

**ФЕДЕРАЛЬНОЕ ГОСУДАРСТВЕННОЕ БЮДЖЕТНОЕ УЧРЕЖДЕНИЕ НАУКИ
ИНСТИТУТ ЯДЕРНОЙ ФИЗИКИ ИМ. Г.И. БУДКЕРА СИБИРСКОГО ОТДЕЛЕНИЯ
РОССИЙСКОЙ АКАДЕМИИ НАУК**

**ГОДОВОЙ ОТЧЕТ
2025**

НОВОСИБИРСК 2026

Оглавление

Введение	5
Физика элементарных частиц	
Детектор СНД	10
Детектор КМД-3	14
Детектор КЕДР	16
Эксперименты Belle и Belle II	28
Криогенные и газовые лавинные детекторы	33
Ядерная физика	
Эксперименты на установке Дейтрон.....	37
Теоретическая физика	
Теоретическая физика	40
Физика плазмы и управляемый термоядерный синтез	
Газодинамическая ловушка.....	43
Установка КОТ	47
Многопробочное удержание плазмы	51
Генерация потоков мм- и субмм-излучения с использованием килоамперных пучков МэВ-ных электронов	58
Взаимодействие плазмы с поверхностью	68
Работы по проекту ИТЭР	70
Теория плазмы	72
Инжекторы пучков быстрых атомов.....	75
ВЧ плазменные источники на основе геликонного разряда для материаловедческих исследований	81
Коллайдеры, ускорительная техника	
Работа комплекса ВЭПП-2000 в 2025 году	84
Инжекционный комплекс	91
Электронное охлаждение	111
Синхронное излучение	
Работа на пучках СИ	113
Сверхпроводящие магнитные системы.....	121
Мощные электронные ускорители	
Ускорители типа ИЛУ.....	123
Физика для медицины	
Ускорительный источник нейтронов для Бор-Нейтронзахватной терапии и других приложений.....	125
Детекторы для медицины	127
Научное руководство ИЯФ СО РАН	129

ВВЕДЕНИЕ

Институт ядерной физики им. Г.И. Будкера Сибирского отделения Российской академии наук (ИЯФ СО РАН) – один из крупнейших академических институтов страны в структуре Российской академии наук: к концу 2025 года он насчитывал 2960 сотрудников, из которых 865 человек занимаются исследовательской деятельностью (из них 320 человек – до 39 лет). Среди 409 (по основному месту работы) научных сотрудников Института – 7 академиков (Бондарь А.Е., Диканский Н.С., Кулипанов Г.Н., Левичев Е.Б., Логачев П.В., Пархомчук В.В., Скринский А.Н.) и 5 членов-корреспондентов РАН (Винокуров Н.А., Логашенко И.Б., Тихонов Ю.А., Фадин В.С., Шатунов Ю.М.), 6 профессоров РАН (Ачасов М.Н., Гармаш А.Ю., Ли Р.Н., Логашенко И.Б., Лотов К.В., Мучной Н.Ю.), 61 доктор наук и 193 кандидата наук. Структура ИЯФ СО РАН насчитывает 79 подразделений, из которых 41 научное подразделение, 9 научно-вспомогательных, 7 производственных и 18 – административно-управленческих подразделений. Особенностью ИЯФ является наличие крупного экспериментального производства (714 человек) с высоким уровнем технического и технологического оснащения.

В октябре 2025 года в ИЯФ СО РАН прошла конференция научных работников, на которой были проведены выборы нового состава Учёного совета (46 человек). Также с 21 октября (Приказом министра науки и высшего образования Фалькова В.Н. № 10-2/193 п-о) Павел Владимирович Логачев назначен исполняющим обязанности директора ИЯФ СО РАН до замещения должности директора в установленном порядке на срок не более одного года.

Институт ведет активную работу по подготовке научных и инженерно-технических кадров высшей квалификации. ИЯФ является базовым Институтом для шести кафедр физического факультета НГУ (кафедра физики элементарных частиц, кафедра физики ускорителей, кафедра физики плазмы, кафедра радиофизики, кафедра физико-технической информатики, кафедра теоретической физики) и кафедры УФуиУ НГТУ. Всего в ИЯФ на конец 2025 г. обучалось 171 студент НГУ (103) и НГТУ (68). В аспирантуре ИЯФ к концу 2025 года обучались 69 человек и еще 18 аспирантов НГУ, НГТУ и ТПУ.

ИЯФ является одним из ведущих мировых центров по ряду областей физики высоких энергий и ускорителей, физики плазмы и управляемого термоядерного синтеза. В Институте ведутся крупномасштабные эксперименты по физике элементарных частиц на электрон-позитронных коллайдерах (ВЭПП-2000 и ВЭПП-4М – два единственных действующих коллайдера в России) и уникальном комплексе открытых плазменных

ловушек (установка ГДЛ, ГОЛ-NB, СМОЛА, КОТ, ГОЛ-ПЭТ, ЭЛМИ), разрабатываются современные ускорители (в т.ч. промышленные ускорители серий ЭЛВ и ИЛУ), интенсивные источники синхротронного излучения и лазеры на свободных электронах.

Основу исследовательской инфраструктуры Института составляют уникальные научные установки и стенды (УНУ). С использованием УНУ выполняется большинство научных проектов Института, проводится большое количество совместных исследований в рамках научно-технического сотрудничества с ведущими российскими и международными научными организациями, и университетами.

Шесть объектов научной инфраструктуры Института индексируются в национальном реестре объектов научной инфраструктуры Российской Федерации (сайт skr-rf.ru): УНУ «Ускорительный масс-спектрометр», УНУ «Комплекс ВЭПП-4 – ВЭПП-2000», УНУ «Комплекс длинных открытых ловушек» («ДОЛ»), УНУ «Новосибирский лазер на свободных электронах терагерцового диапазона», УНУ «Протонный ускоритель Тандем-БНЗТ», УНУ «Стенд ЭЛВ-6». В ИЯФ СО РАН работает центр коллективного пользования «Сибирский центр синхротронного и терагерцового излучения» (ЦКП СЦСТИ). Базой для деятельности ЦКП СЦСТИ являются: накопители электронов/позитронов ВЭПП-3 и ВЭПП-4М – источники синхротронного излучения, и Новосибирский лазер на свободных электронах – источник терагерцового излучения.

В 2025 году ИЯФ СО РАН вышел на финальную стадию реализации проекта ЦКП «СКИФ» (Сибирский кольцевой источник фотонов). Обладая сверхмалым эмиттансом (75 пм) при энергии пучка 3 ГэВ, установка позволит проводить уникальные эксперименты с синхротронным излучением. В марте 2025 года пучок проведен через транспортный канал в бустерный синхротрон и успешно зарегистрирован на люминофорном датчике бустера. В мае начат монтаж экспериментальных станций первой очереди. В августе самая большая в мире взрывная камера доставлена на площадку СКИФа (для станции «Быстропротекающие процессы»). В октябре 2025 года прошел проверку первый ондулятор для станции СКИФа. В ноябре начат монтаж оборудования в тоннеле накопительного кольца. Также в ноябре 2025 года в ИЯФ СО РАН прошел первый международный конгресс пользователей ЦКП «СКИФ». В декабре 2025 года продемонстрирован устойчиво циркулирующий в инжекционном комплексе пучок электронов с проектной энергией 3 ГэВ, который был перепущен из бустерного синхротрона через 220-метровый транспортный канал в накопительное кольцо ЦКП «СКИФ». 15 декабря 2025 года состоялось заседание государственной комиссии по оценке соответствия ЦКП «СКИФ» заданным параметрам. Комиссия пришла к заключению, что ЦКП «СКИФ» вышел на проектные параметры.

Важнейшим достижением Института в 2025 году стало первое в России накопление тяжелых ионов в продольном фазовом пространстве с использованием систем электронного охлаждения, созданных в ИЯФ СО РАН (совместно с ОИЯИ), а также представленные ИЯФ СО РАН результаты измерения масс D-мезонов коллаборацией детектора КЕДР. В 2025 году подготовлена программа обновления детекторов на коллайдере ВЭПП-2000, а также в значительной степени обозначилась форма проекта нового ияфовского коллайдера ВЭПП-6.

В настоящее время в Институте на уникальном комплексе «ДОЛ» открытых плазменных ловушек проводятся эксперименты по высокотемпературному удержанию плазмы. В комплекс входят установки ГДЛ (газодинамическая ловушка), ГОЛ-3 (Гофрированная ловушка), ГОЛ-NB (ГОЛ-Neutral Beams) – импульсная модель будущей установки ГДМЛ (в 2023 году она переведена в многопробочную конфигурацию), СМОЛА (спиральная многопробочная ловушка). В 2025 году завершилось создание новой многопробочной ловушки СМОЛА* с винтовой симметрией и дополнительным нагревом ионов. Эксперименты по ионно-циклотронному резонансному нагреву интересны как с точки зрения разработки технологий управляемого термоядерного синтеза, так и с точки зрения исследования физических процессов в плазме. В 2025 команда физиков-плазмистов ИЯФ СО РАН подготовила технический проект систем нагрева термоядерной плазмы токамаке с реакторными технологиями (ТРТ).

ИЯФ СО РАН в 2025 году продолжал быть активным участником международного проекта ITER.

В ИЯФ СО РАН осуществляется разработка установок ядерной медицины для протонной, ионной и бор-нейтрон-захватной терапии (БНЗТ) и литий-нейтрон-захватной терапии злокачественных образований. В 2021 г. ИЯФ СО РАН начал активное сотрудничество с НМИЦ Онкологии им. Н.Н. Блохина (г. Москва) с целью создания к 2027 году медицинской установки БНЗТ для лечения онкологических заболеваний. Весь 2025 год в онкоцентре им. Н.Н. Блохина осуществлялась сборка, пуско-наладочные работы и настройка созданной в ИЯФ СО РАН машины. На установке VITA ИЯФ СО РАН велись собственные исследования методики БНЗТ, а также научная команда БНЗТ проводила фундаментальные исследования по измерению сечений ядерных реакций (в т.ч. реакции взаимодействия протонов и дейтронов с ядрами лития и бора), созданию различных изотопов, а также по формированию нейтронных пучков для проведения в будущем эксперимента, аналогичного эксперименту Штерна - Герлаха по спиновому расщеплению пучка нейтронов в магнитном поле.

В ИЯФ СО РАН активно работает теоретический отдел, научные изыскания которого по динамическому хаосу, по ядерной физике, физике высоких энергий и элементарных частиц (в том числе квантовой электродинамике и теории сильных взаимодействий),

теории гравитации, многопетлевым вычислениям и т.д. широко известны далеко за пределами России. В 2025 году сотрудниками теоретического отдела получено точное аналитическое выражение для С-чётной части поправок к дифференциальному сечению процесса $e^+ e^- \rightarrow \mu^+ \mu^-$, учитывающее массу рождающихся мюонов; вычислены двухпетлевые поправки к полуинклюзивному глубоконеупругому рассеянию с учётом поляризации; предложен метод разложения по областям, сохраняющий дуальную конформную инвариантность интегралов в суперсимметричной теории Янга-Миллса. С помощью этого метода получено явное простое выражение для дуально конформного пентабокса при малой виртуальности внешних линий. А также впервые построена последовательная теория эффекта Штерна-Герлаха в магнитных полях сложной конфигурации.

В 2025 году ИЯФ СО РАН работал по 162 контрактам с различными российскими (НИЦ «КИ», ПИЯФ, Институт Катализа СО РАН, «РФЯЦ-ВНИИТФ», ОИЯИ, ФГУП «РФЯЦ-ВНИИЭФ», ИТЭР-Центр, МИФИ, ФТИ им. А.Ф. Иоффе, НИИТМ) и зарубежными организациями: KIT, EV-Tech (Южная Корея), Mekong logistic (Вьетнам) и др.

Прикладные работы ИЯФ СО РАН в основном базируются на результатах фундаментальных исследований Института и традиционно сконцентрированы на следующих основных направлениях:

- Промышленные ускорители электронов высокой мощности, используемые для модификации полимеров, очистки промышленных и бытовых отходов, производства нанопорошков чистых металлов, окиси кремния, оксидов, карбидов и нитридов металлов, радиационной обработки продуктов питания, стерилизации медицинского оборудования и одноразовых инструментов и одежды, и других технологических применений. В 2025 г. заказчиком из Китая, Южной Кореи, Индии и России отправлен 21 комплект оборудования промышленных ускорителей ЭЛВ. В 2025 году во Вьетнам был поставлен ускоритель ЛИУ-14.

- Установки для электронно-лучевой сварки.
- Проведение работ по созданию многоракурсного радиографического комплекса импульсной томографии (КИТ), а также линейного индукционного ускорителя ЛИУ-23 в РФЯЦ-ВНИИТФ (г. Снежинск)

- С 2023 года в ИЯФ СО РАН (совместно с НИИТМ) идет развитие тематики имплантерных устройств для нужд микроэлектронной промышленности: разрабатываются инжектор ТМ-200Т и инжектор ТМ-200В. В 2025 году практически завершено создание инжектора ТМ-200Т.

ИЯФ СО РАН отличает широкое международное сотрудничество с большим количеством крупных зарубежных научных центров. За 2025 год несмотря на прогрессирующее ухудшение международных

отношений в связи с проведением СВО сотрудники ИЯФ (127 человек) были направлены в 161 зарубежную командировку в 16 стран мира.

В 2025 году сохранились научно-технические связи с международными научными организациями и коллаборациями: Belle и SuperKEKB (КЕК, Япония), Plasma Research Center (университет Цукубы, Япония), эксперимент COMET (Япония); эксперимент Muon $g-2$ (Fermilab, США), эксперимент NSLS-II (BNL, США); эксперимент DarkSide (INFN, Италия), эксперимент MEG (INFN, LNF, Италия), эксперименты BES III (ИНЕР, Китай) на коллайдере BEPC-II, участие в создании проекта и работе Super Tau-Charm Facility (STCF, Китай), эксперименты по электронному охлаждению в Институте современной физики (Ланчжоу, Китай); международный проект ИТЭР; технологическое сотрудничество с Индией и Китаем и Вьетнамом

В 2025 г. значительно расширены научно-технические и коммерческие связи с Китаем: заключены новые соглашения с ENN SCIENCE AND TECHNOLOGY DEVELOPMENT, NANJING UNIVERSITY OF AERONAUTICS AND ASTRONAUTICS.

Кроме того, в 2025 году ИЯФ постоянно работает над крупными российскими проектами, в числе которых установки исследовательской инфраструктуры класса «MegaScience»: ускорительный комплекс ЦКП «СКИФ»; ускорительный комплекс НИКА (NICA – Nuclotron based Ion Collider fAcility) в ОИЯИ (г. Дубна); синхротронный комплекс СКИ (г. Саров), проект ИЯФ СО РАН и ФГУП РФЯЦ-ВНИИТФ им. академ. Е.И. Забабахина (ГК "РОСАТОМ") по созданию многоракурсного радиографического комплекса импульсной томографии на основе разработанного сотрудниками ИЯФ СО РАН линейного индукционного ускорителя ЛИУ-20; совместный проект ИЯФ СО РАН и НМИЦ Онкологии им. Н.Н. Блохина (г. Москва) по созданию установок ядерной медицины для протонной, ионной и бор-нейтрон-захватной терапии (БНЗТ) злокачественных образований; совместные проекты ИЯФ СО РАН и ГК "РОСАТОМ" в рамках прикладных государственных заданий по созданию атомарных инжекторов и ионных источников; совместные проекты ИЯФ СО РАН и частного учреждения "ИТЭР-Центр"; проект ИЯФ СО РАН и ФГУП "РФЯЦ - ВНИИЭФ" (г. Саров, НЦФМ) по созданию источника комптоновского излучения фотонов с энергией квантов от 1 кэВ до 300 МэВ; создание двух имплантерных инжекторов (Инжектор ТМ-200Т и Инжектор ТМ-200В) совместно с НИИТМ.

В 2025 году существенно увеличилось научно-техническое сотрудничество с НИЦ «Курчатовский Институт» по целому ряду проектов: Токамак Т-15МД, ТНК «Зеленоград», проект «КИСИ-2», проект «РИФ». ИЯФ СО РАН ведет активное научно-техническое сотрудничество по развитию и применению исследований с использованием синхротронного

излучения. Договоры о сотрудничестве в рамках центра коллективного пользования ЦКП СЦСТИ заключены с 56 российскими организациями.

В 2025 году диссертантами ИЯФ СО РАН защищены четыре кандидатские диссертации (А.А. Касатов, Д.Е. Черепанов, Н.Д. Осинцева и В.П. Олейников) и одна докторская диссертация (А.Е. Левичев).

В 2025 году в ИЯФ СО РАН реализовывались проекты по девятнадцати фундаментальным государственным заданиям (на общую сумму 1 454 217 500 руб), трем прикладным государственным заданиям (529 445 100 руб), одной молодежной лаборатории. На содержание уникальных установок ИЯФ СО РАН Минобрнауки России было выделено в 2025 году 322 722 700 рублей.

В 2025 году сотрудниками ИЯФ СО РАН опубликовано 1352 научные работы, из которых в России издано 569 работ, а за рубежом – 783 работы. Из этих работ 598 входят в публикационную базу данных Scopus, 433 научная статья вышла в рамках международных коллабораций. В 2025 году в ИЯФ СО РАН зарегистрировано 15 патентов и 31 программ для ЭВМ.

Лидерами по публикационной активности стали: теоретический отдел, лаборатории 10, сектор 9-21. Для оценки эффективности работы научных сотрудников по основному месту работы (409 человек) в ИЯФ СО РАН в 2025 г. второй год использовался показатель результативности научной деятельности (ПРНД).

Победителями конкурсов молодых ученых ИЯФ в 2025 году стали: Байструков Михаил Андреевич (сек. 1-33), Иванов Даниил Русланович (лаб. 2), Горковенко Антон Олегович (лаб. 2), Гребнев Матвей Сергеевич (лаб. 6-0), Толкачев Михаил Сергеевич (лаб. 10), Бутикова Екатерина Алексеевна (НГУ) и Эптешев Егор Сергеевич (лаб. 8-1).

Стипендиатом ИЯФ СО РАН стипендии им. Г.И. Будкера в 2025 г. стал второй год подряд Федоров Вячеслав Васильевич (сек. 5-13). Также лауреатами именных стипендий ИЯФ СО РАН в 2025 году стали Кожевников Алексей, Корж Виталий, Куляко Ярослав, Морозов Олег, Ооржак Айдаш, Попов Алексей, Сунгуров Кирилл, Басова Полина, Ванда Владислав, Копалкин Иван, Грибанов Денис, Лотов Игорь, Корень Егор, Кутергин Даниил, Животягин Владимир, Руднев Даниил, Макаренко Юлия, Евдокимов Александр.

Лауреатом медали РАН для молодых ученых в 2025 году стали Евгений Сандалов, Денис Самцов (лаб.10) и Екатерина Егорова (ИПФ РАН) за работу «Формирование килоамперных пучков релятивистских электронов и их применение для генерации мультимегаваттных потоков миллиметрового и терагерцового излучения в плазме и электродинамических системах».

Д.ф.-м.н. Шехтману Льву Исаевичу (сек. 3-13) в 2025 г. было присвоено звание «Заслуженный деятель науки Новосибирской области».

Постановлением Президиума РАН от 23.12.2025 г. № 239 научный руководитель ИЯФ СО РАН академик РАН Скринскому Александру Николаевичу была присуждена Большая золотая медаль РАН имени М. В. Ломоносова 2025 года (совместно с британским коллегой Л. Эвансом).

Нагрудным знаком «Молодой учёный» Минобрнауки России отмечены в 2025 году Гнетов Роман Борисович, Прут Владимир Вячеславович, Крапивин Владимир Сергеевич, Павленко Антон Владимирович, Никифоров Данила Алексеевич, Липовый Дмитрий Анатольевич, Федотов Андрей Викторович, Горбулин Кирилл Русланович.

В 2025 году сотрудник ИЯФ СО РАН Осинцева Н.Д. стала лауреатом премии им. Ю.И. Островского за цикл работ по исследованию вихревых бесселевых пучков терагерцового излучения для развития телекоммуникационных технологий.

В 2025 году директор ИЯФ СО РАН академик Логачев П.В. отметил свой шестидесятилетний юбилей. В 2025 году приказом ГК «Росатом» Павел Владимирович Логачев был награжден Почетной грамотой Президента Российской Федерации «За заслуги в научной деятельности и многолетнюю добросовестную работу» (Распоряжение президента РФ № 334-рп от 27.08.25), знаком отличия «За вклад в развитие атомной отрасли» 1 степени, Памятной медалью им. академика М.А. Лаврентьева. Памятной медалью им. академика М.А. Лаврентьева в 2025 году также были награждены член-корреспондент РАН Ю.А. Тихонов, академик РАН А.Е. Бондарь.

В 2025 году 25 физиков ИЯФ СО РАН (с коллегами из коллабораций ATLAS, CMS, LHCb и ALICE) удостоены международной премии «Прорыв» (Breakthrough Prize in Fundamental Physics) за цикл работ 2015-24 гг по детальному измерению свойств бозона Хиггса.

Двумя важнейшими научными достижениями Института за 2025 год Учёный Совет ИЯФ признал следующие результаты:

1. РЕЗУЛЬТАТ ЭКСПЕРИМЕНТА КЕДР ПО ИЗМЕРЕНИЮ МАСС D-МЕЗОНОВ: И.В. Овтин и коллаборация КЕДР.

2. ПЕРВОЕ В РОССИИ НАКОПЛЕНИЕ ТЯЖЕЛЫХ ИОНОВ В ПРОДОЛЬНОМ ФАЗОВОМ ПРОСТРАНСТВЕ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ ЭЛЕКТРОННОГО ОХЛАЖДЕНИЯ: Е.А. Бехтенов, М. И. Брызгунов, А.В. Бублей, А.Д. Гончаров, К.М. Горчаков, И.А. Гусев, Б.А. Довженко, А.А. Жариков, Г.В. Карпов, М.Н. Кондауров, Н.С. Кремнев, В.М. Панасюк, В.В. Пархомчук, В.А. Полухин, А.А. Путьмаков, В.Б. Рева, Д.В. Сеньков, В.А. Чекавинский, Э.Р. Уразов, коллеги из ОИЯИ: А.В. Бутенко, Е.В. Горбачев, В.А. Лебедев, И.Н. Мешков, И.Ю. Николайчук, К.Г. Осипов, Ю.В. Прокофьевич, В.С. Шпаков, С.В. Семенов, А.С. Сергеев, А.О. Сидорин,

В.Л. Смирнов, Е.М. Сыресин, Р.В. Тимонин, Г.В. Трубников, П.Р. Харьюзов.

Кроме того, результатами 2025 года по направлениям деятельности института обозначены следующие достижения:

В области теоретической физики, ядерной физики, физики элементарных частиц и фундаментальных взаимодействий:

1. РЕЗУЛЬТАТ ЭКСПЕРИМЕНТА КЕДР ПО ИЗМЕРЕНИЮ МАСС D-МЕЗОНОВ, Авторы: И.В. Овтин, коллаборация КЕДР.

2. ПРЕЦИЗИОННОЕ ИЗМЕРЕНИЕ СЕЧЕНИЙ ПРОЦЕССОВ $e^+e^- \rightarrow \pi^0\gamma$ и $\eta\gamma$ ВБЛИЗИ РЕЗОНАНСА $\phi(1020)$, Авторы: Коллаборация СНД ИЯФ СО РАН.

3. ВЫЧИСЛЕНО В ДВУХПЕТЛЕВОМ ПРИБЛИЖЕНИИ ДИФФЕРЕНЦИАЛЬНОЕ СЕЧЕНИЕ РОЖДЕНИЯ ТЯЖЕЛЫХ ЛЕПТОНОВ В e^+e^- -АННИГИЛЯЦИИ, Авторы: Р.Е. Герасимов, П.А. Крачков, Р.Н. Ли.

4. ИЗМЕРЕНИЕ СЕЧЕНИЯ ПРОЦЕССА $e^+e^- \rightarrow \pi^+\pi^-2\pi^0\eta$ В ОБЛАСТИ ЭНЕРГИИ ДО 2 ГэВ, Авторы: Коллаборация СНД ИЯФ СО РАН.

5. В ДАННЫХ ДЕТЕКТОРА ATLAS ДЛЯ ПРОЦЕССА $Z \rightarrow l+l-\gamma$ ОБНАРУЖЕНО УКАЗАНИЕ НА ОТКЛОНЕНИЕ ЗАРЯДОВОЙ АСИММЕТРИИ ОТ ПРЕДСКАЗАНИЙ СТАНДАРТНОЙ МОДЕЛИ, Авторы: А. Г. Харламов, Т. А. Харламова, В. Н. Жабин, А. С. Купич.

6. МОНТЕ-КАРЛО ГЕНЕРАТОР NGAMMA ДЛЯ МОДЕЛИРОВАНИЯ МНОГОФОТОННОЙ АННИГИЛЯЦИИ ЭЛЕКТРОН-ПОЗИТРОННОЙ ПАРЫ, Авторы: Л.В. Кардапольцев, Н.А. Мельникова.

В области физики и техники ускорителей заряженных частиц, а также радиофизики:

1. ПЕРВОЕ В РОССИИ НАКОПЛЕНИЕ ТЯЖЕЛЫХ ИОНОВ В ПРОДОЛЬНОМ ФАЗОВОМ ПРОСТРАНСТВЕ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ ЭЛЕКТРОННОГО ОХЛАЖДЕНИЯ, Авторы: Е.А. Бехтенов, М. И. Брызгунов, А.В. Бублей, А.Д. Гончаров, К.М. Горчаков, И.А. Гусев, Б.А. Довженко, А.А. Жариков, Г.В. Карпов, М.Н. Кондауров, Н.С. Кремнев, В.М. Панасюк, В.В. Пархомчук, В.А. Полухин, А.А. Путьмаков, В.Б. Рева, Д.В. Сеньков, В.А. Чекавинский, Э.Р. Уразов, коллеги из ОИЯИ: А.В. Бутенко, Е.В. Горбачев, В.А. Лебедев, И.Н. Мешков, И.Ю. Николайчук, К.Г. Осипов, Ю.В. Прокофьевич, В.С. Шпаков, С.В. Семенов, А.С. Сергеев, А.О. Сидорин, В.Л. Смирнов, Е.М. Сыресин, Р.В. Тимонин, Г.В. Трубников, П.Р. Харьюзов.

2. БЫСТРЫЙ КВАЗИСТАТИЧЕСКИЙ КОД ДЛЯ МОДЕЛИРОВАНИЯ ПЛАЗМЕННОГО КИЛЬВАТЕРНОГО УСКОРЕНИЯ, Авторы: К.В. Лотов, П.В. Туев, И.Ю. Каргаполов, Н.В. Охотников, А.П. Соседкин, И.А.Шалимова (НГУ, ИВМиМГ СО РАН).

В области физики плазмы:

1. ПОЛУЧЕН ПУЧОК ОТРИЦАТЕЛЬНЫХ ИОНОВ ТОКОМ 0.7 А, ДЛИТЕЛЬНОСТЬЮ

ИМПУЛЬСА 2 СЕК С ЭНЕРГИЕЙ 410 КЭВ НА СТЕНДЕ, Авторы: О.З. Сотников, А.Л. Санин, Ю.И. Бельченко, И.В. Шиховцев, А.А. Кондаков, В.В. Ращенко, А.В. Белавский, А.И. Горбовский, В.Х. Амиров, А.А. Гмыря, Д.Ю. Гаврисенко, Н.С. Ильенко.

2. РАЗРАБОТАН КОД MIDAS-1D2V ДЛЯ РАСЧЁТА ЭВОЛЮЦИИ ФУНКЦИИ РАСПРЕДЕЛЕНИЯ ИОНОВ В АКСИАЛЬНО-СИММЕТРИЧНОЙ ОТКРЫТОЙ ЛОВУШК, Автор: В.В. Приходько.

3. СОЗДАНИЕ МНОГОПРОБОЧНОЙ ЛОВУШКИ СМОЛА* С ВИНТОВОЙ СИММЕТРИЕЙ И ДОПОЛНИТЕЛЬНЫМ НАГРЕВОМ ИОНОВ, Авторы: А. В. Судников, А. Д. Беклемишев, А. В. Бурдаков, И. А. Иванов, А. А. Инжеваткина, А. В. Кожевников, В. В. Поступаев, М. С. Толкачёв, В. О. Устюжанин, И. С. Черноштанов.

4. ПЕРВОЕ УСПЕШНОЕ ПРОВЕДЕНИЕ ЛИТИЙ-НЕЙТРОНОЗАХВАТНОЙ ТЕРАПИИ, Авторы: Ю.С. Таскаева, А.И. Касатова, Н.П. Бгатова (НИИ клинической и экспериментальной лимфологии СО РАН), Р. Диб, Т.А. Быков, Д.А. Касатов, Я.А. Колесников, Е.О. Соколова, С.Ю. Таскаев.

5. ИНЖЕКТОР ВОДОРОДНОГО ПУЧКА С ЭНЕРГИЕЙ 15 КЭВ, ТОКОМ 150 А ВЫВЕДЕН НА ДЛИНОИМПУЛЬСНЫЙ РЕЖИМ РАБОТЫ – 0,3 СЕК, Авторы: А.В. Бруль, П.П. Дейчули, Р.В. Вахрушев, В.В. Орешонок, В.В. Ращенко, А.В. Сорокин, Н.В. Ступишин, И.В. Шиховцев.

