

Международная межправительственная организация
Объединенный институт ядерных исследований

№ 125081809581-2



УТВЕРЖДАЮ
Директор института
В.Г. Трубников
«20» 01 2026 г.

О Т Ч Е Т
О ВЫПОЛНЕНИИ ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКОЙ ПРОГРАММЫ
(ПРОЕКТА)

по теме:
РАЗВИТИЕ АППАРАТНО-МЕТОДИЧЕСКОЙ БАЗЫ ДЛЯ РЕШЕНИЯ
НАУЧНЫХ И ПРИКЛАДНЫХ ЗАДАЧ НА ИСТОЧНИКАХ
НЕЙТРОНОВ РАЗНОГО ТИПА

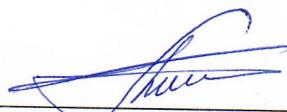
(промежуточный)

Этап 1

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 5 июня 2025 г. № 075-10-2025-153 (внутренний номер 15.СИН.25.12)

Руководитель проекта,
д-р физ.-мат. наук



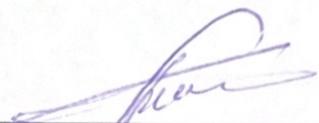
А.В. Белушкин

подпись, дата

Дубна 2026

СПИСОК ИСПОЛНИТЕЛЕЙ

Руководитель
исследовательской
программы (проекта),
д-р физ.-мат. наук



подпись

А.В. Белушкин

Исполнитель проекта,
Начальник отдела
НЭОКС ИБР-2, к-т
физ.-мат. наук



подпись

В.И. Боднарчук

Исполнитель проекта,
старший научный
сотрудник



подпись

А.А. Богдзель

Исполнитель проекта,
начальник сектора



подпись

А. Гонгадзе

Исполнитель проекта,
начальник сектора



подпись

Горбунов Н.В.

Исполнитель проекта,
научный сотрудник



подпись

Д.В. Дедович

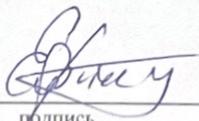
Исполнитель проекта,
ведущий инженер



подпись

В.А. Дроздов

Исполнитель проекта,
лаборант



подпись

В.Ю. Егоров

Исполнитель проекта,
В.н.с., д-р физ.-мат.
наук



подпись

Б.Ж. Залиханов

Исполнитель проекта,
помощник главного
инженера ЛНФ



подпись

С.В. Козырев

Исполнитель проекта,
старший инженер



подпись

А.Г. Колесников

Исполнитель проекта,
МНС



подпись

А.О. Колесников

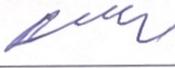
Исполнитель проекта,
научный сотрудник



подпись

А.К. Курилкин

Исполнитель проекта,
начальник сектора, к-т
физ.-мат. наук



подпись

В.М. Милков

Исполнитель проекта,
лаборант



подпись

Т.В. Милкова

Исполнитель проекта,
МНС



подпись

М.О. Петрова

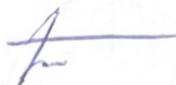
Исполнитель проекта,
М.Н.С.



подпись

В.В. Садилов

Исполнитель проекта,
начальник сектора



подпись

В.В. Терещенко

Исполнитель проекта,
инженер



подпись

С.В. Терещенко

Исполнитель проекта,
С.Н.С.



подпись

А.В. Чураков

СПИСОК СОИСПОЛНИТЕЛЕЙ

№	Название организации	Руководитель работ
1.	Государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования Московской области «Университет «Дубна» (Государственный университет «Дубна»)	И.Б. Немченко Доцент, кандидат физико-математических наук, Государственный университет «Дубна»
2.	Федеральное государственное бюджетное учреждение «Петербургский институт ядерной физики им. Б.П. Константинова Национального исследовательского центра «Курчатовский институт»	Е.В. Алтынбаев и.о. Зам. Зав. ОДНИ ИЦ НТ, НИЦ «Курчатовский Институт» - ПИЯФ кандидат физико-математических наук
3.	Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт ядерных исследований Российской Академии наук	Д.Н. Трунов научный сотрудник ИЯИ РАН, кандидат физико-математических наук
4.	Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт физики металлов имени М.Н.Михеева Уральского отделения Российской академии наук	Е.А. Кравцов Главный научный сотрудник, доктор физико-математических наук, ИФМ УрО РАН

СОДЕРЖАНИЕ

ПЕРЕЧЕНЬ УСЛОВНЫХ ОБОЗНАЧЕНИЙ	9
ВВЕДЕНИЕ	10
ОСНОВНАЯ ЧАСТЬ	13
1.1.1. Разработка, изготовление и испытание прототипа однокоординатного детектора типа MICROMEGAS с конвертером 10В.	13
1.1.2 Разработка, изготовление и испытание высоко поточного мониторного счётчика тепловых нейтронов с конвертером 10В на алюминиевой фольге и окнами из алюминиевой фольги.	27
1.1.3 Разработка, изготовление и испытание высоко поточного позиционно-чувствительного монитора тепловых нейтронов с конвертером 10В на алюминиевой фольге и окнами из алюминиевой фольги.	39
1.1.4 Разработка, изготовление и испытание прототипа многопроволочного однокоординатного детектора Flat tube с конвертером 10В на основе одной сплющенной алюминиевой трубки.	47
1.1.5 Теоретические исследования по определению оптимального материала конвертера для детектора нейтронов с микроканальной пластиной (МКП) (совместно с НИЦ «Курчатовский институт» - ПИЯФ).	61
1.1.6 Моделирование конфигурации нейтронографической установки с варьируемым разрешением на импульсном источнике нейтронов РАДЭКС ИЯИ РАН (совместно с ИЯИ РАН).	73
1.1.7 Разработка конструкции и моделирование оптических параметров одномерных позиционно-чувствительных сцинтилляционных детекторов размерами от 200 мм, определение координаты в которых основано на анализе амплитуды (совместно с ИЯИ РАН).	80
1.1.8 Разработка устройства для определения и контроля давления оптическим методом in-situ в нейтронографических камерах высокого давления системы поршень-цилиндр и на основе различных наковален (совместно с ИЯИ РАН).	84
1.1.9 Разработка метода изготовления пластин высокоэффективного сцинтиллятора на основе ZnS для регистрации тепловых нейтронов. (совместно с ИЯИ РАН).	90
1.1.10 Синтез, структурная характеристика тонких пленок на основе карбида бора (совместно с ИФМ УрО РАН).	93
1.1.11 Исследование влияния технологических режимов импульсного лазерного напыления на рентгеноструктурные и механические (микротвердость) свойства плёнок на основе карбида бора (совместно с ИФМ УрО РАН).	96
1.1.12 Разработка, изготовление и испытание прототипа детектора тепловых нейтронов с конвертером 10В на основе одной алюминиевой straw-трубки (совместно с Государственным университетом «Дубна»).	101
1.1.13 Теоретические исследования и математическое моделирование с целью определения оптимальной конструкции плоскопараллельного детектора с МКП на основе конвертера нейтронного излучения (совместно с НИЦ «Курчатовский институт» - ПИЯФ).	114

1.1.14 Моделирование и оптимизация оптических параметров сцинтилляторов на основе ZnS (совместно с ИЯИ РАН).	131
1.1.15 Разработка стенда для тестирования сцинтилляционных детекторов тепловых нейтронов (совместно с ИЯИ РАН).	135
1.1.16 Разработка, изготовление и испытания в полях тепловых нейтронов газонаполненной ионизационной камеры с плоскими электродами, имеющими тонкоплёночное борсодержащее покрытие (10В) и компенсацию тока от γ -излучения. Этап 1 (совместно с АО «КПП «Атомприбор»).	137
1.1.17 Разработка, изготовление и испытания в полях тепловых нейтронов однообъёмного цилиндрического газоразрядного счётчика нейтронного излучения с тонкоплёночным покрытием на основе изотопа 10В. Этап 1 (совместно с АО «КПП «Атомприбор»).	147
1.2.1 Создание на выведенном пучке нейтронов на реакторе ИБР-2 испытательного комплекса (ИК) для определения характеристик детекторов нейтронов разного типа. Этап 1.	157
1.2.2 Разработка блока электроники для регистрации сигнала с детектора на основе МКП с конвертером нейтронного излучения (совместно с НИЦ «Курчатовский институт» - ПИЯФ).	161
1.2.3 Развитие опытно-экспериментального участка (ОЭУ) по нанесению тонкоплёночных борсодержащих покрытий (часть 1).	175
1.2.4 Изготовление блока электроники для регистрации сигнала с детектора на основе МКП с конвертером нейтронного излучения (совместно с НИЦ «Курчатовский институт» - ПИЯФ).	178
1.3.1 Разработка и реализация в 2025 г. дополнительной образовательной программы повышения квалификации для научных сотрудников, направленной на создание прорывных технологических решений с применением синхротронных и нейтронных источников: «Методы исследований конденсированных сред с помощью рассеяния нейтронов» (совместно с Государственным университетом «Дубна»).	178
1.3.2 Разработка и реализация в 2025 г. дополнительной образовательной программы повышения квалификации «Автоматизация экспериментов в области нейтронной физики» для специалистов в области разработки, проектирования, строительства и технической эксплуатации с прохождением итоговой аттестации (совместно с Государственным университетом «Дубна»).	180
1.3.3 Проведение итоговой аттестации по 2 дополнительным образовательным программам повышения квалификации: «Методы исследований конденсированных сред с помощью рассеяния	181

нейтронов»; «Автоматизация экспериментов в области нейтронной физики» с выдачей удостоверений о повышении квалификации по каждой программе (совместно с Государственным университетом «Дубна»).	
1.3.4 Организация и проведение в 2025 г. конференции обучающихся и исследователей в возрасте до 39 лет по тематике исследований (V Всероссийская научно-практическая конференция «Задачи и методы нейтронных исследований конденсированных сред») (совместно с Государственным университетом «Дубна»).	182
1.3.5 Научно-просветительские и профориентационные мероприятия со школьниками в рамках IX Летней школы «Физика. Математика. Информатика» Государственного университета «Дубна» (совместно с Государственным университетом «Дубна»).	185
ЗАКЛЮЧЕНИЕ	188

ПЕРЕЧЕНЬ УСЛОВНЫХ ОБОЗНАЧЕНИЙ

ВМ	- Вибрационная магнитометрия
ВМР	- 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
λ	- длина волны, измеряется в ангстремах

ВВЕДЕНИЕ

Ключевые слова: сцинтилляционный счетчик, позиционно-чувствительный детектор, одномерный детектор, сцинтиллятор, прототип счетчика, твердотельный конвертор, газоразрядный модуль, магнетронное напыление.

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, а также проектов исследователей в возрасте до 39 лет. 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.

Исследовательская программа представлена проектом **«Развитие аппаратно-методической базы для решения научных и прикладных задач на источниках нейтронов разного типа»**, для выполнения которого был сформирован коллектив из сотрудников головной организации-исполнителя - Международной межправительственной организации Объединенным институтом ядерных исследований (г. Дубна) и 5и организаций – соисполнителей: НИЦ КИ ПИЯФ (г. Гатчина), ИЯИ РАН (г. Троицк, г. Москва), ИФМ УрО РАН (г. Екатеринбург), Государственный университет «Дубна» (г. Дубна), Конструкторско-производственное предприятие Атомприбор (г. Протвино). КПП Атомприбор выступает в данном проекте в качестве индустриального партнера.

План-график работ 2025 г. состоял из 26 задач, распределенных по мероприятиям следующим образом:

- Раздел 1 **«Мероприятия по проведению синхротронных и нейтронных исследований (разработок), необходимых для решения принципиально новых фундаментальных и крупных прикладных задач»** включал в себя 17 задач, выполняемых совместно всеми участниками проекта.
- Раздел 2 **«Мероприятия по созданию сетевой синхротронной и нейтронной научно-исследовательской инфраструктуры на территории Российской Федерации»** включал в себя 4 задачи, выполняемых совместно ОИЯИ, НИЦ КИ ПИЯФ.
- Раздел 3 **«Мероприятия по подготовке 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»** выполнялся совместно с коллективом Государственного университета «Дубна».

Задача первого этапа состояла в основном в обосновании и поиске технических решений для реализации задач исследовательской программы. Для этой цели был выполнен ряд научных и научно-методических работ, которые заложили основы для разработки и изготовления как отдельных элементов, так и готовых приборов на следующих этапах исследовательской программы.

В Разделе 1 из 17 представленных задач 15 посвящены развитию детекторных технологий для регистрации нейтронного излучения, 2 задачи касаются развития экспериментальных методов

исследований с помощью рассеяния нейтронов. На первом этапе проекта были начаты исследования перспективных материалов (карбид бора, микроканальные пластины (МКП)) для их применения детекторах нейтронов разного вида, начаты разработки оригинальных детекторных систем, ранее не использовавшихся и не производимых в Российской Федерации. Предложены для изучения и разработки принципиально новые модели детекторных систем (Flat tube), не имеющие на данный момент аналогов в мире. Несколько задач посвящены развитию уже используемых и применяемых на нейтронных источниках в Российской Федерации сцинтилляционных детекторов. Выполнение поставленных задач должно повысить эффективность работы таких детекторов, а также упростить и ускорить производство подобных детекторов для любых методов рассеяния, где данный вид регистрации нейтронного излучения был бы наиболее эффективен.

В рамках выполнения задач в интересах реального сектора экономики были начаты работы совместно с КПП Атомприбор по разработке газонаполненной ионизационной камеры с плоскими электродами, имеющими тонкоплёночное борсодержащее покрытие на основе изотопа ^{10}B и однообъёмного цилиндрического газоразрядного счётчика нейтронного излучения с тонкоплёночным покрытием на основе изотопа ^{10}B . Данные изделия планируются к применению на объектах атомной промышленности для измерения потоков быстрых нейтронов в области протекания цепной реакции деления, для определения и контроля мощности атомных энергоустановок.

В разделе 2 выполняется важнейшая задача по созданию испытательного комплекса на выведенном пучке нейтронов на импульсном реакторе ИБР-2 для проведения испытаний новых разработок в области детекторных технологий, на котором будет возможна имитация работы детектора в любой из применяемых методик в области нейтронных исследований. Создание данного комплекса позволит проводить характеризацию новых детекторных систем в реальных условиях и тем самым повысить эффективность проводимых работ по разработке новых детекторов нейтронов. Кроме этого, в данном разделе выполняются задачи, связанные с развитием уже созданного ранее Опытно-экспериментального участка по нанесению тонкоплёночных борсодержащих покрытий, который служит базой для разработки и создания новых детекторных систем для станций нейтронного рассеяния. В этом же разделе решается задача по созданию электроники для регистрации сигналов от детекторов, реализованных на базе МКП. Развитие детекторов нейтронов на базе МКП – это новое направление в технике нейтронного эксперимента и разработка блока электроники для этих целей является принципиальным моментом, чтобы потенциал этого метода мог быть реализован.

В разделе 3 реализованы несколько задач, связанных с обучением и подготовкой кадров для работы в области нейтронных исследований. Реализована дополнительная образовательная программа повышения квалификации для научных сотрудников, дополнительная образовательная программа повышения квалификации для специалистов в области разработки, проектирования, строительства и технической эксплуатации установок нейтронного рассеяния. Успешно проведена V Всероссийская научно-практическая конференция «Задачи и методы нейтронных исследований конденсированных сред», на которой было представлено 40 докладов, подготовленных коллективами из 39 ОИЯИ, НИЦ КИ ПИЯФ, ИЯФ им. Г.И. Будкера СО РАН, ИФМ им. М.Н. Михеева УрО РАН, Государственный университет «Дубна», УрФУ, МГУ, МФТИ, СПбГУ и других. География участников имела международный характер: Россия, Казахстан, Белоруссия, Таджикистан, США, Австрия. На конференции 26 докладов представлены исследователями до 39 лет.

Также в разделе 3 проведены научно-просветительские и профориентационные мероприятия со школьниками в рамках IX Летней школы «Физика. Математика. Информатика» на базе Государственного университета «Дубна».

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

Работы, выполняемые за счет финансирования из средств гранта

1.1.1 Разработка, изготовление и испытание прототипа однокоординатного детектора типа MICROMEGAS с конвертером ^{10}B .

В Научно-экспериментальном отделе комплекса спектрометров (НЭОКС) ИБР-2 ЛНФ изготовлен и испытан прототип однокоординатного детектора типа MICROMEGAS с конвертером ^{10}B из карбида бора B_4C на алюминиевой фольге.

1.1.1.1 Детектор Микромегас

Детектор Микромегас (MICROMESH Gaseous Structure или Micromegas, или ММ-детектор), предложенный G. Charpak и I. Giomataris [1], представляет собой плоскопараллельный счётчик с выделенными ионизационным и усилительным зазорами, разделёнными тонкой сеткой и представлен на Рис. 1.1.1.1.

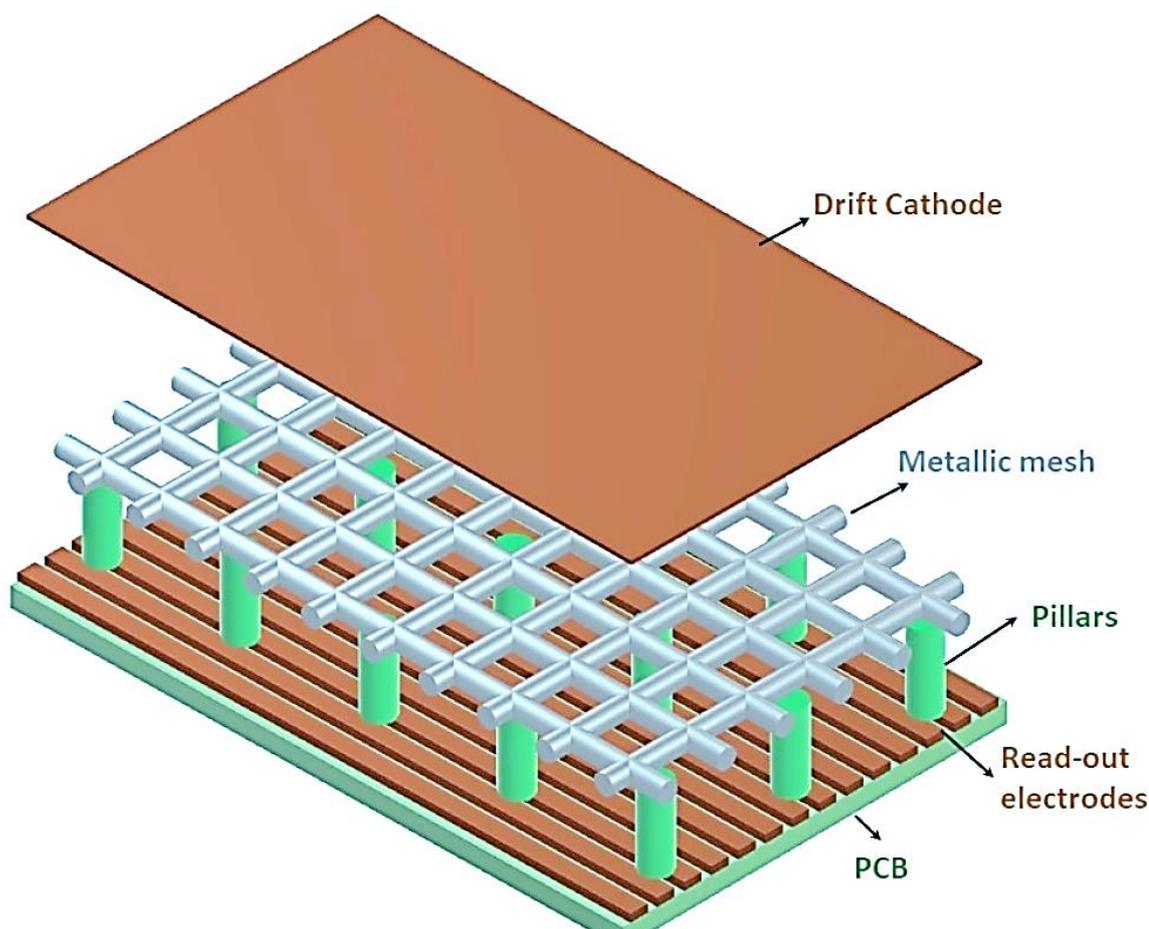


Рис. 1.1.1.1. Схема детектора Микромегас.

Типичная толщина ионизационного зазора, представляющая собой расстояние между дрейфовым катодом (Drift Cathod) и сеткой (Metallic Micromesh) составляет $3\div 5$ мм при дрейфовом

поле напряжённостью около 600 В/см. Усилительный зазор, обычно имеющий размер около 100÷150 мкм, представляет собой расстояние между сеткой (Metallic Micromesh) и анодом, плоскость которого разделена на полоски-стрипы регистрирующих электродов (Read-out electrodes). Напряжённость электрического поля в усилительном зазоре превышает 50 кВ/см, что обеспечивает вторичную электронную ионизацию молекул газа, нарастающую по направлению к аноду. Для получения по всей площади детектора высокой однородности газового усиления необходима однородность электрического поля в усилительном зазоре, которая связана с одинаковым зазором, обеспечиваемым регулярно расположенными одинаковыми по высоте изолирующими столбиками-пилларами (Pillars).

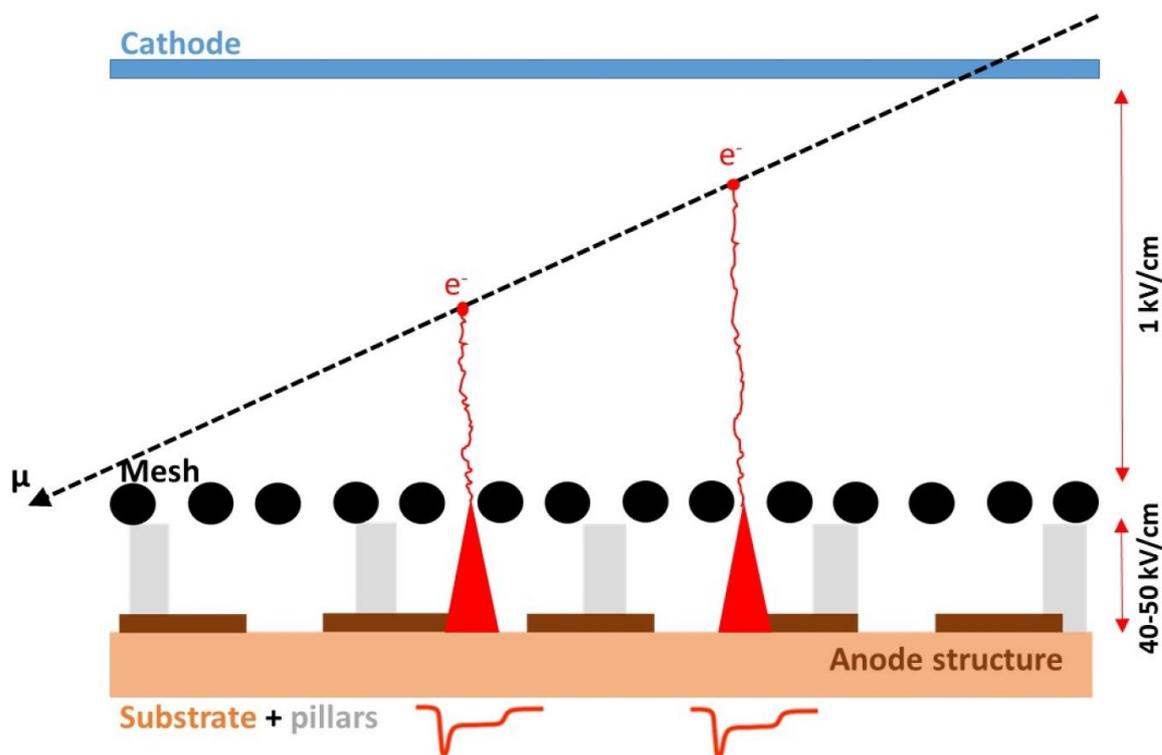


Рис. 1.1.1.2. Принцип работы детектора Микромегас.

Принцип работы детектора поясняется Рис. 1.1.1.2. Проходящие через ионизационный зазор детектора высокоэнергетические частицы на своём пути производят ионизацию газа. Образовавшиеся в результате нескольких актов ионизации ионы дрейфуют к катоду, а электроны дрейфуют к сетке. Благодаря очень большой разнице в напряжённости поля между ионизационным и усилительным зазорами прозрачность сетки для электронов составляет более 90%. В усилительном зазоре за счёт очень высокой напряжённости поля электроны, ускоряясь, приобретают энергию, достаточную для вторичной ионизации молекул газа, в свою очередь вторичные электроны, ускоряясь, также приводят к ионизации. Этот процесс образует нарастающую по направлению к аноду электронную лавину. Полная амплитуда сигнала на аноде достигает более 10^6 электронов. Из-за нарастания электронной лавины по мере приближения к аноду, большая часть электронов и ионов образуются вблизи анода. Поэтому электроны быстро достигают анода, а ионам приходится проходить практически весь усилительный зазор, прежде чем достигнуть сетки, чем объясняется доминирующий (около 90%) вклад ионов в длительность сигнала. Для лавины, образованной одним актом ионизации в ионизационном зазоре (одноэлектронный режим), длительность сигнала определяется временем сбора ионов и составляет

около 150 нс. В классических газовых детекторах, имеющих зазор 8–12мм между катодами, которые симметрично разделены многопроволочным анодом из очень тонких проволочек, образующих анодную плоскость, лавина электронов и ионов образуется вблизи анодной проволоки из-за стремительного увеличения напряжённости поля вследствие вторичной ионизации. Образующиеся ионы, дрейфуя к катоду, образуют объёмный заряд, который искажает поле и может на время исказить и остановить работу детектора. В отличие от этих детекторов, в детекторах Микромегас расстояние анод-катод (здесь ионизационный зазор) и время дрейфа ионов меньше, напряжённость поля такова, что лавина не образуется, и исключается возможность образования объёмного заряда, искажающего дрейфовое поле, который ограничивает загрузочную способность детектора. Для получения пространственного разрешения анодная плоскость разделена на узкие полоски-стрипы, изолированные друг от друга, которые являются считывающими электродами. Обычно стрипы изготавливают с шагом $350 \div 500$ мкм, что позволяет получить собственное координатное разрешение детектора около 100 мкм.

Однако плоские счётчики уязвимы к искровым разрядам. Если заряд лавины превышает предел Риттера (в зависимости от газовой смеси заряд может быть $10^7 \div 10^8$ электронов), то происходит развитие стримера, за которым следует искровой разряд. Этим же страдают детекторы Микромегас, усилительный зазор которых представляет собой плоский счётчик. Очень высокая ионизация может быть вызвана, например, прохождением медленного протона через ионизационный промежуток детектора. В реальной эксплуатации такие события неизбежны. Каждый искровой разряд приводит к неработоспособности детектора Микромегас в течение около 1 мс, что приводит к ограничению максимальной регистрируемой плотности потока медленных протонов. Для смягчения этого эффекта и повышения загрузочной способности используют специальную двухслойную структуру считывающих электродов, показанную на Рис. 1.1.1.3, состоящую из анода – первого электрода, выполненного из материала с высоким удельным сопротивлением, и второго электрода, представляющего собой считывающий слой из медных считывающих стрипов, отделённых от анода изолятором.

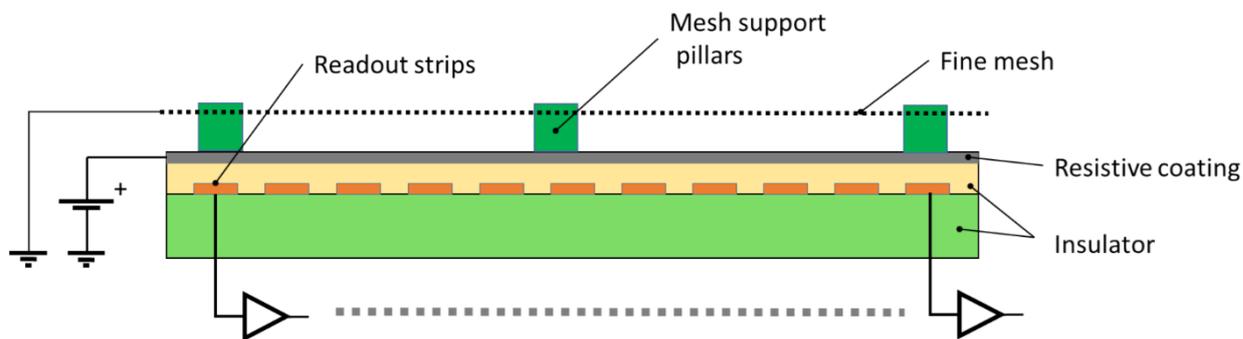


Рис. 1.1.1.3. Схема устойчивой к разрядам структуры детектора Микромегас.

Высокоомный материал анода позволяет сохранить в усилительном зазоре, как и проводящий материал, электрическое поле высокой напряжённости и исключить влияние возникающего искрового разряда на работу всего детектора, локализуя его влияние лишь в области образования искрового разряда, где, в отличие от проводящего материала, разряжается лишь небольшая часть высоковольтного электрода (до нескольких мм), в то время как почти вся площадь детектора остаётся активной. Слой с медными считывающими стрипами отделён от анодного слоя изолятором и предназначен для сбора индуцированного сигнала, стрипами, соответствующими месту образования электронной лавины на высоковольтном аноде. Сигнал с каждого стрипа передаётся

на соответствующий стрипу усилитель. В настоящее время большая часть детекторов Микромегас выполняется по этой схеме. Детекторы Микромегас характеризуются хорошим пространственным разрешением (до 100 мкм) и высокой загрузочной способностью. В корректно спроектированном детекторе общий поток регистрируемых заряженных частиц ограничивается допустимой вероятностью наложения сигналов на одном стрипе и возможностями считывающей электроники. В эксперименте COMPAS [2] детекторы Микромегас успешно работают с потоками частиц до $5 \cdot 10^5$ частиц в секунду на площади в 1 см^2 .

Недостатком Микромегас является малая амплитуда сигналов, из-за чего требуется использование специальной малошумящей считывающей электроники. Достоинством Микромегас является более высокое, чем в классических газовых детекторах пространственное разрешение, которое требует большее количество каналов считывания на одинаковую чувствительную площадь.

Для того чтобы газовый детектор Микромегас мог использоваться для регистрации нейтронов, его требуется дополнить конвертором нейтронов в заряженные частицы. Катод детектора удобно выполнить из алюминиевого листа, покрытого слоем карбида бора $^{10}\text{B}_4\text{C}$, нанесённого на внутреннюю поверхность катода. Захват теплового нейтрона ядром ^{10}B инициирует распад возбуждённого ядра ^{11}B на заряженные частицы литий и α -частицу, разлетающиеся в противоположные стороны, одна из которых попадает в ионизационный зазор. Такие крупные частицы в ионизационном зазоре способны ионизовать большое количество молекул газа и создать до $7 \cdot 10^5$ электронов первичной ионизации.

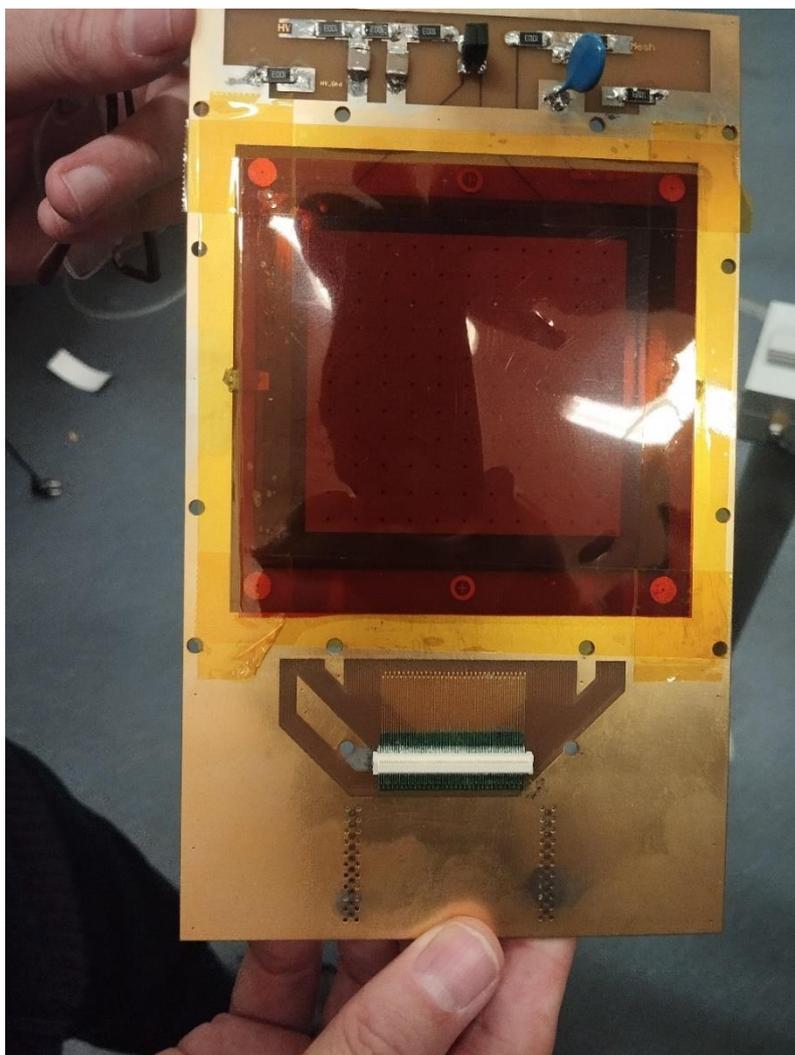


Рис. 1.1.1.4. Основа детектора Микромегас.

Поэтому предполагается, что для регистрации этих частиц достаточно небольшое газовое усиление, около 100, и, следовательно, относительно небольшая напряжённость электрического поля, определяемая напряжением в усилительном зазоре. При этом фоновые процессы (взаимодействие фотонов и заряженных частиц космического излучения), производящие в 100 раз меньшую ионизацию, предполагается, что должны быть подавлены порогом регистрирующей электроники. То есть должны отсутствовать фоновые частицы, которые могли бы вызвать количество электронов первичной ионизации больше, чем частицы нейтронных событий, а также должна отсутствовать возможность возникновения искрового разряда в детекторе. Заряженные частицы распада – литий и α -частица, двигаясь в ионизационном промежутке образуют пространственный трек из электронов первичной ионизации, ухудшающий возможность определения места захвата нейтрона, или пространственное разрешение. Улучшение разрешения детекторов нейтронов Микромегас возможно при уменьшении ионизационного зазора вплоть до использования минимального дрейфового промежутка, который может быть менее 1 мм.



Рис. 1.1.1.5. Детектор Микромегас со снятой крышкой.

При этом количество электронов первичной ионизации будет значительно уменьшаться, но в любом случае будет достаточно для уверенной регистрации сигнальных событий. Оптимальное решение будет определяться конкретными требованиями детектора и считывающей электроники и требует пробных испытаний.

1.1.1.2 Изготовление прототипа однокоординатного детектора Микромегас

Как показано на Рис. 1.1.1.3 основой детектора является металлическая сетка на пилларах и двухслойная структура, состоящая из высокоомного анода и считывающих стрипов. Благодаря малому (160 мкм) расстоянию между сеткой и анодом, конструкция детектора выполнена методами, применяемыми в микроэлектронике. На Рис. 1.1.1.4 приведена фотография основы детектора Микромегас. Чтобы не запылить сетку, структура Микромегас, размещённая в центральной части и имеющая размер около 54x54 мм, закрыта полиимидной плёнкой. Основа детектора изготовлена из трёхслойного стеклотекстолита с применением технологии изготовления печатной платы. Из внутреннего слоя, состоящего из медной фольги, сформировано 120 считывающих полосок-стрипов шириной 0,4 мм с шагом 0,45 мм. На верхнем слое вместо медной фольги нанесён высокоомный резистивный слой из алмазоподобного углерода, являющийся анодом. Анод и медные стрипы разделены слоем текстолита 0,6 мм толщиной. Нижний слой из медной фольги выполнен в виде токопроводящих дорожек, соединяющих считывающие стрипы с разъёмом Panasonic, имеющем 120 контактов, предназначенного для подключения электроники усиления и формирования электрических сигналов, регистрирующих возникающие на аноде токовые сигналы, наведённые на стрипах. Число стрипов соответствует числу контактов – 120 ш. Методом фотолитографии с применением плёночного фоторезиста, нанесённого на анодный слой, и применением маски сформированы пиллары, задающие расстояние анод-сетка. Высота пилларов соответствует толщине фоторезиста и составила 160 мкм. Детектор со снятой крышкой приведён на Рис. 1.1.1.5. Корпус детектора выполнен из алюминия и представляет собой конструкцию с перегородкой по периметру сборки структуры Микромегас. Шнур из витона, уложенный по периметру корпуса с обеих сторон, герметизирует внутренний объём детектора вместе со структурой Микромегас.

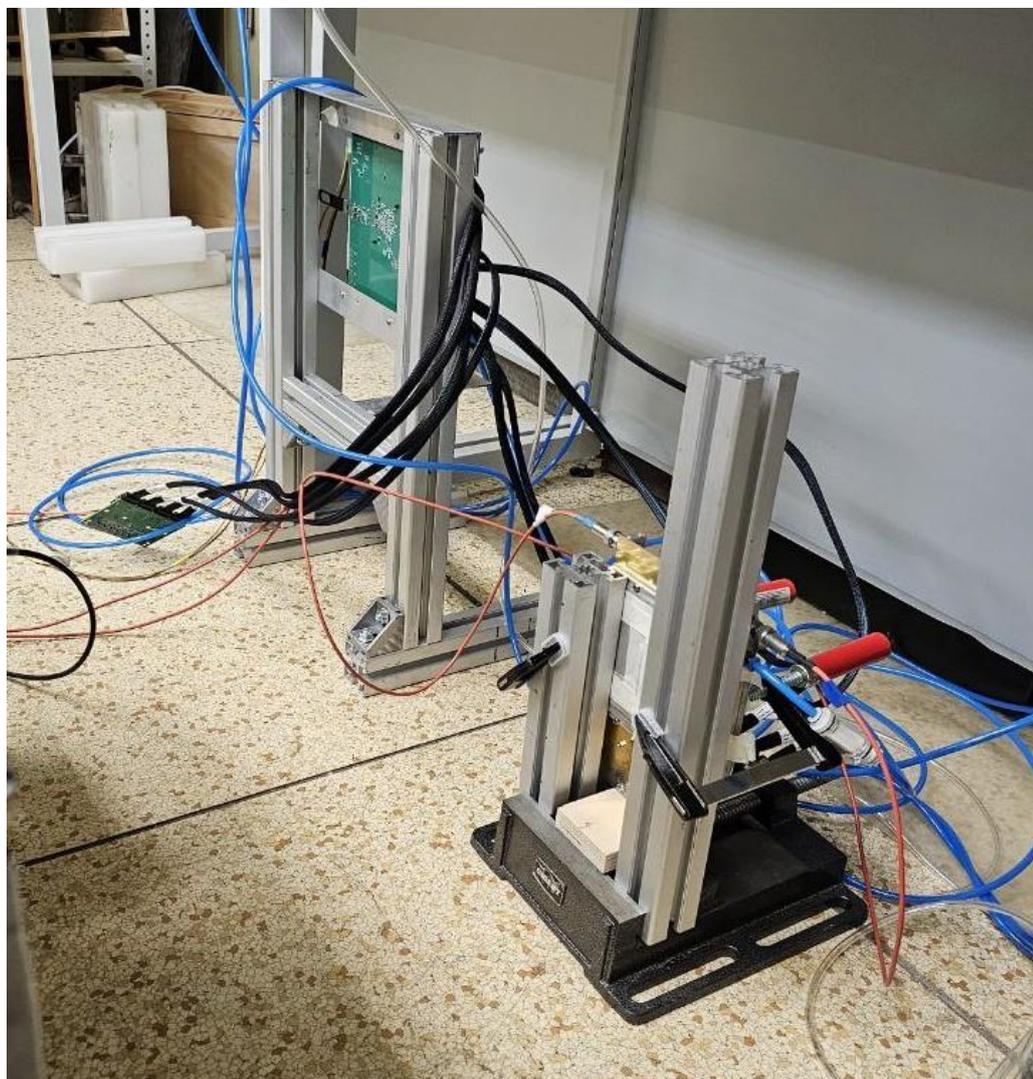


Рис. 1.1.1.6. Детектор Микромегас в сборе с цифровой поканальной электроникой.

По диагонали размещены быстросъёмные фитинги под пластиковую трубку 6 мм для продува рабочей газовой смесью. Два высоковольтных разъёма предназначены для подключения высоковольтного напряжения катод – сетка и сетка – анод. Катод из алюминиевого листа, имеющего размер 100x100 мм и толщину 0,5 мм с покрытием из карбида бора 10В4С, прикреплен через размещённые по углам листа изолирующие прокладки, задающие расстояние 1,0 мм от поверхности катода до сетки структуры Микромегас. Покрытие из карбида бора 10В4С, нанесённое на катод, обращено к структуре Микромегас. На Рис. 1.1.1.6 показан детектор Микромегас, закрытый крышкой с окном 70x70 мм, на стойке в сборе с цифровой поканальной электроникой, закреплённой на держателе. Для проведения испытаний был применена 32-канальная схема считывания.

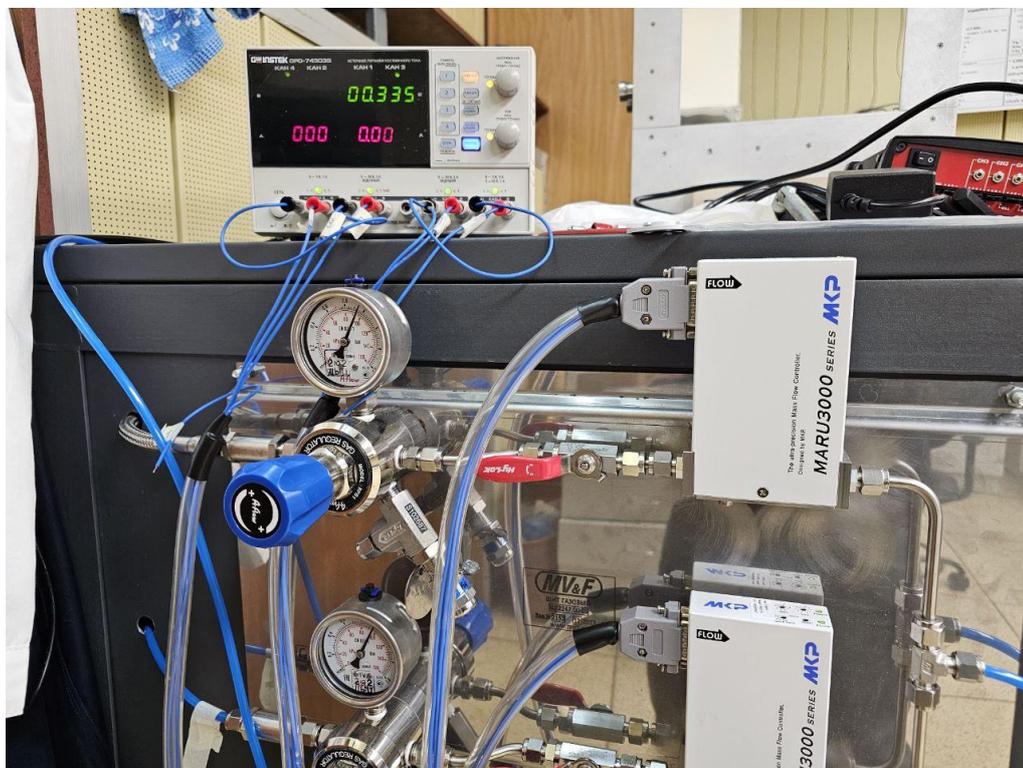


Рис. 1.1.1.7. Система динамического смешения газов.

Для охвата большей чувствительной площади в один канал объединены по два рядом расположенных стрипа. Таким образом, шаг регистрации становится 0,9 мм и охватывает чувствительную область 28,8 мм. На Рис. 1.1.1.7 показана система динамического смешения газов, используемая для создания рабочей смеси газов 90%Ar/10%CO₂, работающая на продув для детектора Микромегас. Система основана на двух управляемых регуляторах расхода газа (РРГ). При подаче давления 1 атм. на вход каждого РРГ, на выходе получается смесь, соответствующая сумме протока газов через РРГ.

1.1.1.3 Испытания прототипа однокоординатного детектора Микромегас

Испытание прототипа детектора Микромегас проводилось на базе ЛНФ ОИЯИ, в помещениях 119 корпуса, предназначенных для работы с радиоактивными источниками, и выполнялись для детектора Микромегас с двумя вариантами толщины слоя конвертера ¹⁰B₄C: 200 нм и 1000 нм с использованием лабораторного источника нейтронов ²⁵²Cf (выход 10⁷ н/с на 07.11.24г.), который устанавливался непосредственно перед измерениями в пластиковый замедлитель.

Для снятия счётной характеристики, определения рабочего напряжения и получения амплитудных спектров собирался измерительный тракт, состоящий из: детектора Микромегас, сигналы со стрипов которого соединены в один сигнальный канал, источника высокого напряжения DT5533EM CAEN, зарядочувствительного усилителя-формирователя квази-гауссовской формы (разработан в НЭОКС ИБР-2 ЛНФ), цифрового многоканального анализатора MCA-8000D и ПК с ПО Dpp-MCA. В качестве рабочего газа использовалась смесь 80%CF₄/20%C₄H₁₀ в проточном режиме со скоростью подачи газовой смеси 2 см³/мин. В течение 4 часов до проведения измерений выполнялась продувка детектора с этой же скоростью.

Детектор Микромегас с толщиной конвертера из карбида бора ¹⁰B₄C 200 нм. Выбор рабочей точки. На Рис. 1.1.1.8 представлены амплитудные спектры в зависимости от напряжения питания и счётная характеристика, построенная на их основе при экспозиции 300 сек, достаточной для набора чёткого спектра. Для отсека шума использовался порог на уровне 20 мВ. На всех амплитудных

спектрах видны пики, соответствующие энергиям частиц, образующимся при взаимодействии бора-10 с нейтронами: это литий (0,84 МэВ) и α -частица (1,47 МэВ).

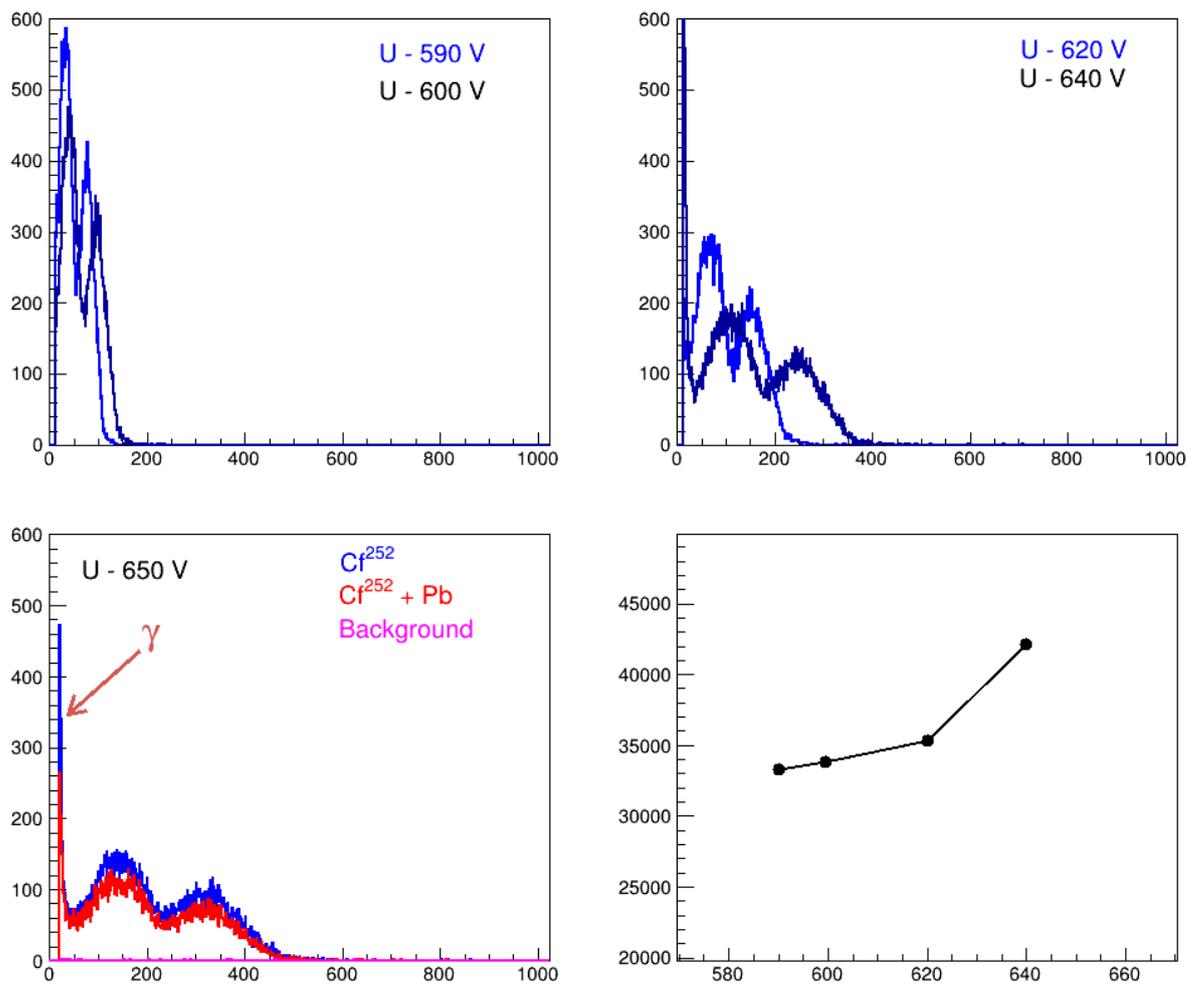


Рис. 1.1.1.8. Детектор Микромегас с толщиной конвертера 200нм. Амплитудные спектры в зависимости от напряжения питания и счётная характеристика.

По спектрам видно, что при установленном пороге 20 мВ вклад от гамма-фона, связанного с источником нейтронов ²⁵²Cf, начал проявляться при напряжении питания более 620В. Увеличение напряжения более 620В даёт резкий рост счётной характеристики, связанный с ростом гамма-фона. Размещение свинцового экрана толщиной 5 мм перед детектором помогает уменьшает гамма-фон, хотя при этом также уменьшается поток нейтронов.

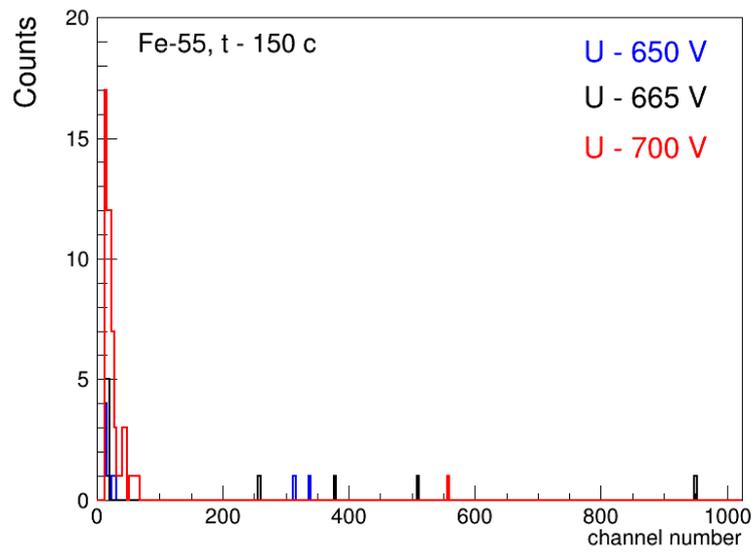


Рис. 1.1.1.9. Амплитудные спектры Fe-55 в зависимости от напряжения питания.

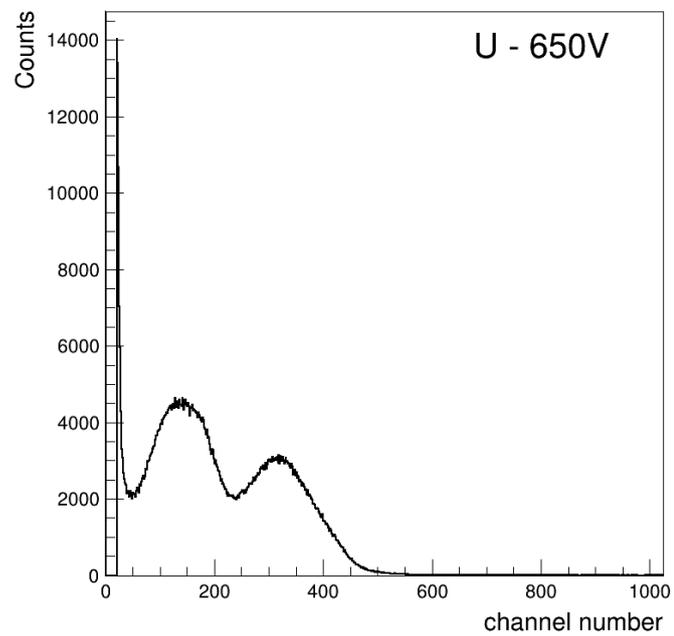


Рис. 1.1.1.10. Амплитудный спектр при напряжении питания 650 В. Экспозиция 58905 сек.

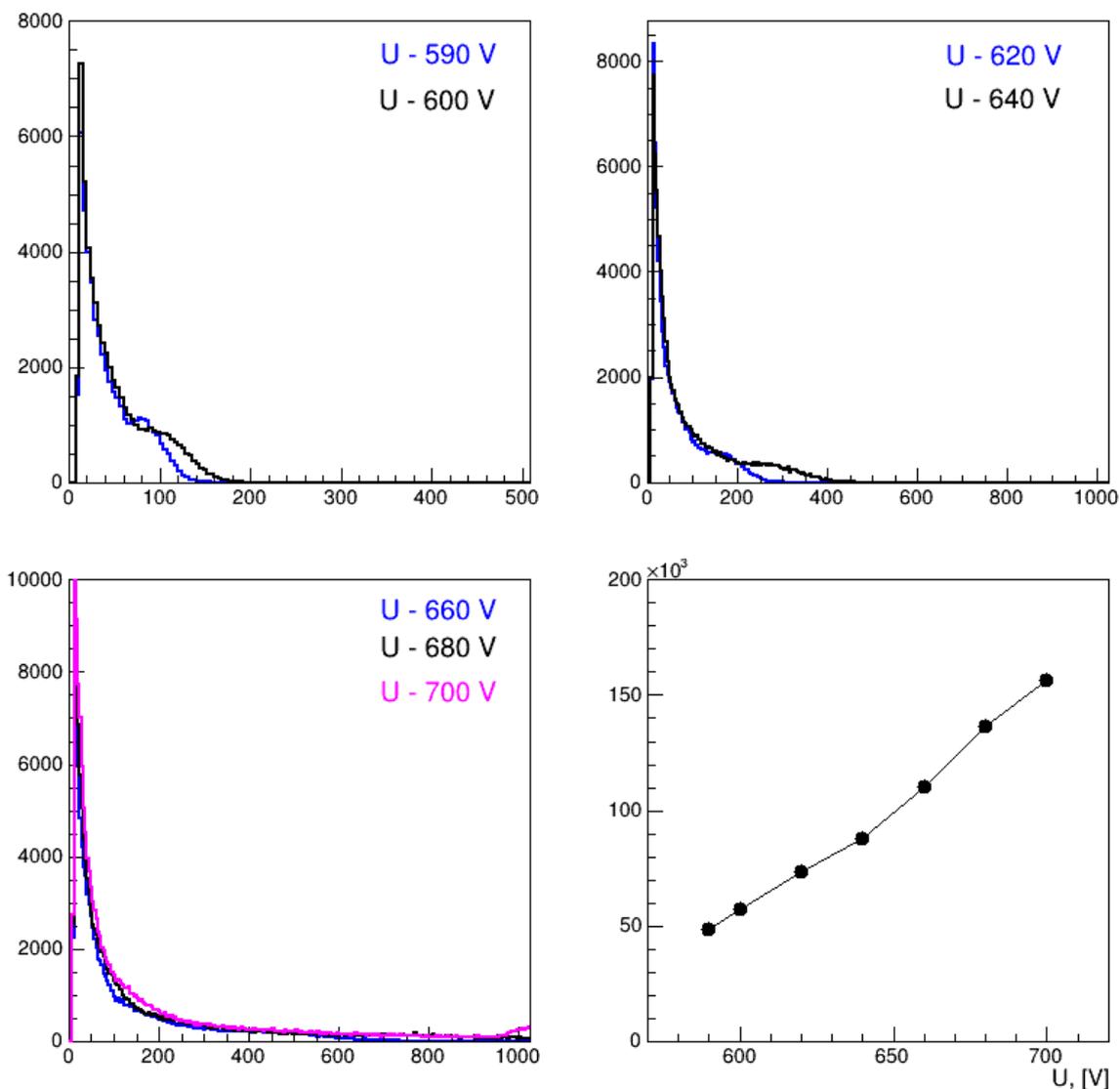


Рис. 1.1.1.11. Детектор Микромегас с толщиной конвертера 1000нм. Амплитудные спектры в зависимости от напряжения питания и счётная характеристика.

Для калибровки энергетического уровня спектральных характеристик использовался источник гамма-излучения около 6 кэВ, изотоп Fe-55. Применялось время экспозиции 150 сек. По Рис. 1.1.1.9 видно, что при напряжении 650 В гамма-излучение от Fe-55 не регистрируется. Заметно проявляется это излучение при напряжении чуть более 665 В. Это означает, что при напряжении питания 650 В регистрация нейтронов начинается с энергий более 10 кэВ. Таким образом была выбрана рабочая точка в 650 В. Для получения более чёткого амплитудного спектра накопление регистрации нейтронов от источника ²⁵²Cf выполнялось с экспозицией 58905 сек. На Рис. 1.1.1.10 приведён полученный амплитудный спектр, по которому видно, что для отсеечения гамма-фона можно выбрать уровень дискриминатора по 45 амплитудному каналу, что соответствует 300 кэВ.

Детектор Микромегас с толщиной конвертера из карбида бора ¹⁰B₄C 1000 нм. Выбор рабочей точки. На Рис. 1.1.1.11 представлены амплитудные спектры в зависимости от напряжения питания и счётная характеристика, построенная на их основе при экспозиции 300 сек. Для отсеечения шума также использовался порог на уровне 20 мВ. На всех амплитудных спектрах слабо видны пики, соответствующие энергиям частиц лития (0,84 МэВ) и α-частиц (1,47 МэВ). Большая толщина конвертера сказалась на форме амплитудного спектра, в котором энергетические пики стали

размытыми вследствие увеличения доли частиц, вылетающих из конвертера в рабочий газ, которые большую часть энергии теряют в толщине слоя конвертера. Чем угол разлёта более острый, тем больший путь частица проходит в слое конвертера и тем меньшая часть энергии выделяется в рабочем газе. Особенно эффект поглощения энергии в толщине слоя конвертера сказывается для частиц, разлетающихся из глубины конвертера под острыми углами к поверхности конвертера, которых с увеличением толщины становится больше. Это приводит к тому, что энергетические пики размываются в сторону малых энергий и накладываются на гамма-фон. На частотной характеристике не наблюдается полка. Всё это осложняет выбор рабочей точки по напряжению питания и поиск оптимального уровня дискриминатора по амплитудным спектрам.

Детектор Микромегас с толщиной конвертера из карбида бора $^{10}\text{B}_4\text{C}$ 200 нм. Проверка позиционной чувствительности. На Рис. 1.1.1.12 показано размещение щели, установленной перед детектором. Щель изготовлена из листа кадмия толщиной 3 мм.

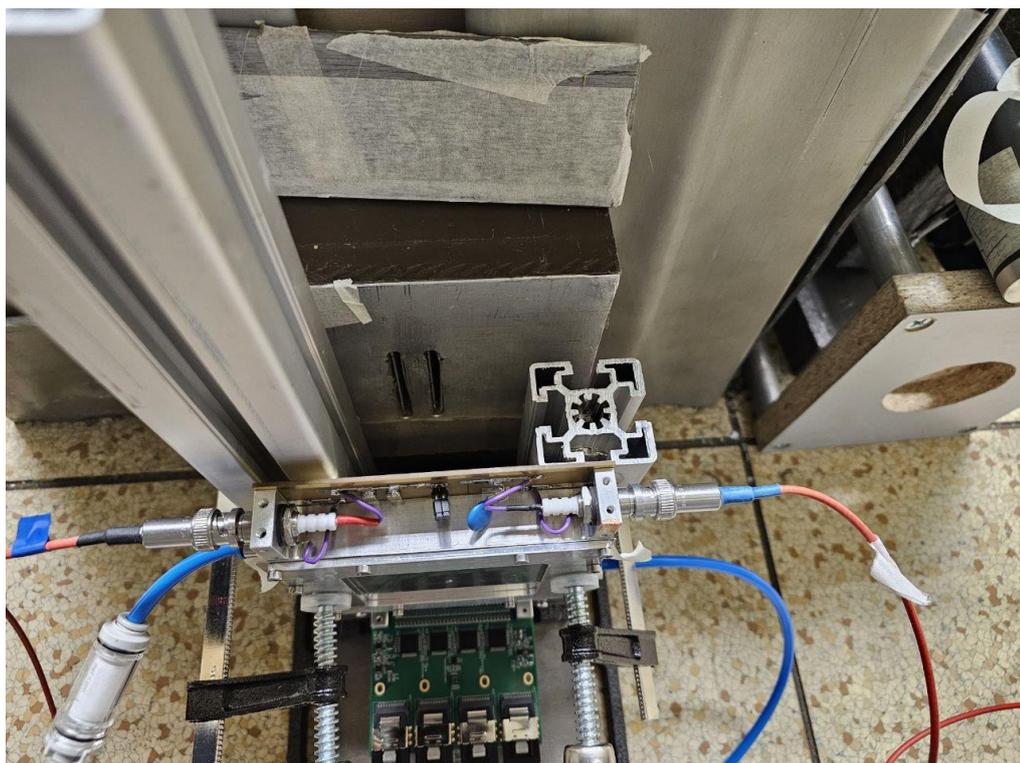


Рис. 1.1.1.12. Размещение щелевого экрана перед детектором Микромегас.

Использовалась двоякая конструкция, состоящая из щелей шириной 6 мм с расстоянием между ними 20 мм. Поскольку чувствительная область 28,8x54 мм, то в центр чувствительной поканальной области (28,8 мм) возможно установить лишь одну щель. По фотографии Рис. 1.1.1.12 видно, что в центр этой области установлена правая щель.

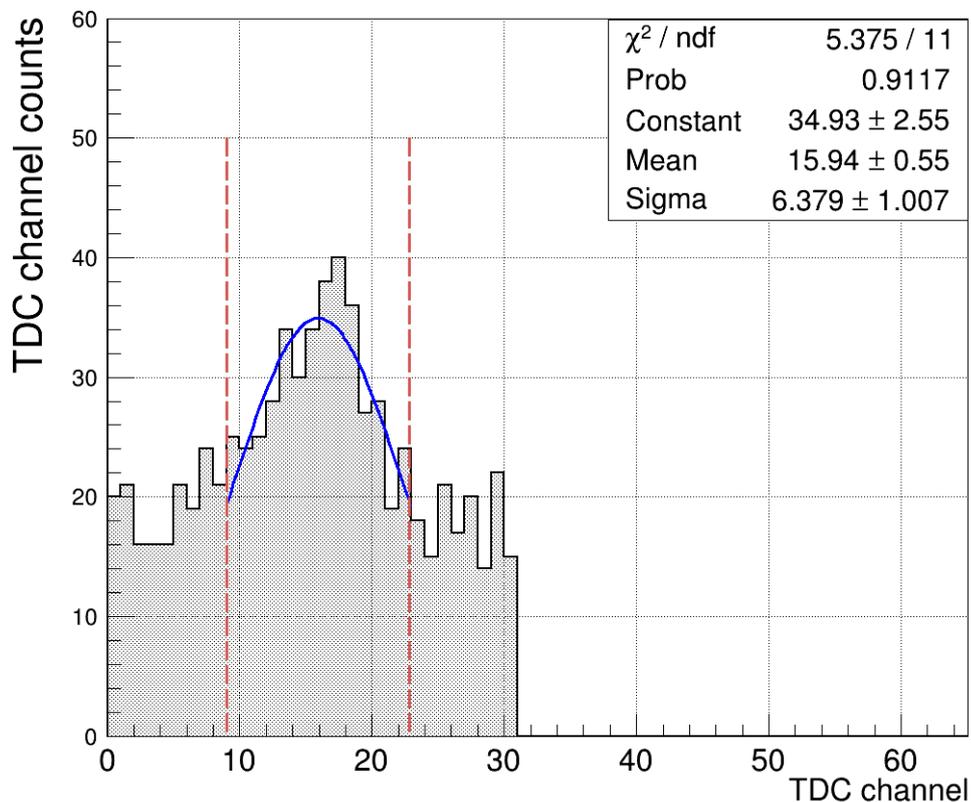


Рис. 1.1.1.13. Позиционное накопление прототипом детектора Микромегас нейтронов от источника ^{252}Cf в полиэтиленовом кубе 300x300 мм. 6мм щель из 3 мм кадмия.

На Рис. 1.1.1.13 показан результат поканального накопления счёта регистрируемых от источника ^{252}Cf нейтронов для определения позиционной чувствительности прототипа однокоординатного детектора Микромегас. Для регистрации использовалась разработанная в НЭОКС ИБР-2 ЛНФ система 32 канального параллельного счёта и накопления сигналов с шагом 0,9 мм, всего 28,8 мм. Из Рис. 1.1.1.13 видно, что нейтроны, прошедшие сквозь щель, регистрируются от 9 до 23 канала из 32 каналов, всего 12 каналов. Распределение накопления по каналам имеет колоколобразную форму, близкую к Гауссовому. Вычисления определили, что центр приходится на 16 канал, а полуширина равна 6,4 канала, что соответствует ($6,4 \times 0,9 = 5,8$ мм) ширине щели. Широкое основание «колокола» и отсутствие полки в верхней части связаны, вероятно, с большими размерами замедлителя, представляющего собой протяжённый источник замедленных до тепловых скоростей нейтронов, расположенный перед щелью. Благодаря протяжённым размерам источника, через щель проникают нейтроны под углами, близкими к 180° , чем и объясняется форма накопления числа регистрируемых нейтронов. Небольшая асимметрия «колокола» связана с наличием второй щели, расположенной слева. Наличие подложки, которая по количеству регистрации меньше в 2 раза, связано с использованием в качестве экрана со щелью кадмия. Кадмий не является абсолютным фильтром, а задерживает лишь часть нейтронов. Кроме того, сказывается использование рассеивающей нейтроны стеклотекстолитовой печатной платы в качестве основы для структуры Микромегас

1.1.1.4 Выводы

Результаты исследований прототипа однокоординатного детектора Микромегас с конвертером $^{10}\text{B}_4\text{C}$ подтвердили возможность изготовления на основе конструкции Микромегас детектора нейтронов.

НЭОКС ИБР-2 ЛНФ в рамках исследовательской программы (проекта) по теме: “Разработка и создание современных экспериментальных станций источников импульсного или постоянного типа” в соответствии с пунктом 1.1.1 Плана-графика «Разработка, изготовление и испытание прототипа однокоординатного детектора типа MICROMEGAS с конвертером ^{10}B выполнены следующие работы:

1. Разработана конструкторская документация прототипа однокоординатного детектора тепловых нейтронов типа MICROMEGAS с конвертером ^{10}B . В составе: чертёж общего вида; габаритный чертёж; сборочный чертёж; пояснительная записка.

2. Изготовлен прототип однокоординатного детектора тепловых нейтронов типа MICROMEGAS с конвертером из карбида бора $^{10}\text{B}_4\text{C}$.

3. Выполнены испытания прототипа однокоординатного детектора тепловых нейтронов типа MICROMEGAS с конвертером из карбида бора $^{10}\text{B}_4\text{C}$ толщиной 200нм и 1000нм

По результатам испытаний можно сделать следующие выводы:

– подтверждена возможность изготовления позиционно-чувствительных детекторов нейтронов на основе детектора Микромегас;

– на полученных амплитудных спектрах с конвертером из карбида бора $^{10}\text{B}_4\text{C}$ толщиной 200нм видны пики, соответствующие максимальным энергиям частиц – лития и гелия при напряжении 650В в газовой среде 80%CF₄/20%C₄H₁₀;

– уровень дискриминатора для слоёв конвертера из карбида бора $^{10}\text{B}_4\text{C}$ более 500 нм следует оставлять таким же, как и для слоя 200нм. Это следует из рассмотрения полученных амплитудных спектров с конвертером толщиной 1000нм. На спектрах видно, что при напряжении 680В и 700В пики, соответствующие максимальной энергии частиц лития (0,84МэВ) и гелия (α -частиц) (1,47МэВ), смещаются вправо и выходят за пределы верхних амплитудных каналов. При этом на частотной характеристике для слоя конвертера 1000нм хотя и не наблюдается полка, но виден перегиб роста характеристики при напряжении 650В. Это же напряжение характерно и при рассмотрении частотной характеристики для слоя 200нм, которое выбрано как оптимальное напряжение для работы детектора Микромегас, имеющим катод с конвертером толщиной 200нм;

– применение стеклотекстолитовой основы, рассеивающей нейтроны, в структуре Микромегас является одной из причин высокой нейтронной подложки, наблюдаемой в поканальной регистрации нейтронов, проходящих сквозь щель;

– для улучшения характеристик детектора нейтронов на основе Микромегас необходимо заменить традиционно используемую структуру Микромегас на основе печатной платы из стеклотекстолита на другие конструкции, которые должны значительно меньше рассеивать нейтроны;

– создание детектора нейтронов на основе Микромегас высокой эффективности связано с построением многослойной системы из нескольких последовательно расположенных друг за другом детекторов Микромегас с катодом, покрытым слоем конвертера из карбида бора $^{10}\text{B}_4\text{C}$ толщиной около 1000нм. Возможность создания такого детектора упирается в создании структуры Микромегас с наименьшей величиной рассеивания нейтронов.

Полученные результаты полностью соответствуют п. 1.1.1 Плана-Графика работ в рамках исполнения обязательств по Соглашению № 075-10-2025-153 от 05 июня 2025 г.

ПРИЛОЖЕНИЯ

– Конструкторская документация. ФАЙЛ: [ПГ 1.1.1 Конструкторская документация.pdf](#)

- Акт изготовления. ФАЙЛ: [ПГ 1.1.1 Акт изготовления.pdf](#)
- Методика испытаний. ФАЙЛ: [ПГ 1.1.1 Методика испытаний.pdf](#)
- Акт испытаний. ФАЙЛ: [ПГ 1.1.1 Акт испытаний.pdf](#)
- Протокол испытаний. ФАЙЛ: [ПГ 1.1.1 Протокол испытаний.pdf](#)

1.1.2 Разработка, изготовление и испытание высоко поточного мониторингового счётчика тепловых нейтронов с конвертером ^{10}B на алюминиевой фольге и окнами из алюминиевой фольги.

В Научно-экспериментальном отделе комплекса спектрометров (НЭОКС) ИБР-2 ЛНФ изготовлен и испытан высокопоточный мониторинговый счётчик тепловых нейтронов с конвертером ^{10}B на алюминиевой фольге и окнами из алюминиевой фольги.

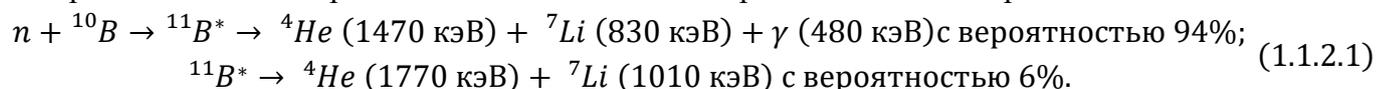
Любой источник нейтронов обладает постоянными флуктуациями интенсивности потока нейтронов даже в относительно небольших временных диапазонах. Для получения точных измерений на станциях нейтронного рассеяния необходимо вводить поправки на флуктуацию интенсивности источника нейтронов на протяжении всего эксперимента. Для этой цели применяются пучковые мониторы-счётчики нейтронного пучка.

Высоко поточные мониторинговые счётчики тепловых нейтронов устанавливаются в самом начале пучка тепловых нейтронов, исходящих от реактора, предназначены для применения в исследовательских системах с высокой плотностью потока нейтронного излучения (более $10^6 \text{ н} \cdot \text{с}^{-1} \cdot \text{см}^{-2}$), и должны соответствовать следующим требованиям:

- 1) максимальное пропускание, то есть должно быть поглощено или рассеяно минимальное количество проходящих сквозь монитор нейтронов;
- 2) оптимальная эффективность, то есть слой конвертера нейтронов должен быть минимальным для обеспечения высокой прозрачности монитора для нейтронов, но достаточным по толщине для надёжной регистрации потока нейтронов;
- 3) низкая чувствительность к γ -фону источника и фону окружающей среды;
- 4) верхний уровень динамического диапазона мониторингового счётчика должен быть выше максимальной интенсивности пучка;
- 5) высокое временное разрешение, соответствующее потоку нейтронов более $10^6 \text{ н} \cdot \text{с}^{-1} \cdot \text{см}^{-2}$.

1.1.2.1 Конструкция мониторингового счётчика

Мониторный счётчик предназначен для определения потока тепловых нейтронов с определением длины волны по времени пролёта через рабочую область монитора. Регистрация нейтронов основана на реакции взаимодействия нейтрона с изотопом бора ^{10}B :



В результате захвата нейтрона ядром ^{10}B образуется ядро $^{11}\text{B}^*$ в возбуждённом состоянии. Результатом возбуждения является распад ядра на заряженные частицы ${}^7\text{Li}$ и ${}^4\text{He}$, разлетающиеся с высокой энергией (1470 и 830 кэВ или 1770 и 1010 кэВ) равновероятно в противоположные стороны в угол 4л. Частицы, попадающие в газовый промежуток камеры, ионизуют рабочий газ. В связи с увеличением напряжённости поля вблизи анодной проволоки более 20кВ/см, происходит лавинообразная ионизация рабочего газа теперь уже ускоренными электронами: создаётся газовое усиление. Регистрация усиленного газовым усилением электрического сигнала, снимаемого с анодных проволок, сигнализирует факт прохождения нейтрона сквозь камеру.

Мониторный счётчик с конвертером на основе ^{10}B использует тонкоплёночное покрытие из карбида бора $^{10}\text{B}_4\text{C}$ толщиной 30–100 нм и представляет собой газовую многопроволочную камеру,

состоящую из двух плоских параллельно расположенных катодов, разделёнными анодом из расположенных в ряд тонких анодных проволочек.

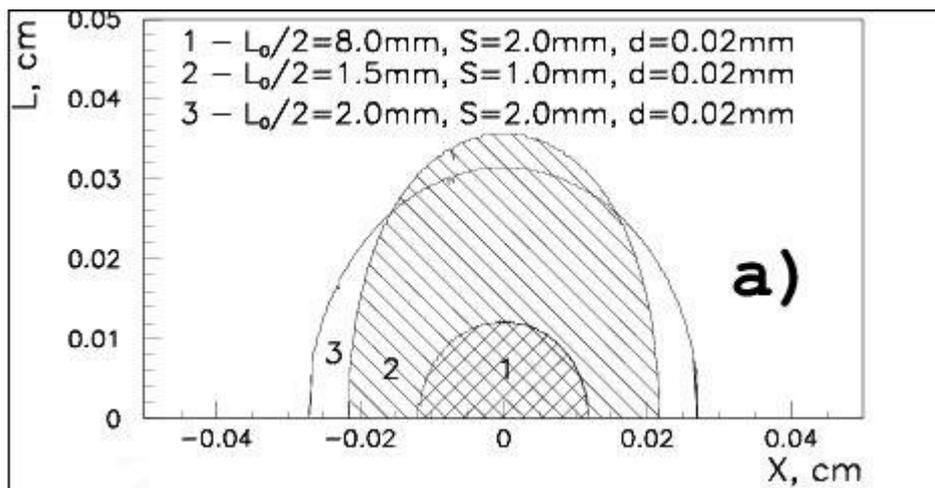


Рис. 1.1.2.1. Область лавинообразования вокруг анодной проволоки, ограниченная напряжённостью поля 20 кВ/см для камер с разными геометрическими параметрами. 1 – для стандартной камеры; 2,3 – для узкозасорных камер.

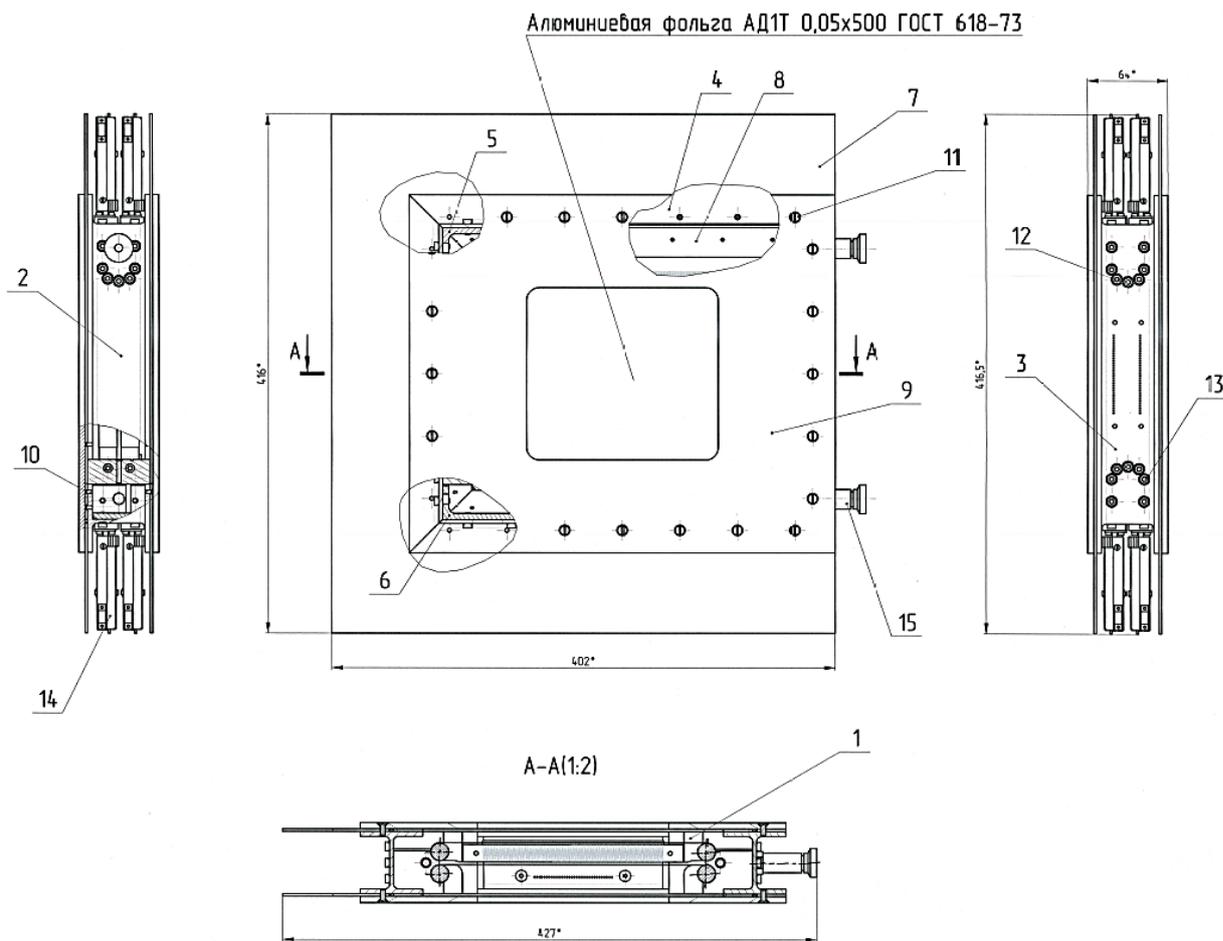


Рис. 1.1.2.2. Конструкция мониторингового счётчика. 1- анодно-катодная сборка; 2, 3 – профиль боковой; 4 – профиль верхний-нижний; 5 – крепёжный уголок; 6 – шнур уплотнительный; 7, 8 –

экран; 9 – экран прижимной с окном; 10, 11, 12, 13 – крепёжные винты; 14 – плата усилителя-формирователя; 15 – фитинг ввода и вывода рабочего газа.

Расстояние между анодом и катодом и величина напряжения определяют напряжённость электрического поля в камере. При уменьшении диаметра проволоки меньше 0,05 мм вблизи неё возрастает напряжённость электрического поля, которая достигает десятков киловольт на см, что и вызывает появление вторичной ионизации газа. Уменьшение расстояния между анодом и катодом (зазора) меньше 3 мм заметно расширяет область напряжённости поля более 20 кВ/см. Расчётная характеристика области лавинообразования при напряжении 2000 В для проволоки диаметром 0,02 мм, применяемой при уменьшении зазора показана на Рис. 1.1.2.1. Камеры с расстоянием анод-катод меньше 3 мм называются узкозазорными. Это связано с появлением ряда особенностей. Распределение электрического поля сдвигает область лавинообразования на значительное удаление от анодной проволоки, за счёт чего уменьшается количество осаждаемых на анодную проволоку радикалов, которые удаляются продувом рабочего газа, что позволяет исключить старение анода детектора.

Это важно при стремлении повысить быстродействие за счёт использования «быстрых» газов, например SF_6 , и добавления газа из многомерных молекул к основному газу, которые гасят кинетическую скорость электронов и ионов, например изобутан (C_4H_{10}).

На Рис. 1.1.2.2 показан чертёж мониторного счётчика размером 416х402х64мм с чувствительной областью 100х100 мм, разработанного на основе узкозазорной камеры. Корпус монитора выполнен из алюминиевого двутавра размером в сечении 50х50мм.

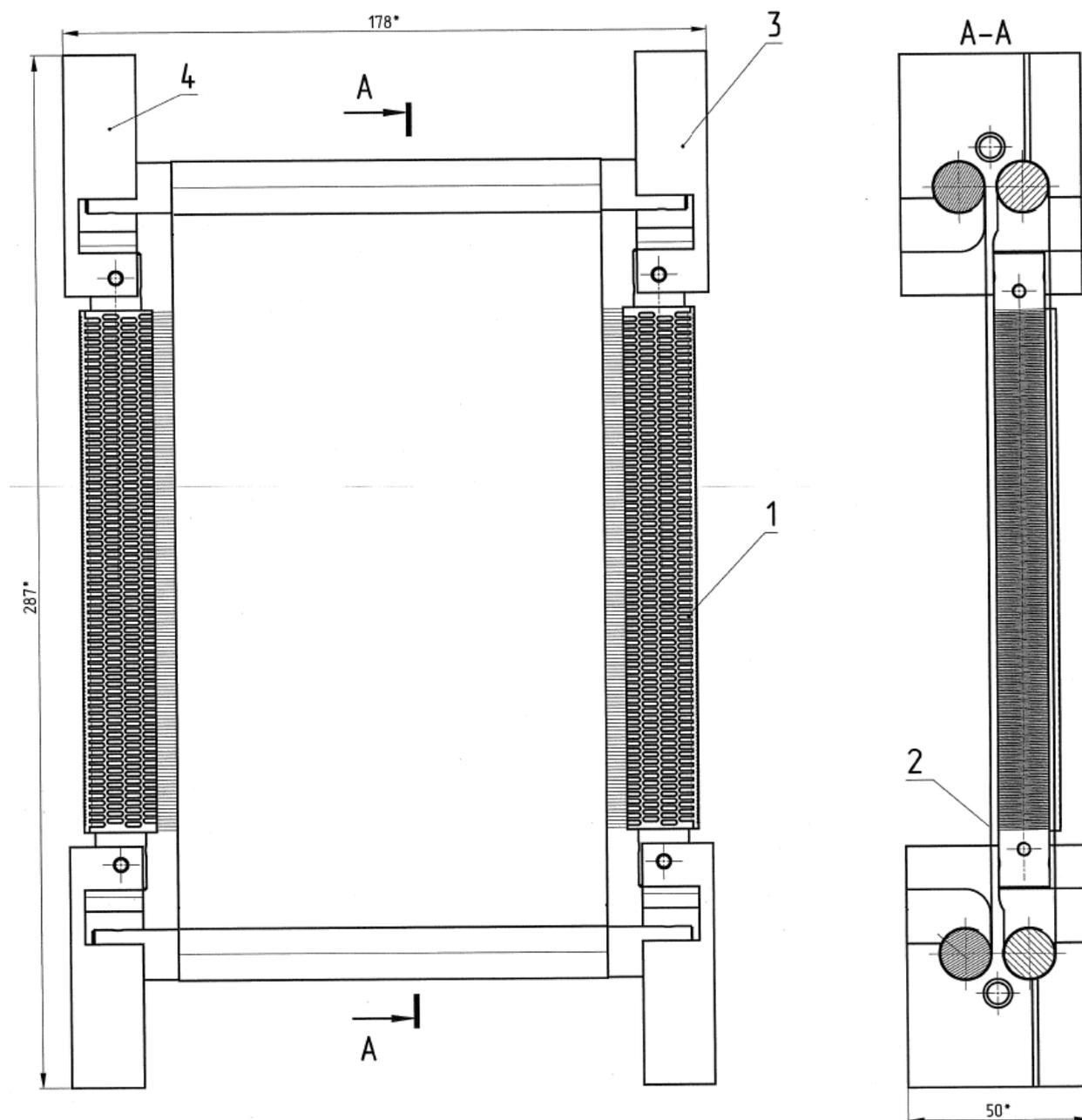


Рис. 1.1.2.3. Конструкция анодно-катодной сборки мониторингового счётчика. 1 – анодная платка; 2 – катод; 3, 4 – фиксаторы.

