

Министерство науки и высшего образования Российской Федерации
ФЕДЕРАЛЬНОЕ ГОСУДАРСТВЕННОЕ БЮДЖЕТНОЕ УЧРЕЖДЕНИЕ НАУКИ
ИНСТИТУТ ЯДЕРНЫХ ИССЛЕДОВАНИЙ РОССИЙСКОЙ АКАДЕМИИ НАУК
(ИЯИ РАН)

УДК 539.1, 539.12, 539.14, 539.17, 539.125

Рег. № 122112300056-3

Рег. №



М.В. Либанов

«30» декабря 2022 г.

**ОТЧЕТ
О НАУЧНО-ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКОЙ РАБОТЕ**

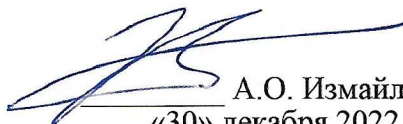
122112300056-3

**НОВЫЕ ДЕТЕКТОРЫ НЕЙТРИНО ДЛЯ УСКОРИТЕЛЬНЫХ И ПОДЗЕМНЫХ
ЭКСПЕРИМЕНТОВ**

(промежуточный за 2022 год)

ФЦП

Руководитель НИР,
к.ф.-м.н.



А.О. Измайлов
«30» декабря 2022 г.

Москва 2022 г.

СПИСОК ИСПОЛНИТЕЛЕЙ

Руководитель НИР,
Ст. науч. сотр.,
канд. физ.-мат. наук



30.12.2022

подпись, дата

А.О. Измайлов
(введение, раздел 1, 2, 3, 4, 5,
заклечение)

Исполнители:

Ст. науч. сотр.



30.12.2022

подпись, дата

Е.П. Веретенкин
(введение, раздел 6)

Гл. науч. сотр.,
д-р. физ.-мат. наук



30.12.2022

подпись, дата

В.Н. Гаврин
(введение, раздел 6, заключение)

Ст. науч. сотр.,
канд. физ.-мат. наук



30.12.2022

подпись, дата

В.В. Горбачев
(раздел 6, заключение)

Мл. науч. сотр.



30.12.2022

подпись, дата

А.Е. Дергачева
(введение, раздел 1)

Ст. науч. сотр.,
канд. физ.-мат. наук



30.12.2022

подпись, дата

Н.В. Ершов
(раздел 1, 2, 4, 5)

Науч. сотр.



30.12.2022

подпись, дата

Т.В. Ибрагимова
(раздел 6)

Гл. науч. сотр.,
д-р. физ.-мат. наук



30.12.2022

подпись, дата

Ю.Г. Куденко
(введение, раздел 1, 2, 3, 4, 5)

Вед. науч. сотр.,
д-р. физ.-мат. наук



30.12.2022

подпись, дата

Б.К. Лубсандоржиев
(введение, раздел 6, заключение)

Стажер-исследователь



30.12.2022

подпись, дата

А.Д. Луканов
(введение, раздел 6, заключение)

Мл. науч. сотр.,
канд. физ.-мат. наук

30.12.2022

подпись, дата

А.В. Мефодьев
(раздел 1)

Ст. науч. сотр.,
канд. физ.-мат. наук

30.12.2022

подпись, дата

О.В. Минеев
(раздел 2, 3, 5)

Ст. науч. сотр.,
канд. физ.-мат. наук

30.12.2022

подпись, дата

Г.Я. Новикова
(введение, раздел 6, заключение)

Мл. науч. сотр.,
канд. физ.-мат. наук

30.12.2022

подпись, дата

А.Ю. Сидоренков
(раздел 6, заключение)

Стажер-исследователь

30.12.2022

подпись, дата

Н.А. Ушаков
(раздел 6)

Стажер-исследователь

30.12.2022

подпись, дата

А.Н. Фазлиахметов
(раздел 6)

Мл. науч. сотр.,
канд. физ.-мат. наук

30.12.2022

подпись, дата

С.А. Федотов
(раздел 1, 4)

Науч. сотр.,
канд. физ.-мат. наук

30.12.2022

подпись, дата

А.Н. Хотянцев
(раздел 1, 2, 4, 5)

Стажер-исследователь

30.12.2022

подпись, дата

А.С. Шварцман
(раздел 1, 2)

Науч. сотр.

30.12.2022

подпись, дата

А.А. Шихин
(раздел 6, заключение)

Нормоконтроль

30.12.2022

подпись, дата

О.Н. Либанова

РЕФЕРАТ

Отчет 27 с., 1 кн., 11 рис., 2 табл., 1 прил.

ОСЦИЛЛЯЦИИ НЕЙТРИНО, ЭКСПЕРИМЕНТ Т2К/Т2К-II/ГИПЕР-КАМИОКАНДЕ, ЧЕРЕНКОВСКИЙ ДЕТЕКТОР, СЦИНТИЛЛЯТОР, БОЛЬШОЙ БАКСАНСКИЙ НЕЙТРИННЫЙ ТЕЛЕСКОП, ЛАБ, ЭКСТРАКТОР, СОРБЦИОННАЯ ОЧИСТКА.

Основной целью исследований является разработка, создание и запуск нейтринных детекторов следующего поколения для проведения прецизионных измерений осцилляционных параметров нейтрино, поиска нарушения СР и СРТ инвариантности в лептонном секторе Стандартной модели в ускорительных экспериментах. Проведение работ для нового низкопорогового низкофонового сцинтилляционного комплекса Большого баксанского нейтринного телескопа (ББНТ) для изучения солнечных нейтрино и гео-нейтрино с низким порогом регистрации и высоким энергетическим разрешением.

Силами ИЯИ РАН созданы активные элементы и необходимая механика нового уникального детектора 3D SuperFGD для проектов Т2К-II/Т2К-Гипер-Камиоканде (Япония), начаты работы по окончательной сборке детектора в Японии.

Совместно с НИИ полимеров им. Каргина (г. Дзержинск) созданы прототипы спектросмещающих пластин для внешней части водного Черенковского детектора Гипер-Камиоканде, чьи свойства существенно лучше имеющихся аналогов. Проведены измерения в Баксанской лаборатории радиоактивных примесей спектросмещающих пластин для новых детекторов нейтрино.

Созданы новые прототипы сцинтилляционных счетчиков для вето-системы промежуточного детектора проекта Т2К-Гипер-Камиоканде.

Изготовлена и испытана система очистки линейного алкилбензола (ЛАБ) методом водной экстракции. Показана достижимость необходимых технологических параметров при очистке больших (сотни литров в час) количеств ЛАБа.

Успешно выполняется работа по созданию в ИЯИ РАН экспериментальной базы для получения результатов мирового уровня по описанию свойств нейтрино в широком диапазоне энергий, а также различных типов и источников нейтрино: атмосферные, солнечные, гео-нейтрино, для построения как можно более полной картины описания роли нейтрино в основных физических моделях: космология, астрофизика, геофизика.

СОДЕРЖАНИЕ

СПИСОК ИСПОЛНИТЕЛЕЙ.....	2
РЕФЕРАТ	4
СОДЕРЖАНИЕ.....	5
ВВЕДЕНИЕ	6
1. Создание нового сцинтилляционного детектора 3D SuperFGD для комплекса ближних детекторов ND280 проектов T2K/T2K-II/Гипер-Камиоканде.....	10
2. Разработка прототипа внешнего детектора нового водного Черенковского детектора Гипер-Камиоканде	12
3. Проведение измерений радиоактивных свойств смектросмещающих пластин для новых детекторов нейтрино	14
4. Разработка прототипа детекторов для вето системы промежуточного детектора проекта Гипер-Камиоканде	16
5. Изучение параметров ФЭУ для внешнего Черенковского детектора Гипер-Камиоканде.	18
6. Система очистки линейного алкилбензола (ЛАБ) методом водной экстракции.....	20
6.1. Метод сорбционной очистки ЛАБа на оксиде алюминия.....	21
ЗАКЛЮЧЕНИЕ.....	24
ПРИЛОЖЕНИЕ А Список публикаций исполнителей отчета за 2022 г.	27

ВВЕДЕНИЕ

1. Задача «Создание нового сцинтилляционного детектора 3D SuperFGD для комплекса ближних детекторов ND280 проектов T2K/T2K-II/Гипер-Камиоканде»

В рамках выполнения задачи будет создан и запущен в работу сцинтилляционный детектор нейтрино СуперFGD.