6. РАЗРАБОТАНА ЛИНЕЙКА АДАПТИВНЫХ РЕГИСТРАТОРОВ ДЛЯ СИСТЕМ УПРАВЛЕНИЯ, СБОРА, ПЕРЕДАЧИ И ХРАНЕНИЯ ДАННЫХ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫХ ЭЛЕКТРОФИЗИЧЕСКИХ УСТАНОВОК, Авторы: А.Д. Хильченко, Е.А. Пурьга, А.Н. Квашнин, П.В. Зубарев, Д.В. Моисеев, С. В. Иваненко.

7. РАЗРАБОТАН И СОЗДАН ИСТОЧНИК ЛЕНТОЧНОГО ИОННОГО ПУЧКА НА ОСНОВЕ КАСПОВОЙ КОНФИГУРАЦИИ, Авторы: С. Г. Константинов, В. Ф. Скляр, А. А. Старостенко, И. Н. Чуркин, И. В. Шиховцев.

8. ОПРЕДЕЛЕН ПОРОГ ЭРОЗИИ КАРБИДА КРЕМНИЯ В СЛУЧАЕ ИМПУЛЬСНОГО НАГРЕВА, ОЖИДАЕМОГО ВО ВРЕМЯ РАБОТЫ ТЕРМОЯДЕРНЫХ УСТАНОВОК, Авторы: Д.Е. Черепанов, М.А. Голосов (ИХТТМ СО РАН), Л.Н. Вячеславов, Н.И. Бакланова (ИХТТМ СО РАН), Г.А. Рыжков, В.А. Попов, А.А. Шошин, С.Р. Казанцев, А.А. Касатов, И.В. Кандауров, А.В. Бурдаков.

9. ИСПЫТАНА СТОЙКОСТЬ КАРБИДА БОРА К ПЛАЗМЕННЫМ НАГРУЗКАМ, СООТВЕТСТВУЮЩИМ УСЛОВИЯМ ЭКСПЛУАТАЦИИ ПЕРВОЙ СТЕНКИ ТЕРМОЯДЕРНОГО РЕАКТОРА, Авторы: Е.И. Кузьмин, А.А. Касатов, А.В. Чесноков, Д.Е. Черепанов.

10. ПОЛУЧЕНИЕ МОЩНЫХ ИМПУЛЬСОВ МИЛЛИМЕТРОВОГО ИЗЛУЧЕНИЯ В ПЛАНАРНОМ ЧЕРЕНКОВСКОМ МАЗЕРЕ НА ОСНОВЕ ЛЕНТОЧНОГО ЭЛЕКТРОННОГО ПУЧКА,

Авторы: А.В. Аржанников, В.Ю. Заславский, П.В. Калинин, Н.Ю. Песков, Д.А. Самцов, Е.С. Сандалов, С.Л. Синицкий, В.Д. Степанов.

11. ЗАПУСК СЕКУНДНОГО МОДУЛИРОВАННОГО ПУЧКА 60 КВ, 6 А НА МОДЕРНИЗИРОВАННОМ ДИАГНОСТИЧЕСКОМ ИНЖЕКТОРЕ АТОМОВ ВОДОРОДА ДИНА-КИ60 НА ТОКАМАКЕ Т-15МД, Авторы: Н.В. Ступишин, А.Г. Абдрашитов, А.В. Белавский, В.П. Белов, Р.В. Вахрушев, В.И. Давыденко, П.П. Дейчули, П.В. Зубарев, В.В. Мишагин, С.П. Посполита, В.В. Ращенко, И.В. Шиховцев, а также коллеги из НИЦ «Курчатовский институт»: Н.А. Вадимов, Л.Г. Елисеев, И.А. Земцов, В.А. Крупин, А.Р. Немец.

12. НА ОТКРЫТОЙ ЛОВУШКЕ ГОЛ-NV ДОСТИГНУТ РОСТ ТЕМПЕРАТУРЫ ПЛАЗМЫ В ПРИОСЕВОЙ ОБЛАСТИ С 25 ДО 45 ЭВ ПРИ ИНЖЕКЦИИ ЭЛЕКТРОННОГО ПУЧКА НИЗКОЙ ЭНЕРГИИ, Авторы: В. В. Поступаев, В. И. Баткин, А. В. Бурдаков, Р. Г. Гороховский, И. А. Иванов, П. В. Калинин, К. Н. Куклин, Я. О. Куляко, Н. А. Мельников, А. В. Никишин, С. В. Полосаткин, А. Ф. Ровенских, Е. Н. Сидоров, Д. И. Сквородин, Е. Н. Скуратов.

13. РАЗРАБОТАНА МЕТОДИКА ВЫЧИСЛЕНИЯ НАБЕГА ФАЗЫ ДЛЯ ДИСПЕРСИОННОГО ИНТЕРФЕРОМЕТРА С ИСКУССТВЕННОЙ МОДУЛЯЦИЕЙ ЗОНДИРУЮЩЕГО ИЗЛУЧЕНИЯ, Авторы: А.Д. Хильченко, С.В. Иваненко, А.Н. Квашнин, В.В. Приходько.

14. ПРЕДЛОЖЕНА И ПРИМЕНЕНА ДИАГНОСТИКА ДВУХКООРДИНАТНОЙ ДОПЛЕРОВСКОЙ СПЕКТРОСКОПИИ ДЛЯ БЕСКОНТАКНОГО ИЗМЕРЕНИЯ УГЛОВОЙ РАСХОДИМОСТИ АТОМАРНОГО ПУЧКА С ЦЕЛЕВОЙ ИОННО-ОПТИЧЕСКОЙ СИСТЕМОЙ, Авторы: П.П. Дейчули, А.В. Бруль, Н.П. Дейчули, Д.А. Куликова (НГУ).

В области физики синхротронного излучения и лазеров на свободных электронах:

1. ДОСТИГНУТ УРОВЕНЬ МАГНИТНОГО ПОЛЯ 1.35 ТЛ НА СВЕРХПРОВОДЯЩЕМ ОНДУЛЯТОРЕ С ПЕРИОДОМ 15.6 ММ ДЛЯ ГЕНЕРАЦИИ СИНХРОТРОННОГО ИЗЛУЧЕНИЯ, Авторы: Н.А. Мезенцев, В.А. Шкаруба, Ф.П. Казанцев.

2. ТГЦ ПЛАЗМОННАЯ РЕФРАКТОМЕТРИЯ ЗЛОТЫХ ПЛЕНОК, Авторы: В.В. Герасимов, В.Д. Кукотенко, В.С. Ванда, А. Г. Лемзяков, А.Г. Кочнева, А.К. Никитин (НТЦУП РАН).

ДЕТЕКТОР СНД

Основные работы в 2025 году

В 2025 году на e^+e^- коллайдере ВЭПП-2000 проводился очередной сеанс набора данных с детектором СНД. Продолжалось сканирование области энергии в системе центра масс от 0.3 до 1.06 ГэВ, начатое в 2024 году. В этом эксперименте планировалось набрать статистику, превосходящую накопленную ранее в экспериментах 2013 и 2018 годов. С учетом опыта эксплуатации детектора и проведенных модернизаций в этом сеансе можно ожидать существенного улучшения качества записанных данных. В январе-июне 2025 года сканировалась область вблизи максимума резонанса ω (760-800 МэВ). Данные с интегральной светимостью 37 pb^{-1} были набраны в 17 точках по энергии. Набор данных продолжился в ноябре 2025 года. К 12 декабря была набрана статистика с интегральной светимостью около 3 pb^{-1} в точках 740 и 750 МэВ. Вблизи максимума резонанса $\omega(782)$ набор данных шел с шагом по энергии пучка 1.0 МэВ.

В этом эксперименте энергия коллайдера и ее разброс измерялись с помощью системы измерения энергии пучка методом обратного комптоновского рассеяния лазерных фотонов на электронном пучке. Относительная систематическая погрешность измерения энергии пучка оценивается равной $\Delta E_b/E_b = 6 \times 10^{-5}$.

Модернизация детектора СНД

В 2025 году продолжалась постепенная замена блоков электроники СНД в стандарте КАМАК на блоки в стандарте «Евромеханика». Были разработаны, изготовлены и включены в работу новые блоки первичного триггера. В них по сравнению со стандартом КАМАКкратно повышена степень интеграции, что позволило уменьшить количество блоков. Они установлены в корзину, где уже работает система «пересчеток». Создано программное обеспечение для включения новых блоков в систему сбора данных детектора СНД. В новой системе первичного триггера СНД работают следующие блоки, заменившие собой девять КАМАК-блоков:

- блок управления (БУ, контроллер),
- модернизированная центральная система управления первичным триггером (МЦСУ),
- два блока размножителей системных команд (РСК).

БУ обеспечивает канал передачи команд и обмен данными по локальной сети с системой сбора данных детектора, осуществляет передачу команд. Он является ведущим блоком (мастером) на шине и обеспечивает управление блоками в корзине. В БУ установлен процессорный модуль (System-on-Module, SOM) Alinx AC7010C, работающий на SoC Zynq 7000, сочетающий в себе программируемую логику, процессорный блок, оперативную память и периферийные устройства, в частности, контроллер сети Ethernet. Связь БУ с системой сбора данных (ССД) осуществляется по локальной сети. Пропускная способность сетевого интерфейса –

до 1 Гбит/с. Управление блоком МЦСУ осуществляется по синхронному последовательному протоколу ИС (I2C) производительностью 400 Кбит/с. Для работы МЦСУ не требуется обмен большим объемом данных и производительности, последовательного протокола вполне достаточно. Для работы с блоками, у которых объем передаваемых данных существенно выше, в блоке управления предусмотрена параллельная 16-ти разрядная шина. Логические протоколы стандарта VME не поддерживаются, т.к. в них нет необходимости, а их использование требует привлечения дополнительных ресурсов.

МЦСУ выполнен на базе Altera Cyclone IV FPGA и объединяет в себе несколько модулей:

- блок решений первичного триггера (БРПТ) в связке с центральной системой управления (ЦСУ),
- блок синхронизации триггерного сигнала с тактовой частотой ВЭПП-2000,
- ограничитель загрузок первичного триггера,
- преобразователь тактовой частоты ВЭПП-2000,
- делитель частоты срабатываний маски первичного триггера СНД, выделяющей события процесса упругого рассеяния $e^+e^- \rightarrow e^+e^-$. Поделенные задержанные срабатывания используются для запуска детектора, формируя «пустые» события, содержащие только ложные срабатывания элементов детектора из-за наложений пучкового фона. Поделенные задержанные срабатывания используются для запуска детектора, формируя «пустые» события, содержащие только ложные срабатывания элементов детектора из-за наложений пучкового фона. Их частота пропорциональна светимости коллайдера. Эти события используются при моделировании событий изучаемых процессов.

БРПТ имеет 12 входов масок триггера, логическое «ИЛИ» которых вызывает срабатывание первичного триггера. Сигналы приходят от Блока масок первичного триггера. Маски являются логическим «И» сигналов аргументов триггера от срабатывания подсистем детектора. Так же в БРПТ поступает описанный выше сигнал для генерации «пустых» событий. Сигнал «ИЛИ» БРПТ синхронизируется с тактовой частотой ВЭПП. После его выработки БРПТ блокируется. Сигнал триггера запускает чтение оцифрованной информации с подсистем детектора. На вычитывание данных из блоков оцифровывающей электроники даётся 5 микросекунд, после чего БРПТ автоматически разблокируется и готов к регистрации следующего события. Максимальная частота триггерных сигналов устанавливается в ограничителе загрузок первичного триггера.

Модуль преобразования тактовой частоты разработан с использованием PLL (Phase-Locked Loop) системы с фазовой автоподстройкой частоты. Он преобразует входные сигналы с тактовой частотой равной примерно 12,29 МГц от ВЧ системы коллайдера (частота обращения пучков в ВЭПП-2000) в два выход-

ных сигнала с частотами, равными тактовой, умноженной на три и делённой на 1000. Первый сигнал с частотой около 37 МГц является тактовым для работы АЦП системы сбора данных, а второй подается на пересчётку для контроля. С выхода МЦСУ сигнал первичного триггера и тактовый сигнал 37 МГц поступают параллельно в блоки РСК.

В блоке РСК сигналы разветвляются из 1 в 9 и передаются в крейты «КЛЮКВА», содержащие оцифровывающую электронику.

В ноябре 2025 года набор данных начался при энергии в системе центра масс ниже 750 МэВ. В этой области энергий для уменьшения систематической погрешности при измерении сечения процесса $e^+e^- \rightarrow \pi^+\pi^-$ требуется существенно ослабить условия отбора в аппаратном первичном триггере. Поэтому был сделан переход на запуск детектора от сигнала срабатывания одной «башни» калориметра (группа из 12 кристаллов по 4 в трех слоях) с порогом на энерговыделение в ней 20 МэВ. Для процесса $e^+e^- \rightarrow \pi^+\pi^-$ это означает, что событие будет записано в случае, если только один из пионов дает энерговыделение в калориметре. Средняя скорость счета запусков первичного триггера при этом составляет около 7 кГц. Для того, чтобы работать с такой нагрузкой потребовалось увеличить производительность и надежность коммутационного оборудования и ПО системы сбора данных. Была улучшена проверка синхронизации данных, приходящих от плат оцифровки. В платы всех типов были добавлены счетчики запусков чтения, реализована периодическая проверка их взаимной синхронности во время захода и сравнение со значением счетчика в системе запуска. Разработаны механизмы контроля целостности считанных событий и оповещения оператора в случае ее нарушения. Сжатие массивов оцифрованных сигналов было перенесено из вычитывающей подсистемы в третичный триггер, а в ССД был задействован функционал сквозного блочного сжатия средствами Apache Kafka. Был реализован механизм гибкой настройки политики очистки временных данных в буферном хранилище, что позволило точнее управлять сроками хранения информации от завершившихся заходов. Для уменьшения количества записанных данных были разработаны условия программного отбора, достаточно жесткие, чтобы эффективно фильтровать полученную ССД информацию, но пропускающие события физических процессов. Эти условия были интегрированы в систему сбора данных. Они обеспечивают примерно трехкратное уменьшение потока данных.

В ПО моделирования эксперимента разработана и реализована схема первичного генератора адронных событий как комбинации генераторов эксклюзивных процессов. Такой генератор полезен для изучения инклюзивных процессов и фонов для эксклюзивных процессов. В связи с этой работой был доработан ряд первичных генераторов. Создан новый первичный генератор процессов многофотонной аннигиляции $e^+e^- \rightarrow N\gamma$. Опубликована статья.

Разработана и внедрена автоматическая система записи резервной копии экспериментальных данных на

магнитные ленты стандарта LTO-6 для обеспечения их долговременно хранения. Также была создана база учета данных, реализована проверка уже записанных данных. Полученная производительность системы записи составляет около 5 Тбайт/сутки (средний поток данных ССД – около 2.5 Тбайт/сутки).

Для данных, накопленных в первой половине 2025 года, была проведена реконструкция. Подготовлены калибровки, необходимые для анализа экспериментальных данных и моделирования (такие как положение и размер места встречи пучков и геометрическая юстировка калориметра).

Закончен перевод и тестирование всего ПО эксперимента на более современный дистрибутив Линукс (Almlinux 9) и 64-битную архитектуру. Текстовые файлы общего доступа (включая исходники ПО) с кириллической кодировкой KOI8-R были конвертированы в кодировку UTF-8. Для персональных файлов предоставлены средства детектирования и конвертации. После миграции было проведено регрессионное тестирование.

Установлен и сконфигурирован сервер коллективной работы с GPU Nvidia для интерактивного анализа данных. Проведены эксперименты с использованием GPU для машинного обучения на тестовых компьютерах.

Внесены значительные изменения в информационную систему детектора, расширяющие доступ к информации о набранных данных, конфигурации и состоянии эксперимента.

Анализ данных СНД

В 2025 году было выполнено прецизионное измерение сечений процессов $e^+e^- \rightarrow \pi^0\gamma$ и $e^+e^- \rightarrow \eta\gamma$ в энергетической области резонанса $\phi(1020)$. Для измерения процесса $e^+e^- \rightarrow \pi^0\gamma$ использовались данные с интегральной светимостью 19 пб⁻¹, записанные в 2018 году в диапазоне энергии 1000-1060 МэВ, а для процесса $e^+e^- \rightarrow \eta\gamma$ – данные с интегральной светимостью 73 пб⁻¹, записанные в 2018 и 2024 годах в диапазоне энергии 980-1060 МэВ. Оба процесса изучались в трехфотонном конечном состоянии. Число событий сигнала определялось из аппроксимации спектра инвариантных масс. Для процесса $e^+e^- \rightarrow \pi^0\gamma$ основными источниками фона являются события e^+e^- аннигиляции в два и три фотона, а также события процесса $e^+e^- \rightarrow \eta\gamma$. Спектр двухфотонных масс при энергии $E=1019$ МэВ, соответствующей максимуму резонанса $\phi(1020)$, приведен на Рис. 1. Он аппроксимировался суммой распределений для сигнала и фона. Оба распределения получены по моделированию. Видно, что моделирование хорошо воспроизводит их форму. Для фона точность расчета числа событий не хуже 5%. Хорошее описание фона было достигнуто в значительной степени за счет использования для моделирования электродинамического процесса $e^+e^- \rightarrow \gamma\gamma(\gamma)$ генератора Babayaga-NLO. Этот же генератор применялся при измерении светимости по событиям двухфотонной аннигиляции. Она была измерена с систематической погрешностью 0.6%. Распределение

по двухфотонной инвариантной массе при энергии $E=1020$ МэВ, по которому определялось число событий процесса $e^+e^- \rightarrow \eta\gamma$ приведено на Рис. 2. Здесь основным источником фона также являются события процесса $e^+e^- \rightarrow \gamma\gamma(\gamma)$. Результаты работы опубликованы.

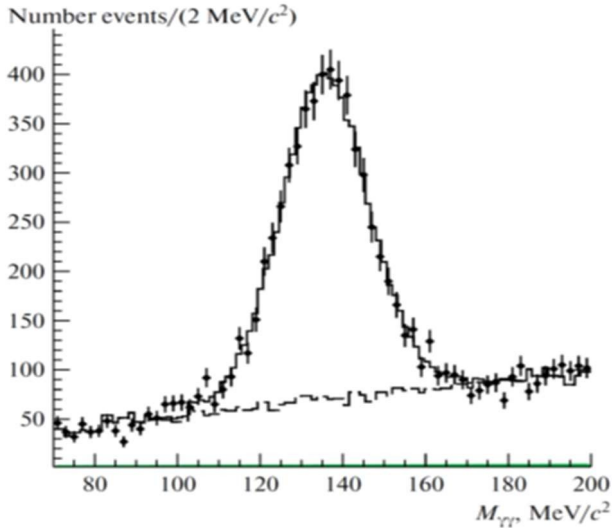


Рисунок 1. Спектр двухфотонных инвариантных масс, используемый при определении числа событий процесса $e^+e^- \rightarrow \pi^0\gamma$ при $E=1019$ МэВ

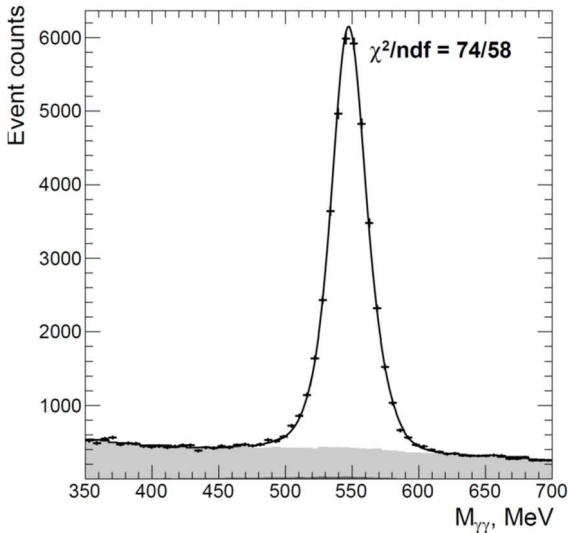


Рисунок 2. Спектр двухфотонных инвариантных масс, используемый при определении числа событий процесса $e^+e^- \rightarrow \eta\gamma$ при $E=1020$ МэВ.

Полученные в работах сечения исследованных процессов приведены на Рис. 3 и Рис.4.

На Рис. 3 измеренное сечение процесса $e^+e^- \rightarrow \pi^0\gamma$ сравнивается с результатами предыдущих измерений, выполненных в экспериментах СНД и КМД-2

на коллайдере ВЭПП-2М. На Рис. 4 синие кружки показывают данные по сечению $e^+e^- \rightarrow \eta\gamma$ для 2024 года, а красные крестики – для 2018 года.

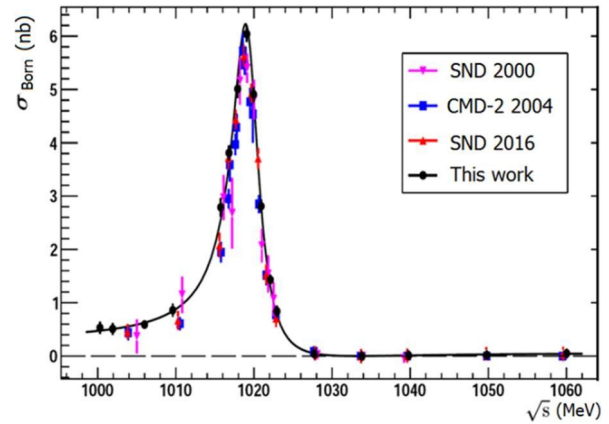


Рисунок 3. Измеренные сечения процесса $e^+e^- \rightarrow \pi^0\gamma$, выполненные в экспериментах СНД и КМД-2 на коллайдере ВЭПП-2М.

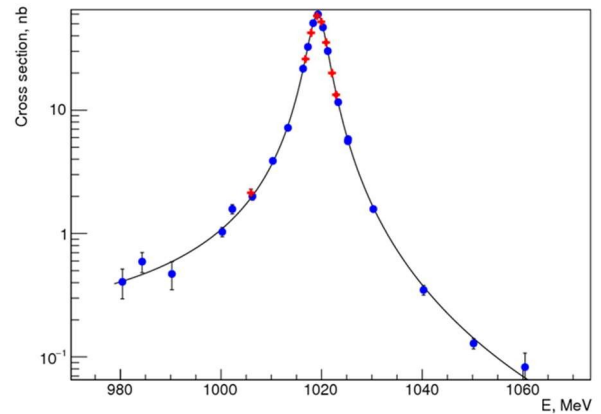


Рисунок 4. Измеренное сечение процесса $e^+e^- \rightarrow \eta\gamma$ для данных 2024 года (синие кружки), данные 2018 года - красные крестики.

Видно, что форма резонансной кривой для обоих процессов асимметрична. Это связано с интерференцией с нерезонансной амплитудой. Сечение процесса $e^+e^- \rightarrow \pi^0\gamma$ в максимуме резонанса измерено с систематической и статистической погрешностями 1.3% и 2.2% соответственно. Для процесса $e^+e^- \rightarrow \eta\gamma$ в максимуме резонанса статистическая ошибка составляет 0.7%, а систематическая – 1.3%. На сегодняшний день это самые точные измерения сечений $e^+e^- \rightarrow \pi^0\gamma$ и $e^+e^- \rightarrow \eta\gamma$. Измеренное сечение процесса $e^+e^- \rightarrow \pi^0\gamma$ на 7-15% превышает результаты предыдущих измерений. Сечение процесса $e^+e^- \rightarrow \eta\gamma$ приблизительно на 5% выше наиболее точных измерений, сделанных в эксперименте СНД на ВЭПП-2М.

По данным, накопленным в эксперименте СНД в 2011, 2012 и 2019–2021 годах в интервале энергий

1.55–2 ГэВ с интегральной светимостью 146 пб^{-1} , выполнено измерение сечения процесса $e^+e^- \rightarrow \pi^+\pi^-2\pi^0\eta$. Выделялись события, содержащие 2 заряженных частицы и шесть фотонов, четыре из которых формируют π^0 мезоны. Распределение по инвариантной массе оставшихся двух фотонов в интервале масс от 0.4 до 0.7 ГэВ приведено на Рис. 5 для эксперимента 2020 года, в котором данные набирались в интервале энергий 1.87-1.94 ГэВ. В распределении на нерезонансной подложке ясно виден пик на массе η -мезона. Из аппроксимации распределений двухфотонных

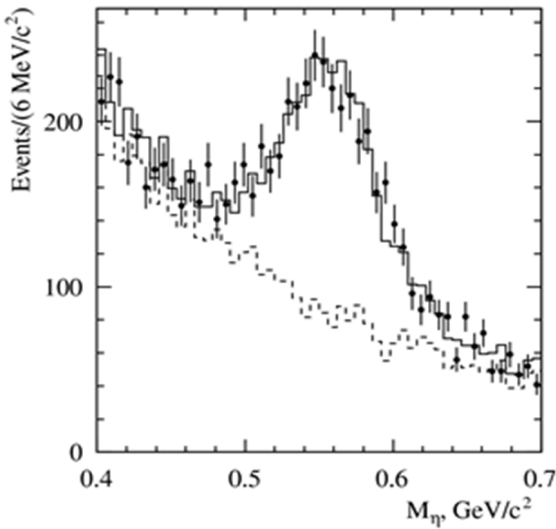


Рисунок 5. Спектр двухфотонных инвариантных масс, который аппроксимируется суммой распределений для сигнала и фона.

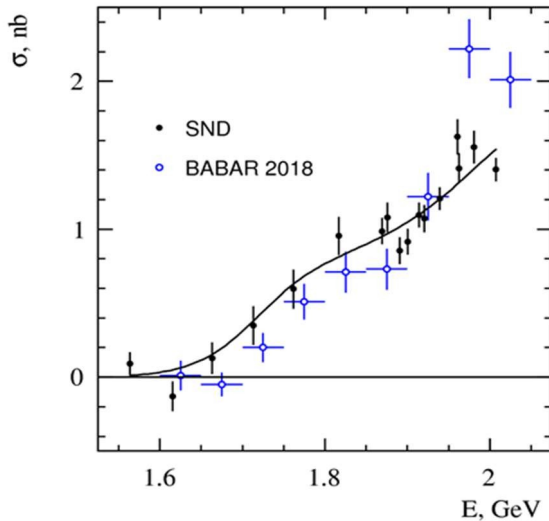


Рисунок 6. Измеренное сечение процесса $e^+e^- \rightarrow \pi^+\pi^-2\pi^0\eta$ в сравнении с данными эксперимента BABAR.

масс суммой распределений для эффекта и фона определялось число событий изучаемого процесса. Форма подложки и число фоновых событий в подложке неплохо (с точностью не хуже 10%) предсказываются моделированием. Измеренное в эксперименте СНД сечение показано на Рис. 6 в сравнении с единственным предыдущим измерением, выполненным в эксперименте BABAR. Систематическая ошибка нашего сечения составляет 6.5-8%, а данных BABAR -13%. Видно, что наши данные лежат систематически выше данных BABAR ниже 1.9 ГэВ и, наоборот, значительно ниже при $E > 1.95$ ГэВ.

В 2025 году были опубликованы работы по анализам процессов $e^+e^- \rightarrow K_S K_L$ и $e^+e^- \rightarrow \pi^+\pi^-\pi^0$, выполненным в 2024 году.

Приведенные выше результаты и предварительные результаты по процессам $e^+e^- \rightarrow \pi^+\pi^-$, $e^+e^- \rightarrow \pi^+\pi^-\pi^0$, $e^+e^- \rightarrow p\bar{p}$ и другим были представлены на конференциях: The 21-st International Conference on Hadron Spectroscopy and Structure, March 27 - 31, 2025, Осака, Япония; Сессия-конференция секции ядерной физики ОФН РАН, посвященная 70-летию В.А. Рубакова, 17-21 февраля, Москва; LXXV International Conference «NUCLEUS – 2025. Nuclear physics, elementary particle physics and nuclear technologies» Jul 1 – 6, 2025, St. Petersburg State University; Twenty-second Lomonosov conference on elementary particle physics, August 21-27, 2025, Москва.

ДЕТЕКТОР КМД-3

На рис. 1 показан детектор КМД-3 в экспериментальном зале ВЭПП-2000.

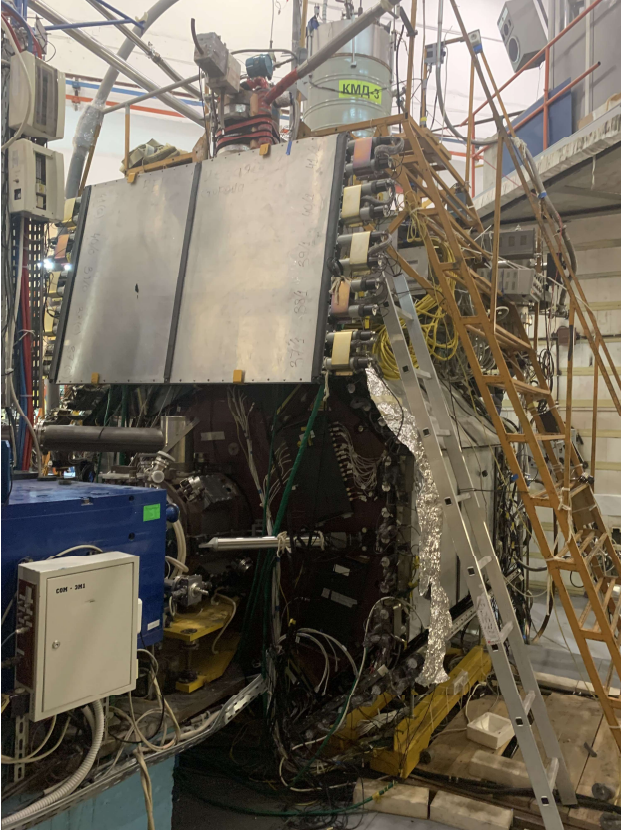


Рисунок 1. Детектор КМД-3.