В корпусе попарно закреплены стальные стержни калиброванного диаметра 14мм, натягивающие анодные проволочки и катоды из фольги, противоположные стороны которых прикреплены к стержням. Для выполнения натяжения стержни располагаются в фиксаторах, которые позволяют осуществлять смещение стержней при натяжении, не изменяя фиксированное при их изготовлении расстояние анод-катод. На Рис. 1.1.2.3 приведена анод-катодная конструкция. Анод сформирован из анодных проволочек из вольфрамовой золочёной проволочки диаметром 25 мкм, размещённой с шагом в 1 мм в межвитковых углублениях, образованных намотанной на стержень медной проволоки диаметром 0,5 мм с покрытием из изоляционного лака. Медная проволока изолирована от стержня полиимидной плёнкой. Концы анодных проволочек с помощью пайки зафиксированы на предварительно приклеенных к стержню анодных платках. Две катодных фольги толщиной 50 мкм приклеены непосредственно на стержень так, что формируют газовую камеру, внутри которой на одинаковом расстоянии 1,5 мм от катодов размещены анодные

проволочки, образующие анодную плоскость. На Рис. 1.1.2.3 можно видеть анодные проволочки, прикрытые катодной фольгой. Фольга одного из катодов имеет тонкоплёночное покрытие из карбида бора $^{10}\text{B}_4\text{C}$. Входные окна монитора изготовлены из алюминиевой фольги толщиной 50мкм, приклеенной к прижимному экрану с входным окном 138x153мм. Два прижимных экрана закрывают внутренний объём мониторного счётчика с обеих сторон. Герметизация газового объёма мониторного счётчика осуществлена с помощью витонитового шнура диаметром 2,7мм, размещённого между прижимным экраном и корпусом. Сигналы с каждой анодной проволочки выводятся сквозь двутавровый корпус к платам усилителя-формирователя герметично заделанными проволочками. Для уменьшения электромагнитной наводки служат экраны из листа алюминия толщиной 2 мм.

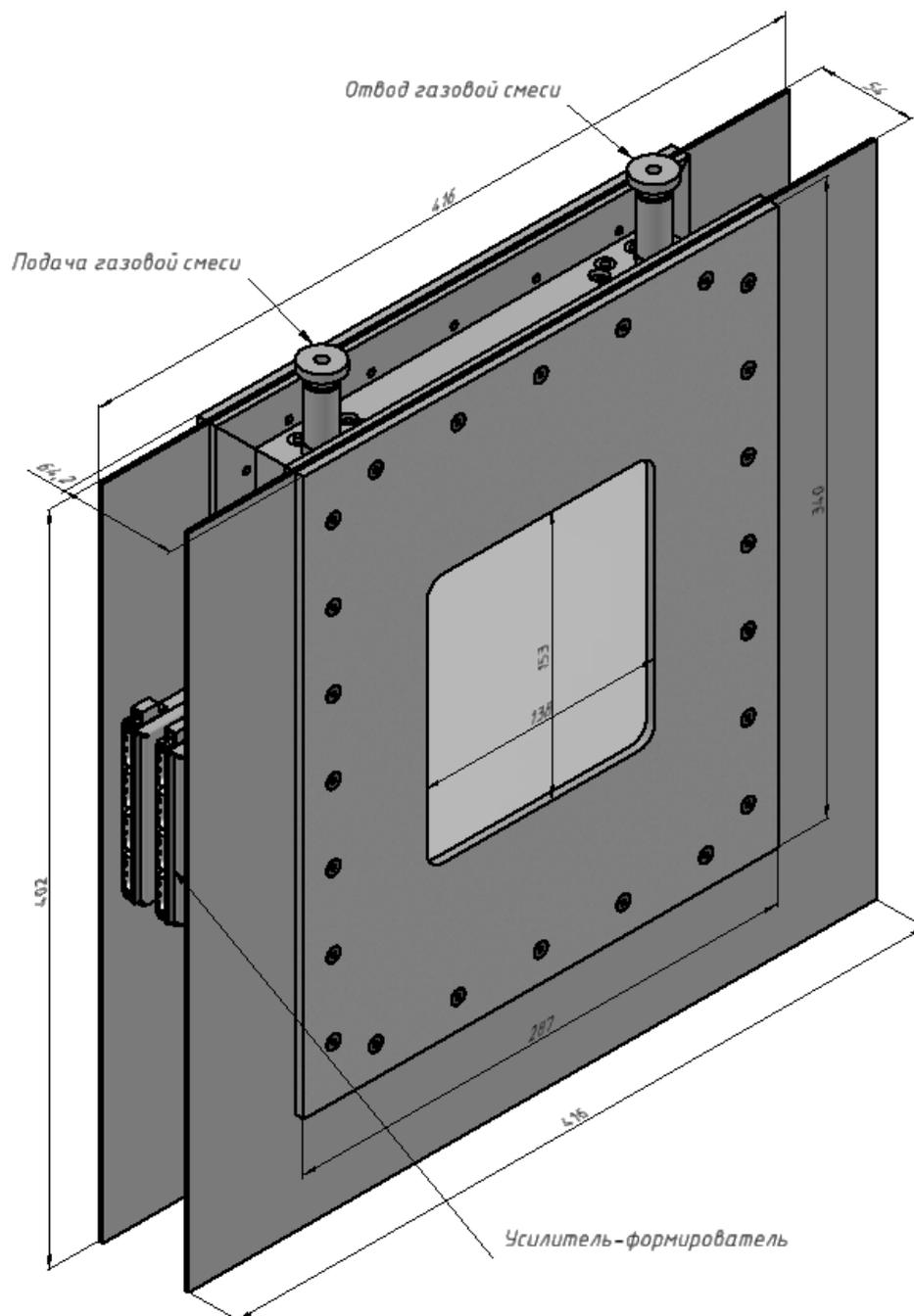


Рис. 1.1.2.4. Схематическое изображение мониторного счётчика тепловых нейтронов.

1.1.2.2 Система динамического смешения газов

На Рис. 1.1.2.5 показана система динамического смешения газов, используемая для создания рабочей смеси газов $80\%CF_4/20\%C_4H_{10}$ и работающая на продув для мониторингового счётчика. Система включает в себя два электронных регулятора расхода газа (РРГ): РРГ1 (CF_4) и РРГ2 (C_4H_{10}) и два газовых редуктора. При подаче одинакового давления 1 атм. Каждого газа на вход РРГ, на выходе получается смесь с общим протоком, соответствующим сумме протоков, установленным на каждом РРГ. Для продува мониторингового счётчика была устанавливалась скоростью подачи газовой смеси до $4\text{ см}^3/\text{мин}$.

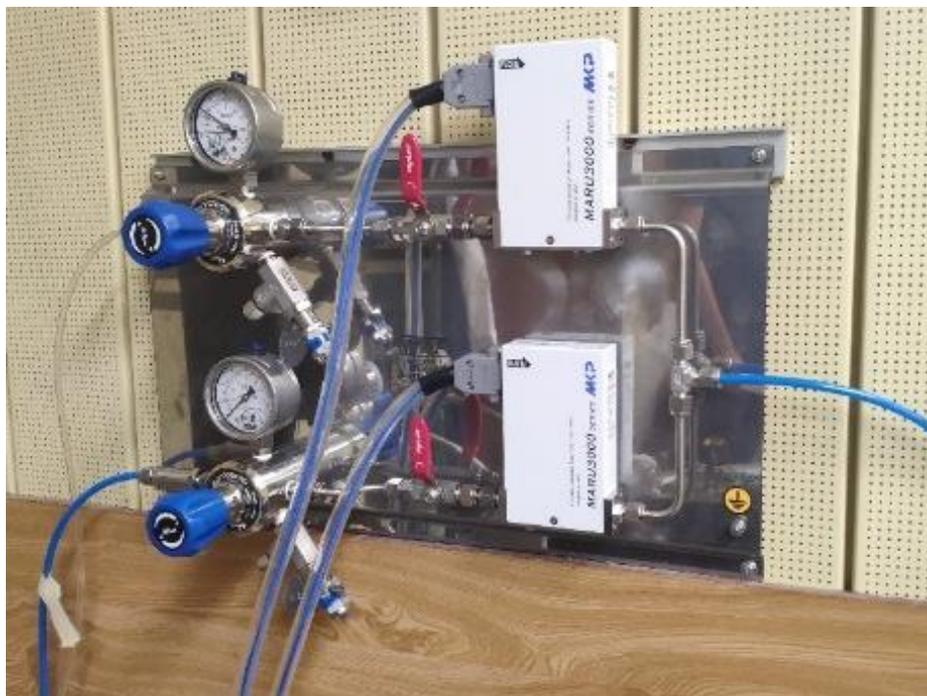


Рис. 1.1.2.5. Устройство динамического смешения газов.

1.1.2.3 Подбор состава газовой смеси CF_4/C_4H_{10} .

Для улучшения счётных характеристик мониторингового счётчика была выполнена оптимизация состава газа. В рабочей газовой смеси CF_4/C_4H_{10} ионизируемым газом является CF_4 , а «гасящей» добавкой, понижающей тепловую энергию электронов, препятствуя их захвату электроотрицательным газом CF_4 , является изобутан C_4H_{10} . Однако, его избыток уменьшает концентрацию CF_4 , то есть ионизацию. Подбор состава газовой смеси выполнялось измерением полуширины линии амплитудного спектра гамма-излучения ^{55}Fe с энергией 5,9 кэВ. На Рис. 1.1.2.6 приведены амплитудные спектры линии 5,9 кэВ гамма-излучения ^{55}Fe , полученные при разных соотношениях состава газа CF_4/H_{10} . Измерения выполнялись при размещении источника ^{55}Fe на поверхности входного окна мониторингового счётчика и напряжении питания 2400В, подобранном для чёткой регистрации формы линии гамма-излучения с энергией 5,9 кэВ. По графику зависимости отношения полуширины к пиковой амплитуде линии 5,9 кэВ ^{55}Fe , представленному на Рис. 1.1.2.7, видно, что наименьшее значение достигается на смеси газов $80\%CF_4/20\%C_4H_{10}$. Наименьшее значение этой величины показывает, что при этом соотношении газов «гасящая» добавка наилучшим образом уменьшает кинетическую энергию электронов облака лавины, за счёт возбуждения C_4H_{10} с высвечиванием фотонами.

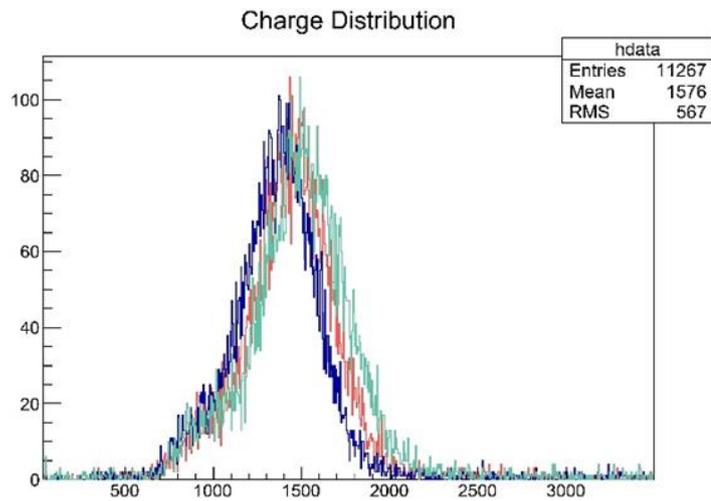


Рис. 1.1.2.6. Амплитудные спектры гамма-излучения ^{55}Fe , зарегистрированное в камере мониторингового счётчика при разных соотношениях состава газа $\text{CF}_4/\text{H}_{10}$. Красный – 85% CF_4 /15% H_{10} , зелёный – 80% CF_4 /20% H_{10} , синий – 75% CF_4 /25% H_{10}

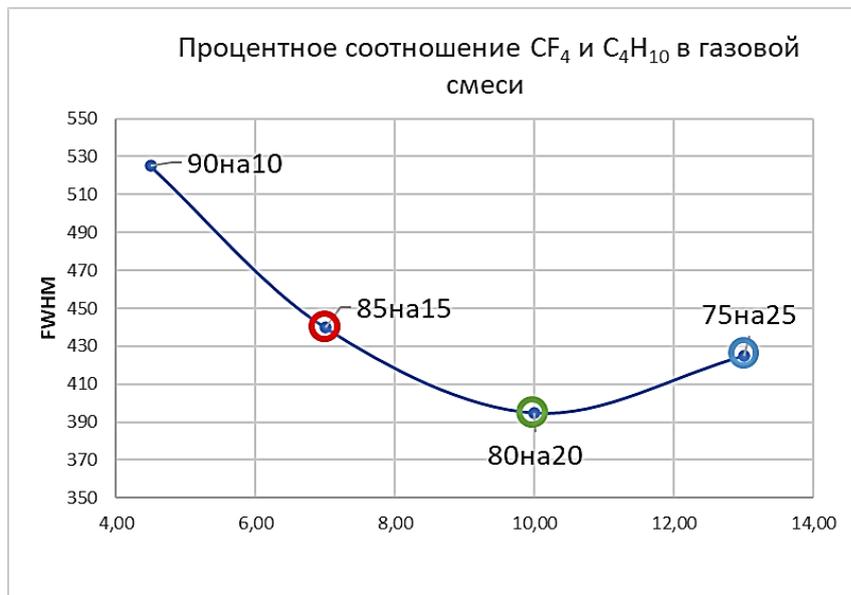


Рис. 1.1.2.7. График зависимости полуширины линии 5,9 кэВ ^{55}Fe от состава газа.

1.1.2.4 Временное разрешение мониторингового счётчика

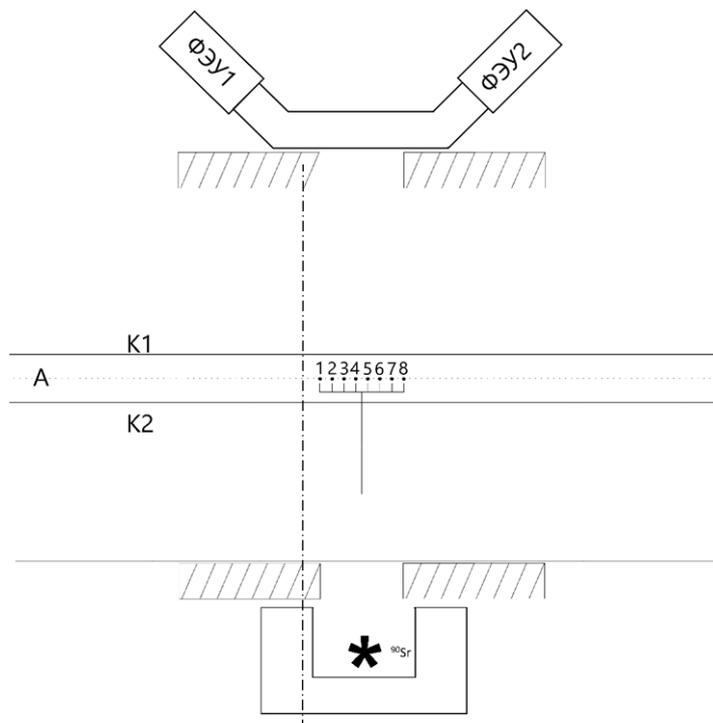


Рис. 1.1.2.8. Схема определения временного разрешения мониторингового счётчика

Принцип определения временного разрешения заключается в измерении флуктуации времени между прохождением заряженной частицы сквозь мониторинговый счётчик и регистрацией этого события, то есть разброса времени между ионизацией рабочего газа в газовой камере монитора и электрическим сигналом, появившимся как результат развития электронной лавины и возникновения на анодных проволочках заряда, регистрируемого электронной системой регистрации прохождения заряженной частицы.

Измерение временного разрешения мониторингового счётчика определялось по схеме, изображённой на Рис. 1.1.2.8. Собранный по этой схеме стенд приведён на Рис. 1.1.2.9 и предназначен для испытания различного типа газовых детекторов тепловых нейтронов с конвертером из карбида бора $^{10}\text{B}_4\text{C}$.



Рис. 1.1.2.9. Стенд для испытания детекторов нейтронов с конвертером из $^{10}\text{B}_4\text{C}$.

При проведении измерений источник электронов ^{90}Sr , заключённый в защитный корпус из бронзы, содержал коллиматор с диаметром отверстия 4 мм и устанавливался почти вплотную к регулируемой щели из свинцовых пластин толщиной 20 мм, имеющей ширину щели 1 мм. Щель с источником ^{90}Sr была почти вплотную приставлена к середине входного окна мониторингового счётчика. С противоположной стороны был размещён сцинтилляционный счётчик, состоящий из плоского сцинтиллятора и двух ФЭУ, прижатых к торцам световодов, которые собирают свет с противоположных сторон сцинтиллятора. Для отсека рассеянных электронов перед сцинтиллятором была установлена регулируемая щель из свинцовых пластин толщиной 20 мм, совмещённая с первой щелью. Для охвата всего пучка электронов сигнал снимался не менее, чем с восьми объединённых вместе анодных проволочек. Сцинтилляционный счётчик регистрирует только те электроны от источника ^{90}Sr , которые смогли пройти сквозь мониторинговый счётчик, вызвав ионизацию в газовой камере монитора, и проникнуть в сцинтиллятор, вызывая возбуждение с последующим высвечиванием в сцинтилляторе. Блок-схема регистрирующей электроники для определения временного разрешения приведена на Рис. 1.1.2.10. Регистрирующая электроника

выполнена с применением модулей CAEN (V925, VX1290N, V792, N840, N1145, N93B) и содержит два независимых канала усиления и формирования импульсов длительностью 10 нс. Схема совпадения ФЭУ исключает ложные фоновые срабатывания. Регулируемая линия задержки обеспечивает поступление на вход измерителя временных интервалов CAEN первым сигнала от ФЭУ. Поскольку быстродействие на лёгких частицах для сцинтиллятора ZnS составляет около 10^{-7} сек, то при измерениях предполагалось, что быстродействие сцинтилляционного счётчика намного превышает быстродействие газоразрядного мониторингового счётчика.

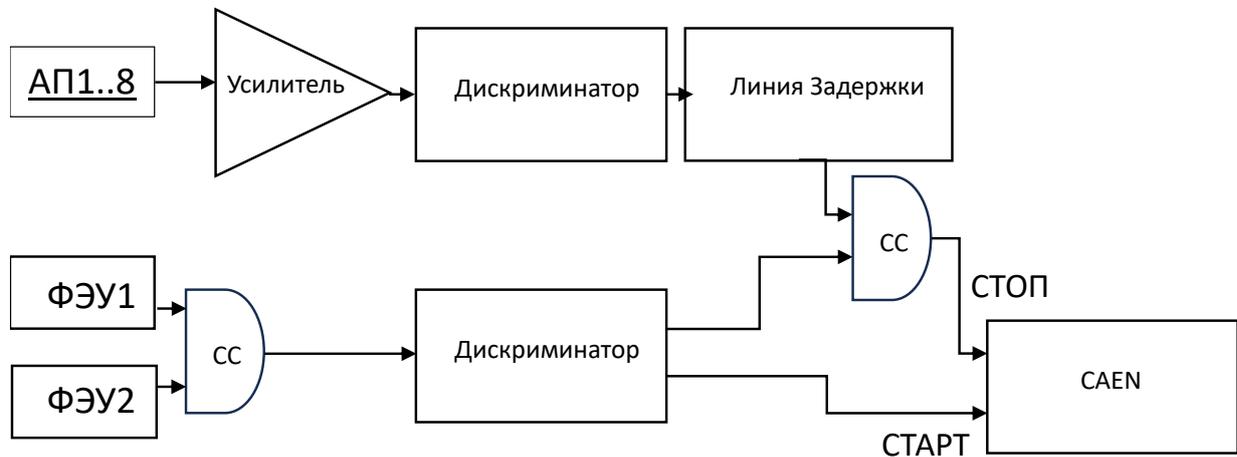


Рис. 1.1.2.10. Блок-схема для измерения временного разрешения мониторингового счётчика.

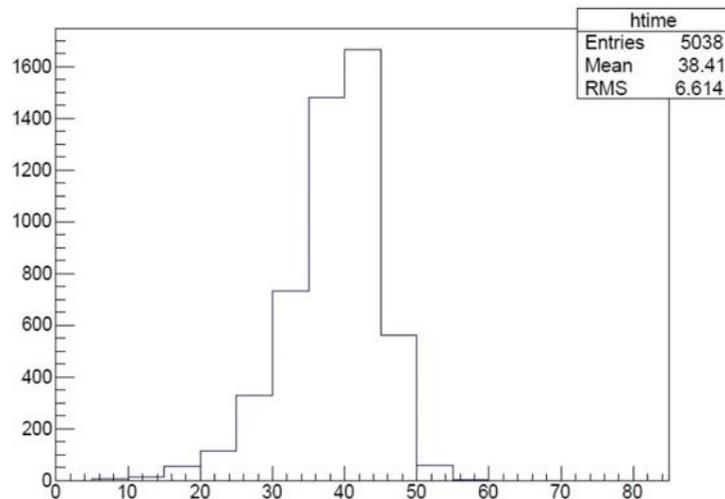


Рис. 1.1.2.11. Гистограмма временной нестабильности формирования сигнала от монитора

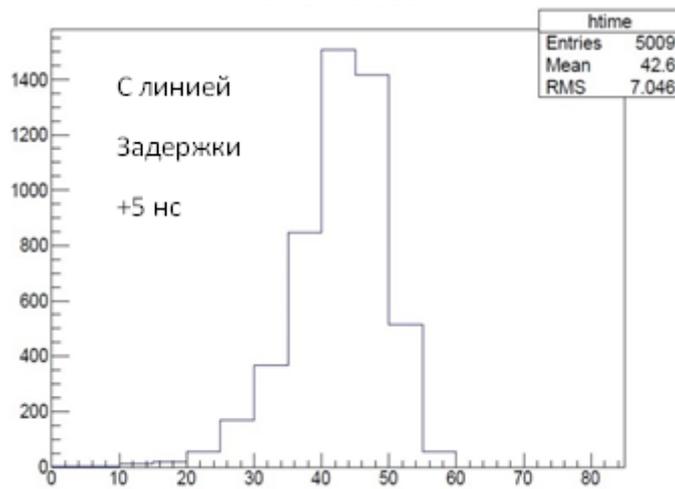
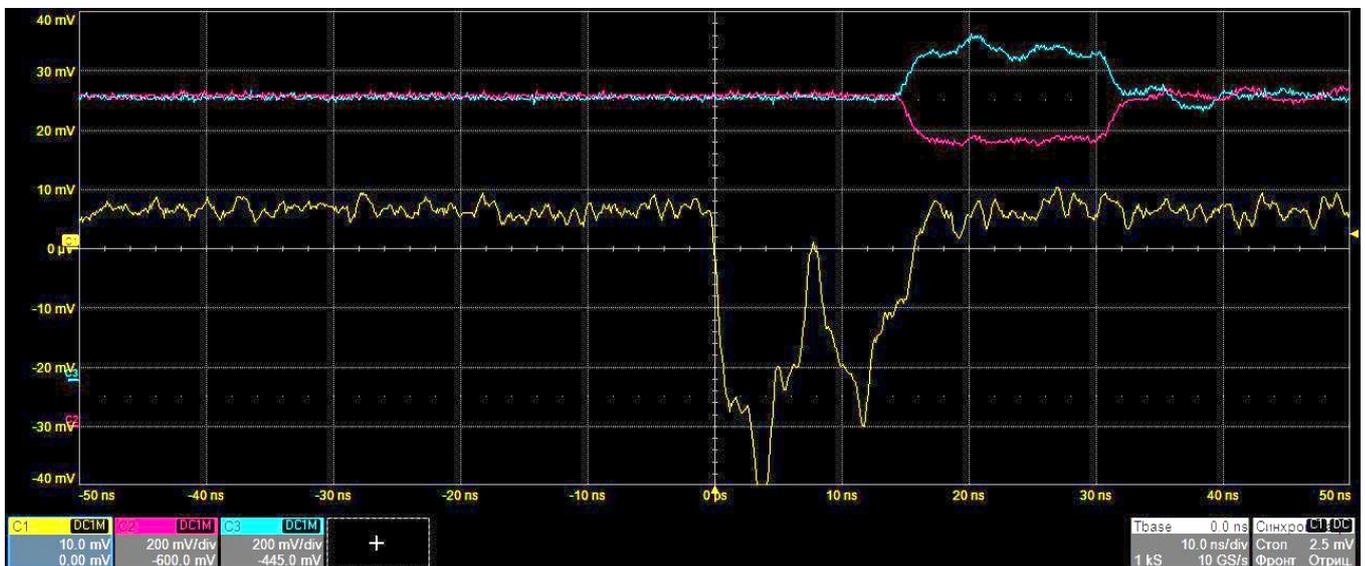


Рис. 1.1.2.12. Гистограмма временной нестабильности с физической линией задержки 5нс.

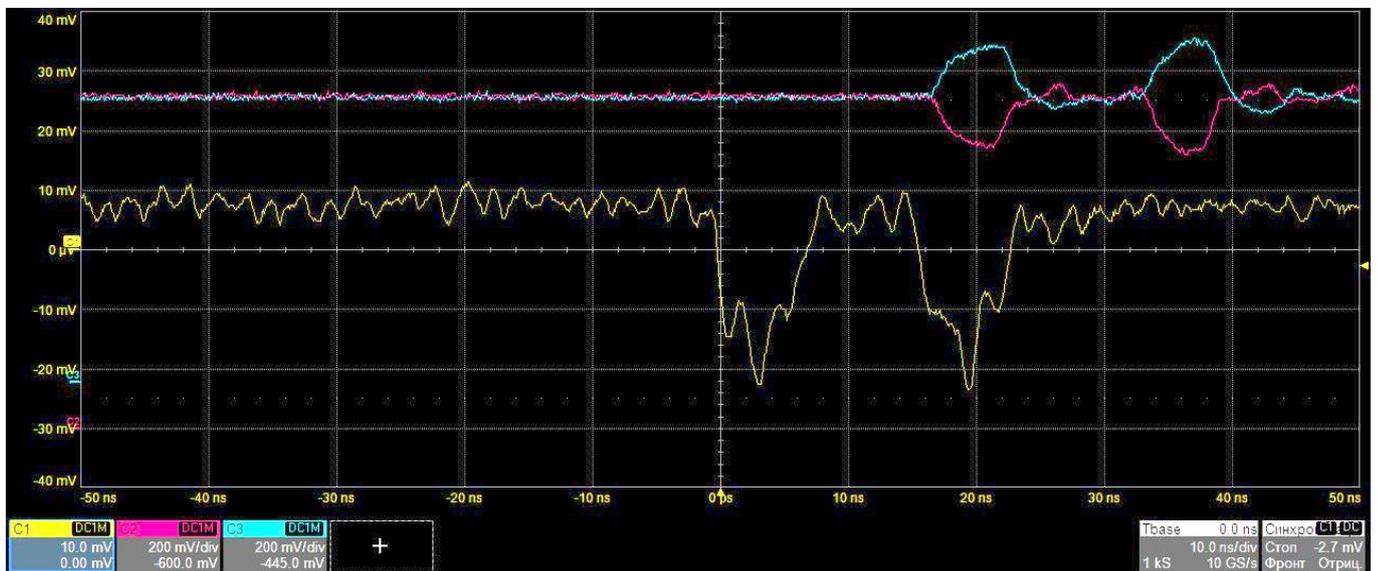
На Рис. 1.1.2.11 представлен результат измерения флуктуации времени регистрации сигнала от мониторингового счётчика, полуширина которого составляет около 10 каналов. Для градуировки длительности временного канала была добавлена физическая задержка за счёт удлинения кабеля. Использовался кабель с измеренной задержкой 5нс. На Рис. 1.1.2.12 приведена гистограмма, полученная с применением линии задержки в виде кабеля. Гистограмма сместилась на 5 каналов. Соответственно, временное разрешение мониторингового счётчика составило 10 нс.

1.1.2.5 Измерение «мёртвого времени» мониторингового счётчика

Для измерения «мёртвого времени» мониторингового счётчика использовался стенд для испытания детекторов нейтронов с конвертером из $^{10}\text{B}_4\text{C}$ представленный на Рис. 1.1.2.9 с электроникой, блок-схема которой представлена на Рис. 1.1.2.10.



a)



б)

Рис. 1.1.2.13. Экранная запись с запоминающего осциллографа АКПП-4154/2. Жёлтым показан сигнал с анода на входе усилителя, голубой и красный – сигнал с выхода усилителя при длительности между событиями регистрации электрона от ^{90}Sr : а) 7–8 нс; б) 14–15 нс.

Мониторный счётчик облучался источником ^{90}Sr , установленным перед счётчиком при раскрытии щели 10 мм. Сигналы снимались с включённых параллельно анодных проволочек. На Рис. 1.1.2.13 представлена экранная запись с запоминающего осциллографа АКПП-4154/2 сигналов на входе (жёлтым) и выходе (голубой и красный) усилителя. Из Рис. 1.1.2.13 видно, что при длительности более 10 нс усилитель разделяет сигналы. Счётный импульс длительностью 7 нс формируется компаратором по переднему фронту сигнала с усилителя. Таким образом, «мёртвое время» мониторингового счётчика составляет 10 нс, что соответствует нагрузкам до $10^8 \text{ н} \cdot \text{с}^{-1} \cdot \text{см}^2$.

1.1.2.6 Измерение счётной характеристики и выбор рабочего напряжения мониторингового счётчика

Для выбора оптимального напряжения питания мониторингового счётчика снималась зависимость числа отсчётов за 300 секунд при изменении напряжения питания для мониторингового счётчика, установленного на расстоянии 3 см от полиэтиленового кубического замедлителя, внутри которого размещался лабораторный источник нейтронов ^{252}Cf (выход 10^7 н/с на 07.11.24).



Рис. 1.1.2.14. Размещение мониторингового счётчика для испытаний на источнике ^{252}Cf .

При испытаниях мониторингового счётчика на источнике ^{252}Cf , мониторинговый счётчик располагался в непосредственной близости от замедлителя. В который помещался источник ^{252}Cf , как показано на Рис. 1.1.2.14.

Результат полученной счётной характеристики приведён на Рис. 1.1.2.15. Резкий рост отсчётов при повышении напряжения питания более 2050 В связан с началом регистрации монитором γ -фона. Незначительный рост числа отсчётов в области 1800–2050 В связан с регистрацией только нейтронов. Оптимальное напряжение питания мониторингового счётчика соответствует 1900–1950 В. Счётная характеристика с наличием резкого роста отсчётов при напряжении более 2050 В показывает, что в выбранной области 1900–1950 В полностью отсутствует регистрация γ -фона, который появляется только при повышении напряжения питания более 2050 В. Это соответствует предельно низкой чувствительности к γ -фону.

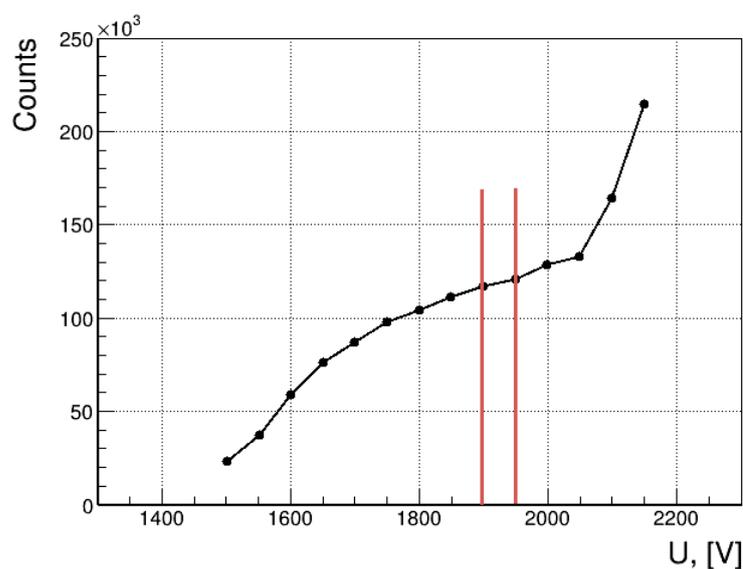


Рис. 1.1.2.15. Зависимость числа отсчётов за 300 сек от напряжения питания

1.1.2.7 Определение стабильности регистрации мониторингового счётчика

Для проверки стабильности регистрации была проведена серия из 5 измерений при фиксированном положении детектора относительно источника нейтронов ^{252}Cf . Использовалось рабочее напряжение 1925 В. В качестве рабочего газа использовалась смесь 80% CF_4 + 20% C_4H_{10} в проточном режиме со скоростью протока газовой смеси 2 см³/мин. На Рис. 1.1.2.16 представлены результаты измерения стабильности работы мониторингового счётчика. Время набора статистики каждого измерения составляло по 300 сек. Коэффициент стабильности измерений, определяемый как отклонение результатов набора числа зарегистрированных нейтронов составляет ~ 0.34 %.

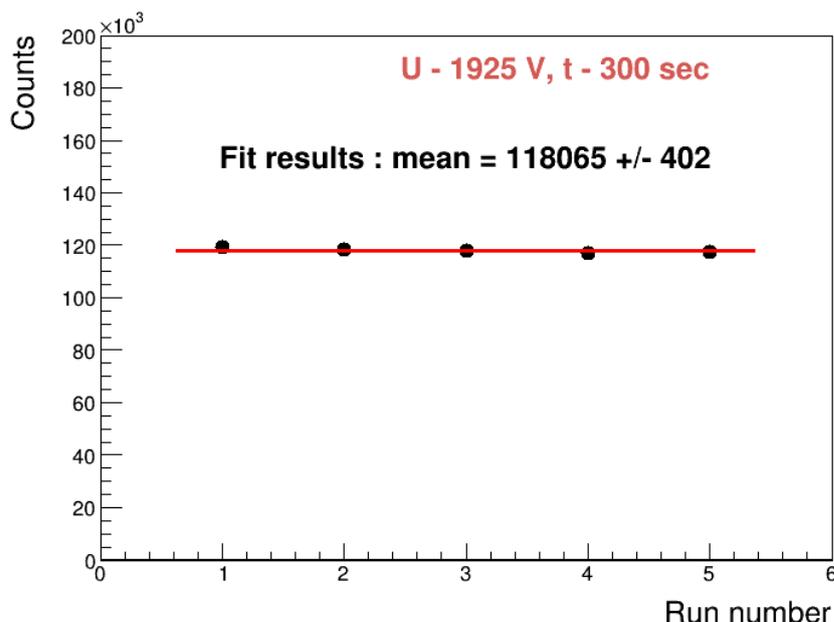


Рис. 1.1.2.16. Количество зарегистрированных нейтронов в зависимости от номера измерения для мониторингового счётчика.

1.1.2.8 Определение динамического диапазона работы мониторингового счётчика

Динамический диапазон работы мониторингового счётчика определяется по верхнему пределу потока нейтронов, регистрируемых счётчиком без пропуска счёта, который связан с «мёртвым временем» монитора. Начало пропуска счёта нейтронов означает достижение мониторингового счётчика насыщения регистрации, при котором наблюдаются частые события прихода более двух нейтронов в промежутке «мёртвого времени», то есть для исследуемого мониторингового счётчика в интервале 10нс.



Рис. 1.1.2.17. Размещение листов стекла на пути пучка нейтронов перед мониторным счётчиком



Рис. 1.1.2.18. Поворот листов стекла на пути пучка нейтронов перед мониторным счётчиком.

Исследования мониторного счётчика по определению проявления насыщения выполнялись на нейтронном пучке 9 канала реактора ИБР-2. Для определения потока, при котором наступает насыщение мониторного счётчика, перед мониторным счётчиком на позиционном столе было установлено 4 листа стекла общей толщиной 22 мм, как показано на Рис. 1.1.2.17.

Для увеличения поглощения нейтронов стеклом, столик поворачивался, как показано на Рис. 1.1.2.18. Первоначальный поток нейтронов измерялся без стекла. Затем устанавливалось стекло: сначала под углом $\alpha=90^\circ$ к пучку нейтронов, затем поворачивалось с равномерным увеличением угла α равномерным шагом в 10° до 170° .

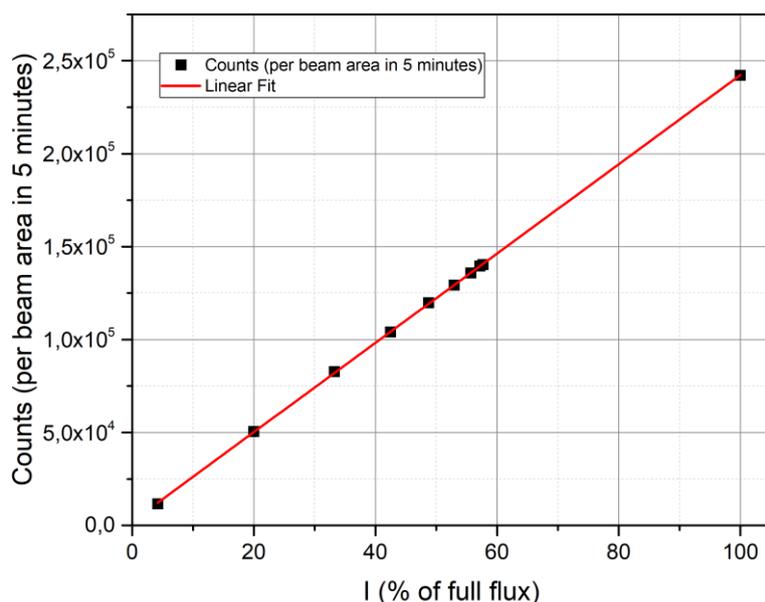


Рис. 1.1.2.19. Зависимость счёта от величины k ослабления потока нейтронов в процентах, связанного с приведённой толщиной стекла $d=d_0/\sin\alpha$ при повороте на угол α .

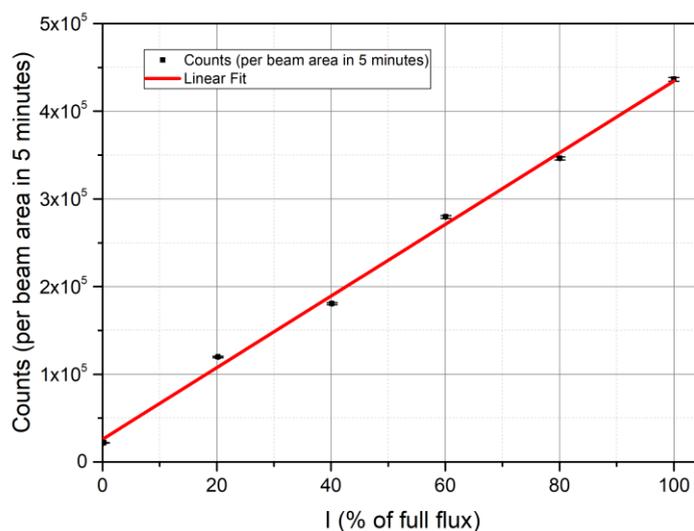


Рис. 1.1.2.20. Зависимость отсчётов от величины падающего потока.

Приведённая к пробегу нейтронов в слое стекла толщина d вычислялась по формуле: $d=d_0/\sin\alpha$. Величина ослабления потока нейтронов в слое стекла зависит от толщины и определяется в процентах по формуле: $k=100*\exp(-m*d)$, где $k=100\%$ при отсутствии стекла. Для выполняемого эксперимента коэффициент $m=0,025$, величина которого зависит от химического состава стекла и нейтронного спектра. График зависимости счёта от ослабления потока представлена на Рис. 1.1.2.19.

Интенсивность нейтронного пучка 9 канала, измеренная методом активационного анализа золотой фольги, составила $3,89*10^6$ н·с⁻¹·см⁻², что подтверждает, что нейтронный пучок 9 канала ИБР-2 можно считать высокопоточным.

График показывает высокую линейность, что означает отсутствие насыщения при высоком потоке нейтронного излучения.

Исследование насыщения мониторного счётчика также было выполнено другим способом. Перед мониторным счётчиком была установлена щелевая диафрагма, максимальное раскрытие которой соответствует ширине пучка, составляющей 10 мм или 100%. Ширина щели, изменялась с шагом 2 мм. Таким образом, ширина щели 8 мм соответствовала 80% от полного потока, 6 мм – 60 % от полного потока и так далее. На Рис. 1.1.2.20 представлена зависимость отсчётов мониторного счётчика от величины потока, проходящего сквозь него. График показывает линейную зависимость во всём диапазоне изменения падающего потока нейтронов. Незначительный разброс связан с неоднородностью пучка нейтронов. Эти исследования подтверждают отсутствие насыщения при высоком потоке нейтронного излучения, составляющем $3,89 \cdot 10^6 \text{ н} \cdot \text{с}^{-1} \cdot \text{см}^{-2}$.

1.1.2.9 Выводы

В НЭОКС ИБР-2 ЛНФ в рамках исследовательской программы (проекта) по теме: “Разработка и создание современных экспериментальных станций источников импульсного или постоянного типа” в соответствии с пунктом 1.1.2 Плана-графика «Разработка, изготовление и испытание высокопоточного мониторного счётчика тепловых нейтронов с конвертером ^{10}B на алюминиевой фольге и окнами из алюминиевой фольги» выполнены следующие работы:

1. Разработана конструкторская документация высокопоточного мониторного счётчика тепловых нейтронов с конвертером ^{10}B на алюминиевой фольге и окнами из алюминиевой фольги в составе: чертёж общего вида; габаритный чертёж; сборочный чертёж; пояснительная записка.

2. Изготовлен мониторный счётчик тепловых нейтронов с конвертером из карбида бора $^{10}\text{B}_4\text{C}$.

3. Выполнены испытания мониторного счётчика тепловых нейтронов с конвертером из карбида бора $^{10}\text{B}_4\text{C}$ толщиной 100нм.

4. Разработан и изготовлен стенд для проведения испытания газовых детекторов тепловых нейтронов с конвертером из карбида бора $^{10}\text{B}_4\text{C}$ с применением источника электронов ^{90}Sr .

По результатам испытаний с применением искусственных источников ^{55}Fe , ^{90}Sr и ^{252}Cf , а также в прямом пучке реактора ИБР-2 можно сделать следующие выводы:

– отработана методика подбора газовой смеси $\text{CF}_4/\text{C}_4\text{H}_{10}$ с использованием линии γ -излучения 5,9 кэВ ^{55}Fe , на основании которой определён оптимальный состав смеси: 80% CF_4 /20% C_4H_{10} ;

– временное разрешение мониторного счётчика и «мёртвое время» составляет 10 нс, что означает ограничение по предельной нагрузке мониторного счётчика до 10^8 событий регистрации нейтронов в 1 секунду, и, соответственно, позволяет применять мониторные счётчики для измерений высокопоточных нейтронных пучков;

– динамический диапазон работы мониторного счётчика линейный. Верхний предел превышает $3,89 \cdot 10^6 \text{ н} \cdot \text{с}^{-1} \cdot \text{см}^{-2}$ и может составлять не менее $10^8 \text{ н} \cdot \text{с}^{-1} \cdot \text{см}^{-2}$, что превышает предельные потоки реактора ИБР-2, имеющего нейтронные потоки в измерительных каналах до $5 \cdot 10^7 \text{ н} \cdot \text{с}^{-1} \cdot \text{см}^{-2}$.

– мониторный счётчик имеет высокое пропускание в широком диапазоне длин волн нейтронов, обусловленное применением при его изготовлении катодов и входного/выходного окна, из алюминиевой фольги малой толщины (50 мкм) и тонких слоёв из карбида бора $^{10}\text{B}_4\text{C}$, составляющих до 100 нм, что обеспечивает минимальное число поглощаемых из пучка нейтронов изотопом бора ^{10}B (менее 0,1%), которых достаточно для получения скорости счёта, необходимой для измерения высокопоточных нейтронных пучков;

– мониторный счётчик имеет низкую чувствительность к γ -фону, которая обусловлена малой толщиной катода из фольги и тонким слоем конвертера, дающим соответственно малое количество фотоэлектронов отдачи, и узким зазором между анодом из проволочек и катодом, значительно

уменьшающим ионизацию газа γ -фоном, вследствие чего частицы распада ^{10}B дают много большую ионизацию по сравнению с ионизацией газа γ -фоном. Это обеспечивает возможность устанавливать рабочее напряжение мониторингового счётчика в пропорциональном режиме, при котором основательно отсекается γ -фон.

Полученные результаты полностью соответствуют п. 1.1.2 Плана-Графика работ в рамках исполнения обязательств по Соглашению № 075-10-2025-153 от 05 июня 2025 г.

ПРИЛОЖЕНИЯ

- Конструкторская документация. ФАЙЛ: [ПГ 1.1.2 Конструкторская документация.pdf](#)
- Акт изготовления. ФАЙЛ: [ПГ 1.1.2 Акт изготовления.pdf](#)
- Методика испытаний. ФАЙЛ: [ПГ 1.1.2 Методика испытаний.pdf](#)
- Акт испытаний. ФАЙЛ: [ПГ 1.1.2 Акт испытаний.pdf](#)
- Протокол испытаний. ФАЙЛ: [ПГ 1.1.2 Протокол испытаний.pdf](#)

1.1.3 Разработка, изготовление и испытание высокопоточного позиционно-чувствительного монитора тепловых нейтронов с конвертером ^{10}B на алюминиевой фольге и окнами из алюминиевой фольги.

В Научно-экспериментальном отделе комплекса спектрометров (НЭОКС) ИБР-2 ЛНФ изготовлен и испытан высокопоточный позиционно-чувствительный монитор (профилومتر) тепловых нейтронов с конвертером ^{10}B на алюминиевой фольге и окнами из алюминиевой фольги.

Источник нейтронов обладает нестабильностью интенсивности и пространственного распределения интенсивности потока нейтронов. Для получения точных измерений на исследовательских станциях нейтронного рассеяния необходимо вводить поправки на временную и пространственную флуктуацию интенсивности источника на протяжении всего эксперимента. Для этой цели применяются пучковые позиционно-чувствительные мониторы (профилометры). Профилометры используются для пространственно-временной нормировки нейтронных измерений, для настройки системы нейтронных приборов и для других нейтронных приборов.

1.1.3.1 Конструкция позиционно-чувствительного монитора

Монитор-профилومتر предназначен для определения потока тепловых нейтронов с определением длины волны по времени пролёта через рабочую область монитора.

Регистрация нейтронов основана на реакции взаимодействия нейтрона с изотопом бора ^{10}B :
$$n + ^{10}\text{B} \rightarrow ^{11}\text{B}^* \rightarrow ^4\text{He} (1470 \text{ кэВ}) + ^7\text{Li} (830 \text{ кэВ}) + \gamma (480 \text{ кэВ}) \text{ с вероятностью } 94\%;$$
$$^{11}\text{B}^* \rightarrow ^4\text{He} (1770 \text{ кэВ}) + ^7\text{Li} (1010 \text{ кэВ}) \text{ с вероятностью } 6\%. \quad (1.1.3.1)$$

В результате захвата нейтрона ядром ^{10}B образуется ядро $^{11}\text{B}^*$ в возбуждённом состоянии. Результатом возбуждения является распад ядра на заряженные частицы ^7Li и ^4He , разлетающиеся с высокой энергией (1470 и 830 кэВ или 1770 и 1010 кэВ) равновероятно в противоположные стороны в угол 4π . Частицы, попадающие в газовый промежуток камеры, ионизуют рабочий газ. В связи с увеличением напряжённости поля вблизи анодной проволоки более 20кВ/см, происходит лавинообразная ионизация рабочего газа теперь уже ускоренными электронами: создаётся газовое усиление. Регистрация усиленного газовым усилением электрического сигнала, снимаемого с анодных проволочек, сигнализирует факт прохождения нейтрона сквозь камеру профилометра.

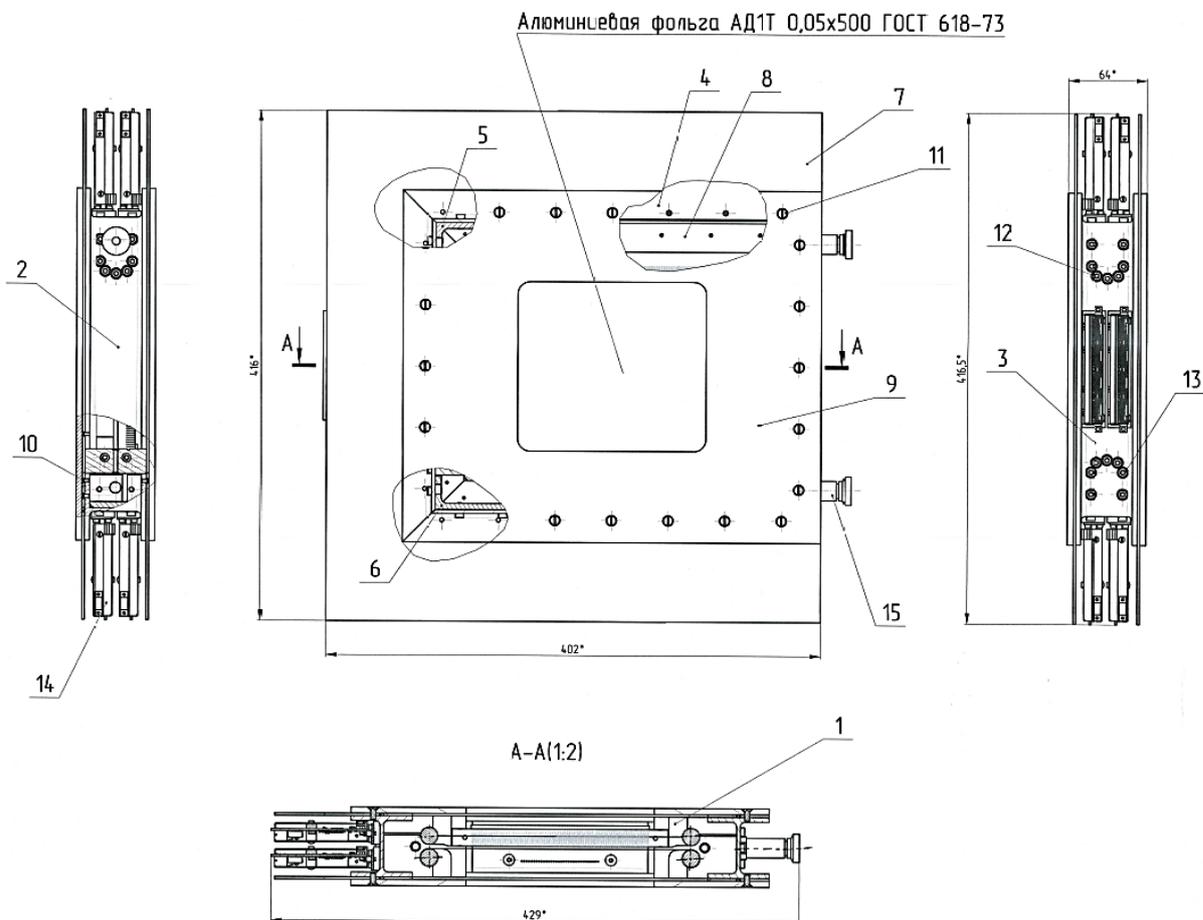


Рис. 1.1.3.1. Конструкция позиционно-чувствительного монитора. 1- анодно-катодная сборка; 2, 3 – профиль боковой; 4 – профиль верхний-нижний; 5 – крепёжный уголок; 6 – шнур уплотнительный; 7, 8 – экран; 9 – экран прижимной с окном; 10, 11, 12, 13 – крепёжные винты; 14 – плата 32 канального усилителя-формирователя; 15 – газовый фитинг.

На Рис. 1.1.3.1 показан чертёж позиционно-чувствительного монитора размером 416x402x64мм с чувствительной областью 100x100 мм, разработанного на основе узкозазорной камеры. Корпус монитора выполнен из алюминиевого двутавра размером в сечении 50x50мм. В корпусе попарно закреплены стальные стержни калиброванного диаметра 14мм, натягивающие анодные проволочки и катоды из фольги, противоположные стороны которых прикреплены к стержням. Для выполнения натяжения стержни располагаются в фиксаторах, которые позволяют осуществлять смещение стержней при натяжении, не изменяя фиксированное при их изготовлении расстояние анод-катод. На Рис. 1.1.3.2 приведена конструкция анода из проволочек – X-координаты системы позиционирования. Анод сформирован из анодных проволочек из вольфрамовой золочёной проволочки диаметром 25 мкм, размещённой с шагом в 1,5 мм в межвитковых углублениях, образованных намотанной на стержень медной проволоки диаметром 0,5 мм с покрытием из изоляционного лака. Медная проволока изолирована от стержня полиимидной плёнкой. Концы анодных проволочек с помощью пайки зафиксированы на предварительно приклеенных к стержню анодных платках. Две катодных фольги толщиной 50 мкм приклеены непосредственно на стержень так, что формируют газовую камеру, внутри которой на одинаковом расстоянии 1,5 мм от катодов размещены анодные проволочки, образующие анодную плоскость.

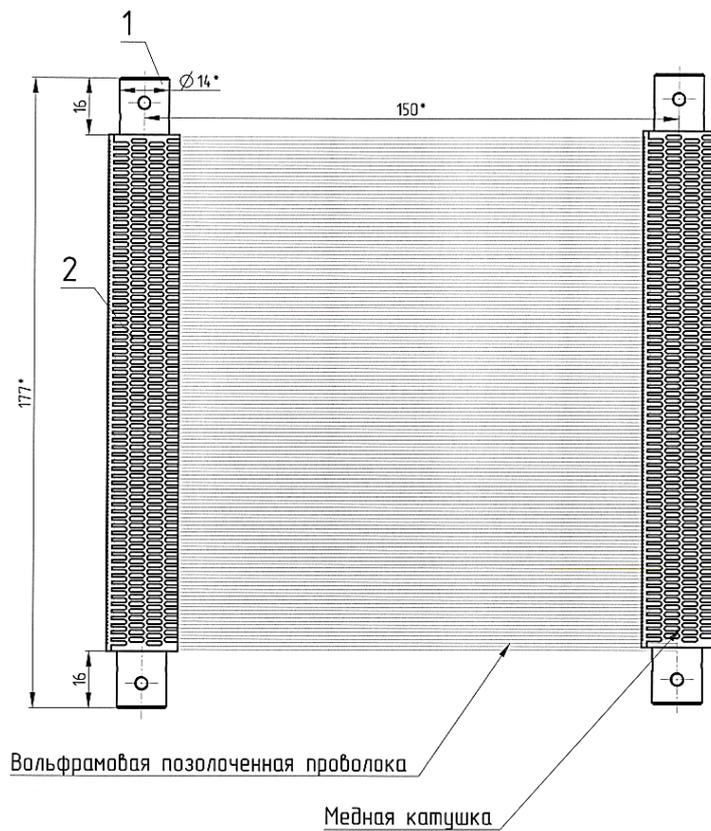


Рис. 1.1.3.2. Конструкция анода из проволочек – X-координаты позиционирования.

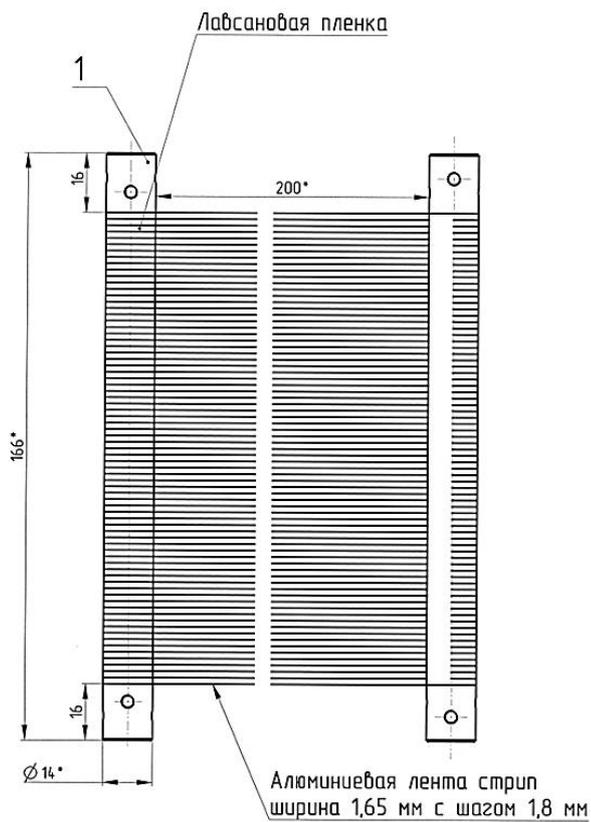


Рис. 1.1.3.3. Конструкция стрипов – Y-координаты системы позиционирования.

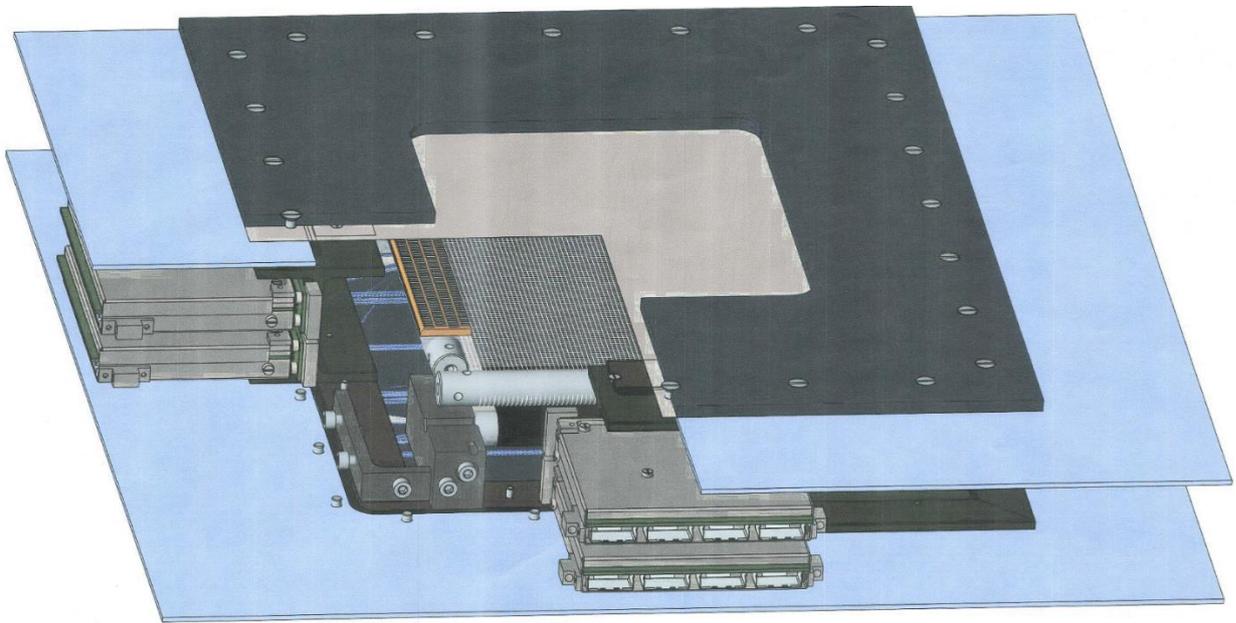


Рис. 1.1.3.4. Схематическое изображение позиционно-чувствительного монитора.

Фольга одного катода имеет тонкоплёночное покрытие из карбида бора $^{10}\text{B}_4\text{C}$. Второй катод выполнен из фольги, разрезанной на полоски-стрипы. На Рис. 1.1.3.3 представлена конструкция стрипов – Y-координаты системы позиционирования. Входные окна монитора изготовлены из алюминиевой фольги толщиной 50мкм, приклеенной к прижимному экрану с входным окном 138x153мм. Два прижимных экрана закрывают внутренний объём монитормого счётчика с обеих сторон. Герметизация газового объёма монитормого счётчика осуществлена с помощью витонитового шнура диаметром 2,7мм, размещённого между прижимным экраном и корпусом. Сигналы с каждой анодной проволоочки выводятся сквозь двутавровый корпус к платам усилителя-формирователя герметично заделанными проволоочками. Для уменьшения электромагнитной наводки служат экраны из листа алюминия толщиной 2 мм.

1.1.3.2 Подготовка позиционно-чувствительного монитора к работе.

Позиционно-чувствительный монитор представляет собой конструкцию, идентичную конструкции монитормого счётчика, разработанного и изготовленного в соответствии с пунктом 1.1.2 Плана-графика: «Разработка, изготовление и испытание высоко поточного монитормого счётчика тепловых нейтронов с конвертером ^{10}B на алюминиевой фольге и окнами из алюминиевой фольги». Позиционно-чувствительный монитор отличается лишь тем, что катод без покрытия карбидом бора $^{10}\text{B}_4\text{C}$ выполнен в виде полосок-стрипов, а также, что сигналы снимаются с каждой анодной проволоочки и с каждого стрипа, образуя XY-пространственное распределение регистрируемых сигналов, то есть профиль пучка нейтронов, проходящих сквозь монитор. В связи с этим для позиционно-чувствительного монитора и для монитормого счётчика характеристики по подбору состава газовой смеси $\text{CF}_4/\text{C}_4\text{H}_{10}$, по счётной характеристике и рабочему напряжению, по стабильности регистрации, по временному разрешению, по «мёртвому времени» и по динамическому диапазону одинаковые. Все эти характеристики описаны в п.1.1.2 Отчёта.

1.1.3.3 Определение позиционного разрешения по ширине щели

Позиционное разрешение характеризуется отклонением действительного размера ширины щели от ширины щели, измеренной по изображению, полученному от позиционно-чувствительного монитора.

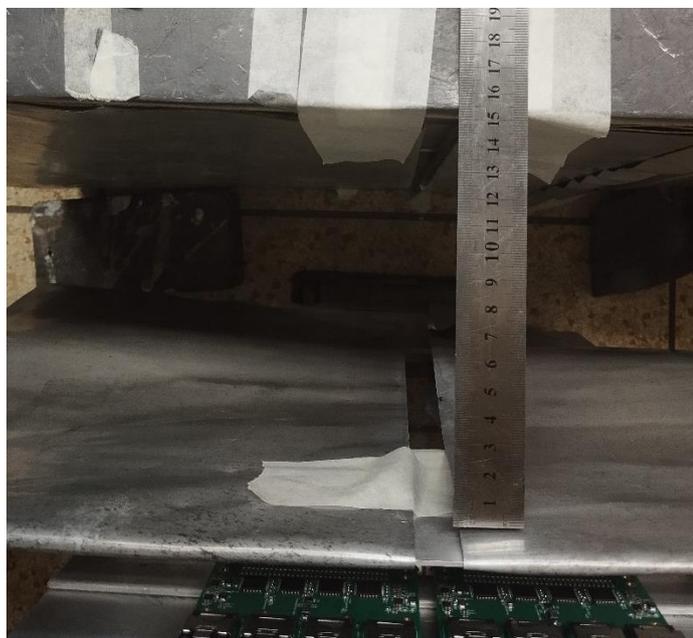


Рис. 1.1.3.5 Размещение монитора со щелью относительно замедлителя со щелью.

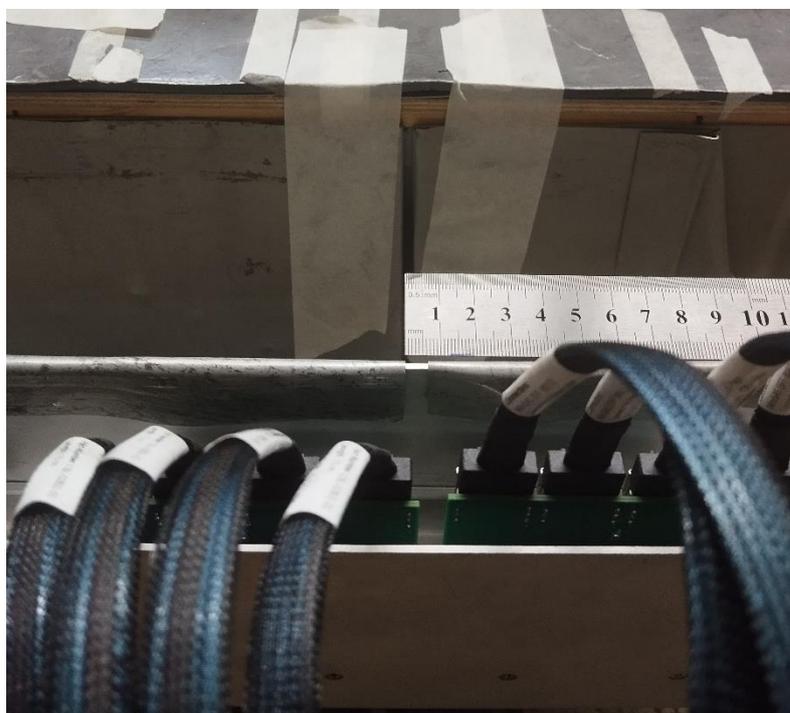


Рис. 1.1.3.6 Размещение позиционно-чувствительного монитора для измерения позиционного разрешения по X- координате.

Для определения позиционного разрешения был собран измерительный тракт, состоящий из позиционно-чувствительного монитора, источника высокого напряжения DT5533EM CAEN, детектирующей поканальной системы параллельного счета, разработанной в отделе НЭОКС ИБР-2 ЛНФ, полиэтиленового кубического замедлителя, внутри которого размещался лабораторный источник нейтронов ^{252}Cf (выход 10^7 н/с на 07.11.24) и двух кадмиевых щелей, коллимирующих поток нейтронов от замедлителя в направлении к позиционно-чувствительному монитору. Одна щель устанавливалась на поверхности замедлителя, вторая – на поверхности входного окна

позиционно-чувствительного монитора. Между щелями было выбрано расстояние 150мм, как показано на Рис. 1.1.3.5. На приведённой фотографии ширина щели 16 мм.

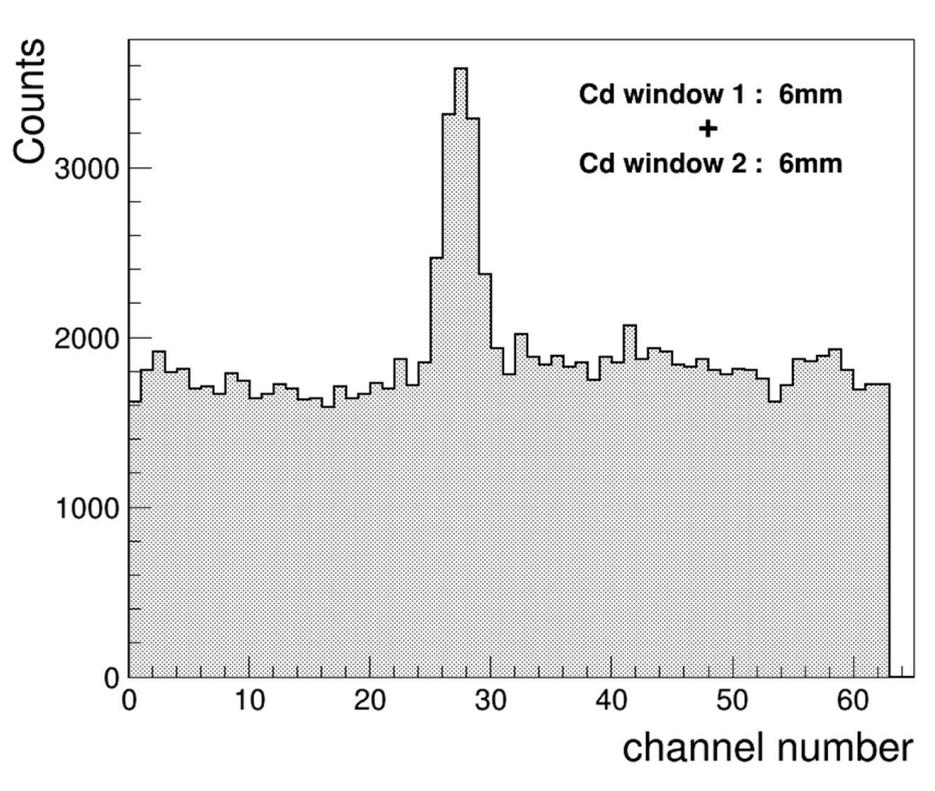


Рис. 1.1.3.7. Форма отображения щели 6 мм.

Для получения позиционного разрешения по X-координате, за которое ответственны установленные в ряд с шагом 1,5 мм анодные проволоочки, применялись кадмиевые пластины толщиной 2 мм, формирующие щель шириной 6 мм, как показано на Рис. 1.1.3.6.

Результат поканального набора счёта нейтронов по X-координате показан на Рис. 1.1.3.7. Полное отображение щели составило 7 каналов, а ширина на полувысоте составила 5 каналов. То есть измеренная ширина щели составляет по основанию 10,5 мм, а на полувысоте 7,5 мм. Так как источником нейтронов является протяжённых размеров замедлитель, то коллимация расходящегося пучка нейтронов при расстоянии между щелями 150 мм не создаёт параллельный пучок нейтронов и происходит либо «подсветка», либо затенение нейтронами, не параллельными оси между щелями. Этим объясняется увеличение изображения щели по основанию до 10,5 мм и уменьшение размера щели на вершине изображения. Оптимальное значение изображения щели приходится на полувысоту изображения. Эта величина равна 7,5 мм, а разность между действительной и измеренной величиной ширины щели 1,5 мм, что согласуется с шагом анодных проволоочек.

Для получения позиционного разрешения по Y-координате, за которое ответственны установленные в ряд с шагом 1,8 мм стрипы катода, применялись кадмиевые пластины толщиной 2 мм, формирующие щель шириной 16 мм. Результат поканального набора счёта нейтронов по Y-координате показан на Рис. 1.1.3.8. Полное отображение щели составило 13 каналов, а ширина на полувысоте составила 10 каналов. То есть измеренная ширина щели составляет по основанию 23,4 мм, а на полувысоте 18,0 мм. Разность между действительной и измеренной величиной ширины щели равна 1,8 мм, что согласуется с шагом стрипов.

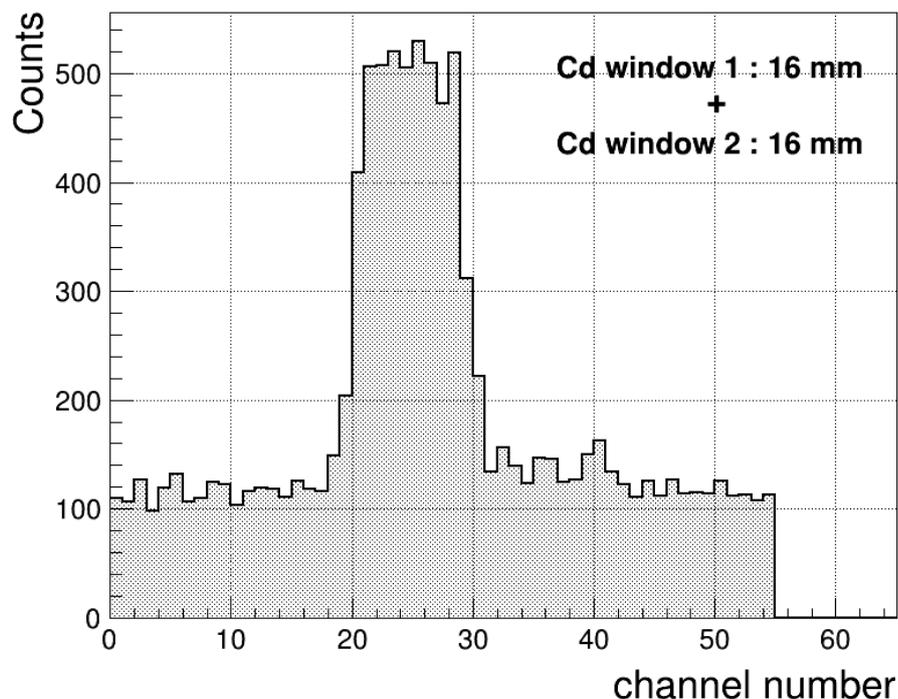


Рис. 1.1.3.8. Форма отображения щели 16 мм.

1.1.3.4 Измерение времяпролетного спектра нейтронов позиционно-чувствительным монитором

Времяпролетные спектры позиционно-чувствительного монитора измерялись в прямом пучке 9 канала импульсного реактора ИБР-2. Для этого поканальная регистрация нейтронного пучка проводилась по времяпролётной схеме. Длительность нейтронного импульса от реактора составляет около 200 мкс с периодичностью 200 мс. Распределение интенсивности потока нейтронов по длинам волн подчиняется закону распределения Максвелла. Временная развёртка выполнялась относительно стартового импульса от реактора. Общая пролетная база 9 канала ИБР-2 составляет около 44 м, что позволяет получать времяпролетные спектры нейтронов с высоким разрешением. Для сравнения спектр нейтронов регистрировался ^3He -детектором. На Рис. 1.1.3.9 представлены полученные спектры. Видно, что в длинноволновой области спектра чувствительность регистрации нейтронов позиционно-чувствительным монитором значительно превышает чувствительность ^3He -детектора. Это в первую очередь связано со сравнительно большей толщиной стенки входного окна ^3He -детектора, составляющего более 5 мм. Малая толщина входного окна позиционно-чувствительного монитора, представляющего собой алюминиевую фольгу толщиной 50 мкм означает, что монитор, более «прозрачный» для длинноволновых нейтронов. Таким образом данный монитор может успешно применяться как профилометр пучка нейтронов в спектрометрах, исследуемых рассеяние нейтронов в длинноволновой области.

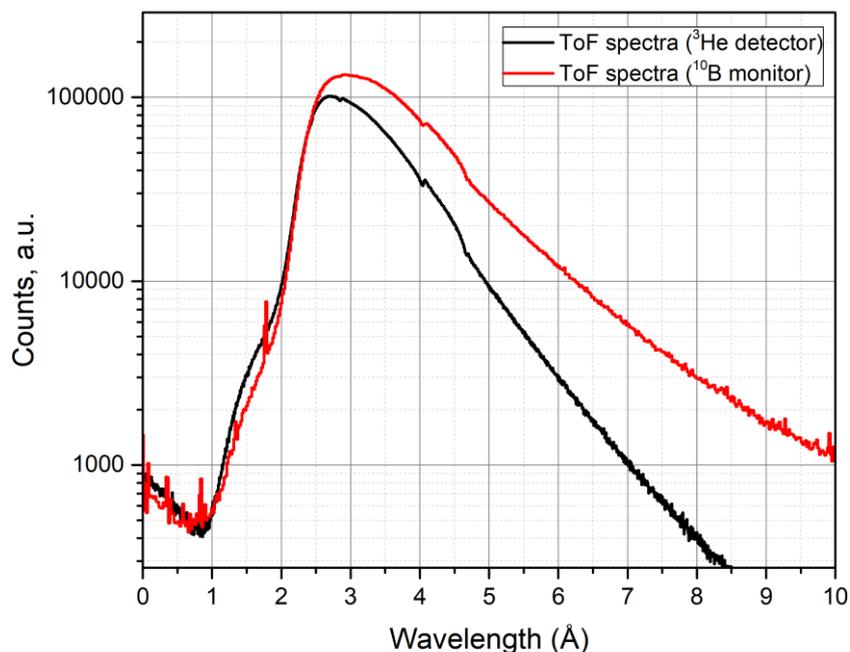


Рис. 1.1.3.9. Вид спектра излучения нейтронов реактора ИБР-2, измеренный позиционно-чувствительным монитором и ^3He -детектором.

1.1.3.5 Выводы

В НЭОКС ИБР-2 ЛНФ в рамках исследовательской программы (проекта) по теме: “Разработка и создание современных экспериментальных станций источников импульсного или постоянного типа” в соответствии с пунктом 1.1.3 Плана-графика «Разработка, изготовление и испытание высокопоточного позиционно-чувствительного монитора тепловых нейтронов с конвертером ^{10}B на алюминиевой фольге и окнами из алюминиевой фольги.» выполнены следующие работы:

1. Разработана конструкторская документация высокопоточного позиционно-чувствительного монитора тепловых нейтронов с конвертером ^{10}B на алюминиевой фольге и окнами из алюминиевой фольги в составе: чертёж общего вида; габаритный чертёж; сборочный чертёж; пояснительная записка.

2. Изготовлен позиционно-чувствительный монитор тепловых нейтронов с конвертером из карбида бора $^{10}\text{B}_4\text{C}$.

3. Выполнены испытания позиционно-чувствительного монитора тепловых нейтронов с конвертером из карбида бора $^{10}\text{B}_4\text{C}$ толщиной 100нм.

По результатам испытаний с применением искусственных источников ^{55}Fe , ^{90}Sr и ^{252}Cf , а также в прямом пучке реактора ИБР-2 можно сделать следующие выводы:

- отработана методика подбора быстрой газовой смеси $\text{CF}_4/\text{C}_4\text{H}_{10}$ с использованием линии γ -излучения 5,9 кэВ ^{55}Fe , на основании которой определён оптимальный состав смеси: 80% CF_4 /20% C_4H_{10} ;

- временное разрешение позиционно-чувствительного монитора и «мёртвое время» составляет 10 нс, что означает ограничение по предельной нагрузке позиционно-чувствительного монитора до 10^8 событий регистрации нейтронов в 1 секунду, и, соответственно, позволяет применять позиционно-чувствительный монитор как профилометр высокопоточных нейтронных пучков;

– динамический диапазон позиционно-чувствительного монитора линейный. Верхний предел превышает $3,89 \cdot 10^6 \text{ н} \cdot \text{с}^{-1} \cdot \text{см}^{-2}$ и может составлять не менее $10^8 \text{ н} \cdot \text{с}^{-1} \cdot \text{см}^{-2}$, что превышает предельные потоки реактора ИБР-2, имеющего нейтронные потоки в измерительных каналах до $10^7 \text{ н} \cdot \text{с}^{-1} \cdot \text{см}^{-2}$;

– координатное разрешение позиционно-чувствительного монитора составляет величину шага по X- и Y-координатам, или 1,5 и 1,8 мм, соответственно;

– позиционно-чувствительный монитор имеет высокое пропускание в широком диапазоне длин волн нейтронов, в том числе в длинноволновой области, обусловленное применением при его изготовлении катодов и входного/выходного окна, из алюминиевой фольги малой толщины (50 мкм) и тонких слоёв из карбида бора $^{10}\text{B}_4\text{C}$, составляющих до 100 нм, что обеспечивает минимальное число поглощаемых из пучка нейтронов изотопом бора ^{10}B (менее 0,1%), которых достаточно для получения скорости счёта, необходимой для измерения профиля высокопоточных нейтронных пучков;

– позиционно-чувствительный монитор имеет низкую чувствительность к γ -фону, которая обусловлена малой толщиной катода из фольги с тонким слоем конвертера, дающих малое количество фотоэлектронов отдачи, и узким зазором между анодом из проволочек и катодом, значительно уменьшающим ионизацию газа γ -фоном, вследствие чего частицы распада ^{10}B имеют много большую ионизацию по сравнению с ионизацией газа γ -фоном. Это обеспечивает возможность устанавливать рабочее напряжение мониторного счётчика в пропорциональном режиме, при котором основательно отсекается γ -фон.

Полученные результаты полностью соответствуют п. 1.1.3 Плана-Графика работ в рамках исполнения обязательств по Соглашению № 075–10–2025–153 от 05 июня 2025 г.

ПРИЛОЖЕНИЯ

- Конструкторская документация. ФАЙЛ: [ПГ 1.1.3 Конструкторская документация.pdf](#)
- Акт изготовления. ФАЙЛ: [ПГ 1.1.3 Акт изготовления.pdf](#)
- Методика испытаний. ФАЙЛ: [ПГ 1.1.3 Методика испытаний.pdf](#)
- Акт испытаний. ФАЙЛ: [ПГ 1.1.3 Акт испытаний.pdf](#)
- Протокол испытаний. ФАЙЛ: [ПГ 1.1.3 Протокол испытаний.pdf](#)

1.1.4 Разработка, изготовление и испытание прототипа многопроволочного однокоординатного детектора Flat tube с конвертером ^{10}B на основе одной сплющенной алюминиевой трубки.

В Научно-экспериментальном отделе комплекса спектрометров (НЭОКС) ИБР-2 ЛНФ, в рамках исследовательской программы (проекта) по теме: “Разработка и создание современных экспериментальных станций источников импульсного или постоянного типа” согласно пункту 1.1.4 Плана-графика «Разработка, изготовление и испытание прототипа многопроволочного однокоординатного детектора Flat tube с конвертером ^{10}B на основе одной сплющенной алюминиевой трубки» изготовлен и испытан прототип многопроволочного однокоординатного газового детектора Flat tube для регистрации тепловых нейтронов с твердотельным конвертером из карбида бора B_4C , обогащённого по изотопу ^{10}B на основе одной сплющенной алюминиевой трубки.

Изготовление прототипа однокоординатного детектора Flat tube с конвертером ^{10}B является началом реализации изготовления позиционно чувствительного детектора (см Рис. 1.1.4.1) тепловых и холодных нейтронов, проект которого разработан в рамках соглашения с Мин.Обр.

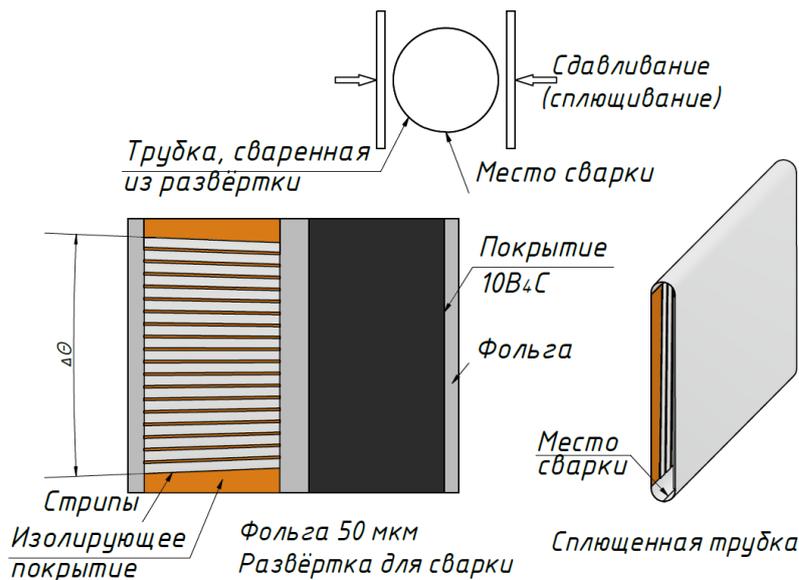


Рис. 1.1.4.1. Принципиальная схема позиционно чувствительного детектора Flat tube.

1.1.4.1 Изготовление прототипа Flat tube

Изготовление выполнялось в несколько этапов.

Изготовление конвертера тепловых нейтронов на подложке из алюминиевой фольги.

С помощью лабораторной вакуумной установки VSR-300 университета «Дубна» (Рис. 1.1.4.2) производилось нанесение слоя конвертера ¹⁰B₄C на подложку из алюминиевой фольги толщиной 50 мкм методом вакуумного магнетронного распыления мишени ¹⁰B₄C. Толщина слоя ¹⁰B₄C определялась с помощью свидетеля – кремниевой полированной пластины, на которой формируется ступенька, высота которой соответствует толщине слоя. Измерения высоты ступеньки выполнялись на профилометре FRT MicroSpy® Profile. Чувствительность профилометра составляет 6–10 нм. Толщина слоя конвертера ¹⁰B₄C составила 1 мкм.

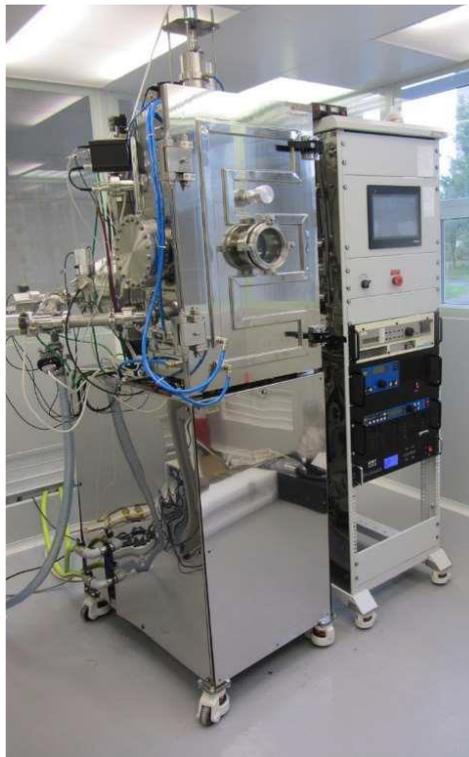


Рисунок 1.1.4.2. Лабораторная вакуумная установка VSR300.

