу ПК Синхротронные и нейтронные исследования для изучения биологически активных веществ, синтетических и природных.pdf
- Копия ведомости итоговой аттестации по курсу повышения квалификации «Использование нейтронных детекторов в анализе объектов окружающей природной среды». ФАЙЛ: Прил. ПГ 3.3.11 Копия ведомости итоговой аттестации по курсу ПК Использование нейтронных детекторов в анализе объектов окружающей природной среды.pdf
- Копия ведомости итоговой аттестации по курсу повышения квалификации «Радиационная безопасность». ФАЙЛ: Прил. ПГ 3.3.11 Копия ведомости итоговой аттестации по курсу ПК Радиационная безопасность.pdf
- Копии ведомостей итоговой аттестации по курсу повышения квалификации «Автоматизация экспериментов в области нейтронной физики». ФАЙЛ: Прил. ПГ 3.3.11 Копии ведомостей итоговой аттестации по курсу ПК Автоматизация экспериментов в области нейтронной физики.pdf

### **3.3.12 Проведение в 2023 г. конференции обучающихся и исследователей в возрасте до 39 лет по тематике исследований (совместно с ИФМ УО РАН).**

III Всероссийская научно-практическая конференция «Задачи и методы нейтронных исследований конденсированных сред» посвящена рассмотрению задачам и методы нейтронных исследований конденсированных сред. Основные темы совещания были связаны с методикой нейтронного эксперимента, нейтронной техникой, созданием приборной базы источников нейтронов, а также применению рассеяния нейтронов для исследования конкретных систем.

На конференции было представлено двадцать три доклада, проводилось обсуждение широкого спектра вопросов, начиная от создания нейтронных установок и нейтронных детекторов до возможных сфер применения рассеяния нейтронов. В конференции выступили 20 участников в возрасте до 39 лет.

Организатором III Всероссийской научно-практической конференции «Задачи и методы нейтронных исследований конденсированных сред» выступило Федеральное государственное бюджетное научное учреждение науки «Институт физики металлов имени М.Н. Михеева Уральского отделения Российской академии наук» (ИФМ УрО РАН), г. Екатеринбург.

#### **ПРИЛОЖЕНИЯ:**

- Приказ о проведении III Всероссийской научно-практической конференции «Задачи и методы нейтронных исследований конденсированных сред». ФАЙЛ: Прил. ПГ 3.3.12 Приказ о проведении конференции ЗМНИКС-2023.pdf
- Скриншот страниц сайта в сети Интернет с информацией о проведенной III Всероссийской научно-практической конференции «Задачи и методы нейтронных исследований

конденсированных сред». ФАЙЛ: [Прил. ПГ 3.3.12 Скриншот страниц сайта с информацией о конференции ЭМНИКС-2023.pdf](#)

- Тезисы III Всероссийской научно-практической конференции «Задачи и методы нейтронных исследований конденсированных сред». ФАЙЛ: [Прил. ПГ 3.3.12 Тезисы ЭМНИКС-2023.pdf](#)
- Список участников III Всероссийской научно-практической конференции «Задачи и методы нейтронных исследований конденсированных сред». ФАЙЛ: [Прил. ПГ 3.3.12 Список участников конференции ЭМНИКС-2023.pdf](#)

### **3.3.13 Работы, выполняемые за счет финансирования из внебюджетных источников.**

**Реализация дополнительной профессиональной программы повышения квалификации «Проведение синхротронных и нейтронных исследований» для специалистов археологического профиля (совместно с К(П)ФУ).**

См. п. 3.3.1

На выполнение работ по п. 3.3.13 израсходовано 697 405 рублей из внебюджетных источников.

ПРИЛОЖЕНИЯ:

- Данные удостоверений и ведомости аттестации археологического профиля. ФАЙЛ: [Прил. ПГ 3.3.13 Данные удостоверений и ведомости аттестации археологического профиля.pdf](#)

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Все работы третьего этапа реализации проекта «Разработка и создание элементов экспериментальных станций на источниках нейтронов импульсного или постоянного типа» были завершены в срок и в полном объеме. Задачи третьего этапа включали в себя изготовление и тестирование детекторных систем разного типа, изготовление механических устройств управления потоком нейтронов, задачи по моделированию и научно-исследовательских изысканий свойств тонкопленочных структур, используемых или предполагаемых к использованию в детекторных технологиях. По всем задачам получены конкретные результаты, которые будут использованы при развитии методической базы на всех действующих источниках нейтронов в Российской Федерации и на планируемых к запуску в ближайшем будущем. Результаты выполненных работ нашли отражение в 15 публикациях и в 4 патентах на изобретение, вышедших в течение реализации 3-го этапа.

Закончены работы по созданию опытно-экспериментального участка для разработки и создания детекторов разных типов на базе ЛНФ ОИЯИ, подготовлены лаборатории для изготовления и испытания детекторов нейтронов в НИЦ «Курчатовский институт» - ПИЯФ г. Гатчина. Реализованные крупномасштабные инфраструктурные проекты обеспечат основу для производства детекторов тепловых нейтронов, необходимых для реализации практически любой методики исследований конденсированного состояния методами рассеяния нейтронов на источниках нейтронов в Российской Федерации.

В части подготовки молодых специалистов разработаны и внедрены учебные модули, по которым прошли обучение около 140 человек. Реализация разработанных курсов и практик показывает наличие большой заинтересованности у студентов тематиками, связанными с исследованиями, выполняемыми с помощью нейтронного и синхротронного излучения. Об этом говорит число студентов, изъявивших желание пройти обучение по разработанным в рамках Проекта курсам, которое превышает плановые показатели почти в 10 раз. Среди студентов, прошедших обучение по разработанным курсам, нашлось немало тех, кто выразил желание выбрать темой своих курсовых, дипломных работ тему, связанную с нейтронными и синхротронными исследованиями, что подтверждает высокий уровень разработанных программ и качества преподавания.

Успешно проведена третья Всероссийская научно-практическая конференция молодых ученых «Задачи и методы нейтронных исследований конденсированных сред» с международным участием. В работе конференции приняли участие 20 молодых ученых из разных вузов и научных центров Российской Федерации и ближнего зарубежья.

Все показатели, включая финансовые, которые планировалось достичь за время второго этапа проекта успешно выполнены, причем многие с перевыполнением плановых значений.

С материалами отчета и другой информацией о ходе выполнения работ в рамках проекта «Разработка и создание элементов экспериментальных станций на источниках нейтронов импульсного или постоянного типа» можно ознакомиться на сайте:

<https://flnp.jinr.int/ru/glavnaya/nauka/fizika-kondensirovannogo-sostoyaniya/programma-razrabotki-priborov-dlya-spektrometrov-ibr-2/proekt-minobrnauki>