Набор данных

В 2025 году продолжался набор данных с детектором КМД-3 на коллайдере ВЭПП-2000. Производилось сканирование «вниз» от энергии 800 МэВ в системе центра инерции и набором в каждой энергетической точке интеграла светимости от 1000 до 5000 нб⁻¹. В период с января по май был просканирован диапазон энергий в системе центра масс от 760 до 800 МэВ с переменным шагом от 6 до 1 МэВ (с минимальным шагом и наибольшим значением интеграла вблизи положения пика ω -мезона). Итого, за этот период был набран интеграл светимости 35.5 пб⁻¹. В ноябре 2025 было продолжено сканирование «вниз» от энергии 750 МэВ в системе центра инерции с шагом 10 МэВ и набором в каждой энергетической точке порядка 2000 нб⁻¹, и набран дополнительный интеграл в 8 пб⁻¹.

В 2025 году суммарный интеграл светимости, накопленный детектором КМД-3 за время работы коллайдера ВЭПП-2000, в форме данных, доступных для последующей обработки, достиг 1 фб⁻¹ (вслед за соответствующим значением, достигнутым в 2024 году согласно онлайн светимости).

Анализ данных КМД-3

В 2025 году продолжалась работа по подготовке к публикации результатов, полученных при обработке данных, набранных с детектором КМД-3. Стадию внутреннего реферирования проходят несколько статей. В их числе работа по измерению массы K_S -мезона, в котором получено значение, находящееся на общемировом уровне точности: $M(K_S) = 497.587 \pm 0.004(stat) \pm 0.012(syst) MeV/c^2$. В работе по измерению сечения процесса $e^+e^- \rightarrow K_S K_L$ в области энергий выше ϕ -мезона получено борновское сечение этого процесса в диапазоне 1.05-2.01 ГэВ в системе центра инерции по всему объему данных, накопленных к настоящему времени на детекторе КМД-3 (результаты представлены на рис. 2).

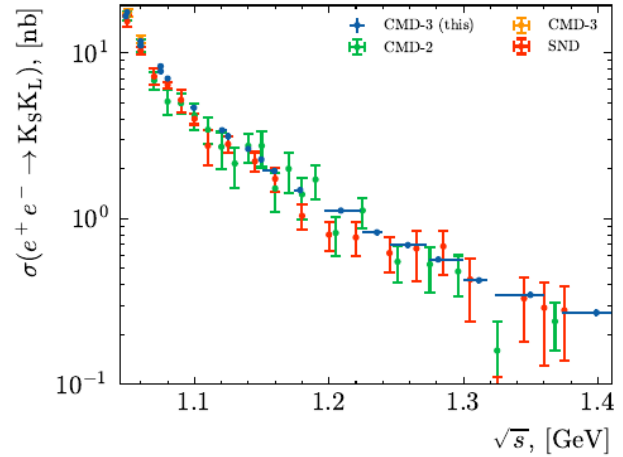
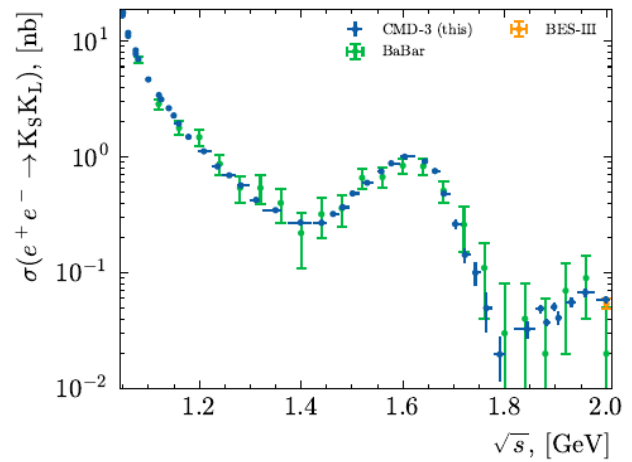


Рисунок 2. Борновское сечение процесса $e^+e^- \rightarrow K_S K_L$ в зависимости от энергии в системе центра масс. Представлено сравнение результатов нового измерения на КМД-3 (синие точки) с результатами КМД-2, СНД, предыдущего измерением КМД-3, BaBar и BES-III.

Ведется также работа по подготовке к публикации результатов по измерению сечения процесса $e^+e^- \rightarrow \pi^+\pi^-\pi^0\pi^0\eta$, и поиску процесса $e^+e^- \rightarrow D^*(2007)^0$.

Результаты по изучению процессов $e^+e^- \rightarrow \pi^+\pi^-\pi^0$, $e^+e^- \rightarrow n\bar{n}$, $e^+e^- \rightarrow K_S K_L$, $e^+e^- \rightarrow K_S K_L\pi^0$,

$e^+ e^- \rightarrow K_s^+ K_l^- \pi^+ \pi^-$, $e^+ e^- \rightarrow \pi^+ \pi^- \pi^+ \pi^-$, $e^+ e^- \rightarrow K_s^+ K^\pm \pi^\mp$, $e^+ e^- \rightarrow \eta \pi^+ \pi^-$, поиску событий конверсионных распадов ω - и ρ -мезонов в $\eta e^+ e^-$, измерению сечений электрон-позитронной аннигиляции в пару адронов вблизи порога рождения $n\bar{n}$, были представлены на Сессии-конференции секции ядерной физики ОФН РАН (Москва, 17-21 февраля 2025), LXXV Международной конференции «ЯДРО-2025» (Санкт-Петербург, Россия, 1-6 июля 2025), 22-ой Ломоносовской конференции по физике элементарных частиц (Москва, Россия, 21-27 августа 2025), обзорный доклад о работе на КМД-3 был представлен на 8th Plenary Workshop of the Muon g-2 Theory Initiative (Bures-sur-Yvette, France, 8-12 September 2025).

Работа и модернизация систем детектора

Для дрейфовой камеры (ДК) внедрен алгоритм подстройки порогов по пучковым заходам; проведена инспекция газовой системы ДК и выполнен анализ утечек, по результатам которых изменен режим продувки ДК; добавлен мониторинг по космическим событиям процессов поглощения ионизации; изготовлен блок мониторинга состава газовой смеси.

Была обновлена прошивка блоков АДИС жидкокислородного (LXe) калориметра, выполнена теплоизоляция выдачи азотного танка, которая привела к подавлению акустических эффектов до уровня естественных шумов зарядочувствительных усилителей. Введен в эксплуатацию новый блок управления клапанами подачи жидкого азота для охлаждения LXe-калориметра, который, будучи полностью автономным, обеспечивает безопасность эксплуатации в т.ч. при аварийном отключении электросети. Введен в работу мониторинг давления и планируется введение в эксплуатацию блока измерения температуры в хранилище ксенона.

Калориметр на основе кристаллов CsI успешно функционировал в составе детектора, в течение года проводились текущие работы по его калибровке и мониторингу нестабильно работающих кристаллов.

В работе торцевого BGO-калориметра отлажена и поставлена на регулярную основу процедура детальной калибровки от генератора плат УФО. Модернизирована прошивка АДИС: добавлено вычитание пьедесталов АДИС из амплитуды перед передачей энергии в «нейтральную» часть системы первичного триггера, введена обработка дополнительных регистров и флагов срабатывания. Модернизирована программа реконструкции кластеров BGO с использованием фитированных пьедесталов УФО и предполагается ее включение в общие программы реконструкции КМД.

Время-пролетная система (ToF) стабильно работает в составе детектора. Выполнена временная калибровка для данных всех сезонов работы детектора, продолжаются работы по амплитудной калибровке и детальному моделированию системы.

В мюонной системе подавлена наводка на всех счетчиках с использованием аттенуаторов, написана программа для регулировки порогов, ведутся текущие работы по калибровке системы.

В магнитной системе детектора поэтапные улучшения системы подачи жидкого азота, выполненные в 2024-2025 гг., привели к сокращению расхода азота с 250 до 150 кг/сут. Продолжаются работы по улучшению системы подачи гелия для минимизации перепадов давления и снижения потерь во время периодических заливок.

В рамках модернизации электроники детектора разработан блок приема и передачи данных (БППД-3.0), который выполняет роль концентратора / разветвителя потока данных с детектора. В 2025 году такой блок установлен на мюонной системе, а также создан стенд для проверки БППД, которая проводится параллельно работе системы сбора данных КМД-3 в условиях максимально приближенных к рабочим. Также ведутся работы по проектированию и отладке новой электроники для детектора: блоков WFD16 для калориметрической системы, плат БППД24, которые смогут принять роль многофункциональных узлов с для системы сбора данных, а также КАМАК-крейт контроллеров с Ethernet связью.

Ранее в 2024 году был введен в работу так называемый «решающий блок» первичного триггера детектора КМД-3, предназначенный для отбора полезных событий в детекторе. В 2025 году были добавлены новые маски заряженного триггера регистрирующие совпадения 4-го слоя ДК со слоями 6,7,8. В результате существенно снижена загрузка «заряженного» триггера, что позволило сократить мертвое время детектора без потери в эффективности срабатывания. Добавлены маски совпадения внутренних слоев ДК с триггерными группами торцевого BGO калориметра. Ведутся работы по улучшению моделирования «заряженного» триггера.

В 2025 году поддерживалась стабильная работа компьютерной и программной инфраструктуры детектора КМД-3. Помимо текущей регулярной поддержки аппаратной части, в два раза увеличено общее дисковое хранилище, введен в эксплуатацию новый онлайн-сервер и выполнена миграция на него дискового сервера системы сбора данных. Сделаны существенные продвижения в разработке и стандартизации программного обеспечения, необходимость которых тесно связаны со введением в работу новых блоков электроники и обновлениями в работе существующих блоков и сервисов системы сбора данных и мониторинга работы систем детектора.

Детектор КЕДР

Детектор КЕДР (рис.1)— это универсальный магнитный детектор, эксперименты с которым ведутся на e^+e^- -коллайдере ВЭПП-4М в области энергий от 2 до 11 ГэВ в системе центра масс. Детектор оборудован системой регистрации рассеянных электронов для изучения $\gamma\gamma$ -физики. Параметры установки КЕДР находятся на уровне параметров детекторов, работающих в мире в этой области энергий. Программа работы детектора КЕДР включает

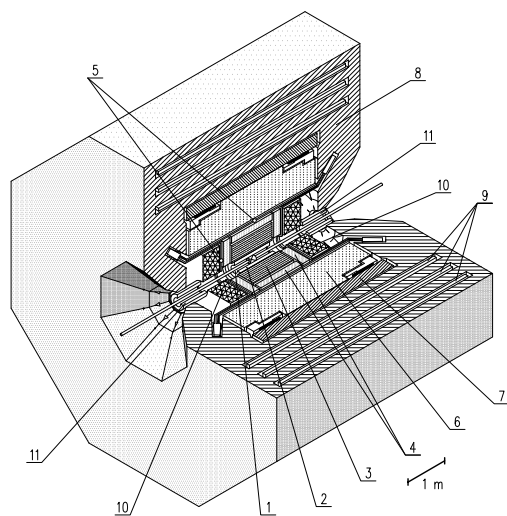


Рис. 1: Детектор КЕДР: 1 – вакуумная камера ускорителя; 2 – вершинный детектор; 3 – дрейфовая камера; 4 – аэрогелевые пороговые черенковские счетчики; 5 – времяпролетные счетчики; 6 – баррельный жидкокриптоновый калориметр; 7 – сверхпроводящая катушка; 8 – ярмо; 9 – мюонные камеры; 10 – торцевой CsI-калориметр; 11 – компенсирующая катушка

в себя набор статистики для изучения двухфотонной физики в области энергий $2E = 7 \div 9,3$ ГэВ, а также набор статистики для измерения масс и лептонных ширин Υ -мезонов в области энергий $2E = 9,46 \div 10,36$ ГэВ. Осенью 2024 года на ускорительном комплексе ВЭПП-4М возникли неполадки, что привело к остановке набора статистики на высокой энергии в области $\Upsilon(1S)$ -резонанса. Было принято решение о наборе статистики в пике и подложке J/ψ -резонанса для увеличения интеграла светимости, который используется для анализа распадов J/ψ -мезона. За 2025 год был набран интеграл светимости $0,85 \text{ пб}^{-1}$. В настоящий момент набор данных в эксперименте КЕДР приостановлен для изготовления и замены некоторых элементов вакуумной камеры ВЭПП-4М. В то же время подготовительные работы по измерению массы $\Upsilon(1S)$ -резонанса продолжают, и в следующем разделе изложены результаты работ с лазерным поляриметром, используемым при измерении энергии ВЭПП-4М.

Лазерный поляриметр

Для измерения поляризации на энергии $\Upsilon(1S)$ на ускорителе ВЭПП-4М используется установка «Лазерный поляриметр». Метод измерения основан на определении асимметрии рассеяния циркулярно поляризованных фотонов на вертикально поляризованном релятивистском электроном.

Лазерный поляриметр расположен вблизи экспериментального промежутка ВЭПП-4М. Основные характеристики используемого источника фотонов (импульсный Nd:YLF лазер): длина волны: 527 нм; мощность: 2 Вт; частота следования импульсов: до 4 кГц; длительность импульса: 5 нс.

Циркулярная поляризация луча создается фазовой пластинкой, а быстрое переключение между состояниями поляризации осуществляется ячейкой Погкельса. Луч фокусируется на электронном ступке через экспандер и управляемое зеркало. Обратные рассеянные гамма-кванты регистрируются детектором на основе тройных газовых электронных умножителей (ГЭУ).

В 2024 году лазерный поляриметр начал применяться в эксперименте по измерению массы $\Upsilon(1S)$ -мезона. За этот период было выполнено более 600 калибровок энергии. Однако в 2025 году из-за проблем с вакуумом в камере ускорителя ВЭПП-4М детектор КЕДР набирал данные на низкой энергии в области J/ψ резонанса. На этой энергии лазерный поляриметр имеет низкую эффективность, поэтому поляризация преимущественно измерялась при помощи тушековского поляриметра.

Интенсивная круглосуточная работа в 2024 году привела к деградации мощности старого лазера с 2 Вт до 0,6 Вт (более чем в три раза). В связи с этим в 2025 году был закуплен и 25 мая введён в эксплуатацию новый лазер со следующими параметрами: мощность: 3 Вт; длительность импульса + джиттер: 8 нс. После замены лазера интенсивность по сравнению со старой системой выросла в 2,5 раза и достигла 25 кГц/мА .

Несмотря на низкую эффективность в области низких энергий, была предпринята попытка одновременного измерения поляризации лазерным и тушековским поляриметрами на резонансе J/ψ . На полученных графиках скачок поляризации соответствует моменту деполаризации, измеренному тушековским поляриметром. Определенная из подгонки разница в измеренных энергиях составила: $\Delta E = 11 \pm 35 \text{ кэВ}$. Однако низкая эффективность и малая величина поляризации не позволяет полноценно использовать лазерный поляриметр на столь низких энергиях.

Для эксперимента по измерению массы иpsilon критически важным является учет систематической погрешности, связанной с шириной спиновой линии. В июне 2025 года было проведено измере-

ние ширины линии путём медленного сканирования (рис. 2).

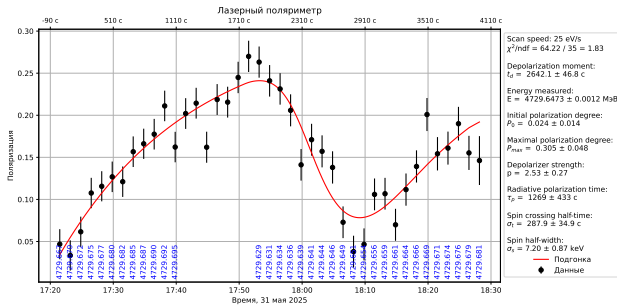


Рис. 2: Измерение ширины спиновой линии при помощи лазерного поляриметра

Измеренное значение ширины спиновой линии составило:

$$\sigma_s = 7,2 \pm 0,9 \text{ кэВ.}$$

Эта величина будет напрямую использоваться в качестве поправки к энергии в основном эксперименте по измерению массы $\Upsilon(1S)$ мезона.

Обработка экспериментальных данных

Измерение масс D -мезонов

Проведено измерение масс нейтрального и заряженного D -мезонов в процессе $e^+e^- \rightarrow \psi(3770) \rightarrow DD$ на основе $4,9 \text{ пб}^{-1}$ интегральной светимости, набранной в эксперименте КЕДР на коллайдере ВЭПП-4М в 2004-м и 2016-2017 годах. D -мезоны реконструировались в распадах $D^0 \rightarrow K^-\pi^+$ и $D^+ \rightarrow K^-\pi^+\pi^+$ (и зарядово-сопряженные). Текущий результат превосходит по точности предыдущее измерение КЕДР 2010 года примерно в 2 раза. Измеренное значение массы D^0 согласуется с более точными измерениями других экспериментов (CLEO, BABAR и LHCb), а значение массы D^+ на данный момент является наиболее точным измерением. Значения масс составили:

$$M_{D^0} = 1865,100 \pm 0,210 \pm 0,046 \text{ МэВ,}$$

$$M_{D^+} = 1869,560 \pm 0,288 \pm 0,109 \text{ МэВ.}$$

Разница масс между D^+ и D^0 мезонами составила:

$$M_{D^+} - M_{D^0} = 4,46 \pm 0,36 \pm 0,12 \text{ МэВ.}$$

Результат согласуется с среднемировым значением и более точным результатом LHCb, в пределах неопределенностей.

Финальный результат физического анализа опубликован в двух статьях: *V. V. Anashin et al.*, *J. High Energy Phys.*, 2025, n.1; *B. V. Anashin и др.*, *ЭЧАЯ*, т.56, вып.3, с.1336–1347 (2025).

Измерение R в области $2E = 5\text{-}7 \text{ ГэВ}$

Величина R определяется как отношение полного сечения аннигиляции электрон-позитронной пары в адроны (с учётом радиационных поправок) к сечению рождения мюонной пары в борновском приближении:

$$R(s) = \frac{\sigma(e^+e^- \rightarrow \text{адроны})}{\sigma(e^+e^- \rightarrow \mu^+\mu^-)}.$$

Точное измерение $R(s)$ имеет фундаментальное значение для проверки Стандартной модели, поскольку эта величина критически важна для:

- определения аномального магнитного момента мюона $(g - 2)_\mu$;
- вычисления константы сильного взаимодействия $\alpha_s(s)$;
- уточнения постоянной тонкой структуры $\alpha(M_Z^2)$ в области резонанса Z -бозона;
- расчётов масс тяжёлых кварков в рамках квантовой хромодинамики.

В период с 2018 по 2020 год на ускорительном комплексе ВЭПП-4М с детектором КЕДР был набран интеграл светимости $13,7 \text{ пб}^{-1}$ в семнадцати точках диапазона энергий от 4,56 до 6,96 ГэВ.

Основной источник систематической неопределённости в измерении R – ограниченная точность моделирования процесса адронизации. В течение 2025 года проводилась настройка первичного моделирования и отклика детектора для улучшения согласования с экспериментальными данными. Для этого проводилась тщательная оптимизация параметров генератора JetSet и учет детекторных эффектов, таких как эффективность реконструкции треков, неэффективность срабатывания проволочек дрейфовой камеры, добавление событий слу-

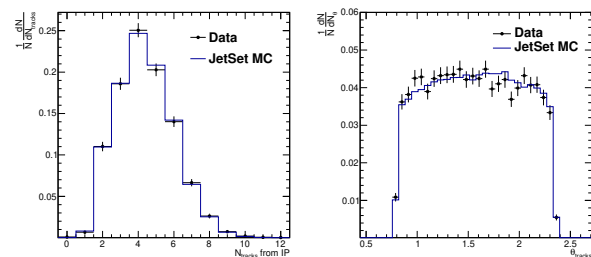


Рис. 3: Слева приведены распределения по числу треков из области места встречи пучков для экспериментальных данных и событий моделирования. Справа - сравнение распределений по полярному углу для экспериментальных данных и событий моделирования.

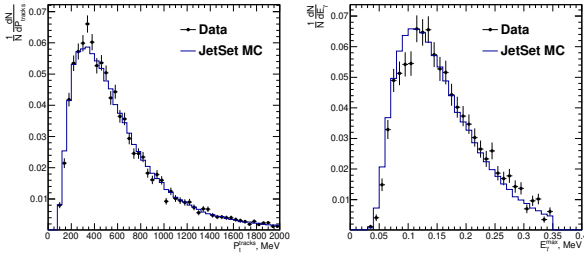


Рис. 4: Слева приведены распределения по поперечному импульсу треков заряженных частиц для экспериментальных данных и событий моделирования. Справа - сравнение распределений по максимальной энергии зарегистрированного фотона для экспериментальных данных и событий моделирования.

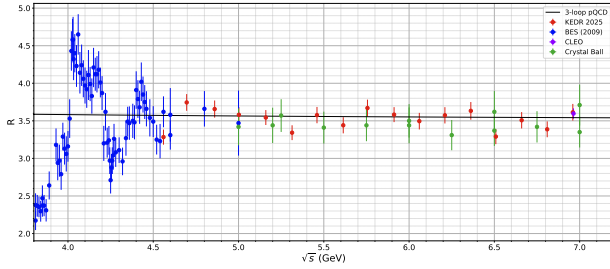


Рис. 5: Сравнение полученных результатов эксперимента КЕДР по измерению величины R с данными предыдущих экспериментов.

чайного запуска, а также калибровка всех подсистем детектора. Из экспериментальных распределений, соответствующих рождению адронов, вычитался вклад фоновых процессов. Проведённые усовершенствования направлены на снижение систематических погрешностей и повышение точности конечных результатов по измерению $R(s)$ в указанном энергетическом диапазоне. Сравнение распределений для экспериментальных данных и событий моделирования показаны на рис. 3 и 4.

Полученные результаты эксперимента КЕДР по измерению величины R в диапазоне энергий от 4,56 до 6,96 ГэВ (рис. 5) были опубликованы в статье: V. V. Anashin et al., Phys. Part. Nucl. Lett., 2025, Vol. 22, No. 1, pp. 137–141.

Измерение вероятности распада $J/\psi \rightarrow \pi^+\pi^-\eta$

В 2025 году завершена работа по исследованию распада $J/\psi \rightarrow \pi^+\pi^-\eta$, при $\eta \rightarrow \gamma\gamma$. В анализе использовано около 4,93 миллиона событий рождения J/ψ , что соответствует интегральной светимости $1,4 \text{ пб}^{-1}$.

Ранее данный канал изучался коллаборациями BaBar (методом ISR) и BES-III, однако внутренняя

динамика процесса (вклады резонансов и их интерференции) подробно не исследовалась. В нашей работе выполнен детальный учёт всех существенных промежуточных состояний. Основной вклад дают резонансы $\rho\eta$ и $\omega\eta$, несмотря на малую вероятность распада $\omega \rightarrow \pi^+\pi^-$. В модель также включены состояния $\rho(1450)\eta$ (по аналогии с процессом $\pi^+\pi^-\pi^0$) и $a_2(1320)\pi$, для которых установлены верхние пределы на уровне 90%, а также нерезонансный процесс $e^+e^- \rightarrow \pi^+\pi^-\eta$ (рис. 6,??).

Помимо вероятностей распада измерены относительные фазы между резонансами: между ρ и ω фаза составила $(88,4 \pm 2,5 \pm 3,1)^\circ$, а между ρ и $\rho(1450)$ — $(148,6 \pm 44,3 \pm 41,0)^\circ$.

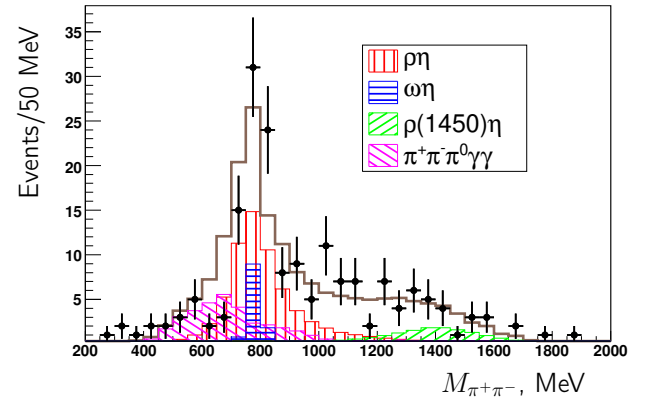


Рис. 6: Инвариантная масса $\pi^+\pi^-$. Цветные гистограммы показывают вклады различных резонансов: $\rho\eta$ (красный), $\omega\eta$ (синий), $\rho(1450)\eta$ (зелёный). Фон от процесса $\pi^+\pi^-\pi^0\gamma\gamma$ показан розовым цветом. Коричневая линия – полное моделируемое распределение.

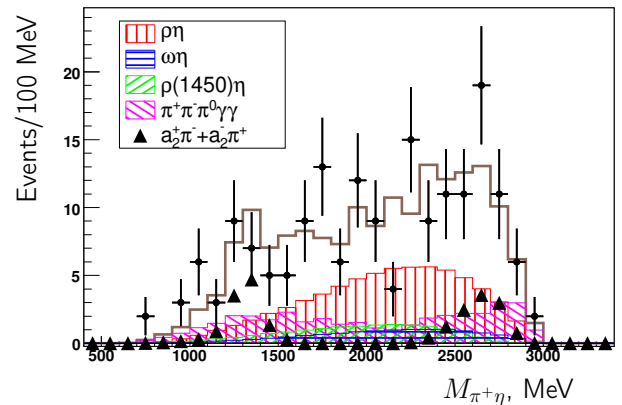


Рис. 7: Инвариантная масса $\pi^+\eta$. Видны намёки на наличие структуры, связанной с состоянием $a_2(1320)\pi$ (около 1300 МэВ и 2700 МэВ).

В анализе учтены все возможные интерференции между состояниями с векторным мезоном, а также

с нерезонансным процессом. Моделирование состояний $a_2(1320)\pi$ и $\pi^+\pi^-\pi^0\gamma\gamma$ проводилось методом спиральных амплитуд, а всех векторных состояний с использованием следующего выражения:

$$\left(\frac{d\Gamma}{d\Phi}\right)_{V+P} \propto \left| \sum_{k=\rho,\omega,\rho(1450)} a_k e^{i\phi_k} \right|^2 =$$

$$= \sum_{k=\rho,\omega,\rho(1450)} |a_k|^2 + \sum_{k,j=\rho,\omega,\rho(1450), k \neq j} a_k a_j^* e^{i(\phi_k - \phi_j)},$$

где

$$a_V = |\mathbf{P}_{\pi^+} \times \mathbf{P}_{\pi^-}| \sin(\theta_n) \frac{m_V^2}{Q^2 - m_V^2 + iq\Gamma_V(Q^2)} \times$$

$$\times \sqrt{\mathcal{B}(J/\psi \rightarrow V\eta)\mathcal{B}(V \rightarrow \pi^+\pi^-)},$$

$$\Gamma_V(Q^2) = \Gamma_V \left(\frac{p_\pi(Q^2)}{p_\pi(m_V^2)} \right)^3 \left(\frac{m_V^2}{Q^2} \right).$$

В выше приведённых формулах применены следующие обозначения:

- $|\mathbf{P}_{\pi^\pm}|$ — кинематические импульсы пионов,
- θ_n — угол между нормалью в плоскости реакции и направлением вдоль пучка электронов,
- \mathcal{B} — вероятность распада,
- $p_\pi(Q^2)$ — четырёх вектор энергии и импульса пиона в зависимости от Q^2 ,
- Γ_V — ширина V мезона.

Вероятности распадов определялись путём подгонки модели к двумерному распределению событий на диаграмме Далица в координатах $M_{\pi^+\eta}$ и $M_{\pi^-\eta}$. Для оценки согласия использовалась логарифмическая функция правдоподобия: $L = -2 \sum_i (N_i^{\text{мод}} - N_i^{\text{эксп}} + N_i^{\text{эксп}} \ln(N_i^{\text{эксп}}/N_i^{\text{мод}}))$, где суммирование проводилось по бинам диаграммы, $N_i^{\text{эксп}}$ и $N_i^{\text{мод}}$ — числа экспериментальных и моделируемых событий в i -м бине.

Результаты измерений:

$$\mathcal{B}(J/\psi \rightarrow \pi^+\pi^-\eta) = (4,73 \pm 0,49 \pm 1,17) \times 10^{-4},$$

$$\mathcal{B}(J/\psi \rightarrow \rho\eta) = (2,04 \pm 0,58 \pm 0,39) \times 10^{-4}.$$

Верхние пределы (на уровне 90%):

$$\mathcal{B}(J/\psi \rightarrow \rho(1450)\eta \rightarrow \pi^+\pi^-\eta) < 1,32 \times 10^{-4},$$

$$\mathcal{B}(J/\psi \rightarrow a_2(1320)\pi) < 1,69 \times 10^{-3}.$$

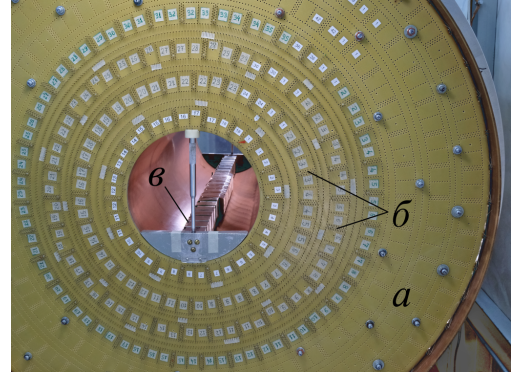


Рис. 8: Вид дрейфовой камеры со стороны высоковольтного питания: *а* — торцевая пластина, *б* — массив пинов с проволочками, *в* — балка с магнитами.