Изготовление заготовки для Flat tube.

Заготовки для сплюсненной алюминиевой трубки изготавливались в ЛНФ ОИЯИ используя Лазерный маркирующий комплекс «Альфа В30А4». Из фольги с конвертером $^{10}\text{B}_4\text{C}$ вырезались заготовки – полосы шириной 280.5 мм и длиной 316 мм. В области предполагаемого шва с помощью этого же лазера с поверхности фольги удалялось покрытие из конвертера $^{10}\text{B}_4\text{C}$.

Размещение заготовки для изготовления Flat tube.

Заготовки из фольги закреплялись на калиброванной полированной трубе диаметром 88.6 мм из нержавеющей стали конверторным слоем к стержню и фиксировались полиимидной плёнкой с клейким слоем так, чтобы края полоски-заготовки были направлены вдоль оси трубы. Область нахлеста вдоль заготовки фиксировалась полиимидной пленкой, которая удалялась во время сварки. Собранный комплекс трубы с заготовкой для изготовления алюминиевой трубки фиксируется для сварки на установке ультразвуковой сварки, как показано на Рис. 1.1.4.3

Сварка алюминиевой трубки.

Сварка заготовки для сплюсненной трубки осуществлялась в ЛНФ ОИЯИ с помощью пьезокерамической колебательной системы с волноводом, оканчивающимся цилиндрической головкой (сонотродом), управляемой ультразвуковым генератором УЗГ13-0,1/22. Процесс сварки происходит за счёт акустических колебаний головки-сонотрода с частотой 22 кГц, прижимаемой к краям фольги, заправленным внахлест. Место прижима головки мгновенно разогревается до температуры плавления алюминия, осуществляя прочное сварное соединение. Установка для ультразвуковой сварки представлена на Рис. 1.1.4.4. В результате сварки получились алюминиевая трубка диаметром 88.7 мм с перекрытием внахлест порядка 1.5-2мм.

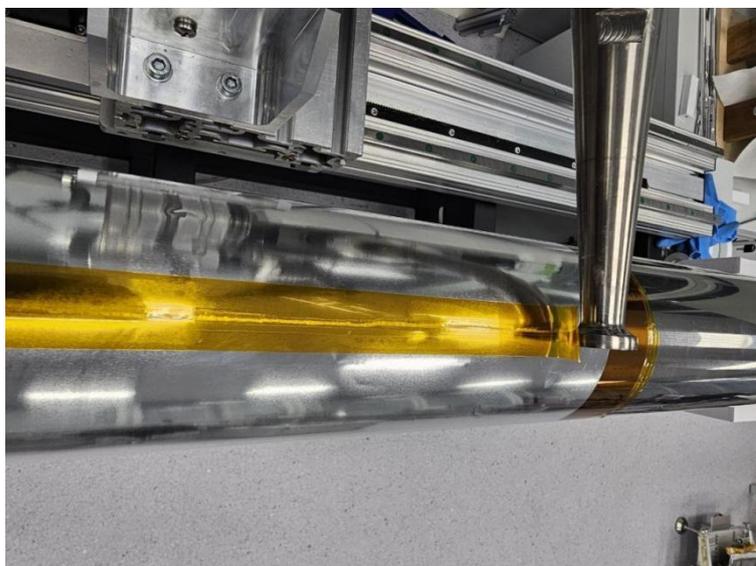


Рис. 1.1.4.3. Размещение трубы с заготовкой для изготовления алюминиевой трубки на установке для ультразвуковой сварки.

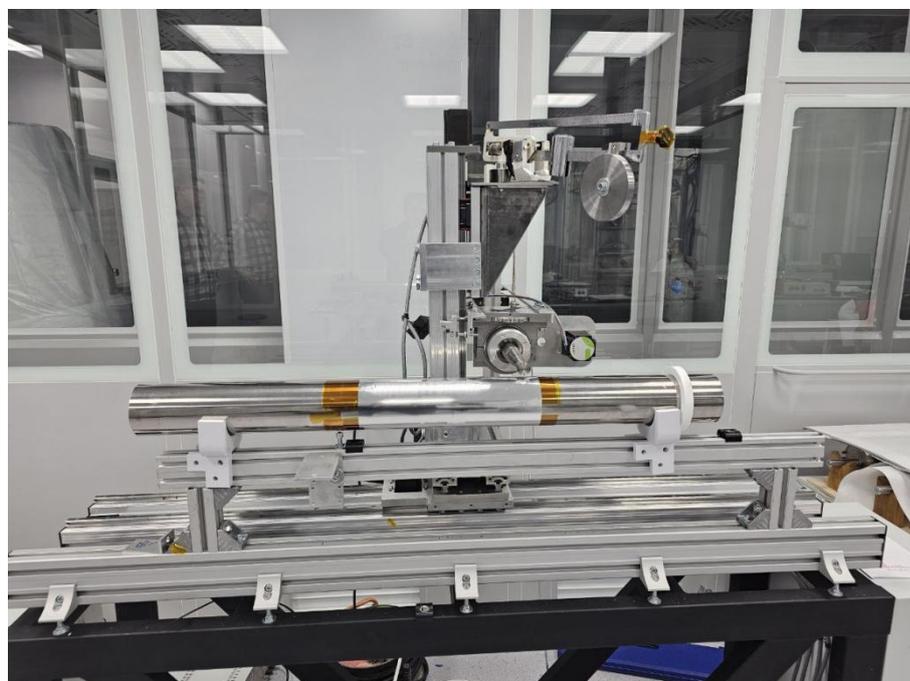


Рис. 1.1.4.4. Установка для ультразвуковой сварки.

На Рис. 1.1.4.5 приведена фотография сварного шва с внутренней стороны трубки, а на рис. 1.1.4.6 представлен вид готовой сваренной трубки. На данном станке возможно изготовления трубок длиной до 1 м.

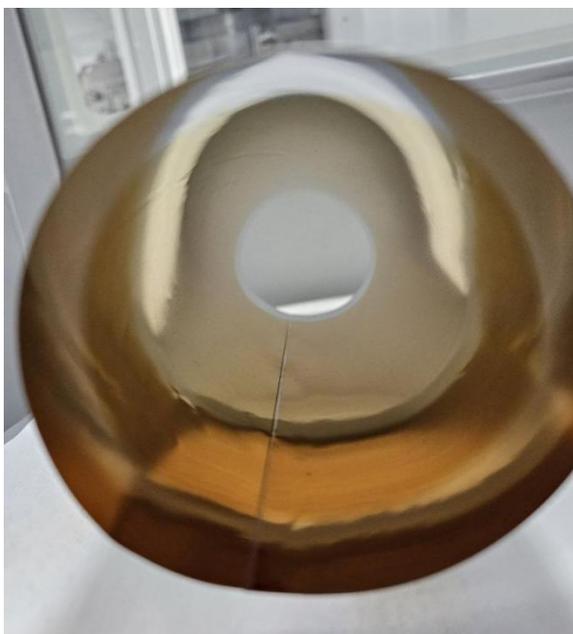


Рис. 1.1.4.5. Фотография сварного шва



Рис. 1.1.4.6. Внешний вид трубки для детектора Flat tube.

Сборка прототипа Flat tube детектора.

На Рис. 1.1.4.7 - 1.1.4.8 представлен внешний вид и чертёж конструкции прототипа детектора Flat tube.

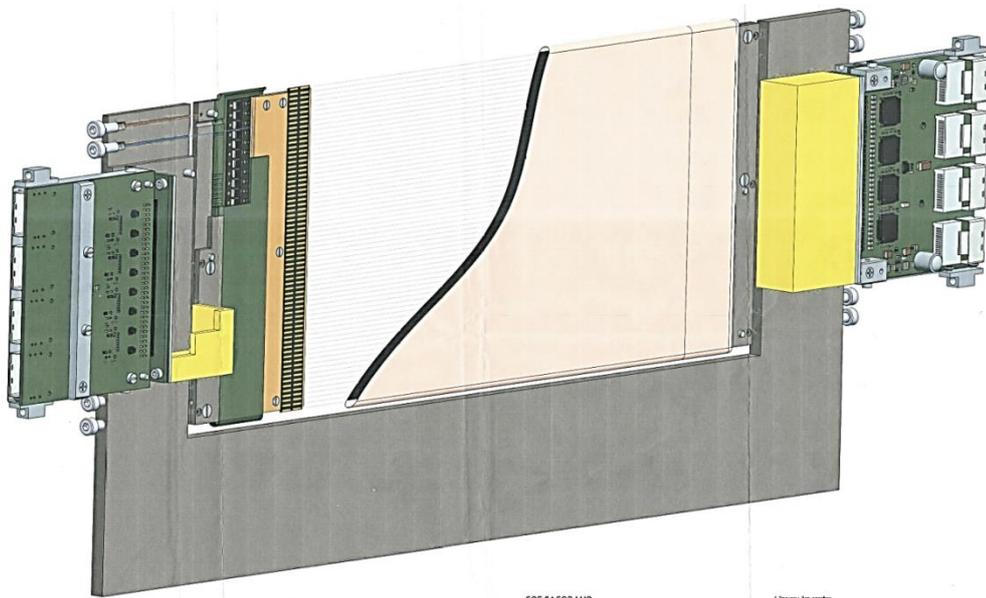


Рис. 1.1.4.7. Внешний вид прототипа детектора Flat tube

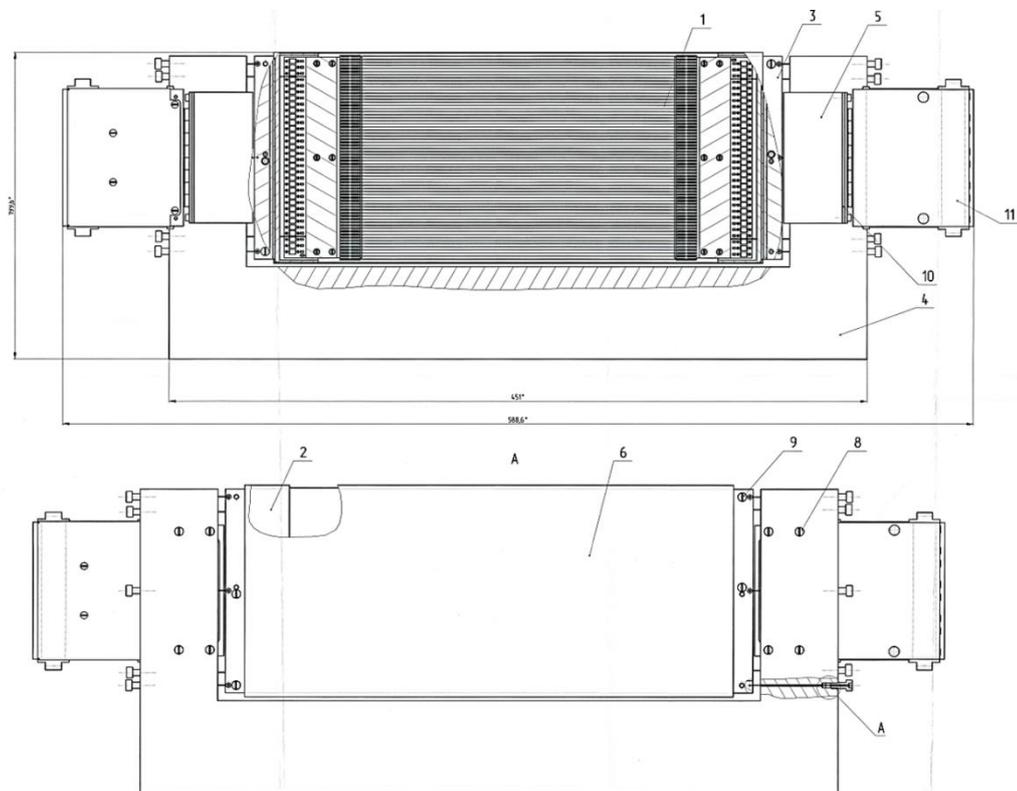


Рис. 1.1.4.8. Конструкция прототипа детектора Flat tube: 1- анод, 2 - изолятор, 3 - зажим фольги, 4 скоба, 5-стойка платы, 6-фольга, 8 и 9 винты, 10 - плата коннектор, 11 - плата усилителя с платой ввода.

Основанием конструкции является прямоугольная скоба 4 из закалённой стали, между лапами которой закреплена фольга 4 с напылённым слоем конвертера В₄С (сплюснутая трубка). Анод 1 расположен внутри сплюснутой трубки. С торцов трубки располагаются изоляторы 2. Сплюснутая трубка фиксируется на изоляторах зажимами 3 специальной формы.

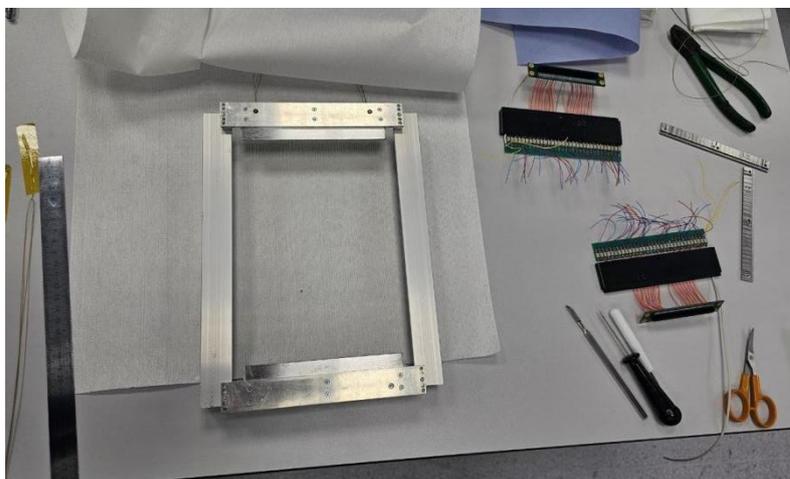


Рис. 1.1.4.9. Анод в оправке и изоляторы, с платами и разъёмами для съёма сигнала.

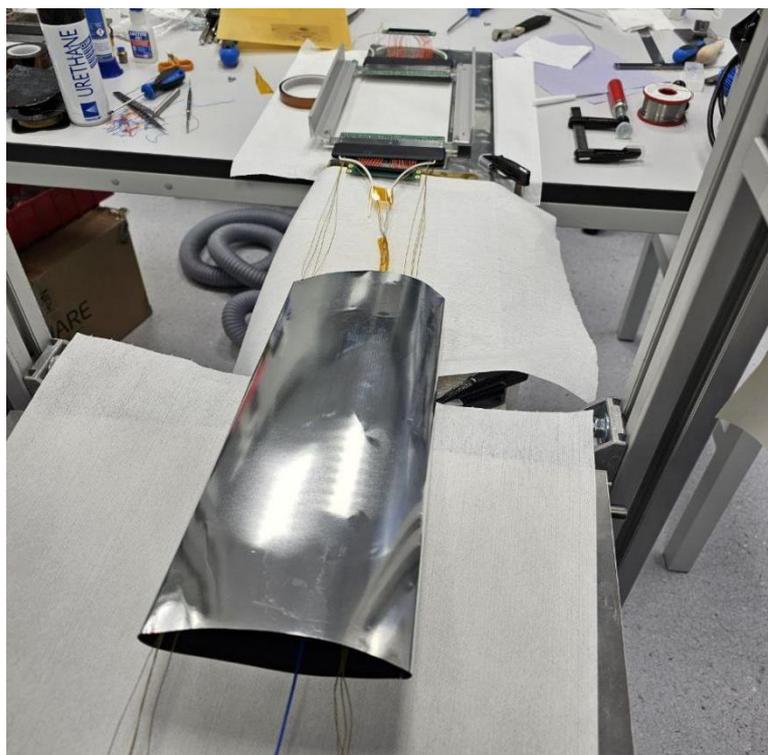


Рис. 1.1.4.10. Процесс сборки прототипа детектора Flate tube.

На Рис. 1.1.4.9 показана анод в специальной оправке. К ламелькам платы, на которых запаяны анодные проволочки, припаиваются также провода для съёма сигнала. Далее собирается конструкция позволяющая поместить анод в сборе с изоляторами платами и сигнальными разъёмами в сплюсненную трубку сохранив при этом натяжение анодных проволоок. Данный этап сборки прототипа детектора Flate tube представлен на Рис. 1.1.4.10 и Рис. 1.1.4.11. После сборки прототипа детектора Flate tube отверстия в изоляторах под сигнальные проволочки и кевларовые нити герметизируется эпоксидной смолой. Прототип детектора Flate tube представлен на Рис. 1.1.4.12.

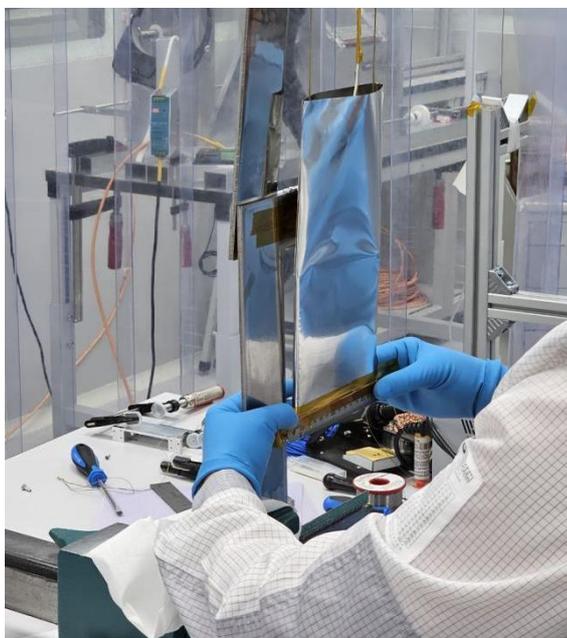


Рис. 1.1.4.11. Протягивание анодной рамки в сборе с изоляторами, платами и разъёмами через сплюсненную трубку.

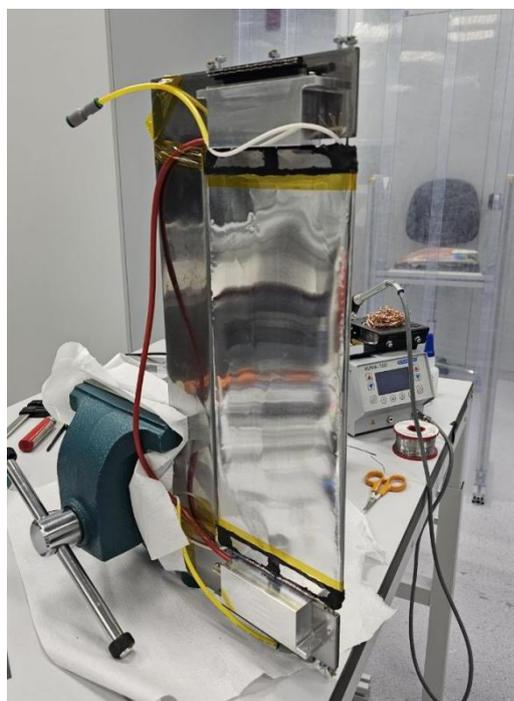


Рис. 1.1.4.12. Прототип детектора Flat tube в сборе.

1.1.4.2 Испытание прототипа детектора Flat tube.

Прототип детектора Flat tube с толщиной конвертера из карбида бора $^{10}\text{B}_4\text{C}$ 500 нм. Выбор рабочей точки. Испытание прототипа детектора Flat tube проводилось на базе ЛНФ ОИЯИ, в помещениях 119 корпуса, предназначенных для работы с радиоактивными источниками и выполнялись с использованием лабораторного источника нейтронов ^{252}Cf (выход 10^7 н/с на 07.11.24г.), который устанавливался непосредственно перед измерениями в пластиковый замедлитель. Испытуемый

прототип детектора размещался в непосредственной близости от замедлителя, как показано на Рис. 1.1.4.13.

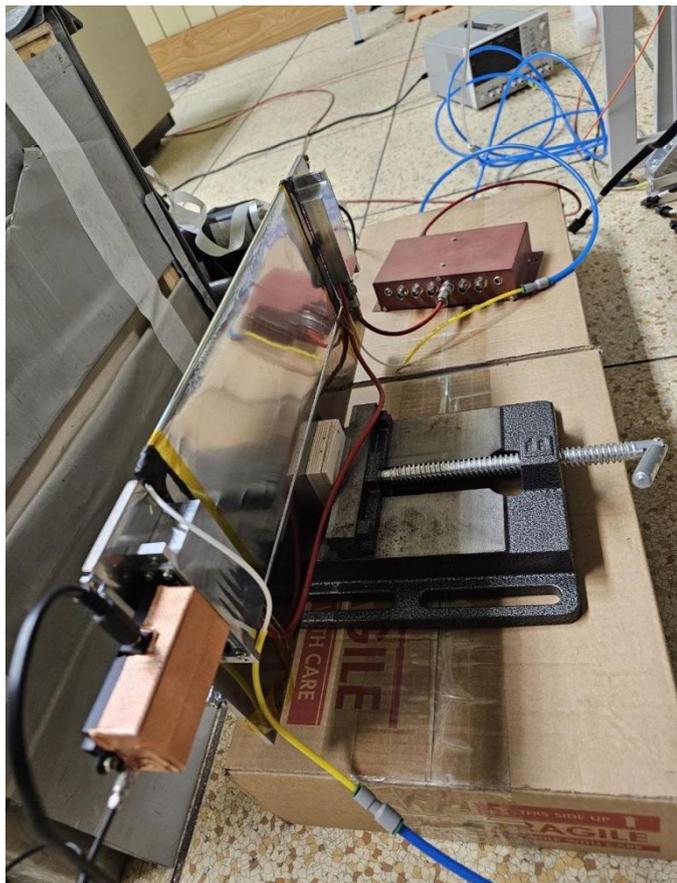


Рис. 1.1.4.13. Размещение прототипа детектора Flate tube для испытаний на источнике ^{252}Cf .

Для снятия счётной характеристики, определения рабочего напряжения и получения амплитудных спектров собирался измерительный тракт, состоящий из: straw-детектора, источника высокого напряжения DT5533EM CAEN, зарядочувствительного усилителя-формирователя квази-гауссовской формы (разработан в НЭОКС ИБР-2 ЛНФ), цифрового многоканального анализатора МСА-8000D и ПК с ПО Dpp-МСА. В качестве рабочего газа использовалась смесь 90%Ar+ 10%CO₂ в проточном режиме со скоростью подачи газовой смеси 2 см³/мин. В течение 4 часов до проведения измерений выполнялась продувка прототипа детектора Flate tube с этой же скоростью. Далее проводилась серия измерений амплитудных спектров при различных напряжениях с источником нейтронов ^{252}Cf , без источника нейтронов для оценки фона, с источником ^{252}Cf и кадмиевым фильтром для оценки подавления потока нейтронов и определения напряжения при которых будет виден вклад от гамма частиц. Время набора статистики в каждом измерении составляло 300 секунд. Результаты измерений представлены на Рис. 1.1.4.14 и 1.1.4.15. Черная и синяя гистограммы показывают амплитудный спектр при измерениях с источником ^{252}Cf и без источника ^{252}Cf для измерения фона. Красной гистограммой показан амплитудный спектр от источника после вычитания фоновых событий.

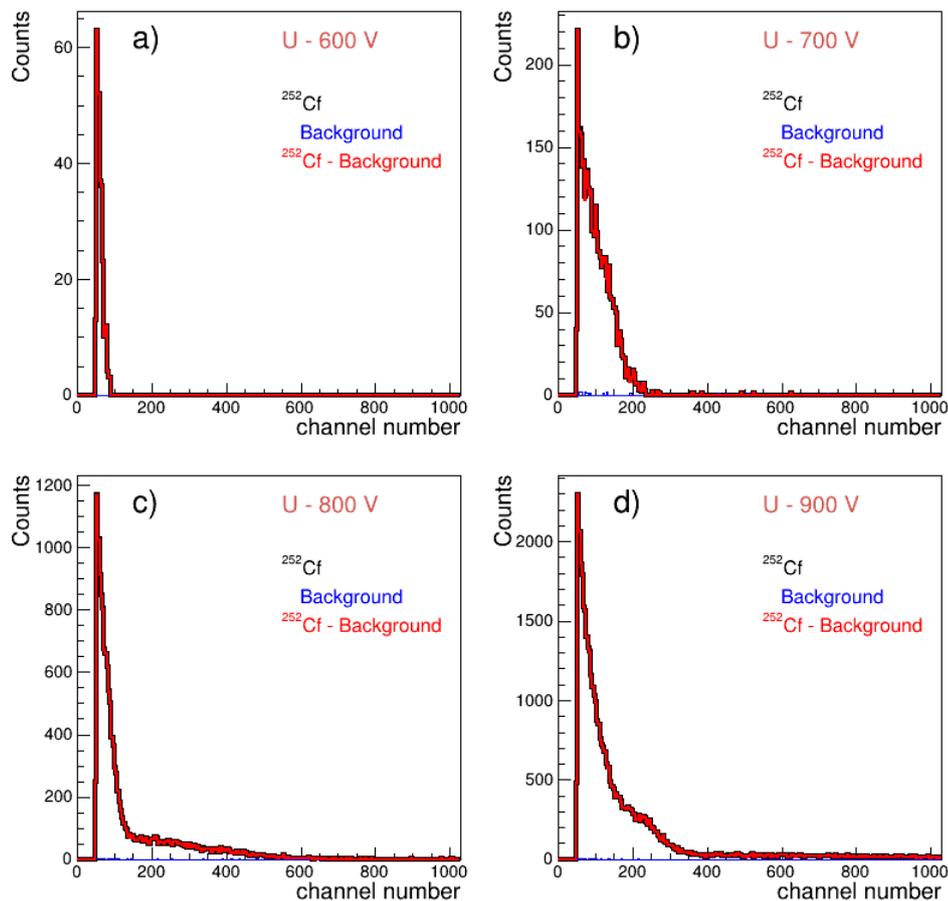


Рис. 1.1.4.14. Амплитудные спектры прототипа детектора Flate tube в зависимости от напряжения питания для диапазона 600-900В.

Счётная характеристика для прототипа детектора Flate tube представлена на панели d) Рис. 1.1.4.15. Выход на плато, согласно счётной характеристике, наблюдается при напряжении 1100-1200В. На Рис. 1.1.4.15-1.1.4.19 представлены результаты влияния кадмиевого фильтра на амплитудный спектр. Черная и красная гистограммы на панелях а) показывают амплитудный спектр при измерениях с источником ^{252}Cf и с источником ^{252}Cf и кадмиевым фильтром. На панелях b) Рис. 1.1.4.15-1.1.4.19 показано отношение амплитудных спектров, набранных с источником ^{252}Cf и с источником ^{252}Cf и кадмиевым фильтром. Вклад от гамма частиц не заметен до напряжений 1000В, поскольку отношение между амплитудными спектрами линейно во всей области каналов. При напряжении 1100В он не существен и заметно проявляется при напряжении 1200В. Оптимальное рабочее напряжение, определяемое по счётной характеристике с учетом отношения амплитудных спектров, набранных с источником ^{252}Cf с дополнительным кадмиевым фильтром и без него, составляет 1100 В.

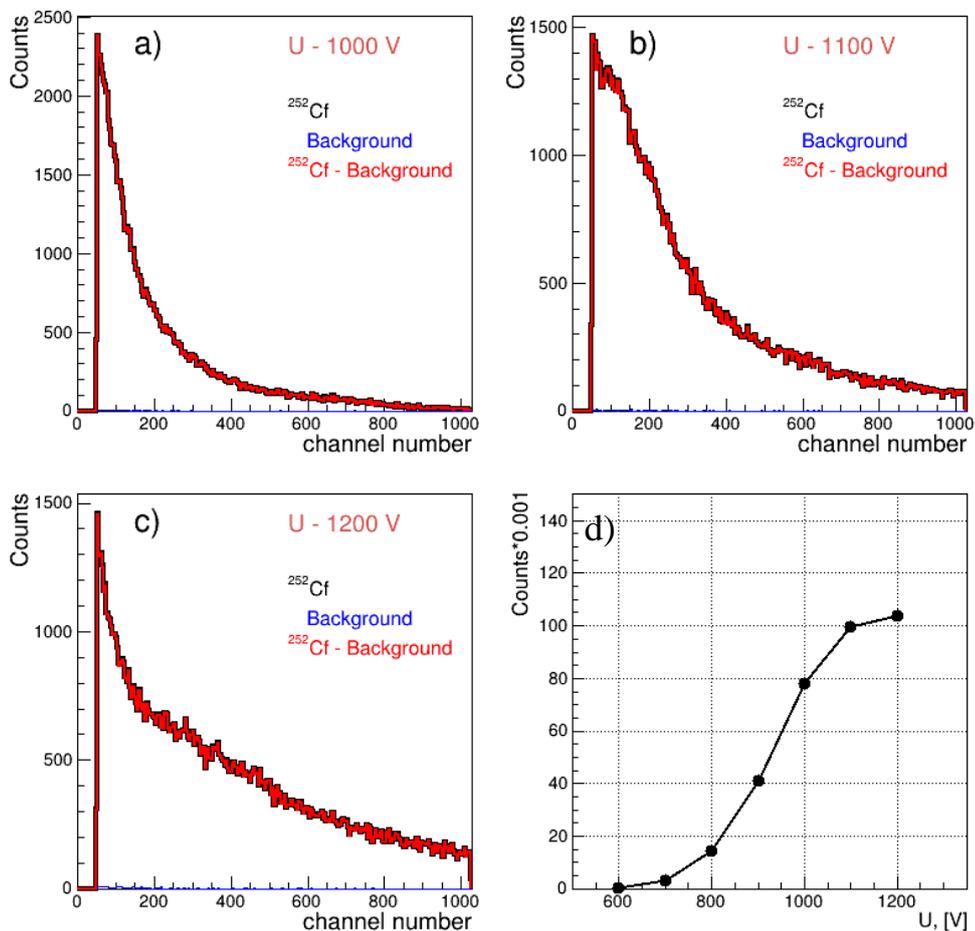


Рис. 1.1.4.15. Амплитудные спектры прототипа детектора Flate tube в зависимости от напряжения питания для диапазона 1000-1200В и счётная характеристика детектора.

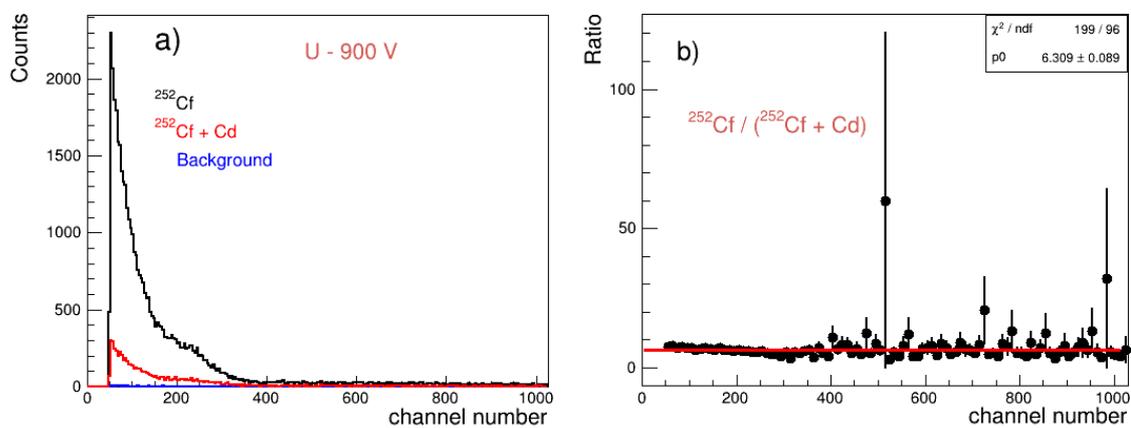


Рис. 1.1.4.16. Влияние кадмиевого фильтра на амплитудный спектр прототипа детектора Flate tube при напряжении питания 900В.

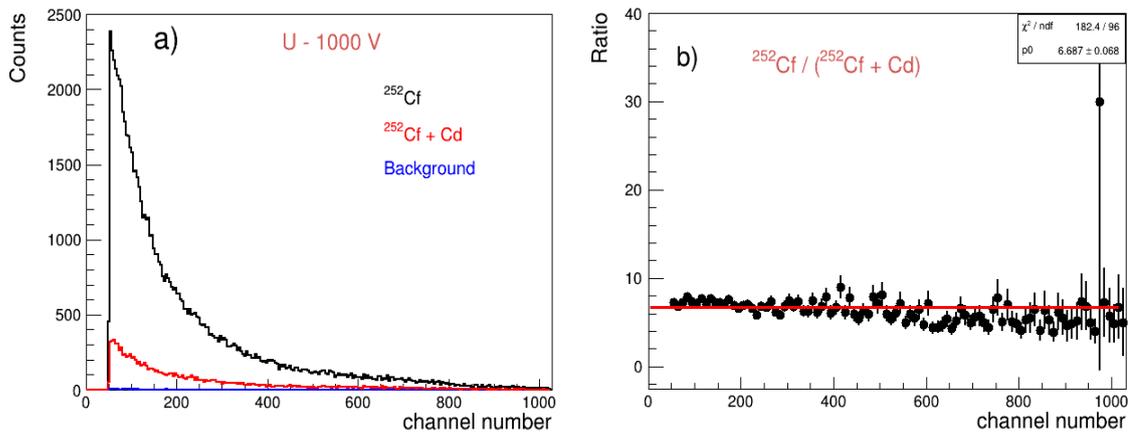


Рис. 1.1.4.17. Влияние кадмиевого фильтра на амплитудный спектр прототипа детектора Flate tube при напряжении питания 1000В.

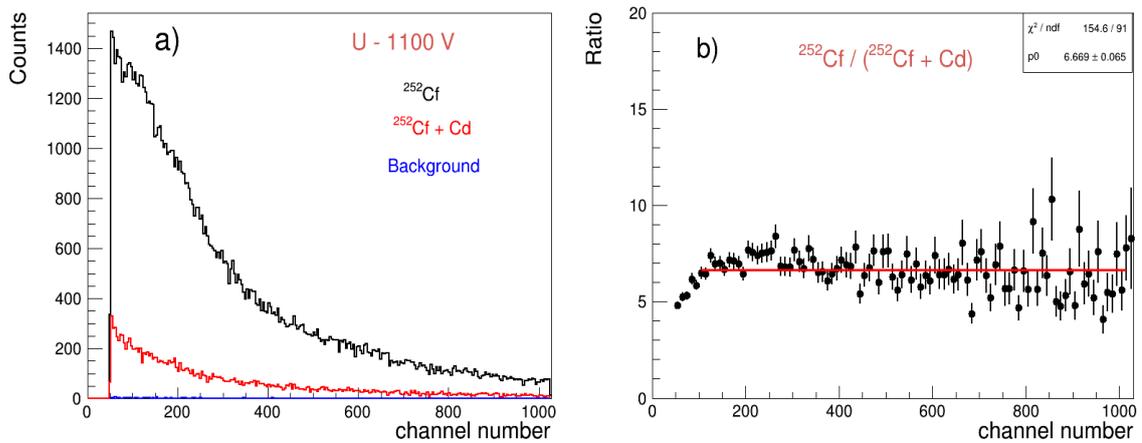


Рис. 1.1.4.18. Влияние кадмиевого фильтра на амплитудный спектр прототипа детектора Flate tube при напряжении питания 1100В.

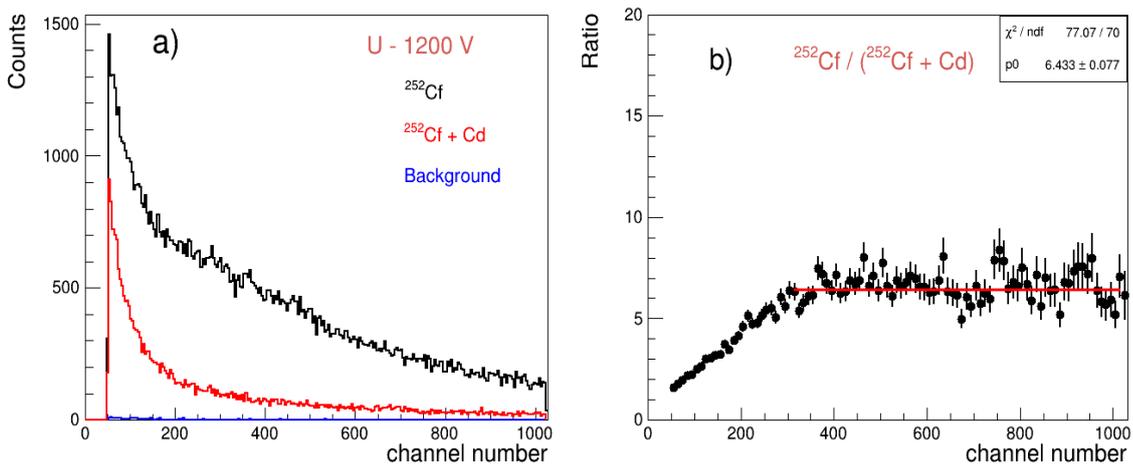


Рис. 1.1.4.19. Влияние кадмиевого фильтра на амплитудный спектр прототипа детектора Flate tube при напряжении питания 1200В.

Прототип детектор Flate tube с толщиной конвертера из карбида бора $^{10}\text{B}_4\text{C}$ 500 нм. Проверка стабильности регистрации. Для проверки стабильности регистрации использовался измерительный тракт такой же как и для измерения счетной характеристики и определения рабочего напряжения

прототипа детектора Flate tube. В качестве рабочего газа использовалась смесь 90%Ar + 10%CO₂ в проточном режиме со скоростью подачи газовой смеси 2 см³/мин. Была проведена серия из 5 измерений при фиксированном положении детектора относительно источника ²⁵²Cf нейтронов при рабочем напряжении 1100 В. На рис. 1.1.1.12 представлены результаты измерений, время набора статистики в каждом измерении 300 сек. Коэффициент вариации, определяющий стабильность регистрации составляет ~ 0.5 %.

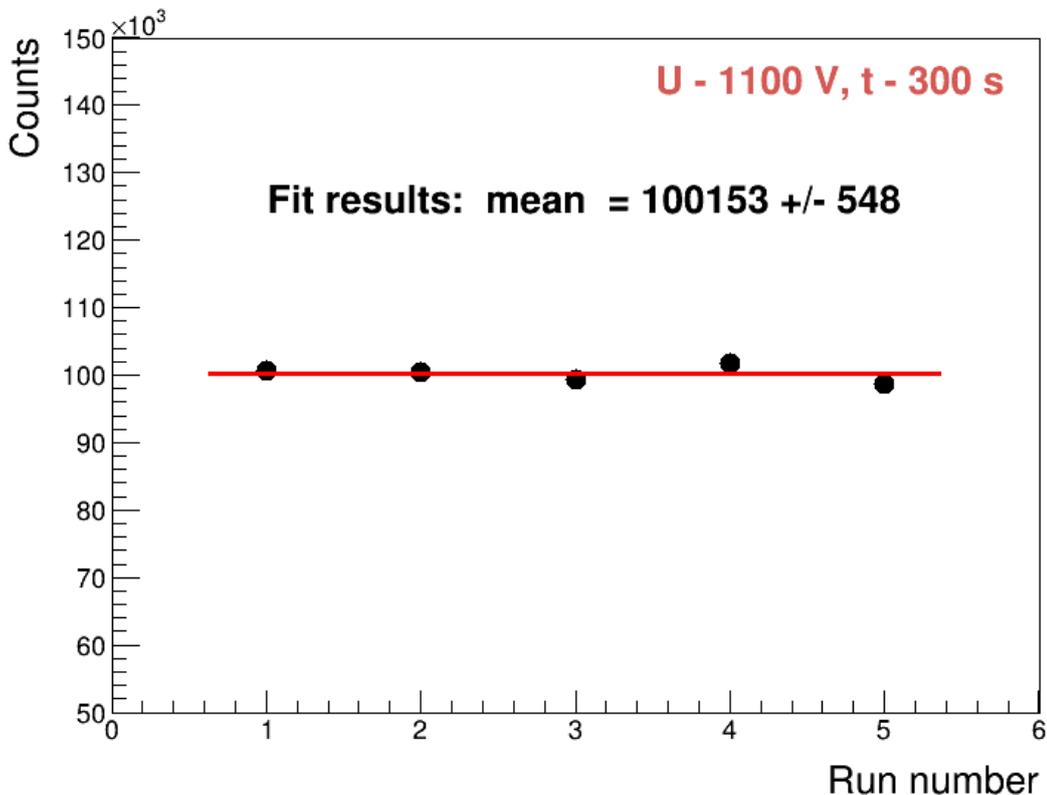


Рис. 1.1.4.20. Количество зарегистрированных нейтронов в зависимости от номера измерения для прототипа детектора Flate tube.

Прототип детектор Flate tube с толщиной конвертера из карбида бора ¹⁰B₄C 500 нм. Проверка позиционной чувствительности. Позиционная чувствительность определялась по распределению количества зарегистрированных импульсов от нейтронов в зависимости от канала при установке между детектором и замедлителем маски из кадмия с щелью. Для определения позиционной чувствительности был собран измерительный тракт, который включал в себя: детектор Flat tube с конвертером ¹⁰B; источник высокого напряжения DT5533EM CAEN; высокочастотный гигагерцовый трансимпендансный усилитель сигнала, разработанный в НЭОКС ИБР-2 ЛНФ, а также цифровой осциллограф. До проведения измерений прототип детектора Flat tube продувался рабочей смесью 90%Ar + 10%CO₂ в течение 4 часов, в процессе измерений детектор работает в проточном режиме со скоростью подачи газовой смеси 2 см³/мин. Детектор Flat tube поместили на расстоянии 10см от замедлителя. На поверхность Flat tube устанавливается кадмиевый фильтр с щелью шириной 2см, совмещённый с кадмиевым фильтром шириной 3см (см Рис. 1.1.4.13), для формирования плоского пучка нейтронов. Затем поместили источник ²⁵²Cf нейтронов в пластиковый замедлитель. В течение фиксированного времени набора статистики при рабочем напряжении детектора, усилителя сигналов и осциллографа провели измерение скорости набора

событий с каждого канала. Результаты измерений представлены на Рис. 1.1.4.21. Согласно результатам измерений ширина основания полки составляет 20мм (5 каналов, ширина 1 канала - 4мм (расстояние между анодными проволочками)).

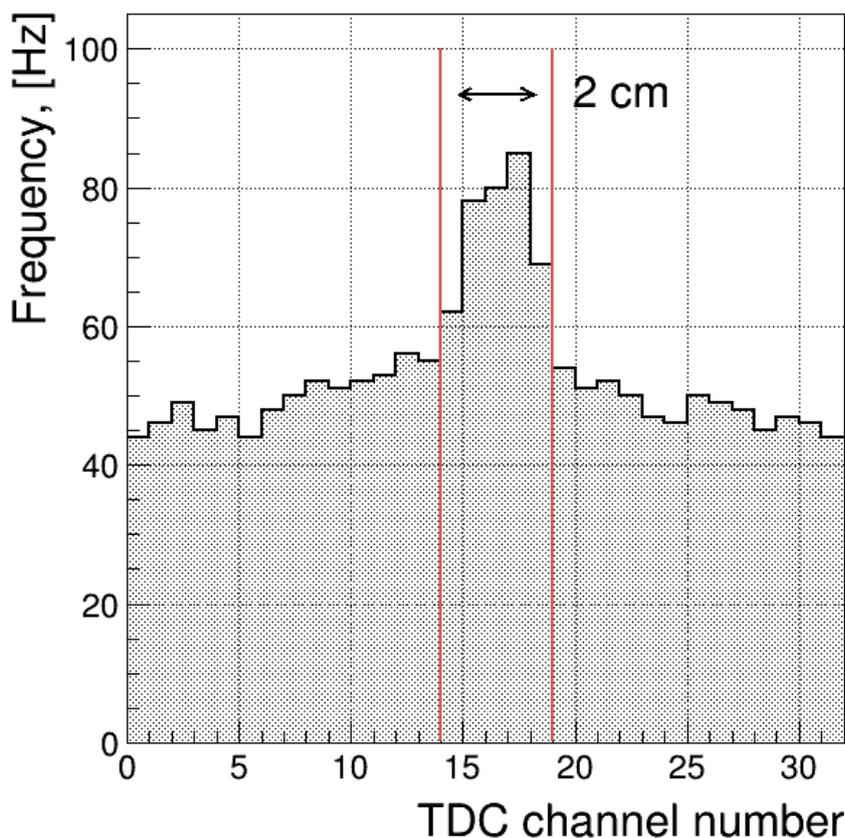


Рис. 1.1.4.21. Скорость счета зарегистрированных нейтронов в зависимости от номера канала для прототипа детектора Flat tube.

1.1.4.3 Выводы

В НЭОКС ИБР-2 ЛНФ, в рамках исследовательской программы (проекта) по теме: “Разработка и создание современных экспериментальных станций источников импульсного или постоянного типа” согласно пункту 1.1.4 Плана-графика «Разработка, изготовление и испытание прототипа многопроволочного однокоординатного детектора Flat tube с конвертером ^{10}B на основе одной сплющенной алюминиевой трубки» разработан, изготовлен и испытан прототип многопроволочного однокоординатного газового детектора Flat tube и выполнены следующие работы:

1. Разработана конструкторская документация прототипа детектора Flat tube нейтронов с конвертером ^{10}B на основе одной сплющенной алюминиевой трубки в составе: чертёж общего вида; габаритный чертёж; сборочный чертёж; пояснительная записка.

2. Изготовлен прототип многопроволочного однокоординатного детектора Flat tube.

3. Выполнены испытания прототипа многопроволочного однокоординатного детектора Flat tube с конвертером из карбида бора $^{10}\text{B}_4\text{C}$ толщиной 500нм.

По результатам испытаний можно сделать следующие выводы:

– Изготовленный прототип многопроволочного однокоординатного детектора Flat tube с конвертером из карбида бора $^{10}\text{B}_4\text{C}$ является отдельным самостоятельным элементом из которых возможно изготовление Multi-flat-tube. Прототип детектора показывает стабильную работу, низкую

чувствительность к гамма фону при рабочем напряжении и позиционную чувствительность на уровне шага между анодными проволочками.

– прототип многопроволочного однокоординатного детектора Flat tube имеет высокое пропускание во всём диапазоне длин волн нейтронов, что обусловлено малой толщиной входного окна, изготовленного из алюминиевой фольги толщиной 50 мкм, что является практически прозрачным для нейтронов всех длин волн;

– Подтверждена целесообразность дальнейших работ по созданию детектора Multi-flat-tube
Для подтверждения указанных характеристик необходимо дополнительно провести исследования на нейтронном пучке реактора.

Полученные результаты полностью соответствуют п. 1.1.4 Плана-Графика работ в рамках исполнения обязательств по Соглашению № 075-10-2025-153 от 05 июня 2025 г.

ПРИЛОЖЕНИЯ

- Конструкторская документация. ФАЙЛ: [ПГ 1.1.4 Конструкторская документация.pdf](#)
- Акт изготовления. ФАЙЛ: [ПГ 1.1.4 Акт изготовления.pdf](#)
- Методика испытаний. ФАЙЛ: [ПГ 1.1.4 Методика испытаний.pdf](#)
- Акт испытаний. ФАЙЛ: [ПГ 1.1.4 Акт испытаний.pdf](#)
- Протокол испытаний. ФАЙЛ: [ПГ 1.1.4 Протокол испытаний.pdf](#)

1.1.5 Теоретические исследования по определению оптимального материала конвертера для детектора нейтронов с микроканальной пластиной (МКП) (совместно с НИЦ «Курчатовский институт» - ПИЯФ, Договор № 245-100-1/2025 от 08.08.2025 г.).

На первом этапе проекта были проведены теоретические исследования по определению оптимального материала конвертера и его толщины для детектора нейтронов с микроканальной пластиной (МКП).

Цель выполнения работы: определить оптимальный материал конвертера для детектора нейтронов с МКП, изучить эффективность конверсии тепловых и холодных нейтронов различных конструкций плоскопараллельного детектора с микроканальной пластиной с применением конвертера на основе гадолиния.

Для достижения поставленной цели были решены следующие задачи:

– подготовлена расчетная модель с описанием источника нейтронов, геометрии и материалов, используемых в МКП;

– проведена верификация расчетной модели с учетом выбранного программного средства моделирования;

– систематизированы данные о взаимодействии тепловых и холодных нейтронов с МКП с гадолинием;

– выполнен сравнительный анализ характеристик МКП для различных конструкций и методов использования гадолиния для регистрации холодных и тепловых нейтронов;

– подготовлены рекомендации в части использования детектора нейтронов с МКП.

Сравнительный анализ эффективности характеристик МКП с гадолинием проводился для трех методов его использования:

1. Внешний слой ^{nat}Gd на алюминиевой подложке.
2. ALD-покрытие Gd_2O_3 на поверхности МКП.
3. Легирование стекла МКП Gd_2O_3 .

Применение гадолиния для регистрации холодных и тепловых нейтронов связано с его уникальными свойствами. Гадолий имеет самое высокое сечение захвата тепловых нейтронов благодаря двум изотопам:

- Gd-157, 15,7% в ^{nat}Gd , $\sigma_c = 255\ 000$ барн;
- Gd-155, 14,8% в ^{nat}Gd , $\sigma_c = 60\ 900$ барн.

Полное сечение и сечение захвата для данных изотопов гадолиния представлены на Рис. 1.1.5.1 и 1.1.5.2.

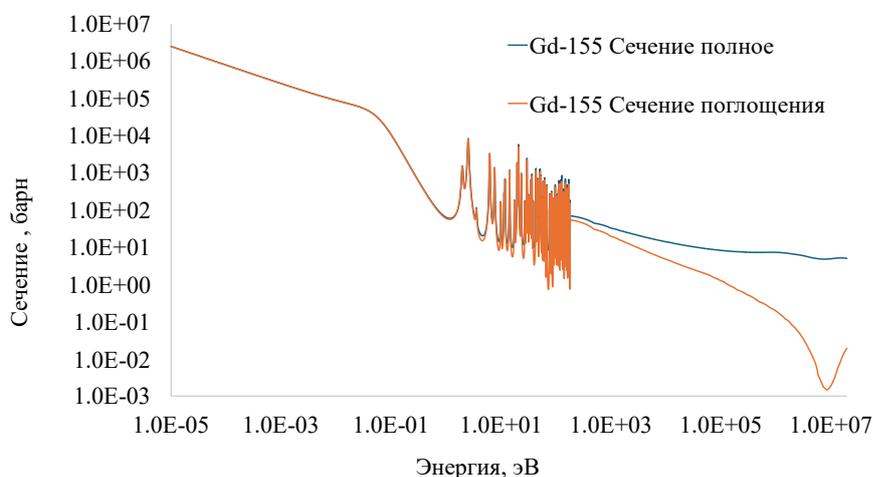


Рис. 1.1.5.1. Сечение взаимодействия нейтронов с Gd-155.

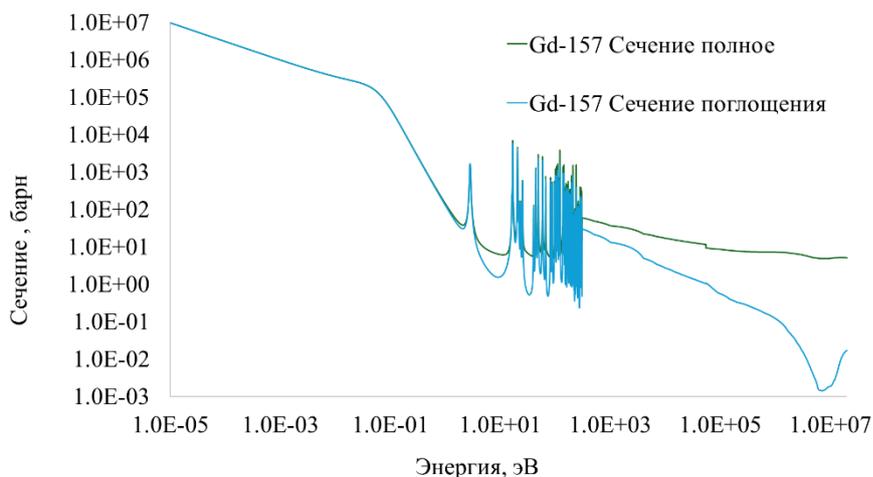


Рис. 1.1.5.2. Сечение взаимодействия нейтронов с Gd-157.

Для тепловых ($E = 25,3$ мэВ) и холодных ($E = 5$ мэВ) нейтронов полное сечение взаимодействия практически совпадает с сечением поглощения. При захвате нейтрона генерируется высокоэнергетическое гамма-излучение, а также каскад вторичных электронов, которые могут быть зарегистрированы детектором. Как представлено в работах [3–5] применение МКП на основе стекла позволяет значительно увеличить интенсивность электронов. Упрощенная схема для одного канала МКП представлена на Рис. 1.1.5.3.

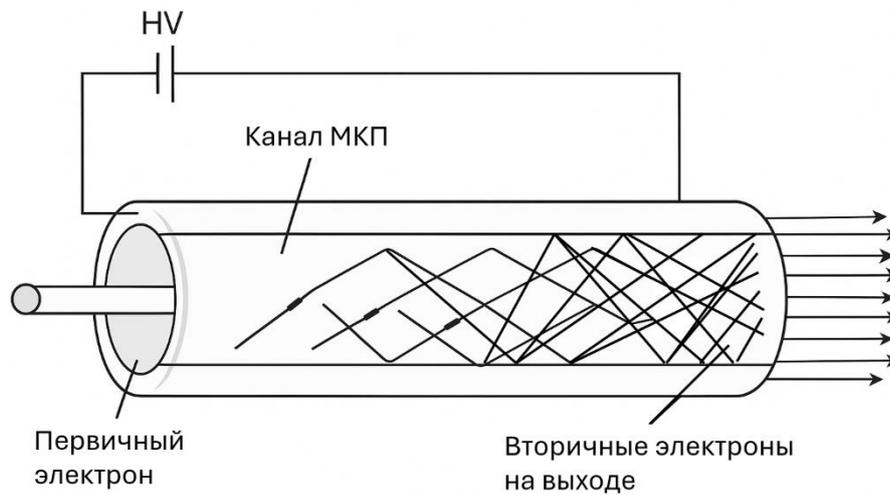


Рис. 1.1.5.3. Упрощенная схема работы канала МКП.

При выполнении настоящей работы были рассмотрены 3 расчетные модели:

- внешний слой на основе природного гадолиния;
- ALD-покрытие из Gd_2O_3 на поверхности МКП;
- легированное стекло МКП с Gd_2O_3 .

Геометрия упрощенных расчетных моделей представлена на Рис. 1.1.5.4–1.1.5.6.

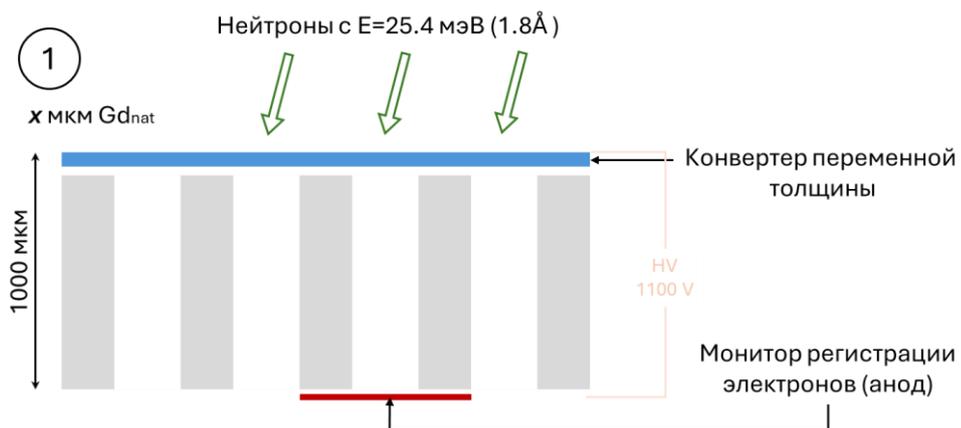


Рис. 1.1.5.4. Модель детектора с конвертером из ^{nat}Gd переменной толщины.

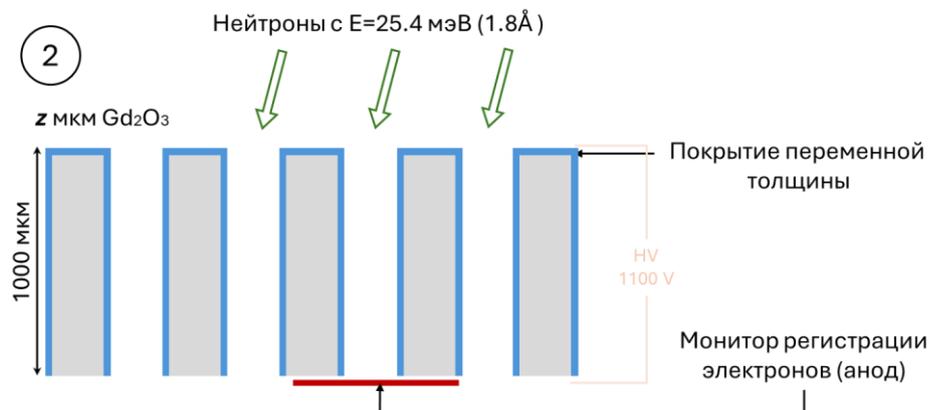


Рис. 1.1.5.5. Модель детектора с ALD-покрытием переменной толщины из Gd_2O_3 .

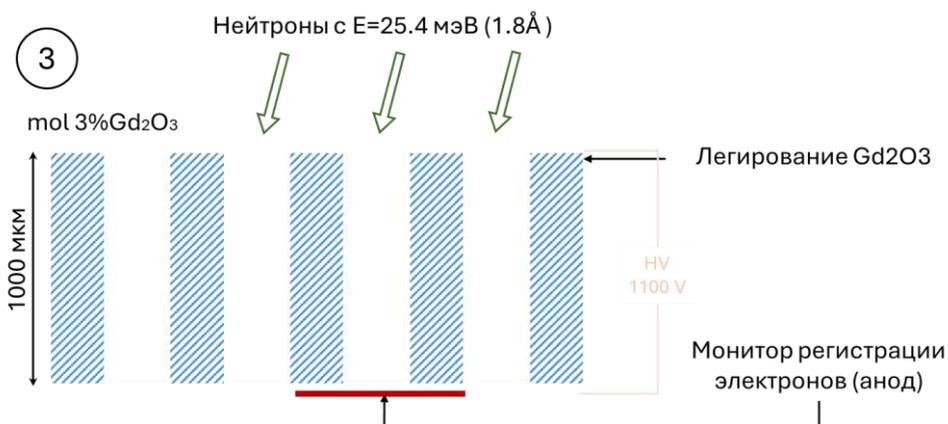


Рис. 1.1.5.6. Модель детектора с легированным стеклом МКП с Gd_2O_3 .

В настоящей работе прежде всего рассматривались нейтроны с длиной волны 1.8 \AA . Перед началом моделирования было выбрано программное средство для решения данной задачи и разработаны расчетные модели.

1.1.5.1 Выбор программного комплекса для моделирования

Известными средствами моделирования переноса излучения на основе метода Монте-Карло являются MCNP [6], FLUKA [16], PHITS [8] и GEANT4 [9]. Широкое распространение в последнее время получил код PHITS, при этом, для моделирования детекторных систем часто используют GEANT4. Далее коротко представлено описание и назначение данных расчетных кодов.

GEANT4 — это открытая платформа для моделирования переноса частиц с помощью метода Монте-Карло. Код позволяет детально моделировать взаимодействие широкого спектра частиц (от нейтронов и фотонов до тяжёлых ионов) в материалах с точностью, обусловленной физическими моделями, проверенными на экспериментальных данных.

Платформа применяется в физике высоких энергий, медицинской физике (лучевая терапия, детектирование), космических исследованиях, радиационной защите и ядерной инженерии, включая моделирование захвата нейтронов в материалах с высоким сечением, таких как гадолиний. GEANT4 обеспечивает гибкость для адаптации под специфические задачи, включая создание собственных детекторов и источников излучения, что делает её инструментом для фундаментальных и прикладных исследований в ядерной физике. Данный пакет реализован на языке программирования C++, который является гибким инструментом для написания собственных модулей и подпроектов.

PHITS — это универсальный пакет, использующий метод Монте-Карло для моделирования переноса частиц. Код способен моделировать транспорт частиц в широком диапазоне энергий, используя различные модели ядерных реакций и библиотеки ядерных данных. PHITS применяется в исследованиях по нейтронной (тепловые и быстрые нейтроны) и гамма физике, лучевой терапии, космической радиации, а также во многих других областях, связанных с переносом частиц и тяжёлых ионов. Данный пакет реализован на языке программирования FORTRAN, что является крупным преимуществом относительно скорости набора статистики.

В настоящей работе основным расчетным инструментом был выбран код PHITS. Для нейтронов с энергией ниже 20 мэВ PHITS использует библиотеки оцененных ядерных данных, таких как ENDF/B-VIII.0 [10], JENDL-4/HE [11], JEFF-3.3 [12], основанные на экспериментальных измерениях. Библиотеки содержат детальную информацию о сечениях реакций, угловых и энергетических распределениях вторичных частиц, включая конверсионные электроны и гамма-излучение при захвате.

Важной особенностью PHITS в этом диапазоне является поддержка точного учёта тепловых нейтронов (энергия ~ 0.025 эВ) и их взаимодействия с материалами с высоким сечением захвата, такими как ^{10}B , ^6Li , ^{155}Gd и ^{157}Gd . Код корректно моделирует вторичные продукты реакций — например, альфа-частицы и ионы лития при захвате на боре, или гамма-кванты и внутренне конвертированные электроны при захвате на гадолинии. Это особенно важно для задач, связанных с детектированием нейтронов, радиационной защитой и разработкой нейтронно-чувствительных сенсоров (например, МКП, легированных Gd_2O_3).

В GEANT4 также существует возможность подключения библиотек для работы с тепловыми нейтронами, однако это зачастую сопряжено с более тонкой настройкой пакета и необходимостью верификации данных, что делает процесс менее гибким.

К основным недостаткам пакета PHITS при решении задачи с эффективностью МКП является отсутствие возможности взаимодействия вторичных электронов с внешним электромагнитным полем, из-за чего решение задачи формирования корректного каскада электронов в каналах МКП не представляется возможным. Однако эта проблема была решена с помощью модуля набора вторичной статистики, которая позволила генерировать вторичное излучение как первичное. Алгоритм генерации/записи вторичных электронов и формирования собственного dump-файла представлен на Рис. 1.1.5.7.

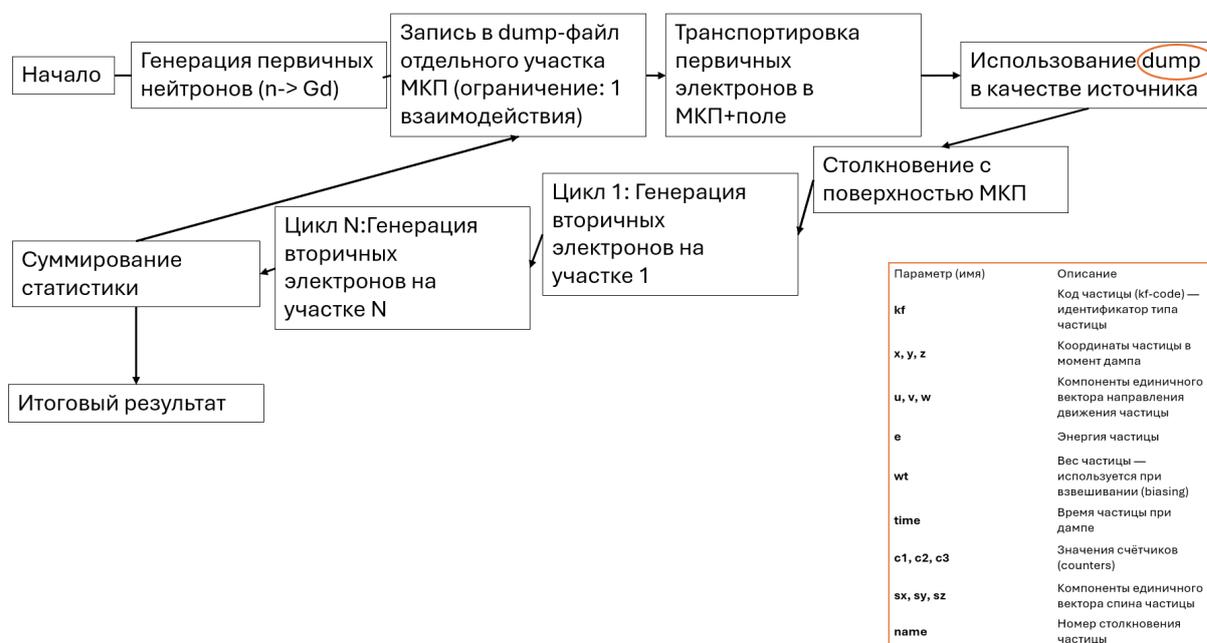


Рис. 1.1.5.7. Алгоритм формирования файла-источника вторичных электронов.

Принцип формирования поля вторичных электронов следующий: при взаимодействии нейтрона с ядром гадолиния образуются электроны, информация о которых записывается в dump-файл с помощью внутренних функций PHITS. Далее данные электроны используются в виде источника начальных частиц для МКП и электромагнитного поля, приложенного к нему. При взаимодействии электронов источника с МКП и генерацией вторичных электронов, происходит запись состояния и сохранение параметров вторичного электрона на участке канала длиной l .

На следующем шаге процедура повторяется с тем лишь отличием, что источник электронов смещается на величину l ближе к аноду. Точность моделирования напрямую зависит от цилиндра радиусом равным радиусу канала МКП и высотой l . Уменьшение данной переменной приводит к значительному росту расчетного времени. Далее выполняется интегрирование по длине канала

МКП и формирование распределенного по длине канала источника вторичных электронов (рис. 1.1.5.8).

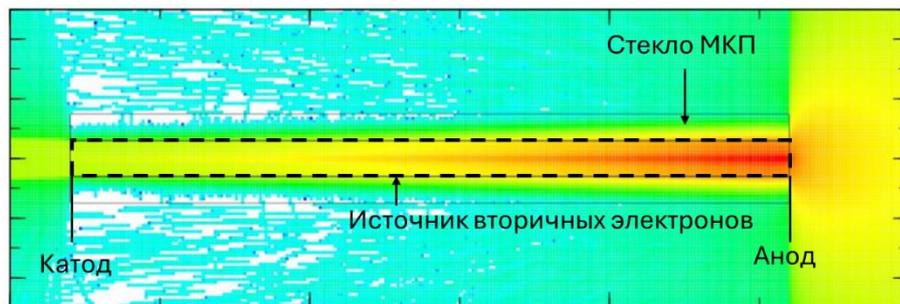


Рис. 1.1.5.8. Пример расчета с распределенным вдоль канала МКП источником вторичных электронов.

Основным недостатком данного способа моделирования является то, что при рассмотрении нескольких каналов МКП для учета влияния друга на друга, расчетное время значительно увеличивается, т.к. необходимо выполнять итерационно формирование источника вторичных электронов в каждом отдельно взятом канале. Для решения качественной задачи определения эффективности вполне достаточно использования структуры, состоящей из 7 каналов МКП.

1.1.5.2 Описание расчетной модели и методика моделирования

Принципиальные модели для различных вариантов МКП были представлены ранее на Рис. 1.1.5.4–1.1.5.6. Толщина МКП принималась равной 1 мм. Диаметр каналов составляет $d = 15$ мкм, шаг решетки $h = 19$ мкм, угол наклона каналов к вертикали составляет $\alpha = 7$ градусов, потенциал ускоряющего поля принимался равным 1100 В. Расчетная модель в горизонтальной и вертикальной плоскостях представлена на Рис. 1.1.5.9.

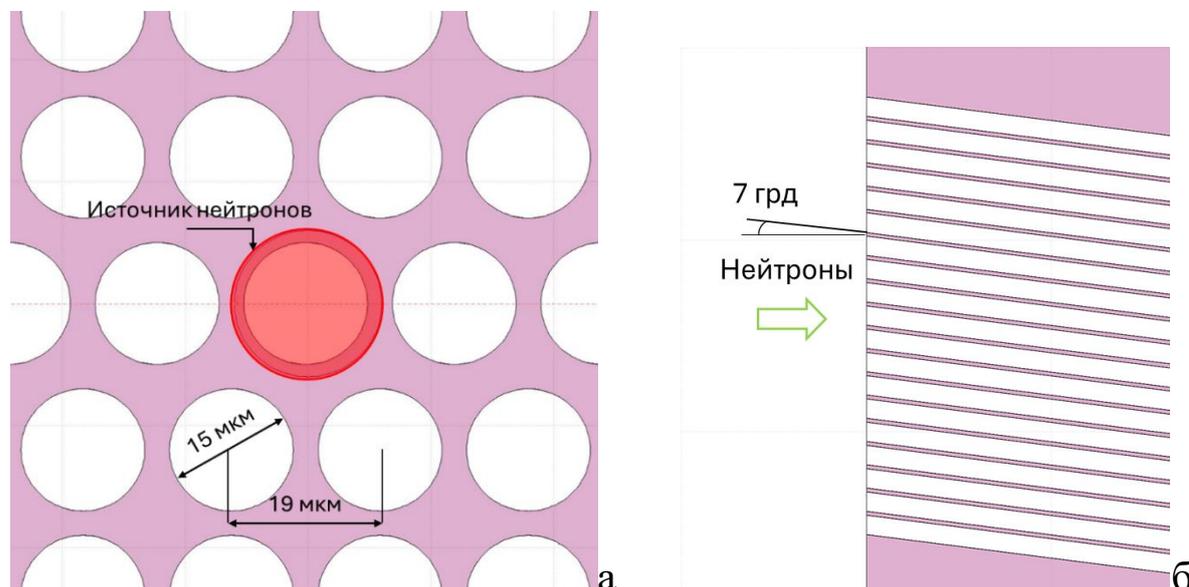


Рис. 1.1.5.9. Расчетная модель МКП: а – горизонтальное сечение расчетной модели, б – вертикальное сечение расчетной модели.

Плоскопараллельный пучок тепловых/холодных нейтронов диаметром 20 мкм налетает на МКП, конструкция которой реализована в трех исполнениях (Рис. 1.1.5.4–1.1.5.6). Для оценки

эффективности детектирования излучения был принят общеизвестный подход, описанный в [13] (1.5.1.1):

$$P = P_1 \cdot P_2 \cdot P_3, \quad (1.5.1.1)$$

где P_1 – вероятность захвата нейтрона в стекле МКП; P_2 – вероятность того, что продукты реакции захвата покинут зону взаимодействия и попадут в соседний канал; P_3 – вероятность, что эти продукты инициируют электронный каскад, регистрируемый электроникой чтения.

P_3 близка к 1 при правильном выборе напряжения на МКП. Вероятность P_1 возрастает с увеличением концентрации ядер гадолиния и уменьшением энергии нейтрона, что может быть оптимизировано путём изменения состава стекла и подбора геометрии МКП. Также известно, что угловая зависимость захвата нейтронов этим МКП в диапазоне $\pm 1^\circ$ часть входящих нейтронов проходит вдоль каналов без столкновений со стеклом, что снижает эффективность детектирования [13].

Реакция захвата нейтронов (n, γ) происходит на изотопах ^{155}Gd и ^{157}Gd , при которой испускание фотонов подавлено, а энергия передаётся орбитальным электронам. В результате, как было указано ранее, возникают сложные спектры конверсионных электронов и рентгеновского излучения. Вероятность превращения нейтрона в конверсионный электрон в реакциях с Gd-155 и Gd-157 составляет $P = 0.875$ [14]. Испускаемые фотоны и конверсионные электроны обладают высокой энергией и большей длиной пробега в подложке МКП по сравнению с продуктами реакции $^{10}\text{B}(n, \alpha)^7\text{Li}$. Энергия конверсионного электрона составляет примерно 29–131 кэВ [15].

Поскольку конверсионные электроны останавливаются значительно легче чем фотоны, их наиболее вероятный пробег в стекле МКП составляет 14–15 мкм, что означает локализацию событий нейтронного захвата преимущественно в одном-двух каналах [13]. Эффективность детектирования можно повысить за счёт уменьшения отношения площади отверстий к общей площади в МКП, легированной Gd.

1.1.5.3 Верификация расчетной модели

При выполнении моделирования для подтверждения корректности выбора расчетной модели, была выполнена верификация данных в части известных примеров оценки эффективности, представленных в статьях по МКП.

Модель 1: внешний слой из природного гадолиния

Согласно [16] оптимальная толщина внешнего слоя из природного гадолиния для пучка нейтронов с энергией $E = 25.3$ мэВ составляет примерно 6 мкм. На Рис. 1.1.5.10 представлена зависимость эффективности регистрации нейтронов с энергией $E = 25.3$ мэВ от толщины слоя из природного гадолиния и Gd-155.

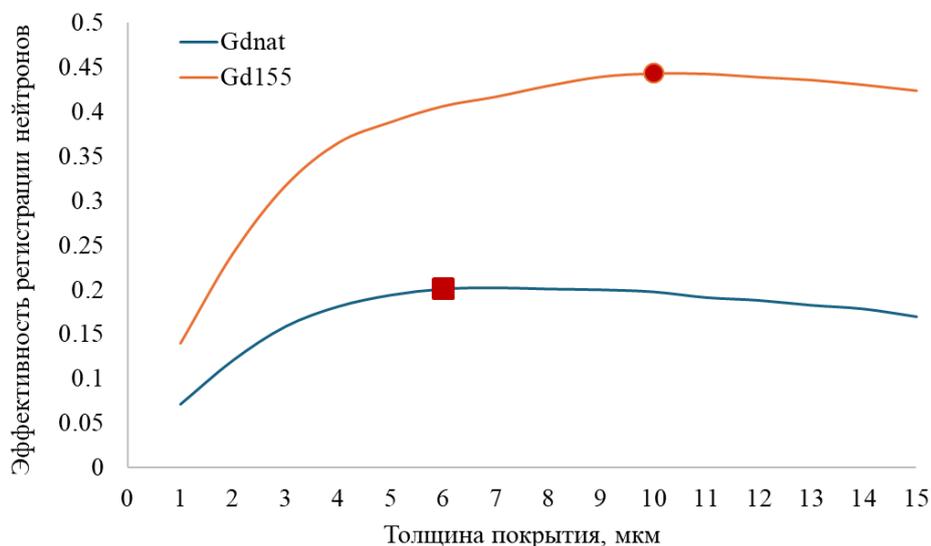


Рис. 1.1.5.10. Сравнение эффективности регистрации нейтронов для ^{nat}Gd и ^{155}Gd .

Оптимальная толщина конвертера из ^{nat}Gd и ^{155}Gd равна 6.1 мкм и 9.5 мкм, при эффективности конверсии 20% и 42% соответственно. Полученные результаты согласуются с данными, представленными в работе [16]: 19% (при 6 мкм) и 44% (при 9 мкм). Незначительное различие может быть связано с различными библиотеками сечений, который использовались для расчета.

Модель 2: ALD-покрытие Gd_2O_3 МКП

Для верификации модели с ALD-покрытием были использованы данные, представленные в работе [17]. На Рис. 1.1.5.11 показано сравнение эффективности регистрации нейтронов различных толщин покрытий из Gd_2O_3 для тепловых нейтронов, налетающих под разными углами к поверхности.

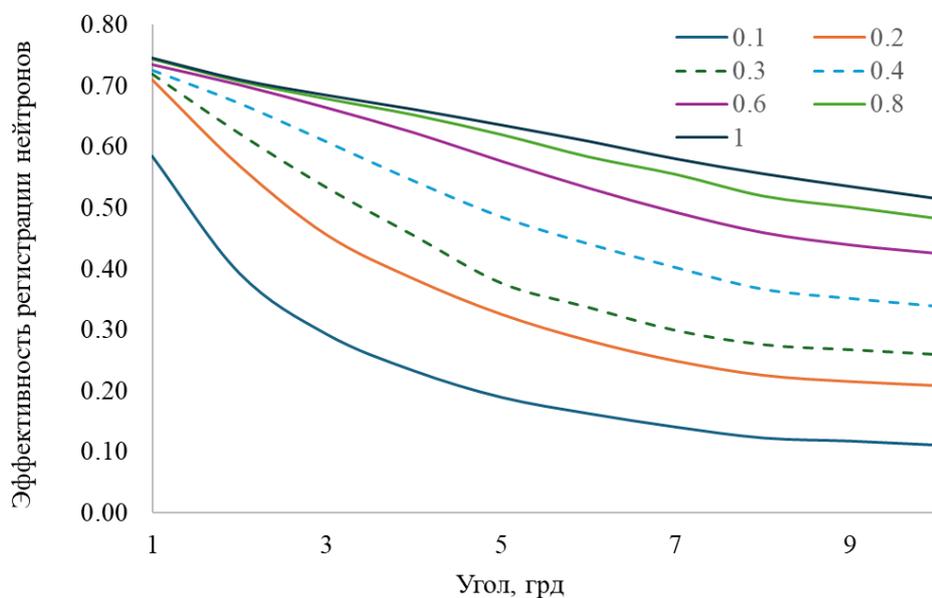


Рис. 1.1.5.11. Эффективность регистрации нейтронов различных толщин покрытий из Gd_2O_3 для тепловых нейтронов, налетающих под разными углами к поверхности.

Расчетная эффективность регистрации тепловых нейтронов для угла равного 1, для ALD-покрытий толщиной 0.3–0.4 мкм составляет примерно 75%. Полученный результат находится в согласии с данными, представленными в работе [17]: 73% при тех же толщинах покрытия.

Модель 3: Легирование Gd_2O_3 МКП

Так же, как и для модели 2, верификация расчетной модели 3 выполнялась на основе работы [17]. На Рис. 1.1.5.12 представлено сравнение эффективности регистрации нейтронов с различным содержанием (мол%) Gd_2O_3 в МКП для тепловых нейтронов, налетающих под разными углами к поверхности.

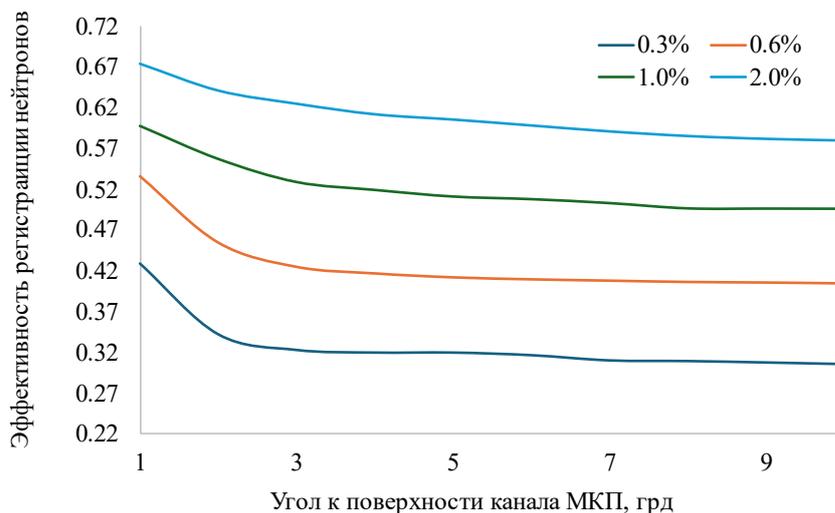


Рис. 1.1.5.12. Эффективность регистрации нейтронов с различным содержанием (мол%) Gd_2O_3 в МКП для тепловых нейтронов, налетающих под разными углами к поверхности

Полученные результаты эффективности незначительно отличаются от данных, изложенных в статье [17]. Исходя из представленных данных, можно сделать вывод о корректности выбранных расчетных моделей и библиотек оцененных ядерных данных. Учитывая факт, что, если принять вероятность $P_3 = 1$, итоговая эффективность зависит главным образом от энергии нейтрона и геометрии МКП.

1.1.5.4 Результаты моделирования

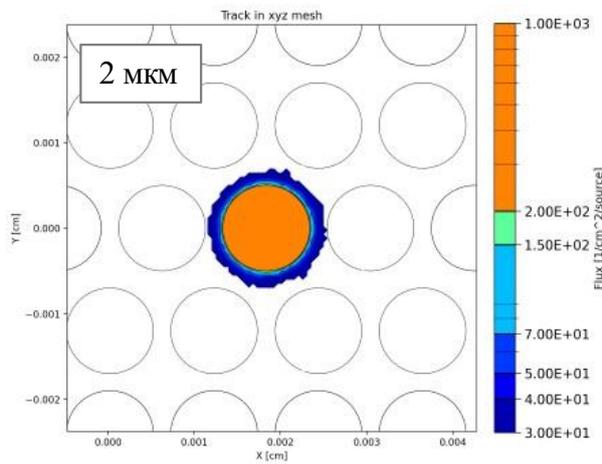
В данном разделе представлены результаты расчеты эффективности для трех различных моделей:

1. Внешний слой ^{nat}Gd на алюминиевой подложке.
2. ALD-покрытие на поверхности МКП.
3. Легирование стекла МКП.

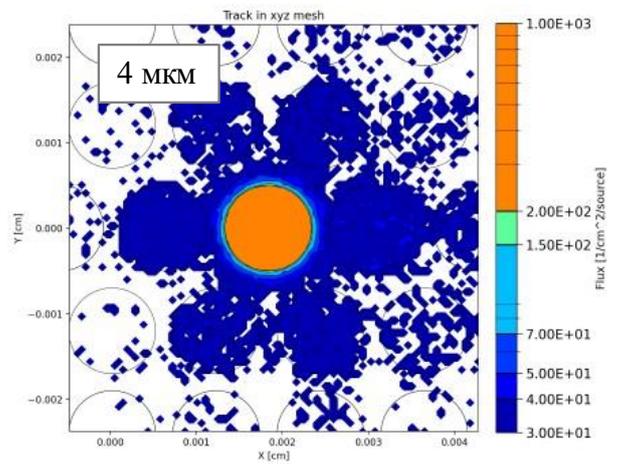
Максимальная погрешность для всех вариантов расчета эффективности составила не более 11% (модель 2).

Модель 1: внешний слой из ^{nat}Gd на отдельной подложке

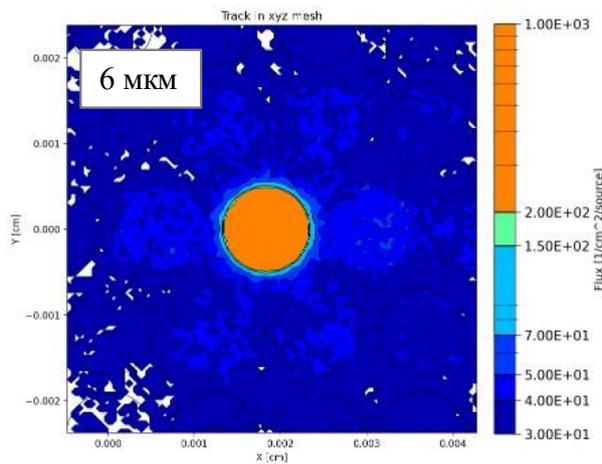
На Рис. 1.1.5.13 представлено распределение вторичных электронов (всех энергий) в позиции анода для одного канала МКП для различных толщин из природного гадолиния.



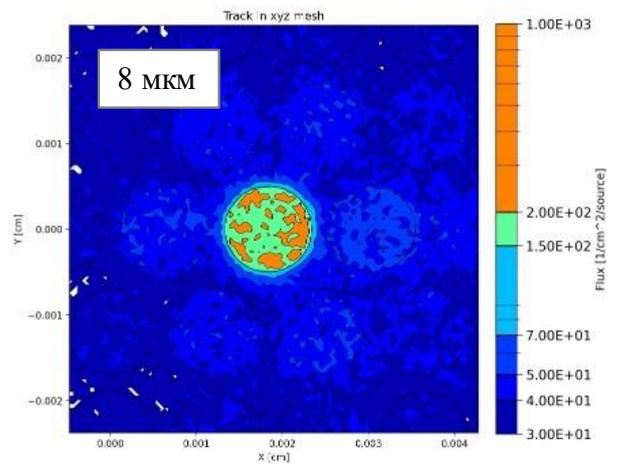
а) Толщина конвертера 2 мкм



б) Толщина конвертера 4 мкм



в) Толщина конвертера 6 мкм



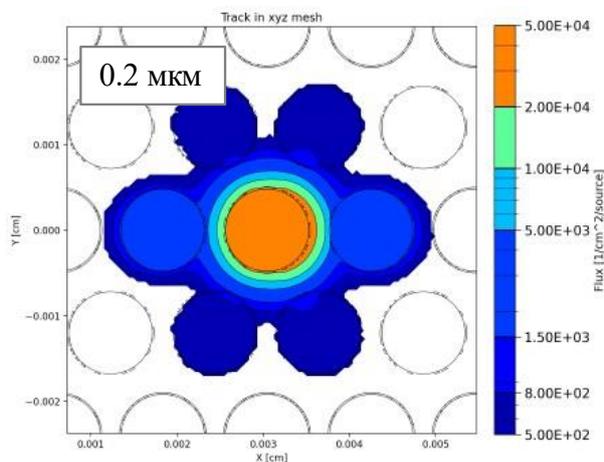
г) Толщина конвертера 8 мкм

Рис. 1.1.5.13. Распределение электронов в позиции анода для одного канала МКП со слоем из ^{nat}Gd переменной толщины.