В настоящее время при активном и ключевом участии ИЯИ РАН ведутся работы по модернизации ближнего детекторного комплекса ND280 ускорительного нейтринного осцилляционного эксперимента T2K (JPARC Токай, Камиока, Япония): детектор нейтральных пионов P0D будет замещен на активную мишень для нейтринных взаимодействий 3D SuperFGD, окруженную двумя горизонтальными время-проекционными камерами HTPC и временными детекторами пробега TOF. Новая структура позволит эффективно регистрировать продукты реакций нейтрино в широком диапазоне фазового пространства, в частности частицы, выходящие под большими углами к оси пучка нейтрино, что является важным для измерения и настройки параметров моделей взаимодействия нейтрино с веществом, учета вклада ядерных процессов, особенно проявляющихся при большой передаче импульса нейтрино. Получится достичь эффективной регистрации продуктов реакций во всем 4π диапазоне, что соответствует чувствительности дальнего детектора Супер-Камиоканде. Таким образом удастся существенно снизить систематические ошибки, связанные с описанием взаимодействия нейтрино с веществом в области энергий ~ 1 ГэВ, что напрямую влияет на точность измерения параметров осцилляций и чувствительность к поиску CP-нарушения в лептонном (нейтринном) секторе. Также, благодаря возможности восстановления полной кинематики нейтринных взаимодействий, ожидается получение новых данных по измерению сечений реакций нейтрино с веществом в различных каналах.

Детектор состоит из 2-х миллионов сцинтилляционных кубиков, каждый объемом в 1 кубический сантиметр, с тремя ортогональным отверстиями для спектросмещающих волокон. Технология изготовления таких сцинтилляционных детекторов была разработана в результате совместной работы ИЯИ РАН с ООО Унипласт (г. Владимир). Этот детектор будет центральным элементом комплекса ближнего нейтринного детектора ND280Upgrade в эксперименте T2K-II (улучшенный детектор ND280 + апгрейд нейтринного пучка JPARC) и будущем проекте Гипер-Камиоканде.

2. Задача «Разработка прототипа внешнего детектора нового водного Черенковского детектора Гипер-Камиоканде»

В рамках выполнения задачи будет разработан и создан прототип внешнего вето детектора для водного Черенковского детектора Гипер-Камиоканде.

К настоящему моменту эксперименты с различными источниками нейтрино позволили во многом изучить эффект нейтринных осцилляций, однако для построения полной картины смешивания, получения ответов на такие фундаментальные вопросы, как наличие CP/CPT-нарушения в лептонном секторе, определение иерархии масс массовых состояний, поиск возможных симметрий и понимание структур смешивания в кварковом и нейтринном секторах, необходимо проведение экспериментов нового поколения, особая роль отводится ускорительным экспериментам с длинной базой, с пучками мюонных (анти)нейтрино высокой интенсивности и чистоты, в этих проектах нейтрино как правило регистрируются дважды: комплексом ближних детекторов и дальним детектором большого объема. Ускорительные эксперименты такого класса являются крупными сложными технологическими проектами, требующими широкого международного сотрудничества. Стоит отметить два проекта: эксперимент DUNE (США) с дальним детектором на жидком аргоне, а также проект Гипер-Камиоканде (Япония) на пучке T2K. Именно в этих проектах планируется решить вопрос (чувствительность $> 5\sigma$) с наличием CP-нарушения. Работы по подготовке эксперимента Гипер-Камиоканде являются одной из основных частей настоящих исследований. Дальний детектор Гипер-Камиоканде — это водный Черенковский детектор (самого) большого (в мире) объема: Супер-Камиоканде (K2K/T2K) 50 килотонн $\rightarrow$ Гипер-Камиоканде 258 килотонн. Физическая программа широка: исследование ускорительных, солнечных, атмосферных, космических нейтрино, а также поиск распада протона. ИЯИ РАН принимает участие в разработке внешнего детектора Гипер-Камиоканде. Основная идея состоит в создании модулей, состоящих из ФЭУ небольшого размера и спектромещающих пластин. Пластины поглощают Черенковский свет от заряженных частиц в ультрафиолетовой области и переизлучают его в видимой области, к которой ФЭУ обладают высокой чувствительностью. Предложено использование отечественных пластин на основе полиметилметакрилата (ПММА). Необходимо провести исследования для выбора оптимального химического состава, геометрии пластин, дополнительного отражателя для обеспечения задач вето детектора, также разработать механику детектора: устройства для закрепления пластин и ФЭУ, с учетом необходимости стабильной работы в течение как минимум десяти лет. Также требуется разработать технологию проверки качества на этапе массового производства пластин.

3. Задача «Проведение измерений радиоактивных свойств смектросмещающих пластин для новых детекторов нейтрино»

В рамках выполнения задачи будет исследована радиоактивность используемых в нейтринных детекторах материалов.

Необходимо выполнить измерения радиоактивных примесей в образцах спектросмещающих пластин (материалы и компоненты PMMA, POPOP, PPO, bis-MSB), задача является важной для проведения прецизионных измерений нейтрино и поиска распада протона с низким порогом в проекте Гипер-Камиоканде. Также задача стоит более широко: в рамках работы планируется наладить сотрудничество с Баксанской лабораторией по проведению измерений чистоты и наличия примесей в элементах, используемых в нейтринных детекторах ускорительных экспериментов, что несомненно важно для подготовки будущих проектов, для которых требования существенного снижения фоновых процессов играет ключевую роль.

4. Задача «Разработка прототипа детекторов для вето системы промежуточного детектора проекта Гипер-Камиоканде»

В эксперименте Гипер-Камиоканде, основной целью которого является поиск CP-нарушения в нейтринных осцилляциях, для повышения чувствительности эксперимента планируется создание промежуточного водного Черенковского детектора массой около 1 килотонны, который будет установлен на расстоянии около 1 км от пионорождающей мишени на сильноточном протонном ускорителе JPARC. Комбинация данных магнитного трекового детектора ND280, который расположен на расстоянии 280 метров от мишени, и промежуточного детектора позволит существенно снизить систематические погрешности осцилляционных измерений в эксперименте Гипер-Камиоканде. Поскольку промежуточный детектор будет расположен в шахте глубиной всего несколько десятков метров, эффективная идентификация и подавление фона от космических мюонов являются одним из ключевых условий для его успешного функционирования. ИЯИ РАН занимается разработкой вето детекторов заряженных частиц в фото модулях, состоящих из 19 ФЭУ диаметром 80 мм. Основу вето детекторов составляют экструдированные сцинтилляционные пластины с внедренными спектросмещающими волокнами. Задача состоит в определении оптимальной структуры детектора, отдельных компонентов, таких как способ размещения волокна для увеличения светосбора. Необходимо показать способность эффективной регистрации частиц по всей поверхности детектора. В дальнейшем требуется разработать механику детектора, выполнить подготовку линии (производство — тесты) к массовому производству счетчиков.

5. Задача «Изучение параметров ФЭУ для внешнего Черенковского детектора Гипер-Камиоканде»

В рамках выполнения задачи будут изучены параметры 80 мм ФЭУ для внешнего Черенковского детектора Гипер-Камиоканде.

Цель достижения эффективной регистрации света в детекторе Гипер-Камиоканде, а также построение корректной физической модели детектора для симуляции данных требуют глубокого понимания аспектов работы фотоумножителей. Целью настоящих исследований является детальное изучение параметров 80 мм ФЭУ для внешнего Черенковского детектора Гипер-Камиоканде: квантовая эффективность фотокатода, однородность фотокатода, временное и амплитудное разрешение одноэлектронного пика, радиоактивность материалов. Эти работы выполняются различными участниками проекта Гипер-Камиоканде, в том числе группой ИЯИ РАН, для Института работа непосредственно связана с задачами по разработке модулей ФЭУ+спектрсмещающая пластина для конечного детектора. Важным дальнейшим этапом является изучение надежности работы ФЭУ под давлением 10 атмосфер для использования в детекторе.