Новая дрейфтовая камера

Основой трековой системы детектора является дрейфовая камера (ДК). Она позволяет измерять координаты и ионизационные потери частиц, а также реконструировать их импульс в магнитном поле. В существующей дрейфовой камере за 25 лет эксплуатации около 25 лет появились нерабочие области и обнаружилась высокая чувствительность к условиям работы, что приводит к ухудшению качества реконструкции треков частиц. Изготовление новой ДК находится в фазе натяжения проволочной структуры, начатой в 2024 году.

ДК насчитывает всего 15 690 проволочек, которые структурированы в 7 концентрических суперслоёв дрейфовых ячеек (рис. 8). Первый (внутренний) суперслой содержит 18 ячеек, каждый следующий — на 6 ячеек больше, чем предыдущий, всего 252 ячейки. В 2025 году натянуты 4 144 проволочки, из них 408 анодных, 3 088 полевых и 648 экранных. Итого по состоянию на конец года в ДК содержится 5 402 натянутых проволочек, или 34,4% от общего числа, при этом близка к завершению работа с четвёртым суперслоем.

Проволочки крепятся с помощью пинов (рис. 9а), которые плотно, без люфта, устанавливаются в отверстия диаметром 1 мм в торцевых пластинах ДК. В ходе работ по натяжению обнаружилось трудности с досылом пина в отверстие, связанные в основном с превышением его диаметра на величины до 0,01 мм от номинальных значений, а также с наличием остатков стружки от сверления и заусенцев на краях отверстий. Частота встречаемости таких случаев достаточно высока — около 30%. Для возможности перетяжки проволочек в сложных, закрытых другими проволочками, местах изготовлена оснастка в виде двух стальных тонких и коротких спиц (с петлями на конце), выполняющих роль проводников проволоки сквозь торцы камеры

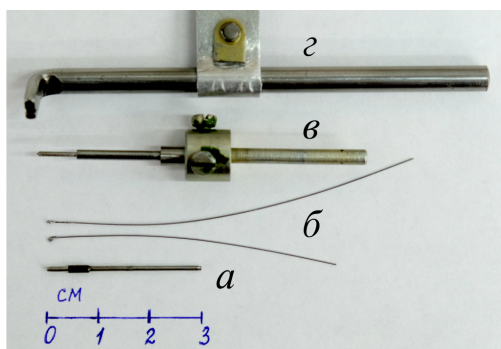


Рис. 9: Элементы оснастки для натяжения проволочек: *а* — пин, *б* — спицы для ремонта, *в* — развертка-калибр, *г* — инструмент досыла пина.

(рис. 9б). Кроме того, для сведения к минимуму числа повторных натяжений (перетяжек) приняты следующие меры: контроль глубины отверстий, при необходимости правка отверстия разверткой-калибром (рис. 9в), чистка и обеспыливание, отбор пинов по внешнему диаметру. Дополнительно был изготовлен новый, более удобный, инструмент для досыла пина (рис. 9г).

Очевидно, что степень досыла пина требует внимания для сигнальных (анодных) проволочек в стереослое, где продольное смещение места выхода проволочки на срезе пина отражается на положении этой проволочки в поперечной плоскости. Величина стереоугла составляет 100 мрад, и расчёт показывает, что смещение пина на 1 мм со стороны одного из торцов камеры приводит к поперечному смещению проволочки в этом месте на 100 мкм. Исходя из того, что проектное пространственное разрешение ДК составляет около 100 мкм, введено следующее ограничение: величина недосыла не должна превышать 0,5 мм.

В связи с тем, что длина пинов имеет разброс до 1 мм, то контролировать степень их досыла оказалось надёжнее путём визуального наблюдения ячейки изнутри через технологические окна во внешней обечайке (рис. 10). Для этой цели используется монокуляр с увеличением 8 крат, обеспечивающий поле зрения около 5 см на расстоянии до объекта 100 см. В норме пин должен быть установлен так, что изнутри камеры его торец оказывается на глубине 0,18 мм от поверхности торцевой пластины и хорошо виден.

В качестве экранных проволочек используется золочёная медно-титановая проволока диаметром 70 мкм. Для удаления заводских остатков эмульсии с её поверхности успешно выполнены 4 захода перемотки и ультразвуковой мойки отрезками по 200 м.

Контроль силы натяжения проволочек проводится по измерению резонансной частоты колебаний в магнитном поле. В 2025 году были установлены постоянные магниты из сплава Nd-Fe-B на всей длине

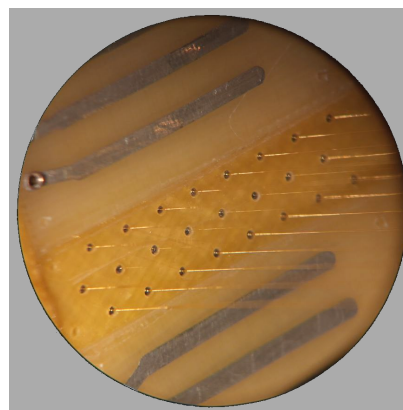


Рис. 10: Вид центральной части дрейфовой ячейки изнутри ДК.

ДК (см. рис. 8в). Благодаря этому возбуждение колебаний стало возможным для проволочек, расположенных на больших расстояниях от балки с магнитами, в четвёртом суперслое. Найденные по измерениям частот колебаний силы натяжения проволочек приведены на рис. 11. Это предварительные результаты, в которых учтена только одна систематическая ошибка, связанная с большей примерно на 5 мм длиной проволоки в стереослое по сравнению с аксиальными.

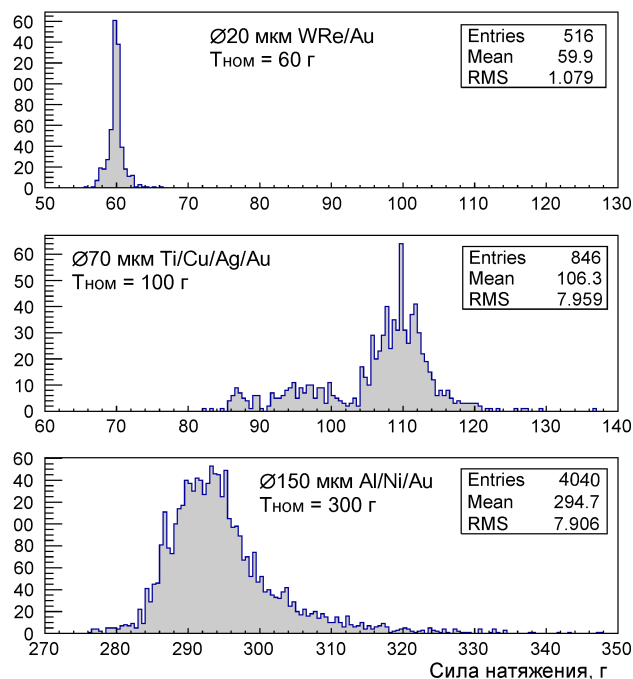


Рис. 11: Гистограммы силы натяжения проволочек.

Модернизация системы сбора данных

В 2025 году работы по модернизации системы сбора данных (ССД) продолжали развивать результаты,

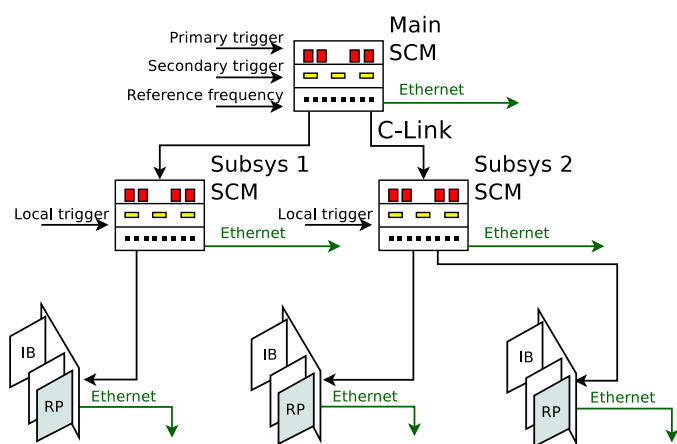


Рис. 12: Схема синхронизации и запуска

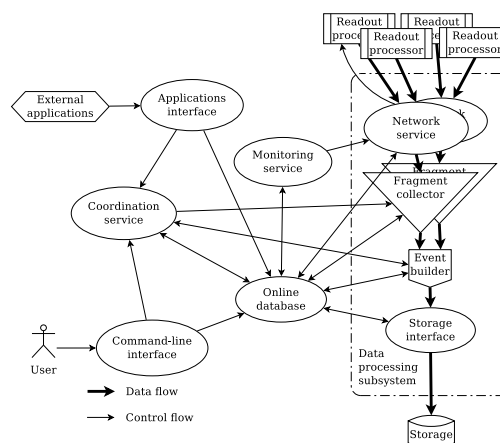


Рис. 13: Программные компоненты системы сбора данных

полученные в прошлом году. Аппаратное обеспечение модернизируемой части ССД состоит из блоков двух видов. Блок МЧС (Модуль Частот и Синхронизации), он же SCM, предназначен для использования в составе ССД для обеспечения синхронизации работы электроники, передачи сигналов от Триггера (первичного и вторичного), сбора статусной информации. Для этого Блок МЧС оснащён интерфейсами Ethernet и USB. Задачи запуска измерений, синхронизации потока данных и изменения состояния ССД решаются применением специализированного интерфейса — C-Link.

Блок ПВВ (Процессор ввода-вывода), он же RP, предназначен для использования в составе ССД детектора КЕДР в качестве контроллера крейта Клюква. На блок возлагаются задачи управления режимами работы информационных и триггерных плат, размещенных в крейте, чтение данных события и отправка её для обработки совместно с другими фрагментами события, взаимодействие с прочими частями ССД. Общая схема системы синхронизации, запуска и распределения команд показаны на рис. 12.

В результате тестирования обновлённых в прошлом году блоков ССД выявились редкие сбои, приводившие к потере связи с устройством. Для повышения общей надёжности и стабильности в прошивках блоков МЧС и ПВВ были скорректированы временные параметры синхросигналов оперативной памяти событий и алгоритмы обработки сетевых запросов.

Данные, полученные устройствами ССД из оцифровывающей электроники, передаются в кластер ССД для программной обработки. Каждый пакет данных, отправляемый из аппаратуры ССД, содержит в себе всю необходимую информацию для однозначной идентификации источника пакета, снимок его состояния в момент обработки события и, обязательно, номер обрабатываемого события.

Программное обеспечение ССД решает весь комплекс задач по управлению процессом сбора данных, настройке и диагностике оборудования, включая получение данных от оборудования и их обработку, реакции на команды пользователей, настройка оборудования сбора данных, поддержание конфигурации, реакции на изменения конфигурации и отказы оборудования.

Система сбора данных детектора является ключевой системой для обеспечения набора данных в ходе эксперимента. Для обеспечения надёжности и отказоустойчивости ССД в основу положен кластерный принцип. Программное обеспечение (ПО) сбора данных реализовано в виде набора независимых процессов исполняющихся на всех машинах кластера. Для обмена командами и данными используется обмен сообщениями. Основные компоненты ССД и схема взаимодействий между ними показаны на рис. 13.

Для хранения настроек аппаратуры и программного обеспечения приёма и обработки данных используется иерархическая база данных конфигурации. Программное обеспечение приёма и обработки данных с использованием базы данных и информации во входящих данных извлекает результаты измерений информационных плат.

За отчётный период была разработана полная цепочка алгоритмов обработки входящих данных для каждого типа источника, реализованы механизмы сборки фрагментов и полных событий. Реализованы механизмы мониторинга работоспособности компонент ПО и динамического распределения нагрузки по имеющимся вычислительным мощностям. Система является горизонтально масштабируемой по построению, обеспечивает высокий уровень параллелизма передачи и обработки данных.

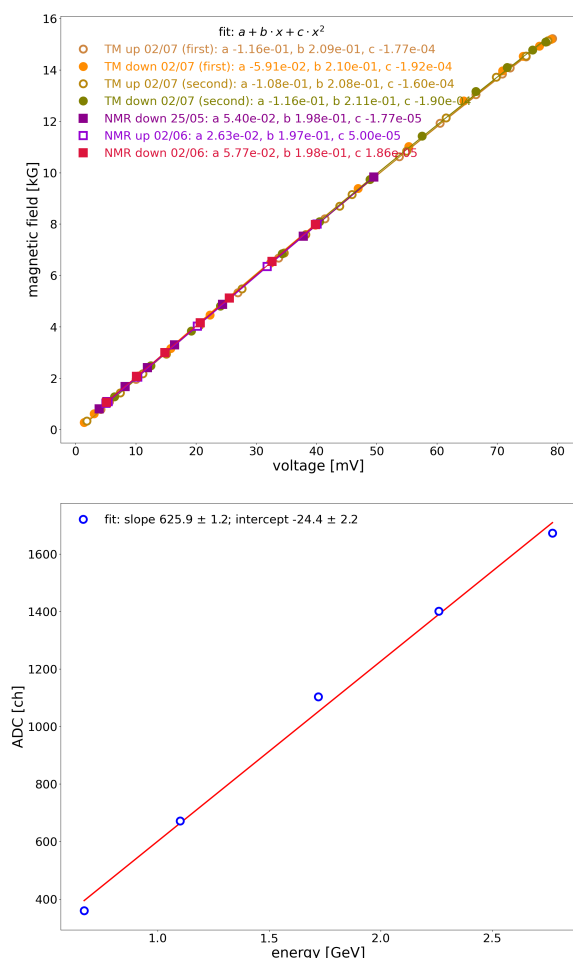


Рис. 14: Зависимость магнитного поля поворотного магнита от напряжения (тока) источника питания, измеренная с помощью датчиков Холла и ЯМР, а также для разных циклов выставки поля – подъём и опускание по петле гистерезиса (сверху). Калибровка энергетической шкалы АЦП, используемого для оцифровки сигнала с NaI-калориметра, – пример зависимости от энергии тестовых электронов (снизу).

Тестовый пучок электронов на ВЭПП-4М

Установка тестовый пучок электронов (далее – установка) предназначена для проведения методических работ по разработке перспективных детекторов в области физики высоких энергий и ядерных исследований. Установка имеет следующие параметры:

- диапазон энергий электронов от 100 МэВ до 3500 МэВ;
- энергетический разброс электронов равен 7,8% для энергии 100 МэВ и 2,6% для энергии 3000 МэВ;

- средняя скорость счета полезных событий 70 ÷ 90 Гц.

Установка оснащена всем необходимым оборудованием для организации триггерного сигнала, измерения координат треков и энергии тестового пучка. Используемая для этого система сбора данных обеспечивает также регистрацию данных с измеряемых прототипов детекторов.

В 2025 году на установке было проведено всего 6 смен. Список проведенных экспериментов и работ следующий.

1. Технические работы на тестовом пучке: калибровка выставки магнитного поля поворотного магнита с измерением соответствующего энергетического спектра тестовых электронов в диапазоне энергий от 500 МэВ до 3000 МэВ (рис. 14). Необходимость выполненной работы обусловлена запросом со стороны команды электромагнитного калориметра детектора MPD (НИКА), полученные результаты нужны для анализа данных, набранных на прототипе калориметра на тестовом пучке в ноябре 2024 года.
2. Исследование прототипа порогового счетчика АШИФ для модернизации системы идентификации частиц детектора СЧД. Модернизация, по сравнению с используемым сейчас счетчиками АШИФ на детекторе СЧД, заключается в использовании твердотельных ФЭУ (SiPM) вместо ФЭУ на основе МКП для регистрации света с переизлучателя. В прототипе использовался аэрогель с двумя показателями преломления $n = 1,03$ и $n = 1,05$. В качестве триггера использовались два ФЭУ на основе МКП. Пример оцифрованного сигнала с SiPMs показан на рисунке 15. Измерялась эффективность регистрации релятивистских электронов в зависимости от их координаты прохождения пучка в прототипе счетчика АШИФ (рис. 16). Измерения выполнялись на двух энергиях тестового пучка 580 МэВ и 2240 МэВ, энергия пучка электронов на ВЭПП-4М была равной 1500 МэВ и 4500 МэВ соответственно.
3. Измерения параметров шифтеров в малом прототипе АШИФ в следующей конфигурации (энергия тестового пучка 580 МэВ): показатель преломления аэрогеля $n=1,008$, два ФЭУ – SiPM NDL (Китай) и ФЭУ fine-mesh. Измерения параметров выполнялись как на низкой энергии (1500 МэВ), так и на высокой энергии (4500 МэВ) электронного пучка ВЭПП-4М. Это потребовало перестройки положения поворотного магнита установки с соответствующим перемещением остального оборудования

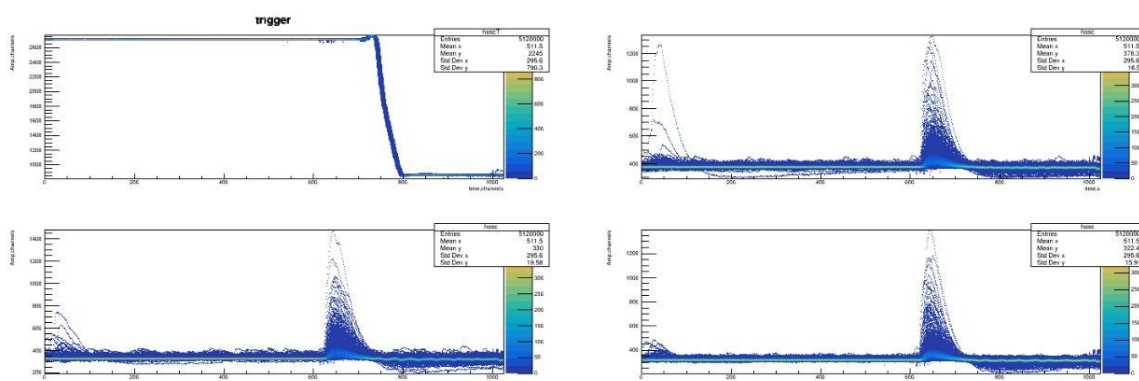


Рис. 15: Пример сигнала с трех SiPMs, в верхней левой части показан триггерный сигнал от ФЭУ с МКП.

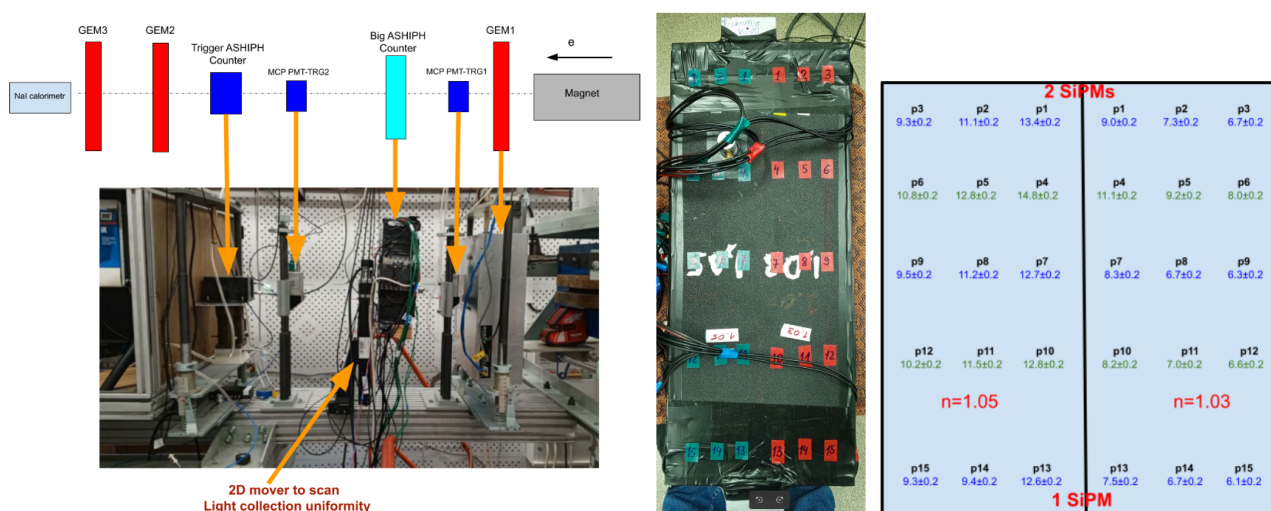


Рис. 16: Схема эксперимента для исследования прототипа счетчика АШИФ (слева). Общий вид счетчика АШИФ с обозначением точек для измерения эффективности регистрации электронов (центр). Полученные результаты эффективности регистрации в числе фотоэлектронов (справа): синим цветом обозначены точки для энергии электронов 580 МэВ, зеленым – энергия 2240 МэВ.

на линии пучка, поскольку меняется положение пятна тормозных гамма-квантов на входе в экспериментальный зал установки (рис. 17). Существующая механическая система позиционирования научного оборудования позволяет выполнить данную операцию за сравнительно малый промежуток времени около 10 минут.

- Измерения нового фокусирующего аэрогеля с прототипом системы идентификации ФАРИЧ-3 на энергии тестового пучка 2300 МэВ. Измерялись два 4-х слойных и один 3-х слойный блоки аэрогеля для детектора SPD (NICA), которые были оптимизированные под пиксель 6×6 мм. Для одного четырёхслойного блока блока выполнено сканирование для трех фокусных расстояний. Также проводились измерения сверхлёгких аэрогелей с показателями преломления в диапазоне от 1,0036 до 1,008. Время срабатывания триггера на основе сцин-

тилляционных счетчиков, используемого для экспериментов с прототипом ФАРИЧ-3, отличается от триггера на основе ФЭУ с МКП (см. выше). Это вызывает необходимость настройки трековых детекторов установки на основе ГЭУ для правильного выбора временного кадра с них. Для этого были внесены нужные изменения в программный код, позволяющие быстро задавать нужную конфигурацию в online режиме. Пример правильно подобранного временного кадра трековых детекторов, содержащий актуальную информацию относительно триггерного сигнала показан на рисунке 18. В частности оказалось, что смещение в числе кадров "стандартного" триггера по сравнению с триггером на базе двух МКП составило 6 кадров (750 нс).

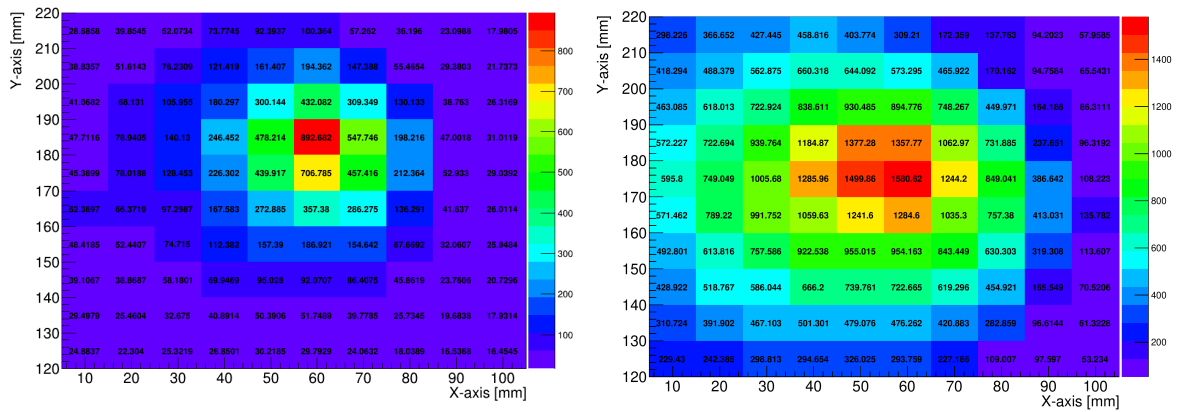


Рис. 17: Пример определения положения пятна тормозных гамма-квантов на входе экспериментального зала установки для энергий электронов ВЭПП-4М 4500 МэВ (слева) и 1500 МэВ (справа).

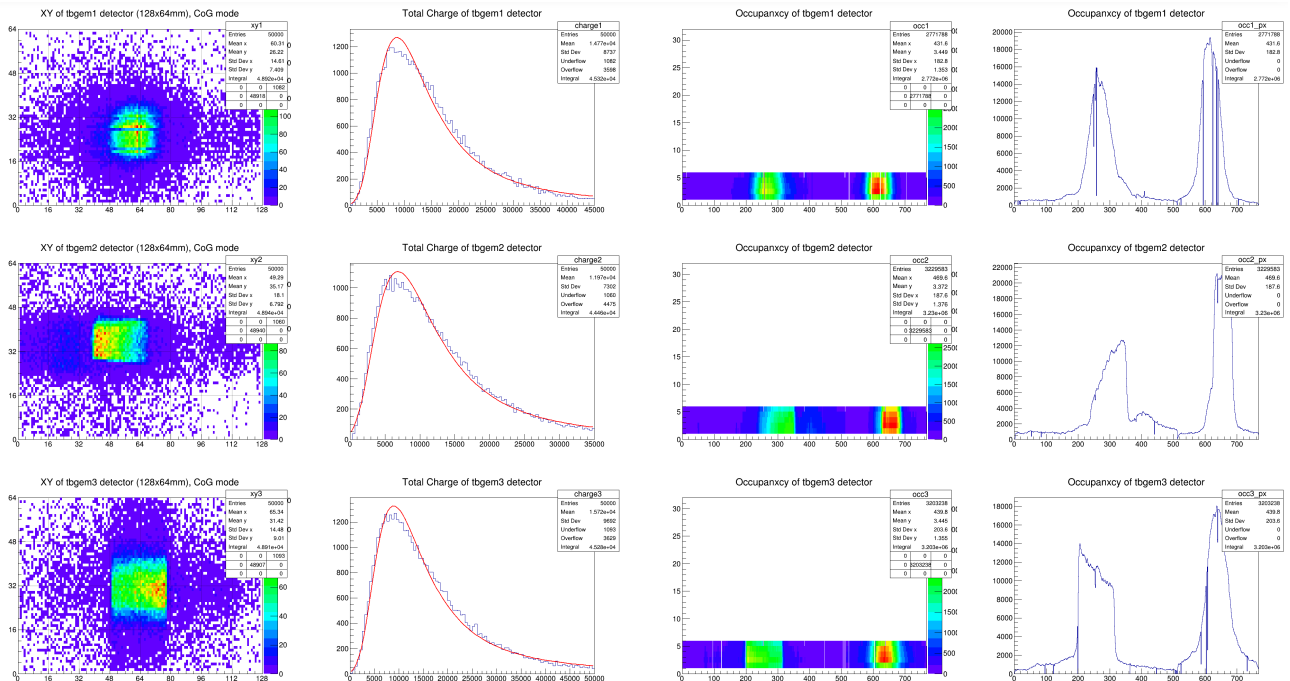
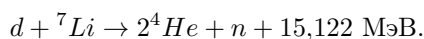
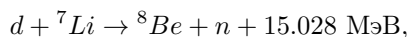


Рис. 18: Пример выбора временного кадра трековых детекторов установки.

Радиационные тесты с быстрыми нейтронами

Ускорительный источник нейтронов для бор-нейтронозахватной терапии (БНЗТ) в ИЯФ СО РАН может работать в режиме генерации быстрых нейтронов с энергиями до 20 МэВ. В этом случае в отрицательном источнике ионов водород заменяется на дейтерий. Основные ядерные реакции при взаимодействии дейтронов с литием следующие:



В марте 2022 года на БНЗТ был проведен эксперимент по исследованию деградации прозрачности

оптического волокна при облучении его быстрыми нейтронами. Эксперимент выполнялся в рамках текущей коллаборации с детектором CMS (CERN). Деградация прозрачности составила от 20% до 35% при полученный интегральной дозе 10^{14} ней/см².

В 2023 году начались работы по созданию прототипа стенда для проведения исследований радиационного старения твердотельных ФЭУ (SiPM) на базе БНЗТ. В ноябре 2024 года был проведен первый тестовый эксперимент с быстрыми нейтронами с целью проверки работоспособности основных систем прототипа под нейтронным облучением.

На основе полученных результатов в 2025 году была спроектирована и реализована первая версия стенда для исследования радиационной стойкости

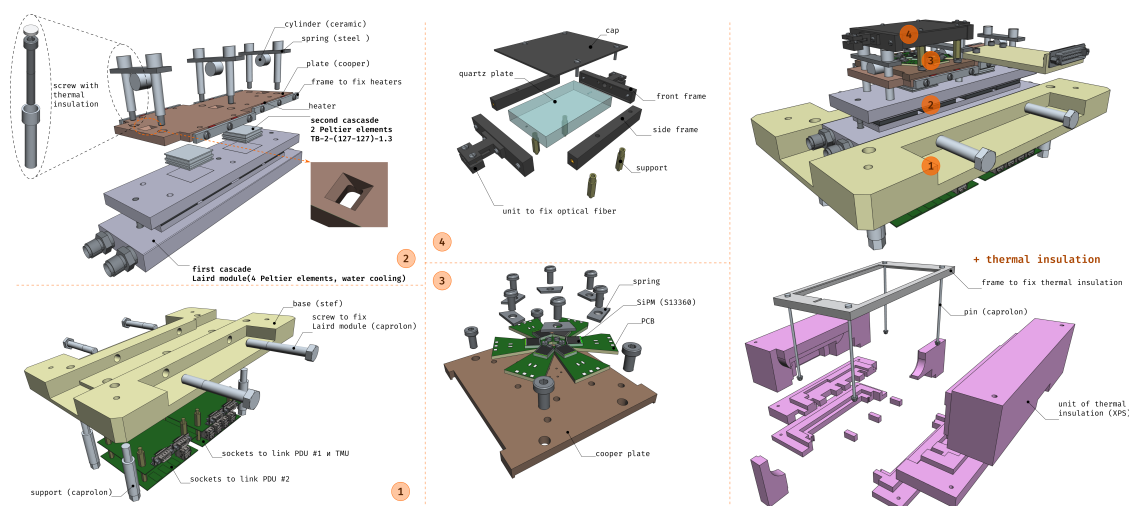


Рис. 19: Дизайн основной частей стенда для проведения исследования радиационного старения SiPM. Цифрами обозначены: 1 – основание с элементами электроники для задания температурного режима; 2 – первый и второй каскады охлаждения; 3 – печатные платы для подключения исследуемых SiPM, устанавливаемые на медную пластину для обеспечения их быстрого извлечения; 4 – кварцевая пластина с элементами рамки; общий вид стенда в сборе (правая верхняя часть); элементы термоизоляционного кожуха (правая нижняя часть).