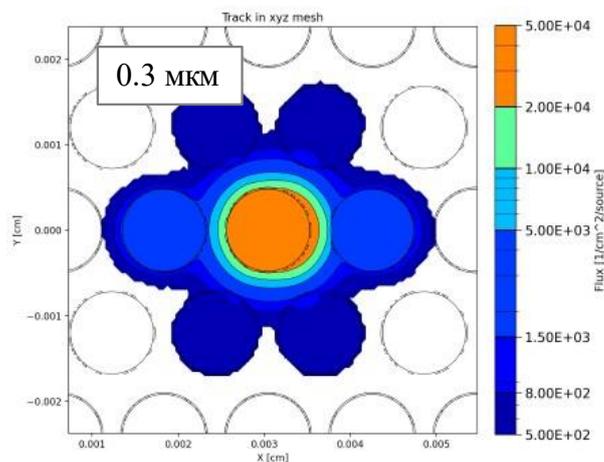
Наибольшее значение эффективности достигается, как было показано ранее, для толщины конвертера равной 6 мкм. Эффективность данного решения крайне невысокая и составляет порядка 20% для тепловых нейтронов с энергией $E = 23.5$ мэВ. Для холодных нейтронов с энергией $E = 5.0$ мэВ оптимальная толщина конвертера составляет 5 мкм при эффективности 33%. С увеличением толщины внешнего слоя для тепловых нейтронов до 8 мкм эффективность уменьшается незначительно, но при этом сильно ухудшается разрешение (Рис. 1.1.5.13).

Модель 2: ALD-покрытие Gd_2O_3 МКП

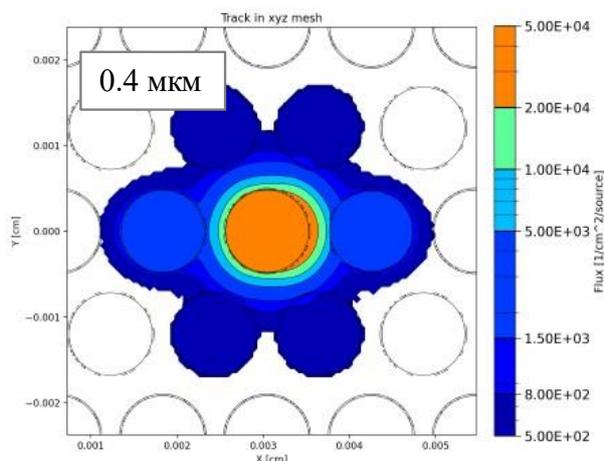
Эффективность и распределение вторичных электронов для покрытия из Gd_2O_3 различной толщины представлена на Рис. 1.1.5.14.



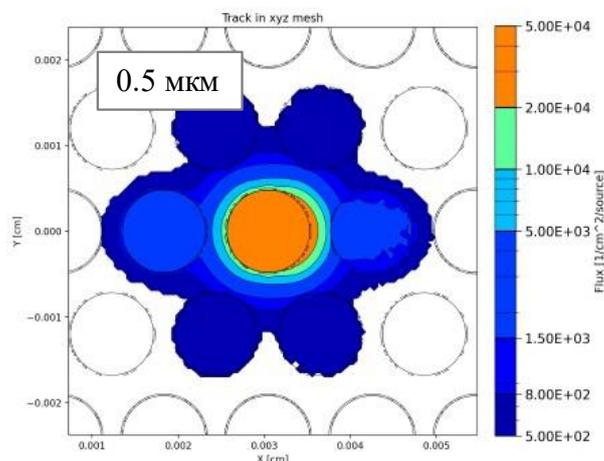
а) Толщина покрытия Gd_2O_3 0.2 мкм



б) Толщина покрытия Gd_2O_3 0.3 мкм



в) Толщина покрытия Gd_2O_3 0.4 мкм



г) Толщина покрытия Gd_2O_3 0.5 мкм

Рис. 1.1.5.14. Распределение электронов в позиции анода для одного канала МКП с покрытием из Gd_2O_3 переменной толщины.

Наибольшая эффективность для тепловых нейтронов достигается при толщине покрытия равной 0.35–0.4 мкм и составляет 54%. Следует отметить, что данная величина может значительно меняться и зависит от угла к поверхности, куда налетает пучок нейтронов. При тех же толщинах покрытия эффективность для холодных нейтронов составляет уже 72%. Распределение электронов в позиции анода для холодных нейтронов и толщины покрытия 0.4 мкм показано на Рис. 1.1.5.15.

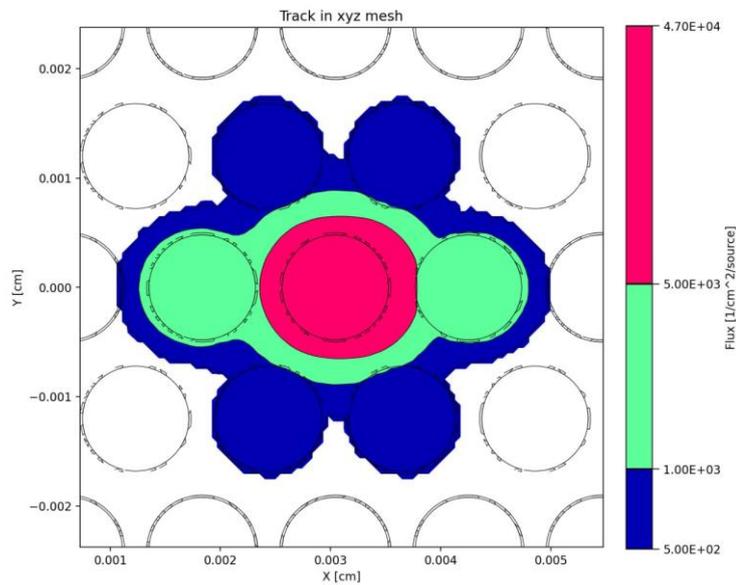


Рис. 1.1.5.15. Распределение электронов в позиции анода для одного канала МКП с покрытием 0.4 мкм из Gd_2O_3 для холодных нейтронов.

Следует отметить, что в данном случае толщина покрытия практически не влияет на разрешение. Связано это, вероятно, с малым диапазоном толщин, выбранных для моделирования: 0.2–0.5 мкм.

Модель 3: Легирование Gd_2O_3 в МКП

Эффективность и распределение вторичных электронов для 3% Gd_2O_3 в МКП представлено на Рис. 1.1.5.16.

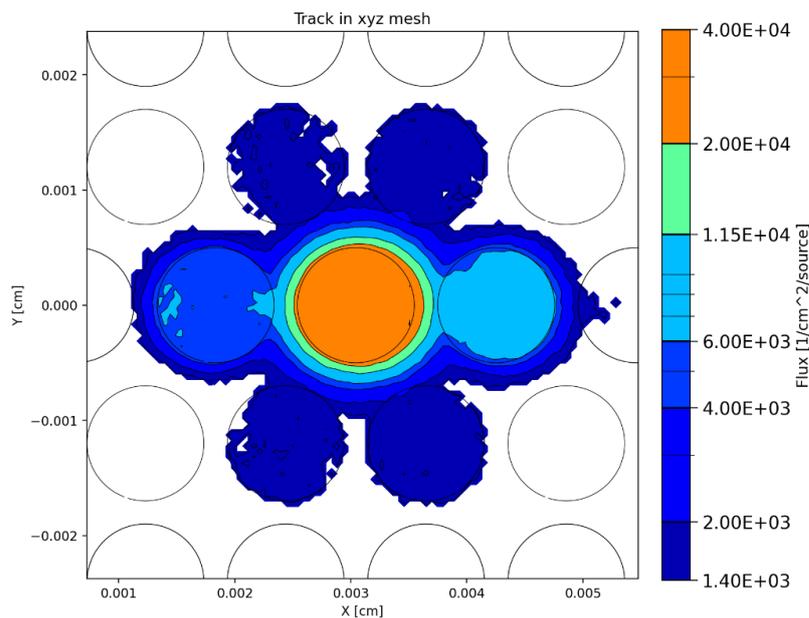


Рис. 1.1.5.16. Распределение электронов в позиции анода для одного канала МКП с легированием 3% моль Gd_2O_3 .

Для модели 3 было выбрано содержание Gd_2O_3 равное 3% моль, как указано в работе [17]. Эффективность для нейтронов тепловых энергий составила порядка 63%. Аналогичное значение для холодных нейтронов составило 75%.

1.1.5.5 Выводы

В настоящей работе была разработана расчетная модель и определены значения эффективности конверсии тепловых и холодных нейтронов для МКП с гадолинием для трех различных конструкций.

Эффективность конверсии для внешнего слоя из природного гадолиния составила 20% для тепловых нейтронов и 33% для холодных нейтронов при эффективной толщине 6 мкм и 5 мкм соответственно.

Для МКП с ALD-покрытием из Gd_2O_3 эффективность конверсии для выбранной расчетной модели для тепловых нейтронов составила 54% при толщине 0.3–0.4 мкм и 72% для холодных нейтронов.

При легировании МКП Gd_2O_3 в количестве 3% моль эффективность для тепловых нейтронов составляет 63%, а холодных 75%.

Наилучшим вариантом использования МКП с точки зрения эффективности конверсии является метод с легированием МКП Gd_2O_3 . При этом эффективность данной конструкции сравнима с ALD-покрытием для холодных нейтронов. Важно отметить, что эффективность конверсии и разрешение в значительной степени зависит от конкретного спектра нейтронов и геометрии МКП.

Полученные результаты полностью соответствуют п. 1.1.5 Плана-Графика работ в рамках исполнения обязательств по Соглашению № 075-10-2025-153 от 05 июня 2025 г.

ПРИЛОЖЕНИЯ

- Отчет о выполненных работах. ФАЙЛ: [ПГ 1.1.5 Отчет о выполненных работах.pdf](#)

1.1.6. Моделирование конфигурации нейтронографической установки с варьируемым разрешением на импульсном источнике нейтронов РАДЭКС ИЯИ РАН (совместно с ИЯИ РАН, Договор № 400-04794 от 21.07.2025 г.).

1.1.6.1 Введение

Современные нейтронные дифракционные исследования базируются на двух основных типах источников — реакторных и спалляционных. В реакторных установках нейтроны рождаются при делении ядер и затем замедляются в специальных модераторах до тепловых или холодных энергий. Такие нейтроны широко применяются для структурного анализа кристаллов, исследования магнитных свойств, а также изучения лёгких элементов и водородсодержащих соединений. В спалляционных источниках нейтроны образуются при взаимодействии ускоренных протонов с тяжёлой мишенью, что приводит к выбросу большого количества нейтронов с широким энергетическим распределением. Такие источники, как правило, работают в импульсном режиме и позволяют использовать метод времени пролёта (time-of-flight, TOF), обеспечивающий одновременное измерение широкого диапазона длин волн. В зависимости от конструкции модераторов и отражателей можно варьировать долю нейтронов различной энергии — от холодных до быстрых. Особый интерес представляют установки, в которых спектр нейтронов смещён в сторону эпитепловых энергий — от десятых долей до нескольких электронвольт. К таким системам относятся, например, дифрактометр EXCED[18] на спалляционном источнике KENS в Японии, а также ряд новых инструментов, разрабатываемых для источников ESS и SNS[19], где предусмотрены модераторы, эффективно использующие эпитепловую компоненту потока.

В работе приведена оценка возможных параметров новой нейтронной установки расположенной на источнике РАДЭКС ИЯИ РАН. Нейтронный источник РАДЭКС ИЯИ РАН предназначен для проведения экспериментов в области ядерной физики и физики конденсированных сред [20]. Его спектр включает быстрые, эпитепловые и тепловые нейтроны, с помощью которых можно изучать структуру и динамику конденсированных сред.

1.1.6.2 Установка с варьируемым разрешением на импульсном источнике нейтронов РАДЭКС ИЯИ РАН.

Для новой установки выбрано название «ВАРИАНТ». Её основная особенность — возможность варьировать разрешение не только за счёт угла детектора, но и длины времяпролётной базы, что позволяет настраивать требуемый диапазон длин волн и повышать разрешающую способность. На Рис. 1.1.6.1 представлена блок-схема установки.

Разрешение времяпролётного дифрактометра ($\Delta d/d$) можно выразить как:

$$\frac{\Delta d}{d} = \left[\left(\frac{\Delta t}{t} \right)^2 + \left(\frac{\Delta L}{L} \right)^2 + (\Delta \theta \operatorname{ctg} \theta)^2 \right]^{\frac{1}{2}}, \quad (1.1.6.1)$$

где L – длина пролётной базы, t – время пролета и θ – угол дифракции. Наилучшее разрешение достигается при углах рассеяния, близких к $2\theta = 180^\circ$. Неопределённость ΔL определяется размером детектора, а временная — длительностью импульса протонного пучка, временем замедления нейтронов и точностью время-цифрового преобразователя (ВЦП). В установке «ВАРИАНТ» предполагается варьирование длительности протонных импульсов в пределах 0.01–200 мкс, угла рассеяния и пролётных баз 7 и 30 м.

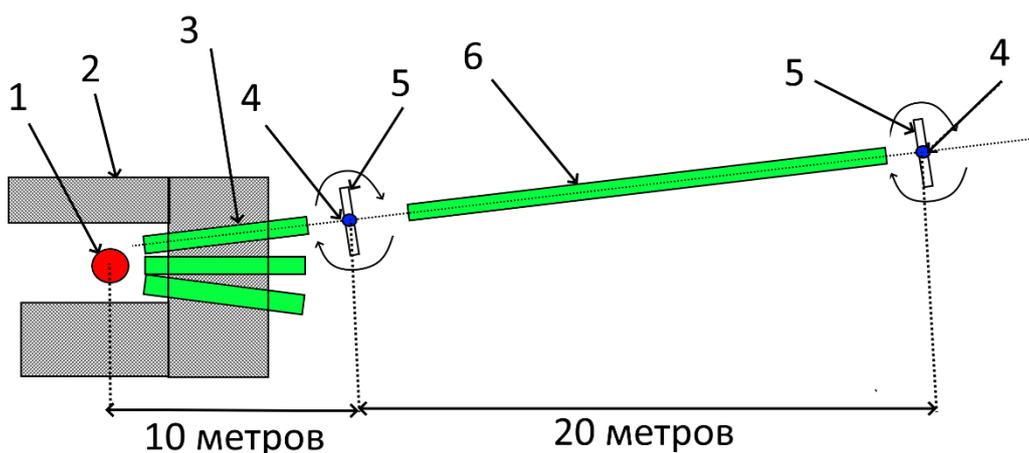


Рис. 1.1.6.1. Блок-схема установки: 1 – мишень, 2 – биологическая защита, 3 – нейтронный канал, 4 – место образца, 5 – кольцо детекторов, 6 – нейтронный канал.

Установка «ВАРИАНТ» предусматривает размещение детекторной системы на расстояниях 7 и 30 м от источника. В качестве детекторной системы используется кольцевой детектор, собранный из одиночных сцинтилляционных детекторов нейтронов.

На Рис. 1.1.6.2 представлена схема детекторной системы. Система состоит из детекторов (5), размещённых на кольце из борированного полиэтилена, на котором также установлены предусилители. Возможно дополнительное кадмирование для коллимации нейтронов и защиты предусилителей. Кольцо закреплено на системе поворота (2) с червячной передачей, обеспечивающей независимый поворот кольца и изменение диапазона разрешения. Образец

установлен со смещением от прямого пучка (рис. 1.2) для снижения фона от несущих элементов. Все части детектора закреплены на плите (1), жёстко фиксированной к столу.

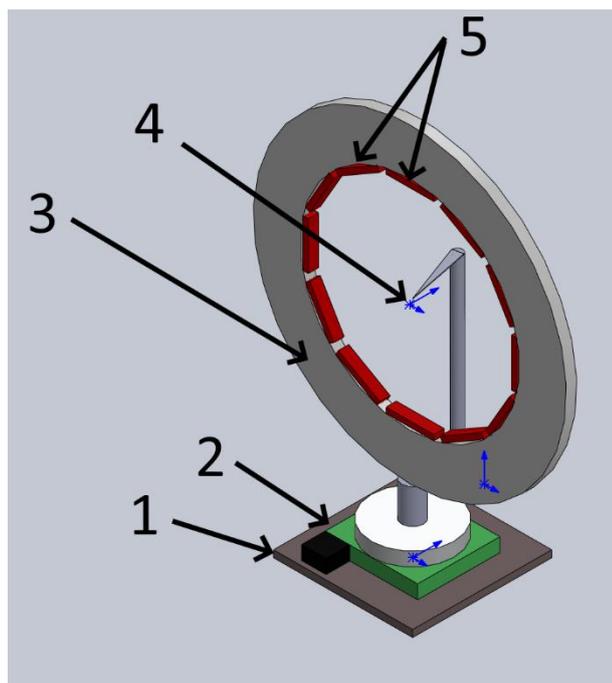


Рис. 1.1.6.2. Схематичное представление детекторной системы: 1 – крепление, 2 – система поворота на основе ШД, 3 – крепление и биозащита детекторов, 4 – место крепления образца, 5 – детекторы нейтронов.

1.1.6.3 Моделирование нейтронной системы источника РАДЭКС и установки ВАРИАНТ

1.1.6.3.1 Набор оценочных параметров источника РАДЭКС

Для оценки возможностей разрабатываемой дифракционной установки РАДЭКС ориентируемся на ключевые параметры, определяющие качество порошковой дифракции. В первую очередь важна плотность нейтронного пучка на образце, поскольку она определяет статистическую точность измерений и скорость получения данных: высокая плотность позволяет регистрировать как сильные, так и слабые дифракционные пики за разумное время эксперимента. Вторым критическим параметром является энергетическое распределение нейтронов, которое влияет на разрешающую способность и корректность определения кристаллической структуры: узкий и стабильный спектр длин волн обеспечивает чёткое разделение дифракционных пиков, тогда как широкий спектр увеличивает интенсивность, но снижает точность измерений. Наконец, разрешение дифракционной установки определяет способность различать близко расположенные пики и зависит от комбинации параметров источника, направляющих, фильтров и геометрии детектора. Высокое разрешение необходимо для точного анализа фазового состава и межплоскостных расстояний в образцах. Совокупная оценка этих параметров — плотности пучка, спектрального распределения и разрешения — позволяет прогнозировать производительность установки РАДЭКС и оптимизировать её проектные характеристики для проведения качественных и надёжных измерений порошковой дифракции.

1.1.6.3.2 Математическая модель конфигурации установки

Формулы для расчета оценочных параметров в общем виде:

Плотность пучка на образце:

$$\Phi = \frac{N_n}{Ab\Delta t} \left(\frac{\text{Н}}{\text{см}^2\text{с}} \right), \quad (1.1.6.2)$$

где N_n – число нейтронов в импульсе, Ab – площадь пучка на образце, Δt – длительность импульса.

Спектральное распределение $f(E)$:

В общем виде нормированная функция:

$$\int_0^{\infty} f(E)dE = 1 \quad (1.1.6.3)$$

В случае времяпролетного источника принимает вид:

$$E(t) = \frac{m_n L_{\text{общ}}^2}{2t^2}, \quad (1.1.6.4)$$

$$f(t) = f(E(t)) \left| \frac{dE}{dt} \right|, \quad (1.1.6.5)$$

$$f(E) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}\sigma_e} \exp \left[-\frac{(E - E_0)^2}{2\sigma_e^2} \right], \quad (1.1.6.6)$$

где E_0 – средняя энергия, σ_e – разброс энергий в пучке, $L_{\text{общ}}$ – расстояние источник детектор.

Разрешение σ_t :

$$\sigma_t^2 = \sigma_{t_0}^2 + \left(\frac{\sigma_L}{V} \right)^2 + \left(\frac{t}{2E} \sigma_E \right)^2, \quad (1.1.6.7)$$

где σ_{t_0} – ширина временного импульса источника, σ_E – ширина спектра, σ_L – геометрическое разрешение (разброс пути), V – скорость нейтрона(энергия).

В общем виде расчёт параметров нейтронной дифракционной установки представляет собой сложную многопараметрическую задачу. Аналитические методы, как правило, не позволяют проследить полный путь нейтрона от источника до детектора и ограничиваются лишь оценкой отдельных характеристик установки и ожидаемых экспериментальных величин. Это существенно затрудняет одновременный анализ пространственных, энергетических и временных параметров нейтронного пучка.

Для решения подобных задач широко применяются методы Монте-Карло моделирования, реализованные в специализированных программных пакетах. Такие подходы позволяют учитывать процессы рассеяния, отражения, поглощения, влияние гравитации, геометрию установки и другие факторы, обеспечивая реалистичное описание переноса нейтронов и формирование детектируемого сигнала.

Математическая модель конфигурации установки ВАРИАНТ разработана в программе моделирования McStas. McStas это программный пакет для моделирования нейтронных экспериментов методом Монте-Карло. Он позволяет рассчитывать поведение нейтронов в различных компонентах нейтронных инструментов, таких как источники, направляющие, фильтры, образцы и детекторы. Основное преимущество McStas заключается в возможности предсказания распределений энергии, времени пролёта, угловых и пространственных характеристик нейтронного потока без необходимости проведения реального эксперимента.

В ходе данной работы было проведено моделирование возможных конфигураций нейтронной системы источника РАДЭС для проектируемой установки “ВАРИАНТ”, схематическое изображение которой представлено на Рис. 1.1.6.3: источником нейтронов в данном случае выступает вольфрамовая мишень с водяным замедлителем толщиной 25 мм. Для доставки нейтронов к дифрактометру используется один из горизонтальных каналов источника. Каналы представляют из себя вакуумные трубы сечением 100 и 200 мм соответственно

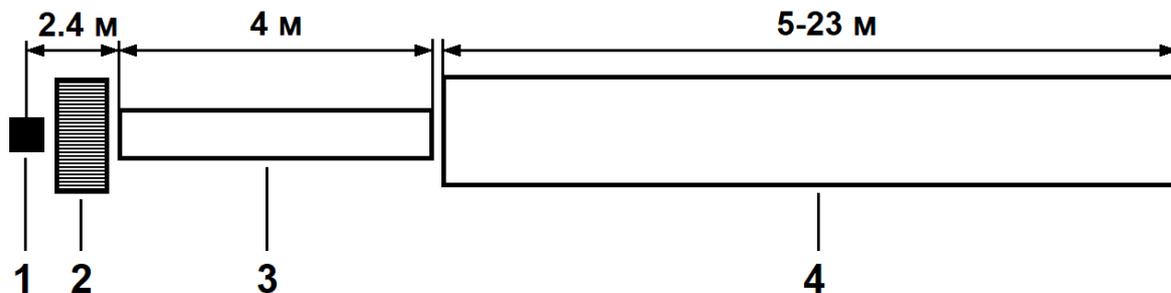


Рис. 1.1.6.3. Система транспортировки нейтронов источника РАДЭКС: 1 - вольфрамовая мишень, 2 - водяной замедлитель нейтронов, 3 - вакуумная труба диаметром 100 мм, 4 - вакуумная труба диаметром 200 мм.

В ходе моделирования первостепенной задачей было рассмотрение возможностей нейтронных труб, которые можно было бы поместить внутри второй вакуумной трубы источника, диаметром 200 мм (Рис. 1.1.6.3). Были смоделированы нейтронные трубы с квадратным поперечным сечением, которые могут выступать в качестве коллиматоров одновременно в вертикальной и горизонтальной плоскостях нейтронного пучка, включая прямые нейтронные трубы постоянного сечения и трапециевидные нейтронные трубы-концентраторы переменного сечения. Длина моделируемых нейтронных труб составляла 5 м и 23 м, что соответствует возможным узлам расположения экспериментальных установок на канале источника.

Сечение входа трапециевидного нейтронного канала составляет 100x100 мм, что позволяет ему захватывать весь нейтронный поток в прямой видимости от замедлителя на расстоянии 4 м. Сечение выхода трапециевидного нейтронного канала составляет 50x50 мм. Постоянное сечение прямого нейтронного канала также составляет 50x50 мм соответствует диаметру коллимирующих отверстий в трубах канала РАДЭКС (50 мм). При моделировании нейтронных труб были исследованы их конфигурации с суперзеркальным покрытием с показателем отражения нейтронов $m=2$, $m=3$ и $m=4$ (где $m=1$ соответствует показателю отражения природного никеля).

Были получены графики спектрального переноса и расходимости нейтронного пучка, подводимого к узлу образца по каналу РАДЭКС. Результаты моделирования приведены на Рис. 1.1.6.4–1.1.6.5. Как можно видеть, трапециевидный нейтронный канал дает наибольший выигрыш в интенсивности нейтронного пучка, ценой ухудшения коллимации подаваемого на образец нейтронного пучка.

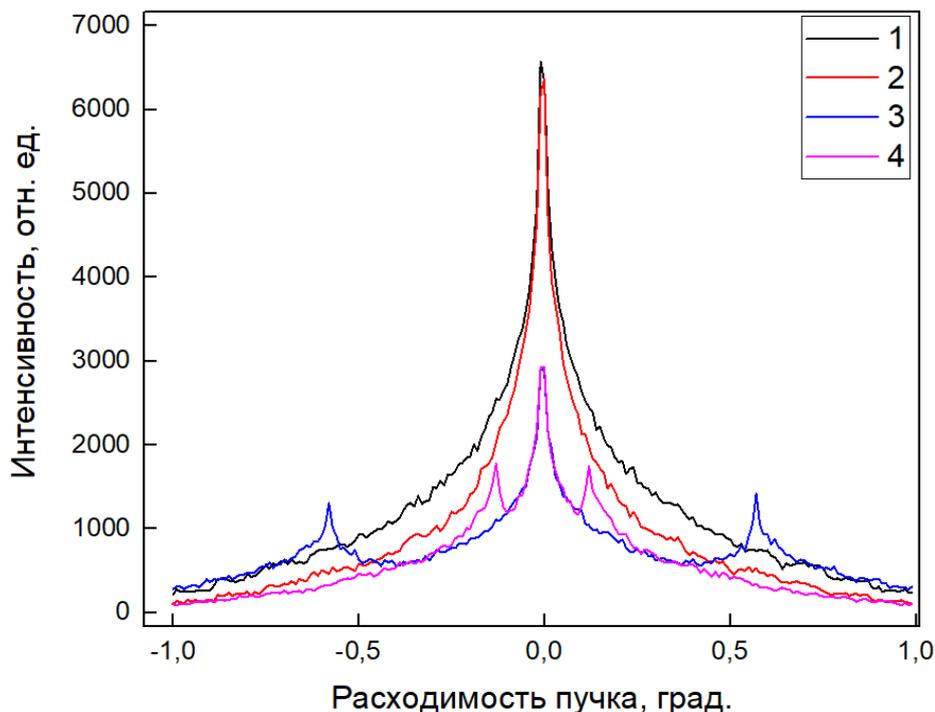


Рис. 1.1.6.4. Расходимость нейтронного пучка источника РАДЭКС на выходе из прямых и трапецевидных нейтронных волноводов различной длины с показателем $m=2$: линейный нейтронный волновод длины 1-5 м, 2-23 м, трапецевидный нейтронный волновод длины 3-5 м, 4-23 м.

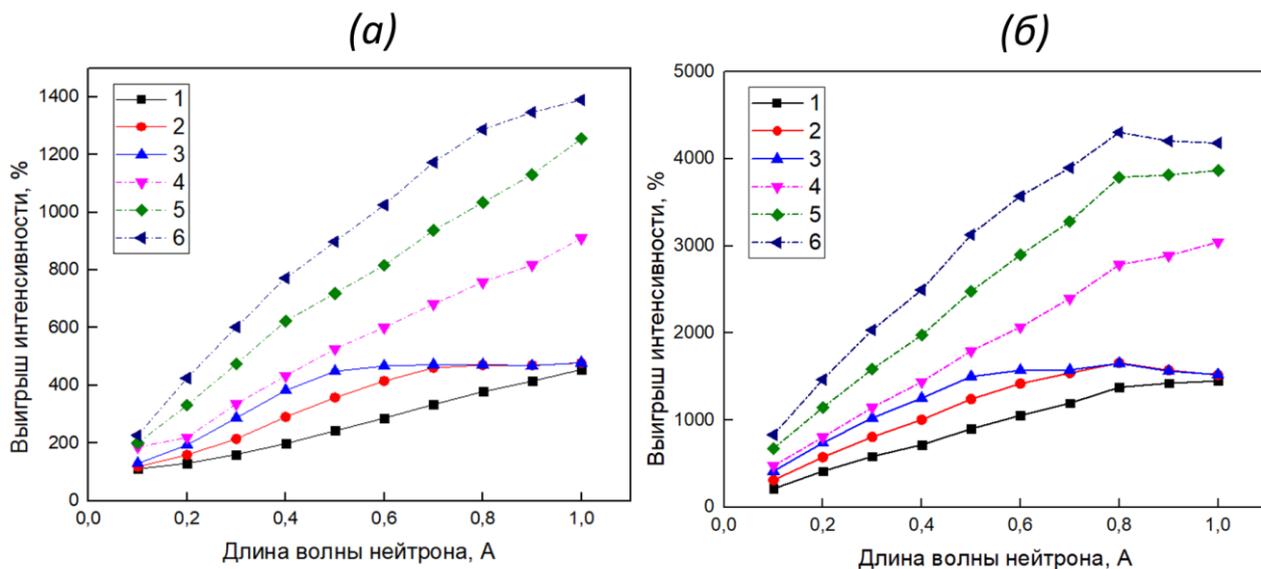


Рис. 1.1.6.5. Спектральный перенос нейтронов от источника РАДЭКС в прямых и трапецевидных нейтронных волноводах длины 5 м (а) и 23 м (б) в процентном сравнении с коллимирующей трубой диаметра 50 мм такой же длины: прямой нейтронный волновод, 1 – $m=2$; 2 – $m=3$; 3 – $m=4$, трапецевидный нейтронный волновод; 4 – $m=4$; 5 – $m=5$;

Трапецевидный нейтронный волновод также видоизменяет всю спектральную область нейтронов ниже 1 Å, в то время как для прямого можно добиться сохранения спектра нейтронов выше 0.5 Å. Кроме того, в ходе моделирования поток нейтронов из замедлителя в прямой видимости канала 3 был распределен равномерно по всему его сечению. В реальности концентрация нейтронов может уменьшаться при отдалении от оси пучка, что потенциально уменьшает эффективность

трапецевидного нейтронотода, которая достигается за счет сбора нейтронов с большей площади сечения канала.

Еще одной задачей в ходе моделирования было подробное рассмотрение возможности использования малого нейтронотода-концентратора, которым на данный момент уже располагает ИЯИ РАН. Нейтронотод представляет из себя трапецевидный канал длиной 0.995 м, с переменным прямоугольным сечением. Сечение входа нейтронотода составляет 27x56 мм, сечение выхода - 10x40 мм, показатель отражения нейтронов внутренней зеркальной поверхности $m = 2$. Нейтронотод расположен внутри узкой части канала РАДЭКС диаметром 100 мм так, что его выход находится на расстоянии 10 см от выходного коллиматора-щели канала, что обусловлено особенностями конструкции вакуумной трубы.

Между секциями канала диаметром 100 мм и 200 мм также возможно размещение экспериментальной установки, в связи с чем было подробно рассмотрено распространение нейтронного пучка прошедшего через короткий нейтронотод и щель-коллиматор первой секции канала (пролетная база источник-детектор в такой конфигурации может составлять 6.5-7 м). На Рис. 1.1.6.6 приведено распределение интенсивности нейтронного пучка вдоль оси его распространения в вертикальной плоскости.

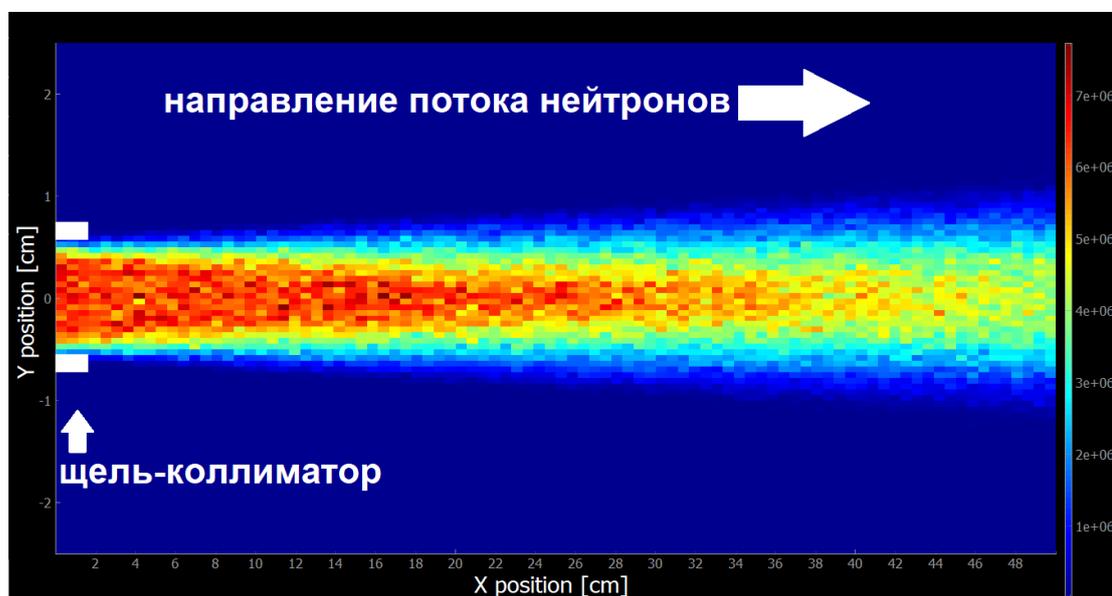


Рис. 1.1.6.6. Интенсивность нейтронного пучка вдоль оси его распространения при выходе из начальной секции канала РАДЭКС при установке в него нейтронотода-концентратора

Был проведен численный эксперимент по рассеянию нейтронов на поликристаллическом образце для проектируемой экспериментальной установки на канале источника РАДЭКС. В качестве образца использовался поликристалл железа прямоугольной формы размером 5x2x2 см. В качестве детектора использован нейтронный счетчик 5x0.5 см, установленный под углом дифракции $2\theta = 90^\circ$. Рассмотрены конфигурации установки с пролетными базами 7 м и 30 м. Для пролетной базы 7 м проводилось моделирование с- и без нейтронотода-концентратора, для пролетной базы 30 м рассмотрен вариант без концентратора. Были получены времяпролетные спектры нейтронов в модельном эксперименте для обоих вариантов пролетной базы установки, при этом производилось суммирование счета нейтронов под тремя различными углами расположения детектора. На их основании проведена оценка разрешения эксперимента как отношение ширины на полувысоте пика, соответствующего 1.6 Å. Для пролетной базы 7 м с нейтронотодом-

концентратором она составляет $2.9 \pm 0.4\%$, для пролетной базы 7 м без концентратора - $3.2 \pm 0.4\%$, для пролетной базы 30 м без концентратора - $2.2 \pm 0.3\%$. Стоит отметить, что при моделировании принималось что тепловые нейтроны, не попавшие в нейтронвод-концентратор, полностью поглощаются биозащитой источника и коллиматорами внутри канала. В противном случае разрешающая способность установки без концентратора может быть ниже.

Также было проведено сравнение интенсивности попадающего на образец нейтронного пучка в данных конфигурациях установки. На Рис. 1.1.6.7 приведено сравнение спектров интегрального потока нейтронов, пришедшего на 1 см^2 поверхности образца в центре пучка за условный промежуток времени от импульсного источника одинаковой интенсивности. Как можно видеть, для случая когда образец не утопает в пучке от нейтронвода-концентратора, использование последнего может быть сопряжено с потерями в области спектра с длиной волны $\lambda < 1.6 \text{ \AA}$, но при этом все еще можно ожидать выигрыша интенсивности потока нейтронов более низких энергий. Для пролетной базы 30 м поток нейтронов от источника падает на 1-2 порядка (примерно в 20 раз для области спектра около 1.6 \AA).

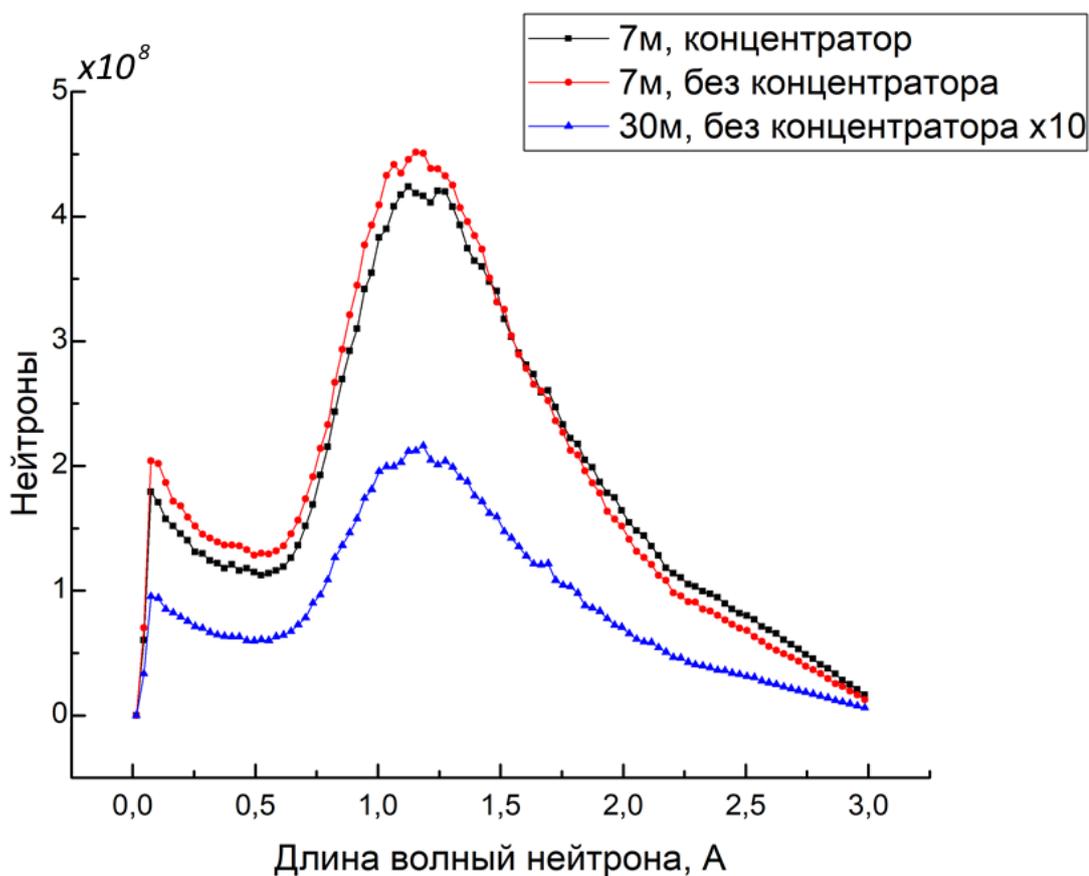


Рис. 1.1.6.7. Спектр нейтронов, пришедших на 1 см^2 поверхности образца в центре нейтронного пучка для различных конфигураций установки

1.1.6.4 Заключение

В ходе Монте-Карло моделирования были рассмотрены варианты модификации системы доставки нейтронного пучка источника РАДЭКС ИЯИ РАН к возможным экспериментальным установкам. Выигрыш в интенсивности нейтронов при пролетной базе 23 м может составлять порядка 30-40 раз по сравнению со стандартной трубой-коллиматором, при условии использования суперзеркал с показателем $m = 4$ и более. Расходимость пучка в случае линейного нейтронвода

изменяется незначительно, а для трапециевидного - увеличивается на 0.5-0.7 градуса и составляет 1-1.2 градуса. При этом появляются дополнительные экстремумы расходимости, обусловленные скольжением нейтронов, вдоль расположенных под углом к оси канала отражающих поверхностей. Получено спектральное распределение нейтронов (Спектр нейтронов) на источнике РАДЭКС и установки ВАРИАНТ, а также плотности пучка и количества нейтронов при различных типах нейтронновода.

Также была рассмотрена возможность установки малого нейтронновода в первую (более узкую, $d = 100\text{мм}$) секцию канала РАДЭКС. Получены зависимости интенсивности нейтронного пучка от расстояния до выхода нейтронновода. Установлено, что данный нейтронновод не вносит существенных изменений в текущий спектр источника, однако при модернизации РАДЭКС с использованием холодного замедлителя можно ожидать увеличение потока нейтронов с длиной волны 5Å и более.

Проведен модельный эксперимент по дифракции нейтронов на поликристаллическом Fe при пролетных базах установки 7м и 30м, а также возможном использовании описанного выше малого нейтронновода-концентратора. На основании полученных результатов дана оценка разрешения возможной установки, которое в зависимости от пролетной базы и нейтронновода варьируется от $2.2\pm 0.3\%$ до $3.2\pm 0.4\%$ для угла дифракции $2\theta = 90^\circ$.

Полученные результаты полностью соответствуют п. 1.1.6 Плана-Графика работ в рамках исполнения обязательств по Соглашению № 075-10-2025-153 от 05 июня 2025 г.

ПРИЛОЖЕНИЯ

– Отчет о выполненных работах. ФАЙЛ: [ПГ 1.1.6 Отчет о выполненных работах.pdf](#)
– Мат. модель установки. ФАЙЛ: [ПГ 1.1.6 Приложение 1 \(Мат модель конфигурации установки\).pdf](#)

1.1.7. Разработка конструкции и моделирование оптических параметров одномерных позиционно-чувствительных сцинтилляционных детекторов размерами от 200 мм, определение координаты в которых основано на анализе амплитуды (совместно с ИЯИ РАН, Договор № 400-04794 от 21.07.2025 г.).

1.1.7.1 Введение

Сцинтилляционные детекторы тепловых нейтронов представляют собой один из наиболее эффективных и универсальных инструментов для регистрации медленных нейтронов. Их основное преимущество заключается в способности преобразовывать энергию ядерной реакции, происходящей при захвате нейтрона, в видимое излучение, которое затем может быть зарегистрировано чувствительным фотодетектором. Такой подход позволяет получить высокий уровень чувствительности, надёжность и широкий динамический диапазон регистрации.

Одним из ключевых достоинств сцинтилляционных детекторов является возможность гибкого выбора конструкции и геометрии. В отличие от газовых или полупроводниковых детекторов, сцинтилляционные системы легко масштабируются: можно изготавливать детекторы практически любых размеров и форм, включая плоские, цилиндрические, линейные и многосегментные конфигурации. Это особенно важно при создании комплексных измерительных систем, адаптированных под конкретные экспериментальные установки и задачи [21].

Кроме того, сцинтилляторы обладают способностью интегрироваться с различными типами фотодетекторов. Наиболее перспективным направлением в последние годы стало использование кремниевых фотоумножителей (SiPM), пришедших на смену традиционным фотомножительным трубкам. SiPM обеспечивают высокую эффективность регистрации фотонов, обладают

компактными размерами, нечувствительны к магнитным полям и имеют низкое рабочее напряжение. Их устойчивость к механическим воздействиям и возможность интеграции в плотные матрицы делают их особенно привлекательными для портативных и многоканальных детекторов [22].

Таким образом, сцинтилляционные детекторы тепловых нейтронов сочетают в себе высокую чувствительность, гибкость конструктивных решений и совместимость с современными фотодетекторами. Всё это делает их незаменимыми в широком спектре научных, прикладных и промышленных задач, включая нейтронографию, мониторинг ядерных реакторов, исследования материалов и безопасность на ядерных объектах.

В рамках данной работы, как продолжение исследований [23–25] в области одиночных сцинтилляционных детекторов нейтронов, были спроектирован и смоделирован образец детектора с возможностью пространственной локализации нейтронного взаимодействия.

Основной недостаток описанных ранее детекторов [23] это ограничение в длине детектора. Связано это с тем, что фотоны имеют затухание в объёме световода и тем самым ограничивают максимальную рабочую длину детектора. Целью данной работы было исследование оптических параметров детектора, имеющего 8 кремниевых фотоумножителей (SiPM), что позволяет использовать эффект градиентного ослабления сигнала для оценки координаты взаимодействия и неограниченно увеличивать длину детектора.

Принцип работы детектора основан на измерении амплитуды сигналов, получаемых множеством SiPM. Фотоны, возникающие в результате сцинтилляции, распространяются по световоду, испытывая затухание. Таким образом, амплитуда сигнала, зарегистрированного на SiPM, зависит от расстояния, пройденного фотонами: чем дальше от SiPM произошла вспышка, тем слабее будет сигнал. Следует также учитывать, что на форму и амплитуду сигнала влияет не только расстояние, но и тип покрытия внутренних поверхностей световода. Из-за множественных отражений часть фотонов может теряться или испытывать дополнительное рассеяние, что также сказывается на итоговой амплитуде. Эти факторы учитываются в процессе моделирования и анализа работы детектора.

1.1.7.2 Моделирование

В качестве модельного детектора выбран детектор по ЭСКД ЛНИЭКД.2Д. Внешний вид детектора представлен на Рис. 1.1.7.1. Детектор имеет длину активной части 480 мм. Размер световода 4x4x480 мм. На световоде изготовлено 8 посадочных мест с линзой типа “рыбий глаз” на которых крепятся кремниевые фотоумножители. Сцинтиллятор крепиться, с одной стороны, весь объём световода покрывается диффузным отражателем.

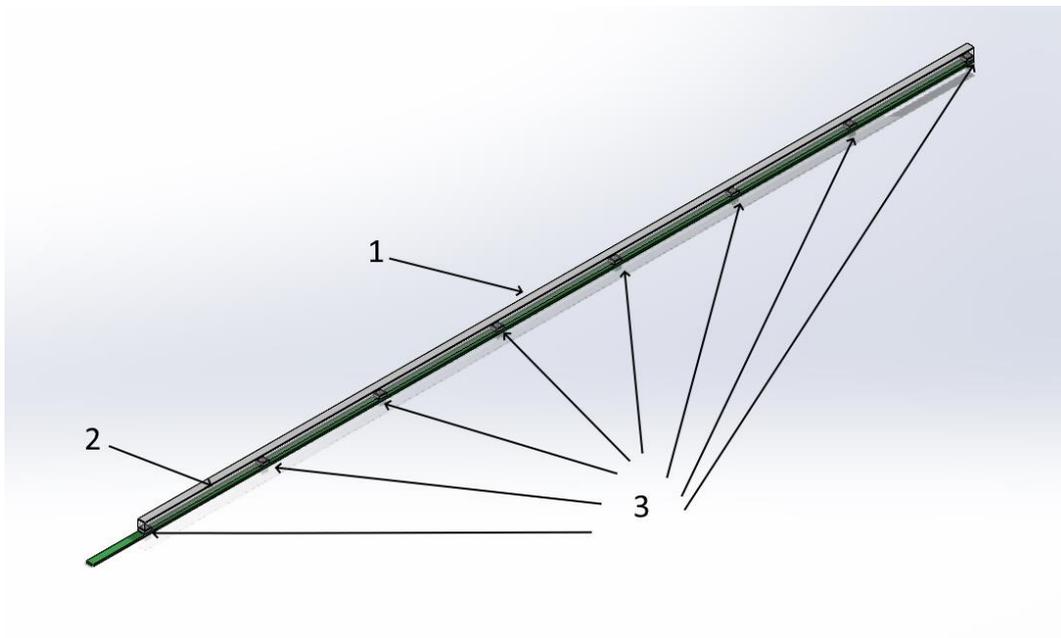


Рис. 1.1.7.1. Внешний вид детектора.

В качестве программы для моделирования использована программа TracePro.

1.1.7.3 Описание модели

В качестве модели загрузим в программу 3D модель световода ЛНИЭКД.2Д.001. Зададим материал объёма модели как “PMMA”. В качестве поверхности выберем идеально диффузное покрытие, которое является аналогом используемого в детекторе PTFE. В качестве покрытия поверхности линз выберем “идеальный поглотитель”, т.е. будем считать, что все фотоны, попавшие в линзу, попадают в кремниевый фотоумножитель.

Создадим сферу диаметром 0.01 мм расположенную в объёме на расстояние 1 мм от поверхности противоположной линзам. В качестве источника света будем использовать поверхность этой сферы. Мощность в ваттах определялась как,

$$n = \frac{E}{E_f} = \frac{P * t * \lambda}{h * c}, \quad (1.1.7.1)$$

где n – количество фотонов, t – время, h – постоянная планка, c – скорость света, P – мощность, λ – длина волны, E – общая энергия, E_f – энергия одного фотона.

Параметры, используемые при моделировании: $t=1$ сек, $\lambda = 450$ нм, количество фотонов – $1.6 * 10^5$. Мощность источника составила $6.9 * 10^{-12}$ Вт. Количество лучей для расчета приняли равным 10 000.

Для определения профиля распространения фотонов производили сдвиг источника фотонов от одного края к другому с шагом 10 мм и записывали поток фотонов падающих на каждый кремниевый фотоумножителей.

1.1.7.4 Результаты моделирования

На Рис. 1.1.7.2 приведен график распространения фотонов в объёме световода при источнике, расположенном ровно по центру детектора. Как видно распространение фотонов имеет форму Гаусса.

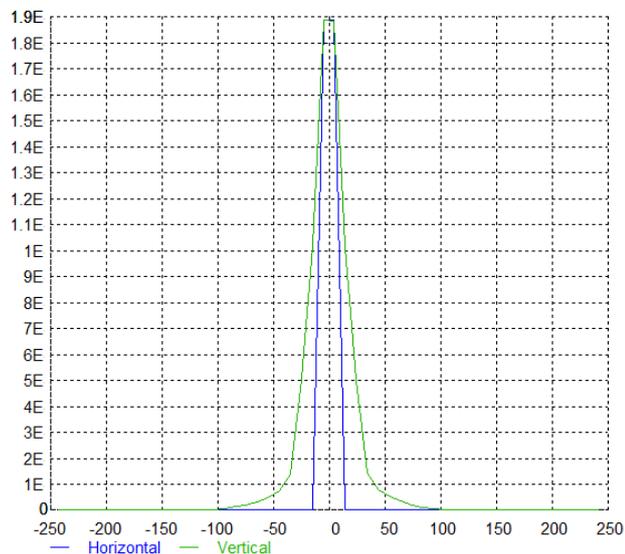


Рис. 1.1.7.2 -График распространения фотонов в объеме световода

На Рис. 1.1.7.3 приведена зависимость потока фотонов от расположения источника и номера кремниевого фотоумножителя.

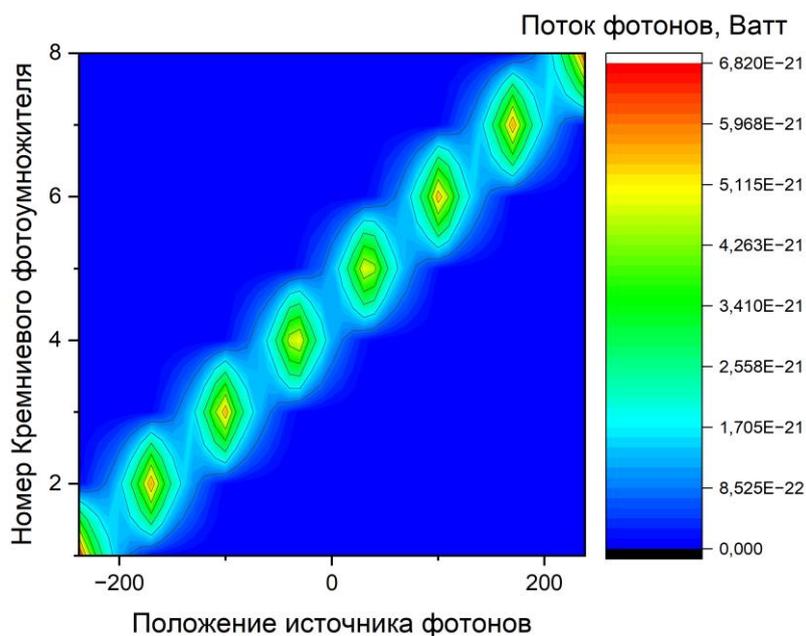


Рис. 1.1.7.3. Зависимость потока фотонов от расположения источника и номера кремниевого фотоумножителя.

1.1.7.5 Изготовление детектора

С учетом моделирования и разработанной конструкторской документации изготовлен тестовый детектор длиной 480 мм. Внешний вид детектора до покрытия светонепроницаемым покрытием представлен на Рис. 1.1.7.4.



Рис. 1.1.7.4. Внешний вид детектора после изготовления по КД ЛНИЭЖД.2Д.

1.1.7.6 Стенд для тестирования

Для оценки параметров разрабатываемого детектора был создан стенд для его тестирования. Блок-схема стенда представлена на Рис. 1.1.7.5. В состав стенда входят восемь трансимпедансных предусилителей (по одному на каждый кремниевый фотоумножитель), а также блок питания, формирующий напряжения +6 В, -6 В и +33 В.

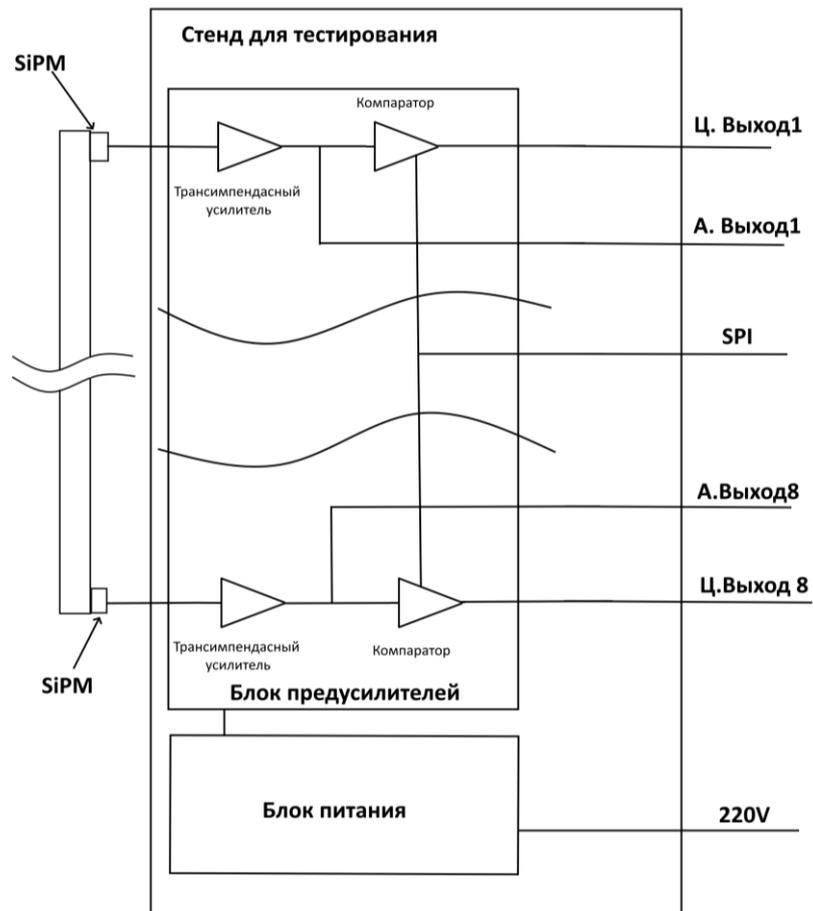


Рис. 1.1.7.5. Блок схема стенда для тестирования.

Для обработки сигналов изготовлена отдельная плата — блок предусилителей (Рис. 1.1.7.6, а), включающий восемь трансимпедансных предусилителей, компараторы и интерфейс SPI, предназначенный для управления порогами срабатывания компараторов. С выходов платы доступны восемь цифровых и восемь аналоговых сигналов.



Рис. 1.1.7.6. Фото блока предусилителей(а) и фото стенда для тестирования (б).

Блок питания и блок предусилителей размещены в одном корпусе (Рис. 1.1.7.6, б). Выходные сигналы могут быть подключены к произвольному аналого-цифровому преобразователю, что позволяет выполнять анализ амплитуд сигналов SiPM и проводить тестирование характеристик детектора.

1.1.7.7 Выводы

По результатам моделирования можно сделать вывод что расстояния между SiPM ~ 70 мм достаточно для регистрации фотонов тремя кремниевыми фотоумножителями. Таким образом в разработанной конструкции детектора с помощью анализа амплитуды, получаемой с трех SiPM, возможно, определения координаты события.

На основе разработанного КД проведена сборка одномерного позиционно-чувствительного сцинтилляционного детектора длиной 480 мм состоящего из 8 кремниевых фотоумножителей, световода и сцинтиллятора ZnS(Ag):LiF эффективностью 42%.

Для тестирования подобных детекторов изготовлен стенд для тестирования. Стенд поддерживает подключение до 8 SiPM и позволяет усиливать и формировать импульсы для дальнейшего анализа с помощью АЦП или осциллографа.

Полученные результаты полностью соответствуют п. 1.1.7 Плана-Графика работ в рамках исполнения обязательств по Соглашению № 075-10-2025-153 от 05 июня 2025 г.

ПРИЛОЖЕНИЯ

- Конструкторская документация. ФАЙЛ: [ПГ 1.1.7 Конструкторская документация.pdf](#)
- Акт изготовления детектора. ФАЙЛ: [ПГ 1.1.7 Акт изготовления детектора.pdf](#)
- Акт изготовления стенда. ФАЙЛ: [ПГ 1.1.7 Акт изготовления стенда.pdf](#)

1.1.8 Разработка устройства для определения и контроля давления оптическим методом *in-situ* в нейтронографических камерах высокого давления системы поршень-цилиндр и на основе различных наковален (совместно с ИЯИ РАН, Договор № 400-04794 от 21.07.2025 г.).

1.1.8.1 Введение

Нейтронные исследования при высоком давлении являются важными методами изучения структурных и магнитных фазовых переходов в материалах, особенно содержащих лёгкие элементы. Нейтроны обладают высокой чувствительностью к водороду и кислороду, различают изотопы и позволяют выявлять магнитный порядок, недоступный рентгеновским методам [26]. Это делает их особенно ценными для исследования воды в минералах, сверхгидридов металлов и сложных магнитных структур. При этом низкая плотность потока нейтронов на современных

установках требует относительно больших объёмов образца, что существенно ограничивает максимальное давление. Традиционно на нейтронных источниках применяли камеры типа «поршень–цилиндр», обеспечивающие давление до 2,5 ГПа. Для преодоления ограничения по давлению были разработаны камеры на основе встречных наковален (Diamond Anvil Cells, DAC). Это позволило достигать давлений десятков и даже сотен гигапаскалей. Однако, по сравнению с рентгеновскими DAC, в нейтронных экспериментах обычно применяют крупные (сантиметрового размера) наковальни, что требует многотонных нагрузок и ведёт к значительному напряжённому состоянию и риску повреждений корпуса ячейки [26].

В работе проведены предварительные оптические исследования материалов используемых при проектировании камер высокого давления и разработанные методы съёма фотонов и схема установки.

1.1.8.2 Измерения сапфира

Сапфир обычно содержит меньше оптических примесей по сравнению с рубином, поэтому у него более слабая люминесценция и лучшая прозрачность. Но в свою очередь достичь полного отсутствия примесей, таких как Fe^{3+} , Ti^{4+} , Cr^{3+} , а также следов редкоземельных ионов (например, Ce^{3+} , Nd^{3+}) достаточно сложно. Это, в свою очередь, придаёт ему пусть и слабую, но заметную люминесценцию. Для проверки люминесценции проведены измерения спектра сапфира, которые представлены на Рис. 1.1.8.1. Интенсивность люминесценции примерно в 100 раз меньше, чем у рубина, но тем не менее остаётся. Эта люминесценция не должна оказывать влияния на измерения рубина в объёме камеры. В свою очередь при использовании достаточно чувствительного спектрометра возможно определять давление по сдвигу R_1 и R_2 в сапфире.

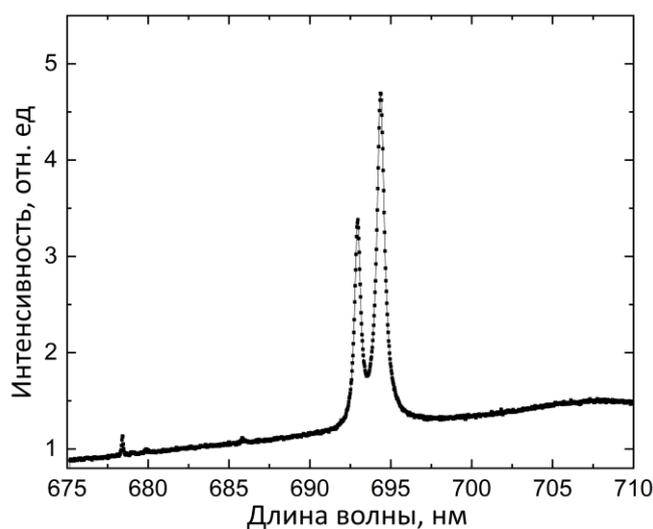


Рис. 1.1.8.1 — Спектр люминесценции сапфира

1.1.8.3 Измерение Муассанита

Муассанит (SiC , карбид кремния) представляет собой синтетический аналог природного минерала, обладающий уникальными оптическими и механическими свойствами. Его кристаллическая структура и наличие дефектов решётки, а также примесей различных элементов обуславливают широкий спектр люминесцентных характеристик. Люминесценция муассанита связана прежде всего с наличием дефектных центров (например, вакансий кремния или углерода), а также с внедрёнными примесными ионами. В зависимости от типа дефекта и энергетических уровней, участвующих в переходе, излучение может наблюдаться в различных областях спектра: от ультрафиолетовой и синей до зелёной, оранжевой и даже инфракрасной. На Рис. 1.1.8.2 представлен

спектр люминесценции муассанита.

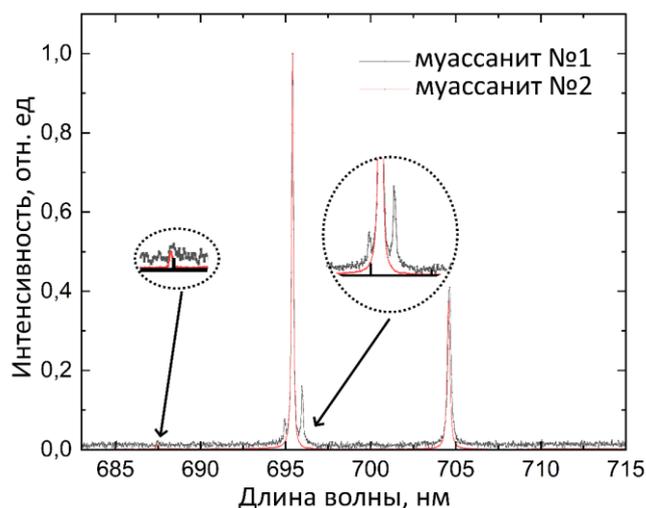


Рис. 1.1.8.2. Спектр люминесценции при возбуждении красным лазером.

По результатам измерений муассанит имеет люминесценцию в диапазоне, перекрывающем линию рубина, что может затруднять измерение; однако интенсивность сигнала у муассанита примерно в 10 раз меньше.

1.1.8.4 Модельные эксперименты с сапфировыми окнами/наковальнями

В модельных экспериментах рассмотрены два типа способов съёма фотонов с поверхности наковальни: прямой съём и съём с помощью оптоволокну.

Прямой съём света требует размещения в непосредственной близости от камеры высокого давления системы измерения. Он обеспечивает максимальный сбор фотонов даже для малых объёмов рубина. Кроме того, есть возможность использовать зеркало, например алюминиевое, не искажающее нейтронный пучок. Это особенно важно для наковален, в особенности в МУРН. Этот подход позволяет дополнительно использовать видеокамеру или тепловизор для контроля геометрии образца, температуры и её градиента. Однако существуют и недостатки: перископ и радиационное воздействие на спектрометр.

В отличие от прямого съёма, использование оптоволокну позволяет разместить систему измерения достаточно далеко, но при этом в зависимости от размера волокну меняется количество света, что может потребовать установки различных коллиматоров или линз. Для оценки эффективности захвата фотонов с поверхности наковальни в зависимости от размеров волокну было проведено моделирование оптической схемы в программе TracePro. На Рис. 1.1.8.3 показана зависимость количества фотонов на конце 1 метра волокну в зависимости от диаметра волокну. Из графика зависимости можно сделать вывод, что чем больше диаметр волокну, тем больше фотонов доходит до системы измерения.

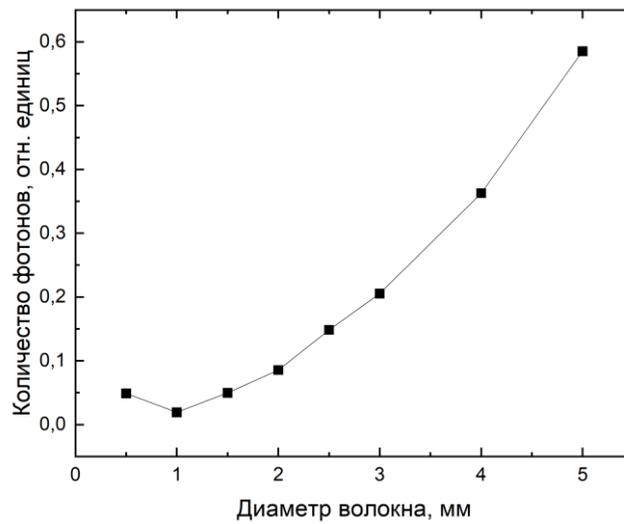


Рис. 1.1.8.3. Зависимость количества фотонов от диаметра волокна.

Были проведены модельные эксперименты с рубинами и сапфировой наковальней (Рис. 1.1.8.4), которая также может быть окном камеры поршень–цилиндр. Измерения проводились с помощью спектрометра Аспект ASP-150С.

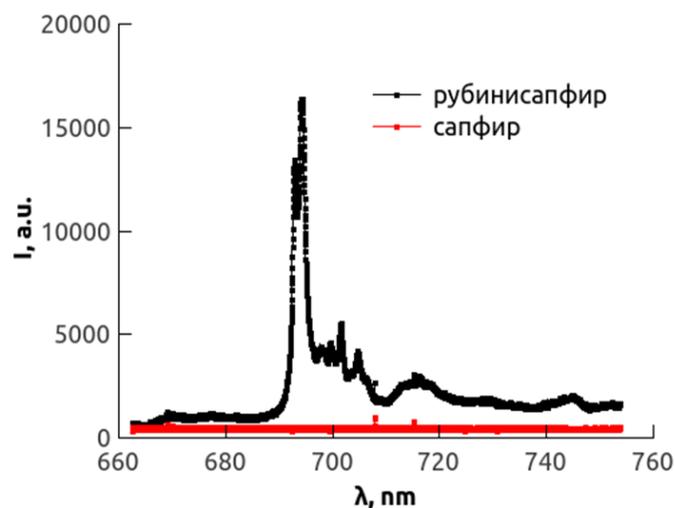


Рис. 1.1.8.4. Спектр рубина с сапфировым окном.

Разработанная схема пригодна для измерения давления как в сапфировых наковальнях, так и в камерах высокого давления с сапфировым окном. Использование оптоволокна для сбора фотонов обеспечивает эффективность светосбора примерно в десять раз ниже по сравнению с непосредственным сбором излучения с помощью линзы. Кроме того, размещение оптоволокна на поверхности линзы требует его фиксации с использованием клеевых соединений, что может существенно затруднить проведение других оптических исследований, в частности рамановских измерений, и ограничить универсальность экспериментальной схемы.

1.1.8.5 Система измерений давлений

Оптическая схема устройства для определения давления представлена на Рис. 1.1.8.5. Для минимизации шума оптическую часть предполагается закрыть непрозрачным кожухом, оставив только оптический ввод.

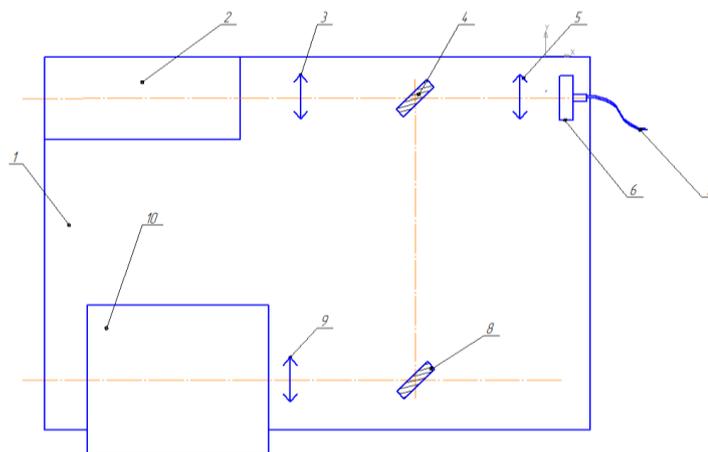


Рис. 1.1.8.5. Оптическая схема устройства, где 1 – оптическая плита, 2 – лазер, 3 – коллиматорная линза, 4 – дихроическое зеркало, 5 – фокусирующая/коллиматорная линза (ахромат), 6 – держатель оптоволокна, 7 – оптоволокно, 8 – зеркало, 9 – фокусирующая линза, 10 – спектрометр ASP-150с.

Оптический ввод может включать как прямой открытый ввод для оптического излучения, так и подключение волокна. В случае использования волокна предполагается применение оптического коллиматора для коллимации излучения перед вводом в спектрометр. В зависимости от типа камеры необходимо обеспечить крепление камеры на нейтронном пучке таким образом что бы не мешать прямому и рассеянному нейтронному излучению.

1.1.8.6 Способ подвода волокна в камеру

Основные способы съёма люминесцентного спектра от рубина в различных типах камер высокого давления представлены на Рис. 1.1.8.6. На Рис. 1.1.8.6(а) представлена классическая конструкция типа поршень–цилиндр, где в поршень вклеено волокно для съёма излучения непосредственно с рубина. На Рис. 1.1.8.6(б) представлена классическая схема камеры с алмазной наковальней.

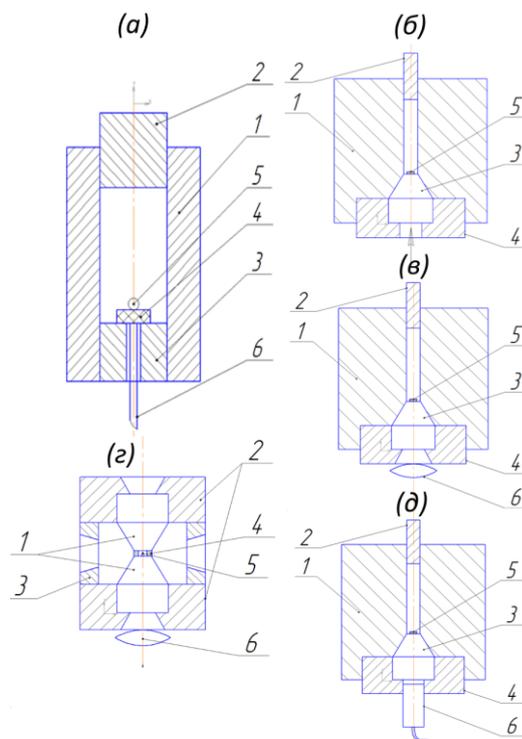


Рис. 1.1.8.6. Способы съема фотонов в различных камерах высокого давления. (а): 1 – тело камеры, 2 – поршень, 3 – внутренний поршень, 4 – оптическое окно, 5 – рубин; (б), (в), (д): 1 – тело камеры, 2 – поршень, 3 – коническое сапфировое окно, 4 – поддерживающая, 5 – рубин, 6(в) – линза, 6(д) – оптоволоконно/оптоволоконный коллиматор; (г): 1 – наковальня, 2 – корпус камеры, 3 – входное окно, 4 – гаскета, 5 – рубин, 6 – линза.

1.1.8.7 Конструкция камеры высокого давления

В рамках данной работы была разработана конструкция камеры высокого давления типа «поршень–цилиндр», в которой в качестве оптического окна используется наковальня, запрессованная в тело камеры и дополнительно зафиксированная с помощью резьбовой гайки (рисунок 3.6, б–д). Такая конструкция обеспечивает надёжную механическую фиксацию прозрачного элемента и позволяет сохранять герметичность камеры при высоких давлениях. Принцип предлагаемого решения заключается в замене одного из металлических поршней на прозрачный материал с высокой механической прочностью, такой как сапфир (Al_2O_3) или муассанит (SiC). Использование данных материалов позволяет реализовать оптический доступ внутрь камеры без существенного ухудшения её прочностных характеристик. Непосредственно вблизи исследуемого образца внутри камеры размещается калибровочный элемент — рубин, используемый в качестве оптического манометра. Измерение давления осуществляется через прозрачный поршень путём регистрации спектра люминесценции рубина; величина давления определяется по сдвигу положения R-линий люминесценции. На основании проведённых экспериментальных исследований и тестов, описанных ранее, было установлено, что наиболее оптимальным способом регистрации спектра люминесценции является его непосредственная съёмка через систему линз. Использование волоконно-оптического подвода оказалось менее эффективным, поскольку волокно не обеспечивает полного сбора и передачи люминесцентных фотонов, выходящих через прозрачную наковальню, что приводит к снижению интенсивности сигнала и ухудшению точности измерений. Разработанная оптическая схема измерения давления по люминесценции рубина позволяет достигать точности порядка ~ 1 кбар в диапазоне давлений от 0 до 30 кбар. При этом прочностные характеристики сапфира и муассанита сопоставимы с

характеристиками традиционно используемых металлических поршней, что позволяет сохранить рабочий диапазон давлений камеры типа «поршень–цилиндр» без его существенного ограничения. Таким образом, предложенное конструктивное решение обеспечивает возможность одновременного создания высокого давления и его *in situ* оптического контроля без ухудшения эксплуатационных характеристик камеры.

Максимально достижимое давление в камере зависит от материалов цилиндра и поршня. Выбор материала всегда является компромиссом между прочностными характеристиками, технологичностью и нейтронно-физическими свойствами. Для цилиндров камер высокого давления традиционно применяются высокопрочные металлические сплавы и композиционные материалы. Закалённые стали, такие как марганцовистые или хромомолибденовые, обладают высокой пределом текучести и вязкостью разрушения, что обеспечивает устойчивость к хрупкому разрушению при циклических нагрузках. Однако их прочность ограничивает рабочие давления, как правило, значениями порядка 1.5–2 ГПа. Более высокие давления достигаются при использовании бериллиевой бронзы и дисперсионно-твердеющие сплавы на основе хрома–никеля, которые сочетают высокую усталостную прочность с лучшей пластичностью, что снижает риск катастрофического разрушения. Наивысшие прочностные характеристики демонстрируют твердосплавные материалы на основе карбида вольфрама с кобальтовой связкой, для которых предел прочности на сжатие может превышать 5–6 ГПа, однако их низкая трещиностойкость и склонность к хрупкому разрушению требуют внешнего бандажирования и строгого контроля геометрии.

Материалы поршней подбираются с учётом необходимости минимизации трения, износа и несоосных нагрузок. В стальных и бронзовых камерах поршни обычно изготавливаются из того же материала или из более твёрдого сплава с близким коэффициентом теплового расширения, что уменьшает риск заклинивания. В высоконагруженных системах применяются поршни из карбида вольфрама, обеспечивающие высокую жёсткость и минимальную упругую деформацию.

Для нейтронных экспериментов механическая прочность материалов должна рассматриваться совместно с их нейтронно-физическими свойствами. Стали и медные сплавы характеризуются относительно высоким коэффициентом поглощения тепловых нейтронов за счёт присутствия железа, никеля и меди, что приводит к снижению нейтронного потока и росту фонового рассеяния. Бериллиевая бронза выгодно отличается более низким сечением поглощения, поскольку бериллий и медь обладают сравнительно высокой прозрачностью для тепловых нейтронов, что делает такие камеры широко используемыми в нейтронной дифракции. Карбид вольфрама, несмотря на выдающиеся прочностные свойства, является одним из наименее благоприятных материалов для нейтронных исследований из-за крайне высокого сечения поглощения и сильного упругого рассеяния на вольфраме, что существенно ограничивает его применение в экспериментах с низким нейтронным фоном.

С точки зрения пропускания нейтронов наилучшие характеристики демонстрируют материалы с малым атомным номером и низким сечением захвата, такие как алюминиевые сплавы, бериллий и титан. Однако их ограниченная механическая прочность не позволяет использовать их в качестве несущих элементов камер высокого давления без массивного армирования. В результате на практике часто применяются гибридные конструкции, в которых силовой цилиндр выполнен из высокопрочного материала, а в зонах прохождения нейтронного пучка используются вставки или окна из нейтронно-прозрачных сплавов. Такой подход позволяет оптимизировать как прочностные, так и нейтронные характеристики камеры.

На основе проведённого анализа оптимальными материалами для изготовления цилиндра камер высокого давления являются бериллиевая бронза либо сплавы на основе хрома–никеля (40ХНЮ, 38ХНЮ и др.), тогда как для основного поршня целесообразно использовать карбид вольфрама. В качестве материала второго поршня предпочтительно применение сапфира либо муассанита, что позволяет обеспечить оптический доступ к рабочему объёму камеры для измерения давления и проведения дополнительных оптических исследований. При достаточно большом объёме образца (порядка 10 мм³ и более) возможна относительно простая коллимация нейтронного пучка, при которой нейтроны не взаимодействуют с материалом поршня. Такой подход позволяет одновременно достичь высокого максимального давления (до 3 ГПа) и сохранить возможность проведения оптических измерений без существенного ухудшения условий нейтронного эксперимента.

Нами разработана конструкция камеры, где в качестве окна используется сапфировая наковальня, которая запрессовывается в тело камеры и удерживается с помощью гайки (Рис. 1.1.8.6-б, в,д), С внутренней стороны на наковальне располагается рубин. Возможные способы съема света с данной камеры: с помощью линзы (Рис. 1.1.8.6, в) или с оптоволоконным коллиматором, который фокусирует свет в оптоволокно (Рис. 1.1.8.6, д).

1.1.8.8 Система контроля и изменения давления в *in-situ* экспериментах

Система контроля и измерения давления (СКИД) служит для проведения *in-situ* измерений на нейтронном пучке с использованием камер типа поршень-цилиндр. Блок схема установки представлена на Рис. 1.1.8.7. В качестве камер предполагается использовать конструкции представлены на Рис. 1.1.8.6 (б, в, д). Система состоит из гидравлического пресса с полым цилиндром и поддержкой. Пресс оснащён манометрическим и тензометрическим датчиками. Полая поддержка снизу нужна для вывода света из объема камера. Предполагается вариант как с оптическим волокном, так и использование зеркала поворачивающего излучения на систему оптического измерения давления. Управление гидравлическим насосом и анализом показаний датчиков, как механических, так и оптических будет осуществляется с ПК.

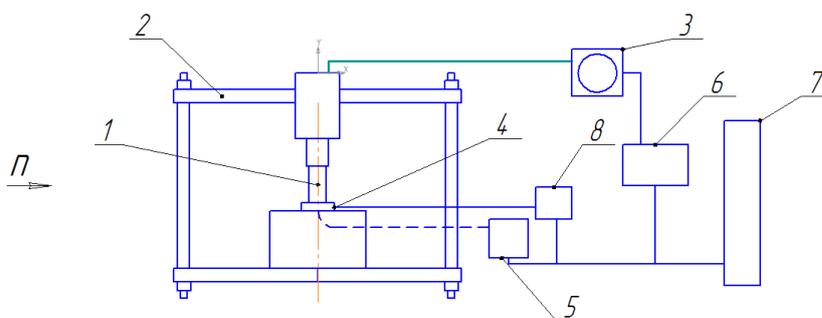


Рис. 1.1.8.7. Система контроля и измерения давления (СКИД), где 1 – камера давления, 2 – колонны пресса, 3 – ресивер, 4 – система датчиков, 5 – система оптического определения давления, 6 – гидравлический насос, 7 – управляющий ПК, 8 – контроллер датчиков.

1.1.8.9 Выводы

1. Разработана оптимальная конструкция устройства для определения и контроля давления оптическим методом *in-situ* в нейтронографических камерах высокого давления системы поршень–цилиндр на основе оптического измерения люминесценции рубина с использованием спектрометра

ASP-150с и лазера в красном диапазоне. Разработанная оптическая схема измерения давления по люминесценции рубина позволяет достигать точности порядка ~ 1 кбар в диапазоне давлений от 0 до 3 ГПа.

2. Проведены измерения оптические измерения рубина и материалов наковален. Выявленная вторичная люминесценция в наковальнях из сапфира и муассанита, однако она слабее основного сигнала от рубина и не должна вносить серьезных помех в спектр.

3. Проведены модельные эксперименты по измерению люминесценции через оптические окна, в ходе которых была экспериментально проверена разработанная схема регистрации люминесценции рубина. Показано, что данная схема пригодна для измерения давления как в сапфировых наковальнях, так и в камерах высокого давления с сапфировым окном при характерном размере сапфировых элементов 0,5 мм и менее. Оптимальная схема съёма фотонов основана на использовании линзы, обеспечивающей фокусировку излучения на рубине, размещённом непосредственно в объёме образца.

4. Разработана конструкция камеры типа поршень-цилиндр с сапфировой наковальней. В качестве материала цилиндра камер высокого давления предлагается использовать бериллиевую бронза либо сплавы на основе хрома-никеля (40ХНЮ, 38ХНЮ и др.). В качестве поршня оптимально использовать карбид вольфрама и сапфир/муассанит. Полученные материалы позволят изготовить камеры с предельным давлением порядка 2-3 ГПа, низким нейтронным фоном и объёмом образца не менее 10 мм³. При этом появится возможность контроля давления в объёме камере и проведения дополнительных оптических измерений.

5. Разработана блок-схема системы контроля и измерения давления in-situ, которая позволит контролировать и регулировать давления в камерах поршень цилиндр во время проведения эксперимента.

6. Проведен литературный обзор основных материалов используемых в конструкции камер высокого давления.

Полученные результаты полностью соответствуют п. 1.1.8 Плана-Графика работ в рамках исполнения обязательств по Соглашению № 075-10-2025-153 от 05 июня 2025 г.

ПРИЛОЖЕНИЯ

- Отчет о выполненных работах. ФАЙЛ: [ПГ 1.1.8 Отчет о выполненных работах.pdf](#)

1.1.9 Разработка метода изготовления пластин высокоэффективного сцинтиллятора на основе ZnS для регистрации тепловых нейтронов. (совместно с ИЯИ РАН, Договор № 400-04794 от 21.07.2025 г.).

1.1.9.1 Введение

ZnS(Ag) – широко используемый сцинтиллятор высокой светоотдачи, особенно эффективный при регистрации тяжёлых частиц и тепловых нейтронов. Для регистрации тепловых нейтронов его смешивают с поглотителями нейтронов – изотопами ⁶Li и ¹⁰B. Эти сцинтилляционные материалы успешно используются в детекторах (например, экраны EJ-426, BC-704 на основе ZnS:Ag + ⁶LiF). При этом в случае использования В₂О₃, он выполняет двойную функцию: служит источником бора и одновременно образует стекловидную матрицу-связку. Введение В₂О₃ позволяет заметно снизить послесвечения – у ZnS:Ag/В₂О₃ после вспышки через 1 мкс высота послеимпульса $\approx 4\%$ от максимума, примерно вдвое меньше, чем у ZnS:Ag/⁶LiF [27]. Таким образом, композитные

сцинтилляторы ZnS:Ag сочетают высокую светоотдачу ZnS:Ag с нейтроночувствительностью Li и В и могут быть изготовлены в виде тонких пластинок или компактных изделий.

1.1.9.2 Анализ параметров синтеза

При горячем прессовании порошки ZnS:Ag и нейтроночувствительные добавки уплотняют при повышенной температуре и давлении. Для чистого ZnS такие условия могут составлять ~950–1000 °С, давление порядка десятков МПа в вакууме (или инертной атмосфере) и время порядка часов [28]. Например, было получено полностью плотное керамическое изделие ZnS размером 3 мм при горячем прессовании 1000 °С в вакууме, с плотностью $\approx 99\%$ и оптической прозрачностью $\sim 75\%$ в ИК-диапазоне [28]. При добавлении LiF или В₂О₃ состав можно прессовать аналогично: LiF плавится при 845 °С, В₂О₃ – при 450 °С, поэтому горячее прессование В₂О₃-композиов обычно проводится при ~ 500 –600 °С, чтобы расплавить боросиликатный наполнитель. В методе прессования с последующим спеканием сначала прессуют (обычно изостатически или в прессе при комнатной температуре) смесь ZnS:Ag с LiF или Н₃ВО₃ (предшественником В₂О₃) в заготовку, а затем спекают в печи. Так, в одном из экспериментов порошок ZnS:Ag (средний размер ~ 5 мкм) смешивали с Н₃ВО₃ в массовом отношении 1,0–1,5 (ZnS:Н₃ВО₃) и спекали 3 часа при 540 °С [27]. При этой температуре муравьиная кислота переходит в В₂О₃ (стекло), плотно обволакивающее кристаллы ZnS. В случае ZnS:Ag + LiF смеси обычно используют полимерные или неорганические связующие с пониженной температурой отверждения, либо горячее прессование без дополнительного спекания.