6. Задача «Система очистки линейного алкилбензола (ЛАБ) методом водной экстракции»

В рамках выполнения задачи будет выполнена работа по разработке системы очистки жидкого сцинтиллятора для нового подземного Большого Баксанского Нейтринного Телескопа (ББНТ)

В качестве сцинтиллятора для нового подземного ББНТ планируется использовать жидкий органический сцинтиллятор на основе линейного алкилбензола (ЛАБ). При этом сцинтиллятор должен обладать хорошими оптическими характеристиками (длина поглощения света при 420 нм не менее 20 м) и низким содержанием радиоактивных примесей таких как ^{238}U и ^{232}Th на уровне менее 1×10^{-17} г/г и ^{40}K менее чем 1×10^{-18} г/г, а также радиоактивных газов Ar, Kr, Rn и т.д. Промышленно изготавливаемый ЛАБ не обладает необходимыми характеристиками и достижение требуемых свойств возможно только с использованием комплексной системы очистки, включающей ультра-фильтрацию, жидкостную экстракцию, сорбционную очистку, дистилляцию и газовую продувку.

1. Создание нового сцинтилляционного детектора 3D SuperFGD для комплекса ближних детекторов ND280 проектов T2K/T2K-II/Гипер-Камиоканде

За отчетный период закончен основной объем работ по разработке и созданию нового уникального детектора нейтрино 3D SuperFGD, являющегося частью нового улучшенного комплекса ближних детекторов ND280 проекта T2K, который в свою очередь будет работать в составе проектов T2K-II/Гипер-Камиоканде (рисунок 1), будущих экспериментов по прецизионному изучению параметров смешивания нейтрино на ускорителях. Детектор 3D SuperFGD представляет собой сборку из 2-х миллионов сцинтилляционных кубиков, каждый объемом 1 кубический сантиметр, с тремя ортогональным отверстиями для спектросмещающих WLS (Kuraray Y11) волокон. Светосбор осуществляется с одной стороны волокна с помощью кремниевых мультипиксельных фотодетекторов Hamamatsu MPPC (Япония), вторая сторона покрыта отражателем. Дизайн детектора был предложен и реализован силами ИЯИ РАН. Технология изготовления таких сцинтилляционных детекторов была разработана в результате совместной работы ИЯИ РАН с ООО «Унипласт (г. Владимир). Кубики изготавливаются методом литья под давлением. Сцинтиллятор состоит из полистирола с добавлением 1,5% паратерфенила (РТР) и 0,01% 1,4-бис(трихлорметил)бензола (РОРОР). Общая масса детектора около 2 тонн, также используются около 60000 каналов считывания. Детектор SuperFGD позволяет использовать геометрическую и зарядовую информацию для эффективного восстановления различных топологий нейтринных взаимодействий, снизить порог регистрации пионов и протонов, что важно для учета ядерных процессов при реакциях нейтрино. Высокое временное разрешение (< 1 нс для одного кубика/волокна) также даст возможность регистрации нейтронов — продуктов реакций, что существенно для работы с нейтринными и антинейтринными взаимодействиями. По итогам работы выполнено создание активных элементов детектора, внешнего бокса для размещения активной части и подключения каналов электроники, создана механика детектора, система для сборки детектора на месте в Японии, соответствующая платформа, здесь особенно критичным является сейсмоустойчивость элементов. Проведено множество измерений различных параметров отдельных кубиков: геометрии, массы, первое важно для успешной сборки сложного детектора, соединения множества кубиков оптоволоконными. Завершена сборка на лесках, которые впоследствии будут заменены на WLS волокна, конечных 56 слоев детектора (рисунок 2).

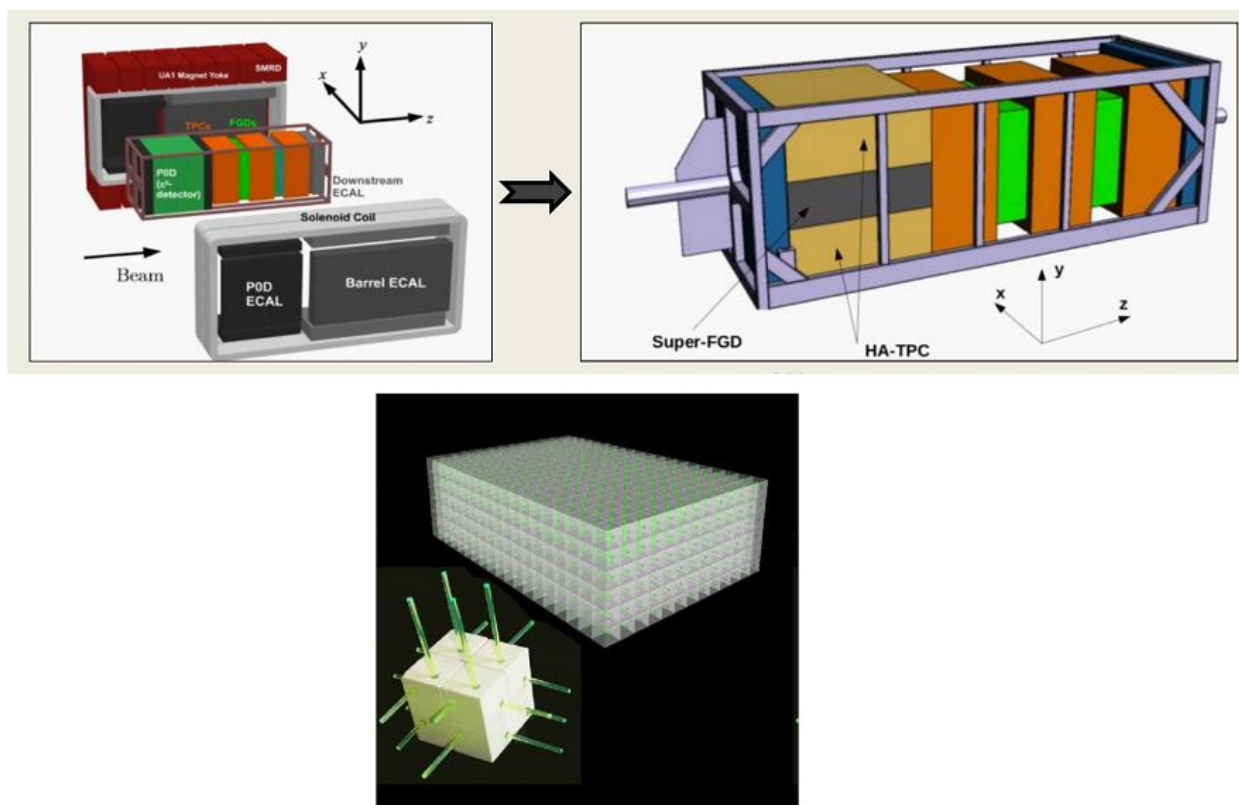


Рисунок 1 – Детектор ND280Upgrade и его часть 3D SuperFGD. Вверху – схема апгрейда ближнего детектора ND280 T2K, внизу – изображение детектора 3D SuperFGD и отдельного кубика сцинтиллятора с оптоволоконнами



Рисунок 2 – собранные вместе на лесках слои детектора 3D SuperFGD в JPARC, Япония, перед установкой во внешний бокс

Стоит также упомянуть, что группа ИЯИ РАН принимает активное участие в разработке программного обеспечения для моделирования детектора (также важно при разработке структуры), анализа данных и непосредственно в анализе данных детекторов ND280-ND280Upgrade, включая 3D SuperFGD.