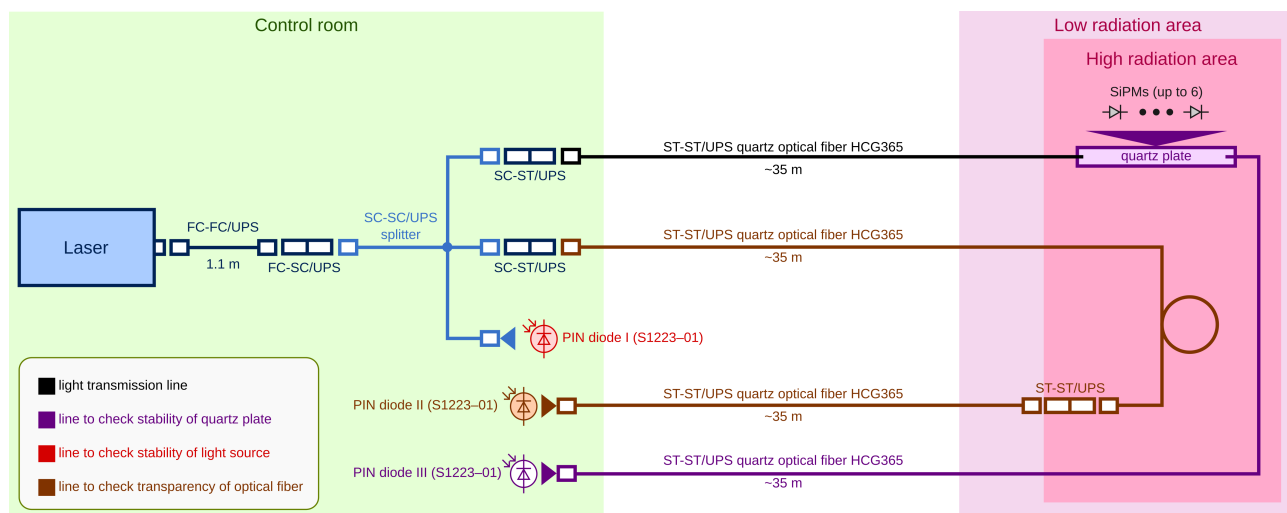


Рис. 20: Принципиальная схема системы распределения света стенда. Одна линия на основе кварцевого оптического волокна предназначена для подачи света в кварцевую пластину. Две других линии используются для контроля оптической прозрачности кварцевой пластины и самого транспортного волокна.

SiPM. Стенд состоит из трех основных систем: климатической камеры, системы распределения света и системы сбора данных (ССД). Дизайн стенда показан на рисунке 19.

Климатическая камера обеспечивает уставку определенной температуры SiPM для исследования зависимости их параметров. Разработанная в ИЯФ СО РАН электроника управления элементами Пельтье (охлаждение) и нагревателями автоматически задает необходимые значения тока и напряжения данных элементов с использованием петли обратной связи (используется температурный дат-

чик). Это позволяет достаточно точно и быстро выходить на нужную температуру без использования программного кода. Достигнутый температурный диапазон составил от $-40\text{ }^{\circ}\text{C}$ до $55\text{ }^{\circ}\text{C}$. Точность выставки температуры и стабильность поддержания находится на уровне $0,06\text{ }^{\circ}\text{C}$.

Принципиальная схема системы распределения света показана на рисунке 20. В качестве источника света используется постоянный лазер с длиной волны 640 нм. Для обеспечения диффузной равномерной засветки SiPM используется кварцевая пластина, пять из шести граней которой покрыты от-

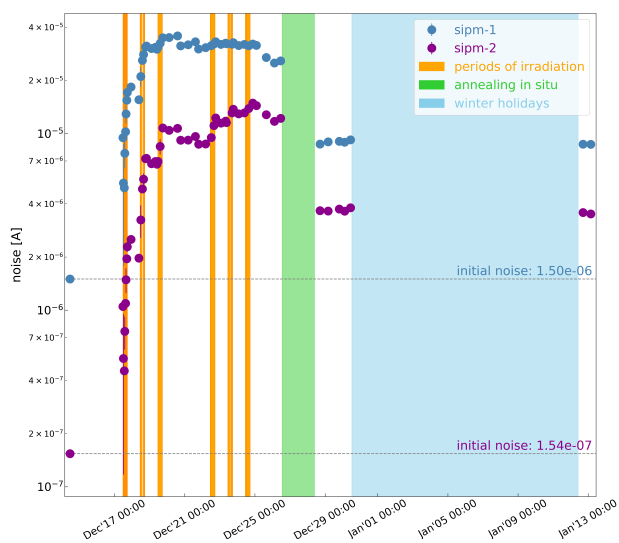


Рис. 21: Схема исследования радиационного старения в декабре 2025 и зависимость темного тока SiPM от значения набираемой дозы. Начальный уровень темного тока исследуемых SiPMs отличался в 10 раз: $I_{sipm-1} = 1,50 \times 10^{-6}$ А, $I_{sipm-2} = 1,54 \times 10^{-7}$ А.

ражающим материалом. Нижняя грань, смотрящая на тестируемые SiPMs — матовая. Выбранная с помощью моделирования форма кварцевой пластины обеспечивает неоднородность светового потока на SiPM менее 3%.

ССД выполнена на базе электрометра 6517В производства компании Keithley, оснащенного картой 6521. Последняя позволяет проводить измерения до 10 каналов.

В декабре 2025 года было проведено исследование радиационной стойкости двух SiPM S10931–100P производства Hamamatsu. Схема проведения эксперимента и поведение темного тока (шум) SiPM приведена на рисунке 21. В общей сложности продолжительность облучения составила 6 дневных смен. Полученный интеграл дозы для SiPM равен $1,4 \times 10^{10}$ neq/cm². В процессе непосредственного облучения температура SiPMs была постоянной и равной 0 °C (проводились измерения темного тока). В периодах между облучением измерялись параметры SiPMs (напряжение пробоя, линейность, шумовые кривые) в интервале температур от –30 °C до 30 °C с шагом 10 °C.

После облучения уровень темного тока SiPM №1 увеличился в ≈ 21 раз и достиг значения $3,21 \times 10^{-5}$ А, ток SiPM №2 вырос на 2 порядка – $1,49 \times 10^{-5}$ А. После облучения был выполнен отжиг SiPMs на месте в течение двух суток при температуре 70 °C и поданном прямом напряжении. Результатом стало уменьшение темного тока обоих SiPMs примерно в 4 раза. Напряжение пробоя после

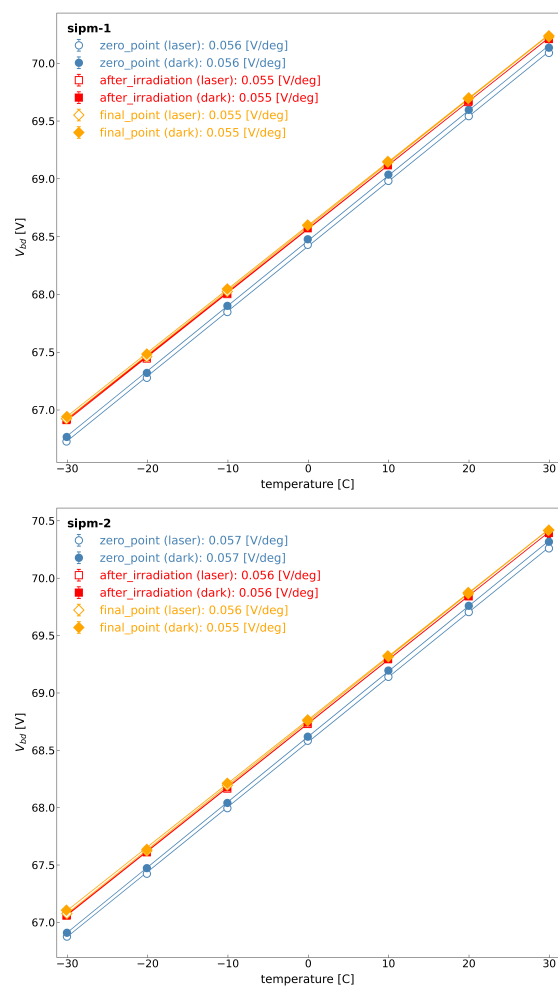


Рис. 22: Температурная зависимость напряжения пробоя исследуемых SiPMs до и после облучения, а также после отжига на месте.

облучения увеличилось незначительно и осталось на этом уровне после отжига на месте (рис. 22).

Зависимость фоточувствительности (линейность) от облучения оказалась более сильной. Темновой ток практически достиг уровня фототока (рис. 23), что привело к падению данного параметра на два порядка (рис. 24). Пример зависимости темного тока от напряжения показан на рисунке 25. В итоге проведенного исследования SiPM S10931–100P производства Hamamatsu можно сделать вывод о нецелесообразности использования данных приборов в экспериментах с высоким уровнем радиационного облучения. Основной целью проведенного эксперимента была проверка работоспособности созданного стенда и методики проведения радиационных исследований в целом, поскольку используемые SiPMs являются достаточно устаревшей моделью и сейчас практически не используются. В ближайшее время запланировано проведение ряда исследований

радиационного старения SiPMs, используемых (или планируемых к применению) в реальных экспериментах в области ФВЭ.

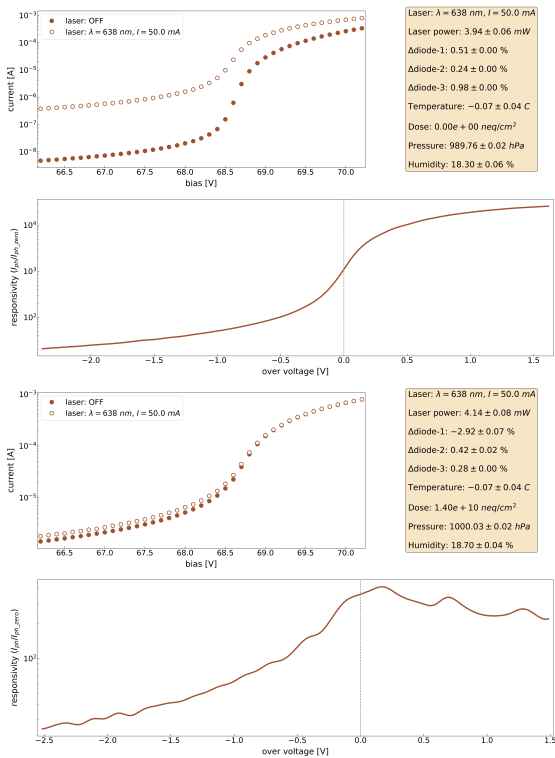


Рис. 23: Примеры определения фоточувствительности для SiPM №2 до (сверху) и после (снизу) облучения. Темновой ток, обозначен сплошными маркерами на верхних левых частях рисунков, практически сравнялся с фототоком после облучения.

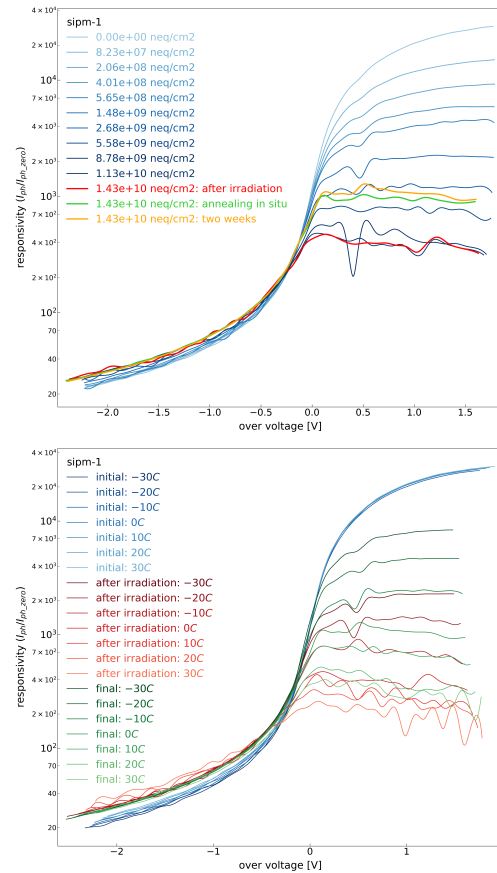


Рис. 24: Пример зависимости фоточувствительности для SiPM №1 от набираемой дозы при постоянном значении температуры 0°C (сверху) и для диапазона температур до и после облучения (снизу).

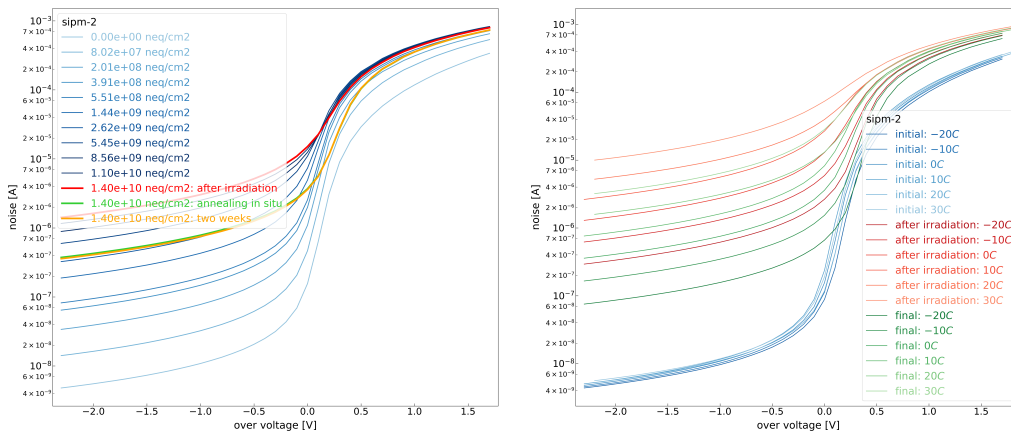


Рис. 25: Пример зависимости темнового тока в диапазоне напряжений для SiPM №2 от набираемой дозы при постоянном значении температуры 0°C (сверху) и для диапазона температур до и после облучения (снизу).

ЭКСПЕРИМЕНТЫ BELLE И BELLE II

Введение

Основным направлением группы ученых Института является сотрудничество в области физики элементарных частиц с Лабораторией Ускорителей высоких энергий (КЕК), Цукуба, Япония, являющейся одной из крупнейших и быстро развивающихся лабораторий мира в области физики высоких энергий. Одним из основных экспериментов в физике элементарных частиц в Японии в настоящее время является изучение CP-нарушения в распадах B -мезонов с детектором Belle II на электрон-позитронном накопителе с очень высокой светимостью (т.н. В-фабрике).

Новосибирские физики внесли большой вклад в создание электромагнитного калориметра детектора Belle (который в настоящее время установлен и на Belle II) как на этапе проектирования, так и при изготовлении элементов этого самого большого в мире калориметра на основе монокристаллов йодистого цезия, его сборке и наладке.

В 2010 году детектор Belle был остановлен для модернизации. Набранная интегральная светимость превышает 1040 обратных фемтобарн. Сейчас продолжается обработка этих экспериментальных данных. Запуск модернизированного детектора Belle II на электрон-позитронном суперколлайдере SuperKEKB состоялся в марте 2019 года. Эксперимент Belle II, созданный международной коллаборацией, включающей более 1100 ученых из 28 стран и 133 научных институтов, осуществит набор данных, превосходящий объем данных своего предшественника, эксперимента Belle, более чем в 40 раз. Основная задача групп-участников эксперимента во время набора данных – обеспечение стабильной и корректной работы всех подсистем детектора Belle II.

Сотрудники Института принимают активное участие как в поддержании работы детектора, так и в обработке набранных экспериментальных данных.

Амплитудный анализ процессов

$$B^0 \rightarrow \psi(2S)\pi^+ K^+, B^+ \rightarrow \psi(2S)\pi^+ K_S^0, \\ B^+ \rightarrow \psi(2S)\pi^0 K^+, B^0 \rightarrow \psi(2S)\pi^0 K_S^0$$

Продолжается амплитудный анализ процессов $B^0 \rightarrow \psi(2S)\pi^+ K^+$, $B^+ \rightarrow \psi(2S)\pi^+ K_S^0$, $B^+ \rightarrow \psi(2S)\pi^0 K^+$, $B^0 \rightarrow \psi(2S)\pi^0 K_S^0$. Анализ проводится с использованием данных, набранных на резонансе $Y(4S)$ в экспериментах Belle (711 fb^{-1}) и Belle II (362 fb^{-1}). Закончена первая стадия анализа, включающая амплитудный анализ распадов $B^+ \rightarrow \psi(2S)K^+$ и $B^0 \rightarrow \psi(2S)K_S^0$, параметризацию разрешения по $(\Delta E, M_{bc})$, аппроксимацию распределений по $(\Delta E, M_{bc})$ в данных, разделение сигнала и фона для каналов с π^0 в конечном состоянии с использованием многих переменных, оптимизацию выбора сигнальной области, параметризацию пикующегося фона от $B^0 \rightarrow \psi(2S)K_S^0$, параметризацию фона в контрольных областях и начальную модель для сигнала. С

использованием полученной модели сигнала сгенерировано реалистичное Монте-Карло моделирование для сигнальных процессов, которое использовано для параметризации пикующихся фонов с перекрестными вкладами для различных каналов $B \rightarrow \psi(2S)\pi K$ и фонов в сигнальном процессе. Начата вторая стадия анализа, при которой аппроксимация сигнальных событий проводится с реалистичным описанием фона. Использование реалистичного описания фона значительно улучшает качество описания распределений для каналов с π^0 в конечном состоянии. Различие между результатами аппроксимации на первой и второй стадиях показано на Рис. 1.

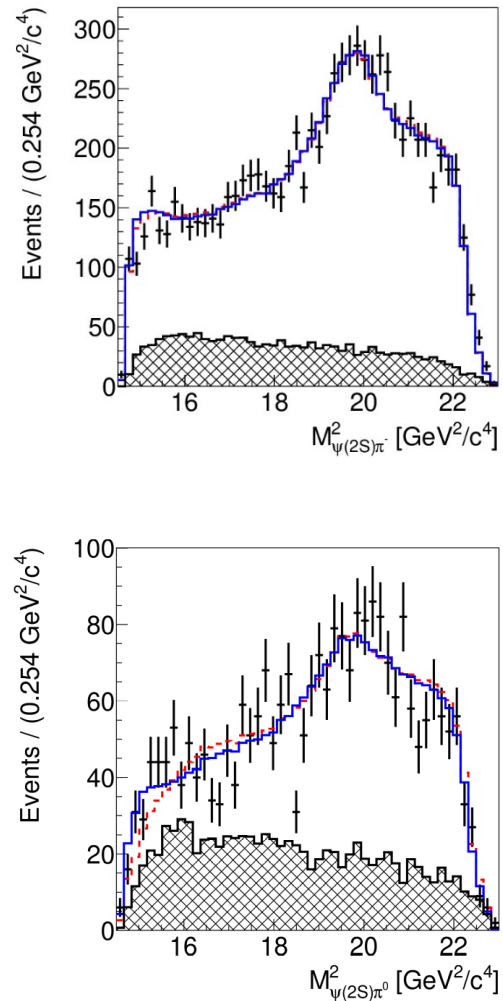


Рисунок 1. Проекция результатов аппроксимации на инвариантную массу комбинации $\psi(2S)\pi$ для распадов $B^0 \rightarrow \psi(2S)\pi^+ K^+$ (сверху) и $B^+ \rightarrow \psi(2S)\pi^0 K^+$ (снизу). Точки с ошибками — данные, красная штриховая линия — результат аппроксимации с простым описанием фона, синяя сплошная линия — результат аппроксимации с улучшенным описанием фона, заштрихованная гистограмма — оценка вклада фона из контрольных областей.

Изучение распада $\Upsilon(5S) \rightarrow \Upsilon(1S)K\bar{K}$

Измерение ширин переходов между боттомониями с излучением легких адронов позволяет лучше понять структуру возбужденных состояний боттомония. Так, для $\Upsilon(5S)$ как связанного состояния $b\bar{b}$ кварков ожидается $B(\Upsilon(5S) \rightarrow \Upsilon(1S)K^+K^-) = \frac{1}{2}B(\Upsilon(5S) \rightarrow \Upsilon(1S)K_S K_S)$, в то время как для четырехкваркового состояния эти относительные вероятности могут быть равны.

Группой сотрудников Института ведется изучение переходов $\Upsilon(5S) \rightarrow \Upsilon(1S)K^+K^-$ и $\Upsilon(5S) \rightarrow \Upsilon(1S)K_S K_S$, где $\Upsilon(1S) \rightarrow l^+l^-$, $l = \mu, e$, с использованием уникальной статистики, набранной с детекторами Belle и Belle II при энергии в диапазоне между массами резонансов $\Upsilon(5S)$ и $\Upsilon(6S)$. Проведено Монте-Карло моделирование, разработаны критерии отбора, изучен фон, доминирующим вкладом в который являются процессы $e^+e^- \rightarrow l^+l^-K^+K^-$. Сигнальные события восстанавливаются как полной реконструкцией всех конечных частиц, так и частичной реконструкцией, когда один из каонов потерян.

Полученная зависимость видимого сечения процессов от энергии в системе центра масс для обоих типов реконструкций представлена на Рис. 2.

Исходя из видимого сечения на $\Upsilon(5S)$ резонансе, получены следующие вероятности адронных переходов: $B(\Upsilon(5S) \rightarrow \Upsilon(1S)K^+K^-) = (7.3 \pm 0.4) \times 10^{-4}$ и $B(\Upsilon(5S) \rightarrow \Upsilon(1S)K_S K_S) = (3.2 \pm 0.3) \times 10^{-4}$, где погрешность статистическая, что согласуется с предыдущим измерением $B(\Upsilon(5S) \rightarrow \Upsilon(1S)K^+K^-) = (6.1 \pm 1.8) \times 10^{-4}$ коллаборации Belle и ожиданием отношения вероятностей 2:1.

Изучение распадов τ -лептона в $h^+h^-h^0$

Последние результаты, полученные на В-фабриках в экспериментах Belle [PRD 81, 113007] и BaBar [PRL 100, 011801], по измерению вероятностей распадов τ лептонов в три заряженных адрона не согласуются между собой. Особенно большая разница наблюдается для распадов с тремя заряженными каонами. Ввиду этого коллаборация Belle приняла решение провести новое независимое измерение вероятностей распадов τ лептона в три заряженных адрона (пионы и каоны в разных комбинация) и нейтрино.

В новой работе были независимым образом изучены систематические ошибки, связанные с идентификацией заряженных пионов и каонов. Получены новые поправочные коэффициенты для процесса идентификации пионов, которые намного лучше описывают экспериментальную ситуацию, так как учитывают корреляцию отклика систем идентификации и нейтральных кластеров в электромагнитном калориметре. Также были применены новые методы контроля систематической ошибки, связанной с идентификацией адронов.

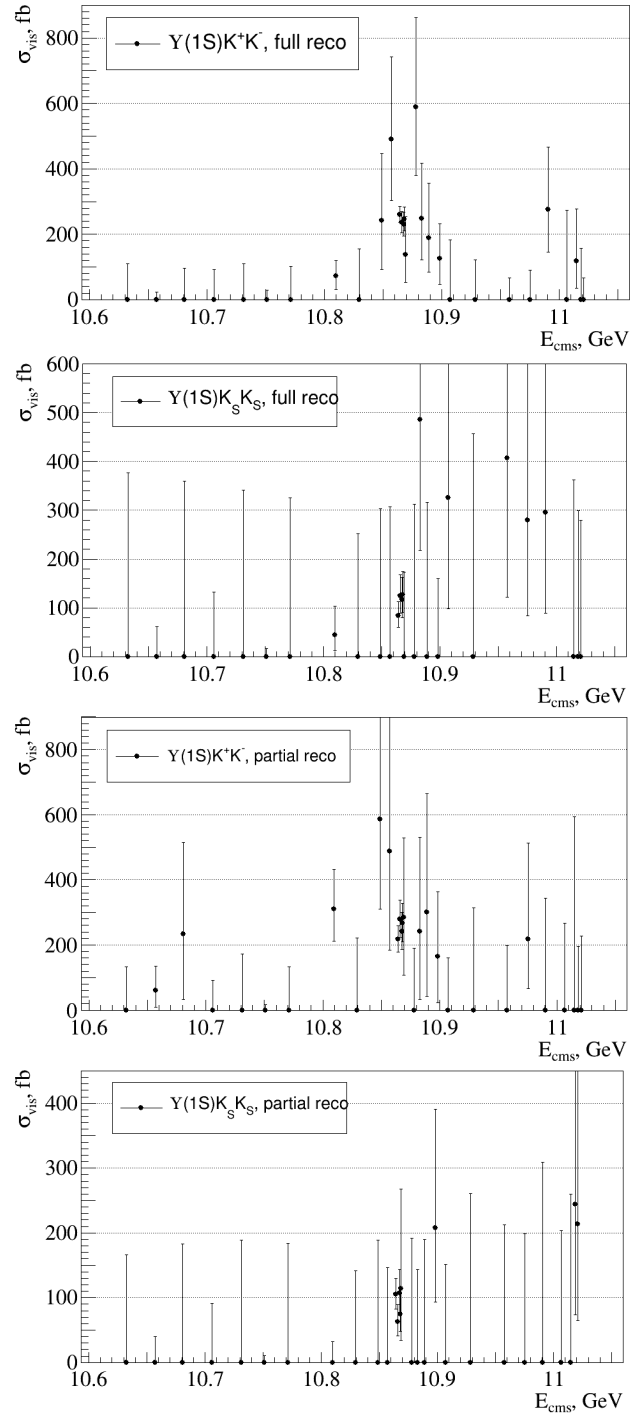


Рисунок 2. Видимое сечение процессов $\Upsilon(5S) \rightarrow \Upsilon(1S)K^+K^-$ и $\Upsilon(5S) \rightarrow \Upsilon(1S)K_S K_S$ в зависимости от энергии при различных способах реконструкции сигнала события.

Кроме того, был найден способ кинематического подавления событий с неправильной идентификацией. Если пионы идентифицируются как каоны, то энергия, вычисленная в лабораторной системе, получается больше, чем энергия пучков в коллайдере. Это приводит к тому, что кинематические соотношения в гипотезе рождения пары τ лептонов нарушаются. Учет этих

соотношений позволил уменьшить фон с неправильной идентификацией в 6 раз для конечного состояния с тремя каонами. При этом относительная эффективность к сигнальным событиям уменьшилась на 17 %.

Для оценки эффективности были использованы усовершенствованные программы моделирования распадов τ лептона, поскольку они лучше описывают экспериментальные данные. Также были изменены предыдущие генераторы для уменьшения систематической ошибки, связанной с моделью, заложенной в генератор.

Анализ распада $B^0 \rightarrow D^- \omega \pi^+$ на Belle и Belle II

Продолжается работа над амплитудным анализом распада $B^0 \rightarrow D^- \omega \pi^+$. Анализ этого процесса выполняется единым образом для Belle и Belle II: используется одинаковый программный пакет обработки и единая стратегия анализа. Сначала на моделировании выполняется оптимизация предварительных условий отбора для Belle и Belle II. Сюда входят параметры сигнальных треков, фотонных кластеров, переменные идентификации частиц с заданной массовой гипотезой, инвариантные массы промежуточных частиц. Выполняется кинематическая реконструкция с ограничением на массы частиц (кроме ω и B^0) и общие точки разлетов всех дочерних частиц. Далее выполняется процедура разделения сигнальных и фоновых событий. К фоновым событиям относятся события континуума и $B\bar{B}$, имитирующие сигнальный процесс. В этом году особое внимание было уделено подавлению второй компоненты фона от $B\bar{B}$ событий. Улучшена процедура разделения фоновой и сигнальной компонент, основанная на машинном обучении. Используются алгоритмы градиентного бустинга деревьев решений (XGBoost, LightGBM, FastBDT), а также нейронные сети глубокого обучения (архитектура TabM). В качестве обучающей выборки используются события сигнального и общего моделирования. Для разделения разных фоновых компонент строится единый классификатор. Условие отбора на выход классификатора оптимизируется на моделировании одновременно с границей сигнальной области в плоскости переменных $(\Delta E, M(\omega))$. Систематическая ошибка, связанная с эффективностью классификации, получается при изучении контрольного канала $B^- \rightarrow D^0 \pi^-, D^0 \rightarrow K^- \omega \pi^+$. Для определения доли фона в сигнальной области параметризуется функция плотности вероятности (PDF) сигнальных и фоновых событий в плоскости $(\Delta E, M(\omega))$. Двумерная PDF сигнальных событий является функцией со сложной корреляцией аргументов ΔE и $M(\omega)$. Сначала был использован непараметрический подход, основанный на ядерной оценке плотности. Ядерный метод сглаживает простую частотную оценку плотности вероятности. Однако он не дает информацию о корреляции компонент случайного вектора в плоскости $(\Delta E, M(\omega))$. В этой связи был предложен параметрический метод, где описывается общая структура корреляций. Они могут быть сколь угодно

сложными, и качество аппроксимации при этом не страдает.