При спекании сцинтилляторов на основе ZnS(Ag):⁶LiF (или ZnS(Ag)+⁶LiF), используются низкотемпературные методы формирования композитных слоёв, поскольку: ZnS разлагается и начинает окисляться при температурах выше ~ 600 °С. ⁶LiF имеет температуру плавления ~ 845 °С, но в присутствии других компонентов может разлагаться или вступать в реакции при более низких температурах. Ag-допант может диффундировать и терять активность при перегреве [29]. Оптимальные параметры синтеза Температура 180–250 °С (иногда до 300 °С), Давление 10–100 МПа, Время выдержки 10–60 минут, Среда Инертная атмосфера (азот или аргон) или вакуум, Охлаждение Медленное, под давлением. Температура ниже 300 °С позволяет избежать окисления ZnS и деградации Ag-центров. ⁶LiF при таких температурах не плавится, но может пластически деформироваться в составе композита. Часто используются органические связующие (например, ПВА, эпоксидная смола, РММА), которые либо остаются в матрице, либо выгорают в мягком режиме (< 400 °С). При необходимости повышенной прочности иногда добавляют Al₂O₃ или стеклянные микросферы, но это ухудшает световыход.

Если целью является получение плотного, тонкого слоя сцинтиллятора, а не полноценный монолит возможно использовать метод холодного прессования: Давление: 100–300 МПа Температура: комната / < 100 °С после чего слой пропитывается прозрачным связующим и отверждается.

1.1.9.3 Влияние размера частиц

Размер частиц ZnS:Ag существенно влияет на сцинтилляционные свойства и прозрачность композита. Обычно используют зерна порядка нескольких микрометров. Показано, что при слишком мелких (~ 3 мкм) зернах они склонны агломерироваться в более крупные кластеры, тогда как при ~ 8 мкм остаются отдельными [30]. Мелкозернистые образцы дают более однородный отклик (симуляция GEANT4 показывает выравнивание светового выхода), но на практике слишком маленькие зерна (< 1 мкм) сильно рассеивают свет и снижают прозрачность. Композиты с меньшим размером ZnS-частиц пропускали меньше света. Выбор оптимального размера – компромисс: зерна

~5–15 мкм обеспечивают хорошую плотность упаковки без избыточного рассеяния и создают достаточно однородную структуру [30].

1.1.9.4 Способы повышения прозрачности сцинтилляционного материала

Прозрачность ZnS(Ag)-композита ограничена рассеянием на порах и границах зерен, поэтому используются несколько методов её улучшения:

- Уплотнение при прессовании. Механическое прессование устраняет воздушные полости: после пресса плотность материала увеличивается (в одном случае на $\approx 25\%$) и возросла интенсивность светового сигнала. Это даёт ощутимый прирост светового выхода ($\sim 16\%$) и чувствительности детектора [30].

- Увеличение доли связующего. Увеличение фракции оптически прозрачного связующего (например, стеклянного или полимерного) приводит к более однородному наполнению заготовки и росту светопропускания. Так, при росте доли связующего в составе экспериментально наблюдалось повышение интенсивности проходящего света. Однако вместе с этим немного падает нейтронная чувствительность из-за меньшего содержания конвертера [30].

- Добавление неактивных наполнителей. Введение мелкодисперсного стекла или керамики (например, стеклянных микросфер) в композит существенно повысило светопропускание с 1.85% до 2.58% (хотя немного снизило поглощение нейтронов). Такие наполнители выравнивают геометрию материала и снижают эффект неоднородностей [30].

- Оптимизация микроструктуры. Использование смеси порошков разного размера (нано- и микрочастиц) улучшает уплотнение при спекании, а предварительный нагрев (обжиг) удаляет примеси. Такие приёмы для ZnS показывали высокие значения прозрачности ($\sim 70\%$) в ИК диапазоне [27]. Также холодное изостатическое прессование (CIP) перед спеканием повышает однородность заготовки и её плотность. Комбинация этих приёмов позволяет получать более прозрачные сцинтилляционные экраны: ключевыми являются высокое уплотнение без пор и тщательный подбор связки и структуры композита [30].

1.1.9.5 Наполнители, их типы и состав (LiF, B₂O₃ и др.)

В композитах ZnS(Ag) основными наполнителями выступают сами LiF и B₂O₃ (источники нейтронов) и связующие. Типичные массовые соотношения: для ZnS:Ag + LiF (например, экран EJ-426) берут ZnS:Ag:LiF $\approx 3:1$ (по массе) (LiF $\sim 25\%$ от смеси), с небольшим ($\sim 1\text{--}5\%$) добавлением связующего. Для ZnS:Ag + B₂O₃ используют соотношение ZnS:Ag:H₃BO₃ $\approx 1:1\text{--}1.5$ по массе (после спекания это примерно $40\text{--}60\%$ B₂O₃). В этих смесях связующим выступает органический полимер (эпоксид, полистирол и др., чуть снижающий светопропускание), или именно борное стекло: в случае H₃BO₃ оно плавится и образует стеклянную матрицу B₂O₃. В некоторых композициях в качестве связующего используют литиевые силикаты – полисиликаты Li («литиевое стекло») [31]. Дополнительных наполнителей обычно не требуется, разве что для регулирования показателя преломления или механических свойств.

1.1.9.6 Связующие (полимерные матрицы)

Полиэтилен (PE) Используется в смеси ZnS(Ag):LiF:PE в соотношении 5:1:1 по массе для нейтронных сцинтилляторов – классический рецепт [32]. Полистирол (PS) Применяется как матрица для аналогичной задачи (на примере ZnO:LiF/PS), показывает хорошие сцинтилляционные свойства [33]. Также используется для 3D-печати на основе ZnS:Ag [34]. ПММА (полиметилметакрилат) распространён в патентах как прозрачное связующее для гранул 3–10 μm ZnS:Ag и LiF – обеспечивает плотную капсуляцию [35]. Силоксановые полимеры (например, на основе фенильных или алифатических силоксанов) используются для гибких гибридов LiF + сцинтиллятор, обладающих хорошей дисперсией и высокой механической прочностью.

1.1.9.7 Параметры для синтеза

Оптимальный состав сцинтиллятора для достижения высокой эффективности регистрации нейтронов соответствует соотношению $ZnS(Ag):6LiF = 1:3$ при добавке около 5 % связующего вещества. Данный выбор обусловлен необходимостью обеспечить достаточную концентрацию нейтронопоглощающего компонента при сохранении высокого световыхода сцинтиллятора.

На основании проведённого анализа установлены ограничения по максимальной температуре изготовления сцинтилляторов $ZnS(Ag)$. Температура синтеза не должна превышать $300^{\circ}C$, поскольку при более высоких температурах наблюдается термическое разложение материала, его окисление, а также возможная деградация активаторных Ag-центров. Указанные процессы приводят к снижению итогового световыхода и ухудшению сцинтилляционных характеристик.

Рабочее давление при синтезе подбирается на основе экспериментальных исследований полученных образцов и может варьироваться в диапазоне от 0 до 300 МПа. Применение давления необходимо, прежде всего, для устранения внутренних пор и увеличения плотности композита, что положительно сказывается на механической прочности и оптической однородности сцинтиллятора. Время прессования и, при необходимости, нагрева составляет до одного часа. Таким образом, оптимальные параметры синтеза определяются используемыми материалами и выбранным технологическим подходом.

Для системы $ZnS(Ag):6LiF$ при холодном синтезе процесс осуществляется при комнатной температуре, давлении порядка 100–300 МПа и длительности до одного часа в воздушной атмосфере. Горячий синтез той же системы проводится при температуре около $250^{\circ}C$, давлении до 100 МПа и аналогичном времени выдержки, также на воздухе. Относительно низкая температура горячего прессования позволяет избежать интенсивного окисления сцинтиллятора и отказаться от использования вакуума или инертной атмосферы, что существенно упрощает конструкцию технологической камеры.

Для композитов $ZnS(Ag):B_2O_3$ условия холодного синтеза аналогичны и включают комнатную температуру, давление 100–300 МПа, выдержку до одного часа и воздушную атмосферу. При горячем прессовании данной системы требуется более высокая температура, порядка $250\text{--}270^{\circ}C$, при давлении до 100 МПа. В отличие от LiF, использование оксида бора требует повышения температуры, однако при этом возможно получение более прозрачного сцинтиллятора за счёт процесса стеклования B_2O_3 , который способствует улучшению оптических свойств материала.

В качестве альтернативы оксиду бора может быть использована борная кислота, которая разлагается при температуре около $190^{\circ}C$ с образованием воды и оксида бора. В этом случае процесс стеклования обеспечивается при более низкой температуре, что дополнительно снижает риск термической деградации сцинтилляционного материала.

Для реализации указанных режимов синтеза была разработана специализированная камера для изготовления тестовых образцов сцинтилляторов.

1.1.9.8 Разработка конструкции камеры

Конструкция камеры, разработанная в рамках ЛНИЭД.КП, предназначена для получения образцов различных сцинтилляционных материалов. Камера позволяет изготавливать образцы диаметром 10 мм и толщиной от 0.1 до 5 мм, что соответствует рабочему объёму от 7.85 мм^3 до 392.7 мм^3 .

При выборе материала камеры были выполнены прочностные расчёты с использованием формул Ламе с учётом геометрии конструкции. Для камеры, изготовленной из стали 10, предельное рабочее давление составляет около 125 МПа. В случае горячего синтеза возможно применение

закалённой стали 45, что позволяет увеличить допустимое давление до 540 МПа. На Рис. 1.1.9.1 представлена блок-схема камеры с системой нагрева.

Материал камеры выбран магнитным, что обеспечивает возможность использования индукционного нагрева. В конструкции предусмотрено отверстие для установки температурного датчика, который подключается к PID-регулятору и управляет включением и отключением индукционного нагревателя, обеспечивая стабильное поддержание заданной температуры.

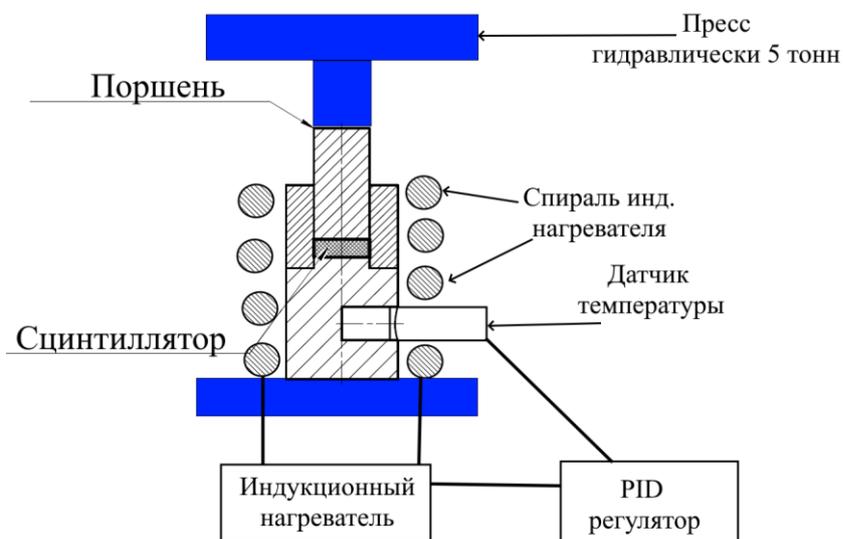


Рис. 1.1.9.1. Блок-схема использования камеры для прессования.

Камера устанавливается в гидравлический пресс с максимальным усилием 5 т. Данного усилия достаточно для создания давления порядка 300 МПа при диаметре поршня 10 мм.

Рассмотрим основные режимы синтеза сцинтилляторов. При холодном прессовании смесь порошков засыпается в рабочий объём камеры, после чего сверху устанавливается поршень. Собранный образец помещается в гидравлический пресс, и давление создаётся вручную с контролем по встроенному манометру пресса. В таком состоянии образец выдерживается заданное время, после чего производится разгрузка камеры, её разборка и извлечение полученного сцинтиллятора.

При горячем прессовании начальные этапы аналогичны: порошковая смесь помещается в камеру и прижимается поршнем. После создания требуемого давления включается PID-регулятор, и камера нагревается до заданной температуры. После достижения температурного режима образец выдерживается в течение установленного времени, по завершении которого нагрев отключается, давление снимается, и камера охлаждается перед разборкой и извлечением сцинтиллятора.

Полученные результаты полностью соответствуют п. 1.1.9 Плана-Графика работ в рамках исполнения обязательств по Соглашению № 075-10-2025-153 от 05 июня 2025 г.

ПРИЛОЖЕНИЯ

- Конструкторская документация. ФАЙЛ: [ПГ 1.1.9 Конструкторская документация.pdf](#)

1.1.10 Синтез, структурная характеристика тонких пленок на основе карбида бора (совместно с ИФМ УрО РАН, Договор № 400-04782 от 28.07.2025 г.).

1.1.10.1 Синтез тонких пленок на основе карбида бора

Тонкие пленки карбида бора были синтезированы методом высоковакуумного лазерного осаждения (лазерной абляции) из твердотельных мишеней В4С на монокристаллические подложки (001) Si, (110) Al₂O₃. Для формирования лазерных импульсов использовался YAG:Nd³⁺ лазер, рабочая длина волны лазера была 532 нм, длительность одного импульса составляла 10-12 нс, энергия лазера составляла 30-50 мДж. Базовое давление в камере роста составляло 10-5 Па. На Рис. 1.1.10.1 показана установка импульсного лазерного осаждения, на которой были синтезированы образцы. Синтез производился либо в вакууме при базовом давлении, либо в атмосфере аргона при потоке 0,03 л/час, давление 10-2 Па. Температура подложки варьировалась от комнатной до 800 оС. Для всех образцов пленки были выращены за 36 000 лазерных импульсов. В Таблице 1.1.10.1 приведен список синтезированных образцов и условия их синтеза.

Таблица 1.1.10.1. Список синтезированных образцов и условия их синтеза.

№ п/п	Обозначени е образца	Подложк а	Условия синтеза		
			Температур а подложки, °С	Давление , мбар (проток аргона, л/ч)	Энерги я лазера, мДж
1	S1	Si	20	~10-4 (0,03)	50
2	A1	Al ₂ O ₃ (A)	20	~10-4 (0,03)	50
3	S2	Si	400	~10-7	30
4	A2	Al ₂ O ₃ (A)	400	~10-7	30
5	A3	Al ₂ O ₃ (A)	800	~10-7	50
6	S3	Si	600	~10-7	50
7	A4	Al ₂ O ₃ (R)	600	~10-7	50
8	S4	Si	20	~10-7	50
9	A5	Al ₂ O ₃ (R)	20	~10-7	50
0	S5	Si	400	~10-4 (0,03)	50
1	A6	Al ₂ O ₃ (R)	400	~10-4 (0,03)	50
2	S6	Si	200	~10-7	50
3	A7	Al ₂ O ₃ (R)	200	~10-7	50

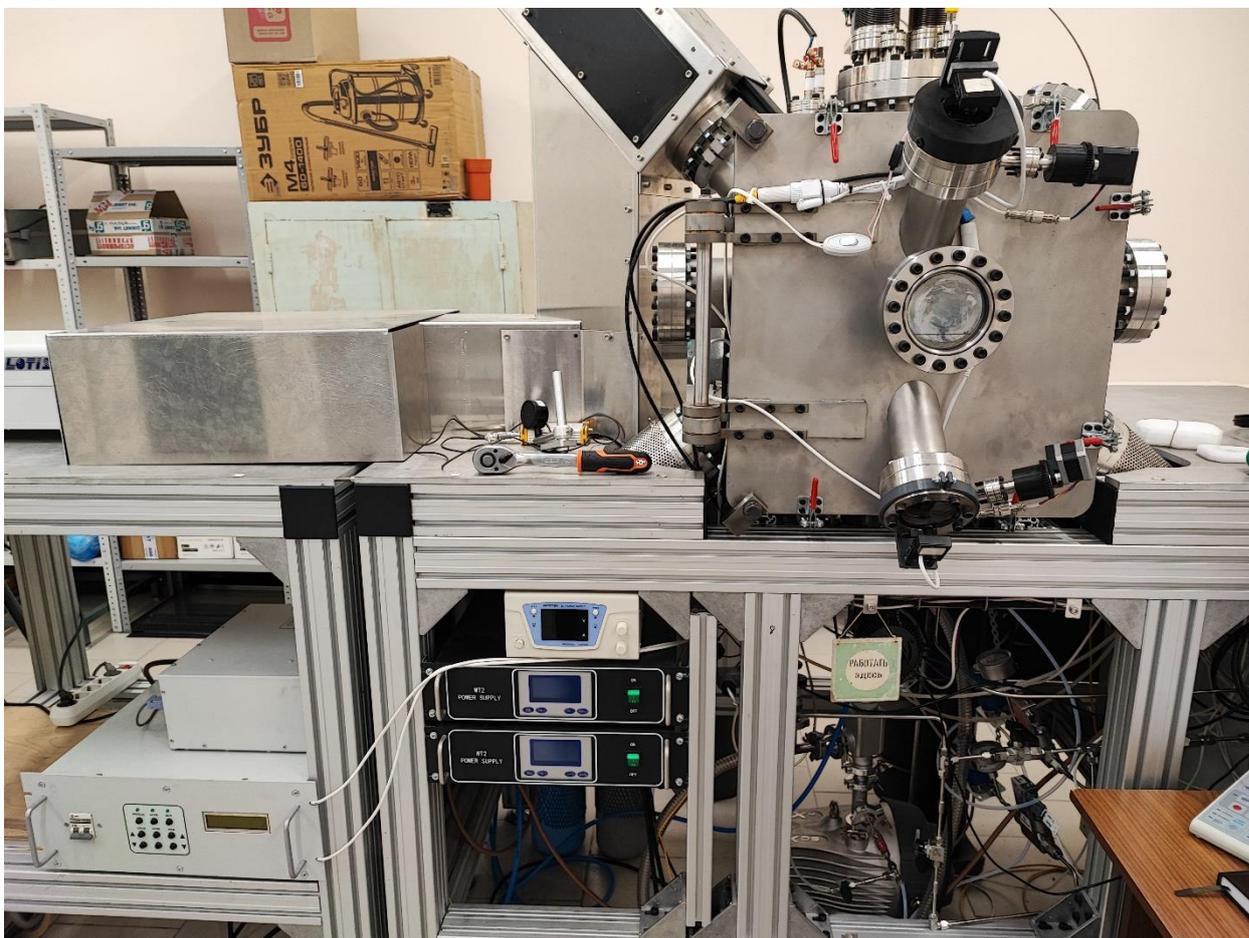


Рис. 1.1.10.1 Установка импульсного лазерного осаждения, на которой были синтезированы образцы.

1.1.10.2 Структурная характеристика тонких пленок на основе карбида бора

Структурные свойства полученных пленок были определены с помощью рентгеновской рефлектометрии и дифрактометрии на лабораторном рентгеновском дифрактометре PANalytical Empyrean Series 2. Измерения проводились в геометрии параллельного пучка на излучении с длиной волны 0.179 нм. Для формирования параллельного пучка на первичном пучке использовалось параболическое зеркало на основе сверхрешетки W/Si, обеспечивающее, помимо формирования параллельного пучка, подавление линии $\text{Co K}\alpha$ излучения и непрерывного спектра. Высота пучка, ограниченного щелью, составляла 0.05 мм. При проведении измерений рентгеновской дифракции на вторичном пучке на вторичном пучке использовался позиционно-чувствительный детектор PIXel3D, обеспечивающий разрешение по шкале 2θ не менее 0.0016° . В рефлектометрических измерениях использовался плоскопараллельный коллиматор в комбинации с плоским графитовым монохроматором, коллимирующей щелью с экваториальной апертурой 0.1 мм и точечным детектором. Обработка (фитирование) рефлектограмм проводилось с помощью коммерческой программы PANalytical X'Pert Reflectivity. Измерения рентгеновской дифрактометрии показали, что все исследуемые образцы являются рентгено-аморфными, брегговские рефлексы от пленок на дифрактограммах отсутствуют, эти данные далее не приводятся.

Рентгеноструктурные исследования показали, что условия синтеза определяют структурное качество пленок. Для синтеза пленок карбида бора на различных подложках необходимо подбирать оптимальные условия синтеза для каждой конкретной подложки. Было установлено, что синтез высококачественных пленок на подложках кремния возможен в вакууме при базовом давлении 10-

5 Па, при температуре подложки 400 °С, энергия лазера понижена до 30 мДж (образец S2). На Рис. 1.1.10.2 приведена рентгеновская рефлектограмма для данного образца. Общая толщина пленки составляет $11,5 \pm 0,1$ нм, среднеквадратичная шероховатость поверхности – 0,4 нм, плотность – 2,35 г/см³, что близко к значению плотности объемного карбида бора 2,52 г/см³. Для синтеза высококачественных пленок карбида бора на подложках из сапфира рекомендуется использовать другие технологические режимы: синтез производить в вакууме при базовом давлении 10-5 Па, при температуре подложки 20 °С, энергия лазера до 30 мДж (образец А5). На Рис. 1.1.10.3 приведена рентгеновская рефлектограмма для данного образца. Общая толщина пленки составляет $36,1 \pm 0,2$ нм, среднеквадратичная шероховатость поверхности – 0,5 нм, плотность – 2,32 г/см³, что близко к значению плотности объемного карбида бора 2,52 г/см³.

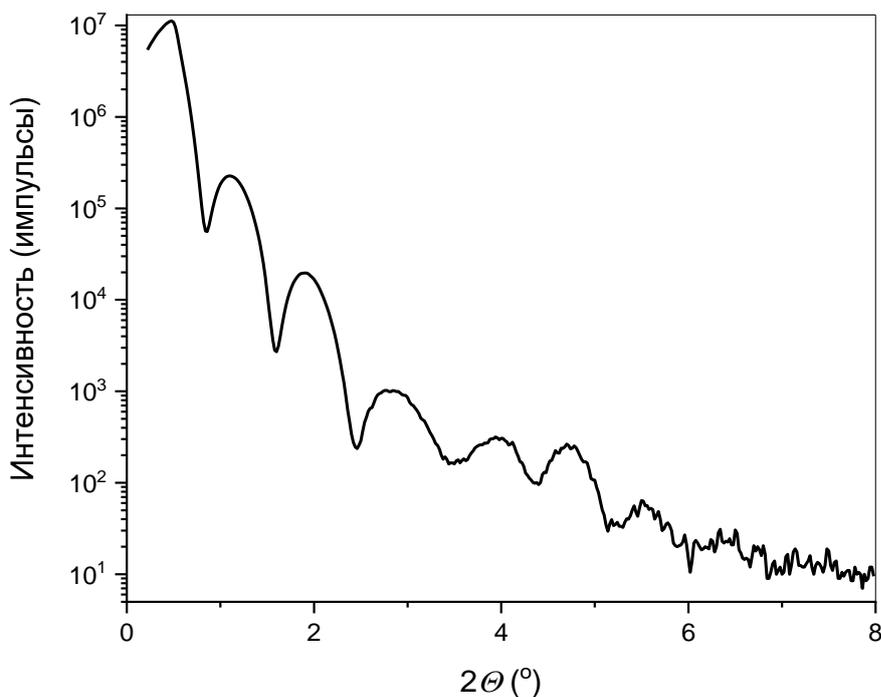


Рис. 1.1.10.2. Экспериментальная кривая рентгеновской рефлектометрии для образца S2.

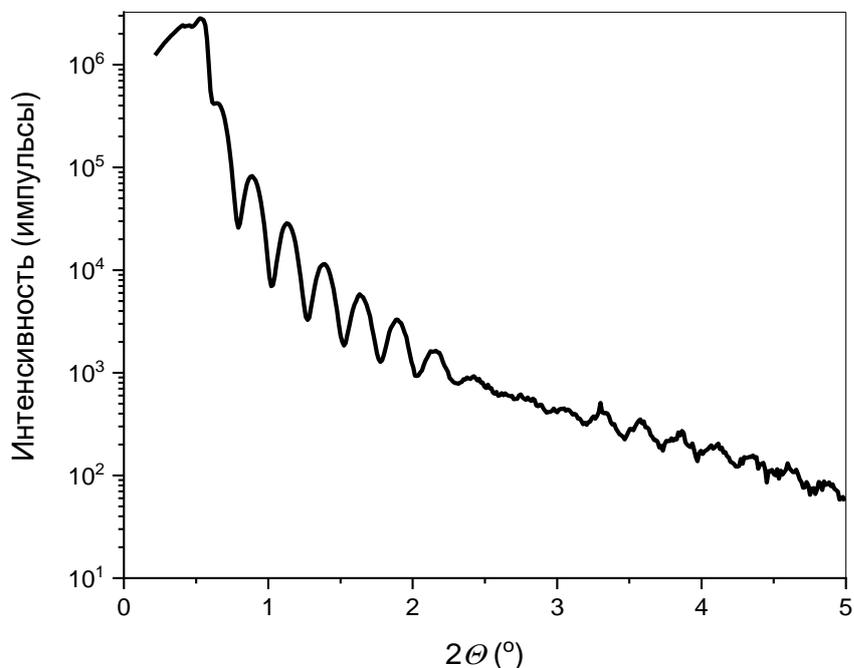


Рис. 1.1.10.3. Экспериментальная кривая рентгеновской рефлектометрии для образца А5.

1.1.10.3 Заключение

Объектом исследования были тонкие пленки на основе карбида бора как перспективные материалы для создания детекторов нейтронов нового поколения.

Цель работы было синтезировать и провести структурную характеризацию таких пленок с целью предложить перспективные тонкопленочные системы для дальнейшего использования в разработке твердотельных детекторов нейтронов.

Задачи первого этапа проекта полностью выполнены. Методом высоковакуумного импульсного лазерного осаждения синтезированы высококачественные тонкие пленки карбида бора на монокристаллических подложках сапфира и кремния. Структурные исследования, проведенные с использованием методов рентгеновской рефлектометрии и дифрактометрии, позволили определить структурные характеристики исследуемых образцов. Были сформулированы рекомендации по синтезу высококачественных пленок карбида бора.

Выполненные работы полностью соответствуют Техническому заданию и Плану-графику работ (п. 1.1.10), выполняемых в рамках реализации исследовательской программы (проекта) (Приложение № 12 к Соглашению о предоставлении субсидии от 05 июня 2025г. № 075-10-2025-153).

Полученные результаты полностью соответствуют п. 1.1.10 Плана-Графика работ в рамках исполнения обязательств по Соглашению № 075-10-2025-153 от 05 июня 2025 г.

ПРИЛОЖЕНИЯ

- Акт синтезирования образцов. ФАЙЛ: [ПГ 1.1.10 Акт синтезирования образцов.pdf](#)

1.1.11 Исследование влияния технологических режимов импульсного лазерного напыления на рентгеноструктурные и механические (микротвердость) свойства плёнок на основе карбида бора (совместно с ИФМ УрО РАН, Договор № 400-04782 от 28.07.2025 г.).

Импульсное лазерное напыление (осаждение) — это метод физического осаждения на подложке тонких пленок из паровой фазы. В этом процессе высокоэнергетический лазерный импульс, взаимодействующий с материалом мишени, приводит к образованию падающего на подложку плазменного сгустка, состоящего из электронов, ионов, нейтральных частиц, а также из микрочастиц материала мишени. Траектория дальнейшего движения этих частиц и их распределение по скоростям, процессы их осаждения на подложку определяются технологическими режимами напыления: давлением в камере синтеза, наличием или отсутствием нейтральных газов, температурой подложки, энергией и длиной волны лазерного излучения. Получение в этих условиях высококачественных пленок, например, карбида бора, является сложной научно-технической задачей, решение которой требует оптимизации параметров синтеза применительно к конкретным материалам мишени и подложки.

Синтез серии пленок карбида бора на монокристаллических подложках кремния и сапфира производился на высоковакуумной установке ИЛН из твердотельных мишеней В₄С. Распыление материала производилось внутри вакуумной камеры мощным сфокусированным лазерным импульсом от YAG:Nd³⁺ лазера (LOTUS ПИ) на длине волны 532 нм. Длительность лазерного импульса составляла 10-12 нс, число импульсов – 36 000. При синтезе образцов серии варьировалась температура подложки от комнатной до 800 °С, энергия лазера от 30 до 50 мДж, давление в камере роста (10⁻⁵ Па при синтезе в вакууме и 10⁻² Па при синтезе в атмосфере нейтрального газа аргона). В Таблице 1.1.11.1 приведен список образцов серии и значения технологических параметров, заданных при их синтезе.

Таблица 1.1.11.1. Список образцов серии и значения технологических параметров, заданных при их синтезе.

№ п/п	Обозначение образца	Подложка	Значения технологических параметров синтеза		
			Температура подложки, °С	Давление, Па	Энергия лазера, мДж
1	S1	Si	20	10 ⁻²	50
2	S2	Si	400	10 ⁻⁵	30
3	S3	Si	600	10 ⁻⁵	50
4	S4	Si	20	10 ⁻⁵	50
5	S5	Si	400	10 ⁻²	50
6	S6	Si	200	10 ⁻⁵	50
7	A1	Al ₂ O ₃	20	10 ⁻²	50
8	A2	Al ₂ O ₃	400	10 ⁻⁵	30
9	A3	Al ₂ O ₃	800	10 ⁻⁵	50
10	A4	Al ₂ O ₃	600	10 ⁻⁵	50
11	A5	Al ₂ O ₃	20	10 ⁻⁵	50
12	A6	Al ₂ O ₃	400	10 ⁻²	50
13	A7	Al ₂ O ₃	200	10 ⁻⁵	50

Сразу после синтеза образцов производились измерения их рентгеноструктурных свойств методами рентгеновской дифрактометрии и рефлектометрии. Рентгеноструктурные измерения проводились на лабораторном рентгеновском дифрактометре PANalytical Empyrean Series 2 в геометрии параллельного пучка на излучении с длиной волны 0.179 нм. Для формирования параллельного пучка на первичном пучке использовалось параболическое зеркало на основе сверхрешетки W/Si, обеспечивающее, помимо формирования параллельного пучка, подавление

линии $Co K_{\alpha}$ излучения и непрерывного спектра. Высота пучка, ограниченного щелью, составляла 0.05 мм. На вторичном пучке использовался плоскопараллельный коллиматор в комбинации с плоским графитовым монохроматором, коллимирующей щелью с экваториальной апертурой 0.1 мм и точечным детектором.

В зависимости от полученных результатов принималось решение о дальнейшем варьировании технологических параметров синтеза с целью определения оптимальных для синтеза высококачественных пленок параметров. Для наиболее совершенных в структурном отношении образцов далее проводились измерения механических свойств (микротвердость). Главными рентгеноструктурными характеристиками, определяющими качество пленки, считали плотность пленки по сравнению с данными для объемного карбида бора ($2,25 \text{ г/см}^3$) и среднеквадратичную шероховатость ее поверхности. Дополнительно были также определены толщины пленок в зависимости от выбранных технологических режимов синтеза. Плотность пленки определялась по положению критического угла полного внешнего отражения на рефлектометрической кривой, среднеквадратичная шероховатость поверхности – по спаду интенсивности рентгеновского отражения от образца по мере увеличения угла скольжения рентгеновского пучка. Толщины пленок были определены по положениям брегговских рефлексов согласно ГОСТ 8.698 — 2010.

На Рис. 1.1.11.1 приведены кривые рентгеновской рефлектометрии для выращенных на подложке из кремния образцов S1-S6. Результаты рентгеноструктурных исследований для этих образцов приведены в Таблице 1.1.11.2. Как следует из результатов рентгеноструктурных исследований, синтез наиболее качественных пленок карбида бора на подложках кремния достигается при синтезе в вакууме при базовом давлении 10^{-5} Па; при температуре подложки $400 \text{ }^{\circ}\text{C}$; при пониженной до 30 мДж энергии лазера (образец S2). В этом случае плотность пленки карбида бора составляет $2,35 \text{ г/см}^3$, что близко к значению плотности объемного карбида бора $2,52 \text{ г/см}^3$, среднеквадратичная шероховатость поверхности составляет 0,4 нм. Отклонение от вышеприведенных технологических параметров синтеза приводит к значительному ухудшению структурных качеств пленок карбида бора, прежде всего, к уменьшению плотности пленки. При повышенной до $600 \text{ }^{\circ}\text{C}$ температуре подложки (образец S3) происходит интенсивная интердиффузия Si и B₄C с образованием силицида. При понижении температуры синтеза (образцы S1, S4, S6), а также при синтезе в атмосфере инертного газа аргона (образец S5) формируется пленка карбида бора, но с уменьшенной плотностью и увеличенной шероховатостью поверхности.

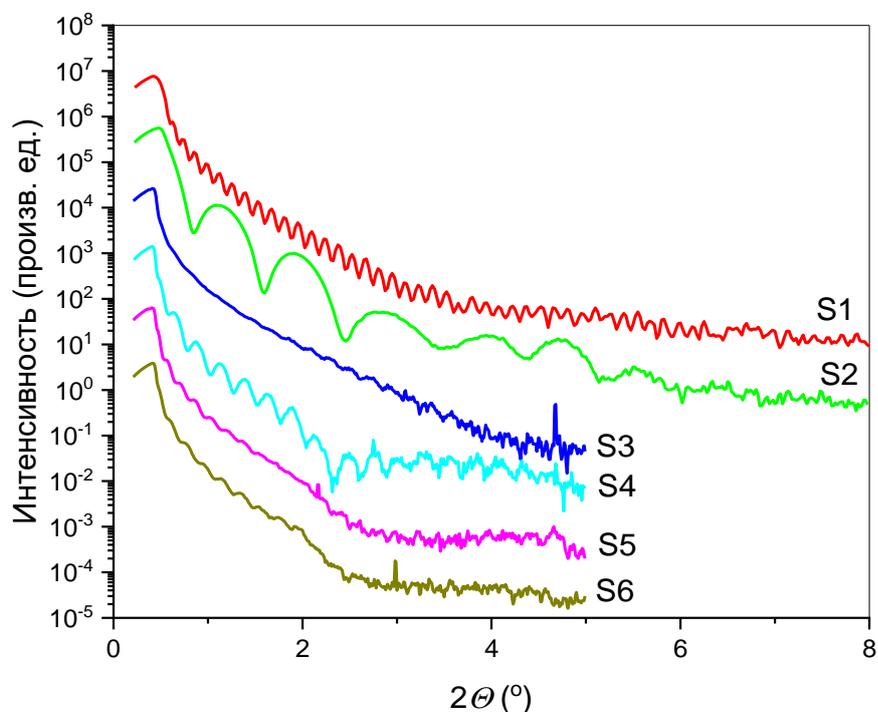


Рис. 1.1.11.1. Экспериментальные кривые рентгеновской рефлектометрии выращенных на подложке из кремния образцов S1-S6.

Таблица 1.1.11.2. Результаты рентгеноструктурных исследований для образцов S1–S6.

№ п/п	Обозначение образца	Плотность пленки, г/см ³	Среднеквадратичная шероховатость поверхности, нм	Общая толщина пленки, нм	Значения относительных погрешностей, нм
1	S1	1,75	1,0	70,3	0,1
2	S2	2,35	0,4	11,5	0,1
3	S3	1,69	0,7	Пленка отсутствует	–
4	S4	1,65	0,5	41	1,0
		1,72	0,9	37	1,0
5	S5	1,45	1,0	63,2	0,2
6	S6	1,45	1,0	51,5	0,2

На Рис. 1.1.11.2 приведены кривые рентгеновской рефлектометрии для выращенных на подложке из сапфира образцов A1-A7. Результаты рентгеноструктурных исследований для этих образцов приведены в Таблице 1.1.11.2. Как следует из результатов рентгеноструктурных исследований, синтез наиболее качественных пленок карбида бора на подложках сапфира достигается при синтезе в вакууме при базовом давлении 10^{-5} Па; при комнатной температуре подложки и при энергии лазера 50 мДж (образец A5). В этом случае плотность пленки карбида бора составляет $2,32$ г/см³, что близко к значению плотности объемного карбида бора $2,52$ г/см³, среднеквадратичная шероховатость поверхности составляет $0,5$ нм. При отклонении от вышеприведенных технологических параметров синтеза снижается плотность пленок и повышается среднеквадратичная шероховатость поверхности.

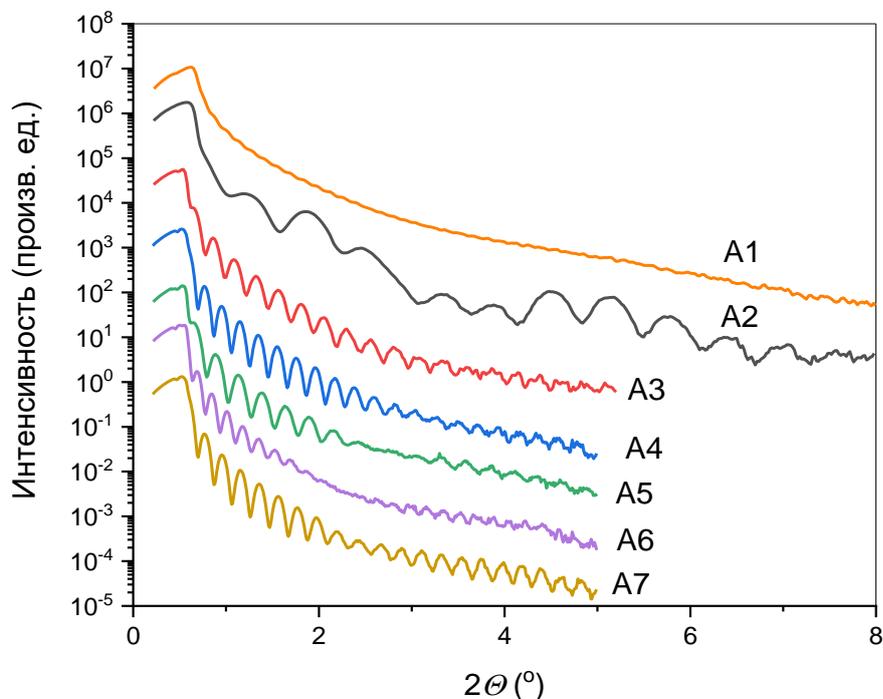


Рис. 1.1.11.2. Экспериментальные кривые рентгеновской рефлектометрии выращенных на подложке из сапфира образцов А1-А7.

Таблица 1.1.11.3. Результаты рентгеноструктурных исследований для образцов А1-А7.

№ п/п	Обозначение образца	Плотность пленки, г/см ³	Среднеквадратичная шероховатость поверхности, нм	Общая толщина пленки, нм	Значения относительных погрешностей, нм
1	А1	1,35	2,0	67,5	0,1
2	А2	2,3	1,5	14,3	0,2
3	А3	2,1	1,5	39,6	0,2
4	А4	2,1	1,0	49,0	1,0
5	А5	2,32	0,5	36,1	0,2
6	А6	2,06	1,0	47,3	0,2
7	А7	2,1	0,5	49,5	0,2

Для отобранных образцов S2 и А5 были проведены измерения микротвердости. Микротвёрдость измеряли с помощью автоматического нанотвердомера Nanotest 600 (Micromaterials Ltd.), который позволяет проводить испытания по методу Виккерса. Метод заключается во вдавливании алмазного наконечника (индентора) в форме правильной пирамиды с углом при вершине 136°, в образец под действием нагрузки и измерении диагонали отпечатка после снятия нагрузки. Пирамидальный наконечник в форме правильной четырехгранной пирамиды удовлетворяет требованиям ИСО 6507-2. Микротвёрдость определяется как отношение приложенной нагрузки к площади поверхности отпечатка. Измерения проводились при нагрузках от 0,5 г до 1,5 Н (по 5 точек на каждую нагрузку), время нагружения 5 секунд. Согласно результатом измерений, средние значения микротвердости составляют $10,89 \pm 1,40$ ГПа для образца S2 и $16,79 \pm 3,30$ ГПа для образца А5. Полученные значения значительно отличаются от данных по микротвердости подложек, на которые нанесены пленки; таким образом, вклад подложек в

микротвердость пленок исключается. Полученные значения микротвердости полученных тонких пленок карбида бора меньше, чем твердость объемного карбида бора, но это обычная ситуация для случая тонких пленок.

Заключение

Задачи первого этапа проекта полностью выполнены. Было исследовано влияние технологических режимов импульсного лазерного напыления (давление в камере синтеза, температура подложки, энергия лазера, наличие аргона в камере синтеза) на рентгеноструктурные и механические свойства синтезируемых тонких пленок карбида бора на подложках кремния и сапфира, определены оптимальные условия синтеза.

Были определены следующие оптимальные технологические параметры для синтеза высококачественных тонких пленок карбида бора методом импульсного лазерного напыления. Для синтеза на подложках кремния рекомендуется проводить синтез в вакууме при базовом давлении 10^{-5} Па; при температуре подложки 400 °С; при энергии лазера 30 мДж. В этом случае плотность пленки карбида бора составляет 2,35 г/см³, что близко к значению плотности объемного карбида бора 2,52 г/см³, среднеквадратичная шероховатость поверхности составляет 0,4 нм, микротвердость составляет $10,89 \pm 1,40$ ГПа. Для синтеза на подложках сапфира рекомендуется проводить синтез в вакууме при базовом давлении 10^{-5} Па; при комнатной температуре подложки и при энергии лазера 50 мДж. В этом случае плотность пленки карбида бора составляет 2,32 г/см³, что близко к значению плотности объемного карбида бора 2,52 г/см³, среднеквадратичная шероховатость поверхности составляет 0,5 нм, микротвердость составляет $16,79 \pm 3,30$ ГПа.

Полученные результаты полностью соответствуют п. 1.1.11 Плана-Графика работ в рамках исполнения обязательств по Соглашению № 075-10-2025-153 от 05 июня 2025 г.

ПРИЛОЖЕНИЯ

- Протокол исследований. ФАЙЛ: [ПГ 1.1.11 Протокол исследований 1.pdf](#)
- Протокол исследований. ФАЙЛ: [ПГ 1.1.11 Протокол исследований 2.pdf](#)

1.1.12 Разработка, изготовление и испытание прототипа детектора тепловых нейтронов с конвертером ¹⁰B на основе одной алюминиевой straw-трубки (совместно с Государственным университетом «Дубна», Договор № 400-04902 от 06.08.2025 г.).

В Государственном университете «Дубна» совместно с НЭОКС ЛНФ, в рамках исследовательской программы (проекта) по теме: “Разработка и создание современных экспериментальных станций источников импульсного или постоянного типа” изготовлен и испытан прототип газового детектора для регистрации тепловых нейтронов с твердотельным конвертером из карбида бора В₄С, обогащённого по изотопу ¹⁰B на основе одной алюминиевой straw-трубки согласно пункта 1.1.12 Плана-графика «Разработка, изготовление и испытание прототипа детектора тепловых нейтронов с конвертером ¹⁰B на основе одной алюминиевой straw-трубки».

1.1.12.1 Изготовление прототипа straw-детектора

Изготовление выполнялось в несколько этапов.

1. Изготовление конвертера тепловых нейтронов на подложке из алюминиевой фольги. С помощью лабораторной вакуумной установки VSR-300 университета «Дубна» (рис. 1.1.12.1) производилось нанесение слоя конвертера ¹⁰B₄С на подложку из алюминиевой фольги толщиной 50 мкм методом вакуумного магнетронного распыления мишени ¹⁰B₄С. Толщина слоя ¹⁰B₄С определялась с помощью свидетеля – кремниевой полированной пластины, на которой формируется

ступенька, высота которой соответствует толщине слоя. Измерения высоты ступеньки выполнялись на профилометре FRT MicroSpy® Profile. Чувствительность профилометра составляет 6–10 нм. Толщина слоя конвертера $^{10}\text{B}_4\text{C}$ составила 200 и 500 нм.

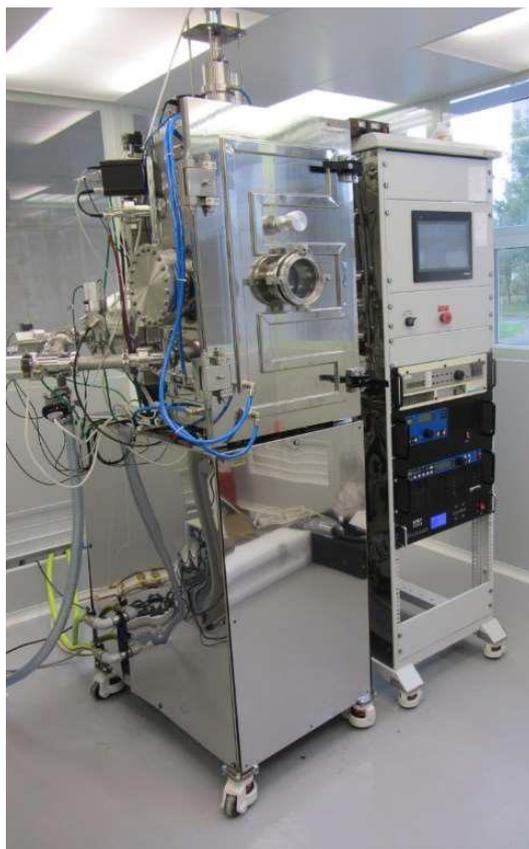


Рис. 1.1.12.1. Лабораторная вакуумная установка VSR300.

2. Изготовление заготовки для straw-трубки.

Заготовки для straw-трубок изготавливались совместно с ЛНФ ОИЯИ используя Лазерный маркирующий комплекс «Альфа В30А4». Из фольги с конвертером $^{10}\text{B}_4\text{C}$ вырезались заготовки – полоски шириной 33 мм и длиной 250 мм. В области предполагаемого шва с помощью этого же лазера с поверхности фольги удалялось покрытие из конвертера $^{10}\text{B}_4\text{C}$.

3. Размещение заготовки для изготовления straw-трубки.

Заготовки из фольги закреплялись на калиброванном полированном стержне диаметром 10 мм из нержавеющей стали конверторным слоем к стержню и фиксировалась полиимидной плёнкой с клейким слоем так, чтобы края полоски-заготовки были направлены вдоль оси стержня. Далее на стержень насаживались последовательно формирователь наложения краёв фольги внахлест, фильера и обжимщик фольги, как показано на Рис. 1.1.12.2.

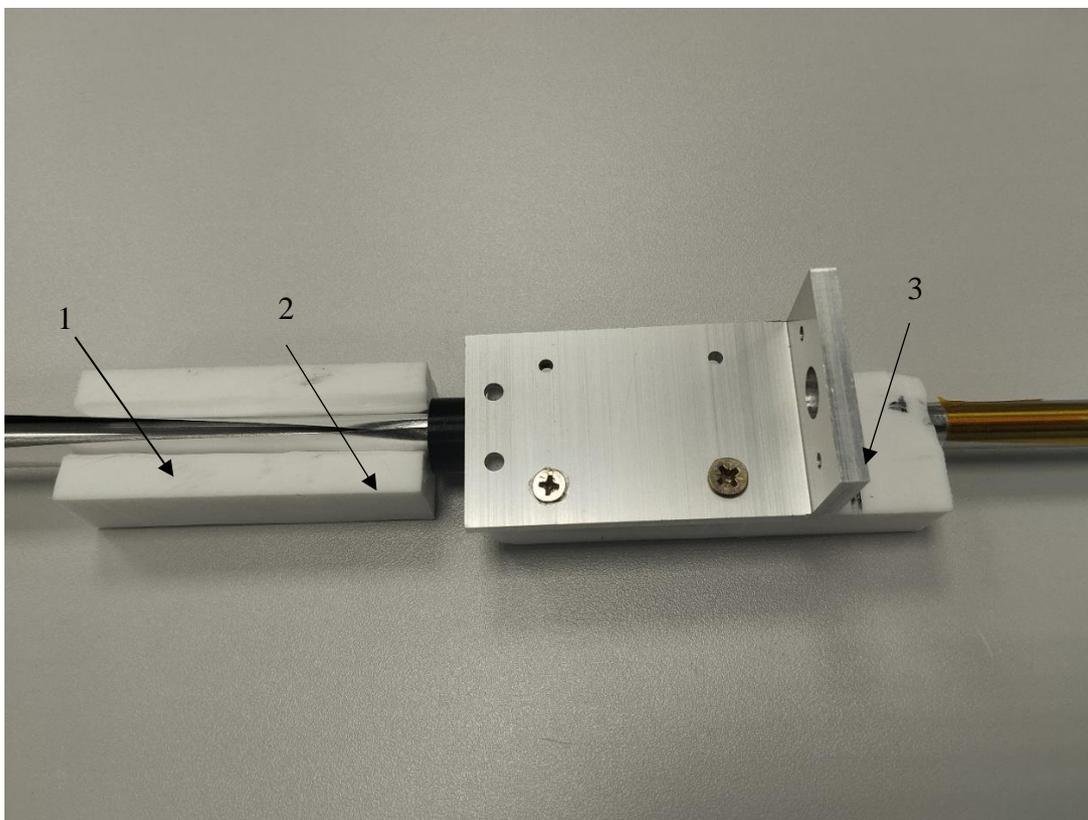


Рис. 1.1.12.2. Размещение заготовки для изготовления straw-трубки. 1 – формирователь; 2 – фильера; 3 – обжимщик фольги.

Собранный комплекс стержня с заготовкой для изготовления straw-трубки фиксируется для сварки на установке ультразвуковой сварки, как показано на Рис. 1.1.12.3.

4. Сварка straw-трубки. Сварка straw-трубки осуществлялась совместно с ЛНФ ОИЯИ с помощью пьезокерамической колебательной системы с волноводом, оканчивающимся цилиндрической головкой (сонотродом), управляемой ультразвуковым генератором УЗГ13-0,1/22. Процесс сварки происходит за счёт акустических колебаний головки-сонотрода с частотой 22 кГц, прижимаемой к краям фольги, заправленным внахлёт. Место прижима головки мгновенно разогревается до температуры плавления алюминия, осуществляя прочное сварное соединение. Установка для ультразвуковой сварки представлена на Рис. 1.1.12.4. В результате сварки получились straw-трубки диаметром 10 мм с перекрытием внахлёт порядка 1.5-2мм.



Рис. 1.1.12.3. Размещение стержня с заготовкой для изготовления straw-трубки на установке для ультразвуковой сварки.

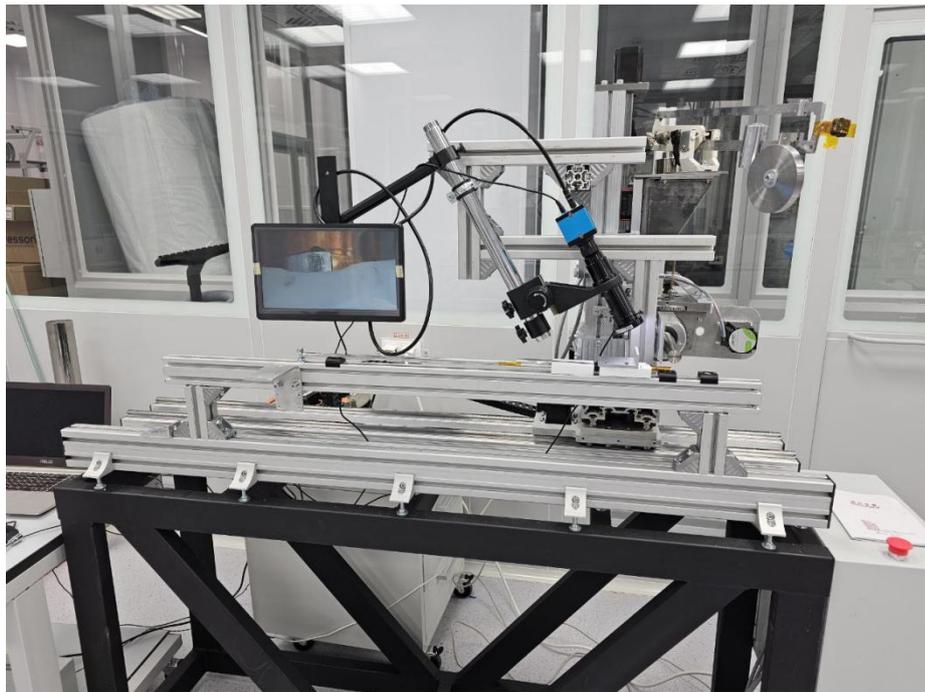


Рис. 1.1.12.4. Установка для ультразвуковой сварки.

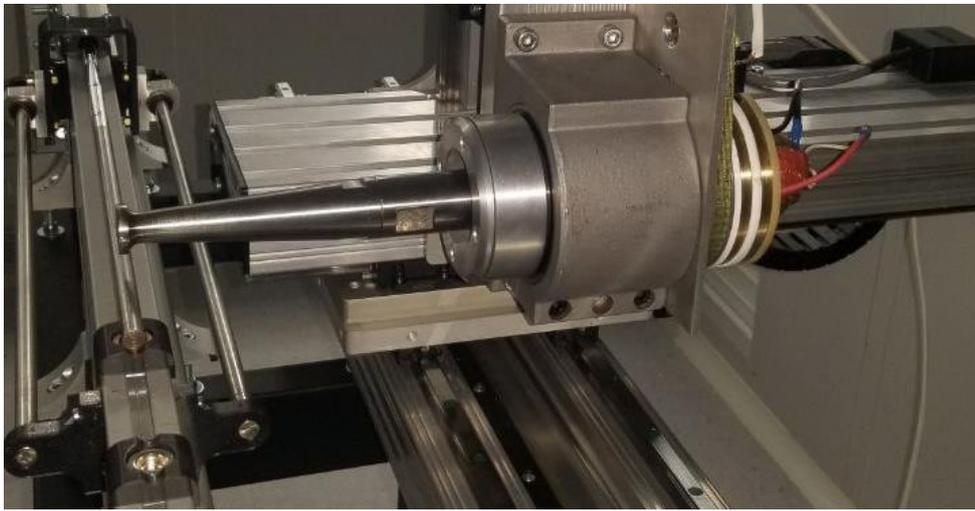


Рис. 1.1.12.5. Расположение цилиндрической головки сонотрода относительно стержня.

На Рис. 1.1.12.5 показано расположение головки сонотрода относительно стержня. На Рис. 1.1.12.6 приведена фотография сварного шва, а на Рис. 1.1.12.7 представлен вид готовой straw-трубки. Эксперименты показали возможность изготовления straw-трубки длиной до 1 м.



Рис. 1.1.12.6. Фотография сварного шва.



Рис. 1.1.12.7. Внешний вид straw-трубки.

Для проведения проверки straw-трубок на герметичность и прочность были подготовлены 2 straw-трубки, у которых отверстия были закупорены с обеих сторон. При этом, с одной стороны вставлялась трубочка, через которую подавался воздух под давлением. Straw-рубки, опущенные в воду, не выделяли пузырьки воздуха. Предельное давление, при котором straw-трубки разрывались, составили 3,5 и 4,5 атм. На Рис. 1.1.12.7 приведена фотография разорванных трубок.



Рис. 1.1.12.8. Фотография разорванных трубок при давлении 3,5 и 4,5 атм.

5. Сборка прототипа straw-детектора.

На Рис. 1.1.12.9 представлен чертёж конструкции straw-детектора. Основанием конструкции является балка 1 из евро-профиля 20x40 мм. В центральной части кронштейнов 2 размещена straw-трубка 3, закрытая с торцов втулками 4, выполненными из изолятора. В каждую втулку 4 вставлен медный пин 5, фиксирующий с помощью обжима вольфрамовую золочёную проволоку 12 диаметром 30 мкм, являющуюся анодом детектора. Втулки 4 выполняют роль центровки анодной проволоки строго вдоль оси straw-трубки 3 и закрепления straw-трубки 3 в кронштейне 2. Во втулке 4 имеется отверстие для возможности продува straw-трубки 3 рабочим газом. Для осуществления продувки газом область размещения торцов straw-трубок 3 на кронштейнах 2 закрывается стаканами 6, притягиваемыми к кронштейну 2 болтами 7 с гайками 9. Герметичность обеспечивается за счёт применения уплотнительного кольца 10. На торце стаканов 6 размещаются быстросъёмные газовые фитинги под газовую трубку ПВХ диаметром 6 мм. На одном стакане 6 размещается высоковольтный разъём для подачи на анод высокого напряжения.

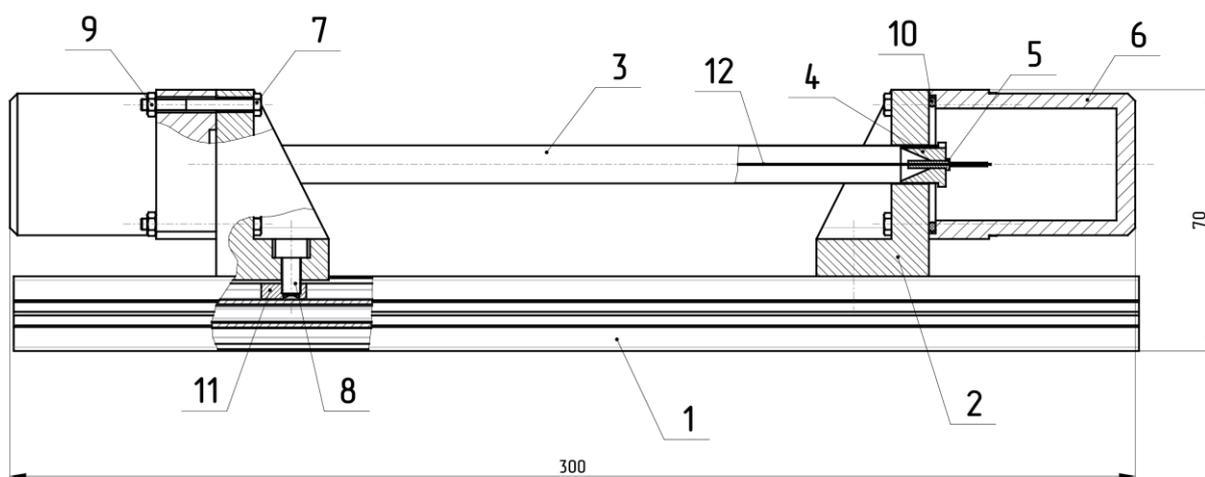


Рис. 1.1.12.9. Чертёж конструкции straw-детектора.

При сборке детектора торцы straw-трубки на кронштейнах развальцовывались и фиксировались эпоксидным клеем. С помощью винтов 8 и Т-гаек 11, установленных в профиле балки 1, осуществлялась фиксация straw-трубки в натянутом положении. После этого продевалась вольфрамовая золочёная проволока диаметром 30 мкм, являющаяся анодом, как показано на Рис. 1.1.12.10.

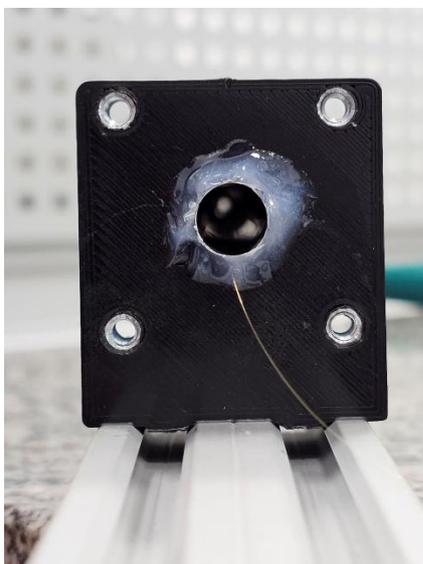


Рис. 1.1.12.10. Straw-трубка с анодной проволокой, закреплённая на кронштейне.



Рис. 1.1.12.11. Straw-детекторы со снятыми стаканами.

Далее, в торец straw-трубки плотно вставлялась втулка и центрирующий, и зажимающий анодную проволоку, медный трубчатый пин. Для натяжения анодной проволоки вся конструкция детектора устанавливалась вертикально, верхний пин обжимался для фиксации анодной проволоки. К нижнему концу анодной проволоки прикреплялся груз в 100 г, обеспечивающий натяжение, после чего обжимался второй пин. Такими действиями обеспечивалось натяжение straw-трубки и анодной

проволоки. На Рис. 1.1.12.11 показано 2 собранных straw-детектора без стаканов. Между ними – стакан с газовым фитингом. На Рис. 1.1.12.12 приведены собранные straw-детекторы с конвертерами 500 нм (чёрный) и 100 нм (белый).



Рис. 1.1.12.12. Straw-детекторы с конвертером 500 нм и 100 нм.

1.1.12.2 Испытание прототипа straw-детектора.

Испытание прототипов straw-детектора проводились на базе ЛНФ ОИЯИ, в помещениях 119 корпуса, предназначенных для работы с радиоактивными источниками, и выполнялись для двух straw-детекторов с толщиной слоя конвертера $^{10}\text{B}_4\text{C}$ 200 и 500 нм с использованием лабораторного источника нейтронов ^{252}Cf (выход 10^7 н/с на 07.11.24г.), который устанавливался непосредственно перед измерениями в пластиковый замедлитель. Испытуемые детекторы размещались в непосредственной близости от замедлителя, как показано на Рис. 1.1.12.13.

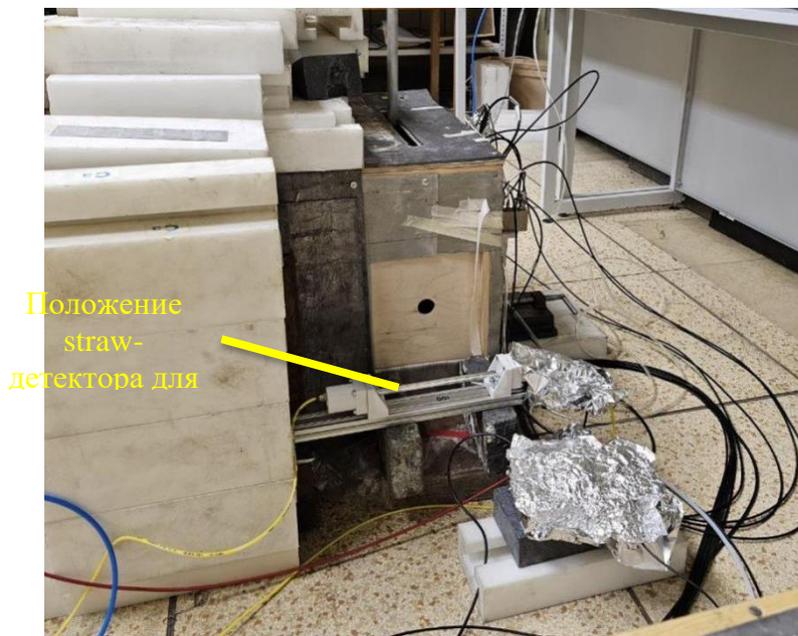


Рис. 1.1.12.13. Размещение straw-детектора для испытаний с источником нейтронов.

Для снятия счётной характеристики, определения рабочего напряжения и получения амплитудных спектров собирался измерительный тракт, состоящий из: straw-детектора, источника высокого напряжения DT5533EM CAEN, зарядочувствительного усилителя-формирователя квази-гауссовской формы (разработан в НЭОКС ИБР-2 ЛНФ), цифрового многоканального анализатора MCA-8000D и ПК с ПО Dpp-MCA. В качестве рабочего газа использовалась смесь 90% Ar/10%CO₂ в проточном режиме со скоростью подачи газовой смеси 2 см³/мин. В течение 4 часов до проведения измерений выполнялась продувка straw-детектора с этой же скоростью.

Straw-детектор с толщиной конвертера 200 нм. На Рис. 1.1.12.14 представлены амплитудные спектры в зависимости от напряжения питания и счётная характеристика, построенная на их основе при коротких экспозициях, достаточных для набора чёткого спектра. Для отсеечения шума использовался порог на уровне 20 мВ. На амплитудных спектрах чётко выделяются пики, соответствующие энергиям частиц, образующихся при взаимодействии бора-10 с нейтронами: по 1 каналу распада (94%) – литий (0,84 МэВ) и α -частица (1,47 МэВ), по 2 каналу распада (6%) – литий (1,01 МэВ) и α -частица (1,77 МэВ). Несимметричность пиков связана со стеночным эффектом конвертера трубчатой формы. При установленном пороге 20 мВ вклад от гамма-фона, связанного с источником нейтронов ²⁵²Cf, начал появляться при напряжении питания более 850 В.

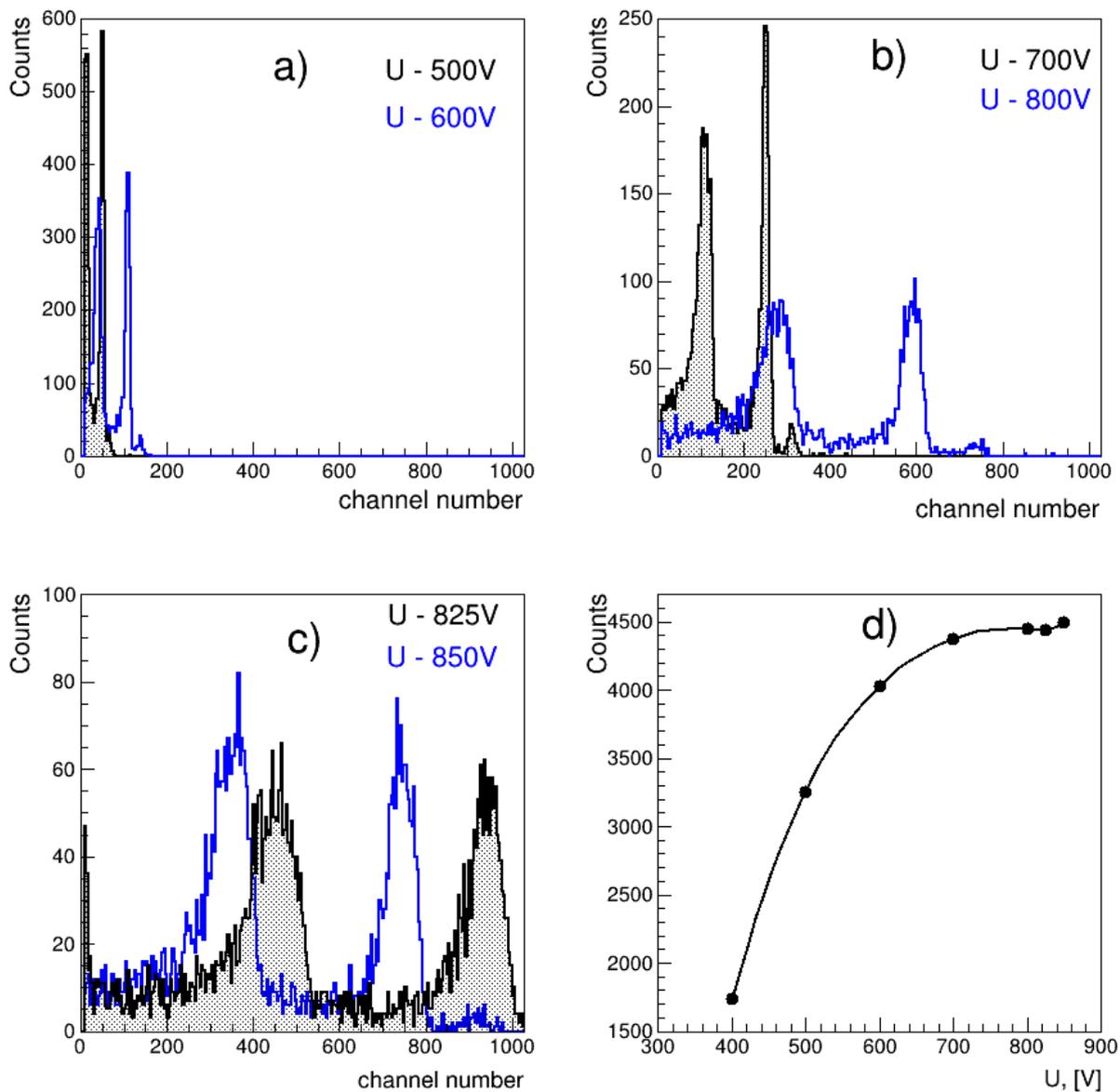


Рис. 1.1.12.14. Straw-детектор с толщиной конвертера 200нм. Амплитудные спектры в зависимости от напряжения питания и счётная характеристика.

Оптимальное рабочее напряжение, определяемое по счётной характеристике, выходящей в насыщение, составляет 800 В. Для получения амплитудного спектра высокого качества было установлено напряжение питания 800 В и время набора 19.5 часов. На Рис. 1.1.12.15 представлен полученный амплитудный спектр. На спектре отчётливо видны энергетические пики частиц лития и гелия обоих каналов распада.

Straw-детектор с толщиной конвертера 500 нм. На Рис. 1.1.12.17 представлены амплитудные спектры в зависимости от напряжения питания и счётная характеристика, построенные аналогично спектрам для 200 нм. На Рис. 1.1.12.16 представлен амплитудный спектр при напряжении 800 В и накоплении 19.5 часов.

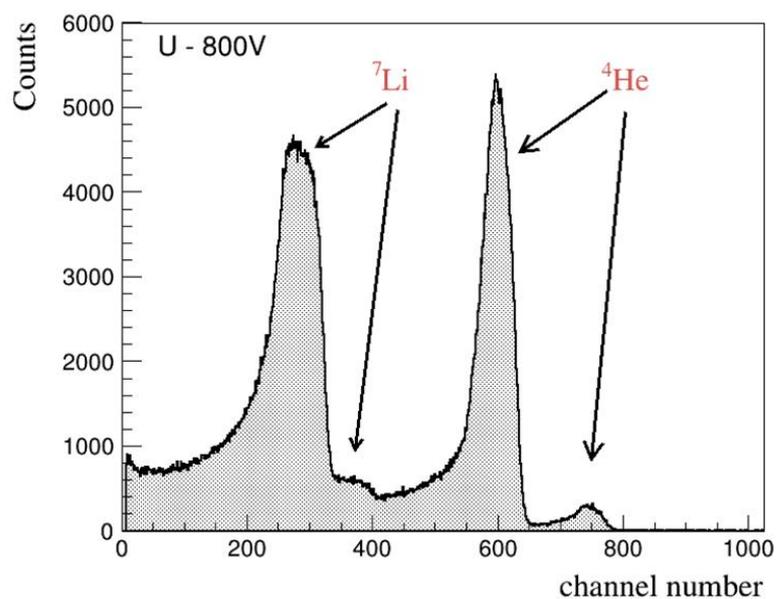


Рис. 1.1.12.15. Амплитудный спектр straw-детектора с конвертером 200 нм при напряжении 800 В и времени набора 19.5 часов.

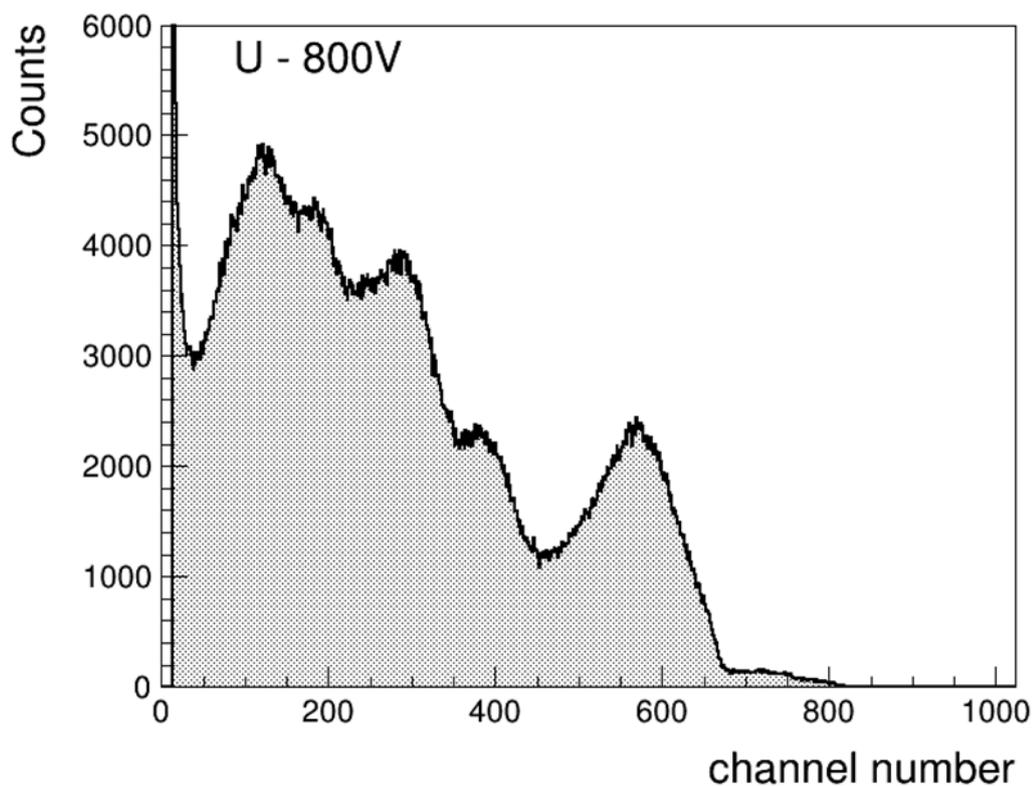


Рис. 1.1.12.16. Амплитудный спектр straw-детектора с конвертером 500 нм при напряжении 800 В и времени набора 19.5 часов.

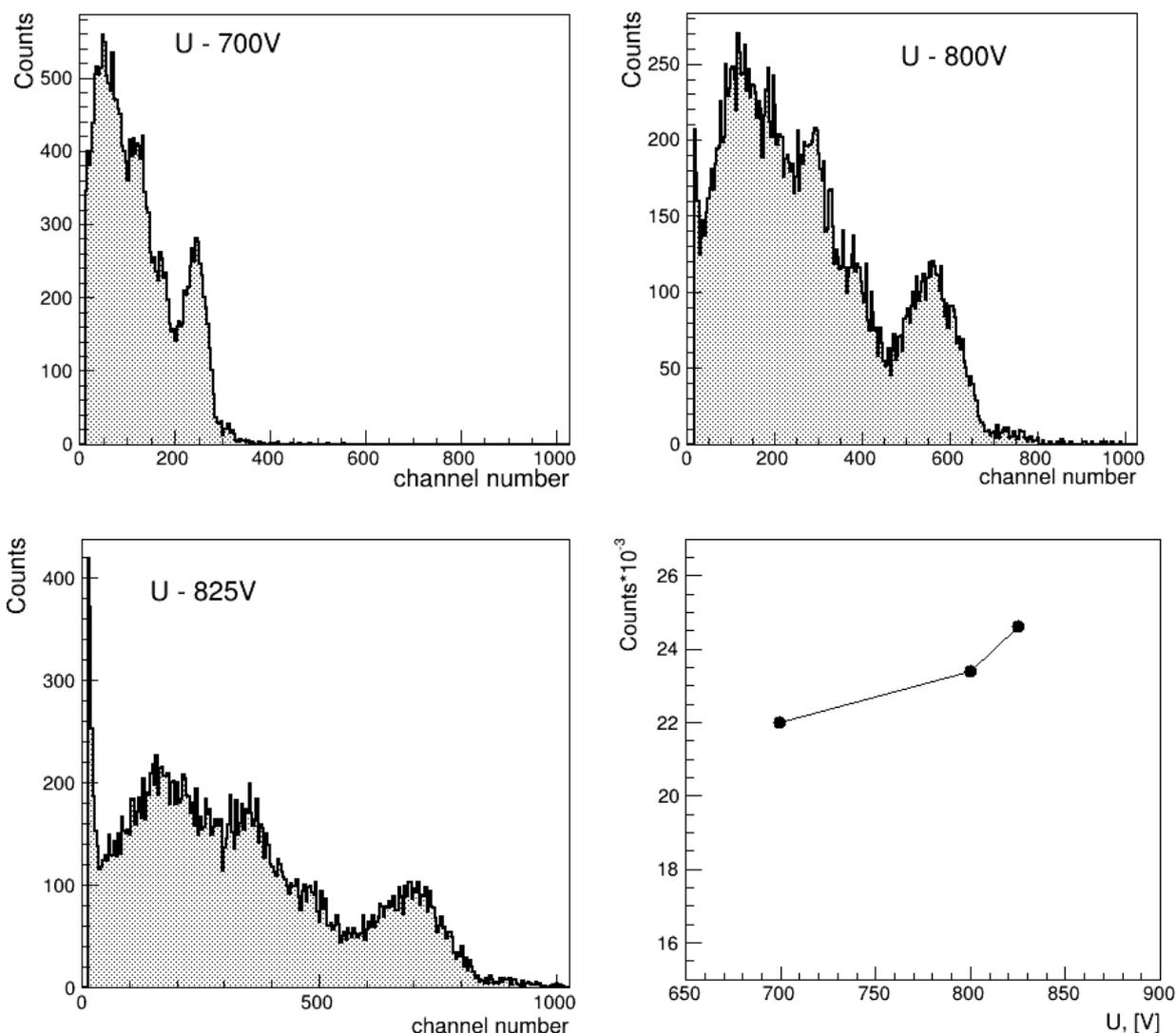


Рис. 1.1.12.17. Straw-детектор с толщиной конвертера 500нм. Амплитудные спектры в зависимости от напряжения питания и счётная характеристика.

Увеличение толщины конвертера до 500 нм сказалось на форме амплитудного спектра, в котором энергетические пики стали размытыми вследствие поглощения части энергии частиц в толщине слоя конвертера. Особенно эффект поглощения энергии в толщине слоя конвертера сказывается для частиц, разлетающихся из глубины конвертера под острыми углами к поверхности конвертера, которых с увеличением толщины становится больше. Чем угол разлёта более острый, тем больший путь частица проходит в слое конвертера и тем меньшая часть энергии выделяется в рабочем газе.

1.1.12.3 Определение эффективности регистрации тепловых нейтронов straw-детектора

Определение эффективности регистрации тепловых нейтронов выполнялось относительным методом. Для проведения измерений лабораторный источник нейтронов ^{252}Cf размещался в пластиковом замедлителе. В фиксированную относительно источника позицию сначала устанавливался контрольный счётчик на основе ^3He – “Гелий-13/120–8.0” и проводилось накопление счёта в течение 600 секунд с использованием цифрового многоканального анализатора МСА-8000D и ПК с ПО Dpp-МСА. После чего в эту же позицию устанавливались поочерёдно сначала straw-детектор с конвертером 200 нм, затем straw-детектор с конвертером 500 нм и

проводилось накопление счёта в течение 600 секунд. Относительная эффективность рассчитывалась как отношение числа накопленных событий регистрации нейтронов straw-детектором с конвертером 200 нм или 500 нм к числу накопленных нейтронных событий счётчика “Гелий-13/120-8.0”. Результаты накоплений для straw-детекторов и контрольного счётчика приведены в таблице 1.1.12.1

Таблица 1.1.12.1. Число отсчётов для straw-детекторов и детектора Гелий -13 за 600сек.

Счетчик	Гелий-13/120-8.0	straw-детектор (200 нм)	straw-детектор (500 нм)
Число отсчетов	132 222	8 856	15 600

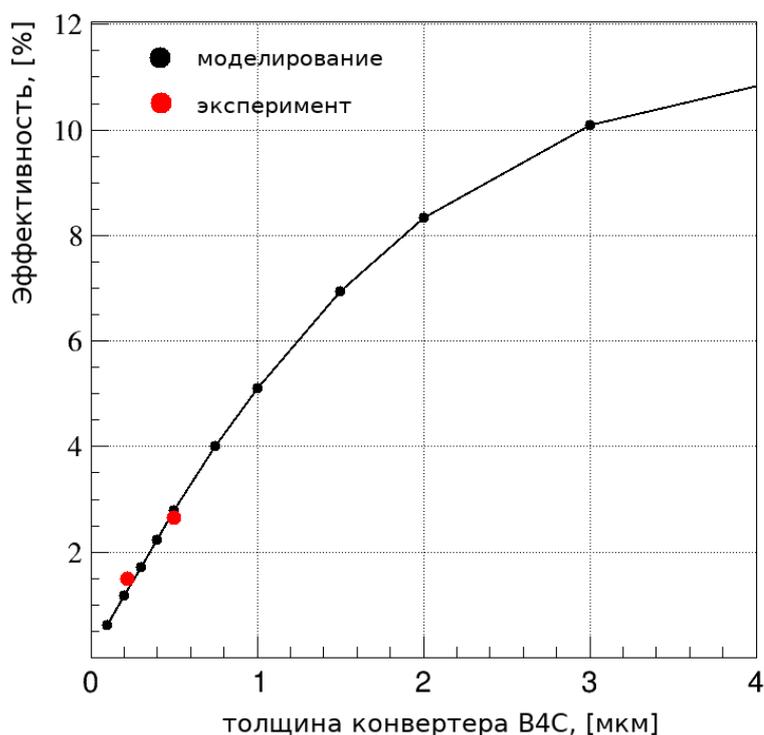


Рис. 1.1.12.18. Зависимость эффективности straw-детектора от толщины слоя конвертера $^{10}\text{B}_4\text{C}$ для нейтронов 1.8 Å.

Активная площадь контрольного счётчика составляет $\sim 7.15 \text{ см}^2$, а straw-детекторов $\sim 20 \text{ см}^2$. Относительная эффективность straw-детекторов с толщиной конвертера 200 и 500 нм по отношению к контрольному счётчику Гелий -13, с учётом разницы активных площадей составляет 0.023 и 0.042, соответственно, или 2,3% и 4,2%.

На Рис. 1.1.12.18 представлены результаты моделирования в пакете Geant4 эффективности straw-детектора диаметром 10 мм в зависимости от толщины слоя конвертера $^{10}\text{B}_4\text{C}$. Согласно результатам моделирования эффективность счётчика Гелий-13 для нейтронов с длиной волны 1.8 Å составляет 63%. По результатам измерений, приведённых в таблице 1.1.12.1 с учётом относительной чувствительности straw-детекторов с толщиной слоя конвертера $^{10}\text{B}_4\text{C}$ 200 нм и 500 нм, абсолютные значения эффективностей регистрации нейтронов с длиной волны 1.8 Å для straw-детекторов составляют ~ 1.5 и $\sim 2.7\%$ соответственно, обозначенными красными точками на графике Рис. 1.1.12.18, что находится в согласии с результатами моделирования в пакете Geant4.

1.1.12.4 Выводы

Результаты исследований подтверждают применимость straw-трубок для регистрации тепловых нейтронов. Установленный порог в 20 mV обеспечивает хорошую дискриминацию гамма-квантов и надёжную регистрацию тепловых нейтронов.

Государственным университетом «Дубна» совместно с НЭОКС ЛНФ, в рамках исследовательской программы (проекта) по теме: “Разработка и создание современных экспериментальных станций источников импульсного или постоянного типа” в соответствии с пунктом 1.1.12 Плана-графика «Разработка, изготовление и испытание прототипа детектора тепловых нейтронов с конвертером ^{10}B на основе одной алюминиевой straw-трубки» выполнены следующие работы:

4. Разработана конструкторская документация детектора тепловых нейтронов с конвертером ^{10}B на основе одной алюминиевой straw-трубки. В составе: чертёж общего вида; габаритный чертёж; сборочный чертёж; пояснительная записка.

5. Изготовлен прототип straw-детектора на основе одной straw-трубки из алюминиевой фольги с конвертером из карбида бора $^{10}\text{B}_4\text{C}$.

6. Выполнены испытания прототип straw-детектора конвертером из карбида бора $^{10}\text{B}_4\text{C}$ толщиной 200 нм и 500 нм.

По результатам испытаний можно сделать следующие выводы:

- подтверждена возможность изготовления straw-трубок из алюминиевой фольги с помощью ультразвуковой сварки;
- разработана технология ультразвуковой сварки straw-трубок с продольным швом;
- на полученных амплитудных спектрах с толщиной слоя 200 нм чётко видно пики, соответствующие энергиям частиц распада лития и гелия при повышении напряжения до 850 В;
- подтверждена низкая чувствительность к гамма-фону;
- эффективность straw-детектора в зависимости от толщины соответствует кривой рассчитанной с помощью программного пакета Geant4, что подтверждает получение эффективности 10% при толщине слоя 3 мкм;
- замена анодной проволоки из золочёного вольфрама на резистивную проволоку даст возможность получения однокоординатного straw-детектора.

Полученные результаты полностью соответствуют п. 1.1.12 Плана-Графика работ в рамках исполнения обязательств по Соглашению № 075-10-2025-153 от 05 июня 2025 г.

ПРИЛОЖЕНИЯ

- Конструкторская документация. ФАЙЛ: [ПГ 1.1.12 Конструкторская документация.pdf](#)
- Акт изготовления. ФАЙЛ: [ПГ 1.1.12 Акт изготовления.pdf](#)
- Методика испытаний. ФАЙЛ: [ПГ 1.1.12 Методика испытаний.pdf](#)
- Акт испытаний. ФАЙЛ: [ПГ 1.1.12 Акт испытаний.pdf](#)
- Протокол испытаний. ФАЙЛ: [ПГ 1.1.12 Протокол испытаний.pdf](#)

Работы исследователей в возрасте до 39 лет

1.1.13 Теоретические исследования и математическое моделирование с целью определения оптимальной конструкции плоскопараллельного детектора с МКП на основе конвертера

нейтронного излучения (совместно с НИЦ «Курчатовский институт» - ПИЯФ, Договор № 245-100-1/2025 от 08.08.2025 г.).