2. Разработка прототипа внешнего детектора нового водного Черенковского детектора Гипер-Камиоканде

В проекте Гипер-Камиоканде внешний Черенковский детектор служит для учета фоновых событий, в частности космических мюонов, а также событий из породы, окружающей детектор. Размер области детектора, то есть области между внутренней и внешней оболочками Гипер-Камиоканде, относительно мал: 1 м по сторонам и 2 м сверху и снизу, таким образом стоит задача увеличения светосбора для эффективной регистрации частиц. Граница между детекторами покрыта отражающим материалом Tyvek. Во внешнем детекторе планируется использовать около 10000 ФЭУ, чрезвычайно важной задачей является оптимизация числа ФЭУ с учетом эффективности регистрации света и общей стоимости. Основная идея увеличения световыхода состоит в создании модулей, состоящих из ФЭУ небольшого размера (диаметр 80 мм) и спектросмещающих WLS пластин размером около 30 x 30 см. Пластины поглощают Черенковский свет от заряженных частиц в ультрафиолетовой области и переизлучают его в видимой области, к которой ФЭУ обладают высокой чувствительностью. Такая концепция реализована во внешнем детекторе Супер-Камиоканде. В рамках выполнения задания решались задачи по выбору материала пластины, спектросмещающих добавок, оптимизации размера и формы отверстия для размещения ФЭУ. ИЯИ РАН начата совместная работа с НИИ полимеров им. Каргина (г.Дзержинск) по производству и исследованию спектросмещающих пластин для нужд нейтринных детекторов. Были изготовлены пластины на основе полиметилметакрилата (ПММА) с различными спектросмещающими добавками и их пропорциями: BisMSB, POPOP, PPO. В ИЯИ РАН подготовлена экспериментальная установка для тестирования пластин (рисунок 3). Исследования проводились с помощью LED диода с длинами волн 265, 315, 380 и 405 нм, источник помещался в различные точки пластины на определенном расстоянии от ФЭУ Hamamatsu R14374 диаметром 80 мм. Добавки имеют различную область поглощения света: PPO — 240-310 нм, BisMSB и POPOP — 300-400 нм. Использование двойных добавок, таким образом, позволяет покрыть широкую область Черенковского спектра: 250-400 нм, в случае двойных добавок наблюдался световой сигнал примерно в 1,5 раза больший по сравнению с одной добавкой. Изучались также коммерческие пластины EJ286 (США) на основе ПВТ (поливинилтолуол). Наибольший световыход показали пластины, изготовленные в НИИ полимеров с добавками POPOP и POP. BisMSB довольно широко применяется, например, эта добавка используется в Супер-Камиоканде, среди преимуществ указывается хорошая растворимость в основном материале, в НИИ полимеров были проведены соответствующие

исследования и показано, что полные времена полимеризации для BisMSB и РОРОР практически совпадают. Были проведены исследования пластин с различной концентрацией добавок, для РРО оптимальная концентрация составила 3 г/л, в области 3-7 г/л свойства практически не меняются, а большая концентрация приводит к уменьшению световыхода. Для РОРОР была выбрана концентрация 50 мг/л, которая эффективна в области более коротких волн 250-320 нм. Проведены исследования различных отражателей на торцах пластины для увеличения световыхода: диффузный отражатель Tyvek, зеркальный отражатель алюминизированная майларовая пленка, зеркальный отражатель полимерная пленка 3М DF2000МА. Наибольший эффект, более чем в два раза по сравнению с Tyvek, наблюдался для пленки 3М DF2000МА. Также был рассмотрен вклад отражателя на задней стороне пластины, эффект для переизлученного света составляет около 10%, отражатель также полезен для сбора прямых Черенковских фотонов. Оптимальный размер пластин был установлен на основе моделирования детектора — 30 x 30 см². Пластины большего размера не эффективны, так как поглощают свет в УФ диапазоне, но для видимых фотонов являются по сути поглотителем. Определялась также оптимальная толщина пластин, здесь использовались непосредственные измерения и результаты моделирования, дополнительно необходимо учитывать стоимость материала — был выбран размер в 6 мм. Моделирование также применялось для оптимизации формы пластины — выбрана квадратная форма. Измерения выполнялись для подбора формы и размера отверстия для размещения 80 мм ФЭУ, оптимальным оказалось цилиндрическое отверстие диаметром 78 мм. Всего для исследований в рамках задания на данный момент в НИИ полимеров изготовлено более ста пластин. Также в ИЯИ РАН было закуплено оборудование: фрезерные, сверлильные станки для обработки пластин из ПММА и конструкций механики для лабораторных исследований, прототипов и конечных детекторов, 3D принтеры для изготовления прототипов крепежных элементов — здесь продолжаются работы по созданию оптимальной конструкции.

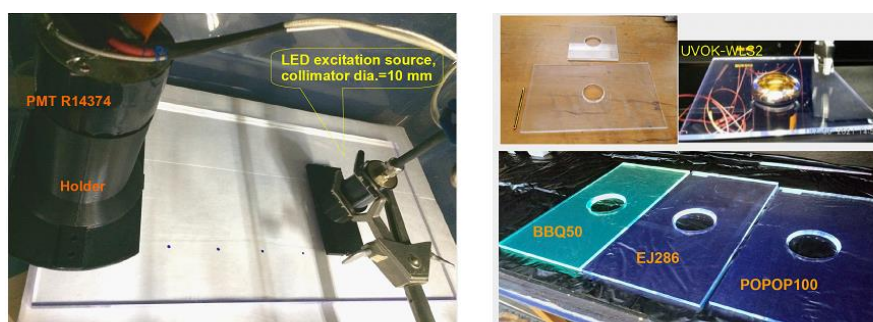


Рисунок 3 – исследование спектросмещающих пластин в ИЯИ РАН. Слева – установка для исследования пластин, справа - различные прототипы пластин для внешнего детектора Гипер-Камиоканде

3. Проведение измерений радиоактивных свойств спектросмещающих пластин для новых детекторов нейтрино

Дан старт работ по тестированию в Баксанской низкофоновой лаборатории наличия радиоактивных примесей элементов будущих детекторов ускорительных нейтрино. Так, изучалась радиоактивность различных по составу и месту производства спектросмещающих пластин для внешнего детектора Гипер-Камиоканде. Исследования проводились в зале D NICA (рисунок 4), который расположен на глубине, соответствующей 660 м водного эквивалента. экспериментальный зал также имеет защиту из низкофонового бетона, ультраосновной магматической породы и стали, в детекторной части - дополнительная защита из свинца (100 мм) и меди (100 мм), для регистрации ионизирующего излучения применяется германиевый полупроводниковый детектор (рисунок 4).

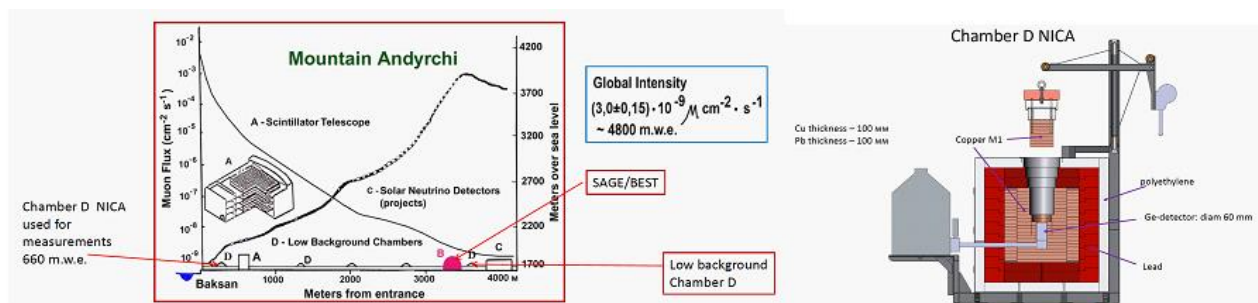


Рисунок 4 – проведение исследований радиоактивности элементов детектора в Баксанской лаборатории. Слева – схема расположения экспериментальных залов, справа – схема детекторной части для проведения исследований

Было проведено исследование пяти образцов спектросмещающих пластин: EJ286 (США) на основе ПВТ (поливинилтолуол) и на основе ПММА (Дзержинск, Россия) с различными добавками — bisMSB, РОРОР и РРО. Набор данных для каждого образца проводился в течение 400-600 часов. Для большинства пластин полученные спектры γ -активности оказались в пределах ожидаемого фона, стоит отметить образец с bisMSB, где видны линии, превышающие ожидаемый фон, например, линия от ^{226}Ra (^{214}Bi) (рисунок 5).