Для амплитудного анализа важным вопросом является интерференция сигнального процесса и фоновых процессов без ω -мезона ($B^0 \rightarrow D^-(4\pi)^+$). Для того, чтобы оценить вклад возможной интерференции, выполняется моделирование различных резонансных вкладов $B^0 \rightarrow D^-(4\pi)^+ : a_1(1260)\pi, \rho\rho, \rho f_0, \rho f_2$. В 2025 году была переработана и улучшена модель генерации этих процессов по сравнению с той, которая использовалась ранее и была заимствована из генератора PHOKHARA. На Рис. 3 показаны генераторные угловые распределения амплитуд $B^0 \rightarrow D^- \omega \pi^+$ и $B^0 \rightarrow D^- a_1(1260)\pi$. В генераторе используется усовершенствованная модель лагранжиана $a_1(1260)\pi\rho$.

В данный момент идет работа над четырехмерным фитом с использованием данных моделирования в пространстве кинематических параметров процесса для определения вкладов орбитальных возбуждений D мезонов.

Поддержание работы калориметра детектора Belle II

Для ускорения проведения калибровочных заходов и для обеспечения быстрого набора заходов при неработающей глобальной системе сбора данных (ССД) планируется добавить возможность ответвления основного потока данных на специализированный сервер калориметра. Это также позволит проводить более углубленное мониторингирование данных калориметра.

С ростом светимости и повышением стабильности работы коллайдера, в эксперименте Belle II важно сократить любые перерывы в наборе физических данных. В частности, раз в сутки необходимо набирать калибровочные заходы для мониторинга стабильности работы электроники калориметра. Процедура калибровки может быть ускорена, если набранные данные будут незамедлительно поступать на обработку, без промежуточного сохранения их на диск. С этой целью был в систему сборки событий детектора Belle II был интегрирован низкоуровневый монитор качества данных (Low Level Data Quality Monitor, LLDQM).

LLDQM получает сетевые пакеты с отдельных модулей электроники калориметра, позволяя независимо обрабатывать получаемые данные в нескольких потоках, гораздо быстрее предоставляя эксперту результаты калибровки. Помимо этого, LLDQM работает даже во время физических заходов – за счёт того, что передача информации реализована по протоколу UDP, любые проблемы с сетью или потенциальные сбои на стороне LLDQM не оказывают никакого влияния на глобальную систему сбора данных.

В результате, разработанный монитор позволяет не только позволяет эксперту быстрее оценивать результаты калибровки, но и может в реальном времени предоставлять низкоуровневую информацию о качестве данных, набранных с калориметра, дополняя центральную систему мониторинга.

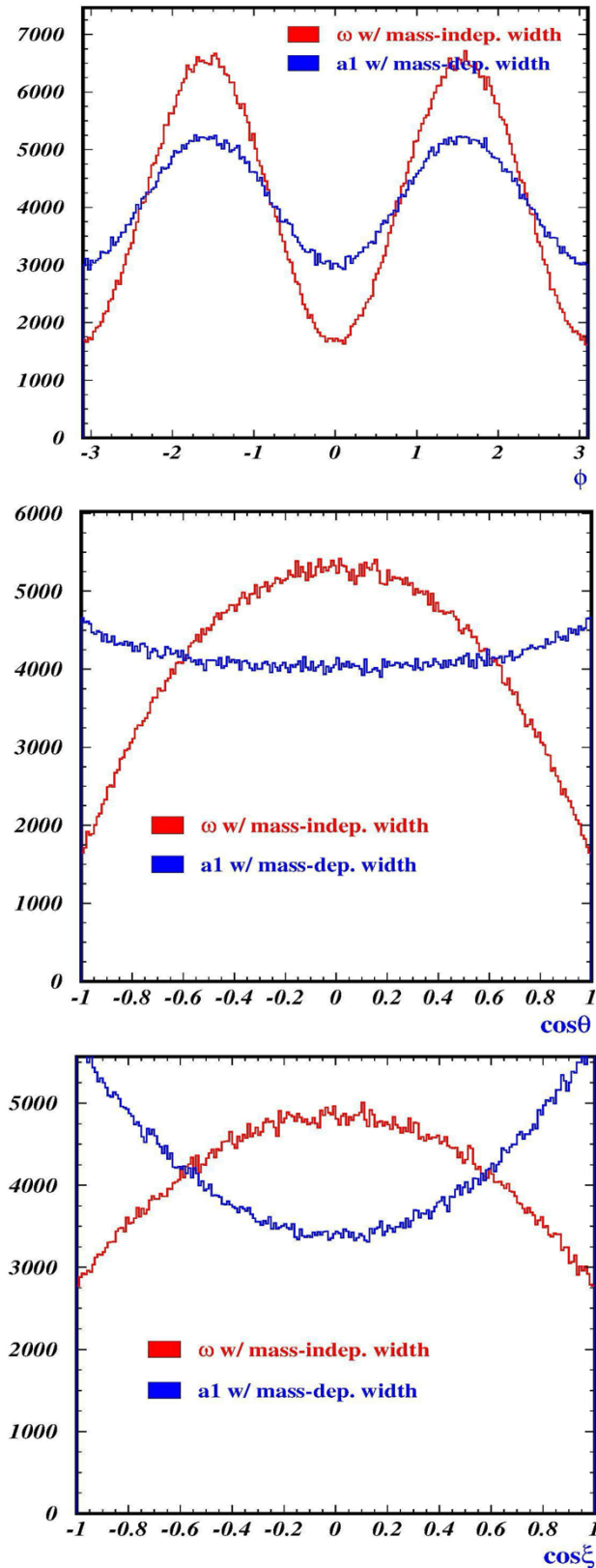


Рисунок 3. Генераторные угловые распределения, описывающие структуру распадов $B^0 \rightarrow D^- \omega \pi^+$ и $B^0 \rightarrow D^- a_1(1260) \pi$, $a_1(1260) \rightarrow \rho \pi$. Модель $a_1(1260) \pi$ показана с учетом энергетической зависимости ширины распада $a_1(1260)$ мезона.

Проверка генератора трёхпионного распада τ лептона

В связи с обнаруженной ошибкой генерирования динамики распада $\tau \rightarrow \pi \pi \pi^+ \nu_\tau$ в версии генератора TAUOLA, используемой на эксперименте Belle, была проведена детальная проверка кода TAUOLA для этого распада. Было подтверждено, что динамика распада $\tau \rightarrow \pi \pi \pi^+ \nu_\tau$ как функция адронного тока моделируется в TAUOLA (версии Belle) *правильно*. Найденная же ранее ошибка возникает в модуле выбора канала распада $\tau \rightarrow a_1 \nu_\tau$, $a_1 \rightarrow \pi \pi \pi^+$ либо $\pi \pi^0 \pi^0$. Для отрицательно заряженного τ лептона выбор моды распада a_1^- делается правильно в соответствии с таблицей относительных вероятностей распадов $a_1 \rightarrow \pi \pi \pi^+$, $\pi \pi^0 \pi^0$, а для положительно заряженного τ лептона выбирается всегда только мода $a_1^+ \rightarrow \pi^+ \pi^0 \pi^0$ (в смысле доли событий и динамики рождения конечного состояния). Это также приводит к наличию небольшой (~1%) зарядовой асимметрии для моды $\tau \rightarrow \pi \pi \pi^+ \nu_\tau$ в версии генератора TAUOLA, используемой коллаборацией Belle. В настоящий момент эта ошибка исправлена. Также была дополнительно проверена специальная версия генератора TAUOLA на Belle, в которой для трёхпионной моды адронный ток был записан в модели резонансной киральной теории возмущений. В этой специальной версии генератора ошибок не обнаружено.

Разработка VecAmpFit – библиотеки для амплитудных анализов

Продолжена разработка библиотеки VecAmpFit, используемой для анализа данных в экспериментах Belle и Belle II. Код анализа $B \rightarrow \psi(2S) \pi K$, описанного в разделе выше, основан на этой библиотеке. Добавлена поддержка подгонки с произвольным числом источников фона, подгонки с вычислением градиента при наличии источников фона и подгонки с весами данных. В пример анализа процесса $e^+ e^- \rightarrow K^+ K^- \pi^+ \pi^-$ добавлены подгонки эффективности и разрешения, создание гистограмм с результатами подгонки, генерация Монте-Карло моделирования с использованием специального класса модели, упрощённое моделирование эффективности восстановления и разрешения детектора. Написана программа для отслеживания времени выполнения (аналог команды *time* в Unix) с сохранением результатов в формате ROOT. Добавлена возможность кросс-компиляции на более новые архитектуры процессоров x86_64. Для некоторых физических функций написаны версии с вычислением градиента. Добавлена векторизованная функция для LU-разложения. Реализовано получение импульсов частиц в распаде $0 \rightarrow A (\rightarrow 1 + 2) + B (\rightarrow 3 + 4)$ по переменным формализма спиральности.

Модуль измерения светимости в реальном времени

Помимо основной задачи измерения энерговыделения, производимого частицами, проходящими через вещество калориметра, важной задачей торцевых частей электромагнитного калориметра детектора Belle II

является измерение светимости SuperKEKB в режиме реального времени. Измерение светимости производится по событиям упругого $e^+e^- \rightarrow e^+e^-$ рассеяния, а также двухфотонной аннигиляции $e^+e^- \rightarrow \gamma\gamma$.

В течение 2025 года модуль измерения светимости продемонстрировал высокую надежность и стабильность работы во время набора данных на эксперименте Belle II. В среднем, отклонение от независимого измерения светимости, основанного на полной реконструкции событий с использованием всех систем детектора, составляет 1.9% (Рис. 4). Тем не менее, стабильность отношения R измерений монитора светимости к независимым измерениям лучше 0.5%, что указывает на высокую стабильность в работе модуля измерения светимости. По результатам работы подготовлена и опубликована статья.

Проведение измерений с прототипом калориметра на основе кристаллов чистого CsI

Высокая светимость коллайдера SuperKEKB в эксперименте Belle II и высокий уровень пучкового фона предъявляют очень жесткие требования к детектору. Одной из главных подсистем детектора Belle II является электромагнитный калориметр на основе сцинтилляционных кристаллов CsI(Tl), в создании и эксплуатации которого принимают активное участие физики из Института. Для уменьшения шумов наложения в калориметре было предложено заменить в торцевых частях калориметра кристаллы CsI(Tl) на кристаллы чистого CsI, обладающие меньшим временем высвечивания. Световыход кристаллов чистого CsI на порядок меньше, чем у CsI(Tl), поэтому для преобразования световой вспышки в электрический сигнал приходится

использовать фоточувствительные элементы с внутренним усилением. Рассматриваются два варианта фоточувствительных элементов: вакуумные фотопентоды и кремниевые лавинные фотодиоды.

Для увеличения световыхода счётчика на основе кристалла чистого CsI, пластины с люминофором NOL-9 и четырех лавинных фотодиодов Hamamatsu APD S8664-55 было предложено использовать специальное селективное зеркало. Такое зеркало устанавливается между кристаллом и спектросмещающей пластиной с лавинными фотодиодами на оптической смазке. Его задача пропускать ультрафиолетовый сцинтилляционный свет из кристалла CsI ($\lambda_{\text{peak}}(\text{CsI}) = 320$ нм) к пластине без поглощения, но отражать с высоким коэффициентом отражения (>99.7%) переизлученный в пластине свет в видимом спектральном диапазоне (с $\lambda_{\text{peak}}(\text{NOL-9}) = 590$ нм). Таким образом весь свет запирается в пластине, и большая его доля успевает попасть на фотодетекторы. Для идеального зеркала (100%-ное пропускание УФ света и 100%-ное отражение всего переизлученного света с оптическим контактом как с кристаллом, так и с зеркалом) согласно численным оценкам и моделированию светосбора в счётчике с помощью пакета Geant-4, ожидаемое увеличение световыхода составляет около 190% (т.е. в 2.9 раз).

В 2025 было написано программное обеспечение (ПО) для расчёта профиля коэффициента поглощения/отражения оптического покрытия в зависимости от длины волны света. Также написано ПО для оптимизации покрытия для широкого диапазона углов падения света на пластину. В настоящее время ведётся поиск оптимальной структуры оптического покрытия.

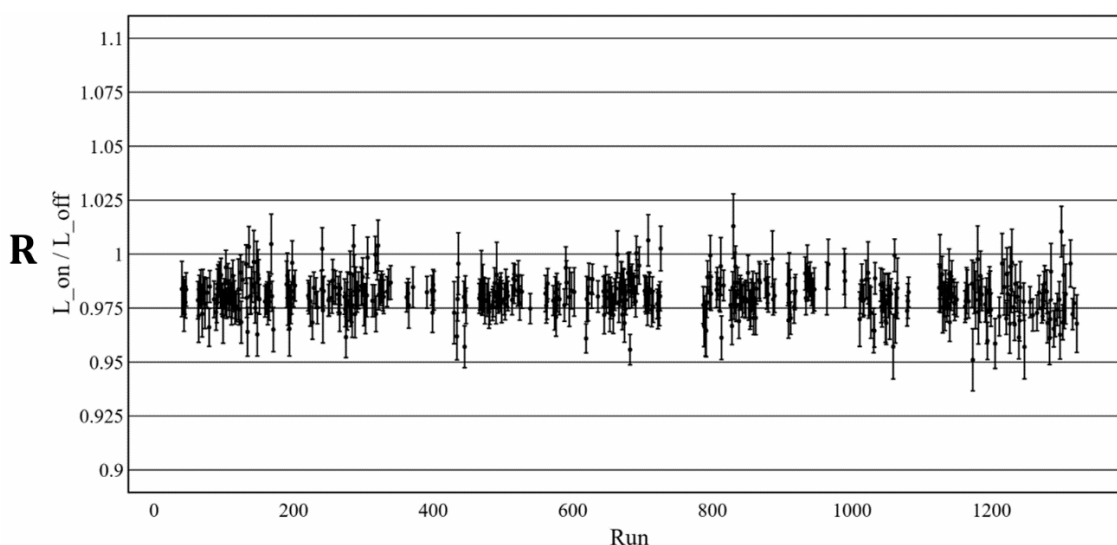


Рисунок 4. Зависимость отношения измерений монитора светимости к независимым измерениям от номера сеанса набора данных.

КРИОГЕННЫЕ И ГАЗОВЫЕ ЛАВИННЫЕ ДЕТЕКТОРЫ

Введение

Работа по теме криогенных лавинных детекторов и газовых лавинных детекторов проводилась группой сотрудников лаб. 3-3:

1) Развитие двухфазных криогенных лавинных детекторов (КЛД) для низкофоновых экспериментов по поиску темной материи и регистрации нейтрино низких энергий.

2) Развитие методики экспериментов с пучками ионов низких энергий - с помощью измерения пробега, ионизационных потерь ионов и регистрации треков во время-проекционной камере (ВПК) низкого давления с помощью зарядового и оптического съёма информации.

Криогенные лавинные детекторы для низкофоновых экспериментов по поиску темной материи и регистрации нейтрино низких энергий.

Основной научный задел по этим направлениям сконцентрирован в совместной Лаборатории космологии и физики элементарных частиц (ЛКФЭЧ) Физического факультета НГУ и ИЯФ, созданной в 2011-2015 годах в рамках мегагранта НГУ (№11.G34.31.0047). Оборудование лаборатории территориально находится в ИЯФ в помещениях ЛКФЭЧ, арендуемых НГУ. В рамках мегагранта НГУ и грантов ИЯФ-РНФ (№14- 50-00080) и НГУ-РНФ (№20-12-00008) в предшествующие годы были произведены значительные закупки оборудования, в результате чего были полностью укомплектованы криогенно-вакуумные системы разрабатываемого детектора тёмной материи и частично – системы зарядового и оптического считывания сигналов и считывающей электроники. Кроме того, была оборудована чистая зона для сборки детекторов.

В основе метода работы КЛД лежит усиление предельно слабых сигналов от ядер отдачи (образованных в криогенной жидкости от рассеяния частиц тёмной материи) в газовой фазе с помощью электролюминесцентного (ЭЛ) зазора и считывания оптического сигнала с помощью КФЭУ-матриц – либо напрямую, либо в составе комбинированного умножителя ГЭУ/КФЭУ матрица (газовых электронных умножителей (ГЭУ) и кремниевых фотоумножителей (КФЭУ)).

В 2025 году в соответствии с планом работ были продолжены исследования по физике таких детекторов и их разработке. Основной целью работ являлась подготовка к проведению эксперимента по измерению ионизационных выходов ядер отдачи в жидком аргоне. Такие измерения важны для понимания отклика детектора на ядра отдачи разных энергий, что в дальнейшем будет необходимо для реализации полноценного детектора темной материи.

А именно, были проведен эксперимент по регистрации нейтронов при помощи стильбеновых счетчиков и исследования по измерению эффективности сместителя спектра ТФБ, необходимого для модернизации КЛД.

Эксперимент по рассеянию нейтронов

Для подготовки к эксперименту по измерению ионизационных выходов ядер отдачи были проведены тестовые измерения по регистрации нейтронов при помощи стильбеновых счетчиков. В качестве источника нейтронов использовался ускоритель ВИТА, где протоны с энергией 2.2 МэВ при столкновении с литиевой мишенью рождали нейтроны с энергией до 463 кэВ. На расстоянии 8 метров от мишени на оси пучка протонов располагался центральный стильбеновый счетчик, а под углами 35, 49, 59 и 72 градуса к нему располагались аналогичные боковые счетчики. В эксперименте записывались формы сигналов на счетчиках при запуске как с центрального счетчика, так и в схеме совпадений центрального и боковых счетчиков.

На рисунке 1 для центрального детектора показана корреляция между фактором PSD (отношение площади сигнала в разных временных интервалах) и энергией, откалиброванной по гамма-изотопам.

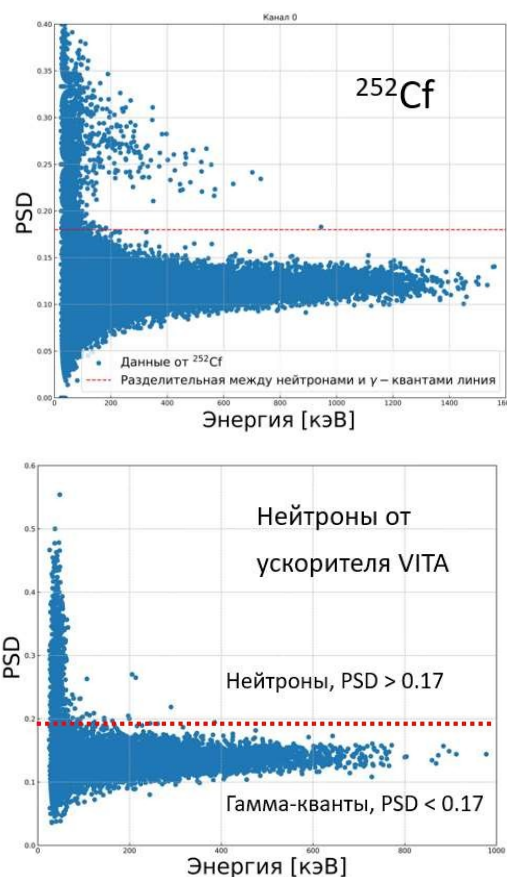


Рисунок 1. Разделение нейтронов и гамма-квантов на центральном детекторе.

Скорость счета нейтронов на центральном детекторе в эксперименте оказалась в два раза ниже расчетной, что можно объяснить смещением пучка протонов относительно оси коллиматора. Также в ходе эксперимента установлено, что порог регистрации ядер отдачи для счетчиков составляет около 100 кэВ и половина нейтронов не может быть зарегистрирована на боковых счетчиках. Ведутся работы по снижению энергетического порога счетчиков и подготовка к проведению повторного эксперимента с более точным позиционированием счетчиков.

На рисунке 2 показан спектр времени пролета нейтронов между центральным и боковым детектором, расположенным под углом 49 градусов. Среднее время пролета составляет около 60 нс, что согласуется с расчетным значением.

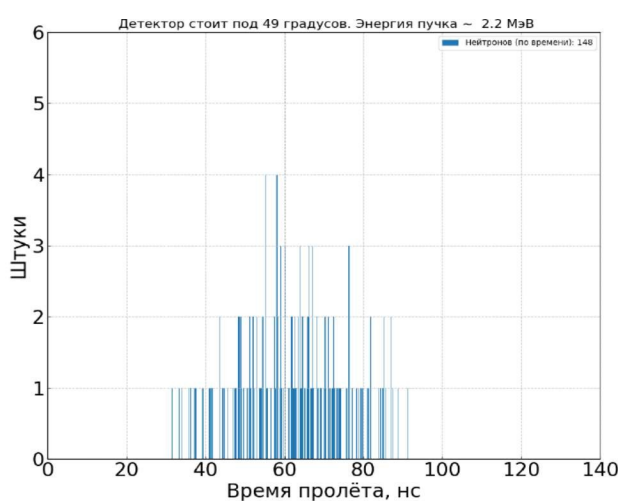


Рисунок 2. Спектр времени пролета нейтронов между центральным и боковым детектором, расположенным под углом 49 градусов.

Изучение пленок органического сместителя спектра 1,1,4,4-тетрафенил-1,3-бутадиена

Параллельно велись работы по измерению эффективности и изучению эффектов старения органического сместителя спектра 1,1,4,4-тетрафенил-1,3-бутадиена (ТФБ). Данный сместитель спектра является наиболее подходящим для переизлучения вакуумного ультрафиолета, возникающего при сцинтилляциях жидкого и газообразного аргона, в видимый диапазон, удобный для регистрации фотодетекторами.

Методом вакуумного напыления были нанесены пленки толщиной 20 и 100 мкг/см² на двухдюймовые ФЭУ R6041-506MOD производства Hamamatsu и на стеклянные образцы.

Для пленок толщиной 20 и 100 мкг/см² эффективность переизлучения оказалась одинаковая и около 100%. Для пленок с толщиной покрытия 100 мкг/см² эффекты старения (снижение эффективности переизлучения) не проявились за год нахождения в светоизолированной камере. Для пленок с толщиной покрытия 20 мкг/см² ситуация неоднозначная: у двух пленок эффективность снизилась до 70% менее чем за

месяц нахождения в светоизолированной камере, а эффективность другой пленки не изменилась: см. рисунок 3.

При помощи оптического и электронного микроскопа была исследована структура поверхности пленок ТФБ. Измерены характерные размеры кристаллов ТФБ и степень заполнения подложки сместителем спектра ТФБ. При помощи рентгенофлуоресцентного анализа и визуального анализа изображений установлено, что постаревший образец содержал меньшее количество ТФБ, однако причины старения пока не понятны. На рисунке 4 показаны снимки с электронного микроскопа.

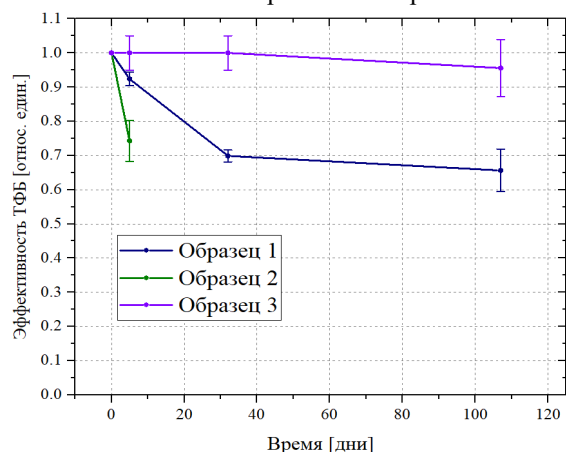


Рисунок 3. Зависимость эффективности ТФБ (относительно первого дня) толщиной 20 мкг/см² от времени.

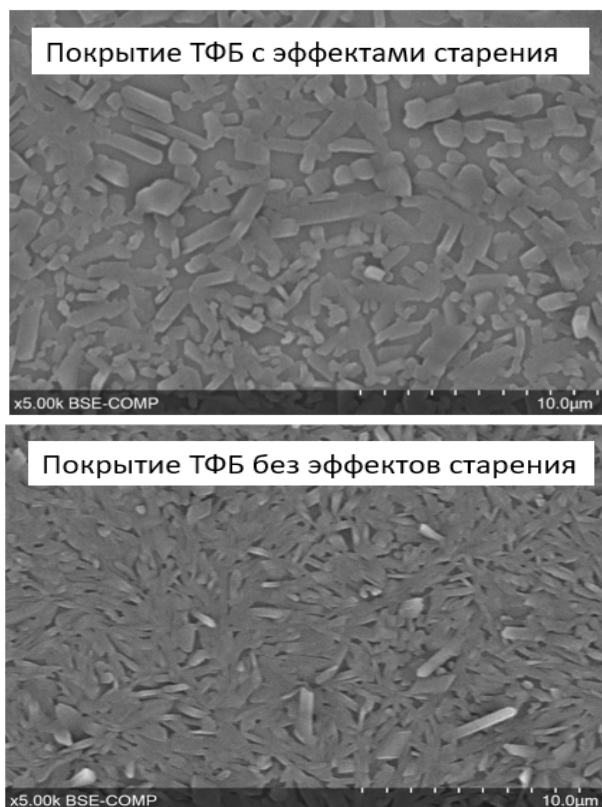


Рисунок 4. Снимки поверхности пленок ТФБ при помощи оптического микроскопа.

Развитие методики экспериментов с пучками ионов низких энергий

В 2025 году в лаборатории 3-3 были продолжены работы по развитию газовых лавинных детекторов низкого давления для задач ускорительной масс-спектрометрии (УМС) и фундаментальной физики. Основной акцент был сделан на развитии методик зарядового и комбинированного (оптико-зарядового) считывания сигналов.

Развитие методики зарядового считывания для УМС

В 2025 году ключевым направлением работы стала отладка режима счета ионов радиоуглерода (^{14}C) с использованием разработанной время-проекционной камеры (ВПК) низкого давления. Эксперименты проводились на базе УМС-комплекса MICADAS-28 в ЦКП «Ускорительная масс-спектрометрия НГУ-ННЦ».

Поскольку сепарация ионов по массе осуществляется магнитной системой УМС, основной задачей детектора является надежная регистрация (подсчет) каждого пришедшего иона ^{14}C и его отделение от остаточного фона. Разработанная нами методика на основе газовых электронных умножителей (ГЭУ) продемонстрировала ряд ключевых преимуществ перед существующими аналогами:

1. в сравнении с ионизационными камерами использование ГЭУ обеспечивает внутреннее газовое усиление сигнала, что позволяет добиться существенно более высокого отношения сигнал/шум. Это критически важно для уверенной регистрации низкоэнергетичных ионов, где сигнал в обычной ионизационной камере находится на уровне шумов электроники.

2. в сравнении с полупроводниковыми детекторами газовые детекторы лишены эффекта радиационного старения (деградации). Полупроводниковые детекторы при работе с пучками тяжелых ионов быстро теряют разрешение и выходят из строя из-за радиационных повреждений кристаллической решетки, тогда как в ВПК рабочее тело (газ) постоянно обновляется, обеспечивая стабильность характеристик в течение многих лет эксплуатации.

Для подтверждения эффективности методики были проведены сравнительные измерения эталонных и фоновых образцов.

На Рисунке 5 представлено двумерное распределение сигналов (длительность/площадь), полученное при измерении «современного» стандарта (сахар). Отчетливо виден плотный кластер событий, соответствующий ионам ^{14}C .

На Рисунке 6 показан результат измерения фонового образца (мелкозернистый плотный графит), не содержащего радиоуглерода. В области регистрации ^{14}C наблюдаются лишь следовые количества событий, отражающие эффект неизбежного загрязнения образца современным углеродом на этапе графитизации (пробоподготовки).

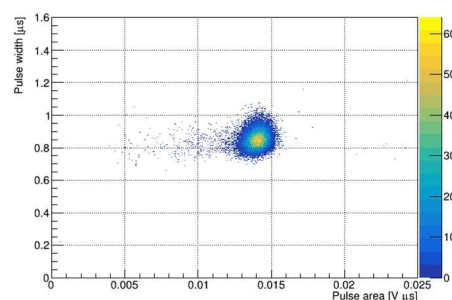


Рисунок 5. Двумерное распределение по длительности и площади ионов от УМС-Micadas, измеренных в ВПК низкого давления в изобутане при давлении 50 торр. Ионы были получены из эталонного образца (сахар), в котором известно точное содержание радиоуглерода. Кластер принадлежит ионам углерода-14.

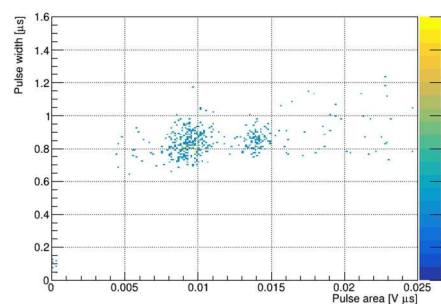


Рисунок 6. Двумерное распределение по длительности и площади ионов от УМС-Micadas, измеренных в ВПК низкого давления в изобутане при давлении 50 торр. Ионы были получены из фонового образца (мелкозернистый плотный графит), не содержащий радиоуглерода.

Данная методика и разработанная конструкция ВПК низкого давления ориентированы на практическое применение в составе создаваемых отечественных малогабаритных УМС-комплексов. Высокая точность измерения пробега (до 2%) и стабильность работы при давлениях порядка 50 Торр делают этот детектор ключевым элементом для будущих российских установок.

Разработка ВПК с комбинированным считыванием

В 2025 году проводились работы по разработке время-проекционной камеры с комбинированным методом регистрации данных. Данное направление ориентировано на решение фундаментальных задач ядерной физики, требующих детальной трехмерной реконструкции топологии сложных событий, таких как поиск эффекта Мигдала или прецизионное изучение многочастичных реакций (например, $p+^{11}\text{B} \rightarrow 3\alpha$).

Концепция детектора основана на одновременной регистрации ионизационного заряда и вторичного светового излучения (сцинтилляции), возникающих в

процессе развития электронной лавины в каскаде ГЭУ.