На первом этапе проекта были проведены теоретические исследования и математическое моделирование с целью определения оптимальной конструкции плоскопараллельного детектора с МКП на основе конвертера нейтронного излучения.

Цель выполнения работы: определить оптимальную конструкцию плоскопараллельного детектора с МКП на основе конвертера нейтронного излучения.

В рамках 1 этапа проекта выполнены теоретические исследования и моделирование электростатических полей в объёме нейтронного детектора на основе микроканальных пластин с целью определения его оптимальной конструкции. Последовательность исследований включала два ключевых этапа.

На первом этапе был проведен теоретический анализ современных подходов к созданию нейтронных детекторов с гадолинием (или его соединениями) в качестве конвертера.

Исследовались такие методы включения гадолиния в состав детектора как:

- а) внешние слои ^{nat}Gd (фольги/подложки, в прямой и обратной геометрии);
- б) легирование стекла МКП $^{nat}\text{Gd}/\text{Gd}_2\text{O}_3$;
- в) ALD покрытие поверхности каналов МКП соединением Gd_2O_3 .

На втором этапе произведено численное моделирование электрических полей внутри детектора с МКП, в программном пакете Maxwell 14.

Среда ANSYS Maxwell позволяет в статической и квазистатической постановке проводить прецизионные расчёты распределения электрического потенциала и напряжённости поля в двух- и трёхмерной области сложной конфигурации с учётом особенностей реальных диэлектрических и проводящих материалов.

Расчёты полей необходимы для обеспечения надёжности функционирования детектора в условиях высокого градиента напряжений, предотвращения поверхностных и объёмных пробоев в вакууме, а также оптимизации условий движения электронов от конвертера через каскад микроканальных пластин к аноду, с целью достижения стабильного лавинного умножения при минимальном уровне шумов и ионных токов.

В результате удалось определить безопасную и стабильную конфигурацию сборки каскада из двух МКП и анода, предложена концепция размещения каскада МКП на стандартном вакуумном фланце. Представлены варианты организации сбора информации.

1.1.13.1 Теоретические исследования и обзор современных разработок

1.1.13.1.1 Физические основы применения гадолиния в детекторах нейтронов

Гадолий является одним из наиболее эффективных материалов для детектирования тепловых нейтронов благодаря исключительно высокому сечению радиационного захвата двух его изотопов: ^{155}Gd (61 000 барн, ~14.8% распространённость) и ^{157}Gd (254 000 барн, ~15.7% распространённость), что для природной смеси даёт эффективное сечение захвата ~49 000 барн [36]. Ключевым для детектирования является каскад девозбуждения после захвата нейтрона, который сопровождается эмиссией гамма-квантов, рентгеновского излучения, оже-электронов и, что наиболее важно для регистрации в зарядочувствительных детекторах, внутренних конверсионных электронов (ICE).

Качественный состав и энергетическое распределение этих продуктов реакции — критически важные для моделирования отклика детектора, были измерены с рекордным энергетическим разрешением в 2023 г. [37].

Как наглядно демонстрирует Рис. 1.1.13.1, спектр одиночных событий от внутренних конверсионных электронов природного гадолиния после захвата нейтронов обладает высокой степенью детализации.

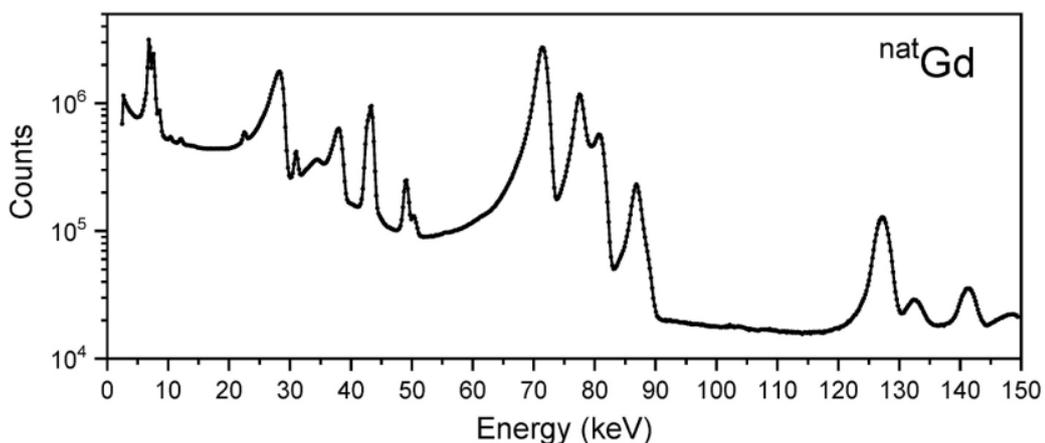


Рис. 1.1.13.1. Энергетический спектр электронов и фотонов, испущенных в процессе девозбуждения ^{nat}Gd после облучения тепловыми нейтронами, зарегистрированных как «события в одиночном пикселе» в Si сенсоре [37].

Четко идентифицируются дискретные пики электронов, выбитых с K, L, M-оболочек для основных гамма-переходов (79.51 кэВ в ^{158}Gd и 88.967 кэВ в ^{156}Gd), а также линии оже-электронов и рентгеновского излучения. Наличие таких интенсивных и узких пиков в диапазоне 30–100 кэВ является прямым экспериментальным подтверждением того, что гадолиний генерирует плотный и удобный для регистрации поток заряженных частиц. Именно эти ИСЕ, обладающие достаточной энергией, чтобы покинуть тонкий слой конвертера, инициируют лавину в активном объеме детектора, что обеспечивает высокую эффективность детектирования и хорошее пространственное разрешение.

Современные экспериментальные данные, полученные с помощью пиксельных кремниевых детекторов, позволили также выявить, что относительные выходы электронов с M, N, O+ оболочек могут превышать теоретические предсказания [37]. Это имеет прямое следствие для моделирования и оптимизации детекторов, чувствительных к низкоэнергетичным электронам.

Таким образом, несмотря на сопутствующее гамма-излучение, которое требует применения методов селекции, генерация интенсивного и удобного для регистрации потока заряженных частиц делает гадолиний высокоперспективным конвертером для создания высокоэффективных плоскопараллельных детекторов тепловых нейтронов.

1.1.13.2 Анализ современных технологий создания детекторов с использованием гадолиния и его соединений

1.1.13.2.1 Легирование стекла МКП гадолинием

Метод легирования заключается во введении соединений гадолиния (например, Gd_2O_3) непосредственно в состав стекла микроканальной пластины на этапе ее изготовления. Теоретические исследования показывают, что легирование природным Gd_2O_3 является высокоэффективным подходом. Согласно [38] моделирование предсказывает, что МКП, легированная 3 мол.% $^{nat}\text{Gd}_2\text{O}_3$, по эффективности эквивалентна или превосходит МКП, легированную 20 мол.% обогащенного $^{10}\text{B}_2\text{O}_3$. При этом расчетная эффективность поглощения нейтронов в стекле достигает 98% при длине трека 0.6 мм.

Экспериментальные работы подтвердили высокий потенциал метода. В [39] сообщается о создании детектора на основе МКП, легированной 3 мол.% $^{nat}\text{Gd}_2\text{O}_3$. При использовании одной легированной МКП толщиной 0.6 мм в схеме «шеvron» с обычной МКП была достигнута экспериментальная эффективность детектирования тепловых нейтронов 33%, а пространственное разрешение системы составило 72 мкм, что на момент измерений ограничивалось системой считывания на аноде с клиновидными полосками (Wedge Strip Anode). Исследования, проведенные коллаборацией NOVA Scientific, демонстрируют еще более высокие результаты. Последние поколения МКП, легированных ^{10}B и Gd , показали эффективность детектирования 70% для пучка холодных нейтронов, с сохранением высокого пространственного и временного (~ 1 мкс) разрешения [40].

1.1.13.2.2 Метод атомно-слоевого осаждения Gd_2O_3 на поверхность МКП

Данный метод предполагает нанесение тонкой пленки Gd_2O_3 на внутреннюю поверхность каналов готовой стандартной МКП и не требует изменения состава ее стекла. Теоретическое моделирование демонстрирует высокий потенциал этого подхода. Прогнозируемая эффективность детектирования для МКП с толщиной покрытия 0.4 мкм может достигать 70% для нейтронов с энергией 25.3 мэВ, а пространственное разрешение оценивается лучше 100 мкм [41].

Экспериментально подтверждено, что ALD-покрытие придает МКП нейтронную чувствительность. В работе [42] было успешно нанесено покрытие, эквивалентное ~ 42 нм чистого Gd_2O_3 . Его чувствительность к тепловым нейтронам была проверена в эксперименте с коллимированным пучком, где МКП выступала в роли поглотителя, а детектирование прошедших нейтронов осуществлялось ^3He -трубкой. Аналогичные испытания в [42] также подтвердили нейтронную чувствительность ALD-покрытия, эффективная толщина которого была оценена в ~ 40 нм.

В работе [43] отмечается, что определенные ALD-покрытия, включая Gd_2O_3 , могут характеризоваться пониженным коэффициентом вторичной электронной эмиссии (δ) по сравнению со специально активированным свинцовым или калиевым стеклом стандартной МКП. Это создает инженерную проблему для инициирования устойчивой лавины вторичных электронов в вакууме. Поэтому для реализации полноценного детектора на основе такой МКП с сохранением высокой эффективности регистрации зачастую требуется нетривиальный подход, такой как переход к газонаполненному режиму работы детектора, в котором лавина развивается в объеме газа, а не на поверхности каналов.

1.1.13.2.3 Внешний слой ^{nat}Gd на отдельной подложке

Прямые экспериментальные данные о системе, сочетающей внешний Gd -конвертер и микроканальную пластину (МКП), имеются в научной литературе. В исследованиях [44] по применению МКП для детектирования нейтронов, авторы рассматривали возможность использования внешнего Gd -конвертера. А уже в более поздней своей работе [45] представили результаты испытаний детектора, в котором 5-микронная фольга из ^{nat}Gd размещалась перед МКП с зазором 0.6 мм. Авторы сообщили о зарегистрированной эффективности детектирования тепловых нейтронов 3.3% и отметили наличие пика в амплитудном распределении импульсов от конверсионных электронов Gd . Дополнительно подтверждает высокий потенциал использования внешнего гадолиниевого конвертера его успешное применение в других типах детекторов, в частности в связке с газовыми электронными умножителями (GEM).

В GEM-детекторе, подробно описанном в [46], слой природного гадолиния толщиной ~ 250 мкм используется в качестве катода (в обратной геометрии). Нейтроны, проходя через дрейфовый объем и структуру GEM-фольг, поглощаются в Gd -слое, а возникающие конверсионные электроны

регистрируются в газовом объеме, инициируя лавину в GEM. Моделирование в GEANT4, в изученных статьях, подтверждает высокий потенциал метода. Для монослоя, обогащенного ^{155}Gd толщиной 9 мкм, прогнозируется эффективность конверсии до 44% [47] (рис. 1.1.13.2).

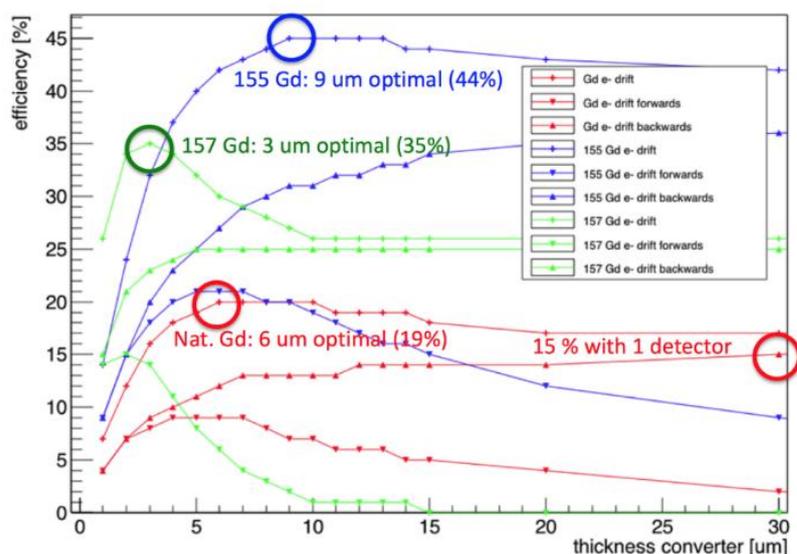


Рис. 1.1.13.2. Монте-Карло моделирование (GEANT4) эффективность регистрации нейтронов для различных толщин конвертеров на основе гадолиния [47].

Важно, что для более тонких (6 мкм) слоев природного гадолиния моделирование также предсказывает значительную эффективность ~19% для тепловых нейтронов, что демонстрирует перспективность даже без использования дорогостоящего обогащенного материала.

Экспериментально была подтверждена работоспособность данного подхода. Для детектора с катодом из 250 мкм ^{nat}Gd была достигнута измеренная эффективность 11.8% ($\lambda = 2 \text{ \AA}$) и, с пространственным разрешением <250 мкм [47]. Высокое разрешение стало возможным благодаря μTRC -анализу, реконструирующему точку поглощения нейтрона по длинным (~мм) трекам конверсионных электронов.

Успех данной схемы позволяет предположить, что тонкий внешний Gd-конвертер может быть эффективно совмещен и с МКП. В такой гибридной системе конверсионные электроны, вылетающие из Gd-слоя, будут попадать на входную поверхность стандартной, нелегированной МКП, инициируя в ее каналах лавину вторичных электронов. Это потенциально позволяет сочетать высокую эффективность конверсии Gd с превосходным усилением и разрешением МКП, избегая сложных процессов легирования или внутреннего покрытия каналов.

1.1.13.2.4 Сравнительный анализ методов применения конвертера из Gd в детекторах на базе МКП.

Сравнительный анализ методов применения конвертера из Gd в детекторах на базе МКП представлен в таблице 1.1.13.1.

Таблица 1.1.13.1. Методы применения конвертера из Gd в детекторах на базе МКП

Метод	Преимущества	Недостатки
Легирование стекла МКП	1. Высокая экспериментальная эффективность (до 70%);	1. Высокая стоимость и сложность технологии изготовления.

	2. Работа в стандартном вакуумном режиме МКП; 3. Наилучшее пространственное (<20 мкм) и временное разрешение.	2. Ограничения по концентрации легирующей добавки.
ALD-покрытие поверхности МКП	1. Потенциально очень высокая эффективность (~70% по моделям); 2. Использование стандартных МКП без изменения состава стекла.	1. Сложность нанесения качественного покрытия вглубь каналов. 2. Ограничения по работе в вакууме.
Внешний слой на подложке	1. Технологическая простота изготовления конвертера; 2. Хорошая эффективность (12-19%), подтвержденная расчетами и экспериментом; 3. Высокое разрешение (<250 мкм) с μ TPC-анализом; 4. Потенциал для гибридных систем с МКП.	1. Повышенная чувствительность к гамма-фону. 2. Рассеяние нейтронов в материалах детектора

1.1.13.3 Сравнение эффективности регистрации для различных способов введения Gd-конвертера в состав детектора

1.1.13.3.1 Сравнение эффективности регистрации на основе публикаций.

Сравнительный анализ трех основных методов интеграции гадолиния в детекторы демонстрирует различные подходы к достижению высокой эффективности регистрации нейтронов, каждый со своими оптимальными областями применения и технологическими компромиссами.

Наиболее высокой экспериментально подтвержденной эффективностью (~70% для холодных нейтронов) обладает метод легирования стекла МКП. Это достигается за счет большого эффективного объема взаимодействия, так как нейтроны могут поглотиться в любой точке толщины микроканалов. Однако этот метод технологически сложен и дорог.

Метод ALD-покрытия теоретически может достичь сопоставимой эффективности конверсии для холодных нейтронов (~70% по моделям при толщине 0.3-0.4 мкм), но на практике сталкивается с трудностями нанесения достаточно толстых и однородных покрытий внутри каналов, и его экспериментальная реализация пока существенно отстает от расчетной.

Метод внешнего слоя на подложке, несмотря на то что в исследованной конфигурации (250 мкм ^{nat}Gd в GEM) показал умеренную эффективность ~12%, имеет значительный нереализованный потенциал. Моделирование предсказывает, что использование тонких (5 мкм) слоев ^{nat}Gd может обеспечить эффективность конверсии для холодных нейтронов ~33%. Это делает его наиболее гибким и перспективным с точки зрения дальнейшего роста эффективности при оптимизации материалов и геометрии.

Таким образом, выбор метода определяется требованиями конкретной задачи: легированная МКП — для рекордной эффективности и разрешения, ALD-покрытие — потенциальная альтернатива с использованием стандартных МКП, а внешний конвертор — для гибких и технологичных решений, в том числе гибридных систем с МКП, с возможностью значительного повышения эффективности при использовании обогащенного гадолиния.

1.1.13.4 Моделирование плоскопараллельного нейтронного детектора с МКП в программном пакете Maxwell 14

1.1.13.4.1 Выбор конструктивной схемы и обоснование геометрии

Для моделирования была выбрана конструкция, включающая внешний конвертер на основе природного гадолиния (^{nat}Gd), шевронную сборку из двух микроканальных пластин и сегментированный стрип-анод. В качестве рабочего варианта предполагается использовать коммерчески доступные МКП производства ООО ВТЦ «Баспик» [48].

Шевронная сборка МКП обеспечивает достижение высокого коэффициента усиления (порядка 10^6), достаточного для регистрации одиночных электронов, а также подавления ионной обратной связи. Такая конфигурация является типичной для детекторов с МКП.

1.1.13.4.2 Параметры моделирования и настройки

Построена двумерная плоская модель в декартовой системе координат (XZ), точно отражающая поперечное сечение детекторной сборки. Параметры элементов модели приведены в таблице 1.1.13.2.

Таблица 1.1.13.2. Параметры модели детектора в ANSYS Maxwell

Элемент сборки	Геометрия	Параметры материала
Подложка (катод)	100 мм × 0.5 мм	Al (материал из библиотеки)
Слой конвертера	95 мм × 0.005 мм	^{nat}Gd (идеальный проводник)
Вакуумный зазор 1	100 мм × 0.3 мм	Вакуум ($\epsilon = 1.0$)
МКП-1 (основа)	90 мм × 0.9 мм	Стекло ($\rho = 5 \times 10^8 \text{ Ом}\cdot\text{м}$)
Каналы МКП-1	13 каналов. $\varnothing 15$ мкм. угол 7°	Вакуум ($\epsilon = 1.0$)
Вакуумный зазор 2	90 мм × 0.1 мм	Вакуум ($\epsilon = 1.0$)
МКП-2 (основа)	90 мм × 0.9 мм	Стекло ($5 \times 10^8 \text{ Ом}\cdot\text{м}$)
Каналы МКП-2	13 каналов. $\varnothing 15$ мкм. угол 7°	Вакуум ($\epsilon = 1.0$)
Вакуумный зазор 3	90 мм × 0.4 мм	Вакуум ($\epsilon = 1.0$)
Анод (стрипы)	0.8 мм шаг 1 мм (подложка)	Медь (материал из библиотеки)
Подложка	90 мм × 1.5 мм	Керамика Al_2O_3 ($\epsilon = 9.8$)

Примечания:

- Модель является двумерной и плоской. Все компоненты моделируются как протяженные в направлении, перпендикулярном плоскости модели (ось Y).
- Для адекватной оценки распределения электрического поля внутри каналов МКП без излишнего усложнения модели в каждой пластине было смоделировано 13 наклонных каналов диаметром 15 мкм. Данного количества достаточно для получения репрезентативной картины поля в активной области.
- Удельное объемное сопротивление стекла МКП задано в соответствии с паспортными данными производителя $(0,5-5) \times 10^8 \text{ Ом}\cdot\text{м}$.

Настройки Maxwell:

Для модели использовалась Electrostatic Solver ANSYS Maxwell 14 с максимальным числом проходов 15, степенью сходимости 1% и адаптивным измельчением сетки. Локальное измельчение сетки до 0.005 мм применено в области каналов МКП и межэлектродных зазоров.

1.1.13.5 Рассмотренные схемы поляризации электродов

В ходе моделирования были опробованы и проанализированы различные принципиальные схемы подачи напряжения:

а) Положительный стек:

- Конвертер: 0 В;
- МКП-1: от -50 В до +1050 В;
- МКП-2: от +1050 В до +2150 В;
- Анод: 0 В.

Недостаток: Отсутствие ускоряющего поля между конвертером и МКП-1 затрудняет эффективное вытягивание вторичных электронов.

б) Высокие положительные потенциалы:

- Конвертер: -1000 В;
- МКП-1: от 0 В до +1100 В;
- МКП-2: от +1100 В до +2200 В;
- Анод: 0 В.

Недостаток: Высокие абсолютные потенциалы (до +2200 В) создают повышенный риск поверхностных пробоев и требуют сложной системы изоляции.

с) Все отрицательные потенциалы (выбранная схема):

- Конвертер: -2500 В;
- МКП-1: от -2400 В до -1300 В;
- МКП-2: от -1300 В до -200 В;
- Анод: 0 В.

1.1.13.5.1 Обоснование выбора схемы с отрицательными потенциалами

Выбор схемы с отрицательными потенциалами обусловлен следующими преимуществами:

а) Эффективность сбора электронов: отрицательный потенциал на конвертере (-2500 В) создает ускоряющее поле в зазоре 300 мкм, что достаточно для эффективной эмиссии и направления вторичных электронов в каналы МКП-1.

б) Стабильность усиления: разность потенциалов на каждой МКП (1100 В) обеспечивает напряженность поля в каналах ~12-15 кВ/мм, что соответствует оптимальному режиму лавинного умножения с коэффициентом усиления $\sim 10^4$ на одну пластину.

с) Безопасность эксплуатации: все высоковольтные потенциалы имеют отрицательную полярность относительно корпуса, что снижает риск пробоев и упрощает конструкцию вакуумного ввода.

д) Совместимость с электроникой: анод на земляном потенциале (0 В) обеспечивает простое согласование с малошумящей предусилительной электроникой и системами сбора данных.

1.1.13.6 Результаты моделирования и анализ распределения полей

2D карта распределения электрического потенциала в межэлектродном пространстве представлена на Рис. 1.1.13.3.

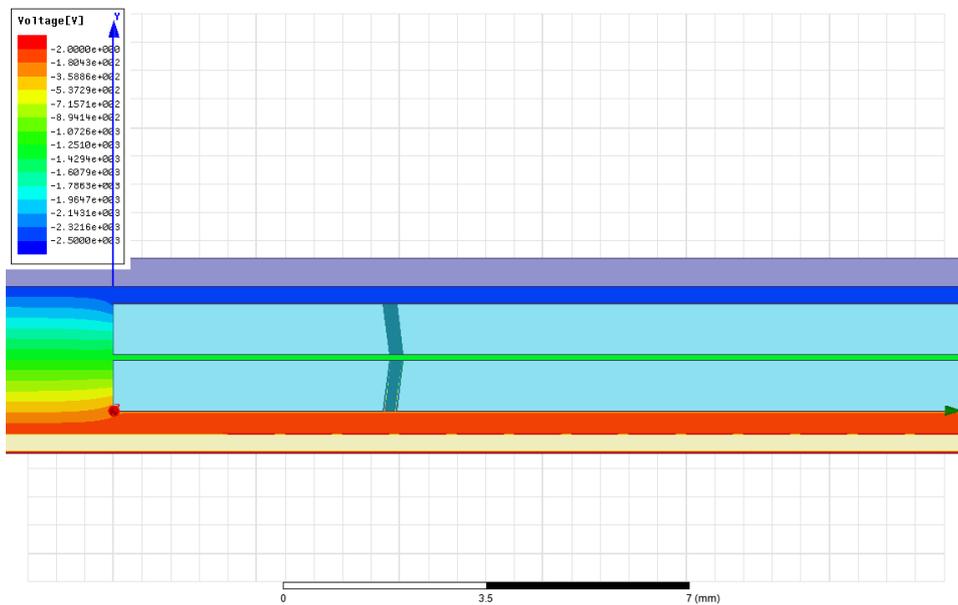


Рис. 1.1.13.3. Двумерное распределение электрического потенциала в плоскости детекторной сборки.

Данная карта позволяет оценить общую электростатическую целостность системы. Визуализирован плавный градиент потенциала от -2500 В на катоде (темно-синяя область на рис.) до 0 В на аноде (красная область на рис.), что подтверждает отсутствие нежелательных локальных концентраций и «плавающих» потенциалов.

Двумерная карта распределения напряжённости электрического поля E в межэлектродном пространстве представлена на Рис. 1.1.13.4–1.1.13.6.

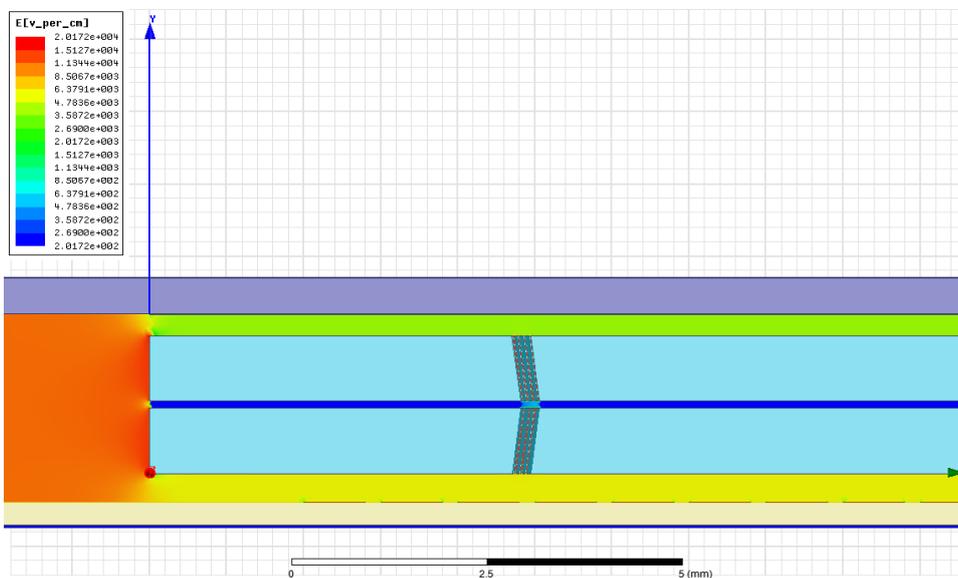


Рис. 1.1.13.4. Общий вид распределения электрического поля E , в плоскости детекторной сборки.

Карта напряжённости показывает полезную концентрацию поля E в ключевых зонах детекторной сборки:

- В вакуумных зазорах между конвертером и МКП-1 (зеленым) и между МКП-2 и анодом (желтым);

- Непосредственно в каналах МКП (красным);
- Наблюдается эффект распространения поля из объемов каналов в зазоре между МКП-1 и МКП-2.

Линия polyline3, показанная на Рис. 1.1.13.5, определяет траекторию для детального осевого анализа.

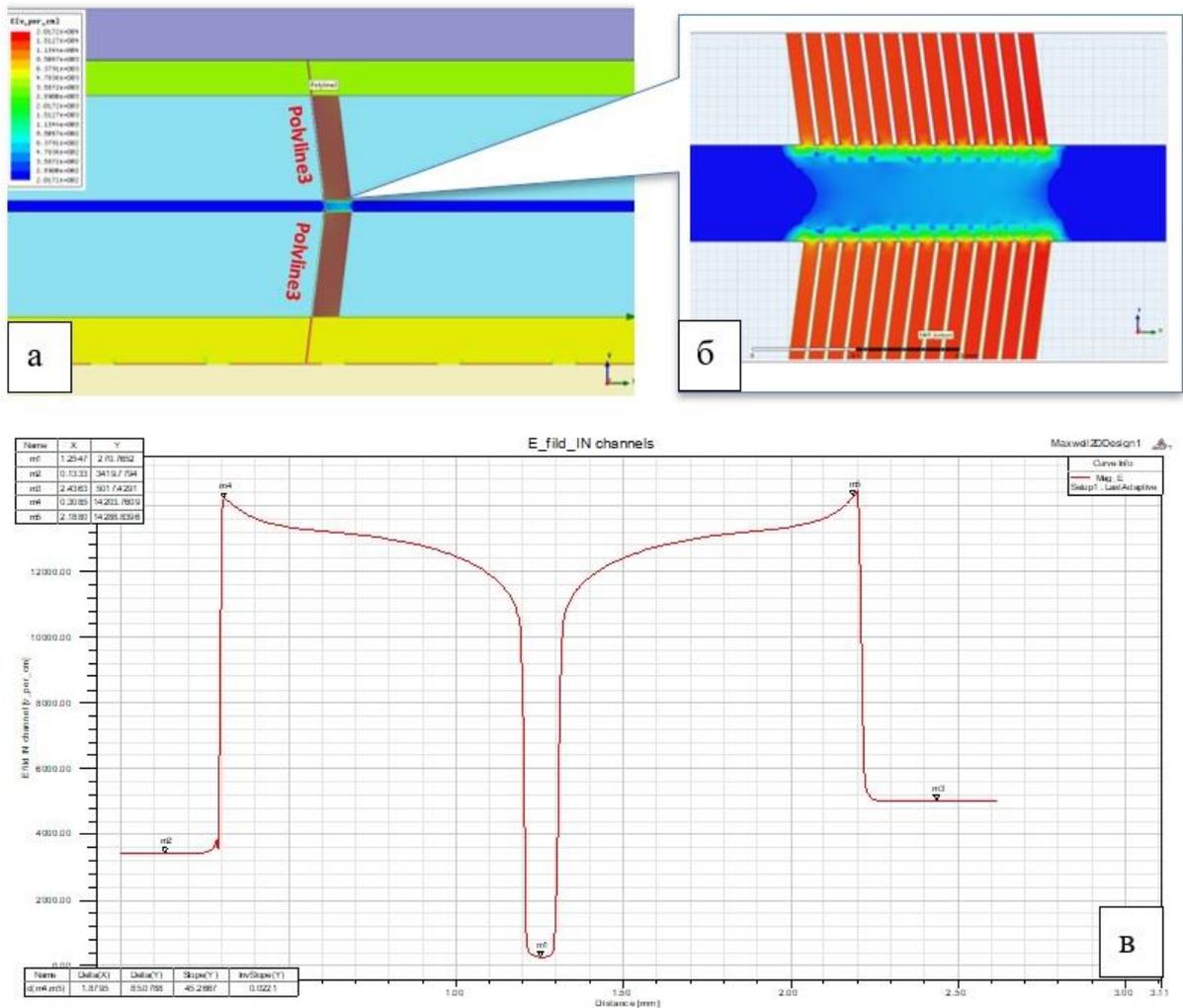


Рис. 1.1.13.5. Распределение напряженности электрического поля E в сборке катод → МКП-1 → МКП-2 → анод (а); демонстрация распространения поля E в зазоре МКП-1–МКП-2 (б); значение поля E вдоль polyline3 (в).

Количественный анализ по маркерам выявляет детальную структуру поля:

- m2 (вход МКП-1): 3.4 кВ/см – обеспечивает эффективную инжекцию электронов в первый каскад умножения;
- m4 (максимум в канале МКП-1): 14.2 кВ/см – соответствует оптимальному режиму лавинного умножения;
- m1 (зазор МКП-1 - МКП-2): 0.27 кВ/см;
- m5 (максимум в канале МКП-2): 14.2 кВ/см – стабильное поле для умножения во втором каскаде;
- m3 (выход МКП-2): 5 кВ/см – обеспечивает конечное ускорение электронов к аноду.

Напряженность электрического поля по краю детекторной сборки представлена на Рис. 1.1.13.6.

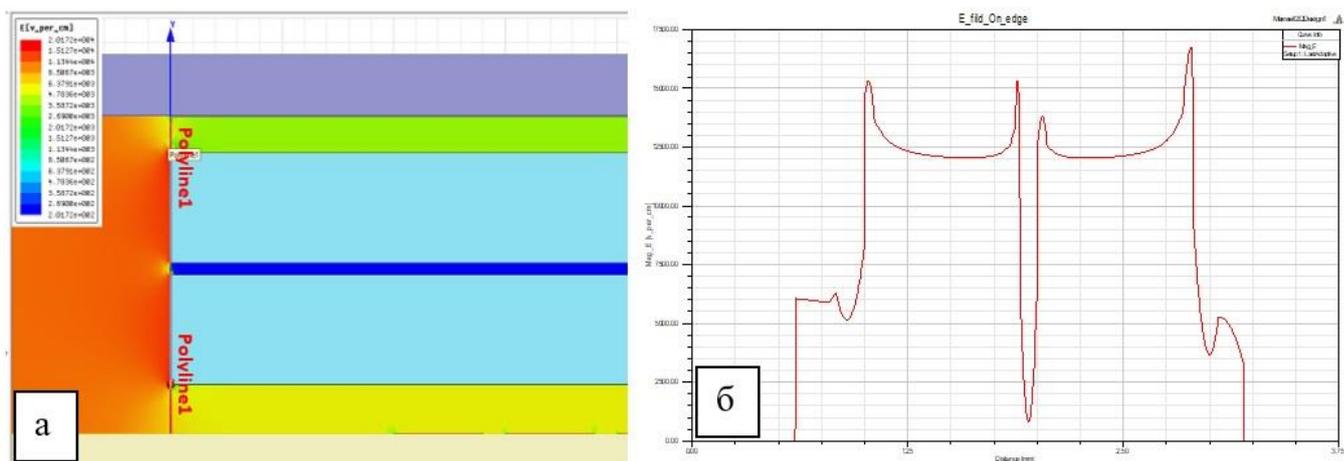


Рис. 1.1.13.6. Распределение напряженности электрического поля E на краях детекторной сборки (а) Значение поля E вдоль polyline1 (б).

Максимальное значение поля $E \sim 17$ кВ/см, достигается на краю выходного электрода МКП-2. Эта величина находится на пороге электрического пробоя в вакууме (см. п. 2.7). Но стоит напомнить, что для получения более контрастной картины, в maxwell-модели на электроды подавались максимально допустимые (с точки зрения электрической прочности коммерческих МКП) потенциалы.

1.1.13.7 Анализ риска вакуумного пробоя и обоснование запаса электрической прочности

На основе анализа технической литературы подтверждается, что для реальных вакуумных систем, можно использовать консервативное значение электрической прочности 20 кВ/см с учетом технологических факторов. Электрическая прочность вакуумного промежутка с необработанными электродами составляет около 10 кВ/см, что подчеркивает необходимость учета состояния поверхностей [49]. В условиях реальной эксплуатации вакуумных приборов, включая нейтронные детекторы со шевронными сборками, критическое поле пробоя определяется не идеальными теоретическими значениями, а практическими ограничениями, связанными с микрорельефом электродов, наличием загрязнений и технологическими допусками при изготовлении. Для детекторов на МКП, работающих при высоких напряжениях, инженерное проектирование предусматривает запас прочности по электрическому полю, что делает значение 20 кВ/см обоснованным выбором для обеспечения надежности и долговечности прибора в реальных условиях эксплуатации.

1.1.13.7.1 Оценка запасов электрической прочности в детекторной сборке

Анализ напряженности электрического поля в межэлектродных зазорах согласно данным, полученным в ANSYS Maxwell, представлен в таблице 1.1.13.3.

Таблица 1.1.13.3. Анализ напряженности электрического поля в межэлектродных зазорах

Область	Расстояние	ΔU , в	E_{maxwell} , кВ/см	$E_{\text{пробоя}}$, кВ/см	Запас прочности
Катод МКП 1	300 мкм	100	3.4	20	$\times 6.1$
Анод МКП 2	400 мкм	200	5.0	20	$\times 4.0$
Каналы МКП 1, 2	0.9 мм	1100	14.2	>100	$> \times 7.0$

1.1.13.7.2 Выводы по результатам моделирования

Сравнительный анализ показал преимущество схемы с отрицательными потенциалами по критериям безопасности и эффективности.

Моделирование подтвердило безопасность выбранной электрической схемы — во всех основных вакуумных зазорах напряженность поля имеет многократный запас относительно порога пробоя.

Напряженность поля 14.2 кВ/см в каналах МКП обеспечивает оптимальный режим лавинного умножения. Однако, на основе карты полей на краях сборки максимальная напряженность на краях сборки достигает ~ 17 кВ/см, что требует дополнительных мер по снижению риска пробоя: тщательная полировка острых кромок, применение экранов или радиусных скруглений, а также контроль чистоты поверхности.

Выбранная схема с отрицательными потенциалами относительно корпуса признана оптимальной по следующим критериям:

- Все напряженности полей в межэлектродных вакуумных зазорах находятся с многократным запасом ниже критических значений для пробоя (20 кВ/см при 10^{-5} мбар).
- Отсутствие плавающих потенциалов исключает накопление заряда и нестабильность электрического поля.
- Анод под нулевым потенциалом упрощает согласование с измерительными цепями и снижает требования к изоляции.
- Отрицательный потенциал на подложке с конвертером ускоряет электроны к МКП, минимизируя потери в зазоре катод-МКП-1.

1.1.13.8 Универсальность проведенного моделирования

Проведенные в ANSYS Maxwell расчеты электростатических полей обладают высокой степенью универсальности и могут быть, с некоторыми правками применены как к конфигурации с внешним Gd-конвертером, так и к вариантам с легированными МКП или с ALD-покрытыми МКП, так как:

- геометрия самих МКП одинакова для всех вариантов;
- расположение и относительные позиции электродов в сборке остаются неизменными;
- потенциалы, приложенные к МКП и аноду, оптимизированы для обеспечения стабильного лавинного умножения и не зависят от варианта использования конвертера.

Проведенные расчеты электростатических полей обладают универсальностью в части геометрии расположения МКП и анода, а также распределения потенциалов в каналах. Однако возможность их прямого переноса на детекторы с ALD-покрытием Gd_2O_3 требует существенных уточнений, поскольку согласно [43], ALD-покрытие Gd_2O_3 значительно снижает коэффициент

вторичной электронной эмиссии поверхности каналов ($\delta \approx 2-3$), что затрудняет лавинное умножение в вакуумном режиме работы МКП.

1.1.13.8.1 Общие требования к электрическим полям:

- Критические значения напряженности поля для предотвращения вакуумного пробоя (20 кВ/см при 10^{-5} мбар) идентичны для всех конфигураций.
- Требования к полю в каналах МКП (~ 15 кВ/см для коэффициента усиления 10^4) не зависят от способа нанесения конвертера.
- Безопасные запасы по пробую в межэлектродных зазорах обеспечиваются одинаково для всех типов детекторов.

Исключение: Расчеты поля в зазоре между конвертером и первой МКП специфичны только для конфигурации с внешним конвертером и легированными МКП. В ALD-конфигурации этот зазор не нужен, так как конвертер нанесен непосредственно на поверхность каналов и электроны генерируются уже внутри активной области детектора.

1.1.13.9 Организация сбора информации: анализ методов считывания

1.1.13.9.1 Линия задержки

Линия задержки представляет собой систему проводников, расположенных на аноде в виде двух перпендикулярных систем (X и Y). При попадании электронного пучка в точку пересечения систем возникают два сигнала, распространяющиеся в противоположных направлениях по каждой из линий. Положение точки попадания определяется по разнице во времени прихода сигналов на концы линий.

Преимущества:

- Требуется всего четыре канала считывания (два для X-направления, два для Y-направления), что значительно упрощает систему по сравнению с поканальным считыванием.
- Хорошее временное разрешение.
- Более экономичное решение.

Недостатки:

- Ограниченное пространственное разрешение: фактическое разрешение системы определяется не только теоретическим пределом ($\sim 100-200$ мкм), но и точностью временных измерений, стабильностью электроники и равномерностью параметров линии. На практике этот параметр более существенен для крупногабаритных детекторов.
- Требуется тщательной калибровки временных задержек по всей площади детектора.
- Краевые эффекты могут приводить к нелинейностям в определении положения на границах детектора.

1.1.13.9.2 Поканальный съем

Принцип работы: каждый канал или небольшая группа каналов имеют отдельный электронный канал считывания. Это может быть реализовано через сегментированный анод, где каждый сегмент соответствует определенной области детектора, или через ASIC (специализированные интегральные схемы), подключенные непосредственно к аноду.

Преимущества:

- Высокое и предсказуемое пространственное разрешение. Разрешение напрямую определяется геометрией анода, и оно как правило лучше, чем типичное разрешение системы с линией задержки сравнимого размера. При этом разрешение является стабильным по всей площади детектора.
- Высокая скорость счета: поканальное считывание позволяет обрабатывать до 10^6 событий в секунду на сегмент без значительных потерь.

- Простота калибровки: каждый канал калибруется независимо, что упрощает процесс настройки.

Недостатки:

- Более сложная и дорогая электроника.
- Высокие требования к пространству для электроники.
- Требуется высокопроизводительная система сбора и обработки данных.

1.1.13.9.3 Обоснование выбора метода считывания

Для данной разработки в качестве основного метода считывания выбрана система на основе линии задержки. Решение обосновано следующими факторами:

- Совместимость с разрабатываемой электроникой: система идеально соответствует архитектуре 4-канального TDC (время-цифрового преобразователя) собственной разработки, где два канала используются для X-координаты и два для Y-координаты.

- Оптимальное соотношение цена/производительность: как отмечено в технической документации [50], системы с линией задержки обеспечивают хорошее пространственное разрешение (~100–500 мкм) при минимальном количестве электронных каналов, что значительно снижает стоимость системы по сравнению с поканальным считыванием.

- Технологическая отработанность: конструкция линий задержки хорошо стандартизирована [50, 51], что снижает риски при производстве и повышает надежность детектора в целом.

Таким образом, выбор в пользу линии задержки представляет собой оптимальный компромисс между стоимостью, сложностью реализации и функциональными характеристиками для создаваемого плоскопараллельного детектора с МКП.

1.1.13.10 Предложение по конструктивному исполнению детектора

1.1.13.10.1 Общая концепция и выбор базового конструктива

Для размещения детекторной сборки и обеспечения вакуумной герметичности, выбран стандартный фланец CF160. Выбранный размер обеспечивает размещение коммерчески доступных микроканальных пластин габаритами 90×20 мм, с учетом требуемых технологических зазоров для предотвращения поверхностных пробоев. Внутренний диаметр фланца обеспечивает достаточно пространства для размещения всех компонент детекторной сборки, не опасаясь электрического пробоя на корпус, что повышает надежность и упрощает монтаж.

Эскиз предлагаемой конструкции представлен на Рис. 1.1.13.7.

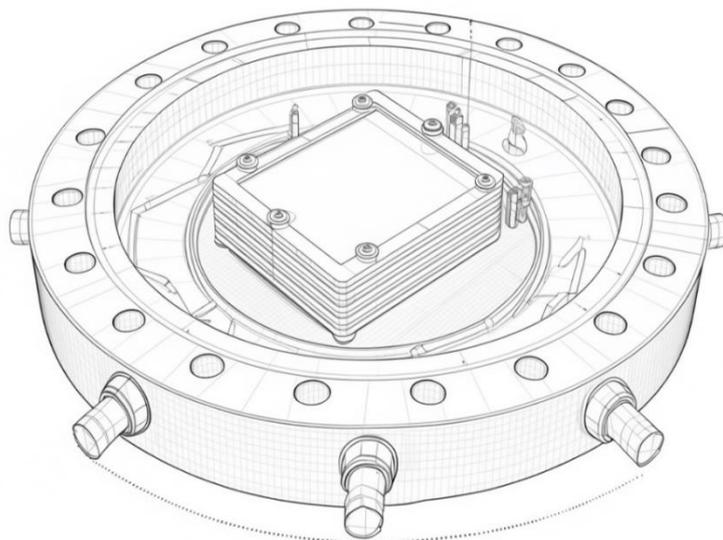


Рис. 1.1.13.7. Эскиз плоскопараллельного детектора с МКП на стандартном вакуумном фланце (без крышки).

Последовательность размещения компонентов детекторной сборки сверху вниз представлена в таблице 1.1.13.4.

Таблица 1.1.13.4. Последовательность компонентов в сборке

№	Компонент	Толщина, мм	Материал
1	Крышка	5.0	Нерж. сталь 304L
2	Прокладка 0	1.0	Керамика (Al_2O_3)
3	Подложка с Gd-конвертером	0.5+0.001	Al + natGd
4	Прокладка 1	0.3	Al_2O_3
5	МКП-1 (BASPIK)	0.9	Стекло
6	Прокладка 2	0.1	Al_2O_3
7	МКП-2 (BASPIK)	0.9	Стекло
8	Прокладка 3	0.4	Al_2O_3
9	Анодная пластина	1.5	Керамика
10	Фланец CF160	-	Нерж. сталь 304L

1.1.13.10.2 Система электрических соединений и вакуумных вводов

На фланце CF160 размещены следующие гермовводы:

- 5× гермовводов для подачи высокого напряжения;
- 1× многоконтактный вакуумный вывод для съема сигналов.
- 1× вакуумный разъем для подключения к вакуумному посту.

Внутренняя разводка выполнена проводами в изоляции из PTFE, соединения с керамическим анодом – ультразвуковая сварка.

1.1.13.10.3 Расположение компонентов внутри фланца

- 1) Система позиционирования и крепления:

- Керамические стойки (Al_2O_3 , $\varnothing 3$ мм, высота по месту): обеспечивают электрическую изоляцию и точное позиционирование компонентов. Располагаются по углам активной зоны с допуском ± 0.01 мм.

- Прецизионные прокладки: изготовлены методом лазерной резки из Al_2O_3 с допуском ± 5 мкм. Имеют вырезы для обеспечения вакуумного объема и прохождения электронов.

- Керамические держатели МКП: специальные рамки из Al_2O_3 , обеспечивающие:

- центровку МКП относительно оптической оси;

- электрическую развязку с электродами МКП.

2) Электрическая разводка и вакуумные вводы:

Расположение гермовводов на фланце CF160:

- 1× вакуумный SHV разъем: подача HV1 на подложку с Gd-конвертером;

- 2× вакуумных SHV разъема: подача HV2 и HV2 –1000В на МКП-1;

- 2× вакуумный SHV разъема: подача HV3 и HV3 –1000В на МКП-2;

- 1× вакуумный многотырьковый разъем: Съём сигналов с ЛЗ.

3) Внутренняя разводка:

- Высоковольтные соединения: провода с изоляцией PTFE, $\varnothing 0.5$ мм;

- Сигнальные линии: витая пара с экранированием, $\varnothing 0.3$ мм;

- Заземление: корпус фланца служит общим земляным электродом.

1.1.13.11 Выводы

В результате проведенных теоретических исследований и комплексного численного моделирования была разработана и обоснована концепция плоскопараллельного детектора нейтронов на основе микроканальных пластин (МКП) и гадолиниевого конвертера.

1. На основе сравнительного анализа показана перспективность использования тонкопленочного внешнего конвертера из природного гадолиния, который сочетает высокую эффективность конверсии, технологическую простоту и потенциал для дальнейшего совершенствования.

2. Посредством моделирования в ANSYS Maxwell выбрана и верифицирована схема подачи напряжения с отрицательными потенциалами относительно корпуса. Установлено, что данная конфигурация обеспечивает:

- Стабильное лавинное умножение в каналах МКП.

- Эффективный сбор электронов с конвертера и их инжекцию в каналы МКП.

- Кратный запас по электрической прочности в основных вакуумных зазорах.

3. Полученная электростатическая модель обладает высокой степенью универсальности и может быть адаптирована для детекторов с легированными МКП или ALD-покрытием.

4. Предложена конструкция на стандартном вакуумном фланце CF160, обеспечивающая точное позиционирование компонентов, вакуумную герметичность и удобство обслуживания.

5. В качестве оптимального метода сбора информации предложена система на основе линии задержки (ЛЗ), которая обеспечивает субмиллиметровое пространственное разрешение при использовании всего 4 каналов считывания, что идеально согласуется с разрабатываемой электроникой на базе 4-канального TDC.

Данную работу выполнили исследователи в возрасте до 39 лет: Алтынбаев Е.В., Коваленко Н.А., Костарев К.В.

Полученные результаты полностью соответствуют п. 1.1.13 Плана-Графика работ в рамках исполнения обязательств по Соглашению № 075-10-2025-153 от 05 июня 2025 г.

ПРИЛОЖЕНИЯ

- Отчет о выполненных работах. ФАЙЛ: [ПГ 1.1.13 Отчет о выполненных работах.pdf](#)
- Справка об исследователях в возрасте до 39 лет. ФАЙЛ: [ПГ 1.1.13 Справка об исследователях до 39 лет.pdf](#)

Работы, выполняемые за счет софинансирования из внебюджетных источников

1.1.14 Моделирование и оптимизация оптических параметров сцинтилляторов на основе ZnS (совместно с ИЯИ РАН, Договор № 400-04794 от 21.07.2025 г.).

1.1.14.1 Введение

Нейтронные детекторы — ключевые инструменты в ядерной физике, энергетике и безопасности. Их задача — регистрировать нейтроны, не имеющие электрического заряда и потому неудобные для прямого измерения электромагнитными методами. Существует несколько принципиально разных типов нейтронных детекторов: газоразрядные (на основе ^3He , BF_3), полупроводниковые и сцинтилляционные. Сегодня среди сцинтилляционных детекторов доминируют системы, использующие сцинтилляторы на основе $\text{ZnS}(\text{Ag})/{}^6\text{LiF}$, обладающие высокой чувствительностью к тепловым нейтронам и хорошим подавлением γ -фона [52]. Сцинтилляторы преобразуют энергию заряженных частиц, возникающих при взаимодействии нейтронов с ядрами ${}^6\text{Li}$ или ${}^{10}\text{B}$, в видимое излучение. Энергия этих частиц ионизирует кристаллическую матрицу или связующий полимер, что приводит к возбуждению примесного агента-люминофора (Ag^+ в ZnS или редкоземельные ионы в стеклах) и последующему излучению фотонов в видимом или ближнем УФ-диапазоне [52, 53]. Одним из наиболее распространённых материалов для тепловых нейтронов является сцинтиллятор $\text{ZnS}(\text{Ag}):{}^6\text{LiF}$. Смесь порошков ZnS , активированного Ag^+ , и ${}^6\text{LiF}$ образует тонкие сцинтилляционные листы. При захвате нейтрона на ядре ${}^6\text{Li}$ высвобождаются α -частицы и тритоны, которые возбуждают $\text{ZnS}(\text{Ag})$, обеспечивая высокую световую эффективность (до 80 000 фотонов/МэВ) [54] и длительное время спада (~1,4 мкс) [54]. Вместе с тем $\text{ZnS}(\text{Ag})$ имеет высокое поглощение света, что ограничивает толщину сцинтиллятора и требует применения многослойных конструкций для повышения вероятности захвата нейтронов без существенной потери света [55]. Альтернативный подход — внедрение связующего на основе стекла B_2O_3 , богатого изотопом ${}^{10}\text{B}$, в матрицу $\text{ZnS}(\text{Ag})$. B_2O_3 обеспечивает оптическую прозрачность и механическую прочность, одновременно вводя дополнительные центры захвата нейтронов (${}^{10}\text{B}$). В эксперименте [56] показано, что тонкие сцинтилляторы ZnS в спечённом B_2O_3 обладают эффективностью захвата тепловых нейтронов до 30 % при толщине порядка 100 мкм и сравнительно низким послеизлучением. Современные модификации включают до 10 мас.% B_2O_3 с обогащением по ${}^{10}\text{B}$, что позволяет достичь эффективностей свыше 40 % при сохранении хорошей прозрачности и светового выхода [57].

Моделирование светового выхода и эффективности сцинтилляторов имеет критическое значение для проектирования современных детекторов. Компьютерное моделирование (GEANT4, MCNP) позволяет предсказать распределение энергии частиц, генерацию фотонов, их транспортировку внутри многослойных структур и сбор светочувствительными элементами (PMT, SiPM, волоконно-оптическими светопроводами). Это сокращает потребность в дорогостоящих прототипах и ускоряет оптимизацию толщины слоёв, состава и геометрии детектора. Так, в работе [58] предложен метод расчёта светосбора и полной эффективности на основе GEANT4 с учётом процессов рассеяния, поглощения и отражения фотонов на границах слоёв.

1.1.14.2 Расчет зависимости эффективности от количества конвертера

Приведем пример расчета для смеси концентрацией 1:1. Плотность итоговой смеси определяется как:

$$\text{Плотность} = \Pi_{ZnS(Ag)} * P_{ZnS(Ag)} + \Pi_{B_2O_3} * P_{B_2O_3}, \quad (1.1.14.1)$$

где Π – процентное содержание вещества в итоговой смеси, P – плотность. Из этой плотности ${}^6\text{LiF}$ занимает 50% (для соотношения 1:1) или 3.2088 г/см³. Плотность Молекулы LiF (M_{LiF}) (с обогащённым ${}^6\text{Li}$) весит примерно 25 г/моль (6 г/моль для ${}^6\text{Li}$ + 19 г/моль для F).

$$N_{\text{Li}} = 0.95 * \text{Плотность} * \text{Соотн. ZnS:Li} * Na/M_{\text{LiF}} \approx 3.66 \cdot 10^{22} \text{ атомов } {}^6\text{Li}/\text{см}^3, \quad (1.1.14.2)$$

Сечение захвата теплового нейтрона ${}^6\text{Li}$ примерно 940 барн ($940 \cdot 10^{-24} \text{ см}^2$). Макроскопическое сечение захвата (без учета рассеяния) вычисляется как,

$$E_{\text{cap}} = N_{\text{Li}} * \sigma_0 \approx 34.42 \text{ см}^{-1} \quad (1.1.14.3)$$

Если бы нейтрон шел только по прямой (без рассеяния) вероятность захвата при толщине 0.5 мм(L) рассчитывалась по формуле

$$\text{Эффективность} = (1 - \exp(-E_{\text{cap}} * L)) * 100 = 82.12\% \quad (1.1.14.4)$$

По аналогии произведем расчет для конвертера на основе B_2O_3 природного обогащения. Результаты расчета использованы для сравнения с результатами моделирования

1.1.14.3 Результаты моделирования GEANT4

На Рис. 1.1.14.1 и 1.1.14.2 приведены результаты моделирования для различных составов смеси и толщины сцинтиллятора. Количество событий для каждой точки 10000. Относительный световыход определялся как количество фотонов, которые покинули объём сцинтиллятора относительно общего количества фотонов. Эффективность соответственно рассчитывалась как количество нейтронов, которые взаимодействовали с ядром конвертера (${}^6\text{Li}$ или ${}^{10}\text{B}$) к общему количеству нейтронов. Световыход для B_2O_3 незначительно отличается от ${}^6\text{LiF}$ поэтому на Рис. 1.1.14.2(б) приведено сравнение световыхода двух смесей.

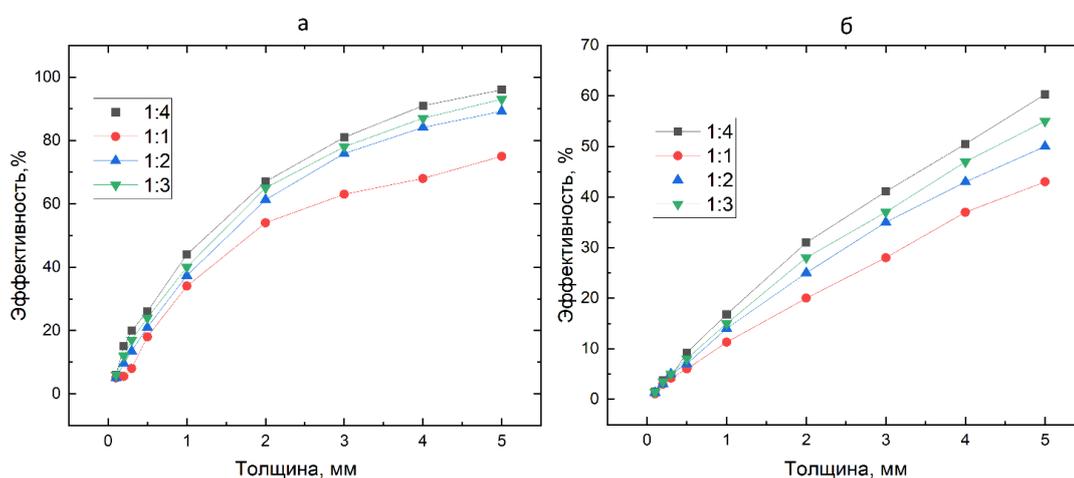


Рис. 1.1.14.1. Зависимость эффективности для ${}^6\text{LiF}$ (а) и B_2O_3 (б).

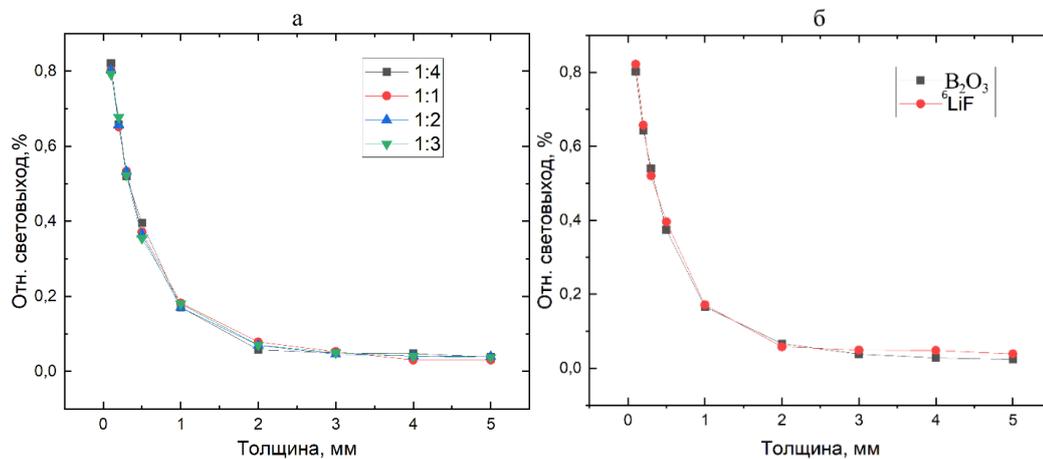


Рис. 1.1.14.2. Зависимость относительного световыхода для ${}^6\text{LiF}$ (а) и сравнение ${}^6\text{LiF}$ и B_2O_3 для смеси 1:4 (б).

1.1.14.4 Обсуждения

Оценка и сравнение световыхода:

Типичный выход света для $\text{ZnS}(\text{Ag})$ под действием альфа-частиц составляет $\sim 80,000$ фотонов/МэВ для тяжелых заряженных частиц[54]. В сцинтилляторе энергия заряженных частиц преобразуется в фотоны.

Максимальное количество фотонов для конвертера ${}^6\text{LiF}$ $4,8 \text{ МэВ} \cdot 80000 \text{ фотонов/МэВ} = 384000$ фотонов. Для B_2O_3 $2,31 \text{ МэВ} \cdot 80000 = 184000$ фотонов. Но в свою очередь $\text{ZnS}(\text{Ag})$ непрозрачен для собственного излучения (синий свет с длиной волны $\sim 450 \text{ нм}$). Фотоны, рожденные в глубине материала, поглощаются до выхода на поверхность. Это снижает наблюдаемый выход света. Сцинтилляция включает быструю и медленную компоненты. Для нейтронных событий характерно длительное свечение, что позволяет отделить их от гамма-фона с помощью методов дискриминации по форме импульса.

При использовании B_2O_3 в качестве конвертера частицы ${}^7\text{Li}$ и α имеют меньшие пробеги, чем α и T в ${}^6\text{Li}$, что снижает эффективность преобразования энергии в свет. Так же в 93% случаев есть гамма-квант (478 кэВ), который не участвует в сцинтилляции, снижая полезную энергию до $\sim 1.83 \text{ МэВ}$ на событие. На Рис. 5.3 приведено сравнение теоретического световыхода двух конвертеров.

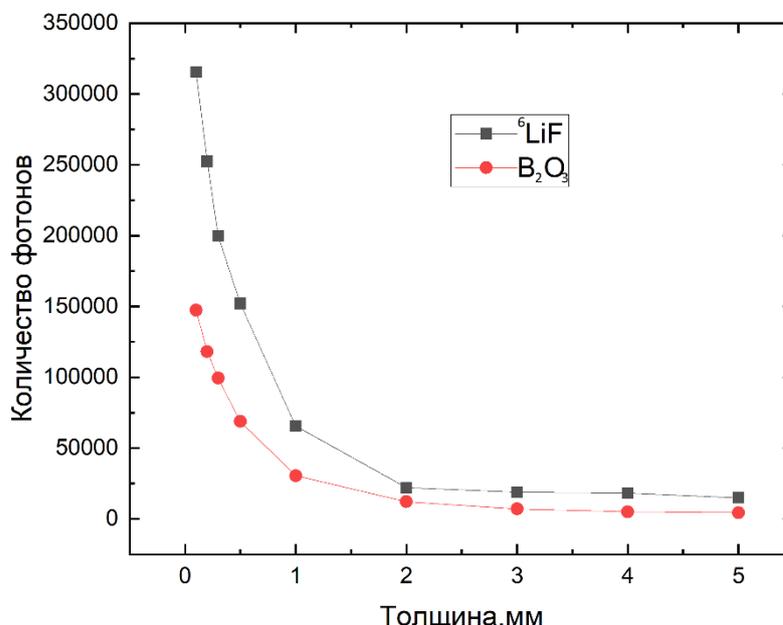


Рис. 1.1.14.3. Сравнение световых выходов.

Сравнение эффективности регистрации нейтронов

На Рис. 5.4 приведено сравнение эффективности регистрации нейтронов, рассчитанное методом на основе количества ядер конвертера и на основе Монте-Карло моделирования в программе GEANT4. Метод на основе Монте-Карло учитывает состав и неоднородности сцинтиллятора, поэтому эффективность значительно отличается от расчетной.

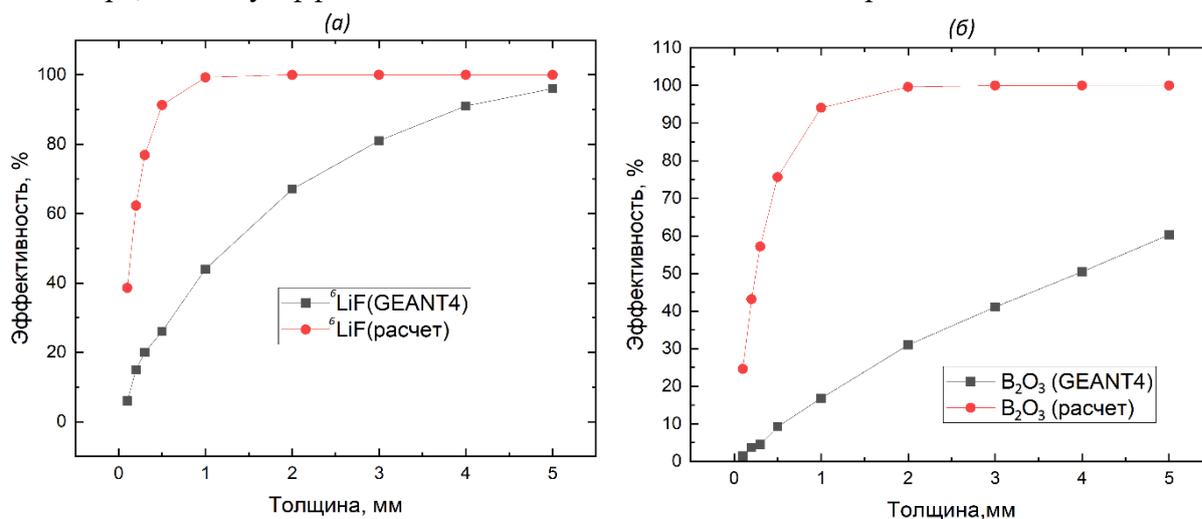


Рис. 1.1.14.4. Сравнение расчетной и рассчитанной методом Монте Карло (GEANT4) для сцинтиллятора 1:4 с конвертером ${}^6\text{LiF}$ (а) и B_2O_3 (б).

1.1.14.5 Оптимизация оптических параметров

Современные сцинтилляционные детекторы в качестве фотоприёмников широко используют кремниевые фотоумножители (SiPM). Поскольку в детекторах на основе сцинтилляторов ключевой задачей является достоверная регистрация испускаемых фотонов, при оптимизации параметров сцинтиллятора необходимо учитывать типичные характеристики SiPM.

К основным параметрам распространённых кремниевых фотоумножителей относятся: Активная площадь, Число микропикселей, PDE (Photon Detection Efficiency) и спектральная чувствительность.

Спектральная чувствительность большинства SiPM имеет максимум в диапазоне 420–450 нм, что хорошо согласуется с длиной волны излучения сцинтилляторов на основе ZnS(Ag). Это обеспечивает эффективную регистрацию фотонов. Квантовая эффективность фотоприёмника достигает максимума в области пика спектральной чувствительности, поэтому при оптимизации параметров детектора далее используется усреднённое пиковое значение PDE, равное 50 % от числа падающих фотонов.

Число микропикселей определяет максимальное количество фотонов, которое может быть зарегистрировано одновременно без насыщения SiPM. В дальнейших оценках используется типичное значение порядка 10 000 микропикселей. Площадь активной области определяет допустимые размеры сцинтиллятора или световода, с которых осуществляется съём света; в расчётах принята средняя площадь 6×6 мм².

Оптимизация параметров сцинтиллятора: длина волны излучения

Длина волны излучения определяется исключительно составом сцинтиллятора. Для сцинтилляторов на основе ZnS(Ag) максимум спектра люминесценции находится в диапазоне 450–470 нм. Спектр излучения ZnS(Ag) хорошо согласуется с областью максимальной чувствительности SiPM, что позволяет достичь высокой эффективности регистрации фотонов.

Оптимизация параметров сцинтиллятора: световыход

Световыход сцинтиллятора определяется свойствами ZnS(Ag) и энергией вторичных заряженных частиц, возникающих при захвате нейтронов конвертером. Для ZnS(Ag) характерный световыход составляет порядка 80 000 фотонов на 1 МэВ поглощённой энергии.

Для конвертера ⁶LiF при реакции захвата нейтрона суммарная энергия вторичных частиц составляет 4,78 МэВ, что соответствует максимальному числу фотонов: 4,8 МэВ*80000 фотонов/МэВ = 384000 фотонов. Для конвертера В₂О₃ суммарная энергия вторичных частиц составляет порядка 2,31 МэВ, что даёт 2.31 МэВ*80000=184000 фотонов. Следует отметить, что световыход определяется полной поглощённой энергией и не зависит напрямую от толщины сцинтиллятора. Однако для практической оптимизации важно не общее число сгенерированных фотонов, а количество фотонов, выходящих из объёма сцинтиллятора и доступных для регистрации фотоприёмником.

Оптимизация параметров сцинтиллятора: пробег частиц

Пробег вторичных частиц определяется типом реакции захвата нейтронов конвертером и плотностью сцинтилляционной смеси. При увеличении доли конвертера плотность смеси уменьшается, что приводит к увеличению пробега вторичных частиц. Рассмотрим два предельных случая для массовых соотношений ZnS(Ag):конвертер 1:1 и 1:4.

Для ⁶Li Альфа-частица и тритон испускаются практически из одной точки и изотропно. Плотность смеси составляет ~3,2 г/см³ для соотношения 1:1 и ~2,8 г/см³ для соотношения 1:4. Соответствующие пробеги вторичных частиц: для альфа-частицы пробеги при 1:1 ~5.6 мкм и ~6.4 мкм, тритон 33.8 мкм и 38.6 мкм соответственно. Таким образом, максимальный световыход достигается при толщине сцинтиллятора порядка 40 мкм, однако при таких толщинах эффективность регистрации тепловых нейтронов остаётся низкой.

Для В₂О₃ разница в пробеге при различных концентрациях незначительна, и составляет порядка α (1.47–1.78 MeV): 5.5 мкм и ⁷Li (0.84–1.01 MeV): 2 мкм. Следовательно, максимальный световыход достигается при толщине сцинтиллятора ~5–6 мкм, однако, как и в случае ⁶LiF, эффективность регистрации нейтронов при таких толщинах остаётся низкой.

Оптимизация параметров сцинтиллятора: световыход с поверхности сцинтиллятора

Количество фотонов, выходящих с поверхности сцинтиллятора, является ключевым параметром при оптимизации детектора. Тонкие сцинтилляторы обеспечивают высокий удельный световыход, но обладают низкой эффективностью регистрации нейтронов и поэтому малоприменимы для практических применений. Оптимизация заключается в поиске компромисса между высокой эффективностью регистрации нейтронов и достаточным световыходом для уверенной регистрации события SiPM.

Максимальное количество фотонов, которые может зарегистрировать SiPM составляет $N_{\max} = \text{Количество ячеек/PDE} = 20000$ фотонов на площади 9 мм^2 . Для надёжной регистрации события минимальное число зарегистрированных фотонов принимается равным 10 % от этого значения. Данный запас учитывает вклад тёмного и теплового шума SiPM, параметры электроники и послесвечение сцинтиллятора. На основе полученных расчетов в главе 3.2 и 3.3 рассмотрим различные случаи съема фотонов и оптимизируем толщину и световыход с поверхности сцинтиллятора. В случае, когда SiPM снимает фотоны прямым оптическим контактом и размер сцинтиллятора совпадает с размером SiPM имеем следующие параметры:

- Для LiF диапазон толщины, при котором оптимально регистрировать фотоны, составляет ~ 2.7 мм (эффективность 75%) и 5 мм (эффективность 96%).

- Для B_2O_3 диапазон толщины, при котором оптимально регистрировать фотоны, составляет ~ 1.55 мм (эффективность 24.5%) и 5 мм (эффективность 60.3%)

В реальных детекторах площадь сцинтиллятора, как правило, значительно превышает площадь SiPM, поэтому для сбора и транспортировки света используются световоды. В качестве световодов используются спектросмещающие волокна или прозрачный пластик. Рассмотрим подробнее эти варианты.

Спектросмещающие волокна

Спектросмещающие волокна работают за счёт поглощения фотонов в объёме волокна с последующим переизлучением и транспортировкой света к торцам за счёт полного внутреннего отражения. Данный подход позволяет передавать свет на расстояния порядка метров, однако характеризуется низкой эффективностью захвата. Типичное значение светосбора на торцах составляет около 5 %. Таким образом с учетом этого значения максимальная толщина сцинтиллятора составляет до ~ 1.55 мм (эффективность 58%) для ${}^6\text{LiF}$ и ~ 0.8 мм (эффективность 14%) для B_2O_3

Пластиковый световод

При использовании пластикового световода за счёт диффузного отражения от стенок возможно собрать большее количество фотонов. Однако эффективность переноса света зависит от длины и формы световода, а также от внутренних потерь.

Рассмотрен световод из PMMA (прозрачность ~ 95 % на 450 нм), покрытый отражателем из фторопласта с коэффициентом отражения $R \approx 0.98$. Согласно закону Бугера–Ламберта–Бера, при длине световода около 30 см его эффективность становится сопоставимой с эффективностью спектросмещающего волокна (~ 5 %). В этом случае допустимые толщины сцинтиллятора аналогичны: до ~ 1.55 мм (эффективность 58%) для ${}^6\text{LiF}$ и ~ 0.8 мм (эффективность 14%) для B_2O_3 . С учётом неидеальности отражателя и дополнительных потерь реальная длина световода, при которой эффективность переноса составляет ~ 5 %, оценивается в ~ 10 см. При уменьшении длины до ~ 1 см эффективность возрастает до ~ 10 %, что позволяет использовать сцинтилляторы толщиной: ${}^6\text{LiF}$ до ~ 2.7 мм (эффективность 75%), B_2O_3 до ~ 1.55 мм (эффективность 24.5%).

1.1.14.6 Выводы

Современные детекторы фотонов имеют достаточно высокую квантовую эффективность. Подобранный оптимальный способ съема фотонов с поверхности сцинтиллятора, позволит увеличить эффективность готового детектора за счет возможности использования более толстого сцинтиллятора. Использование для съема фотонов детекторов на основе кремниевого фотоумножителя позволяет достоверно регистрировать события от 1000 фотонов. Рассмотрены различные конфигурации сцинтилляционных детекторов и подобранные оптимальные параметры сцинтиллятора для использования в различных типах детекторов.

Полученные результаты полностью соответствуют п. 1.1.14 Плана-Графика работ в рамках исполнения обязательств по Соглашению № 075-10-2025-153 от 05 июня 2025 г.

ПРИЛОЖЕНИЯ

- Отчет о выполненных работах. ФАЙЛ: [ПГ 1.1.14 Отчет о выполненных работах.pdf](#)

1.1.15 Разработка стенда для тестирования сцинтилляционных детекторов тепловых нейтронов (совместно с ИИИ РАН, Договор № 400-04794 от 21.07.2025 г.).

Стенд предназначен для обучения студентов физических ВУЗов работе со сцинтилляционными счетчиками тепловых нейтронов на пучке нейтронов. Напряжение питания счетчиков не более 35 вольт, поэтому можно применять в любых помещениях и лабораториях. Стенд имеет удаленный блок счетчиков, что позволяет безопасно работать как с нейтронным источником ^{252}Cf так и с нейтронным пучком. Демонстрирует работу нейтронных твердотельных сцинтилляционных счетчиков тепловых нейтронов с сцинтиллятором ZnS(Ag)/LiF , кремниевыми фотоумножителями и световодом из полиметакрилата. А также на стенде можно наблюдать как счет нейтронов, так и при наличии импульсного источника нейтронов дифракцию.

В качестве детекторов используются разработанные сцинтилляционные детекторы нового типа. Эффективность счетчика доведена выше 75%, что сравнимо с гелиевыми счетчиками. Разброс эффективности счетчиков не более 5%. Это позволило отказаться от использования гелиевых счетчиков. Блок схема детектора представлена на Рис. 1.1.15.1.

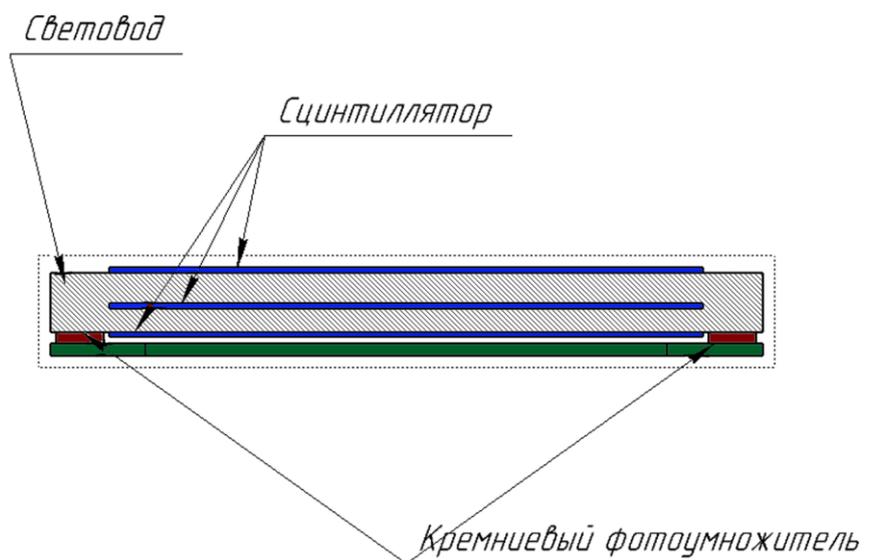


Рис. 1.1.15.1 – блок схема детектора

Стенд содержит несколько блоков в своём составе (Рис. 1.1.15.2):

- А. Блок сцинтилляционных счётчиков тепловых нейтронов.
- В. Блок много стоповых время- цифровых преобразователей (ВЦП) и контроллера управления порогоми счетчиков.
- С. Блок питания.
- Д. Ноутбук.

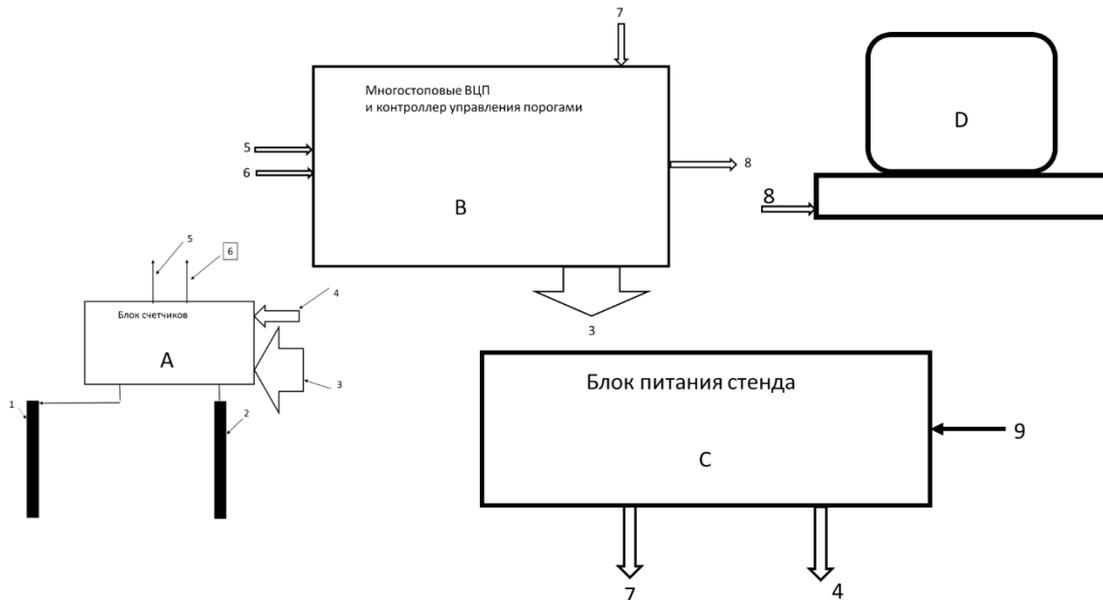


Рис. 1.1.15.2. Блок-схема стенда.

На пучок нейтронов поставлен образец синтетический алмаз. Рядом располагаются два сцинтилляционных счетчика тепловых нейтронов под определенным углом друг к другу. Сигналы с них приходят на много стоповый ВЦП. С него через USB интерфейс на ноутбук, на экране которого наблюдают дифракцию. На Рис. 1.1.15.3 приведен внешний вид стенда. Подана заявка на изобретение на разработанный стенд.



Рис. 1.1.15.3. Внешний вид стенда для тестирования детекторов.

Полученные результаты полностью соответствуют п. 1.1.15 Плана-Графика работ в рамках исполнения обязательств по Соглашению № 075-10-2025-153 от 05 июня 2025 г.

ПРИЛОЖЕНИЯ

- Акт изготовления. ФАЙЛ: [ПГ 1.1.15 Акт изготовления.pdf](#)
- Программа тестирования. ФАЙЛ: [ПГ 1.1.15 Программа тестирования.pdf](#)
- Акт тестирования. ФАЙЛ: [ПГ 1.1.15 Акт тестирования.pdf](#)
- Протокол тестирования. ФАЙЛ: [ПГ 1.1.15 Протокол тестирования.pdf](#)

Работы, выполняемые совместно с организациями, действующими в реальном секторе экономики

1.1.16 Разработка, изготовление и испытания в полях тепловых нейтронов газонаполненной ионизационной камеры с плоскими электродами, имеющими тонкоплёночное борсодержащее покрытие (^{10}B) и компенсацию тока от γ -излучения. Этап 1 (совместно с АО «КПП «Атомприбор», Соглашение о сотрудничестве № 557 от 14.07.2025).

На предприятии АО «КПП «Атомприбор» разработана, изготовлена и испытана в полях тепловых нейтронов газонаполненная ионизационная камера с плоскими электродами, имеющими тонкоплёночное борсодержащее покрытие (^{10}B) и компенсацию тока от гамма-излучения, имеющая обозначение КНТ-01.

1.1.16.1 Камера ионизационная КНТ-01

Нейтронная мощность ядерного реактора, в зависимости от режима его работы, изменяется в очень широком диапазоне значений. Для надежного контроля работы реакторной установки, в части касающейся плотности потока нейтронов в активной зоне и скорости его изменения, в составе АСУ ТП энергоблока предусмотрены блоки детектирования нейтронного потока (БДПН). БДПН предназначены для измерения плотности потока тепловых нейтронов в каналах ионизационных камер, при работе реакторной установки.

Места расположения блоков детектирования представлены на Рис. 1.1.16.1.

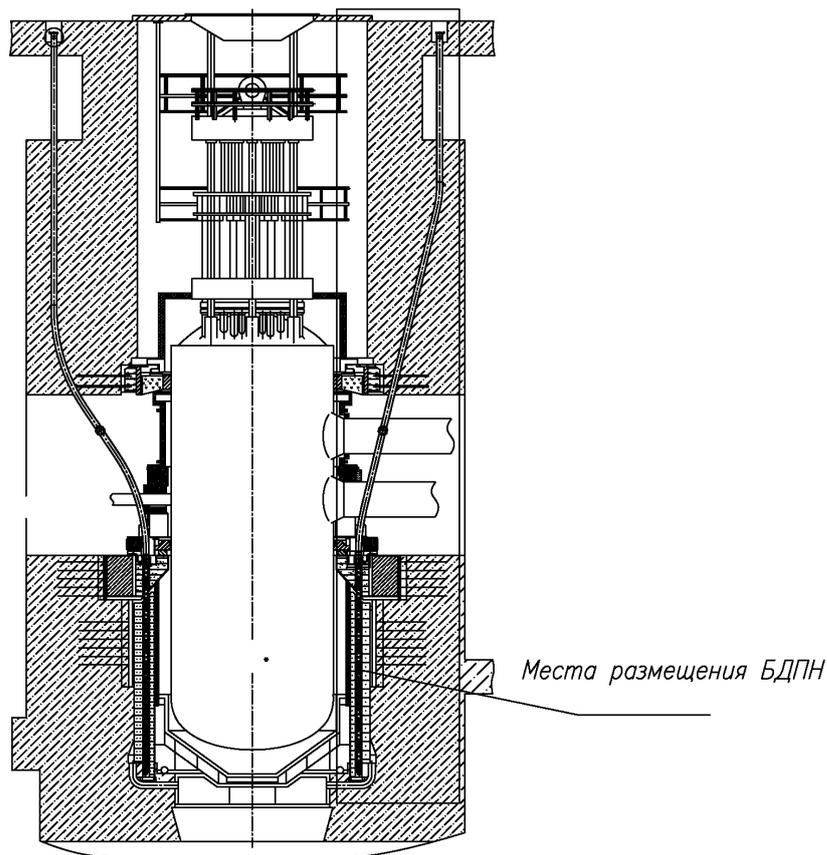


Рис. 1.1.16.1. Места расположения БДПН реакторной установке.

В состав различных БДПН входят детекторы плотности нейтронного потока разнообразных типов (камеры деления, ионизационные камеры, счетчики нейтронов) с различной чувствительностью, предназначенные для измерения плотности потока тепловых нейтронов в различных диапазонах.

По сравнению с токовыми камерами деления камеры, содержащие ^{10}B обладают двумя преимуществами. Первое заключается в низком собственном токе, на фоне которого можно измерять сигнал от тепловых нейтронов при низких плотностях потока. Второе преимущество обусловлено низким энерговыделением реакции $^{10}\text{B}(n, \alpha) ^7\text{Li}$, что позволяет получать линейный ток в камере при более высокой плотности потока нейтронов.

На основе борных компенсированных ионизационных камер производятся блоки детектирования для работы в рабочем диапазоне мощности реакторных установок АЭС.

Пример установки блоков детектирования в каналы ионизационных камер реакторной установки приведен на Рис. 1.1.16.2.