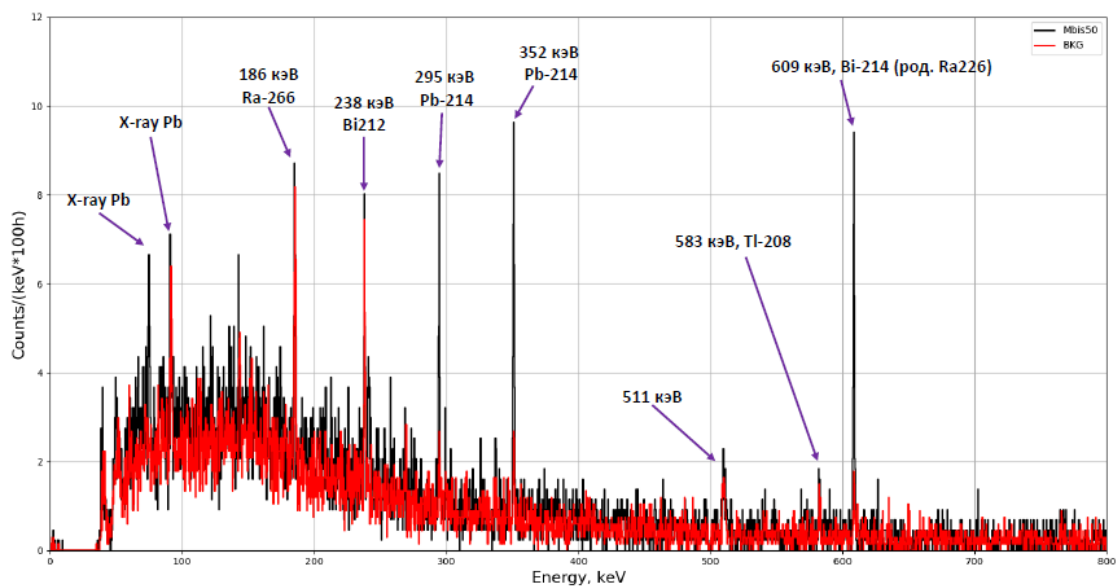


Рисунок 5 – измеренный спектр для образца ПММА с добавкой bisMSB

Предварительный результат: в целом не обнаружено существенного превышения уровня фона при измерении спектросмещающих пластин: активности основных элементов — ^{40}K , ^{228}Ac , ^{208}Tl , ^{226}Ra (^{214}Bi) составляют < 600 мБк/кг, < 60 мБк/кг, < 20 мБк/кг, < 60 мБк/кг соответственно. Для продолжения исследований требуется дополнительное снижение фона.

4. Разработка прототипа детекторов для вето системы промежуточного детектора проекта Гипер-Камиоканде

В промежуточном детекторе проекта Гипер-Камиоканде в качестве фотоприемников Черенковского света будут использоваться модули, имеющие вид полусферы и состоящие из 19 ФЭУ диаметром 80 мм. Рассматриваются несколько возможных вариантов вето системы заряженных частиц. ИЯИ РАН было предложен один из наиболее оптимальных вариантов: использование сцинтилляционных детекторов в виде дисков, которые устанавливаются в нижней части модуля, рисунок 6. Сцинтилляционный сигнал регистрируется с помощью спектросмещающих волокон, вклеенных в сцинтиллятор, и Кремниевых Фотоумножителей (КФУ). Сцинтилляционные детекторы состоят из двух полукругов, вырезанных из пластин сцинтиллятора на основе полистирола с 1,5% паратерфенила РТР и 0,25% РОРОР, изготовленного ООО «Унипласт» (г.Владимир) методом экструзии. Детектор имеет диаметр 350 мм и толщину 7 мм (рисунок 7). На поверхности детектора путем химического вспенивания сцинтиллятора образован тонкий (около 0.1 мм) слой с диффузным отражением. Свет с детектора собирается с помощью спектросмещающего волокна Y11(200) MSY диаметром 1 мм и длиной 650 мм, вклеенного в изогнутую S-образную канавку шириной 1,2 мм и глубиной 3,5 мм с помощью гелисилоксановой композиции СУРЭЛ-СЛ1, ТУ 38.303.04.1-21-98 компании ООО «СУРЭЛ». В качестве примера, такая форма канавки позволила получить высокий световыход и высокую эффективность регистрации заряженных частиц в сцинтилляционных счетчиках мюонного детектора (SMRD, разработан ИЯИ РАН) в эксперименте Т2К. Концы спектросмещающего волокна обрезаются с помощью алмазного резца, что обеспечивает качество поверхности близкое к качеству, получаемому полировкой. Свет с одного конца спектросмещающего волокна регистрируется КФУ МРРС S13081-050CS(X1), присоединенного с помощью простого оптического разъема. Другой конец волокна покрыт серебряной краской Silver Shine компании Eptainks, Италия. Два полукруга объединены в полный детектор. Измерения световыхода одной из половин сцинтилляционного детектора проводились с помощью радиоактивного источника ^{90}Sr . Моделирование измерительной установки с помощью GEANT4 показало, что среднее значение световыхода испытываемого детектора к электронам от ^{90}Sr близко к среднему значению световыхода для минимально ионизирующих частиц перпендикулярных поверхности детектора. Световыход сцинтилляционных детекторов в собранном состоянии был также измерен с использованием космических мюонов. Относительно простые и дешевые детекторы с одним спектросмещающим волокном, вклеенным в изогнутую канавку в сцинтилляторе, и фотоприемником КФУ, имеют световыход для

перпендикулярно падающих на детектор минимально ионизирующих частиц от 10 до 40 фотоэлектронов в зависимости от точки прохождения частицы через сцинтиллятор. Такой световыход должен обеспечить эффективность регистрации космических мюонов детектором более 99%, что заведомо удовлетворяет требованиям к оптическим модулям промежуточного Черенковского детектора проекта Гипер-Камиоканде. Планируется дальнейшее тестирование образцов для подбора оптимальной структуры детектора и подготовка к массовому производству модулей.

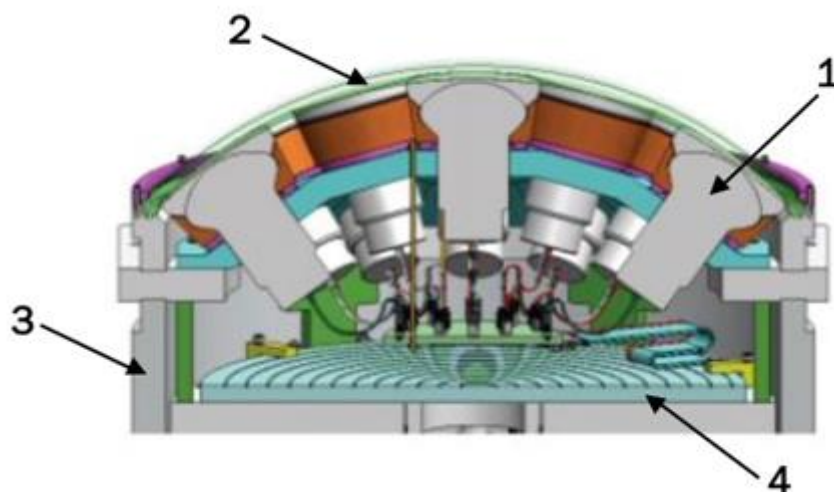


Рисунок 6 – Геометрия оптического модуля промежуточного водного Черенковского детектора. 1 – ФЭУ, 2 – прозрачный колпак из акрила, 3 – корпус модуля, 4 – сцинтилляционный вето детектор