Для регистрации двумерных (XY) проекций треков используется высокочувствительная КМОП-камера Hamamatsu ORCA Flash 4.0. Высокое пространственное разрешение камеры (пиксель матрицы 6.5×6.5 мкм) в сочетании с прецизионной оптикой позволяет фиксировать детальную структуру трека.

Сбор заряда осуществляется с помощью сегментированного анода, выполненного из прозрачного проводящего материала ITO (оксид индия-олова). Анод структурирован на стрипы методом фотолитографии, что позволяет считывать временную развертку зарядового сигнала.

В качестве сцинтилирующего газа используется чистый тетрафторид углерода (CF_4), обладающий интенсивными полосами эмиссии в видимом и ближнем УФ-диапазоне, что идеально согласуется со спектральной чувствительностью камеры ORCA без применения спектросместителей.

В ходе серии экспериментов с альфа-источником ^{226}Ra была подтверждена работоспособность всех узлов системы. С помощью алгоритмов кластеризации (DBSCAN) была проведена автоматизированная обработка полученных изображений, позволившая выделить треки на фоне шумов и рассчитать распределение яркости в них.

На текущем этапе выявлена необходимость дальнейшего повышения коэффициента газового усиления для улучшения качества изображений одиночных треков. В связи с этим в настоящее время проводятся работы по модернизации усилительного каскада до системы Quad-GEM (четырёхслойный газовый множитель), что позволит достичь предельной чувствительности при сохранении стабильности работы детектора. Дополнительно планируется доукомплектование установки многоканальной электроникой для реализации триггера по всем сегментам анода.

ЭКСПЕРИМЕНТЫ НА УСТАНОВКЕ ДЕЙТРОН

Введение

На установке Дейтрон на накопителе электронов ВЭПП-3 проводятся эксперименты по измерению поляризационных наблюдаемых в электро- и фотореакциях на тензорно-поляризованной дейтериевой внутренней газовой мишени [1].

Модернизация установки Дейтрон

Продолжались работы по оснащению детектора установки дейтрон системой высокоточного измерения времени пролета заряженных частиц, основанной на многозачерных резистивных плоскостных камер (МРПК). Проведен цикл исследований с использованием прототипа МРПК на основе гетинаксовых электродов с размерами рабочей области 10x20 см², фотография которого показана на Рис. 1.

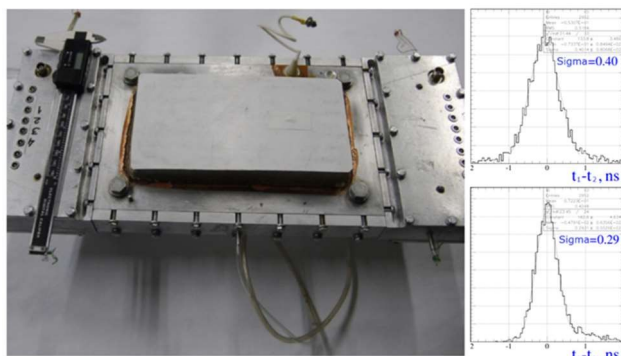


Рисунок 1. Слева: фотография прототипа МРПК. Справа: распределения по разности времён срабатывания двух сцинтилляционных счётчиков (t_1-t_2) и прототипа и одного из сцинтилляционных счётчиков (t_0-t_2).

При испытании на космических частицах прототип продемонстрировал устойчивую работу с эффективностью выше 90%. Скорость счета шумовых срабатываний постепенно снижались до уровня нескольких Гц/см². Временное разрешение прототипа было измерено с помощью двух сцинтилляционных счётчиков. Космические частицы проходили через два сцинтиллятора и прототип МРПК. Временное разрешение прототипа (σ_0) определялось по следующей формуле:

$$\sigma_0^2 = \frac{\sigma_{01}^2 + \sigma_{02}^2 - \sigma_{12}^2}{2},$$

где σ_{01}^2 (σ_{02}^2) – дисперсия разности времён срабатывания прототипа и первого (второго) сцинтиллятора, σ_{12}^2 – дисперсия разности времён срабатывания двух сцинтилляторов. Измерения показали, что временное разрешение прототипа МРПК составляет около 100 пс.

Несмотря на то, что работы с прототипом МРПК ещё не закончены, разработка чертежей основных рабочих МРПК уже завершена. Заказ на изготовление деталей для них отправлен в мастерские ИЯФ.

Продолжались работы по усовершенствованию электроники детектора установки Дейтрон. Завершена разработка тракта измерения заряда сигналов с кремниевых фотоумножителей (SiPM) адронного калориметра-сэндвича. Была модифицирована плата конверсии заряд-время, разработана конфигурация ПЛИС обработки/передачи данных, изготовлены два 48-канальных блока, полностью обеспечивающие оба плеча калориметра (см. Рис. 2). По сравнению со старыми КА-МАК модулями новые оцифровщики имеют на порядок меньшее мертвое время, как за счет более быстрой конверсии, так и в результате внутреннего подавления пустых каналов. Блоки использовались в тестовом сеансе на накопителе ВЭПП-3 и продемонстрировали надежную работу с запланированными параметрами.

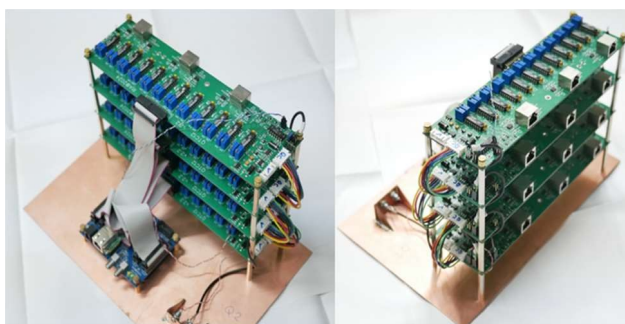


Рисунок 2. Новый 48-канальный блок зарядо-цифрового преобразователя для оцифровки сигналов с SiPM адронного калориметра-сэндвича.

Завершена разработка аппаратуры высокоточного измерения времени для времяпролетных детекторов. На Рис. 3 показан первый экземпляр блока время-цифрового преобразователя (ВЦП). 30-канальный блок создан по модульному принципу и позволяет выполнять многоканальное измерение времени и длительности импульсов с шагом 5 пс и разрешением до 15 пс с частотой следования до 4 МГц. Для оцифровки планируемого числа каналов двух плеч МРПК требуется 8 таких блоков. В настоящее время идет их производство. Блок может работать и в режиме без измерения длительности импульсов. В этом случае он обеспечивает 58 измерительных каналов.

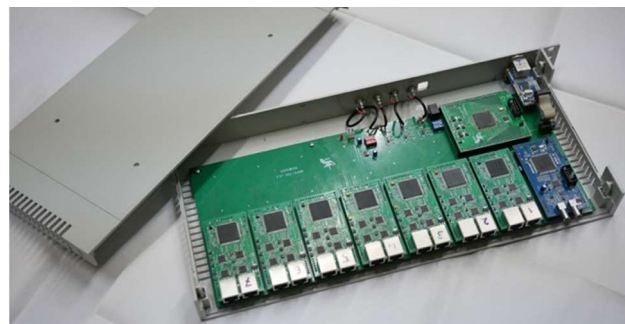


Рисунок 3. Первый экземпляр модульного блока время-цифрового преобразователя с 15-пикосекундным разрешением для времяпролетных детекторов.

Тестовый сеанс на накопителе ВЭПП-3

Осенью 2025 г. был проведен тестовый сеанс на электронном накопителе ВЭПП-3 при энергии электронов 1200 МэВ. Целью сеанса являлся выбор оптимального режима работы ВЭПП-3 с установленной на экспериментальном промежутке системой мечения фотонов. В режиме набора экспериментальных данных величина фоновых событий должна быть минимальной, а время жизни электронного пучка – максимальным. Для снижения фона были установлены подвижные ограничители апертуры электронного пучка (пробники) в нескольких местах накопителя ВЭПП-3. В экспериментальном промежутке размещались переносные сцинтилляционные счетчики малых размеров для измерения величины фоновых загрузок. Также были установлены детекторы LQ поляриметра. В этом заходе LQ поляриметр регистрировал в основном события пучкового фона. На Рис. 4 представлен результат измерения скорости счета событий LQ поляриметра во время ввода одного из ограничителей апертуры ВЭПП-3. Данный ограничитель был установлен вблизи одного из резонаторов накопительного кольца ВЭПП-3, ближайшего к экспериментальному промежутку Дейтрон. Он двигался снизу вверх, ограничивая апертуру в вертикальном направлении.

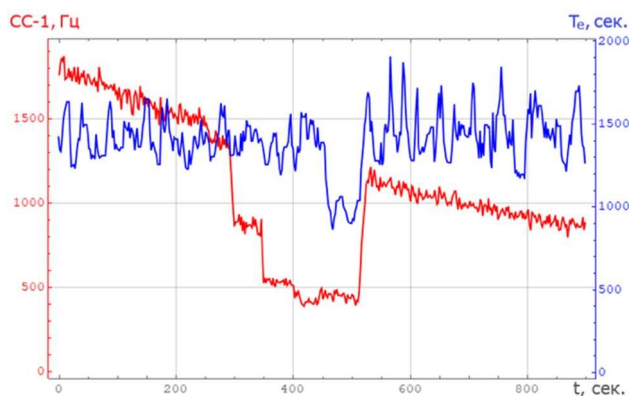


Рисунок 4. Красная кривая показывает изменение скорости счета событий LQ поляриметра при введении ограничителя апертуры электронного пучка. Синяя кривая – время жизни электронного пучка в накопителе ВЭПП-3. Электронный ток $I_e = 5$ мА.

Как видно из рисунка, при определенном положении ограничителя пучка загрузка LQ поляриметра падает почти в 3 раза, а время жизни электронного пучка не меняется (на Рис. 4 значения графиков при $t \sim 415$ с). Данное положение ограничителя апертуры является оптимальным: гало электронного сгустка срезается так, что это еще не влияет на время жизни пучка электронов в накопителе, но уже приводит к уменьшению фоновых загрузок детекторов, т.к. пучок, проходящий через узкие места экспериментального промежутка, теперь не содержит гало. Если вдвинуть ограничитель еще на несколько миллиметров (на Рис. 4 значения графиков при $t \sim 450$ с), то он приблизится к электронному пучку слишком близко. Время жизни последнего уменьшится, а фоновые загрузки подрастут. На Рис. 4.

также виден момент, когда ограничитель апертуры удаляется на максимальное расстояние от пучка ($t > 500$ с).

Поляризованная газовая мишень

За отчетный период на источнике поляризованных атомов дейтерия (ИПА) были определены скорости откачки турбомолекулярных насосов по дейтерию. Они оказались в пределах паспортных данных на эти насосы. Это измерение было выполнено с целью определения количества дейтерия в молекулярном или атомарном состоянии, поступающего в различные камеры ИПА. Задачей исследования являлось определение фокусирующей способности атомов дейтерия ИПА на расстоянии 160 см от сопла, то есть определение количества атомов, поступающих в последнюю камеру при введении тока в фокусирующие магниты ИПА. На Рис. 5 приведена интенсивность атомного (молекулярного) пучка при выключенных магнитах ИПА и выключенном разряде в диссоциаторе.

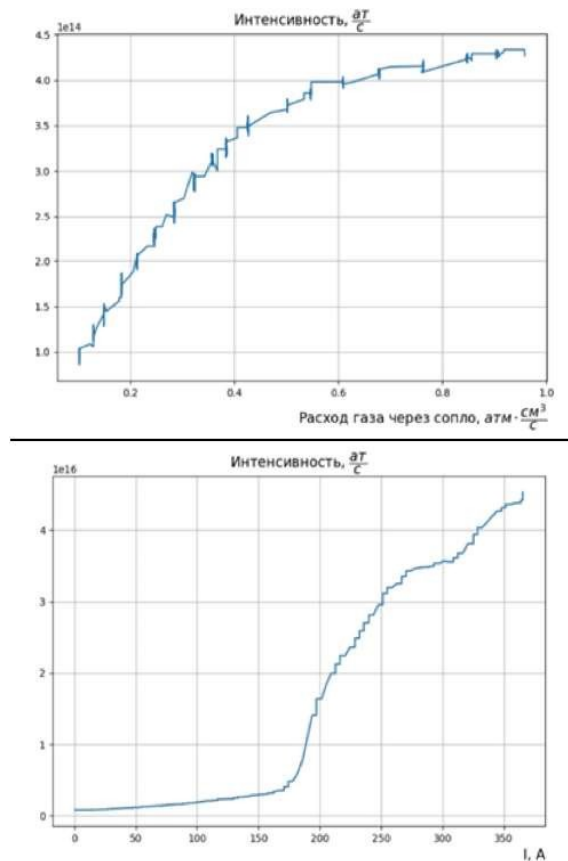


Рисунок 5. Вверху: зависимость интенсивности атомного пучка от расхода газа через сопло при выключенных фокусирующих магнитах. Внизу: зависимость интенсивности атомного пучка от тока, протекающего через магниты. Ток через первую группу магнитов 170 А, ток через вторую группу магнитов 200 А.

При расходе газа через сопло $0.6 \text{ норм.см}^3/\text{с}$ интенсивность пучка составляет $4.0 \times 10^{14} \text{ ат/с}$. Это половинная интенсивность пучка атомов, которые будут фокусироваться магнитами ИПА (см. Рис. 5). Такая интенсивность примерно соответствует распределению интенсивности из сопла по закону косинуса полярного угла. При этом атомы не поляризованы по электронному спину. Надо отметить, что при включении разряда для получения атомарного пучка, давление в камерах, откачиваемых турбомолекулярными насосами, почти не изменяется, однако внутри ИПА, где откачка осуществляется криогенными поверхностями, давление возрастает примерно в два раза. При включении тока через обмотки сверхпроводящих фокусирующих магнитов ИПА поток атомов (только они фокусируются за счет градиента магнитного поля в магнитах) возрастает до величины $4 \times 10^{16} \text{ ат/с}$. Это означает, что в сфокусированном атомарном пучке доля неполяризованной молекулярной компоненты, возникающей из-за неполной диссоциации молекул в диссоциаторе, составляет менее процента. Этот параметр нашего ИПА является рекордным для источников поляризованных атомов данного типа.

Анализ данных предыдущих экспериментов на установке Дейтрон

В 2025 году продолжалась обработка данных предыдущих экспериментов на установке Дейтрон с внутренней тензорно-поляризованной мишенью. Результаты обработки опубликованы в статье [2]. Рисунок 6 взят из данной статьи. На нем представлены результаты измерения компоненты T_{20} тензорной анализирующей способности реакции $\gamma d \rightarrow ppp^-$ по данным экспериментального захода, проведенного в 2023 году. В статье проводится сравнение экспериментальных данных с результатами статистического моделирования, выполненного в рамках разных теоретических моделей. В первой модели применяется импульсное приближение. Во второй модели к импульсному приближению добавляется учёт последующего нуклон-нуклонного и пион-нуклонного перерасеяний. Как видно из Рис. 6 учёт взаимодействия в конечном состоянии в подсистемах NN и πN улучшает согласие между теорией и экспериментом. Ожидается, что дальнейшее улучшение согласия между теорией и экспериментом будет достигнуто при введении дополнительных механизмов реакции, например, учёте двухчастичных образований.

В 2025 году получены первые результаты обработки экспериментальных данных по измерению T_{20} в реакции двухчастичной фотодисинтеграции дейтрона $\gamma d \rightarrow pp$. Данные относятся к экспериментальному заходу 2023 года. В ближайшее время будет подготовлена научная публикация на эту тему.

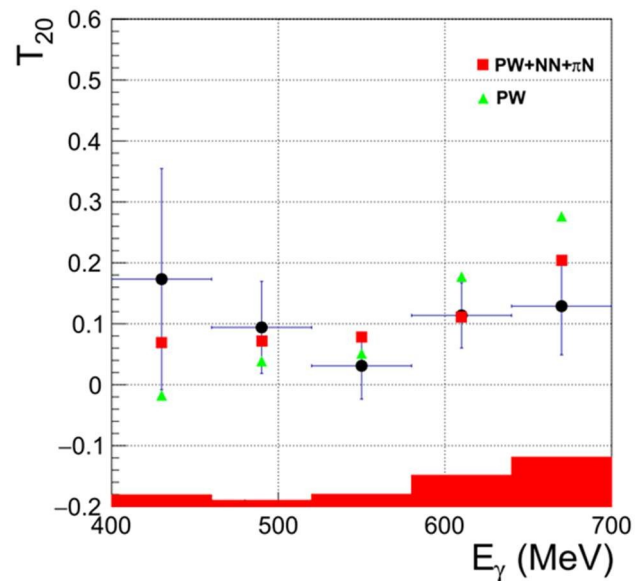


Рисунок 6. Зависимость компоненты T_{20} тензорной анализирующей способности реакции $\gamma d \rightarrow ppp^-$ от энергии фотона. Кружки – экспериментальные результаты. Треугольники – расчет в импульсном приближении, красные квадратики – расчет с учетом NN и πN взаимодействий в конечном состоянии.

В работе [3] обсуждается методика анализа данных, записанных на установке Дейтрон в 2013 г. с детектором, состоящим из двух ассиметричных плеч. Верхнее плечо использовалось для регистрации протонов и дейтронов, а нижнее, содержащее электромагнитный калориметр на основе кристаллов NaI(Tl) , для регистрации фотонов от распада π^0 -мезона. В статье описана связь между электро- и фотореакциями на дейтроне. Представлены методы анализа экспериментальной статистики и оценки неотделимого фона с использованием пакета GEANT4 и генератора фотореакций GENBOS. Хорошее соответствие между экспериментальными данными и моделированием показывает корректность методологии идентификации реакций $\gamma d \rightarrow d\pi^0$ и $\gamma d \rightarrow p\pi^0$.

Список используемых источников

- [1] Y.V. Shestakov et al., Photodisintegration of tensor polarized deuteron: Status of the experiment at the VEPP-3 storage ring, *Int. J. Mod. Phys.* 33, 2441023 (2024).
- [2] V.V. Gauzshtein et al., Measurement of the tensor analyzing power T_{20} for incoherent π^- photoproduction on a deuteron above the first resonance region, *Phys. Lett.* B 860, 139166 (2025).
- [3] Y.M. Cherepennikov et al., Pion photoproduction on a deuteron at the VEPP-3 electron beam, *Nucl. Instrum. Meth. A* 1074, 170316 (2025).

ТЕОРЕТИЧЕСКАЯ ФИЗИКА

Теория сильных взаимодействий

В работе [1] показана ошибочность утверждения об отсутствии одновременных скачков многочастичных амплитуд по энергетическим инвариантам перекрывающихся каналов и неправомочность использования соотношений Штейнманна для доказательства этого утверждения. Существование одновременных скачков означает ошибочность принятой в настоящее время формы мультиреджевских амплитуд и должно учитываться при выводе уравнения БФКЛ (Балицкого–Фадиной–Кураева–Липатова) в следующих приближениях.

Полюсы Редже (реджеоны) в комплексной плоскости угловых моментов порождают разрезы. В КХД разрезы порождаются обменов реджеванских глюонов, свойства которых разительно отличаются от свойств реджеонов в классической теории. Это приводит к особенностям формирования разрезов. В работе [2] показана неприменимость мандельштамовского критерия (непланарности фейнмановских диаграмм) для формирования разрезов в теории возмущений КХД.

В работе [3] обсуждаются результаты, которые необходимы для исследований в области физики насыщения и глюонной томографии с большой точностью. В частности, вычисление в следующем за главным порядке дифракционного рождения 1) двух струй, 2) продольно поляризованного легкого векторного мезона, 3) полуинклюзивного фото- и электророждения одного и двух адронов с большим поперечным импульсом на нуклоне или ядре. Также мы рассматриваем более сложный процесс 4) эксклюзивного рождения поперечно поляризованного легкого векторного мезона, первый неисчезающий вклад в который имеет подавление по твисту. Этот новый класс процессов предоставляет доступ к прецезионному описанию динамики насыщения глюонов, которая может наблюдаться на Электронно-Ионном коллайдере или БАК в рА и АА рассеянии в ультрапериферических столкновениях.

Также вышло учебное пособие [4]. Книга является введением в основные идеи и методы, необходимые для понимания сильных взаимодействий. Каждая глава содержит краткое теоретическое введение — лекцию, и набор задач для самостоятельной работы или решения на семинаре. Уровень изложения приемлем для понимания студентом-физиком IV–VI курсов, специализирующемся на физике элементарных частиц. Материал может служить основой краткого семестрового или длинного двухсеместрового курсов. Изложение касается группы $SU(N)$, флейворной симметрии и эффективных лагранжианов, построенных на основе флейворной $SU(3)_F$ симметрии, конститuentных кварков, кварков и глюонов как фундаментальных полей, квантовой хромодинамики как калибровочной теории поля, функционального интегрирования, вильсоновских линий, метода Фаддеева — Попова, БРСТ-сим-

метрии, спинор-спирального формализма, теории возмущений на световом фронте, решеточных методов, аномалий, перенормировки, эффективного действия, сильной СР-проблемы, аксиона, киральной теории возмущений, глубоко неупругого рассеяния, уравнений эволюции ДГЛАП, БФКЛ и БК, струй, правил сумм, структуры вакуума и инстантонов. Пособие предназначено для аспирантов и студентов физико-математических специальностей, научных работников.

Радиационные поправки

Метод структурных функций (партоновых расщеплений) в настоящее время широко используется для вычисления радиационных поправок к эксклюзивным сечениям электрон-позитронной аннигиляции. При этом точность вычисления поправок снижается, поскольку составляющее основу метода коллинеарное приближение не позволяет правильно учитывать ограничения на кинематику излученных фотонов, накладываемые экспериментальным отбором событий. В работе [5] предлагается модификация метода, правильно учитывающая эти ограничения.

Работа [6] посвящена расчету двухпетлевых поправок к дифференциальному сечению процесса $e^+e^- \rightarrow \mu^+\mu^-$. Основной результат — точное аналитическое выражение для С-чётной части поправок, учитывающее массу рождающихся мюонов, но пренебрегающее малыми поправками от массы электрона. Полученные формулы выражены через полилогарифмы Гончарова и пригодны для анализа данных экспериментов на электрон-позитронных коллайдерах. Также впервые были получены полные аналитические выражения для амплитуд с тремя виртуальными фотонами. Кроме того, уточняются и систематизируются ранее известные результаты, такие как форм-факторы лептонов. Эти результаты критически важны для повышения точности теоретических расчётов, что необходимо для корректного анализа данных с современных e^+e^- -коллайдеров. В частности, расчеты критичны для точного измерения сечения рождения пионов. Этот процесс играет ключевую роль в определении вклада адронной поляризации вакуума в аномальный магнитный момент мюона ($g-2$). Таким образом, работа вносит прямой вклад в одну из самых актуальных задач физики высоких энергий — поиск Новой физики.

Методы многопетлевых вычислений

В работе [7] рассматривается группа монодромии дифференциальных систем для многопетлевых интегралов. Описан простой эвристический метод получения матриц монодромии как функций размерности пространства-времени d . Отмечено, что в специально выбранном базисе элементы этих матриц оказываются многочленами Лорана от переменной $z = e^{ind}$ с целыми коэффициентами. То есть группа монодромии оказывается подгруппой группы $GL(n, Z[z, 1/z])$. Рассмотрены билинейные соотношения для монодромий в d и $-d$ измерениях, которые следуют из подкрученных билинейных соотношениях Римана и проверено, что найденные матрицы монодромии удовлетворяют им.

В работе [8] вычислены интегралы по фазовому пространству, возникающие в диаграммах двойного реального излучения для полуинклюзивного глубоко неупругого рассеяния в следующем-за-следующим ведущем порядке (NNLO) квантовой хромодинамики (КХД). Применяя метод обратной унитарности, эти интегралы были преобразованы в петлевые интегралы, что позволяет использовать тождества интегрирования по частям и свести их к набору мастер-интегралов. Затем эти интегралы вычисляются с помощью метода дифференциальных уравнений и выражаются через обобщённые полилогарифмы. Анализируя разложение по параметру размерной регуляризации, найдены дополнительные соотношения между некоторыми из главных интегралов. В качестве альтернативного подхода вычислены мастер-интегралы, разделяя угловое и радиальное интегрирование.

Полуинклюзивное глубоконеупругое рассеяние (SIDIS) предоставляет важную информацию о структуре адронов, позволяя исследовать функции партонных распределений (PDF) и функции фрагментации (FF). Коэффициентные функции для SIDIS могут быть вычислены в рамках пертурбативной КХД и в настоящее время известны до следующего-за-следующим ведущим порядком (NNLO) для случаев, когда как начальный лептон, так и адрон либо оба поляризованы, либо оба неполяризованы. В работе [9] подробно описаны вычисления в порядке NNLO, включая детальное обсуждение всех партонных каналов, расчёт амплитуд и необходимых мастер-интегралов, а также перенормировку ультрафиолетовых расходимостей и массовую факторизацию для инфракрасных расходимостей. Выполнен феноменологический анализ влияния NNLO-поправок на сечения SIDIS для различных PDF и FF и при разных кинематических условиях, включая те, которые планируются для будущего электрон-ионного коллайдера (EIC). Показано, что эти поправки не только существенны, но и необходимы для уменьшения зависимости от масштабов перенормировки и факторизации.

В работе [10] применен метод разложения по областям к вычислению дуально-конформных интегралов при малой виртуальности. В отличие от стандартного подхода, где разделение на области осуществляется с помощью размерностной регуляризации, нарушающей дуальную конформную инвариантность (DCI), использовалась достаточно общая комбинация размерностной и аналитической регуляризации, сохраняющую DCI. В рамках такой регуляризации (называемой DCI-регуляризацией) вклад каждой области оказывается дуально-конформно инвариантным. Показано, что предложенный метод существенно упрощает вычисления. В качестве иллюстрации вычислен слабо-виртуальный DCI-пентабок-интеграл с точностью до степенных поправок. Вклады всех 32 областей выражаются через Γ -функции, умноженные на некоторые степени DCI кросс-отношений. Соответственно, после снятия регуляризации окончательный результат выражается исключительно через логарифмы кросс-отно-

шений. Проверено, что полученное выражение численно согласуется с результатом недавней статьи Белицкого и Смирнова [11], имеющим существенно более сложную форму.

Феноменологические модели

В работе [12] обсуждаются радиационные переходы $D_{s1} \rightarrow D_s \gamma$ и $D_{s1} \rightarrow D_s^* \gamma$ p -волновых мезонов. Поскольку D_{s1} -мезоны не имеют определённой C -чётности, а массы кварков в этих мезонах существенно различаются, то из-за спин-орбитального взаимодействия каждый из p -волновых мезонов с полным угловым моментом $J = 1$ представляет собой суперпозицию состояний с полным спином кварков $S_{tot} = 0$ и $S_{tot} = 1$. Мы объясняем, почему парциальная ширина радиационного перехода $D_{s1}(2460) \rightarrow D_s \gamma$ значительно больше соответствующего значения для $D_{s1}(2536) \rightarrow D_s \gamma$. Также предсказаны соответствующие парциальные ширины B_{s1} и B_{c1} мезонов.

В работе [13] обсуждаются радиационные $M1$ переходы $D^* \rightarrow D \gamma$, $D_s^* \rightarrow D_s \gamma$, $B^* \rightarrow B \gamma$ и $B_s^* \rightarrow B_s \gamma$. Предложена релятивистская потенциальная модель. Соответствующий гамильтониан, разложенный до членов порядка v^2/c^2 , где v — скорости кварков, совпадает с гамильтонианом Брейта. Эта модель позволяет сделать предсказания для ширин радиационных переходов мезонов с одним лёгким кварком. Учёт релятивистских эффектов особенно важен для переходов $D_s^* \rightarrow D_s \gamma$ и $D^* \rightarrow D \gamma$, где наблюдается большая компенсация в величине магнитного момента этих мезонов. Полученные результаты согласуются с известными экспериментальными данными.

В работе [14] изучена зарядовая асимметрия в процессе $e^+e^- \rightarrow \pi^+\pi^-\pi^0\gamma$ для фотонов с энергией $\nu \ll \sqrt{s}$. Учитывается продольная поляризация электронов (позитронов). Асимметрия возникает из-за интерференции амплитуд образования пионных состояний с противоположной C -чётностью. Обсуждается вклад $a_1^0(1260)$ -мезона в промежуточном состоянии в зарядовую асимметрию. Этот вклад не является лидирующим, однако им нельзя пренебречь. Показано, что зарядовая асимметрия может достигать нескольких десятков процентов.

Квантовая механика

В статье [15] представлено решение квантовой задачи распространения нейтронов в магнитном поле с мультипольным разложением поля. Строгое решение уравнения Паули для нейтронов показывает существование двух решений, для конечного и бесконечного движения, при любой мультипольной конфигурации. В качестве примера представлено подробное исследование движения нейтронов в квадрупольных и секстипольных магнитах. Полученные предсказания согласуются с результатами эксперимента Штерна-Герлаха для нейтронов. Для проверки существования конечного и бесконечного движения обсуждается эксперимент, который может быть выполнен в Институте ядер-

ной физики им. Г.И. Будкера с использованием существующего оборудования. В заключение рассматривается накопительное кольцо нейтронов с прямолинейной секцией и дискретными магнитами, фокусирующими пучок.

В работе [16] рассмотрен нестационарный эффект Ааронова-Бома (рассеяние электрона в поле узкого соленоида с переменным током). Используя приближение эйконала, найдено дифференциальное и полное сечение процесса. В отличие от случая постоянного тока, полное сечение в случае переменного тока оказывается конечным. Обнаружена осциллирующая со временем асимметрия в дифференциальном сечении рассеяния. Обсуждается возможность экспериментального наблюдения эффекта.