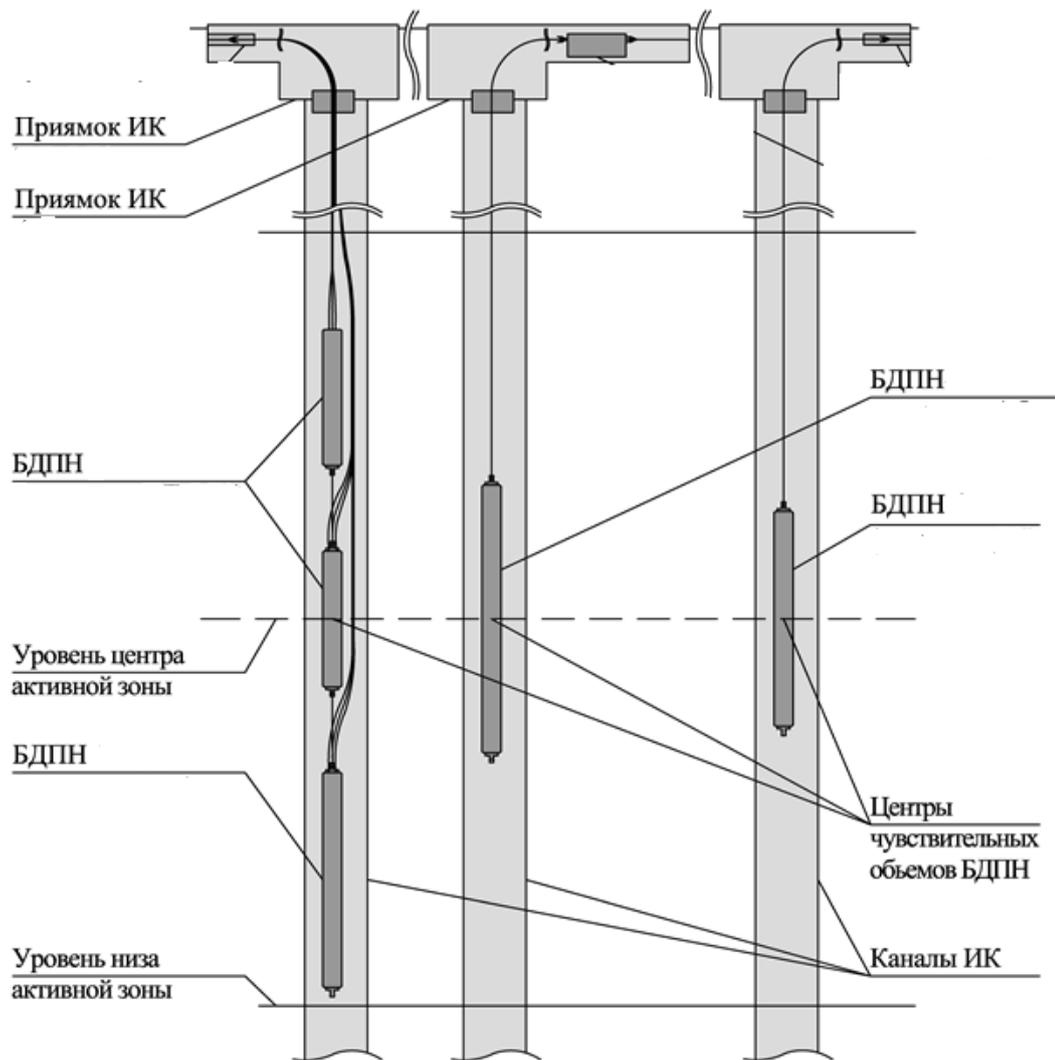


Рис. 1.1.16.2. Пример размещения БДПН в каналах ИК.

Разработанная трехэлектродная камера КНТ-01 с компенсацией тока от гамма-излучения предназначена для измерения потока тепловых нейтронов в системах управления и защиты ядерных реакторов.

При проектировании ионизационной камеры КНТ-01 были применены решения, такие как: использование изоляторов из вакуумной жаропрочной корундовой керамики ВК-100-2, отказ от применения в составе наполнения газовой смеси сложных газов, обеспечивающие расчетную радиационную стойкость, которая необходима для его эксплуатации в течение 10 компаний РУ типа ВВЭР-1000 (ВВЭР-1200, ВВЭР-1300) с максимальной плотностью потока тепловых нейтронов в каналах ИК - $10^{10} \text{ см}^{-2} \cdot \text{с}^{-1}$ при мощности поглощенной в воздухе (экспозиционной) дозы гамма-излучения в месте размещения $1,0 \cdot 10^3 \text{ Гр} \cdot \text{ч}^{-1}$.

Физический процесс, используемый для получения тока в ионизационной камере, представляет собой реакцию взаимодействия нейтронов с ядрами ^{10}B :



В качестве борсодержащего материала тонкоплёночного покрытия электродов ионизационной камеры КНТ-01 использовался карбид бора $^{10}\text{B}_4\text{C}$, обогащённый по содержанию изотопа ^{10}B до 96%. Покрытие выполнялось методом вакуумного магнетронного напыления с использованием

оборудовании и сил отдела НЭОКС ИБР-2 ЛНФ ОИЯИ. Толщина слоя карбида бора ограничивается длиной свободного пробега частиц распада – лития и α -частицы, которые поглощаются в нанесённом слое. Длина свободного пробега лития и α -частицы в среде, состоящей из атомов ^{10}B составляет 1,7 и 3,5 мкм соответственно. Чем меньше толщина слоя карбида бора $^{10}\text{B}_4\text{C}$, тем количество взаимодействий с нейтронами меньше, но тем большее число частиц распада будет зарегистрированы в газовом объёме камеры. При увеличении толщины слоя карбида бора $^{10}\text{B}_4\text{C}$ число взаимодействий с нейтронами увеличивается, но увеличивается также число поглощённых в слое частиц распада бора ^{10}B и уменьшается доля зарегистрированных событий. Толщина покрытия $^{10}\text{B}_4\text{C}$, равная 3,0 мкм, была определена опытным путём, как оптимальная для применения в изделии КНТ-01.

Ионизационная камера КНТ-01 собрана из трех частей, установленных одна за другой и сваренных между собой посредством переходных фланцев. Каждая секция имеет систему из трех электродов, размещенных в цилиндрическом корпусе из стали 12Х18Н10Т диаметром 50 мм и толщиной стенки около 0,8 мм. Один из электродов содержит в каждой части 44, а два других по 22 и 23 диска диаметром 44 и толщиной 0,5 мм, закрепленных на металлических шпильках. Рисунок диска электрода с покрытием $^{10}\text{B}_4\text{C}$ приведен на Рис. 1.1.16.3.

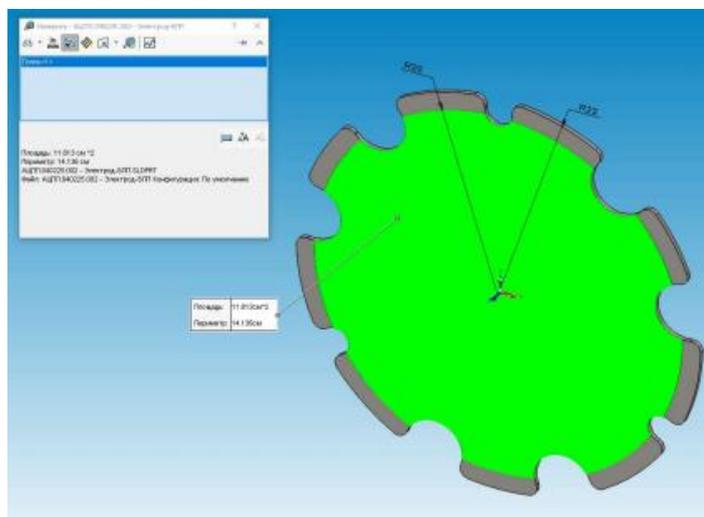


Рис.1.1.16.3. Диск электрода.

Применены три типа электродов:

- покрытые радиатором с двух сторон;
- покрытые радиатором с одной стороны;
- без покрытия.

Электродная система образует две секции. Секцию чувствительную к нейтронам и гамма-излучению (эта электродная секция называется измерительной) и секцию, не содержащую нейтроночувствительного материала и служащую для компенсации ионизационного тока от гамма-излучения в цепи сигнального электрода (эта электродная секция называется компенсационной). Схема электродной системы приведена на Рис. 1.1.16.4.

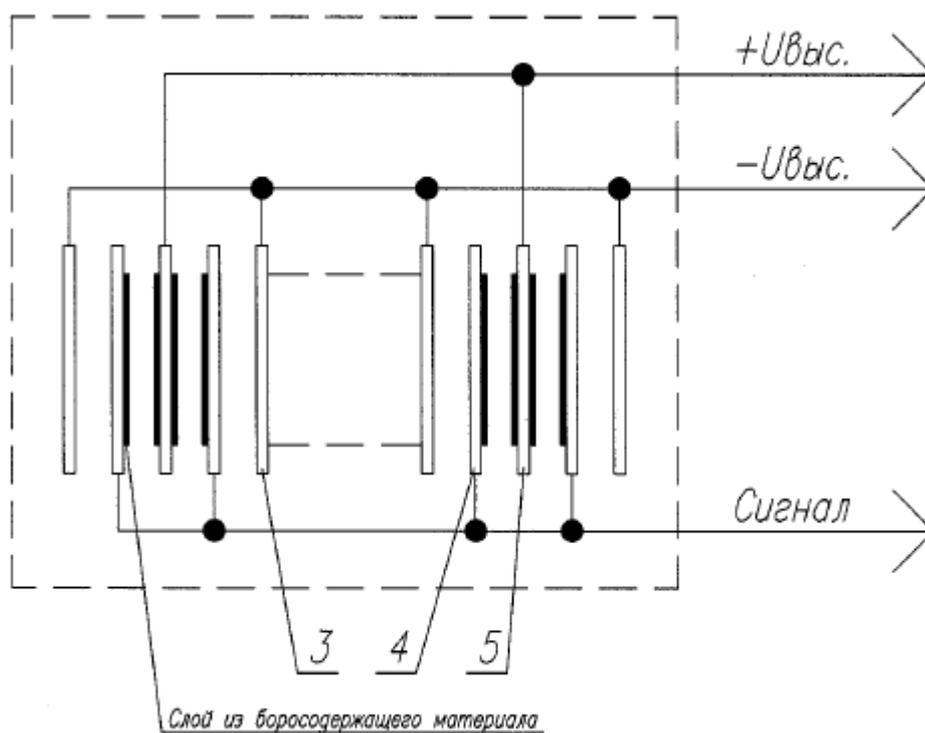


Рис.1.1.16.4. Схема электродной системы.

Корпус ионизационной камеры заполняется рабочей газовой смесью состава 96% Ar - 2% N₂ - 2%N₂ при давлении $4,0 \cdot 10^5$ Па.

Рабочее напряжение КНТ-01 составляет плюс 150 В и минус 150 В постоянного тока. Схема КНТ-01 приведена на рисунке 1.1.16.5.



Рис. 1.1.16.5. Схема КНТ-01.

1.1.16.2 Изготовление КНТ-01

Для сборки электродной секции с помощью электродов, приведенных на Рис. 1.1.16.6, используется стойка - Трубка 3x1 (12X18Н10Т), длина L=197 мм. Способ крепления электродов к стойке - лазерная сварка. При сборке образуются три электродных системы, независимых друг от друга.



Рис.1.1.16.6. Сборка электродной секции.

Электроды собираются на стойках, шаг 1,6 мм. Электродные системы изолированы друг от друга керамическим изолятором, механически зафиксированы, зазор выставляется при сборке электродной системы. Керамический изолятор жестко фиксирован в металлической обечайке, стойки изолированы друг от друга, выдерживают зазор между электродами. Фотография электродной секции приведена на рисунке 1.1.16.7. Соединение секций приведено на рисунке 1.1.16.8.

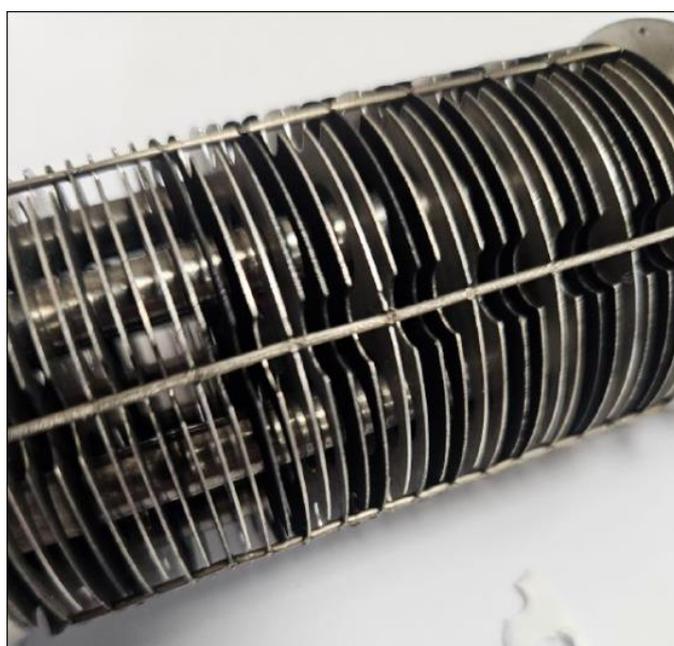


Рис.1.1.16.7. Фотография электродной секции.

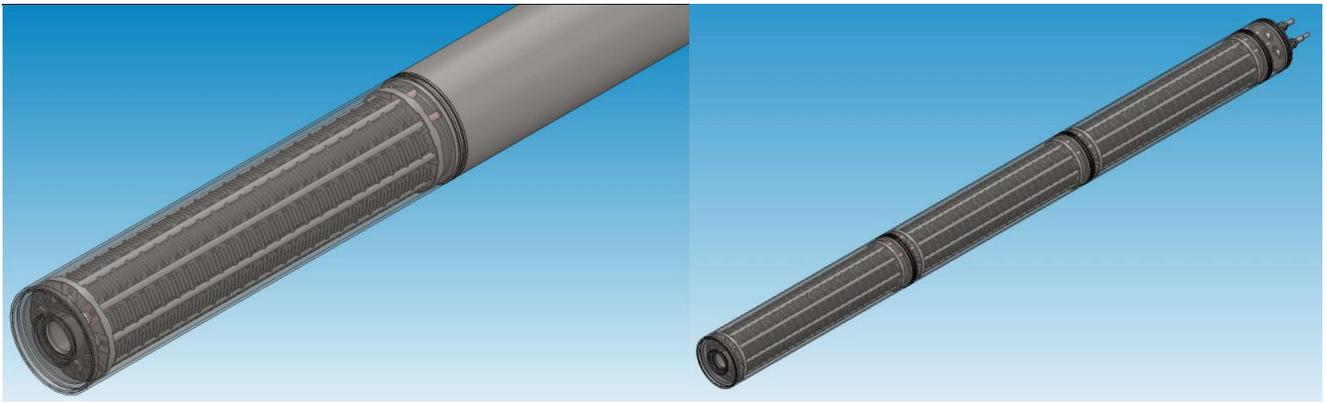


Рис. 1.1.16.8. Соединение секций: слева – аксонометрический вид в корпусе, справа – аксонометрический вид соединения трех секций.

Выводы электродной системы выводятся на металлокерамические изоляторы фланца корпуса камеры.

После сборки всей электродной системы проводится проверка сопротивления изоляции и электрической прочности изоляции. Площадь общего покрытия электродов, $S=3118,632 \text{ см}^2$.



Рис. 1.1.16.9. КНТ-01 аксонометрический вид с разрезом.

Электродная система помещается в корпус ионизационной камеры, который герметизируется аргонодуговой сваркой, проверяется герметичность сварных соединений масс-спектрометрическим методом и далее проводится обезгаживание собранной камеры при температуре 450°C в течение 12 часов. После этого проверяются сопротивление изоляции, электрическая прочность изоляции и камера заполняется рабочей газовой смесью состава $96\% \text{ Ar} - 2\% \text{ N}_2 - 2\% \text{ N}_2$ при давлении $4,0 \cdot 10^5 \text{ Па}$, после чего вновь проверяются сопротивление изоляции и электрическая прочность изоляции.



Рис. 1.1.16.10. Общий вид КНТ-01.

1.1.16.3 Подготовка измерительного канала

Для подключения кабельной линии связи к КНТ-01 был приварен защитный кожух с кабелями. Фотография внешнего вида КНТ-01 с кожухом и линией связи приведен на Рис. 1.1.16.11.



Рис. 1.1.16.11. КНТ-01 с линией связи.

Для обработки токовых сигналов и подачи высоковольтных напряжений питания к КНТ-01 был подключен канал нейтронных измерений КНИПФ, который позволяет подавать на камеру КНТ-01 напряжения постоянного тока до плюс 400 В и минус 400В и измерять входные от КНТ-01 токи (от $1 \cdot 10^{-11}$ А).

1.1.16.4 Испытания КНТ-01

Испытание ионизационной камеры КНТ-01 проводились на установке УРН-1 в соответствии с документом «Камера ионизационная КНТ-01. Программа предварительных испытаний в полях тепловых нейтронов газонаполненной ионизационной камеры с плоскими электродами, имеющими борсодержащее покрытие (^{10}B) и компенсацию тока от гамма излучения».

Для воспроизведения полей тепловых нейтронов плотностью потока до $1,0 \cdot 10^5 \text{с}^{-1} \cdot \text{см}^{-2}$ применялась установка УРН-1 с установленным источником - источник быстрых нейтронов плутоний бериллиевый с р/н Pu-238 ИБН-8-7. На Рис. 1.1.16.12 приведен общий вид установки УРН-1. На Рис. 1.1.16.13 приведена схема размещения КНТ-01 и источника ИБН-8-7 в установке УРН-1.



Рис. 1.1.16.12. Установка УРН-1.

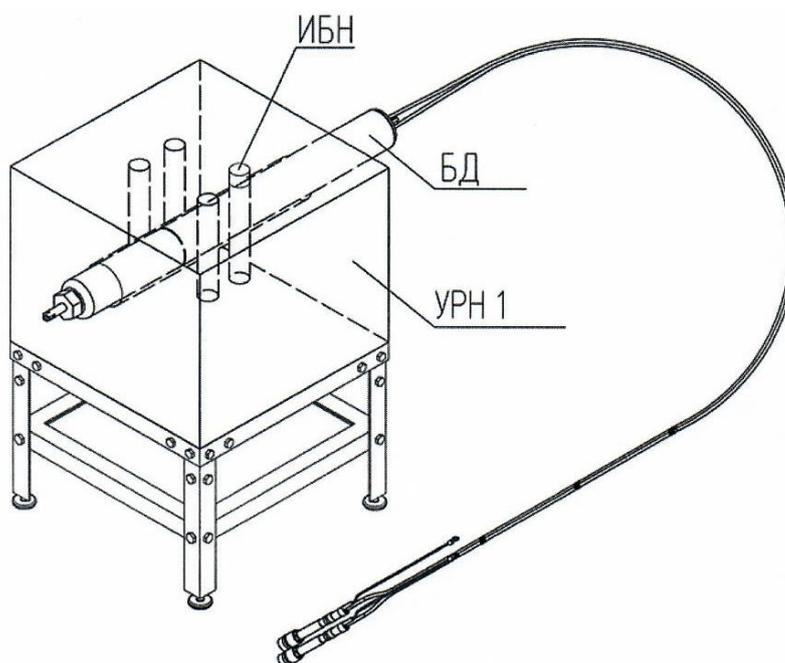


Рис. 1.1.16. 13. Схема размещения КНТ-01 и источника ИБН-8-7 в установке УРН-1.

Проверка чувствительности КНТ-01 к тепловым нейтронам проведена при двух значениях плотности потока тепловых нейтронов $1,0 \cdot 10^4 \text{ с}^{-1} \cdot \text{см}^{-2}$ и $1,0 \cdot 10^5 \text{ с}^{-1} \cdot \text{см}^{-2}$.

Выполнено 10 измерений в каждой точке с интервалом времени 30 с.

1.1.16.5. Результаты проверки чувствительности КНТ-01 к тепловым нейтронам

По результатам проведенных испытаний были получены следующие результаты:

- получены средние значения токов ионизационной камеры $2,4 \cdot 10^{-11} \text{ А}$ и $2,4 \cdot 10^{-10} \text{ А}$ соответственно.

- вычислено значение чувствительности КНТ-01 в соответствующих точках, которая составила $2,4 \cdot 10^{-15} \text{ А} \cdot \text{см}^{-2} \cdot \text{с}^{-1}$.

1.1.16.6 Выводы

Результаты разработки и исследований камеры ионизационной для измерения плотности потока тепловых нейтронов с радиатором $^{10}\text{B}_4\text{C}$ подтвердили прогнозные параметры КНТ-01.

АО «КПП «Атомприбор» в рамках исследовательской программы (проекта) по теме: «Мероприятия по проведению синхротронных и нейтронных исследований (разработок), необходимых для решения принципиально новых фундаментальных и крупных прикладных задач» в соответствии с пунктом 1.1.16 Плана-графика «Разработка, изготовление и испытания в полях тепловых нейтронов газонаполненной ионизационной камеры с плоскими электродами, имеющими борсодержащее покрытие (^{10}B) и компенсацию тока от гамма-излучения» выполнил следующие работы:

1. Разработана конструкторская документация ионизационной камеры КНТ-01 в составе: чертёж общего вида; габаритный чертёж; сборочный чертёж; пояснительная записка.
2. Изготовлен опытный образец ионизационной камеры КНТ-01 с радиатором из карбида бора $^{10}\text{B}_4\text{C}$.
3. Выполнены предварительные испытания КНТ-01 на установке УРН-1.

Выполненные работы подтвердили возможность изготовления радиационно—стойких детекторов потока тепловых нейтронов с радиатором $^{10}\text{B}_4\text{C}$. Изготовление КНТ-01 выполнено АО КПП «Атомприбор» с применением электродов с напылением высокообогащенного ^{10}B , которое выполнялось методом вакуумного магнетронного напыления с использованием оборудования и сил отдела НЭОКС ИБР-2 ЛНФ ОИЯИ.

С учетом опыта применения в составе БДПН для СУЗ АЭС борных ионизационных камер, необходимо повысить значение чувствительности КНТ-01. Для повышения значения чувствительности возможно увеличить количество пластин электродной системы с покрытием из $^{10}\text{B}_4\text{C}$.

В качестве дальнейшего развития, для возможного применения КНТ-01 в составе оборудования спецсистем безопасности на ОИАЭ, необходимо провести испытания КНТ-01 на устойчивость к воздействиям внешних воздействующих факторов, устанавливаемых требованиями нормативных документов.

Полученные результаты полностью соответствуют п. 1.1.16 Плана-Графика работ в рамках исполнения обязательств по Соглашению № 075-10-2025-153 от 05 июня 2025 г.

ПРИЛОЖЕНИЯ

- Конструкторская документация. ФАЙЛ: [ПГ 1.1.16 Конструкторская документация.pdf](#)
- Акт изготовления. ФАЙЛ: [ПГ 1.1.16 Акт изготовления.pdf](#)
- Программа и методика предварительных испытаний. ФАЙЛ: [ПГ 1.1.16 Программа и методика предварительных испытаний.pdf](#)
- Акт предварительных испытаний. ФАЙЛ: [ПГ 1.1.16 Акт предварительных испытаний.pdf](#)
- Протокол предварительных испытаний. ФАЙЛ: [ПГ 1.1.16 Протокол предварительных испытаний.pdf](#)

1.1.17 Разработка, изготовление и испытания в полях тепловых нейтронов однообъемного цилиндрического газоразрядного счётчика нейтронного излучения с тонкоплёночным покрытием на основе изотопа ^{10}B . Этап 1 (совместно с АО «КПП «Атомприбор», Соглашение о сотрудничестве № 557 от 14.07.2025).

На предприятии АО «КПП «Атомприбор» разработан, изготовлен и испытан в полях тепловых нейтронов прототип цилиндрического газоразрядного счетчика нейтронного излучения с радиатором из карбида бора B_4C , названного СНМ-01.

1.1.17.1 Счетчик СНМ-01

При проектировании современных реакторных установок стремятся к уменьшению потока быстрых нейтронов на корпусе реактора для увеличения срока его службы. Это приводит к снижению плотности потока тепловых нейтронов в каналах ионизационных камер (каналы ИК) в бетонной защите реактора, где располагаются блоки детектирования потока нейтронов (БДПН). БДПН входят в состав аппаратуры контроля нейтронного потока (АКНП) энергоблоков АЭС и предназначены для непрерывного измерения плотности потока тепловых нейтронов от реакторной установки (РУ).

Снижение плотности потока тепловых нейтронов требует повышенной чувствительности БДПН, предназначенных для работы во время перегрузки топлива РУ и при работе РУ в диапазоне источника. Поэтому при этих режимах работы РУ для повышения чувствительности каналов АКНП применяются блоки детектирования БДПН выполненные на основе счетчиков нейтронов вместо ионизационных камер.

Счетчики нейтронов, используемые на АЭС, должны обладать радиационной стойкостью к нейтронному излучению для того, чтобы отсутствовала необходимость вывода БДПН из зоны интенсивного излучения по высоте каналов ИК с помощью механизмов перемещения.

При проектировании счетчика СНМ-01 были применены решения (такие как использование изоляторов из вакуумной жаропрочной корундовой керамики ВК-100-2, вместо традиционно используемых стеклянных; применение полиэфирэфиркетона (РЭЭК) вместо пресс-материала АГ-4В ,отказ от применения в составе наполнения газовой смеси сложных газов), обеспечивающие расчетную радиационную стойкость, необходимую для использования его без необходимости перемещения в канале ИК, в течение 10 компаний РУ типа ВВЭР-1000 (ВВЭР-1200, ВВЭР-1300) с максимальной плотностью потока тепловых нейтронов в каналах ИК $10^9 \text{ см}^{-2} \cdot \text{с}^{-1}$.

Так как конструктивно коронный счетчик не отличается от пропорционального, СНМ-01 может работать в обоих режимах. Для обеспечения повышенной стойкости к работе в гамма-полях выбран коронный режим работы, который должен обеспечивать измерение плотности потока тепловых нейтронов в диапазоне от 10^{-1} до $10^4 \text{ см}^{-2} \cdot \text{с}^{-1}$ при мощности поглощенной в воздухе (экспозиционной) дозы гамма-излучения в месте размещения не более $8 \text{ Гр} \cdot \text{ч}^{-1}$.

Физический процесс, используемый для получения сигнала в счётчике нейтронов, представляет собой реакцию взаимодействия нейтронов с ядрами ^{10}B :



В качестве борсодержащего материала тонкоплёночного покрытия стенок камеры СНМ-01 использовался карбид бора $^{10}\text{B}_4\text{C}$, обогащённый по содержанию изотопа ^{10}B до 96%. Покрытие выполнялось методом вакуумного магнетронного напыления с использованием оборудования и сил отдела НЭОКС ИБР-2 ЛНФ ОИЯИ. Толщина слоя карбида бора ограничивается длиной свободного пробега частиц распада – лития и α -частицы, которые поглощаются в нанесённом слое. Длина свободного пробега лития и α -частицы в среде, состоящей из атомов ^{10}B составляет 1,7 и 3,5 мкм соответственно. Чем меньше толщина слоя карбида бора $^{10}\text{B}_4\text{C}$, тем количество взаимодействий с нейтронами меньше, но тем большее число частиц распада будет зарегистрированы в газовом объёме счётчика. При увеличении толщины слоя карбида бора $^{10}\text{B}_4\text{C}$ число взаимодействий с нейтронами увеличивается, но увеличивается также число поглощённых в слое частиц распада бора ^{10}B и уменьшается доля зарегистрированных событий. Расчётами установлено и опытным путём

подтверждено, что при толщине слоя более 3 мкм количество вышедших в газовый промежуток частиц достигает насыщения. Толщина покрытия $^{10}\text{B}_4\text{C}$, равная 3,0 мкм, была определена опытным путём, как оптимальная для применения в изделии СНМ-01. При этом чувствительность регистрации нейтронов оказалась выше, чем у таких же изделий с покрытием традиционным консервативным методом суспензией, содержащей порошок В обогащённый по изотопу ^{10}B до 96% с плотностью покрытия 1 мг/см².

В детекторе с цилиндрической геометрией напряженность электрического поля изменяется обратно пропорционально радиусу:

$$E=(U/\ln(r_k/r_a)) \cdot 1/r \quad (2)$$

$$E = \left(U / \ln \left(\frac{r_k}{r_a} \right) \right) \cdot \frac{1}{r}, \quad (1.1.17.2)$$

где: U-напряжение между электродами детектора; r_a -радиус анода; r_k -радиус катода.

Для возникновения коронного разряда необходимо подать напряжение 850 В постоянного тока.

Счетчик СНМ-01 представляет собой газоразрядный коронный цилиндрический счётчик тепловых нейтронов. Длина катода (эффективная) 280 мм, диаметр катода – 32 мм, диаметр анода – 100 мкм. Катод изготовлен из нержавеющей трубы диаметром 32 мм и толщиной стенки 0.5 мм 08X18H10. Внутри катода вставлен согнутый по внутреннему радиусу алюминиевый лист толщиной 0,5 мм с покрытием из карбида бора $^{10}\text{B}_4\text{C}$ толщиной 3,0 мкм, нанесённого на лист методом магнетронного напыления. Схема счетчика СНМ-01 представлена на рисунке 1.1.17.1.



Рис. 1.1.17.1. Схема счётчика СНМ-01.

Газовое наполнение: 97 % Ar + 3 % He, общим давлением 250 торр (32,9 кПа).

Рабочее напряжение СНМ-01 составляет 950 В постоянного тока.

Чувствительность счетчика к тепловым нейтронам во всем диапазоне измерения: не менее $(3,0 \pm 0,7) \text{ см}^2$ (имп. · см²/нейтр.).

1.1.17.2 Изготовление СНМ-01

Кожух счётчика СНМ-01 (катод) изготавливался из трубы из нержавеющей стали 08X18H10 толщиной 0,5 мм. Внутри кожуха устанавливался цилиндр из алюминия с покрытием из карбида бора $^{10}\text{B}_4\text{C}$. На кожух монтировались фланцы с изоляторами и натягивалась вольфрамовая нить толщиной 100 мкм.

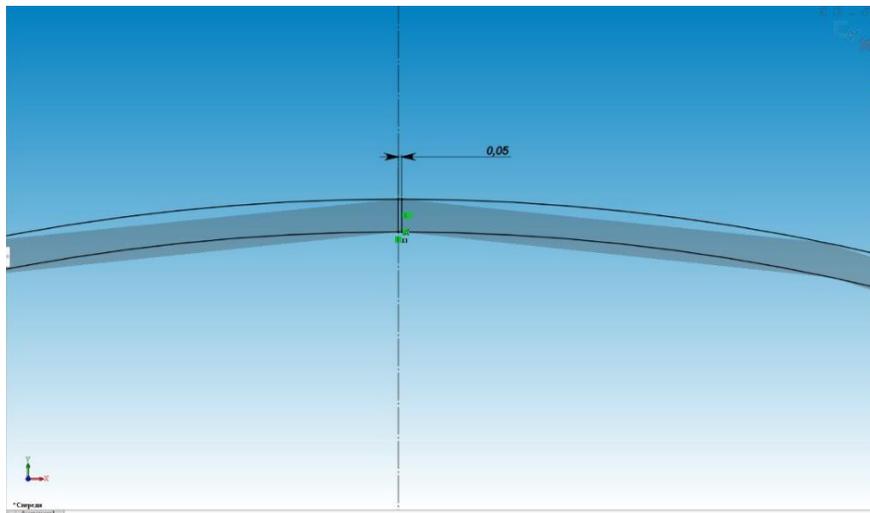


Рис. 1.1.17.2. Схема сборки алюминиевого цилиндра.

После сборки и установки фланцев швы заваривались при помощи лазерной сварки. Внутренний объем был откачан (обезгажен) при температуре 400 °С и, затем, заполнен газовой смесью 97 % Ar + 3 % He до указанного давления через изолятор, после чего трубка была заварена.



Рис. 1.1.17.3. Общий вид счетчика СММ-01.

1.1.17.3 Подготовка измерительного канала

Для подключения кабельной линии связи и защиты СММ-01 от внешних воздействий, изделие было установлено в корпус БДПН, предназначенный для использования с тремя детекторами с внешним диаметром 32 мм. Два оставшихся места для установки счетчиков были оставлены пустыми.

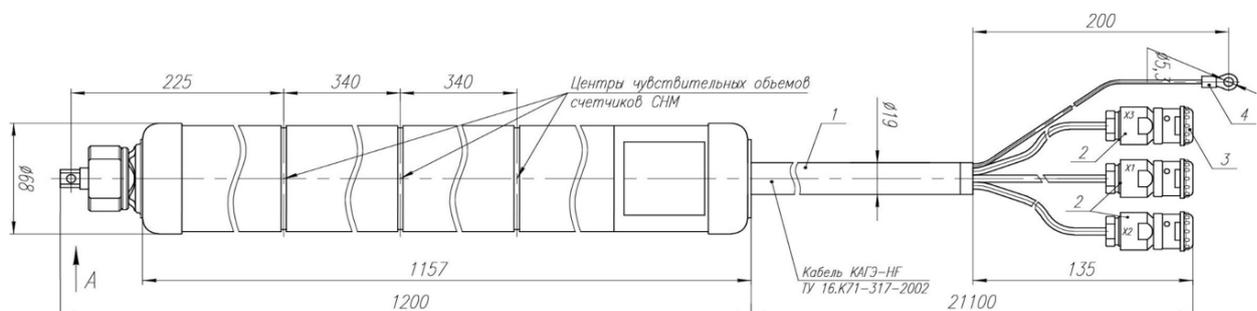


Рис. 1.1.17.4. Габаритный чертёж БДПН.

Внешний вид СНМ-01 в корпусе БДПН представлен на рисунке 6.



Рис. 1.1.17.5. Внешний вид БДПН с СНМ.

Для обработки сигналов СНМ-01 и подачи высоковольтных напряжений питания к СНМ-01 был подключен блок усиления импульсов с платой усилителя импульсов. Усилитель импульсов ПУИ построен по схеме зарядочувствительного усилителя (ЗЧУ) с дифференциальным входом для усиления и преобразования сигнала с детектора без заметного ухудшения отношения сигнал/шум и повышения помехоустойчивости.

Схема входного каскада ПУИ представлена на рисунке 1.1.17.6.

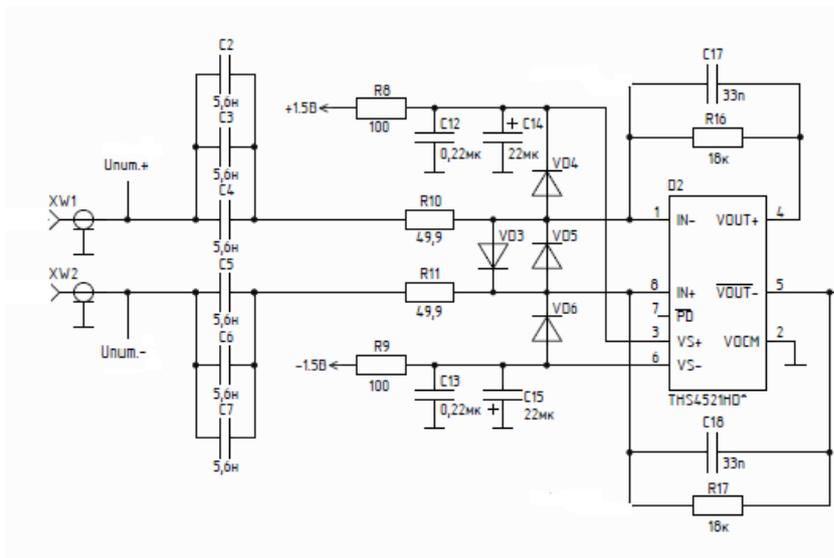


Рис. 1.1.17.6. Схема входного каскада ПУИ.

Внешний вид блока усиления импульсов представлен на рисунке Рис. 1.1.17.7.

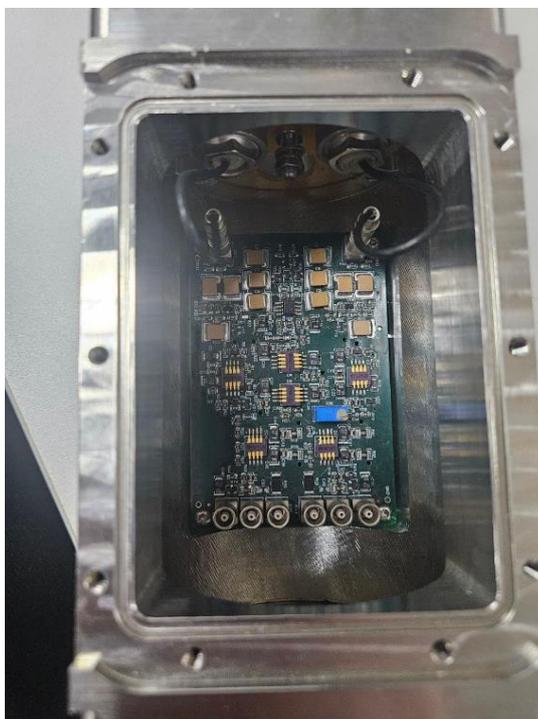


Рис. 1.1.17.7. Внешний вид блока усиления импульсов.

Для определения скорости счета к выходу дискриминатора подключался частотомер в счетном режиме.

1.1.17.4 Испытания СНМ-01

Испытание счетчика нейтронов СНМ-01 проводились на установке КИС-НРД-МБ и установке УРН-1.

В таблице 1.1.17.1 представлены значения плотностей потока тепловых нейтронов, воспроизводимых на приведенных установках в процессе испытаний.

Таблица 1.1.17.1

Плотность потока тепловых нейтронов φ , $\text{с}^{-1}\cdot\text{см}^{-2}$	Тип установки
0,5	Установка КИС-НРД-МБ
50	
200	
$2,0\cdot 10^3$	
$1\cdot 10^4$	Установка УРН-1. Источник ИБН-8-7

Для снятия дискриминационной характеристики, вольт-счетной характеристики, определения рабочего напряжения и определения значения чувствительности СММ-01 собирался измерительный тракт, описанный в разделе 3. Для воспроизведения полей тепловых нейтронов плотностью потока до $2,0\cdot 10^3 \text{ с}^{-1}\cdot\text{см}^{-2}$ применялась установка КИС-НРД-МБ.



Рис. 1.1.17.8. Установка КИС-НРД-МБ.

Для воспроизведения полей тепловых нейтронов плотностью потока $1,0\cdot 10^4 \text{ с}^{-1}\cdot\text{см}^{-2}$ применялась установка УРН-1 с установленным источником - источник быстрых нейтронов плутоний бериллиевый с р/н Pu-238 ИБН-8-7. На рис. 1.1.17.9 и 1.1.17.10 приведён вид установки УРН-1 со счётчиком СММ-01. На рис. 1.1.17.11 приведена схема размещения СММ-01 и источника ИБН-8-7 в установке УРН-1



Рис. 1.1.17.9. Установка УРН-1.



Рис. 1.1.17.10. Установка УРН-1 с установленным в ней СНМ-01.

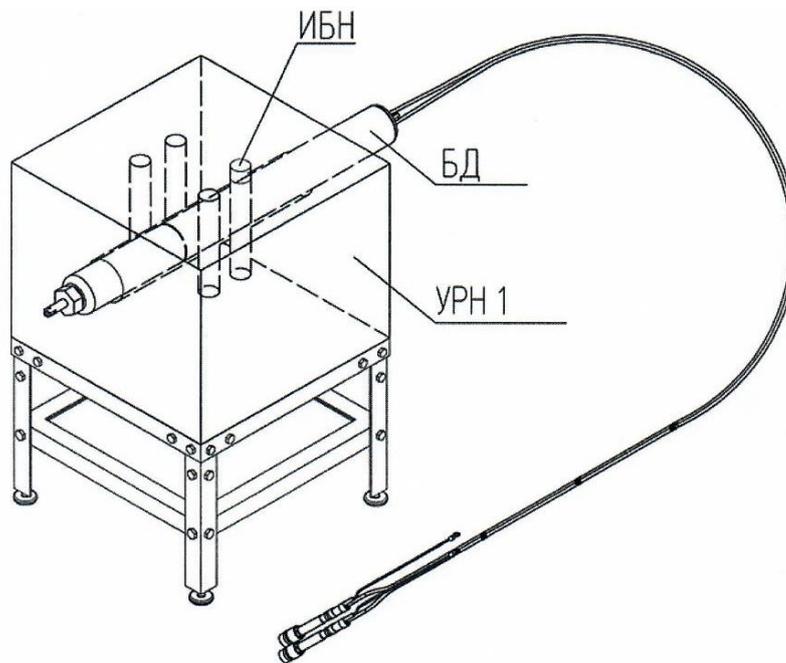


Рис. 1.1.17.11. Схема размещения СНМ-01 и источника ИБН-8-7 в установке УРН-1

Выбор рабочей точки.

Определение рабочего напряжения питания СНМ-01 проводилось на установке КИС-НРД-МБ при плотности потока тепловых нейтронов $50 \text{ с}^{-1} \cdot \text{см}^{-2}$. Было определено напряжение зажигания коронного разряда СНМ-01 равное 850 В постоянного тока. Форма импульса и амплитуда шумов коронного разряда на выходе зарядочувствительного усилителя приведена на осциллограмме на рисунке Рис. 1.1.17.12.

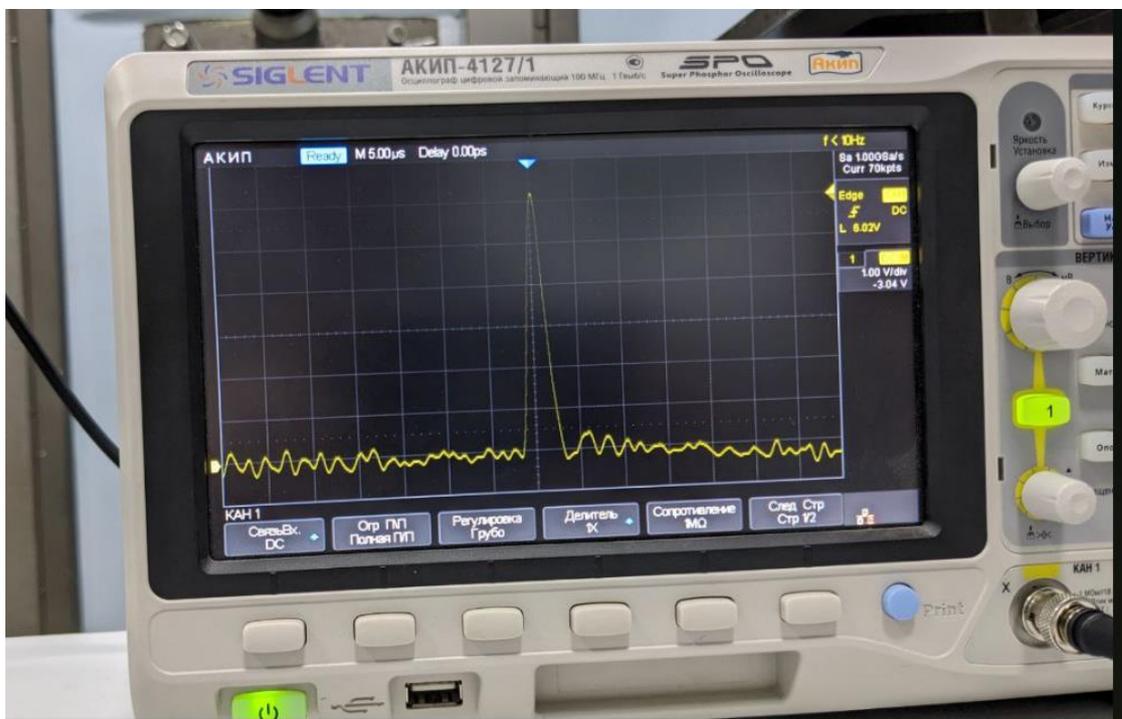


Рис. 1.1.17.12. Осциллограмма выходного сигнала.

Для отсечения шума токов коронного разряда использовался порог дискриминации на уровне 1 В.

На рисунке 1.1.17.13 представлена вольт-счетная характеристика СНМ-01 (зависимость скорости счета импульсов от нейтронов от напряжения питания детектора) при установленном пороге дискриминации 1 В.

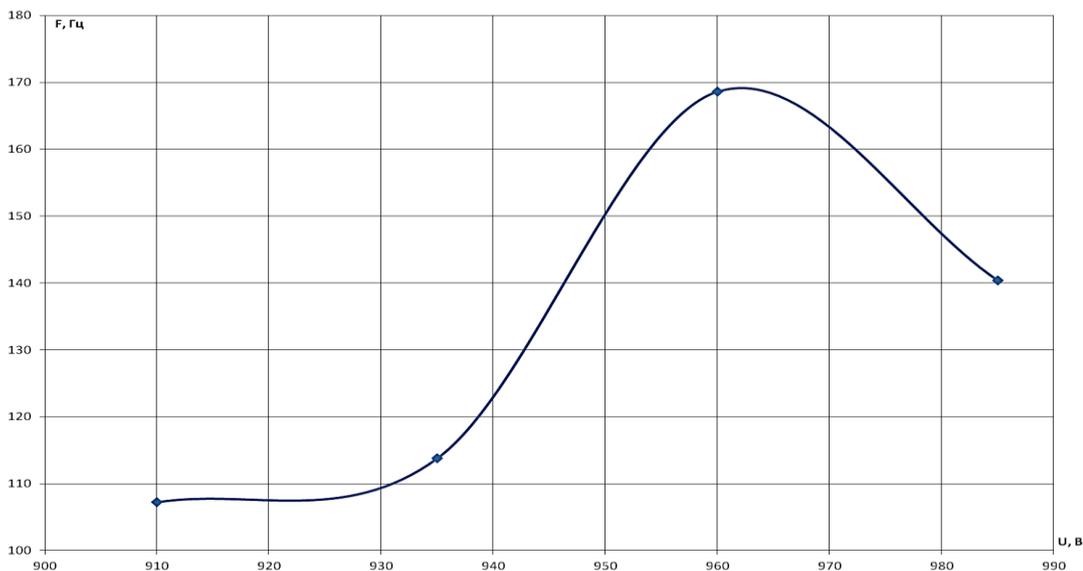


Рис. 1.1.17.13. Вольт-счётная характеристика СНМ-01 при пороге дискриминации 1В.

По рисунку видно, что оптимальное напряжение питания СНМ-01 составляет около 950 В. При таком напряжении питания детектора наблюдаются максимальные значения скорости счета импульсов от нейтронов и остается небольшой запас до перегиба характеристики.

Проверка чувствительности к тепловым нейтронам.

Проверка значения чувствительности к тепловым нейтронам проводилась в соответствии с разработанной Программой и методикой предварительных испытаний. Полученные результаты отражены в Протоколе и Акте предварительных испытаний. Полученное значение чувствительности измерительного канала на основе СНМ-01 находится в границах $(3,3 \pm 0,8)$ во всем диапазоне измерения плотности потока тепловых нейтронов.

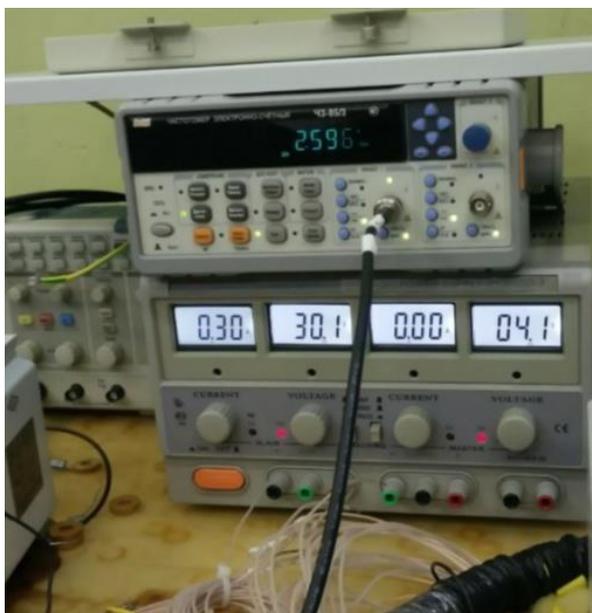


Рис. 1.1.17.14. Измерение скорости счета импульсов от нейтронов.

На рис. 1.1.17.15 приведена дискриминационная характеристика измерительного канала на основе счетчика СММ-01 (зависимость скорости счета импульсов от порога дискриминации в усилителе).

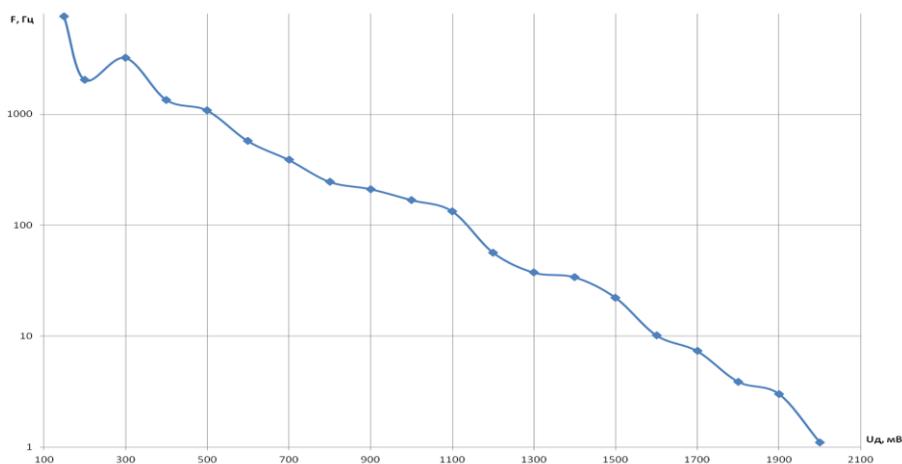


Рис. 1.1.17.15 Дискриминационная характеристика СММ-01.

1.1.17.5 Выводы

Результаты исследований коронного газоразрядного счетчика тепловых нейтронов с радиатором $^{10}\text{B}_4\text{C}$ подтвердили заявленные расчетные параметры СММ-01.

АО «КПП «Атомприбор» в рамках исследовательской программы (проекта) по теме: «Мероприятия по проведению синхротронных и нейтронных исследований (разработок), необходимых для решения принципиально новых фундаментальных и крупных прикладных задач» в соответствии с пунктом 1.1.17 Плана-графика ««Разработка, изготовление и испытания в полях тепловых нейтронов однообъемного цилиндрического газоразрядного счётчика нейтронного излучения с тонкопленочным покрытием на основе ^{10}B » выполнены следующие работы:

1. Разработана конструкторская документация газоразрядного счетчика тепловых нейтронов СНМ-01. В составе: чертёж общего вида; габаритный чертёж; сборочный чертёж; пояснительная записка.

2. Изготовлен опытный образец счетчика нейтронов СНМ-01 с радиатором из карбида бора $^{10}\text{B}_4\text{C}$.

3. Выполнены предварительные испытания СНМ-01.

4. По результатам испытаний можно сделать следующие выводы:

– подтверждена возможность изготовления радиационно-стойких перемещаемых детекторов потока тепловых нейтронов с радиатором $^{10}\text{B}_4\text{C}$;

– характеристики опытного образца подтверждают заявленные расчетные характеристики;

– для уменьшения рабочего напряжения и напряжения зажигания коронного разряда в счетчике необходимо уменьшить диаметр анода до 30 мкм;

– для увеличения чувствительности (при необходимости) возможно увеличить длину катода и анода в два раза;

– для снижения накопления долгоживущих и короткоживущих радионуклидов в материале СНМ заменить нержавеющей сталь на алюминий;

Полученные результаты полностью соответствуют п. 1.1.17 Плана-Графика работ в рамках исполнения обязательств по Соглашению № 075-10-2025-153 от 05 июня 2025 г.

ПРИЛОЖЕНИЯ

- Конструкторская документация. ФАЙЛ: [ПГ 1.1.17 Конструкторская документация.pdf](#)
- Акт изготовления. ФАЙЛ: [ПГ 1.1.17 Акт изготовления.pdf](#)
- Программа и методика предварительных испытаний. ФАЙЛ: [ПГ 1.1.17 Программа и методика предварительных испытаний.pdf](#)
- Акт предварительных испытаний. ФАЙЛ: [ПГ 1.1.17 Акт предварительных испытаний.pdf](#)
- Протокол предварительных испытаний. ФАЙЛ: [ПГ 1.1.17 Протокол предварительных испытаний.pdf](#)

1.2 Мероприятия по созданию сетевой синхротронной и нейтронной научно-исследовательской инфраструктуры на территории Российской Федерации

Работы, выполняемые за счет финансирования из средств гранта

1.2.1 Создание на выведенном пучке нейтронов на реакторе ИБР-2 испытательного комплекса (ИК) для определения характеристик детекторов нейтронов разного типа. Этап 1.

Среди задач проекта «Развитие аппаратно-методической базы для решения научных и прикладных задач на источниках нейтронов разного типа» более десяти посвящены разработкам в области детектирования нейтронного излучения для научных исследований или промышленного применения. Создание новых детекторов предполагает использование при их разработке новых научных подходов и технологических решений, которые должны позволить добиться качественного прорыва в достижении лучших параметров новых детекторов по быстродействию, временному и пространственному разрешениям. Реализация новых подходов в создании детекторов требует создания условий для их тестирования и отладки. Разработка нового детектора должна проходить определенные уровни развития, которые в обязательном порядке должны заканчиваться

проведением испытаний на пучке нейтронов для понимания работоспособности и определения параметров созданной системы. Самый простой способ организации пучка нейтронов — это использование изотопного источника, который можно разместить в относительно небольшом помещении, условия которого позволяют организовать в нем работы соответствующего характера. Преимущества такого подхода в постоянной доступности источника и возможность проведения измерений по мере возникновения в этом необходимости. Однако интенсивности таких источников нейтронов достаточно невелики и многие характеристики, такие как загрузочной способности детектора измерить невозможно. Кроме этого, каждый детектор предназначен для определенных экспериментальных условий его применения, создать которые на изотопном источнике, как правило нельзя, в силу малой интенсивности излучения. Для полного и всестороннего изучения новой детекторной системы требуются интенсивные пучки и желательно в тех экспериментальных условиях, в которых детекторная система будет работать. С целью решения этой задачи начата разработка специализированного измерительного комплекса (ИК) на базе выведенного пучка нейтронов на канале № 9 на импульсном реакторе ИБР-2. В настоящее время на канале №9 располагается установка РЕФЛЕКС – нейтронный рефлектометр с поляризованными нейтронами. Установка РЕФЛЕКС входит в программу пользовательской политики ЛНФ ОИЯИ, в связи с чем разрабатываемый ИК должен быть реализован в виде дополнительной опции, которая может выполнять свои функции, не отменяя возможности проведения измерений на установке РЕФЛЕКС.

Методы исследования конденсированных сред с помощью рассеяния нейтронов реализуются на выведенных пучках тепловых нейтронов, энергия которых (выраженная в длинах волн) может варьироваться в пределах от 0.5÷25Å. Большинство методов, использующих рассеяние нейтронов нацелены на получение информации о тех или иных структурных параметрах изучаемых материалов и/или характеристик внутренней динамики. Можно выделить 3 основных метода структурных исследований, которые могут варьироваться в части реализации на конкретном источнике применительно к той или иной конкретной задаче: нейтронная дифракция (НД), метод малоуглового рассеяния нейтронов (МУРН), нейтронная рефлектометрия (НР). Рассмотрим каждый из этих базовых методов с точки зрения основных требований к конфигурации регистрирующей части рассеянных на изучаемом образце нейтронов.

Метод нейтронной дифракции. В основе метода лежит свойство нейтронов отражаться от системы кристаллических плоскостей с интерференционным усилением отраженной интенсивности для определенных длин волн и углов рассеяния в соответствии с формулой Брэгга-Вульфа

$$2d\sin\frac{\theta}{2} = n\lambda, \quad (1.2.1.1)$$

где λ – длина волны нейтрона, d – межплоскостное расстояние кристаллической решетки, θ – угол рассеяния, n – порядок дифракции. Угол θ в этом методе может принимать значения от нескольких градусов до 180°.

Метод НД по своей реализации может подразделяться на метод порошковой дифракции, метод дифракции на монокристаллах. Оба из них могут быть реализованы на монохроматическом пучке нейтронов или на «белом» пучке с использованием метода времени пролета. Метод порошковой дифракции наиболее распространен в исследовательских нейтронных центрах. Образец представляет собой контейнер с исследуемым материалом, перетертый в мелкодисперсный порошок. Если метод НД реализуется на установке с постоянной длиной волны, то рассеянное излучение представляет собой конусообразные распределения с углом раствора 2θ .

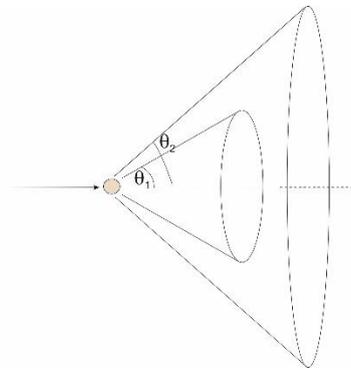


Рис. 1.2.1.1. Схематичное изображение структуры рассеянного излучения в методе порошковой дифракции при постоянной длине волны падающего излучения.

В силу неидеальной монохроматизации, конечного углового разрешения и других факторов, рассеянное излучение размыто по углу θ и сосредоточено внутри углового интервала $\theta \pm \Delta\theta$. Для регистрации интенсивности рассеянного излучения можно ставить детектирующие поверхности перекрывающие частично конусы рассеяния в большей или меньшей степени. Чем больше будет перекрыто детекторной системой рассеянное излучение по азимутальному углу, тем более светосильным будет данная установка, но тем более дорогой становится ее стоимость из-за размеров детекторной системы.

В случае белого пучка детектор может занимать положение, фиксированное по некоторому угловому интервалу $\Delta\theta$ и проводить сканирование рефлексов в шкале длин волн λ . В этом случае детекторная система может представлять собой кольцо из счетчиков, расположенное под углом рассеяния 90° .

Метод монокристалльной дифракции. Если основное назначение дифрактометра это изучение монокристаллов, то в этом случае угол рассеяния может оказаться произвольным и задача детекторной части такой установки – перекрыть как можно больше возможных направлений рассеяния. В этом случае создаются детекторы, покрывающие телесные углы, близкие к 4π . Таким образом, можно сделать вывод, что детекторные системы дифрактометров могут представлять собой очень громоздкие сооружения. Для проведения тестовых испытаний может идти речь о создании условий для тестирования отдельных элементов подобных детекторов. Но для этих элементов необходимо предусмотреть возможность их расположения под углом рассеяния от 0° до 180° .

Малоугловое рассеяние нейтронов (МУРН). Метод МУРН реализуется в аксиальной геометрии. Пучок коллимируется так называемыми pin-hole коллиматорами. Характер рассеянного пучка представляет собой распределение по углу θ в пределах $5^\circ \div 20^\circ$. По азимутальному углу в большинстве случаев рассеяние однородно, но бывают исключения, в случае изучения анизотропных молекул. Поэтому иногда возникает необходимость анализа распределения по азимутальному углу. Но это никак не сказывается на габаритных размерах детектора. Для метода МУРН считается достаточным детектор размерами в пределах $1000 \times 1000 \text{ мм}^2$ в плоскости перпендикулярной оси пучка, устанавливаемом на расстоянии от образца 2- 4 м.

В методе нейтронной рефлектометрии требования к детекторной системе полностью совпадают с методом МУРН.

Исходя из специфики применяемых методов рассеяния были сформулированы основные требования к ИК с точки зрения возможности проведения тестовых испытаний детекторов, разрабатываемых для указанных экспериментальных методик.

1. Возможность установки и размещения детекторных элементов под углами рассеяния от 5° до 175°
2. Возможность обеспечения перемещения детекторного элемента по высоте
3. Возможность обеспечения выбора расстояния образец – детектор от 1 м до 5 м.
4. Возможность обеспечения размещения дополнительного оборудования рядом с детектирующими элементами (источники питания, усилители и др.)
5. Возможность обеспечения подведения к любому из возможных положений детекторного элемента кабелей питания, сигнальных кабелей и т.д.
6. Возможность обеспечения подведения к любому из возможных положений детекторного элемента подачи газовой смеси для продувки детекторной камеры.
7. Система должна быть оснащена системой управления, позволяющей корректировать конфигурацию ИК дистанционно от управляющего компьютера.
8. Система должна вписываться в доступные габариты для размещения на 9-м канале реактора ИБР-2, не налагая ограничений на выполнение экспериментальных задач на рефлектометре РЕФЛЕКС, расположенном на этом же канале.

На основании сформулированных требований была спроектирована механическая система, которая может быть установлена на выведенном пучке 9-го канала импульсного реактора ИБР-2.

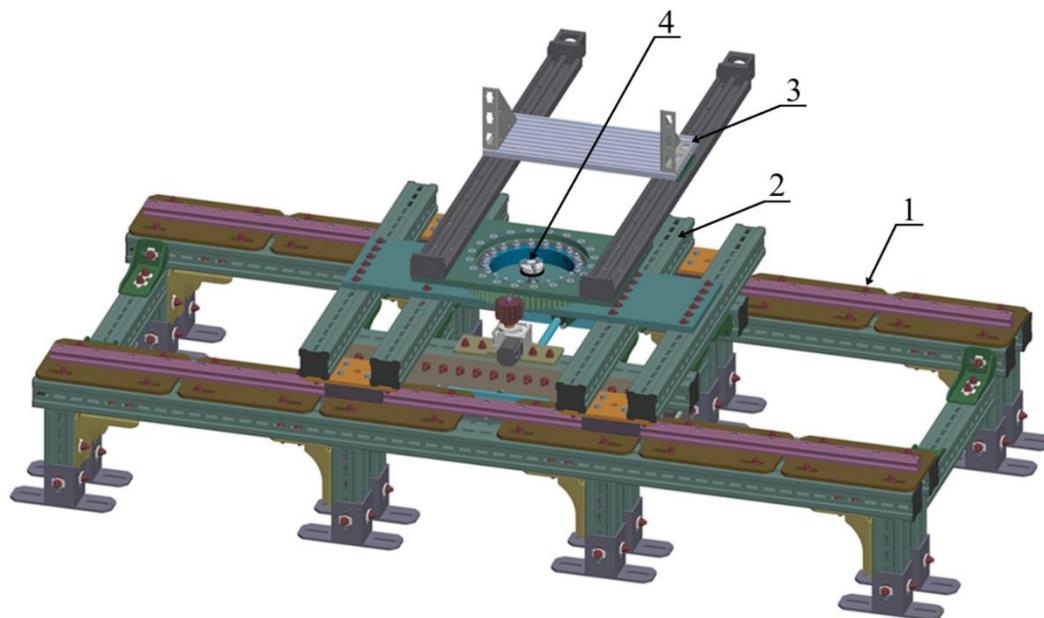


Рис. 1.2.1.2. Проект измерительного комплекса для размещения детекторного оборудования для проведения тестовых измерений с целью определения ее параметров и функциональности. Цифрами на рис. обозначены: 1 – основание с рельсовым путем, обеспечивающим перемещение вдоль оси выведенного пучка; 2 – поворотная платформа, позволяющая устанавливать детекторный элемент под требуемым углом рассеяния; 3 – платформа для монтажа детекторного элемента; 4 – место установки рассеивающего образца.

ИК представляет собой рельсовые направляющие, установленные на массивных основаниях, на которых устанавливается поворотный стол. В центре поворотного стола, на оси вращения предусмотрено место установки рассеивателя (имитатор изучаемого образца). На вращающейся платформе стола предусмотрена площадка для монтажа детекторного элемента. Детекторная

площадка может перемещаться ближе или дальше от рассеивателя в пределах 400 – 1400 мм. Таким образом, детекторный элемент может перемещаться вдоль оси пучка, вращаться относительно рассеивателя и менять расстояние между рассеивателем и детекторным элементом в пределах 1 м. Позиционирование изучаемого детекторного элемента по высоте относительно установочной площадки возможно с помощью дополнительных подставок. Наличие указанных степеней свободы позволяет имитировать работу детектора в любом из описанных выше базовых методов исследований с помощью рассеяния нейтронов. Таким образом, разрабатываемый комплекс поможет получать точные и полные характеристики новых детекторов или проводить проверки для настройки и отладки действующих детекторов на станциях нейтронного рассеяния.

На следующих этапах выполнения проекта начнётся изготовление и монтаж оборудования на планируемом месте эксплуатации, на 9м канале импульсного реактора ИБР-2.

Полученные результаты полностью соответствуют п. 1.2.1 Плана-Графика работ в рамках исполнения обязательств по Соглашению № 075-10-2025-153 от 05 июня 2025 г.

ПРИЛОЖЕНИЯ

- Конструкторская документация. ФАЙЛ: [ПГ 1.2.1 Конструкторская документация.pdf](#)

Работы, выполняемые за счет софинансирования из внебюджетных источников

1.2.2 Разработка блока электроники для регистрации сигнала с детектора на основе МКП с конвертером нейтронного излучения (совместно с НИЦ «Курчатовский институт» - ПИЯФ, Договор № 245-100-1/2025 от 08.08.2025 г.).

На первом этапе проекта была выполнена разработка блока электроники для регистрации сигнала с детектора на основе МКП с конвертером нейтронного излучения.

Цель выполнения работы: разработать и скомпоновать блок электроники для регистрации сигнала с детектора на основе МКП с конвертером нейтронного излучения.

Основное применение блока электроники — зарегистрировать и преобразовать электрические сигналы, получаемые с детекторов нейтронов при проведении научных исследований. Полученные сигналы необходимо видоизменить и представить в удобном для восприятия пользователя виде, например, в виде графиков или потока данных, отображаемых на экране компьютера.

Состав электронных изделий, применяемых для работы с сигналами и входящих в блок электроники, имеет определенный функционал, согласно которому подключаемые в определенном порядке изделия образуют единую систему регистрации сигналов с детектора нейтронов.

Ключевыми элементами блока электроники являются электронные компоненты для микроканальных пластин (металлокерамические детекторы DV50-8A и DV50-8P с микроканальными электронными усилителями МЭУО 50-8), а также комплект печатных плат, входящих в систему регистрации сигнала с детектора на основе МКП с конвертером нейтронного излучения: плата время-цифрового преобразователя RPV102.10, плата предусилителя CFD RPA350.01, плата линейного источника питания RV422.32, плата линии задержки.

Регистрация сигналов, поступающих с детектора нейтронов, осуществляется с использованием метода линии задержки. Координаты электронной лавины на аноде вычисляются с помощью преобразователя время-код (TDC) по разности времени прихода сигналов на концы линии задержки. Импульсы поступают из четырех каналов детектора (X1, X2, Y1, Y2). Общая схема блока электроники представлена на Рис. 1.2.2.1.

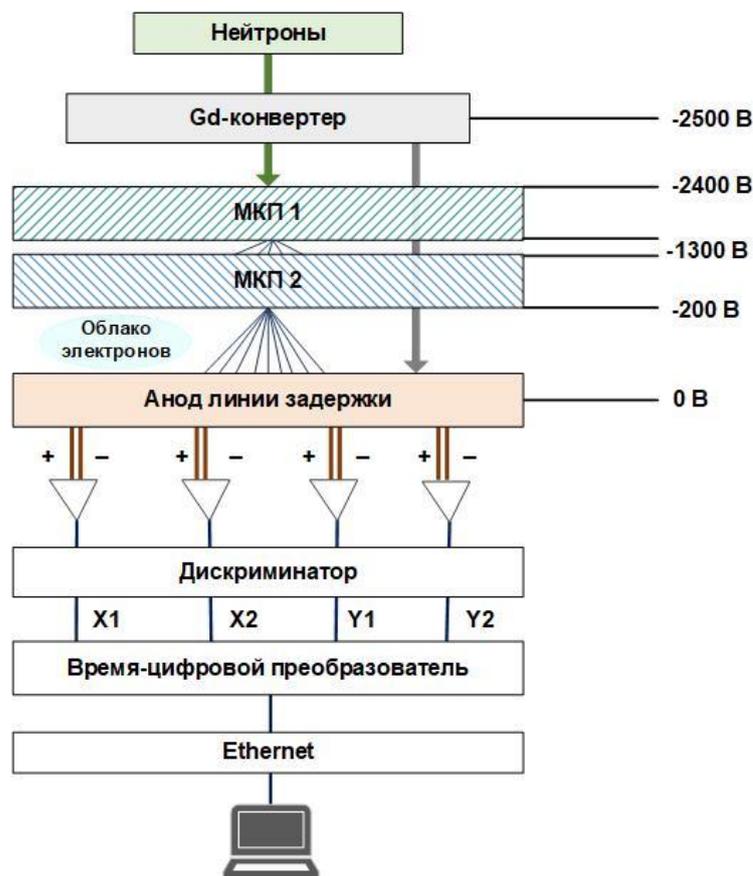


Рис. 1.2.2.1. Общая схема блока электроники. Подача напряжения: на Gd-конвертер -2500 В, на шевронной сборке МКП 1 – от -2400 В до -1300 В, на МКП 2 – от -1300 В до -200 В, на анод – 0 В. X1, X2, Y1, Y2 – каналы сбора информации

Для разработки и создания блока регистрирующей электроники на основании проведенных теоретических исследований были определены необходимые компоненты, а также разработаны схемы электронных печатных плат для сборки блока. Сборка осуществлялась с использованием приобретенной компонентной базы, а также электронных плат и корпусов.

1.2.2.1 Описание МКП в составе блока электроники

Основным компонентом, используемым в блоке электроники для регистрации сигнала, являются микроканальные пластины (МКП). Они используются в качестве детекторов фотонов и заряженных частиц уже много лет [62]. Технологии производства хорошо развиты, доступны коммерческие устройства с широким диапазоном активных областей, соотношений длины/диаметра канала, поверхностных покрытий и других свойств, определяющих производительность [63].

МКП — это устройство, состоящее из тонкой (0.5–1 мм) стеклянной пластины, содержащей компактное расположение параллельных микроканалов (рис. 1.2.2.2), поверхности которых специально обработаны для усиления вторичной электронной эмиссии. МКП демонстрируют быстрое временное разрешение (лучше 100 пс), что привело к их широкому использованию.

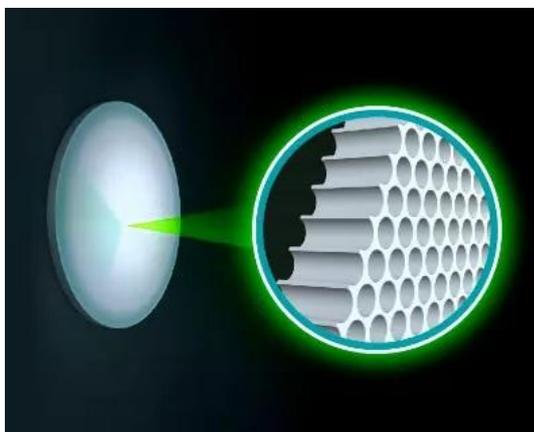


Рис. 1.2.2.2. Микрокапиллярная пластина с сеткой каналов.

Слои металлизации, обычно ~ 1500 Å из нихрома, покрывают переднюю и заднюю поверхности пластины и, когда высокое напряжение подается через устройство, МКП действует как электронный усилитель. В ответ на поглощение ионизирующей частицы или фотона на входе, на выходе создается импульс заряда.

Как правило, нейтронно-чувствительные МКП включают непосредственно в стекло поглощающий нейтроны ^{10}B и ^{nat}Gd в концентрациях, достаточных для регистрации нейтронов.

Каждый микроканал может действовать независимо, что позволяет рассматривать МКП как массив отдельных электронных умножителей. Одиночный МКП имеет коэффициент усиления заряда до 10^4 , но более высокие коэффициенты усиления (от 10^6 до 10^7) могут быть получены путем соединения двух (шевронных) или трех (Z-стек) блоков вместе. Например, описанный в [64] детектор состоит из Z-стека из трех МКП.

1.2.2.1.1 Принцип работы МКП

Механизм регистрации нейтронов включает реакцию конверсии нейтронов с ^{10}B или природным Gd в стекле МКП. Нейтроны могут поглощаться любым из изотопов ^{155}Gd или ^{157}Gd , испуская конверсионные электроны, а также гамма-лучи. Диапазон продуктов реакции заряженных частиц в стекле МКП составляет ~ 4 мкм (альфа-частицы), $\sim 2,5$ мкм (ядра лития) или ~ 10 мкм (конверсионные электроны). Это хорошо соответствует толщине стенки микроканала [65], поэтому электронный каскад в первом нейтронном преобразователе МКП обычно ограничен одним каналом, смежным с нейтронным взаимодействием или местом события (рис. 1.2.2.3).

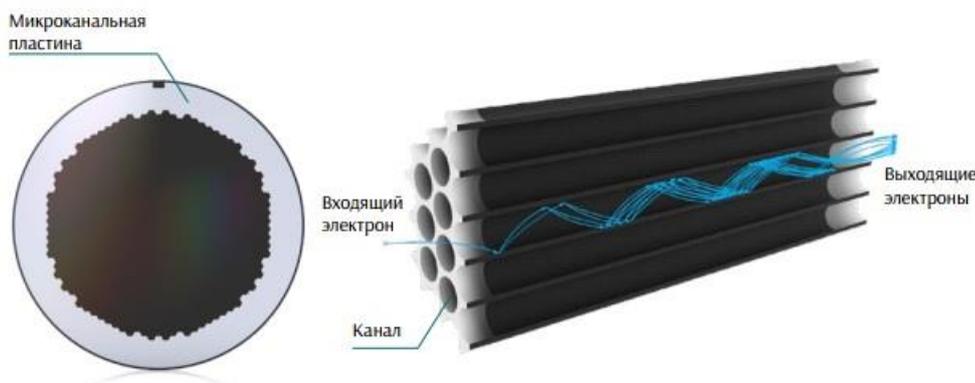


Рис. 1.2.2.3. Преобразование электронов в МКП.

Распространение заряда между пластинами расширяет лавину, охватывая несколько каналов во второй пластине. Нейтроны могут быть поглощены по всей массе нейтронно-чувствительной передней пластины, поэтому временное разрешение в МКП составляет порядка 1 мкс для тепловых нейтронов. Этот показатель можно улучшить, если разместить тонкие пленки (фольгу) с нанесенным конвертором с ^{10}B или природным Gd перед обычными МКП, с использованием электрических полей для доставки альфа-частиц или конверсионных электронов до МКП с последующей их регистрацией.

Следует отметить, что эффективность обнаружения тепловых нейтронов для МКП, покрытых $^{\text{nat}}\text{Gd}_2\text{O}_3$ и МКП легированных $^{\text{nat}}\text{Gd}$, согласно результатам моделирования Монте-Карло, показывают, что обе МКП могут достигать высокой эффективности обнаружения нейтронов 25,3 мэВ, составляющей около 70% и 60% соответственно [66]. Теоретические исследования по определению оптимального материала конвертера для нашей работы представлены в главе 1 данного Отчета.

В результате высоко локализованного зарядового выхода, МКП могут быть объединены со сложными схемами 2D считывания (например: линия задержки с перекрестными стрипами, поканальный съём с перекрестных стрипов, пиксельная система съёма и др.) для создания систем визуализации с высоким разрешением.

Детекторы на основе МКП могут использоваться в области ядерной физики — для исследования нейтронных потоков в реакторах и ускорителях, а также в медицинских целях — для нейтронной терапии и диагностики, для промышленного применения — неразрушающего контроля материалов и анализа их состава.

1.2.2.1.2 Преимущества и недостатки МКП

Преимущества детекторов на основе МКП:

- 1) Высокая чувствительность: МКП обеспечивает высокое усиление сигнала, что позволяет детектировать даже слабые потоки нейтронов.
- 2) Быстродействие: МКП способны регистрировать события с высокой временной разрешающей способностью — с точностью до наносекунд, что важно для экспериментов с импульсными источниками.
- 3) Компактность: детекторы на основе МКП значительно меньше традиционных сцинтилляционных или газовых детекторов, что делает их удобными для использования в различных условиях.

Недостатки детекторов на основе МКП:

- 1) Для эффективной работы детектора необходимо равномерное нанесение конверсионного материала на МКП, что требует сложных технологических процессов.
- 2) МКП чувствительны к гамма-излучению, что требует разработки методов подавления шумов.

1.2.2.1.3 Описание компонентов МКП для блока электроники

Для сборки блока электроники использовались два варианта металлокерамических детекторов открытого типа DV50-8A и DV50-8P на основе шевронной сборки двух микроканальных электронных усилителей в монолитном обрамлении МЭУО 50-8 (рис. 1.2.2.4).

Микроканальная пластина

Вставка с каналами

Монолитное обрамление

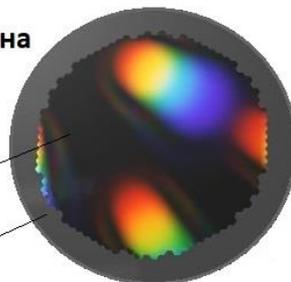


Рис. 1.2.2.4. Структура МКП в обрамлении.

Конструктивно детектор DV50-8А (рис. 1.2.2.5) состоит из сборки двух микроканальных электронных усилителей МЭУО 50-8, представляющих собой базовые МКП (микрокапиллярные слайды с вытравленными каналами), размещенные в монолитном обрамлении, и металлического анода. Напряжение на детектор с МКП подается через никелевые выводы длиной не менее 50 мм. Детектор предназначен для работы в вакууме при остаточном давлении не более $6,7 \cdot 10^{-4}$ Па ($5 \cdot 10^{-6}$ мм рт. ст.) в вакуумной системе с безмасляной откачкой.



Рис. 1.2.2.5. Детектор DV50-8А.

Технические характеристики детектора DV50-8А с МЭУО 50-8 представлены в таблице 1.2.2.1.

Таблица 1.2.2.1. Технические характеристики детектора DV50-8А

Наименование параметра, единица измерения	Значение не менее	Значение не более
Диаметр МЭУ, мм	49,8	50,0
Диаметр канала, мкм	10	11
Диаметр рабочей зоны, мм	41,5	-
Толщина, мм	0,47	0,53
Угол наклона каналов, градус	4	9
Шаг структуры, мкм		13
Напряжение питания при коэффициенте усиления 10^4 , В		1200
Напряжение питания при коэффициенте усиления $\geq 1 \cdot 10^7$, В		2400
Электрическое сопротивление при напряжении питания 800 В, Ом	$0,08 \cdot 10^8$	$1 \cdot 10^8$
Плотность темнового тока, А/см ²	-	$1 \cdot 10^{-13}$
Плотность скорости счёта темновых импульсов, имп/с·см ²		3
Предельно допустимое напряжение, В	-	1250
Коэффициент прозрачности ω	0,62	-

Одноэлектронное амплитудное разрешение, %		135
Ток проводимости сборки МЭУ при напряжении питания МЭУО 2000 В, мкА	10	150

Конструктивно детектор DV50-8P (рис. 1.2.2.6) состоит из шевронной сборки двух микроканальных электронных усилителей в монолитном обрамлении МЭУО 50–8 и люминесцентного экрана К – 67 желто–зелёного свечения на стеклянной подложке с длиной волны в максимуме спектральной характеристики 550 нм. Напряжение подаётся через никелевые выводы длиной не менее 50 мм. Детектор предназначен для работы в вакууме при остаточном давлении не более $6,7 \cdot 10^{-4}$ Па ($5 \cdot 10^{-6}$ мм рт. ст.) в вакуумной системе с безмасляной откачкой.



Рис. 1.2.2.6. Детектор DV50-8P.

Технические характеристики детектора DV50-8P с МЭУО 50-8 представлены в таблице 1.2.2.2.

Таблица 1.2.2.2. Технические характеристики детектора DV50-8A

Наименование параметра, единица измерения	Значение не менее	Значение не более
Диаметр МЭУ, мм	49,8	50,0
Диаметр канала, мкм	10	11
Диаметр рабочей зоны, мм	41,5	-
Толщина, мм	0,47	0,53
Угол наклона каналов, градус	4	9
Шаг структуры, мкм		13
Напряжение питания при коэффициенте усиления 10^4 , В		1200
Электрическое сопротивление при напряжении питания 800 В, Ом	$0,08 \cdot 10^8$	$1 \cdot 10^8$
Плотность темнового тока, А/см ²	-	$1 \cdot 10^{-13}$
Плотность скорости счёта темновых импульсов, имп/с·см ²		3
Предельно допустимое напряжение, В	-	1250
Коэффициент прозрачности ω	0,62	-
Коэффициент усиления при напряжении на сборке МЭУО ≤ -2400 В	$1 \cdot 10^7$	
Напряжение между выходом МЭУ 2 и экраном, В		3000

Ток проводимости сборки МЭУ при напряжении питания МЭУО 2000 В, мкА	10	150
---	----	-----

1.2.2.2 Описание печатных плат в составе блока электроники

В состав блока электроники включены печатные платы: плата время-цифрового преобразователя RPV102.10 (рис. 1.2.2.7), плата предусилителя-CFD RPA350.01 (рис. 1.2.2.8), плата линейного источника питания RV422.32 (рис. 1.2.2.9), плата линии задержки (рис. 1.2.2.10), образующие систему регистрации сигнала с детектора на основе МКП с конвертером нейтронного излучения.

Система регистрации блока электроники обеспечивает:

- Регистрацию временных задержек импульсов детектора на основе МКП;
- Декодирование и конверсию данных TDC-GPX в наносекунды;
- Валидацию событий по критериям попадания в рабочую область детектора;
- Передачу данных с помощью TCP-сервера;
- Визуализацию данных в реальном времени в виде гистограмм, 2D карт и 3D поверхностей и экспорт результатов в стандартные форматы (PNG, PDF, CSV).

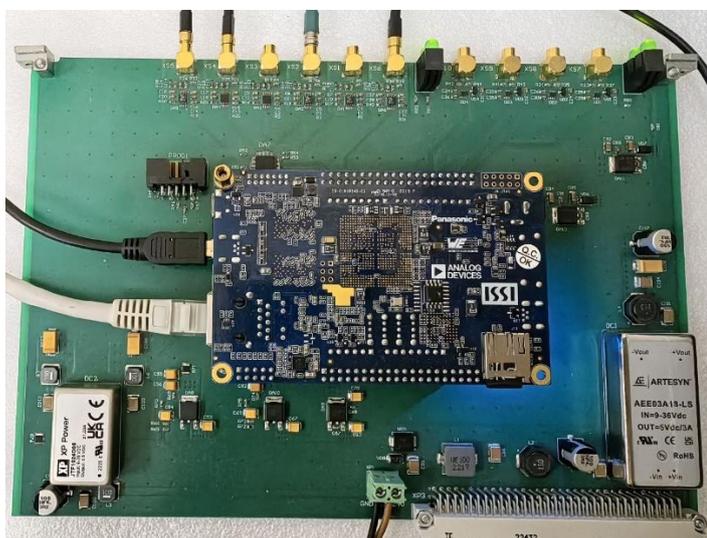


Рис. 1.2.2.7. Плата время-цифрового преобразователя RPV102.10.

Время-цифровой преобразователь (TDC-GPX) выполняет преобразование момента получения импульсов в цифровой код и работает в модуле FPGA программируемого устройства DE10-Nano.

DE10-Nano — это аппаратная платформа для разработки на базе FPGA, сочетающая встраиваемые ядра Cortex-A9 с программируемой логикой, что обеспечивает гибкость конфигурирования в сочетании с высокопроизводительной процессорной системой. Система реализована на кристалле Altera и объединяет аппаратную процессорную систему (HPS) на базе ARM, состоящую из процессора, периферийных устройств и интерфейсов памяти, связанных с FPGA посредством высокоскоростной соединительной магистрали. Программируемая плата DE10-Nano оснащена высокоскоростной памятью DDR3, аналого-цифровыми функциями, сетевым интерфейсом Ethernet и др.



Рис. 1.2.2.8. Плата предусилителя CFD RPA350.01.

Предусилитель усиливает и преобразовывает сигналы с детектора – импульс тока преобразовывается в импульс напряжения. Токковые сигналы необходимо преобразовать в напряжение и усилить, чтобы регистрирующие и анализирующие устройства среагировали на импульсы. На выходе предусилителя амплитуда сигнала определяется током, образованным ионизирующей частицей в детекторе.

На плате предусилителя размещается дискриминатор постоянной доли (CFD), применяемый для точного определения времени пика импульса, который пропорционален энергии регистрируемого события. Особенность такого типа дискриминатора заключается в том, что CFD фиксирует момент, когда импульс достигнет определенной доли своей пиковой амплитуды (например, 50%), вместо ожидания достижения импульсом определенного значения амплитуды (как в амплитудных дискриминаторах). Этот метод позволяет снизить зависимость времени регистрации от амплитуды импульса, что повышает точность измерения времени.



Рис. 1.2.2.9. Плата линейного источника питания RV422.32.

Линейный источник питания преобразует переменный ток (AC) из сети в регулируемое напряжение постоянного тока (DC). Таким образом устройство обеспечивает стабильное выходное

напряжение с минимальными пульсациями и электромагнитными помехами, что делает его подходящим для чувствительной к шумам электроники.