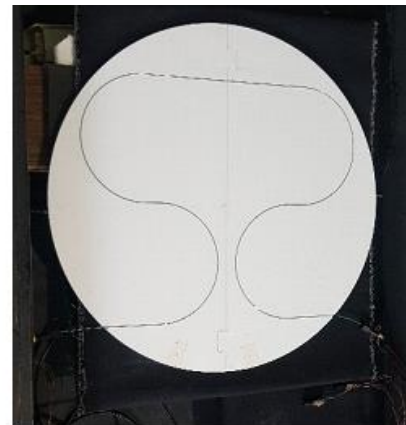
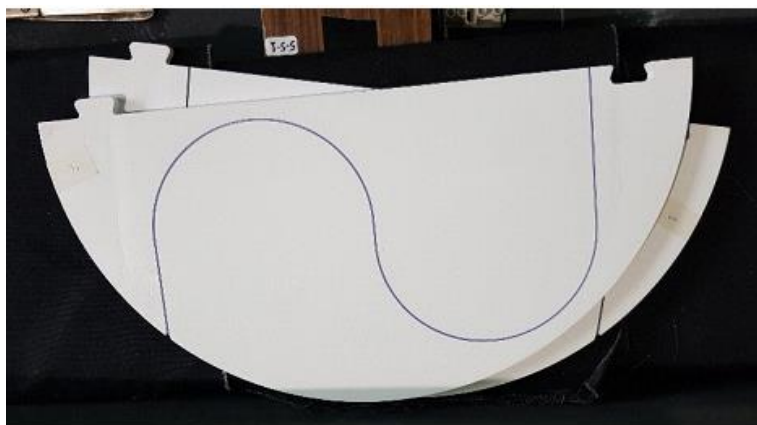


Рисунок 7 – Фотографии сцинтилляционного детектора. Слева – две половины детектора, справа – полный собранный детектор

5. Изучение параметров ФЭУ для внешнего Черенковского детектора Гипер-Камиоканде

Для успешного выполнения физической программы проекта Гипер-Камиоканде предъявляются высокие требования к используемым фотоумножителям ФЭУ, которые должны обеспечить высокую эффективность регистрации фотонов, низкий уровень шумов, также высокую стабильность работы на протяжении не менее ~ 10 лет во время набора данных. Важным является детальное понимание параметров ФЭУ, квантовой эффективности фотокатода, однородности фотокатода, временного и амплитудного разрешения одноэлектронного пика для точной оценки чувствительности детектора, построения корректной и полной физической модели модулей Гипер-Камиоканде, оптимизации структуры элементов детектора, например, связки ФЭУ + WLS пластины, где важно учесть взаимное расположение частей для эффективного сбора фотонов. В ИЯИ РАН проведены измерения для ФЭУ Hamamatsu R14374 диаметром 80 мм. Изображение изготовленной экспериментальной установки представлено на рисунке 8. Измерения проводятся с использованием LED диода с длиной волны 380 нм, изменяя полярный угол можно исследовать радиус катода в диапазоне 0-40 мм, азимутальный угол выбирается произвольно, измерения проводились для различных азимутальных секторов.

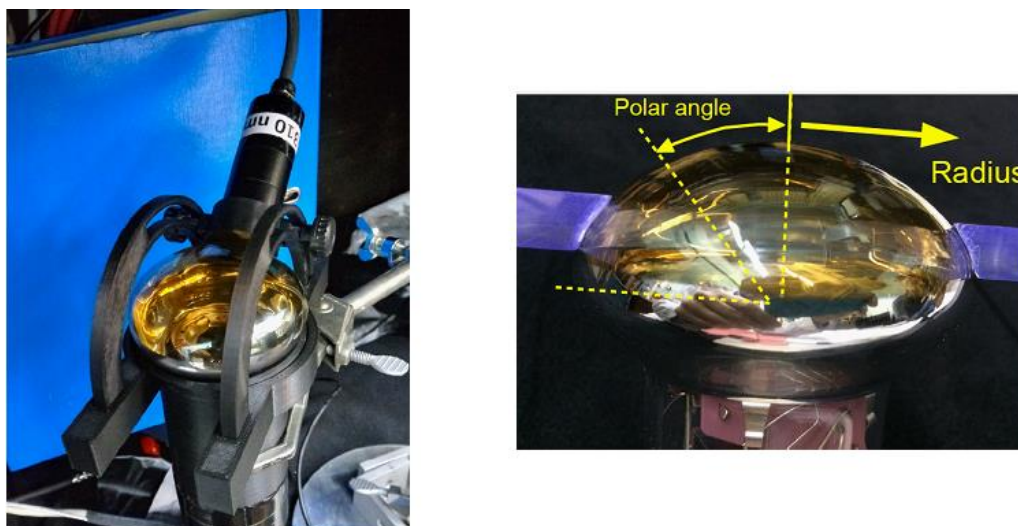


Рисунок 8 – Установка для исследований ФЭУ

Полученная относительная эффективность регистрации фотонов однородна по фотокатоду, ее падение соответствует радиусу 35 мм, что подтверждает заявленную Hamamatsu спецификацию диаметра фотокатода в 72 мм (рисунок 9).

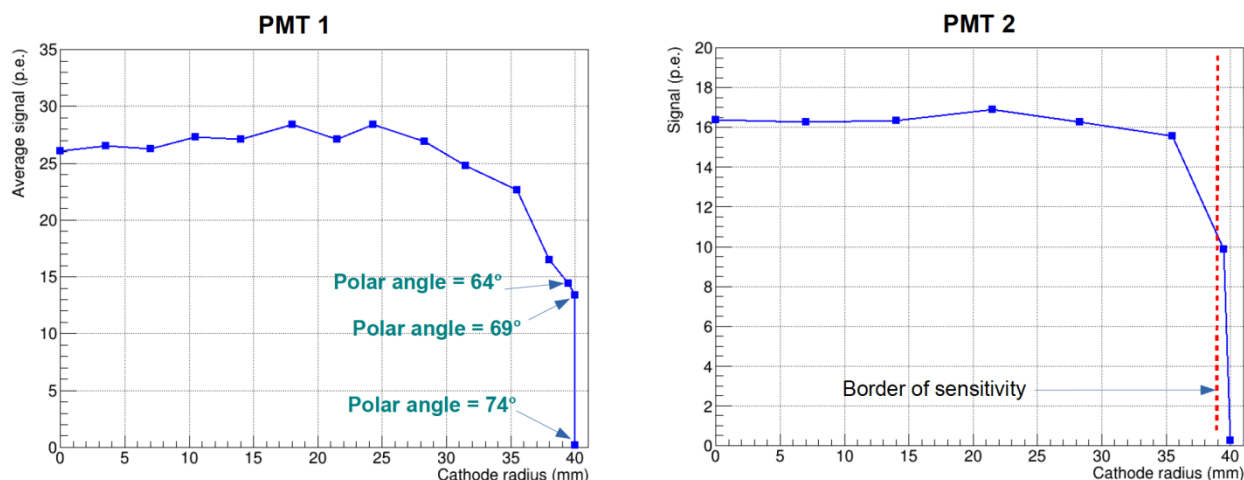


Рисунок 9 – Измерения относительность квантовой эффективности 80 мм ФЭУ для внешнего детектора Гипер-Камиоканде

Полученные значения используются для оптимизации взаимного расположения спектросмещающей пластины и ФЭУ, выбора формы отверстия для размещения ФЭУ, здесь также учитывается эффективность сбора первичных и вторичных переизлученных пластиной фотонов, исследовались цилиндрическая и коническая формы отверстий, их различный размер, для 80 мм ФЭУ оптимальным является вариант с использованием цилиндрического отверстия диаметром 78 мм.