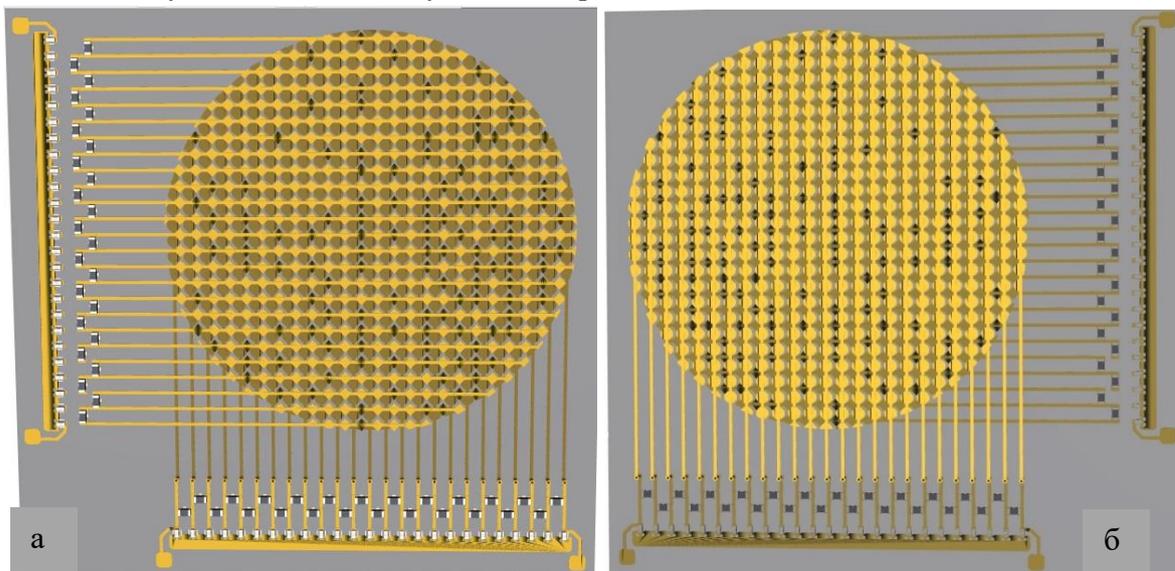


Рис. 1.2.2.10. Схема считывающего электрода: а – передняя сторона электрода, б – задняя сторона электрода

На Рис. 1.2.2.10 показана структура передней (а) и задней (б) сторон оптимизированного считывающего электрода. Стрипы, форма которых напоминает цепочку ромбов, нанесены медной печатью на плату FR4 толщиной 0,5 мм. Шаг полосок составляет 2 мм. Передняя сторона имеет гораздо меньшие контактные площадки, чтобы избежать электромагнитного экранирования обратной стороны и обеспечить равные амплитуды сигнала с обеих сторон считывающей платы. Ромбы передней стороны расположены в открытых областях между ромбами обратной стороны. Структуры перекрываются только в местах пересечения тонких полосок, соединяющих ромбы, что минимизирует емкостную связь между обеими сторонами платы. Полоски с каждой стороны соединены через LC-линию задержки с задержкой 2,5 нс на отвод. Линия задержки — это устройство, предназначенное для задержки электрических или электромагнитных сигналов на заданный промежуток времени.

Используемый метод съема сигналов на ЛЗ обеспечивает требуемое быстродействие при минимальном количестве регистрирующих каналов электроники. Регистрация событий осуществляется по схеме совпадений: первый пришедший сигнал является стартовым, запускающим TDC в режим ожидания («временные ворота») сигналов с X- и Y-каналов.

1.2.2.3 Описание системы регистрации сигнала с детектора

Для осуществления регистрации сигнала с детектора на основе МКП с конвертером нейтронного излучения в состав блока многоканальной электроники входит система регистрации и обработки данных с линиями задержки. Система представляет собой комплекс аппаратно-программных средств, включающий схему FPGA, TCP-сервер на ARM HPS устройства DE10-Nano и Windows-совместимый клиент для тестирования (рис. 1.2.2.11). Схема FPGA работает с внешними устройствами: модулем MAX V, выполняющим функции регистрации входящих импульсов, и микросхемой TDC-GPX, выполняющей преобразование момента получения импульсов в цифровой код.

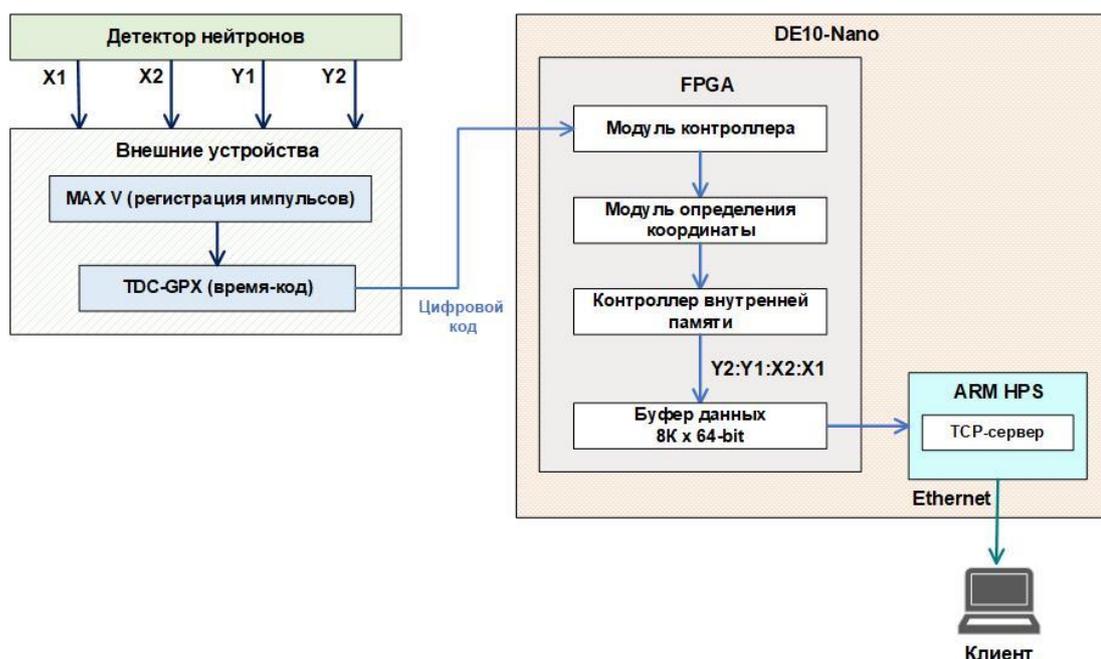


Рис. 1.2.2.11. Схема системы регистрации сигнала.

Система регистрации сигнала состоит из следующих функциональных блоков:

- *Модуль контроллера FPGA*: управляет внешними устройствами (MAX V и TDC-GPX), генерирует управляющие сигналы и контролирует временные параметры работы.
- *Модуль определения координаты*: преобразует цифровой код TDC-GPX в координаты события, применяет алгоритмы фильтрации данных по временному окну и сумме задержек.
- *Контроллер внутренней памяти*: обеспечивает обмен данными между ARM и FPGA через интерфейс с разделяемой памятью. Взаимодействие между ARM HPS и FPGA осуществляется через регистры, отображенные в память. Для доступа из программы на ARM используется отображение физической памяти в виртуальное адресное пространство.
- *Буфер данных*: хранит зарегистрированные события (глубина 8192 записи), организован по принципу кольцевой очереди для обеспечения непрерывной работы. Чтение нескольких записей из буфера за одну операцию существенно повышает производительность.
- *TCP-сервер*: предоставляет собой сетевой интерфейс для управления системой и получения данных, функционирует на ARM процессоре устройства DE10-Nano. Сервер запускается автоматически при старте системы.
- *Windows-клиент*: обеспечивает интерфейс пользователя для настройки, управления и отображения данных системы.

Функциональные возможности системы:

- 1) Регистрация временных задержек импульсов детектора с разрешением ~82 пс.
- 2) Декодирование и конверсия данных TDC-GPX из единиц TDC в наносекунды.
- 3) Валидация событий по критериям попадания в рабочую область детектора.
- 4) Передача данных по сети TCP/IP.
- 5) Визуализация в реальном времени в виде гистограмм, 2D карт и 3D поверхностей.
- 6) Коррекция нелинейности TDC-GPX для повышения точности измерений.
- 7) Экспорт результатов в стандартные форматы (PNG, PDF, CSV).

Регистрация поступающих сигналов с детектора на основе МКП осуществляется согласно следующему алгоритму:

1. Регистрация события:

- детектор с МКП регистрирует попадание нейтрона;
- генерируются импульсы на четырёх каналах (X1, X2, Y1, Y2).

2. Формирование стартового сигнала:

- модуль MAX V регистрирует импульсы;
- формируется стартовый сигнал для TDC-GPX.

3. Измерение временных задержек:

- TDC-GPX измеряет временные интервалы между стартовым сигналом и импульсами каждого канала;
- преобразование в цифровые коды с разрешением ~82 пс.

4. Обработка на FPGA:

- считывание данных из TDC-GPX;
- декодирование каналов;
- конверсия значений;
- валидация событий;
- формирование 64-битных пакетов данных;
- запись в кольцевой буфер SRAM.

5. Передача данных:

- ARM-процессор считывает события из буфера;
- передача клиенту по TCP/IP блоками по 1024 события.

6. Визуализация:

- накопление данных;
- применение коррекции нелинейности TDC-GPX;
- отображение в виде гистограмм, 2D карт или 3D поверхностей.

Декодирование каналов детектора и конверсия временных кодов TDC-GPX в координаты событий в наносекундах с валидацией осуществляется в соответствии с формулой конверсии (1.2.2.1):

$$t = \alpha \cdot n - t_0, \quad (1.2.2.1)$$

где n – временной код от TDC-GPX (единица ≈ 82 пс), α – коэффициент конверсии единицы TDC \rightarrow наносекунды, t_0 – start-offset, t – время задержки в наносекундах.

Проверка попадания координат в рабочую область детектора осуществляется по формулам (1.2.2.2):

$$\begin{aligned} X_1, X_2 &\in [0, G] \\ Y_1, Y_2 &\in [0, G] \end{aligned} \quad (1.2.2.2)$$

где $G = g \cdot 20$ нс, g – параметр gate из регистра CONTROL.

Программное обеспечение системы регистрации сигнала

Для управления системой регистрации сигнала блока электроники разработано клиентское программное обеспечение (ПО) – многостраничный интерфейс со вкладками для визуализации (рис. 1.2.2.12), осуществляющее: подключение к серверу FPGA по TCP, управление измерениями (запуск, остановка), управление параметрами сбора данных, отображение данных в режиме реального времени (гистограммы, 2D карты, 3D поверхности), сохранение результатов в различных форматах, мониторинг состояния системы.

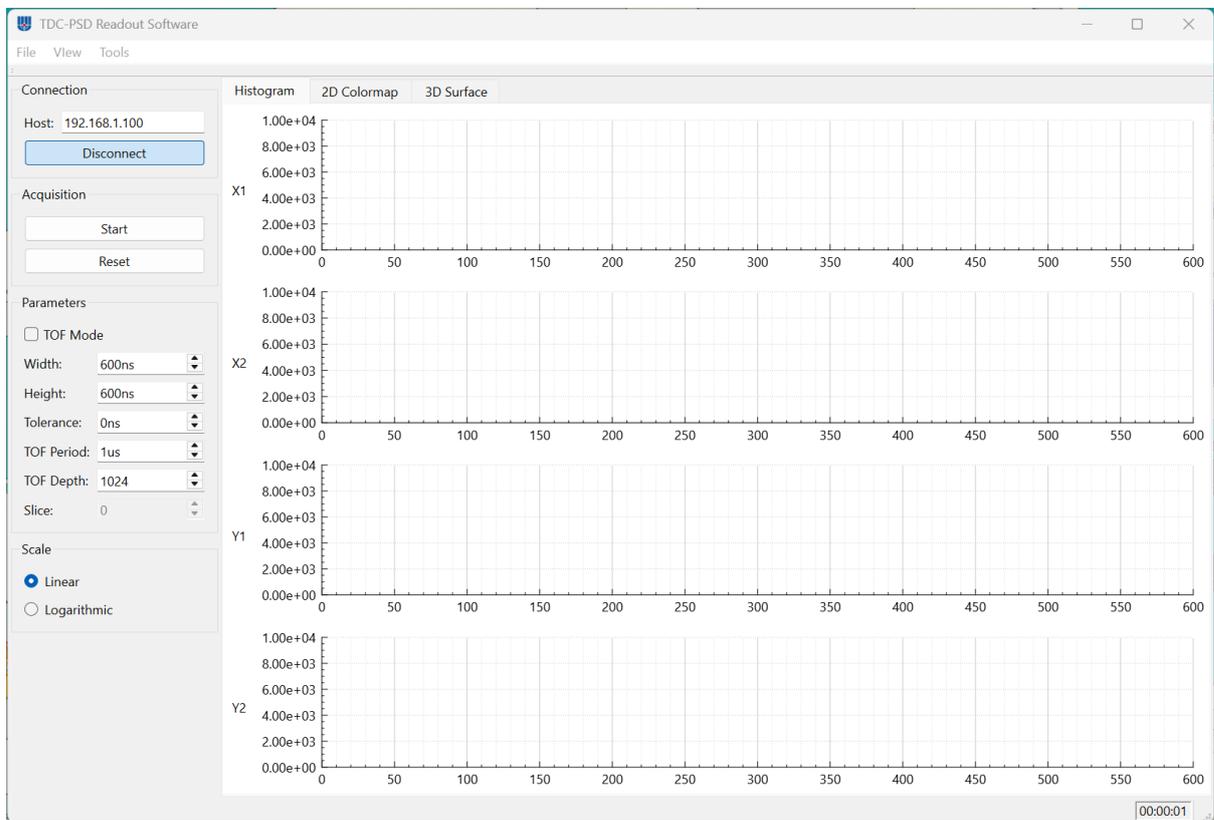


Рис. 1.2.2.12. Главное окно клиентского программного обеспечения.

Интерфейс ПО состоит из следующих основных элементов:

1) Секция Connection:

- поле ввода IP-адреса сервера;
- кнопка Connect/Disconnect;
- индикатор состояния подключения.

2) Секция Acquisition:

- Start/Stop – запуск/остановка регистрации;
- Clear – сброс FPGA и очистка данных.

3) Секция Parameters:

- Gate – длительность временного окна (100–600);
- Tolerance – допуск для sum check (1–100);
- TOF Mode: переключение режима Classic/TOF;
- TOF Period: период дискретизации (1–127 мкс);
- TOF Depth: максимальное значение счётчика (64–4095);
- Slice Selector: выбор отображаемого среза (TOF режим).

Режимы работы ПО:

1) Классический режим (Classic) – все события накапливаются в единое 2D изображение.

Применение: регистрация распределений, накопление статистики, получение картины распределения нейтронов.

2) Режим TOF (Time-of-Flight) – события разделяются по временным срезам. Применение: исследование энергетического спектра нейтронов.

Визуализация данных:

- вкладка Histogram – гистограммы для каналов X1, X2, Y1, Y2 (рис. 1.2.2.12) с использованием линейной или логарифмической шкалы, автомасштабирование осей;
- вкладка 2D Colormap – двумерная цветовая карта данных (рис. 1.2.2.13);
- вкладка 3D Surface – трехмерная визуализация распределения событий (рис. 1.2.2.14);
- экспорт изображений в PNG, PDF, CSV.

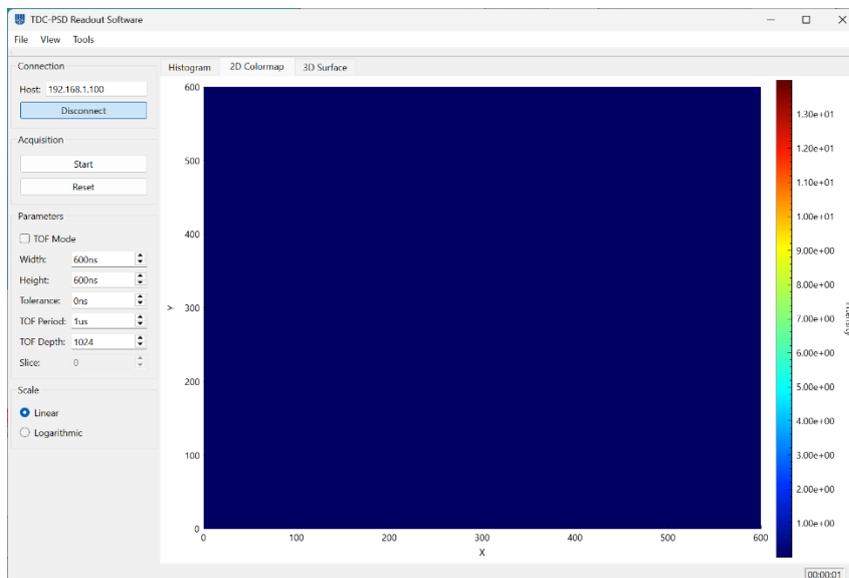


Рис. 1.2.2.13. Окно двумерной цветовой карты данных.

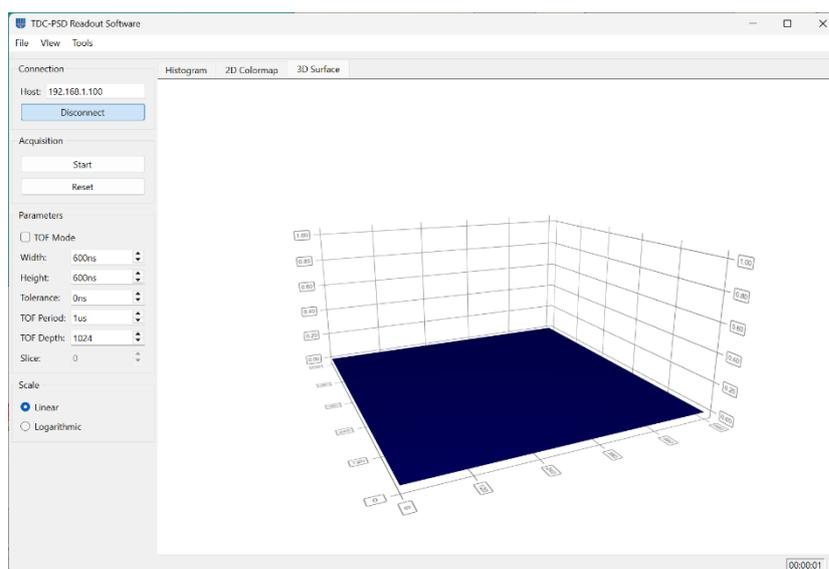


Рис. 1.2.2.14. Окно трехмерной визуализации данных.

Для проверки работоспособности блока электроники для регистрации сигнала с детектора на основе МКП был проведен тест, демонстрирующий пространственное распределение частиц в детекторе. Для отображения равномерного распределения частиц в области регистрации, были поданы импульсы с генератора с равным промежутком времени. Программа отобразила гистограмму с распределением координат по осям X и Y, демонстрирующую нелинейность (рис. 1.2.2.15). В результате обработки входящих импульсов модулем TDC, сигналы отображаются с погрешностью, для устранения которой требуется провести калибровку согласно определенному алгоритму.

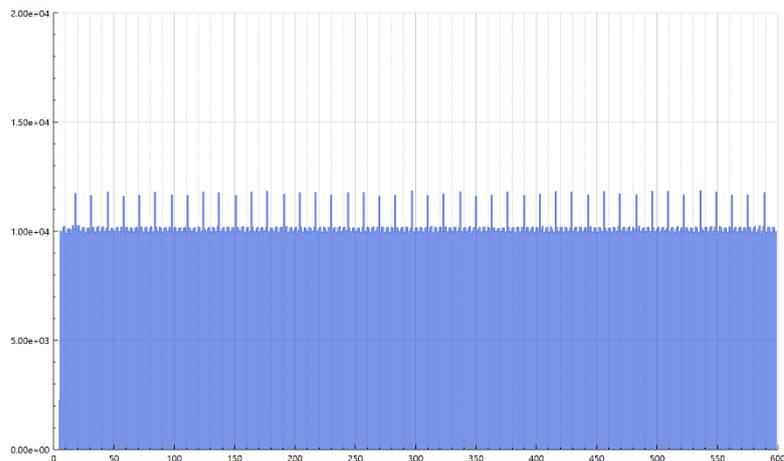


Рис. 1.2.2.15. Гистограмма сигнала до калибровки

После проведения калибровки сигналов была получена дифференциальная нелинейность, и распределение данных на гистограмме стало равномерным, что и предполагалось изначально при подаче стартовых импульсов. Гистограмма, полученная в результате обработки сигналов, представлена на Рис. 1.2.2.16. Проведенный тест демонстрирует работоспособность блока электроники и возможность его использования для регистрации сигналов с детектора с использованием специального программного обеспечения.

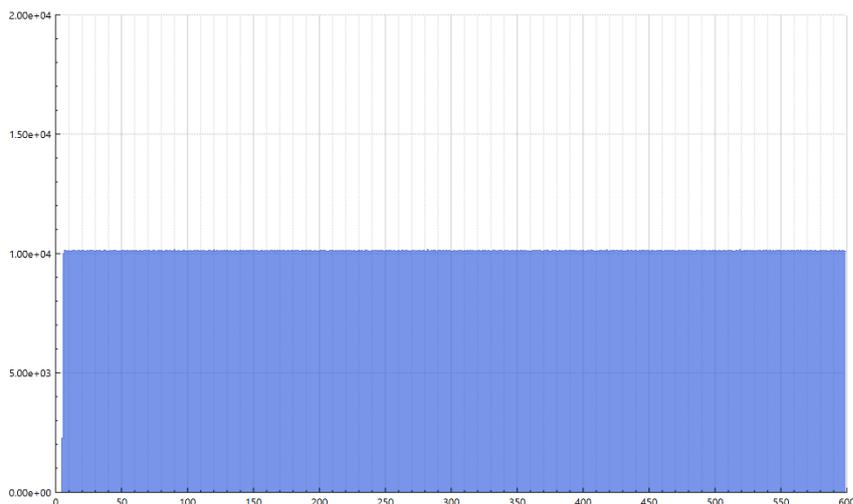


Рис. 1.2.2.16. Гистограмма сигнала после калибровки

Полученные результаты полностью соответствуют п. 1.2.2 Плана-Графика работ в рамках исполнения обязательств по Соглашению № 075-10-2025-153 от 05 июня 2025 г.

ПРИЛОЖЕНИЯ

- Отчет о выполненных работах. ФАЙЛ: [ПГ 1.2.2 Отчет о выполненных работах.pdf](#)

1.2.3 Развитие опытно-экспериментального участка (ОЭУ) по нанесению тонкоплёночных борсодержающих покрытий (часть 1).

За прошлые годы в рамках работ по проекту «Разработка и создание элементов экспериментальных станций на источниках нейтронов импульсного или постоянного типа»,

выполнявшемуся по Соглашению о предоставлении из Федерального бюджета гранта в форме субсидии от 13 октября 2021 г. № 075-10-2021-115 на базе Научно-экспериментального отдела комплекса спектрометров ИБР-2 Лаборатории нейтронной физики Объединённого института ядерных исследований был создан Опытно-экспериментальный участок (ОЭУ) по нанесению тонкоплёночных бор содержащих покрытий. Целью данной работы являлось создание участка по исследованию, созданию прототипов детекторных элементов на основе тонких слоев бор содержащих соединений для экспериментальных станций на источниках нейтронов, а также проведения обучения и практикумов по полному циклу производства элементов экспериментальных станций.

Данный ОЭУ в настоящее время выполняет следующие задачи:

- Обработка методик и технологий по нанесению борсодержащих покрытий;
- Создание прототипов устройств (прототипов детекторов, монохроматоров, коллиматоров и других устройств нейтронных спектрометров);
- Исследование и характеристика борсодержащих покрытий и устройств на их основе;
- Проведение практических и лабораторных работ по созданию детекторов нейтронов.

Для решения поставленной задачи было выделено помещение 102 корпуса 119 площадки ЛЯП ОИЯИ площадью 550 м². Согласно архитектурному решению предложено разделение данного пространства на 5 комнат: вентиляционная, участок хранения материалов и комплектующих, цех сборки и механообработки, участок вакуумного напыления и сборки детекторов и участок тестирования детекторов.

Вентиляционная комната является технической комнатой с ограниченным доступом обслуживающего персонала и предназначена для размещения вентиляционного оборудования корпуса 119 и остальных комнат ОЭУ. Также в данной комнате размещаются силовые щиты электропитания ОЭУ и компрессор для обеспечения сжатым воздухом механического цеха и напылительной установки.

Участок хранения материалов и комплектующих предназначен для хранения материалов для детекторов, коллиматоров и других изготавливаемых устройств. Также он используется для временного хранения покупной продукции или элементов, изготовленных внешними подрядчиками. В этой зоне планируется разместить также место хранения готовых устройств или прототипов перед установкой на нейтронные источники.

В цехе сборки и механообработки производятся монтажные работы по сборке устройств, слесарная обработка, изготовление деталей с помощью фрезерной и токарной обработки, шлифовки, выполнение первичной подготовки подложек для напыления, раскрой листового материала.

Участок вакуумного напыления и сборки детекторов содержит в себе чистую зону с пониженным содержанием пыли в воздухе. В данном помещении размещены магнетронная напылительная установка, станки для создания строу-детекторов, станки для намотки рамок детекторов, устройства контроля магнетронов и напыленных образцов.

Участок тестирования детектора – комната, на которую получен санитарный сертификат, позволяющий проводить работы с закрытыми источниками ионизирующих излучений. На участке располагается стенд для проверки детекторов и электроники. Здесь размещаются контейнеры с изотопным источником нейтронов ²⁵²Cf, источник электронов ⁹⁰Sr и гамма-излучения ⁵⁵Fe.

В рамках текущего проекта «Развитие аппаратно-методической базы для решения научных и прикладных задач на источниках нейтронов разного типа» (Соглашение от 5 июня 2025 г. № 075-10-2025-153) было принято решение провести ремонтные работы в помещении механообработки.

При создании данного помещения в 2021-2024 гг. из-за экономии средств было принято решение не проводить финишную обработку верхних частей стен и потолков. Это не влияло на возможность принятия данного помещения в эксплуатацию и проведения работ в ней. В рамках проекта было принято решение завершить отделку помещения полностью.

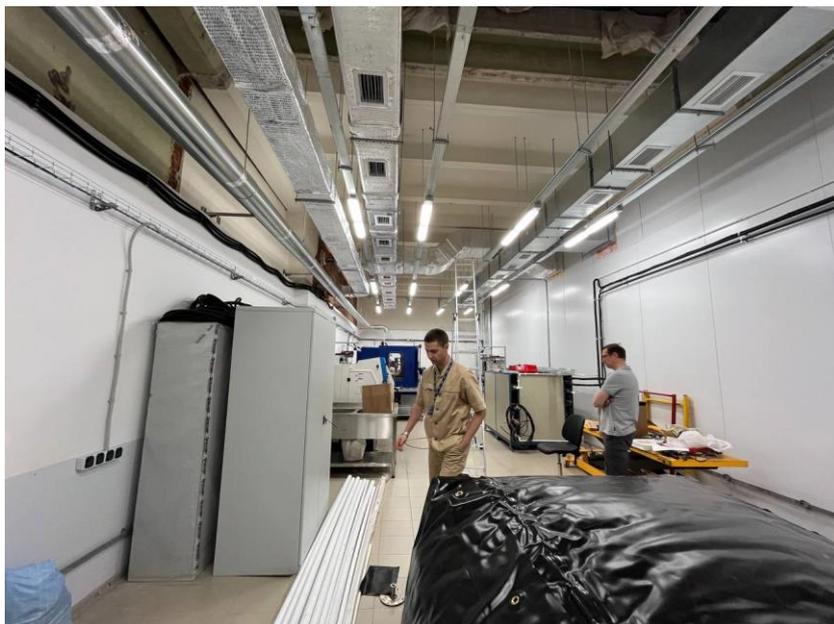


Рис. 1.2.3.1. Состояние помещения механической обработки ОЭУ до проведения ремонтных работ и после. На левом снимке видно отсутствие облицовки верхних частей стен и потолка. На правом снимке видно новый облик помещения после проведения ремонтных работ

Потолок выполнен в виде подвесного потолка грильято. Это позволило полностью сохранить воздухообмен в помещении и в то же время значительно улучшило внешний вид.

После запуска ОЭУ в эксплуатацию встал вопрос о комнате для персонала, задействованного в работах, проводимых в ОЭУ. Распоряжением дирекции ЛНФ ОИЯИ (Распоряжение № 101 от 25.07.2025) в структуру ОЭУ было выделено отдельное помещение (пом. 109, зд. 119 ЛНФ ОИЯИ), расположенное рядом с ОЭУ для оборудования там офисного помещения для установки рабочих мест для персонала, непосредственно задействованного в эксплуатации оборудования ОЭУ. Важность решения этого вопроса обусловлена также и тем, что часть оборудования во время эксплуатации является сильношумящим (насосы, компрессоры, чиллеры и др.) и длительное нахождение рядом с ним нежелательно. Отдельными технологическими, измерительными процессами можно управлять удаленно из помещения, изолированного непосредственно от работающего оборудования. Ремонтные работы в пом. 109 были успешно выполнены, комната передана для персонала ОЭУ.



Рис. 1.2.3.2. Комната для персонала ОЭУ до ремонта (верхние два изображения) и после (нижние два изображения).

Полученные результаты полностью соответствуют п. 1.2.3 Плана-Графика работ в рамках исполнения обязательств по Соглашению № 075-10-2025-153 от 05 июня 2025 г.

ПРИЛОЖЕНИЯ

- Акты и документация на поставку. ФАЙЛ: [ПГ 1.2.3 Акты и документация на поставку.pdf](#)

1.2.4 Изготовление блока электроники для регистрации сигнала с детектора на основе МКП с конвертером нейтронного излучения (совместно с НИЦ «Курчатовский институт» - ПИЯФ, Договор № 245-100-1/2025 от 08.08.2025 г.).

На первом этапе проекта проводились работы, направленные на изготовление блока электроники для регистрации сигнала с детектора на основе МКП с конвертером нейтронного излучения. На софинансирование данных работ направлены средства из внебюджетных источников.

Цель выполнения работы: изготовить блок электроники для регистрации сигнала с детектора на основе МКП с конвертером нейтронного излучения с использованием специально приобретенных для изготовления оборудования и комплектующих.

В рамках исполнения данной части проекта были приобретены комплектующие и оборудование, предназначенные для изготовления блока электроники, а также для создания исследовательского стенда для проверки работоспособности блока электроники.

В результате выполнения работ была осуществлена закупка оборудования и комплектующих на основании договоров заказчика НИЦ «Курчатовский институт» - ПИЯФ с поставщиками:

- ООО «ЭРСТВАК», договор №0623 от 03.10.2025 г.
- ООО «Витал Электроникс», договор №12/2025/0642 от 02.10.2025 г.

Полученные результаты полностью соответствуют п. 1.2.4 Плана-Графика работ в рамках исполнения обязательств по Соглашению № 075-10-2025-153 от 05 июня 2025 г.

ПРИЛОЖЕНИЯ

- Акты выполненных работ. ФАЙЛ: [ПГ 1.2.4 Акты выполненных работ.pdf](#)
- Акт изготовления. ФАЙЛ: [ПГ 1.2.4 Акт изготовления.pdf](#)
- Документация на поставку ОМК. ФАЙЛ: [ПГ 1.2.4 Документация на поставку ОМК.pdf](#)

1.3 Мероприятия по подготовке 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.

Работы, выполняемые за счет финансирования из средств гранта

1.3.1 Разработка и реализация в 2025 г. дополнительной образовательной программы повышения квалификации для научных сотрудников, направленной на создание прорывных технологических решений с применением синхротронных и нейтронных источников: «Методы исследований конденсированных сред с помощью рассеяния нейтронов» (совместно с Государственным университетом «Дубна», Договор № 400-04902 от 06.08.2025 г.).

Дополнительная образовательная программа повышения квалификации для научных сотрудников, направленная на создание прорывных технологических решений с применением синхротронных и нейтронных источников, «Методы исследований конденсированных сред с помощью рассеяния нейтронов», разработана коллективом авторов из числа сотрудников государственного университета «Дубна» и ОИЯИ и утверждена учебно-методическим советом (протокол №19 от 11.09.2025 г.).

Авторы:

- Авдеев Михаил Васильевич, доктор физ.-мат. наук, начальник сектора нейтронной оптики НЭОНИКС, ЛНФ ОИЯИ
- Андреев Олег Александрович, кандидат техн. наук, доцент кафедры проектирования электроники для установок «мегасайенс», Государственный университет «Дубна», старший научный сотрудник, АО «Акустический институт имени академика Н.Н. Андреева»
- Боднарчук Виктор Иванович, кандидат физ.-мат. наук, начальник Научно-экспериментального отдела комплекса спектрометров ИБР-2, ЛНФ ОИЯИ

– Булавин Максим Викторович, кандидат физ.-мат. наук, начальник сектора нового источника и комплекса замедлителей, ЛНФ ОИЯИ

– Жакетов Владимир Дмитриевич, канд. физ.-мат. наук, научный сотрудник научно-экспериментального отдела нейтронных исследований конденсированных сред, ЛНФ ОИЯИ

– Немченко Игорь Борисович, доктор техн. наук, и.о. проректора по научной деятельности и инновациям, заведующий кафедры нанотехнологий и новых материалов, Государственный университет «Дубна»

– Петрова Мария Олеговна, младший научный сотрудник научно-экспериментального отдела комплекса спектрометров ИБР-2, ЛНФ ОИЯИ

– Стрекаловский Олег Викторович, канд. техн. наук, доцент кафедры проектирования электроники для установок «мегасайенс», Государственный университет «Дубна», ведущий инженер, ЛЯР ОИЯИ

Программа реализована следующими преподавателями:

– Авдеев Михаил Васильевич, доктор физ.-мат. наук, начальник сектора нейтронной оптики НЭОНИКС, ЛНФ ОИЯИ

– Андреев Олег Александрович, кандидат техн. наук, доцент кафедры проектирования электроники для установок «мегасайенс», Государственный университет «Дубна», старший научный сотрудник, АО «Акустический институт имени академика Н.Н. Андреева»

– Боднарчук Виктор Иванович, кандидат физ.-мат. наук, начальник Научно-экспериментального отдела комплекса спектрометров ИБР-2, ЛНФ ОИЯИ

– Булавин Максим Викторович, кандидат физ.-мат. наук, начальник сектора нового источника и комплекса замедлителей, ЛНФ ОИЯИ

– Жакетов Владимир Дмитриевич, канд. физ.-мат. наук, научный сотрудник научно-экспериментального отдела нейтронных исследований конденсированных сред, ЛНФ ОИЯИ

– Немченко Игорь Борисович, доктор техн. наук, и.о. проректора по научной деятельности и инновациям, заведующий кафедры нанотехнологий и новых материалов, Государственный университет «Дубна»

– Петрова Мария Олеговна, младший научный сотрудник научно-экспериментального отдела комплекса спектрометров ИБР-2, ЛНФ ОИЯИ

– Стрекаловский Олег Викторович, канд. техн. наук, доцент кафедры проектирования электроники для установок «мегасайенс», Государственный университет «Дубна», ведущий инженер, ЛЯР ОИЯИ

Целью реализации программы является – изучение передового опыта, закрепление теоретических знаний, приобретение практических умений и навыков в области нейтронных детекторов, прикладных исследований нейтронной физики, проектирования приборов для проведения и автоматизации экспериментов в области нейтронной физики.

Программа разработана для повышения квалификации научных сотрудников и направлена на создание прорывных технологических решений с применением синхротронных и нейтронных источников.

Приказом №2697к от 24 октября 2025 г. организован курс повышения квалификации с 27.10.2025 г. по 21.11.2025 г. по дополнительной профессиональной программе повышения квалификации «Методы исследований конденсированных сред с помощью рассеяния нейтронов» в объёме 72 часа, утверждён календарно-учебный график (расписание) занятий, и зачислены 6 слушателей на места, финансируемые за счёт средств гранта в форме субсидии. После окончания

обучения слушатели прошли итоговую аттестацию, получили удостоверения о повышении квалификации и были отчислены приказом №2952к от 21.11.2025 г.

Полученные результаты полностью соответствуют п. 1.3.1 Плана-Графика работ в рамках исполнения обязательств по Соглашению № 075-10-2025-153 от 05 июня 2025 г.

ПРИЛОЖЕНИЯ

- ДОППК Методы исследований КС с помощью рассеяния нейтронов. ФАЙЛ: [ПГ 1.3.1 ДОППК Методы исследований КС с помощью рассеяния нейтронов.pdf](#)
- Приказ о зачислении слушателей. ФАЙЛ: [ПГ 1.3.1 Приказ о зачислении слушателей.pdf](#)
- Аттестация слушателей. ФАЙЛ: [ПГ 1.3.1 Аттестация слушателей.pdf](#)

1.3.2 Разработка и реализация в 2025 г. дополнительной образовательной программы повышения квалификации «Автоматизация экспериментов в области нейтронной физики» для специалистов в области разработки, проектирования, строительства и технической эксплуатации с прохождением итоговой аттестации (совместно с Государственным университетом «Дубна», Договор № 400-04902 от 06.08.2025 г.).

Дополнительная образовательная программа повышения квалификации «Автоматизация экспериментов в области нейтронной физики» для специалистов в области разработки, проектирования, строительства и технической эксплуатации разработана коллективом авторов из числа сотрудников государственного университета «Дубна» и ОИЯИ и утверждена учебно-методическим советом (протокол №19 от 11.09.2025 г.).

Авторы:

- Боднарчук Виктор Иванович – доцент кафедры ядерной физики, начальник Научно-экспериментального отдела комплекса спектрометров ИБР-2, кандидат физ.-мат. наук;
- Пискунова Оксана Ивановна – доцент кафедры проектирования электроники для установок «мегасайенс», директор Инженерно-физического института, кандидат техн. наук;
- Алтынов Алексей Владимирович – старший инженер, ЛНФ ОИЯИ;
- Зернин Николай Дмитриевич – инженер, ЛНФ ОИЯИ;
- Кирилов Андрей Сергеевич – начальник группы ЛНФ ОИЯИ, канд. физ.-мат. наук;
- Мурашкевич Светлана Маратовна – инженер-программист 1 категории, ЛНФ ОИЯИ;
- Садилов Валентин Викторович – научный сотрудник ЛНФ ОИЯИ, кандидат физ.-мат. наук;
- Черников Александр Николаевич – начальник группы ЛНФ ОИЯИ;
- Яковлев Константин Борисович – инженер ЛНФ ОИЯИ.

Программа реализована следующими преподавателями:

- Боднарчук Виктор Иванович – доцент кафедры ядерной физики, начальник Научно-экспериментального отдела комплекса спектрометров ИБР-2, кандидат физ.-мат. наук;
- Пискунова Оксана Ивановна – доцент кафедры проектирования электроники для установок «мегасайенс», директор Инженерно-физического института, кандидат тех. наук;
- Алтынов Алексей Владимирович – старший инженер, ЛНФ ОИЯИ;
- Зернин Николай Дмитриевич – инженер, ЛНФ ОИЯИ;
- Кирилов Андрей Сергеевич – начальник группы ЛНФ ОИЯИ, канд. физ.-мат. наук;
- Мурашкевич Светлана Маратовна – инженер-программист 1 категории, ЛНФ ОИЯИ;

– Садилов Валентин Викторович – научный сотрудник ЛНФ ОИЯИ, кандидат физ.-мат. наук;

– Черников Александр Николаевич – начальник группы ЛНФ ОИЯИ;

– Яковлев Константин Борисович – инженер ЛНФ ОИЯИ.

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.

Программа предназначена для специалистов в области разработки, проектирования, строительства и технической эксплуатации синхротронных и нейтронных источников.

Приказом №2616к от 17 октября 2025 г. организован курс повышения квалификации с 20.10.2025 г. по 14.11.2025 г. по дополнительной профессиональной программе повышения квалификации «Автоматизация экспериментов в области нейтронной физики» в объёме 72 часа, утверждён календарно-учебный график (расписание) занятий, и зачислены 18 слушателей на места, финансируемые за счёт средств гранта в форме субсидии. После окончания обучения слушатели прошли итоговую аттестацию, получили удостоверения о повышении квалификации и были отчислены приказом №2877к от 14.11.2025 г.

Полученные результаты полностью соответствуют п. 1.3.2 Плана-Графика работ в рамках исполнения обязательств по Соглашению № 075-10-2025-153 от 05 июня 2025 г.

ПРИЛОЖЕНИЯ

- ДОППК Методы исследований КС с помощью рассеяния нейтронов. ФАЙЛ: [ПГ 1.3.2 ДОППК Методы исследований КС с помощью рассеяния нейтронов.pdf](#)
- Приказ о зачислении слушателей. ФАЙЛ: [ПГ 1.3.2 Приказ о зачислении слушателей.pdf](#)
- Приказ об отчислении слушателей. ФАЙЛ: [ПГ 1.3.2 Приказ об отчислении слушателей.pdf](#)

1.3.3 Проведение итоговой аттестации по 2 дополнительным образовательным программам повышения квалификации: «Методы исследований конденсированных сред с помощью рассеяния нейтронов»; «Автоматизация экспериментов в области нейтронной физики» с выдачей удостоверений о повышении квалификации по каждой программе (совместно с Государственным университетом «Дубна», Договор № 400-04902 от 06.08.2025 г.).

Итоговая аттестация по 2 дополнительным образовательным программам повышения квалификации: «Методы исследований конденсированных сред с помощью рассеяния нейтронов» и «Автоматизация экспериментов в области нейтронной физики» состоялась, соответственно, 21.11.2025 г. и 14.11.2025 г. в государственном университете «Дубна».

Полученные результаты полностью соответствуют п. 1.3.3 Плана-Графика работ в рамках исполнения обязательств по Соглашению № 075-10-2025-153 от 05 июня 2025 г.

ПРИЛОЖЕНИЯ

- Копии удостоверений. ФАЙЛ: [ПГ 1.3.3 Копии удостоверений.pdf](#)
- Копии ведомостей итоговой аттестации. ФАЙЛ: [ПГ 1.3.3 Копии ведомостей итоговой аттестации.pdf](#)

1.3.4 Организация и проведение в 2025 г. конференции обучающихся и исследователей в возрасте до 39 лет по тематике исследований (V Всероссийская научно-практическая конференция «Задачи и методы нейтронных исследований конденсированных сред») (совместно с Государственным университетом «Дубна», Договор № 400-04902 от 06.08.2025 г.).

V Всероссийская научно-практическая конференция (с международным участием) «Задачи и методы нейтронных исследований конденсированных сред» проведена 24-27 ноября 2025 г. в государственном университете «Дубна» (конференц-зал 1-300), подключение участников онлайн осуществлялось посредством системы для видеоконференцсвязи telemost.yandex.ru.

Основанием для организации и проведения конференции стал приказ №871 «Об организации и проведении V Всероссийской научно-практической конференции «Задачи и методы нейтронных исследований конденсированных сред» от 28 июля 2025 г., а также в дополнение к нему приказ №1423 «Об организации и проведении V Всероссийской научно-практической конференции «Задачи и методы нейтронных исследований конденсированных сред» от 18 ноября 2025 г.

За 4 дня конференцию посетило более 80 человек в очном и дистанционном (посредством платформы конференций государственного университета «Дубна» indico.uni-dubna.ru) форматах, представляющие 39 организаций из России, Казахстана, Беларуси, Таджикистана, США, Австрии, из них 17 Университетов из России, Казахстана, Беларуси, Таджикистана, в т.ч.:

1. Государственный университет «Дубна», г. Дубна, Россия
2. Объединенный институт ядерных исследований, г. Дубна, Россия
3. НИЦ «Курчатовский институт», г. Москва, Россия
4. Казанский (Приволжский) федеральный университет, г. Казань, Россия
5. НИЦ «Курчатовский институт» – Петербургский институт ядерной физики им. Б.П. Константинова, г. Гатчина, Россия
6. Физико-технический институт им. А.Ф. Иоффе, г. Санкт-Петербург, Россия
7. Институт физики металлов имени М.Н. Михеева УрО РАН, г. Екатеринбург, Россия
8. Neutron Scattering Division, Oak Ridge National Laboratory, Oak Ridge, TN 37831, USA
9. Materials Science and Technology Division, Oak Ridge National Laboratory, Oak Ridge, TN 37831, USA
10. Department of Chemistry and Physics of Materials, University of Salzburg, Salzburg A-5020, Austria
11. Уральский федеральный университет, г. Екатеринбург, Россия
12. Московский физико-технический институт, г. Долгопрудный, Россия
13. Московский государственный университет имени М. В. Ломоносова, г. Москва, Россия
14. Филиал НИЦ «Курчатовский институт» – Петербургский институт ядерной физики – ИХС, г. Санкт-Петербург, Россия
15. Институт общей и неорганической химии им. Н.С. Курнакова РАН, г. Москва, Россия
16. Институт физики твердого тела РАН, г. Черноголовка, Россия,
17. Научно-исследовательский университет «Высшая школа экономики», г. Москва, Россия
18. Физический институт им. П.Н. Лебедева РАН, г. Москва, Россия
19. Национальный исследовательский ядерный университет «МИФИ», г. Москва, Россия
20. Белорусский государственный университет, г. Минск, Беларусь
21. Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники, г. Минск, Беларусь
22. Национальный исследовательский университет «МИЭТ», г. Москва, Россия

23. Научно-практический центр НАН Беларуси по материаловедению, г. Минск, Беларусь
24. Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого, г. Санкт-Петербург, Россия
25. Санкт-Петербургский государственный университет, г. Санкт-Петербург, Россия
26. Институт ядерных исследований РАН, г. Москва, Россия
27. НИЦ «АЛИУМ», г. Красногорск, Московская область, Россия
28. Сколковский институт науки и технологий, г. Москва, Россия
29. Филиал МГУ имени М.В. Ломоносова в г. Дубне, г. Дубна, Россия
30. Всероссийский научно-исследовательский институт сельскохозяйственной биотехнологии, г. Москва, Россия
31. Всероссийский центр карантина растений, г. Раменский, Россия
32. Институт органической и физической химии им. А.Е. Арбузова КазНЦ РАН, г. Казань, Россия
33. ФИЦ «Казанский научный центр РАН», г. Казань, Россия
34. Томский политехнический университет, г. Томск, Россия
35. Худжандский государственный университет имени академика Бободжана Гафурова, Худжанд, Таджикистан
36. Институт ядерной физики, г. Алматы, Казахстан
37. Казахский национальный университет им. аль-Фараби, г. Алматы, Казахстан
38. Филиал «Протвино» государственного университета «Дубна», г. Протвино, Россия
39. Институт высокотемпературной электрохимии УрО РАН, г. Екатеринбург, Россия

На конференции представлено 40 докладов, включая 26 докладчиков в возрасте до 39 лет.

Тематика докладов:

- Исследование конденсированных сред с помощью рассеяния нейтронов;
- Методика нейтронного эксперимента;
- Детекторы нейтронного излучения и детекторная электроника;
- Нейтронные исследования и науки о жизни;
- Разработка и моделирование станций нейтронного рассеяния;
- Автоматизация и обработка экспериментальных данных.

Целью конференции является обсуждение последних достижений в области теории взаимодействия нейтронного излучения с веществом и методики нейтронного эксперимента, исследования кристаллических и магнитных структур, динамических свойств и элементарных возбуждений в конденсированных средах, исследования биологических систем и объектов культурного наследия, фундаментальных исследований с нейтронами.

Конференция организована совместно с Казанским (Приволжским) федеральным университетом, Московским физико-техническим институтом (национальный исследовательский университет), Петербургским институтом ядерной физики им. Б.П. Константинова Национального исследовательского центра «Курчатовский институт», Институтом ядерных исследований РАН, Институтом физики металлов имени М.Н. Михеева Уральского отделения РАН.

- Белушкин Александр Владиславович, д.ф.-м.н., член-корреспондент РАН, начальник отделения нейтронных исследований и разработок в области конденсированных сред лаборатории нейтронной физики ОИЯИ – председатель программного комитета;

- Боднарчук Виктор Иванович, к.ф.-м.н., начальник отдела лаборатории нейтронной физики ОИЯИ – заместитель председателя программного комитета;

- Кравцов Евгений Алексеевич, д.ф.-м.н., профессор, главный научный сотрудник, Федеральное государственное бюджетное учреждение науки института физики металлов им. М.Н. Михеева Уральского отделения Российской академии наук;
 - Садыков Равиль Асхатович, к.ф.-м.н., ведущий научный сотрудник, Федеральное государственное бюджетное учреждение науки института ядерных исследований Российской Академии наук, г. Троицк;
 - Рогачев Андрей Вячеславович, к.ф.-м.н., директор Физтех-школы физики и исследований им. Ландау МФТИ;
 - Горбунов Николай Васильевич, к.т.н., доцент, начальник сектора лаборатории физики высоких энергий ОИЯИ, доцент кафедры проектирования электроники для установок «мегасайенс» государственного университета «Дубна»;
 - Бугай Александр Николаевич, д.ф.-м.н., директор лаборатории радиационной биологии ОИЯИ;
 - Малахов Александр Иванович, д.ф.-м.н., профессор, начальник отдела лаборатории физики высоких энергий ОИЯИ, заведующий кафедрой физико-технических систем государственного университета «Дубна»;
 - Немченко Игорь Борисович, д.т.н., и.о. проректора по научной работе и инновациям государственного университета «Дубна», председатель организационного комитета.
- Организационный комитет
- Немченко Игорь Борисович, д.т.н., и.о. проректора по научной работе и инновациям государственного университета "Дубна" – председатель организационного комитета;
 - Пискунова Оксана Ивановна, к.т.н., директор инженерно-физического института государственного университета "Дубна" – заместитель председателя организационного комитета конференции;
 - Захаров Максим Андреевич, к.ф.-м.н., доцент кафедры ядерной физики государственного университета "Дубна";
 - Клименко Ольга Павловна, старший преподаватель кафедры ядерной физики, заместитель директора инженерно-физического института государственного университета "Дубна" - учёный секретарь конференции;
 - Буденная Наталья Николаевна, старший преподаватель кафедры биофизики государственного университета "Дубна";
 - Петрова Мария Олеговна, ассистент кафедры ядерной физики государственного университета "Дубна";
 - Надгериева София Денисовна, ассистент кафедры фундаментальных проблем физики микромира государственного университета "Дубна";
 - Березникова Виктория Михайловна, специалист по УМР инженерно-физического института государственного университета "Дубна".
- Материалы по V Всероссийской научно-практической конференции «Задачи и методы нейтронных исследований конденсированных сред»:
- программа V Всероссийской научно-практической конференции «Задачи и методы нейтронных исследований конденсированных сред»;
 - скриншоты страницы сайта университетской платформы конференций <https://indico.uni-dubna.ru/event/22/> с общей информацией о V Всероссийской научно-практической конференции «Задачи и методы нейтронных исследований конденсированных сред»;

- Информационное сообщение о проведении V Всероссийской научно-практической конференции «Задачи и методы нейтронных исследований конденсированных сред»;
- Постер V Всероссийской научно-практической конференции «Задачи и методы нейтронных исследований конденсированных сред»;
- «Задачи и методы нейтронных исследований конденсированных сред: V Всероссийская научно-практическая конференция» (Дубна, 24-27 ноября 2025 г.): сборник тезисов докладов / под общ. ред. В. И. Боднарчука. В сборнике представлены тезисы докладов участников V Всероссийской научно-практической конференции «Задачи и методы нейтронных исследований конденсированных сред» по проблемам проведения экспериментов в области нейтронной физики, разработки измерительного оборудования, а также основных направлений фундаментальных и прикладных исследований.

Полученные результаты полностью соответствуют п. 1.3.4 Плана-Графика работ в рамках исполнения обязательств по Соглашению № 075-10-2025-153 от 05 июня 2025 г.

ПРИЛОЖЕНИЯ

- Информационные материалы конференции. ФАЙЛ: [ПГ 1.3.4 Информационные материалы конференции.pdf](#)
- Приказы о проведении конференции. ФАЙЛ: [ПГ 1.3.4 Приказы о проведении конференции.pdf](#)
- Список участников конференции до 39 лет. ФАЙЛ: [ПГ 1.3.4 Список участников конференции до 39 лет.pdf](#)

1.3.5 Научно-просветительские и профориентационные мероприятия со школьниками в рамках IX Летней школы «Физика. Математика. Информатика» Государственного университета «Дубна» (совместно с Государственным университетом «Дубна», Договор № 400-04902 от 06.08.2025 г.).

IX Летняя школа «Физика. Математика. Информатика» и «Нанотехнологии» для учащихся старших классов (10, 11 классы) проведена с 19 по 29 июля 2025 г. на базе государственного университета «Дубна». Приказом №807 от 9 июля 2025 г. «О проведении IX Летней школы «Физика. Математика. Информатика» и «Нанотехнологии» утверждены: организационный комитет, программа школы с привлечением партнёров, сформированы рабочие группы по подготовке профильных секций школы (лекторий и практикум по математике, физике и информатике, нанотехнологический практикум, проектная деятельность), маркетинговое, информационное и телекоммуникационное сопровождение мероприятия, юридическое сопровождение мероприятия, организационное сопровождение мероприятий в рамках школы, обеспечение порядка и безопасности участников мероприятия.

С целью формирования устойчивого интереса к научной и исследовательской деятельности на уникальных научных установках класса «мегасайенс» в рамках школы проведены:

- 1) Научно-популярные лекции:
 - ОИЯИ. Энергия науки,
 - Зачем физику компьютер?
 - Космическая радиация. Как от неё защититься,
 - Нужен ли машинный код программисту,
 - NISA – назад в будущее,
 - Век открытий,

- Основы инженерного проектирования,
- Основа научного метода,
- Программирование в команде. Что такое программная инженерия?
- Визуализация данных,
- Нейросети врываются в мир художников,
- Накопители энергии в современном мире,
- Логические микросхемы и зачем они нужны,
- Современные тренды применения линейных ускорителей в прикладных задачах и причём тут клистроны с модуляторами;

2) Экскурсии:

- Экскурсия в Объединенный институт ядерных исследований (ОИЯИ)
- Экскурсия в Корпорацию «ПРОМТЕХ»;

3) Мастер-классы, лабораторные и экспериментальные практикумы:

- Мастер-класс от НПП «Детектор»,
- Мастер-класс «Визуализация данных»,
- Мастер-класс «Опыты с жидким азотом»,
- Мастер-класс по ИИ и ML «ДавАИ идею – ДелАИ контент»,
- Мастер-класс «Разработка мобильных приложений»,
- Мастер-класс «Как научить компьютер видеть»,
- Мастер-класс «Цифровая земля: первый шаг в геоаналитику»,
- Виртуальная лаборатория по ядерной физике,
- Экспериментальный практикум по нанотехнологиям;

4) Олимпиады:

- Олимпиада по физике,
- Олимпиада по математике,
- Олимпиада по информатике;

5) Проектная работа.

В IX Летней школе «Физика. Математика. Информатика» и «Нанотехнологии» прошли обучение 69 учащихся средних учебных заведений г. Дубны, Москвы и Московской области, Санкт-Петербурга, Вологды, Воронежа, Петрозаводска, Твери и Тверской области, Владимирской области, Тамбовской области.

Материалы IX Летней школы «Физика. Математика. Информатика» и «Нанотехнологии»:

- Программа IX Летней школы «Физика. Математика. Информатика» и «Нанотехнологии»;
- Приказ «О проведении региональных олимпиад в рамках IX Летней школы «Физика. Математика. Информатика» и «Нанотехнологии» №867 от 25.07.2025 г.;
- Результаты олимпиад в рамках IX Летней школы «Физика. Математика. Информатика» и «Нанотехнологии»;
- Скриншот сайта IX Летней школы «Физика. Математика. Информатика» и «Нанотехнологии» <https://abitur.uni-dubna.ru/leto>;
- Скриншоты страницы «Проекты» сайта IX Летней школы «Физика. Математика. Информатика» и «Нанотехнологии» <https://abitur.uni-dubna.ru/projects>;
- Скриншоты новостных постов официальных групп университета «Дубна» в социальных сетях «ВКонтакте» и «Одноклассники, а также в СМИ;

- Баннер IX Летней школы «Физика. Математика. Информатика» и «Нанотехнологии».

Полученные результаты полностью соответствуют п. 1.3.4 Плана-Графика работ в рамках исполнения обязательств по Соглашению № 075-10-2025-153 от 05 июня 2025 г.

ПРИЛОЖЕНИЯ

- Информационные материалы Летней школы. ФАЙЛ: [ПГ 1.3.5 Информационные материалы Летней школы.pdf](#)
- Приказ о проведении олимпиад и протокол. ФАЙЛ: [ПГ 1.3.5 Приказ о проведении олимпиад и протокол.pdf](#)
- Приказ о проведении Летней школы. ФАЙЛ: [ПГ 1.3.5 Приказ о проведении Летней школы.pdf](#)

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Работы первого этапа реализации проекта «Развитие аппаратно-методической базы для решения научных и прикладных задач на источниках нейтронов разного типа» были завершены в срок и в полном объеме.

В рамках Мероприятия 1 решались задачи по разработке новых приборов для регистрации нейтронного излучения для использования на станциях нейтронного рассеяния и для промышленного применения, а также по разработке новых методических решений для расширения экспериментальных возможностей при исследованиях с помощью рассеяния нейтронов. Основные цели и задачи этой части проекта состоят в том, чтобы иметь рабочие и отлаженные технологии изготовления линейки самых разных типов нейтронных детекторов, чтобы при запросе со стороны исследователей не было никаких ограничений при выборе методов исследований в рамках существующих научных программ исследований на источниках нейтронов, так и перспективных, которые возникнут при вводе в эксплуатацию новых более мощных источников нейтронов в будущем. Задачи, связанные с развитием детекторных технологий, состояли из трех видов: разработка детекторов с конвертером на базе изотопа ^{10}B , разработка детекторов нейтронов на базе микроканальных пластин (МКП), развитие сцинтилляционных детекторов нейтронов с использованием твердотельных фотоумножителей. Потребности в новых детекторах нейтронов обусловлены развитием методов исследований с помощью рассеяния нейтронов и появлением новых научных задач, связанных с необходимостью регистрации большого потока событий в широком спектральном диапазоне. Наиболее распространенные в данное время детекторы нейтронов с конвертером из газообразного He-3 с необходимостью имеют толстые стенки для удержания газа, имеющем давление в пределах 5- 15 атм. Это существенно ограничивает возможности для регистрации длинноволновой части спектрального распределения, так как нейтроны с такими энергиями начинают сильно поглощаться или рассеиваться материалом стенки камеры детектора. Выбранные направления развития детекторных технологий в рамках проекта как раз должны дать результаты, преодолевающие ограничения, накладываемые детекторами с газом ^3He .

В первом случае решалась задача создания детектора нейтронов типа MICROMEGAS. Данная технология обладает большим потенциалом для использования в исследованиях, проводимых с помощью рассеяния нейтронов. Начальными условиями выполнения задачи являлось наличие опыта создания подобных детекторов у членов коллектива исполнителей для задач из области физики высоких энергий, связанных с регистрацией заряженных частиц. На первом этапе реализации проекта важно было показать реализуемость данной методики для регистрации нейтронного излучения, что и было успешно выполнено. Разработанный и созданный в рамках проекта однокоординатный детектор MICROMEGAS с конвертером из карбида бора прошел успешное испытание на пучке тепловых нейтронов, сгенерированных от изотопного источника ^{252}Cf . Полученный результат позволяет заключить, что данная технология может быть усовершенствована до уровня необходимого для применения на станциях нейтронного рассеяния в двухкоординатном варианте с высокой эффективностью регистрации нейтронного излучения.

Две другие задачи состояли в реализации техники изготовления straw-трубок из алюминиевой фольги, на которую нанесен слой карбида бора. Участниками проекта за короткий срок был успешно разработан, собран, испытан и запущен в эксплуатацию станок ультразвуковой сварки алюминиевой фольги, который позволяет создавать трубки различного диаметра длиной до 1 м. Это позволило успешно выполнить задачи по изготовлению детекторов на основе простых straw-трубок – газонаполненных под атмосферным давлением с продувом трубок с анодной нитью по оси трубки. Данная технология отличается значительной простотой изготовления, (а значит дешевой) и большим вариантом использования данных трубок в различной конфигурации для покрытия больших площадей регистрации рассеянного излучения. Использование тонкой (50 мкм) алюминиевой фольги минимизирует эффект рассеяния на материале трубки, и не является препятствием для проникновения сквозь нее нейтронов из холодной части спектрального распределения, что всегда является проблемой для детекторов с газом ^3He . Использование технологии straw для регистрации нейтронного излучения не является новым. Подобные детекторы

изготавливаются и применяются, в частности в ESS, но материалом для трубок там берется медная фольга. Медь, в отличие от алюминия значительно сильнее рассеивает тепловые и холодные нейтроны, к тому же медь хорошо активируется в потоке нейтронов и гамма-квантов, что приводит к повышению фоновой составляющей при использовании таких детекторов в эксперименте. При работе над выполнением проекта коллективу исполнителей удалось подобрать режимы сварки, на разработанном оборудовании при которой образуется прочный и герметичный сварной шов на алюминиевой фольге, что является несомненным преимуществом по сравнению с аналогичными детекторами, изготавливаемыми из медной фольги. В этом состоит новизна полученного результата. Кроме этого, успешная реализация задачи по ультразвуковой сварке алюминиевой фольги позволила реализовать детектор нейтронов в виде сплюсненной straw-трубки. Это многообещающая разработка, использующая принцип увеличения эффективности регистрации нейтронного излучения за счет ориентации поверхности конвертера под острым углом к падающему излучению. Если сам принцип известен уже давно, то его реализация в виде сплюсненной straw-трубки является уникальной, нигде ранее не применявшейся и не предлагавшейся. Успешная реализация этой идеи открывает возможности создания высокоэффективных детекторов большой площади для разных экспериментальных методов, состоящих из отдельных модулей, каждый из которых представляет собой отдельную сплюсненную straw-трубку. Таким образом, выполнение описываемых задач способствовало не только появлению детекторов нейтронов нового типа, но и внесло вклад в развитие технологической базы для разработки этих детекторов, что позволяет оценивать выполнение задач, как очень успешное.

В рамках Мероприятия 1 решались задачи по разработке детекторов нейтронов на базе микроканальных пластин (МКП). Использование МКП в нейтронных детекторах пока не является массовым. Однако применение МКП для регистрации излучений хорошо проработано в области физики высоких энергий. В мире не очень много производителей высококачественных МКП. Наличие уникального производства МКП в России (компания ООО ВТЦ Баспик, г. Владикавказ) делает возможность разработки детектора на его основе перспективной. На первом этапе реализации проекта проведены расчеты оптимальной конфигурации детектора основе МКП, выбран материал конвертера. Созданный задел и полученные результаты закладывают фундамент для создания детекторов на базе МКП на следующих этапах реализации проекта. Поэтому оценивать в полной мере полученный результат можно будет позднее.

Несколько задач проекта касались развития методов детектирования на основе сцинтилляторов. Сцинтилляционные детекторы тепловых нейтронов остаются одним из наиболее эффективных и универсальных инструментов для регистрации медленных нейтронов. Одним из ключевых достоинств сцинтилляционных детекторов является возможность гибкого выбора конструкции и геометрии. В отличие от газовых или полупроводниковых детекторов, сцинтилляционные системы легко масштабируются: можно изготавливать детекторы практически любых размеров и форм, включая плоские, цилиндрические, линейные и многосегментные конфигурации. Это особенно важно при создании комплексных измерительных систем, адаптированных под конкретные экспериментальные установки и задачи. В ходе реализации проекта разработана конструкция одномерных позиционно-чувствительных сцинтилляционных детекторов размерами от 200 мм, в которых координата определяется через анализ затухания амплитуды в световоде по мере удаления от места высвечивания после захвата нейтрона. Результаты носят пока промежуточный характер. В полной мере оценить данный метод можно будет на следующем этапе выполнения проекта, когда будет изготовлен и испытан детектор, работающий по данному принципу.

В области разработки методики нейтронного эксперимента выполнено моделирование будущей установки на импульсном источнике нейтронов РАДЭКС ИЯИ РАН (г. Троицк, г. Москва). Особенность рассматриваемой установки заключается в варьируемом разрешении за счёт углового положения детектора, и вариации времяпролётной базы, что позволит настраивать требуемый диапазон длин волн и повышать разрешающую способность по переданному импульсу q . В ходе Монте-Карло моделирования были рассмотрены варианты модификации системы доставки нейтронного пучка источника РАДЭКС ИЯИ РАН к возможным экспериментальным установкам.

Выигрыш в интенсивности нейтронов при пролетной базе 23м может составлять порядка 30-40 раз по сравнению со стандартной трубой-коллиматором, при условии использования суперзеркал с показателем $m = 4$ и более. Дана оценка разрешения возможной установки, которое в зависимости от пролетной базы и нейтронотода варьируется от $2.2 \pm 0.3\%$ до $3.2 \pm 0.4\%$ для угла дифракции $2\theta = 90^\circ$. Предложена конструкция дифрактометра с варьируемым разрешением на импульсном источнике нейтронов РАДЭКС ИЯИ РАН. Результаты этого раздела проекта могут применяться при планировании модернизации существующих станций нейтронного рассеяния для повышения их эффективности при той же мощности источника нейтронов. Таким образом задачу можно считать выполненной полностью, а полученные результаты имеют значимость, выходящую за рамки одного источника нейтронов, для которого эти результаты получены.

Нейтронные исследования при высоком давлении являются важными методами изучения структурных и магнитных фазовых переходов в материалах, особенно содержащих лёгкие элементы. Традиционно на нейтронных источниках применяли камеры типа «поршень–цилиндр», обеспечивающие давление до 2,5 ГПа. Для преодоления ограничения по давлению были разработаны камеры на основе встречных наковален (Diamond Anvil Cells, DAC). Это позволило достигать давлений десятков и даже сотен гигапаскалей. Задача этой части проекта состояла в проведении оптических исследований материалов для наковален, используемых при проектировании камер высокого давления и разработанные методы съема фотонов для определения давления методом люминесценции. Результат выполнения работы состоит в разработке конструкции камеры высокого давления типа поршень-цилиндр с сапфировой наковальной с контролем давления в объёме оптическим методом. Кроме этого, разработана блок-схема системы контроля и измерения давления in-situ, которая позволит контролировать и регулировать давление в камерах поршень-цилиндр во время проведения эксперимента. Результат носит промежуточный характер. В полной мере оценить данный метод можно будет на следующем этапе выполнения проекта.

Две задачи проекта были посвящены развитию методов регистрации потоков нейтронов в промышленных энергетических установках. Разработанный в сотрудничестве ОИЯИ и Государственным университетом «Дубна» метод нанесения тонкопленочных покрытий карбида бора на различные основания вызвал интерес к себе от производителей измерительного оборудования для атомных энергетических установок. В сотрудничестве с КПП Атомприбор была предложена конструкция газонаполненной ионизационной камеры с плоскими электродами, имеющими тонкопленочное борсодержащее покрытие и однообъемного цилиндрического газоразрядного счётчика нейтронного излучения, обеспечивающих контроль интенсивности потоков тепловых нейтронов для возможного применения на энергетических установках Росатома. Данный результат имеет крайне важное значение, поскольку демонстрирует возможность плодотворного взаимодействия научного коллектива с промышленностью.

В рамках Мероприятия 2 решалась важная задача по созданию испытательного комплекса (ИК) для определения характеристик детекторов нейтронов разного типа. Комплекс разрабатывается на выведенном пучке нейтронов на импульсном реакторе ИБР-2 (ЛНФ ОИЯИ) для проведения испытаний новых разработок в области детекторных технологий, на котором будет возможна имитация работы детектора в любой из применяемых методик в области нейтронных исследований. Создание данного комплекса позволит проводить характеризацию новых детекторных систем в реальных условиях и тем самым повысить эффективность проводимых работ по разработке новых детекторов нейтронов, а также проводить проверки действующих детекторов с целью отладки и контроля параметров. Измерения на данном комплексе будут доступны всем заинтересованным специалистам в рамках программы пользователей реактора ИБР-2.

В рамках Мероприятия 3 реализованы несколько задач, связанных с обучением и подготовкой кадров для работы в области нейтронных исследований. Реализована дополнительная образовательная программа повышения квалификации для научных сотрудников, дополнительная образовательная программа повышения квалификации для специалистов в области разработки, проектирования, строительства и технической эксплуатации установок нейтронного рассеяния. Успешно проведена V Всероссийская научно-практическая

конференция «Задачи и методы нейтронных исследований конденсированных сред», на которой было представлено 40 докладов, подготовленных коллективами из 39 ОИЯИ, НИЦ КИ ПИЯФ, ИЯФ им. Г.И. Будкера СО РАН, ИФМ им. М.Н. Михеева УрО РАН, Государственный университет «Дубна», УрФУ, МГУ, МФТИ, СПбГУ и других. География участников имела международный характер: Россия, Казахстан, Белоруссия, Таджикистан, США, Австрия. На конференции 26 докладов представлены исследователями до 39 лет. Проведены научно-просветительские и профориентационные мероприятия со школьниками в рамках IX Летней школы «Физика. Математика. Информатика» на базе Государственного университета «Дубна».

Все показатели, включая финансовые, которые планировалось достичь за время первого этапа проекта успешно выполнены.

По итогам выполненных работ можно заключить, что успешно начата реализация научно-технических задач, открывающих новые возможности в развитии нейтронных исследований в Российской Федерации. Отдельные результаты первого этапа имеют важное и даже прорывное значение, которое безусловно найдет применение в новых разработках для нейтронных методов исследований уже в рамках реализуемого проекта. В то же время ряд достигнутых результатов носят пока промежуточный характер из-за обширности поставленных задач. Полный потенциал полученных результатов будет раскрываться на следующих этапах реализации проекта. В рамках работы над задачами проекта достигнута консолидация научного сообщества в части развития методик проведения нейтронных исследований, разработок детекторных систем для регистрации тепловых и холодных нейтронов и методов исследований с помощью рассеяния нейтронов. Разработаны и реализованы программы для подготовки молодых специалистов для работы в области проведения нейтронных исследований.

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 познакомиться на сайте:

<https://flnp.jinr.int/ru/glavnaya/nauka/materialy/federalnaya-nauchno-tekhnicheskaya-programma-razvitiya-sinkhrotronnykh-i-nejtronnykh-issledovanij-i-issledovatelskoj-infrastruktury-na-2019-2027-gody>

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

- [1] Giomataris Y., Rebourgeard P., Robert J., Charpak G. MICROMEGAS: A high-granularity position-sensitive gaseous detector for high particle-flux environments // Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section A: Accelerators, Spectrometers, Detectors and Associated Equipment. — 1996.— V. 376, no. 1.— P. 29–35.
- [2] Abbon P. et al. [COMPASS Collaboration] The COMPASS experiment at CERN // Nuclei Instrum. Meth. A.— 2007.— V. 577.— P. 455–518.— arXiv:hep-ex/0703049.
- [3] Fraser G. W. et al. Thermal neutron imaging using microchannel plates //Neutrons, X Rays, and Gamma Rays: Imaging Detectors, Material Characterization Techniques, and Applications. – SPIE, 1993. – Т. 1737. – С. 298–307
- [4] Wiza J. L. et al. Microchannel plate detectors //Nucl. Instrum. Methods. – 1979. – Т. 162. – №. 1-3. – С. 587–601
- [5] Siegmund O. H. W. et al. High resolution delay line readouts for microchannel plates //Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section A: Accelerators, Spectrometers, Detectors and Associated Equipment. – 1991. – Т. 310. – №. 1-2. – С. 311–316
- [6] Forster R. A., Godfrey T. N. K. MCNP-a general Monte Carlo code for neutron and photon transport //Monte-Carlo Methods and Applications in Neutronics, Photonics and Statistical Physics: Proceedings of the Joint Los Alamos National Laboratory – Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg, 2006. – С. 33–55
- [7] Battistoni G. et al. Overview of the FLUKA code //Annals of Nuclear Energy. – 2015. – Т. 82. – С. 10–18
- [8] Niita K. et al. PHITS—a particle and heavy ion transport code system //Radiation measurements. – 2006. – Т. 41. – №. 9-10. – С. 1080–1090
- [9] Agostinelli S. et al. Geant4—a simulation toolkit //Nuclear instruments and methods in physics research section A: Accelerators, Spectrometers, Detectors and Associated Equipment. – 2003. – Т. 506. – №. 3. – С. 250–303
- [10] Brown D. A. et al. ENDF/B-VIII. 0: the 8th major release of the nuclear reaction data library with CIELO-project cross sections, new standards and thermal scattering data //Nuclear Data Sheets. – 2018. – Т. 148. – С. 1–142
- [11] Iwamoto O. et al. Status of JENDL //EPJ Web of Conferences. – EDP Sciences, 2020. – Т. 239. – С. 09002
- [12] Koning A. J. et al. Status of the JEFF nuclear data library //J. Korean Phys. Soc. – 2011. – Т. 59. – №. 2. – С. 1057–1062
- [13] Pan J. et al. High detection efficiency neutron sensitive microchannel plate //Journal of Instrumentation. – 2013. – Т. 8. – №. 01. – С. P01015
- [14] Greenwood R. C. et al. Collective and two-quasiparticle states in ^{158}Gd observed through study of radiative neutron capture in ^{157}Gd //Nuclear Physics A. – 1978. – Т. 304. – №. 2. – С. 327-428
- [15] Smith G. C. NEUTRON IMAGING, RADIOGRAPHY AND TOMOGRAPHY. – Brookhaven National Lab. (BNL), Upton, NY (United States), 2002. – №. BNL-69065
- [16] G. Croci. F. Murtas. F. Resnati et al. "Prospects in MPGDs development for neutron detection". Summary of RD-51 Academia-Industry Matching Event. 2015
- [17] Lu N. et al. Neutron detector design based on ALD coated MCP //Physics Procedia. – 2012. – Т. 26. – С. 61–69.
- [18] Schanzer, C., Böni, P., Filges, U., Hils, T. Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section A: Accelerators. 2004. Т. 529, № 1–3. С. 63–68. DOI: 10.1016/j.nima.2004.04.178.

- [19] Франк, А. И. Сообщения ОИЯИ. 2021. P3-2021-36.
- [20] Adams, T., Brandl, G., Chacon, A., Wagner, J. N., Rahn, M., Mühlbauer, S., Georgii, R., Pfeleiderer, C., Böni, P. Applied Physics Letters. 2014. Т. 105, № 12. С. 123505. DOI: 10.1063/1.4896295.
- [21] Cieslak, M., Gamage, K., Takahashi, X. Critical Review of Scintillating Crystals for Neutron Detection // Crystals. – 2019. – Т. 9. – № 9. – С. 480. – DOI: 10.3390/cryst9090480.
- [22] An, B., Deng, Y., Jin, Z., Sun, S. Scintillators for Neutron Detection and Imaging: Advances and Prospects // Advanced Functional Materials. – 2024. – Т. 35. – DOI: 10.1002/adfm.202422522.
- [23] Трунов, Д. Н., Марин, В. Н., Садыков, Р. А. и др. Моделирование оптических параметров сцинтилляционных позиционно-чувствительных детекторов с органическим световодом // Поверхность. Рентгеновские, синхротронные и нейтронные исследования. – 2023. – № 4. – С. 71–76. – DOI: 10.31857/S1028096023040209.
- [24] Glushkova, T. I., Trunov, D. N., Marin, V. N. и др. Prototype of Position-Sensitive Scintillation Neutron Detector Based on SiPM and ZnS:Li6 // Journal of Surface Investigation. – 2023. – Т. 17. – С. 130–134. – DOI: 10.1134/S1027451023010093.
- [25] Трунов, Д. Н., Марин, В. Н., Глушкова, Т. [и др.]. Исследования прототипа позиционно-чувствительного детектора нейтронов на основе кремниевых фотоумножителей // Международный научно-исследовательский журнал. – 2023. – № 12 (138). – DOI: 10.23670/IRJ.2023.138.23.
- [26] Haberl B., Guthrie M., Boehler R. Advancing neutron diffraction for accurate structural measurement of light elements at megabar pressures // Scientific Reports. — 2023. — Vol. 13. — P. 4741. — DOI: 10.1038/s41598-023-31295-3.
- [27] Nakamura, T., Katagiri, M., Tsutsui, N., Toh, K., Rhodes, N., Schooneveld, E., Ooguri, H., Noguchi, Y., Sakasai, K., Soyama, K. Development of a ZnS/(B₂O₃)-B¹⁰ scintillator with low-afterglow phosphor // Journal of Physics: Conference Series. – 2014. – Т. 528. – № 1. – С. 012043. – DOI: 10.1088/1742-6596/528/1/012043.
- [28] Chlique, C., Merdrignac-Conanec, O., Hakmeh, N., Zhang, X.-H., Adam, J.-L. Transparent ZnS Ceramics by Sintering of High Purity Monodisperse Nanopowders // Journal of the American Ceramic Society. – 2013. – Т. 96. – № 10. – С. 3070–3074. – DOI: 10.1111/jace.12570.
- [29] Tarasov, V., Zelenskaya, O., Shpilinskaja, O., Trefilova, L., Andruschenko, L., Borysova, L., Hapon, Yu. Preparation and characterization of ⁶LiF/ZnS(Ag) scintillator with varying granulometry // Functional Materials. – 2024. – Т. 31. – № 2. – С. 153–162.
- [30] Osovizky, A., Pritchard, K., Ziegler, J., Binkley, E., Yehuda-Zada, Y., Tsai, P., Thompson, A., Cooksey, C., Siebein, K., Hadad, N., Jackson, M., Hurlbut, C., Ibberson, R., Baltic, G., Majkrzak, C., Maliszewskij, N. ⁶LiF:ZnS(Ag) mixture optimization for a highly efficient ultrathin cold neutron detector // IEEE Transactions on Nuclear Science. – 2018. – Т. 65. – № 9. – С. 1–8. – DOI: 10.1109/TNS.2018.2809567.
- [31] Патент RU 2795750 C1. Сцинтилляционный детектор тепловых нейтронов [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://patents.google.com/patent/RU2795750C1/ru> (дата обращения: 18.10.2025).
- [32] Tojo, T., Nakajima, T. Preparation of thermal neutron scintillators based on a mixture of ZnS(Ag), ⁶LiF and polyethylene // Nuclear Instruments and Methods. – 1967. – Т. 53. – С. 163–166. – DOI: 10.1016/0029-554X(67)91347-X.
- [33] Pino, F., Stevanato, L., Cester, D., Nebbia, G., Sajó-Bohus, L., Viesti, G. Study of the thermal neutron detector ZnS(Ag)/LiF response using digital pulse processing // Journal of Instrumentation. – 2015. – Т. 10. – № 08. – С. T08005. – DOI: 10.1088/1748-0221/10/08/T08005.

- [34] ArXiv preprint. Simulation study on ZnS(Ag)/⁶LiF neutron detectors [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://arxiv.org/abs/2212.13394> (дата обращения: 18.10.2025).
- [35] Free Patents Online. U.S. Patent Application US20110303852 A1 [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://www.freepatentsonline.com/y2011/0303852.html> (дата обращения: 18.10.2025).
- [36] IAEA LiveChart of Nuclides. <https://www.nds.iaea.org/relnsd/vcharthtml/VChartHTML.html>
- [37] S. Pomme et al., “Analysis of a neutron-induced conversion electron spectrum of gadolinium”. Applied Radiation and Isotopes 197 (2023) 110828
- [38] J. Pan. et al. "High detection efficiency neutron sensitive microchannel plate". JINST. vol. 8. 2013. P01015.
- [39] Yang Tian J. Pan. et al., "High efficiency event-counting thermal neutron imaging using Gd doped micro channel plate". Submitted to Chinese Physics C.
- [40] A. S. Tremsin. J. Pan. et al., "Improved efficiency of high resolution thermal and cold neutron imaging". NIMA in Physics Research A. vol. 628. 2011. pp. 415-418.
- [41] Nianhua Lu. Yigang Yang. Jingwen Lv. Jingsheng Pan. Manchun Liang. Xuewu Wang. Yuanjing Li. "Neutron Detector Design Based on ALD Coated MCP". Physics Procedia. vol. 26. 2012. pp. 61-69.
- [42] Yang Tian. Nianhua Lu. Yigang Yang. Weiqi Huang. "Realization of Neutron Sensitive MCP with ALD Technique". In: 2011 IEEE Nuclear Science Symposium Conference Record. 2011. pp. 196-198.
- [43] Nianhua Lu. Yigang Yang. Jingwen Lv. Jingsheng Pan. Xiaoming Han. Wei Xu. Manchun Liang. Xuewu Wang. Yuanjing Li. "Realization and evaluation of doping and coating neutron sensitive MCP". Physics Procedia. vol. 26. 2012. pp. 309-316.
- [44] G.W. Fraser and J.F. Pearson, “The direct detection of thermal neutrons by imaging microchannel-plate detectors”. <https://colab.ws/articles/10.1016%2F0168-9002%2890%2990325-z>
- [45] G.W. Fraser “Thermal neutron imaging using microchannel plates”, 1992. <https://colab.ws/articles/10.1117%2F12.138671>
- [46] D. Pfeiffer et al. "First measurements with new high-resolution gadolinium-GEM neutron detectors". JINST 11 P05011. 2016. <https://arxiv.org/pdf/1510.02365>
- [47] G. Croci. F. Murtas. F. Resnati et al. "Prospects in MPGDs development for neutron detection". Summary of RD-51 Academia-Industry Matching Event. 2015. <https://arxiv.org/pdf/1601.01534>
- [48] <https://baspik.com/products/mcps/pryamougolnye-mkp>
- [49] Физическая Энциклопедия <https://www.astronet.ru/db/msg/1172474>
- [50] Roentdek GmbH. Delay Line Readout for MCPs. <https://www.roentdek.com/manuals/MCP%20Delay%20Line%20manual.pdf>
- [51] Czasch A et al. "Position and time sensitive photon counting detector with image charge delay-line readout" // Proc. SPIE 6771, Photon Counting Applications, Quantum Optics, and Quantum Cryptography, 67710J (2007).
- [52] Sykora, G. J., Mann, S. E., Mauri, G., Schooneveld, E. M., Rhodes, N. J. Review of thermal neutron scintillators: Evaluation metrics and future prospects for demanding applications // Optical Materials: X. – 2024. – Т. 24. – С. 100373. – DOI: 10.1016/j.omx.2024.100373.
- [53] Cieślak, M. J., Gamage, K. A. A., Glover, R. Critical Review of Scintillating Crystals for Neutron Detection // Crystals. – 2019. – Т. 9. – № 9. – С. 480. – DOI: 10.3390/cryst9090480.
- [54] Pritchard, K., Osovizky, A., Ziegler, J., Binkley, E., Tsai, P., Hadad, N., Jackson, M., Hurlbut, C., Baltic, G. M., Majkrzak, C. F., Maliszewskyj, N. C. ⁶LiF:ZnS(Ag) neutron detector performance optimized using waveform recordings and ROC curves // IEEE Transactions on Nuclear Science. – 2020. – Т. 67. – № 1. – С. 1–8. – DOI: 10.1109/TNS.2019.2953875.

- [55] Zada, I. C., Osovizky, A., Orion, I. Enhanced high-sensitivity multi-layer neutron detector based on LiF:ZnS(Ag) scintillator // *Scientific Reports*. – 2024. – Т. 14. – № 31446. – DOI: 10.1038/s41598-024-83129-5.
- [56] Gunst, S. B., Connor, J. C., Bayard, R. T. Thin scintillators of ZnS in fused B₂O₃ for thermal neutron detection // *Review of Scientific Instruments*. – 1955. – Т. 26. – № 9. – С. 894–895.
- [57] Nakamura, T., Katagiri, M., Tsutsui, N., Toh, K., Rhodes, N., Schooneveld, E., Ooguri, H., Noguchi, Y., Sakasai, K., Soyama, K. Development of a ZnS/(B₂O₃)-B¹⁰ scintillator with low-afterglow phosphor // *Journal of Physics: Conference Series*. – 2014. – Т. 528. – С. 012043. – DOI: 10.1088/1742-6596/528/1/012043.
- [58] Yehuda-Zada, Y., Pritchard, K., Ziegler, J. B., Cooksey, C., Siebein, K., Jackson, M., Hurlbut, C., Kadmon, Y., Cohen, Y., Ibberson, R. M., Majkrzak, C. F., Maliszewskyj, N. C., Orion, I., Osovizky, A. Optimization of ⁶LiF:ZnS(Ag) scintillator light yield using GEANT4 // *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section A: Accelerators, Spectrometers, Detectors and Associated Equipment*. – 2018. – Т. 892. – С. 59–69. – DOI: 10.1016/j.nima.2018.02.099.
- [59] Ляпидевский В.К. Методы детектирования излучений: Учебное пособие для вузов.- М.:Энергоатомиздат, 1987.-408с.:ил.
- [60] Горн Л.С., Хазанов Б.И. Схемотехника радиометров. М., Атомиздат, 1977, 288 с.
- [61] Цитович А.П. Ядерная радиоэлектроника. Издательство «Наука» гГлавная редакция физико-математической литературы. Москва 1967.
- [62] Joseph Ladislav Wiza. Microchannel plate detectors. *Nuclear Instruments and Methods*, V. 162, Pages 587-601, 1979. doi:10.1016/0029-554x(79)90734-1
- [63] <https://baspik.com/products/>
- [64] K.D. Berry, Hassina Z Bilheux, Lowell Crow, et al. A neutron sensitive microchannel plate detector with cross delay line readout. *Nuclear Science Symposium and Medical Imaging Conference (NSS/MIC)*, 2012 IEEE. DOI:10.1109/NSSMIC.2012.6551091
- [65] A.S. Tremsin, J.V. Vallerga, J.B. McPhate, et al. On the possibility to image thermal and cold neutron with sub-15 μm spatial resolution. *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section A: Accelerators, Spectrometers, Detectors and Associated Equipment*. Vol. 592, Pages 374-384, 2008. DOI: 10.1016/j.nima.2008.03.116
- [66] Nianhua Lu, Yigang Yang, Jingwen Lv, et al. Neutron Detector Design Based on ALD Coated MCP. *Physics Procedia* Vol. 26, Pages 61-69, 2012. 10.1016/j.phpro.2012.03.010