Также проводились исследования темнового шума ФЭУ, порог устанавливался на уровне 0,5 фотоэлектронов. Значения зависят от температуры и составляют около 400 Гц для комнатной температуры. После помещения в светоизолированную установку требуется некоторое время (1-2 часа) для стабилизации темнового сигнала, это связано с послесвечением элементов ФЭУ: стекло, различные компоненты ФЭУ, возможные примеси. Измерения используются для последующего сравнения уровня темновых сигналов связки ФЭУ + WLS пластина, в этом случае иногда можно видеть флуктуации темнового сигнала, достигающего до уровня 1-3 кГц, наблюдаемого в течение нескольких дней измерений. В соответствии с данными измерений в низкофоновой Баксанской лабораторий сделан вывод об источнике фона, захватываемого пластиной, при измерениях в ИЯИ РАН (Троицк, Москва), который удастся значительно подавить, используя пассивную свинцовую защиту, ведутся работы по соответствующему улучшению экспериментальной установки для дальнейшего проведения исследований элементов детектора Гипер-Камиоканде. Отметим связь указанных работ с измерениями в низкофоновой Баксанской лаборатории.

6. Система очистки линейного алкилбензола (ЛАБ) методом водной экстракции

За отчетный период была изготовлена и испытана система очистки линейного алкилбензола (ЛАБа) методом водной экстракции. Метод водной экстракции основан на различии растворимостей ионов тяжелых металлов в воде и ЛАБе и используется для очистки ЛАБа от радиоактивных примесей тяжелых металлов U^{238} , Th^{232} и K^{40} . Система очистки состоит из каскада двух центробежных экстракторов, полностью изготовленных из фторопласта (рисунок 10). На рисунке 11 показана гидравлическая схема движения потоков ЛАБа (органическая фаза) и воды. С помощью перистальтического насоса органическая фаза и вода подаются в смесительную камеру первого экстрактора, где происходит образование эмульсии вода-ЛАБ, и тяжелые металлы переходят из ЛАБа в водную фазу. Затем в центробежной части экстрактора ЛАБ отделяется от воды и поступает во второй экстрактор для дополнительной очистки аналогичным путем. Суммарная пропускная способность экстракторов составляет 400 л/час, таким образом при соотношении потоков водная фаза:органическая фаза = 3:1 производительность установки по ЛАБу составляет 100 л/час.



Рисунок 10 – Система экстракционной очистки ЛАБа

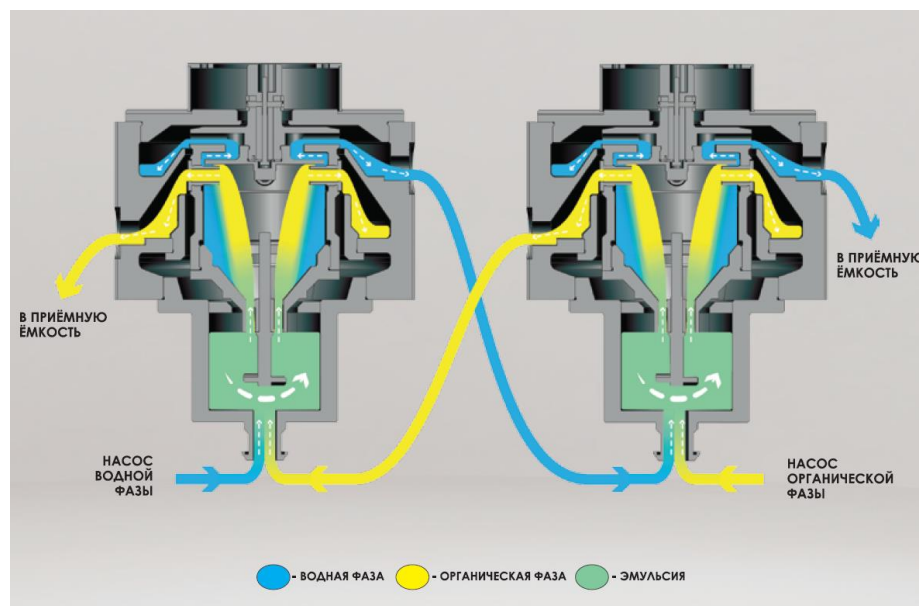


Рисунок 11 – Гидравлическая схема экстракционной очистки ЛАБа

Была продемонстрирована эффективность очистки ЛАБа от K^{40} , при этом содержание калия определялось методом ICP-OES, эффективность очистки ЛАБа от U^{238} и Th^{232} будет определена после разработки методов контроля этих примесей.

6.1. Метод сорбционной очистки ЛАБа на оксиде алюминия

Для повышения оптических характеристик сцинтиллятора был исследован метод сорбционной очистки ЛАБа на оксиде алюминия. Сорбционная очистка позволяет в первую очередь удалить из ЛАБа продукты его окисления при контакте с кислородом в воздухе и в результате увеличить длину поглощения света в ЛАБе. Было показано, что эффективность очистки возрастает при активации оксида алюминия при $250\text{ }^{\circ}\text{C}$ в вакууме в течение 5 часов. После такой обработки один объем оксида алюминия позволяет провести очистку более 10 объемов ЛАБа. Однако, было установлено, что имеющийся оксид алюминия обладает очень высоким гидравлическим сопротивлением за счет наличия частиц очень мелкой фракции. Это приводит к существенным трудностям при очистке больших количеств ЛАБа. Был определен фракционный состав имеющегося в наличии оксида алюминия производства Донецкого завода.

Фракционный состав определялся просеиванием исходного порошка через сита с различными размерами ячеек: 315, 56, и 40 мкм. Исходный порошок предварительно прокаливался в вакуумном сушильном шкафу при температуре $\sim 150\text{ }^{\circ}\text{C}$ в течение 4–5 часов. Убыль веса при этом составила 0,6%. В процессе просеивания на ситах оставалось $0,55 \pm 0,09$ г мелкого порошка, забивающего ячейки и препятствующего дальнейшему просеиванию. Поэтому после каждого просеивания сита промывались де-ионизованной водой и высушивались в сушильном шкафу при температуре $100\text{ }^{\circ}\text{C}$ в течение 5–10 мин.

Процентное содержание фракции порошка с размером > 315 мкм по результатам просеивания 100 и 50 г оксида алюминия составило $0,7 \pm 0,08$ %.

Процентное содержание фракции с минимальным размером частиц (менее 40 мкм) определялось по результатам последовательного просеивания 25 г исходного порошка через сито с размером ячейки 40 мкм и составило $35,5 \pm 2,3$ %. Результаты показаны в таблице 1.

Таблица 1 – Результаты определения процентного содержания фракции минимального размера (< 40 мкм)

Просев	m, г	σ , г	%
1	5,49	0,33	$22 \pm 1,3$
2	2,525	0,15	$10,1 \pm 0,6$
3	0,86	0,05	$3,4 \pm 0,2$
Итого			$35,5 \pm 1,6$

Процентное содержание фракций с размерами порошка диаметром (d) $40 \text{ мкм} < d < 56 \text{ мкм}$ и $56 < d < 315 \text{ мкм}$ определялись просеиванием через сито с размером ячейки 56 мкм предварительно однократно просеянного порошка через сито с размером ячейки 40 мкм с учетом того факта, что в первом просеве содержится 10,1 % порошка с размером менее 40 мкм и 0,7 % порошка с размером частиц более 315 мкм. Фракционный состав однократно просеянного и исходного порошка Al_2O_3 представлен в таблице 2.

Таблица 2 – Фракционный состав однократно просеянного и исходного порошка

Диаметр порошка	Однократно просеянный Al_2O_3 , %	Исходный Al_2O_3 , %
$d < 40 \text{ мкм}$	10,1	$35,5 \pm 1,6$
$40 \text{ мкм} < d < 56 \text{ мкм}$	45,4	$32,5 \pm 1,6$
$56 < d < 315 \text{ мкм}$	43,8	$31,3 \pm 1,6$
$d > 315 \text{ мкм}$	0,7	$0,7 \pm 0,08$

Было показано, что использование оксида алюминия с фракционным составом $d < 40$ мкм позволяет достигнуть необходимых технологических параметров при очистке больших (сотни литров в час) количеств ЛАБа.

В настоящее время разрабатывается методика фракционирования оксида алюминия и конструкция сорбционных колонн для очистки ЛАБа методом сорбции на оксиде алюминия.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

План работ на 2022 год выполнен полностью. Получены значимые научные результаты. Создана надежная основа для дальнейших работ в 2023-2024 гг.

1. Задача «Создание нового сцинтилляционного детектора 3D SuperFGD для комплекса ближних детекторов ND280 проектов T2K/T2K-II/Гипер-Камиоканде»

В 2022 году закончено создание отдельных активных элементов детектора SuperFGD, сцинтилляционных кубиков размером 1 см^3 . Создана вся механика, требуемая для конечной сборки детектора в Японии: внешний бокс для размещения активной части, платформы, стол для собирания слоев кубиков. В JPARC, Япония, собраны на лесках все 56 слоев детектора, около 2-х миллионов индивидуальных кубиков, далее слои будут перемещены во внешний бокс, и лески заменены на WLS оптоволокна. В настоящее время, ноябрь-декабрь 2022 года, проводятся тесты системы калибровки детектора с использованием LED диодов. Зимой 2023 года планируется продолжение сборки, подключение электроники, системы сбора данных, тесты на поверхности с космическими частицами. Далее весной/летом 2023 года установка SuperFGD в магнит ND280, в это время ожидаются первые данные SuperFGD на нейтринном пучке T2K. Детектор SuperFGD будет набирать статистику в составе проектов T2K-II и Гипер-Камиоканде, его использование позволит существенно снизить систематические ошибки, связанные с описанием взаимодействия нейтрино и антинейтрино с веществом, что напрямую влияет на точность измерения параметров нейтринных осцилляций и позволит достичь в будущем чувствительности к CP-нарушению в лептонном (нейтринном) секторе на уровне открытия.

2. Задача «Разработка прототипа внешнего детектора нового водного Черенковского детектора Гипер-Камиоканде»

Основная идея состоит в создании модулей, состоящих из ФЭУ небольшого размера (диаметр 80 мм) и спектромещающих пластин. Пластины поглощают Черенковский свет от заряженных частиц в ультрафиолетовой области и переизлучают его в видимой области. Пластины на основе полиметилметакрилата разработаны совместно с НИИ полимеров им. Каргина (г.Дзержинск). Проведены исследования по выбору оптимального химического состава пластин, а также их геометрии: пластины из ПММА с добавками РОРОР 50 мг/л и РРО 3 г/л, квадратные размером $30 \times 30\text{ см}^2$, толщиной 6 мм, ФЭУ планируется размещать в цилиндрические отверстия диаметром 78 мм. Проведенные исследования показали хорошие параметры пластин из НИИ полимеров, во многом превосходящие аналоги, изготавливаемые, например, компаниями Kuraray (Япония) и ELJ (США). Использование зеркального отражателя позволяет повысить эффективность регистрации переизлученного Черенковского света до 3%. Общее увеличение световыхода при использовании пластин и

отражателей можно оценить как в 2-3 раза. Если удастся достичь таких параметров в промышленном производстве, то фоны от космических мюонов в детекторе Гипер-Камиоканде будут подавлены примерно в 10^6 раз, что необходимо для детектирования нейтрино низких энергий (солнечные нейтрино, реликтовые нейтрино от взрывов Сверхновых за время существования Вселенной).

3. Задача «Проведение измерений радиоактивных свойств спектросмещающих пластин для новых детекторов нейтрино»

Положено начало исследованию радиоактивности детекторных элементов для будущего нейтринного эксперимента Гипер-Камиоканде. В Баксанской низкофоновой лаборатории с помощью германиевого детектора проведены измерения пиков гамма-активности различных образцов спектросмещающих пластин. Для большинства образцов активность не выходит за фоновые значения. Такие измерения чрезвычайно важны для проведения прецизионных измерений в Гипер-Камиоканде. Дальнейшие планы включают в себя проведение исследований в зале НЛГЗ-4900 (Низкофоновая Лаборатория Глубокого Заложения на глубине 4900 м в.э.) для дополнительного снижения фона, а также подготовку к проведению тестов на этапе промышленного производства пластин и других элементов детектора.

4. Задача «Разработка вето-детекторов для промежуточного детектора нейтрино проекта Гипер-Камиоканде»

В рамках проекта ИЯИ РАН предложена идея дизайна вето детекторов и протестированы первые прототипы их активных элементов. Предлагается использовать две пластины из экструдированного полистирола со спектросмещающими добавками, которые собираются в конечный детектор круглой формы, который в свою очередь размещается в оптическом модуле ФЭУ. Были измерены параметры указанных сцинтилляционных вето счетчиков. Относительно простые и дешевые счетчики с одним спектросмещающим WLS волокном, вклеенным в изогнутую канавку в сцинтилляторе, и фотоприемником КФУ Hamamatsu MPPC, имеют световыход для перпендикулярно падающих на детектор минимально ионизирующих частиц от 10 до 40 фотоэлектронов в зависимости от точки прохождения частицы через сцинтиллятор. Такой световыход обеспечивает эффективность регистрации космических мюонов вето детектором более 99%, что заведомо удовлетворяет требованиям к оптическим модулям промежуточного Черенковского детектора проекта Гипер-Камиоканде.

5. Задача «Изучение параметров ФЭУ для внешнего Черенковского детектора Гипер-Камиоканде»

Проведены исследования параметров ФЭУ Hamamatsu R14374 диаметром 80 мм, использование ФЭУ такого типа предлагается для внешнего детектора Гипер-Камиоканде. В ИЯИ РАН создана экспериментальная установка для проведения соответствующих измерений. Тесты проводятся с использованием LED диода, есть возможность изменять полярный и азимутальный углы для изучения различных частей ФЭУ, была показана однородность чувствительности фотокатода, полученный при измерениях относительной эффективности радиус чувствительной области ФЭУ соответствует спецификации Hamamatsu, основываясь на измерениях была проведена оптимизация геометрии структуры ФЭУ+спектрсмещающая пластина для конечного детектора. Также были проведены измерения темнового сигнала ФЭУ, наблюдались остаточные эффекты послесветимости после облучения приборов дневным светом, стабилизация наступает через 1-2 часа. Уровень темнового сигнала предварительно соответствует задачам Гипер-Камиоканде, при работе с пластинами из ПММА наблюдался повышенный уровень фона, что может быть вызвано фоновой активностью при проведении исследований, приняты меры для ее подавления. Ведутся работы для лучшего понимания происходящих процессов, что важно для разработки светособирающей системы внешнего детектора Гипер-Камиоканде, также планируются исследования на экспериментальной установке ИЯИ РАН низкофоновых ФЭУ CR160-02 (Китай).

6. Задача «Система очистки линейного алкилбензола (ЛАБ) методом водной экстракции»

Изготовлена система и проведены испытания экстракционной системы на основе центробежных экстракторов и установки для очистки сорбционным методом на оксиде алюминия сцинтиллятора для ББНТ. В ходе испытаний было показано, что использование оксида алюминия с фракционным составом $d < 40$ мкм позволяет достигнуть необходимых технологических параметров при очистке больших (сотни литров в час) количеств ЛАБа.

ПРИЛОЖЕНИЕ А

Список публикаций исполнителей отчета за 2022 г.

A.1 Статьи в журналах, главы в книгах, материалы конференций, индексируемые Web of Science Core Collection, Scopus и Russian Science Citation Index (RSCI)

1. Development and tests of WLS plates for Outer Detector of Hyper-Kamiokande / Yu. Kudenko [et al.] // Nucl.Instrum.Meth.A. – 2023. – Vol.1045. – P. 167543.

2. Жидкие органические сцинтилляторы для регистрации редких событий, методы очистки от U, Th и K / Веретенкин Е.П. [и др.] // Ядерная физика. – 2022. – Т. 85, N 6. – С. 459-467.

A.2 Статьи в журналах, входящих в перечень RSCI

Перечислены в А.1

A.6 Иные публикации по теме

1. Neutron detection and application with a novel 3D-projection scintillator tracker in the future long-baseline neutrino oscillation experiments / S. Gwon [et al.] // arXiv: 2211.17037.