В работе [17] рассматривается рассеяние нерелятивистского электрона на узком соленоиде конечной длины. При этом магнитное поле вне соленоида отлично от нуля. С использованием эйконального приближения найдены дифференциальное и полное сечения процесса. Показано, что полное сечение конечно, в отличие от случая рассеяния на бесконечно длинном соленоиде (эффект Ааронова-Бома). Также обнаружена асимметрия сечения рассеяния, наблюдаемая экспериментально.

В работе [18] исследована модель взаимодействия двух электронов в краевых состояниях двумерного топологического изолятора. Рассмотрены как решения уравнения Шредингера, так и решения уравнения Бете-Солпитера при различных значениях энергии Ферми. Показано, что для уравнения Бете-Солпитера, учитывающего существование поверхности Ферми, в системе двух электронов существует дискретный спектр. Это явление отсутствует в случае уравнения Шредингера. Найдена энергия связанного состояния при ненулевом суммарном импульсе электронов.

Гравитация и космология

Синхронная калибровка в гравитации ($g_{0\lambda} = -\delta_{0\lambda}$) плохо определена из-за сингулярности при $p_0 = 0$ в пропагаторе гравитона. Ранее изучалось «смягчение» этой калибровки рассмотрением вместо неё калибровки $n^\lambda g_{\lambda\mu} = 0$, $n^\lambda = (1, -\varepsilon(\partial^j \partial_j)^{-1} \partial^k)$ в пределе $\varepsilon \rightarrow 0$. В работе [19] изучалась возможность использования предписания главного значения (не в стандартном смысле Коши), которое сводится, грубо говоря, к замене сингулярностей $p_0^{-j} \rightarrow [(p_0 + i\varepsilon)^{-j} + (p_0 - i\varepsilon)^{-j}]/2$, которые затем ведут себя подобно обобщённым функциям. Преимуществом этого предписания является индивидуальная конечность диаграммных вкладов при $\varepsilon \rightarrow 0$. Показано, что такой пропагатор получается при добавлении к действию калибровочно неинвариантного слагаемого общего вида, которое сводится к $\sim \int f_\lambda \Lambda^{\lambda\mu} f_\mu d^4x$ с постоянным оператором $\Lambda^{\lambda\mu}$, зависящим от ∂ , и функционалом метрики f_λ . Проанализирован вклад полей духов в эффективное действие. Для требуемой промежуточной регуляризации подразумевается дискретная структура теории на

малых расстояниях. Показано, что вклад духов исчезает в пределе $\varepsilon \rightarrow 0$.

Список литературы

- [1] V.S. Fadin, On the Discontinuities of Multiparticle Amplitudes, JETP Lett., 122 (2025) 203–207.
- [2] V.S. Fadin, Peculiarities of Regge Cuts in QCD, Phys. Part. Nucl. Lett., 22 (2025) 117–125.
- [3] M. Fucilla, R. Boussarie, A. V. Grabovsky, E. Li, L. Szymanowski and S. Wallon, Gluon tomography through diffractive processes in a saturation framework, PoS DIS2024, 469 (2025).
- [4] А. В. Грабовский, Введение в сильные взаимодействия: теория и приложения, учебное пособие для вузов Лань 2026, 448 стр., ISBN 978-5-507-53153-0.
- [5] V.S. Fadin, Exclusive Hadron Production in Electron-Positron Annihilation and the Structure Function Method, Phys. Part. Nucl., 56 (2025) 398–404.
- [6] Gerasimov, R.E., Krachkov, P.A., Lee, R.N, Electron-positron annihilation into heavy leptons at two loops, Journal of High Energy Physics, 118 (2025).
- [7] Lee R.N., Pomeransky A.A., Monodromy of multiloop integrals in d dimensions, Journal of High Energy Physics, 9 (2025).
- [8] Ahmed T. et al, NNLO phase-space integrals for semi-inclusive deep-inelastic scattering, Phys. Rev. D, 112 (2025) 014020.
- [9] Goyal S. et al, NNLO QCD corrections to unpolarized and polarized SIDIS, Phys. Rev. D, 111 (2025) 094007.
- [10] L.V. Bork, R.N. Lee, A.I. Onishchenko, Method of regions for dual conformal integrals, Journal of High Energy Physics, 12 (2025).
- [11] A.V. Belitsky, V.A. Smirnov, Tropical regions of near mass-shell pentabox, arXiv:hep-ph/2508.14298.
- [12] A.E. Bondar, A.I. Milstein, Phenomenology of D_{s1} mesons radiative transitions, Phys. Rev. D, 111 (2025) 114019.
- [13] A.E. Bondar, A.I. Milstein, Relativistic effects in M1 radiative decays of heavy-light mesons, Phys. Rev. D, 112 (2025) 054037.
- [14] I.V. Obraztsov, A.S. Rudenko, A.I. Milstein, Charge asymmetry in the process $e^+e^- \rightarrow \pi^+\pi^-\pi^0\gamma$, Phys. Rev. D, 112 (2025) 094028.
- [15] A. Bogomyagkov et al, Quantum and classical dynamics of neutron in a magnetic field, Nucl. Phys. B 1012 (2025) 116833.
- [16] A.I. Milstein, I.S. Terekhov, Scattering of electron in the field of a narrow solenoid with alternating current, Phys. Rev. B, 112 (2025) 024113.
- [17] A.I. Milstein, I.S. Terekhov, Skew scattering and the Aharonov-Bohm effect, Annals of Physics, 483 (2025) 170263.
- [18] A.I. Milstein, I.S. Terekhov, Discrete spectrum of edge states in a two-dimensional topological insulator, Phys. Rev. B, 112 (2025) 155425.
- [19] V.M. Khatsymovsky, Soft synchronous gauge in gravity: Principal value prescription, Int. J. Mod. Phys. A, 40 (2025) 2550080.

ГАЗОДИНАМИЧЕСКАЯ ЛОВУШКА

ЭЦР нагрев плазмы

Для увеличения электронной температуры плазмы и, соответственно, времени жизни горячих ионов на ГДЛ применяется электронный циклотронный резонансный нагрев (ЭЦРН) плазмы. Излучение гиротрона передаётся по волноводной линии передачи до установки ГДЛ. С мощностью квазиоптической двухзеркальной системы излучение на необыкновенной волне фокусируется в плазму и там поглощается в области резонанса на второй гармонике электронной циклотронной частоты.

Схема ввода излучения

Используемая для ЭЦР нагрева плазмы на ГДЛ схема ввода излучения предполагает ввод излучения со стороны слабого относительно резонансного магнитного поля (Рис. 1). Квазиоптическое моделирование ЭЦР нагрева плазмы на ГДЛ показало значительное отражение излучения от ЭЦР в такой схеме. Доля поглощённого излучения в самом благоприятном случае не превышает 50% [1]. Это связано с особенностью поведения показателя преломления плазмы вблизи ЭЦ резонанса.

С другой стороны, согласно моделированию, при инжекции излучения со стороны сильного магнитного поля отражения не происходит и практически всё излучение (свыше 95%) поглощается плазмой.

Для реализации такого метода ввода излучения была разработана схема модернизации узла ввода излучения (Рис. 2). Внутри вакуумной камеры размещаются два плоских зеркала, которые сдвигают и поворачивают пучок так, чтобы он инжектировался в плазму со стороны сильного магнитного поля. В настоящий момент закончено изготовление комплектующих и начата сборка системы на стенде.

Для параметров плазмы ГДЛ обыкновенная волна на второй гармонике практически не поглощается, поэтому необходимо было обеспечить такую поляризацию волны на входе в плазму, чтобы доля необыкновенной волны была максимальна. В предыдущих экспериментах в плазму инжектировалась волна с линейной поляризацией, перпендикулярной магнитному полю. Можно рассчитать поляризацию необыкновенной волны в холодной плазме со стремящейся к нулю плотностью (граница плазма – вакуум), магнитным полем 0,952 Т и углом между волновым вектором и магнитным полем 79° [2]. Она получается эллиптической с отношением полуосей 2,8, большей полуосью перпендикулярной плоскости, в которой лежат магнитное поле и волновой вектор, и с направлением вращения электрического поля в электронную сторону. При использовании линейной поляризации теряется примерно 10% мощности на обыкновенную волну. Поэтому в данной серии экспериментов была установлена более выгодная поляризация волны на входе в плазму. Для этого с учётом геометрии тракта, а также свойств универсального поляризатора были рассчитаны углы поворота зеркал универсального поляризатора ($\Psi_1=63^\circ$, $\Psi_2=8^\circ$).

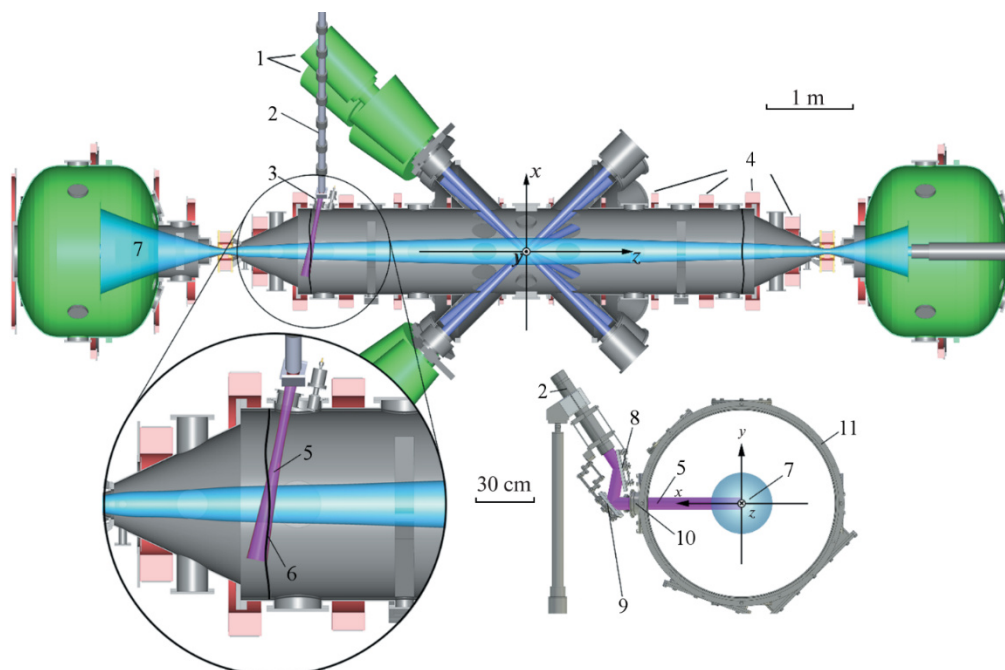


Рисунок 1. Схема ввода излучения в плазму ГДЛ: 1 – инжекторы нейтральных атомов, 2 – волноводный тракт от гиротрона, 3 – квазиоптическая система ввода излучения в ГДЛ, 4 – магнитная система ГДЛ, 5 – СВЧ пучок, 6 – ЭЦР, 7 – плазма, 8 – плоское зеркало, 9 – фокусирующее зеркало, 10 – вакуумное окно, 11 – вакуумная камера ГДЛ.

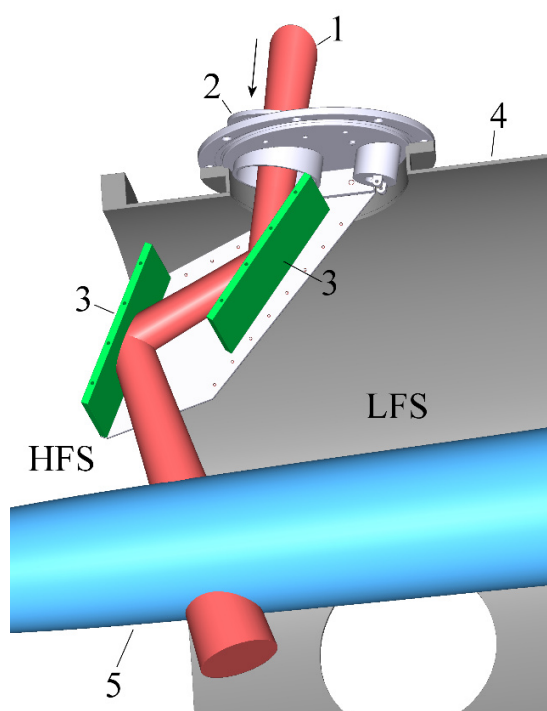


Рисунок 2. Конструкция схемы ввода излучения в плазму ГДЛ со стороны сильного поля: 1 – СВЧ пучок, 2 – вакуумное окно, 3 – зеркало, 4 – вакуумная камера, 5 – плазма, HFS – область сильного магнитного поля, LFS – область слабого магнитного поля.

Результаты

Сценарий эксперимента по ЭЦР нагреву плазмы на ГДЛ показан на Рис. 3.

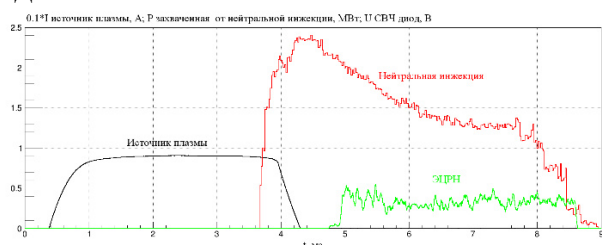


Рисунок 3. Сценарий эксперимента по ЭЦР нагреву.

Вначале включается дуговой источник плазмы, который заполняет ловушку холодной плотной плазмой, затем ещё до выключения источника плазмы включается нейтральная инжекция и начинается накопление горячих ионов и нагрев плазмы. Через 1 мс после атомарных инжекторов включается ЭЦР нагрев, его длительность составляет 3,5 мс. Моменты выключения ЭЦР нагрева и нейтральной инжекции совпадают. При инжекции излучения в резонансное поле при достаточной температуре и плотности плазмы наблюдалось уменьшение уровня рассеянного излучения гиротрона в вакуумной камере ГДЛ. На Рис. 4 представлены два сигнала с СВЧ диода, расположенного на стенке вакуумной камеры. Первый сигнал соответствует выстрелу № 57485, в нём в момент времени 7,5 мс развилась неустойчивость плазмы и по данным томсоновского рассеяния температура в момент времени 9 мс упала ниже 20 эВ. При таких параметрах излучение практически

не поглощается. Второй сигнал соответствует выстрелу № 57599, в нём неустойчивости не наблюдалась, фиксировалось увеличение электронной температуры плазмы в течение импульса ЭЦР нагрева и достигалась температура свыше 400 эВ.

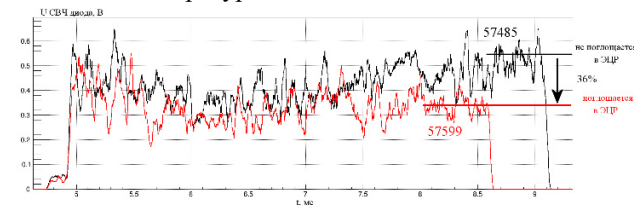


Рисунок 4. Уровень рассеянного СВЧ излучения в вакуумной камере ГДЛ в выстрелах № 57485 и № 57599.

Сравнение уровня двух сигналов даёт оценку доли поглощённой мощности излучения гиротрона примерно в 36% в удачных выстрелах с правильными для ЭЦР нагрева условиями, что примерно соответствует 200 кВт мощности, поглощённой при проходе излучения через ЭЦР.

В результате инжекции СВЧ излучения в течение 3,5 мс на необыкновенной волне в область ЭЦ резонанса на второй гармонике с помощью томсоновского рассеяния зарегистрировано увеличение электронной температуры плазмы. На Рис. 5 изображены два профиля электронной температуры, измеренные в одно время 8 мс в выстреле № 57599 с ЭЦРН и в выстреле № 57607 без ЭЦРН.

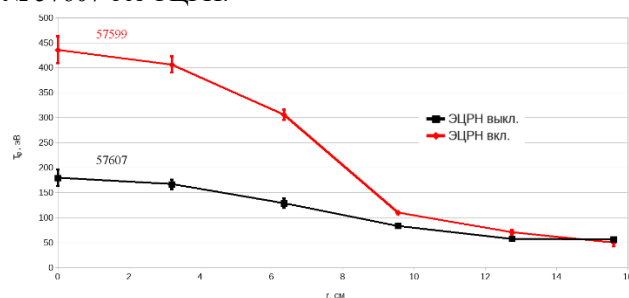


Рисунок 5. Сравнение профилей электронной температуры в выстрелах с ЭЦРН и без ЭЦРН.

Видно значительное увеличение электронной температуры в области плазмы с радиусом до 10 см. На Рис. 6 представлены аналогичные профили электронной плотности плазмы, измеренные в тех же выстрелах № 57599 и № 57607 в момент времени 8 мс.

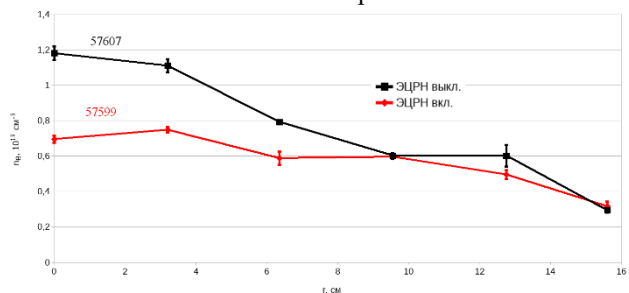


Рисунок 6. Сравнение профилей электронной плотности в выстрелах с ЭЦРН и без ЭЦРН.

При этом наблюдается заметное уменьшение плотности плазмы в выстреле с ЭЦРН примерно в той же области плазмы, где регистрируется увеличение температуры. Однако давление мишенной плазмы (произведение плотности на температуру) при ЭЦР нагреве всё же растёт (Рис. 7).

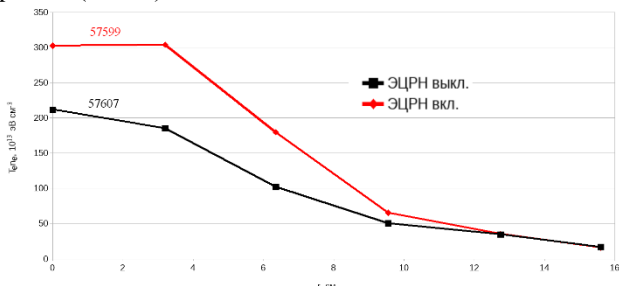


Рисунок 7. Сравнение профилей давления мишенной плазмы в выстрелах с ЭЦРН и без ЭЦРН.

Временная динамика профилей температуры и плотности плазмы, измеренная также с помощью томсоновского рассеяния в выстреле с ЭЦРН № 57599, показана на Рис. 8. Гиротрон в этом выстреле в соответствии со сценарием, показанным на Рис. 3, работал с 5 до 8,5 мс.

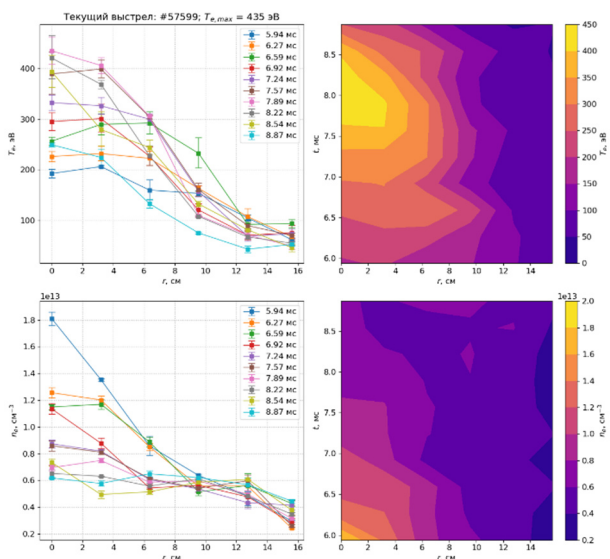


Рисунок 8. Динамика по времени температуры и плотности плазмы в выстреле № 57599 с ЭЦРН.

Видно, что температура плазмы растёт в течение всего интервала времени регистрации параметров плазмы при помощи томсоновского рассеяния. Плотность плазмы, наоборот, падает в течение этого времени, причём только в приосевой области плазмы до 10 см, где наблюдается увеличение температуры.

Дополнительные эффекты в плазме при ЭЦР нагреве

При ЭЦР нагреве наблюдался интересный эффект генерации продольного тока. На Рис. 9 изображены зависимости полного тока на плазмоприёмники установки в двух выстрелах с ЭЦР нагревом и без него, а также суммарный ток на оба плазмоприёмника в этих же выстрелах.

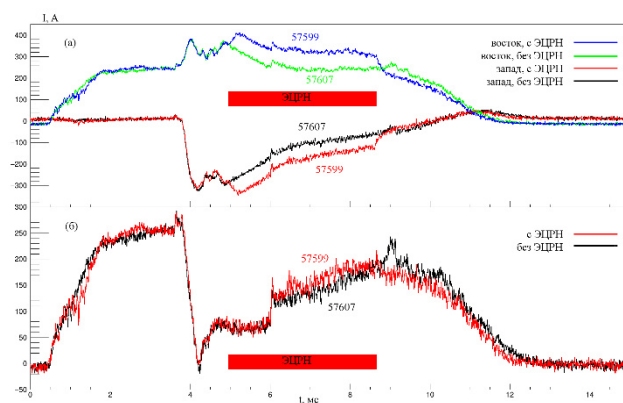


Рисунок 9. Сравнение полного тока на плазмоприёмники в выстрелах с ЭЦРН и без ЭЦРН: (а) – ток на каждый плазмоприёмник отдельно, (б) – суммарный ток на оба плазмоприёмника.

При включении ЭЦР нагрева на обоих плазмоприёмниках скачком увеличивается ток на величину порядка 50 А. После выключения ЭЦР нагрева ток так же быстро уменьшается. Изменения суммарного тока при ЭЦР нагреве не наблюдается, что свидетельствует о генерации продольного тока в ловушке.

В отдельных выстрелах с ЭЦРН наблюдалось развитие МГД неустойчивости, после появления которой в импульсе резко падает температура по всему сечению плазмы. На Рис. 10 изображена динамика температуры и плотности в таком выстреле. Гиротрон здесь работает также до 8,5 мс, неустойчивость развивается в 7,5 мс. Причём в момент развития неустойчивости резко уширяется профиль температуры, после чего температура падает по всему сечению плазмы, а далее снова возобновляется нагрев.

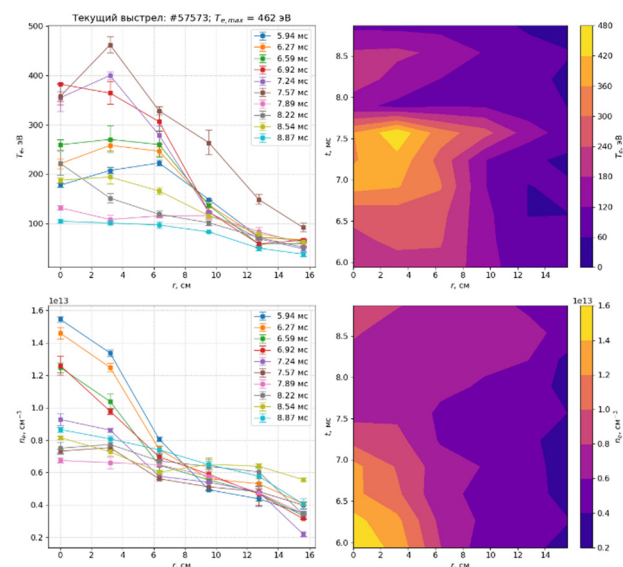


Рисунок 10. Профили температуры и плотности плазмы в выстреле, в котором наблюдается неустойчивость, связанная с ЭЦРН.

Большая часть выстрелов с ЭЦР нагревом при достижении температуры примерно 400 эВ заканчивалась

развитием такой неустойчивости, резко охлаждающей плазму. Возможно, это связано с сильной пикировкой профиля температуры вследствие увеличения поглощения излучения при увеличении температуры. Неустойчивость развивается при достижении некоторого порогового градиента температуры, который уже не стабилизируется применяемым на ГДЛ методом вихревого удержания [3].

Список литературы

1. Хусаинов Т.А., Балакин А.А., Господчиков Е.Д., Шалашов А.Г., Анашкин И.О., Литвак А.Г. Квазиоптическое моделирование сценариев с электронным циклотронным нагревом плазмы на второй гармонике на установке ГДЛ// Физика плазмы. – 2024. – Т. 50. – № 11. – С. 1299–1315
2. Гинзбург В.Л. Распространение электромагнитных волн в плазме. – Москва: Наука. – 1967. – С. 684.
3. Beklemishev A.D., Bagryansky P.A., Chashin M.S., Soldatkina E.I. Vortex confinement of plasma in symmetric mirror traps// Fusion science and technology. – 2010. – Т. 57. – С. 351-360.

УСТАНОВКА КОТ

Развитие диагностического комплекса

Программа исследований установки КОТ (Компактный Осесимметричный Торойд) ориентирована на изучение удержания горячей плазмы с высоким относительным давлением в осесимметричном пробкотроне малого объёма с мощной атомарной инжекцией. Для реализации этой программы использован достигнутый в ИЯФ существенный прогресс в технологиях нейтральной инжекции, позволяющий получить ранее недостижимую плотность эквивалентного тока нейтральных атомов в пучках на поверхности мишени плазмы.

Система атомарной инжекции включает в себя два инжектора с геометрической фокусировкой пучка. Инжекция осуществляется в экваториальную плоскость под углом 90° к оси установки, мощность атомарной инжекции составляет не менее 1.5 МВт, а уровень средней энергии накопленных горячих ионов не менее 7 кэВ. Конфигурация магнитного поля оптимизирована для развития в плазменной струе неустойчивости Кельвина-Гельмгольца, вследствие развития которой начальная газоразрядная плазма нагревается до температуры порядка 40-50 эВ и становится адекватной мишенью для последующего захвата атомарных пучков и образования плазмоида горячих ионов с высоким относительным давлением.

В 2025 году на установке КОТ продолжилось оснащение диагностическими системами.

Диагностическая система для измерения параметров атомарных пучков

Для измерения параметров инжектированных атомарных пучков в установку КОТ разработана и введена в эксплуатацию система вторично-эмиссионных датчиков и калориметров в каждом инжекторном тракте.

Два массива вторично-эмиссионных датчиков (ВЭД) собраны и установлены в приёмники атомарных пучков на расстоянии 4 м от ИОС инжектора. Каждый массив состоит из двадцати одного вторично-эмиссионного датчика, выполнен в форме креста вдоль и поперёк щелей ионно-оптической системы инжектора, как показано на Рис. 1.

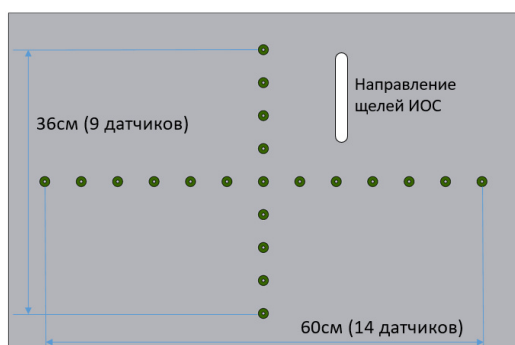


Рисунок 1. Расположение ВЭД в приёмнике пучка.

Система питания и сбора данных для каждого массива ВЭД размещена в компактном выносном блоке, его основу составляет 21-канальный АЦП, разработанный в ИЯФ СО РАН. Использование собственной разработки обеспечивает ряд преимуществ: повышенная компактность, интегрированность в общую систему сбора данных, отсутствие наводок, а также возможность управления через программы с открытым исходным кодом (Python, C) с использованием среды EPICS.

Данные с массива ВЭД (Рис. 2) оцифровываются с частотой 20 кГц и передаются в рабочий архив установки. Полученный массив экспериментальных данных используется для:

- вычисления распределения плотности тока пучка в плоскости приёмника в любой момент времени;
- расчёта угловой расходимости пучка вдоль и поперёк щелей ИОС;
- расчёта распределения плотности тока пучка на заданном расстоянии от ИОС.

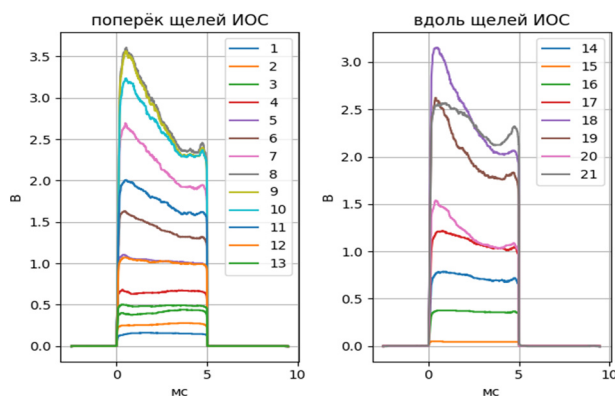


Рисунок 2. Пример сигналов с ВЭД пучка NBI2.

Распределение плотности тока пучка NBI1 и его профиль в плоскости приёмника, определённые с помощью ВЭД, показаны на Рис. 3. Параметры пучка: ионный ток 70 А, энергия – 15 кэВ. Рассчитанная угловая расходимость: 14 мрад вдоль щелей ИОС, 68 мрад – поперёк. Распределение плотности тока пучка NBI2 и его профиль в плоскости приёмника, определённые с помощью ВЭД, показаны на Рис.4. Параметры пучка: ионный ток 120 А, энергия – 15 кэВ. Рассчитанная угловая расходимость: 18 мрад вдоль щелей ИОС, 37 мрад – поперёк.

Контроль вносимой в плазму мощности от каждого инжектора происходит с помощью двух проходных калориметров, представляющих собой танталовую проволоку диаметром 0,5 мм. Входной калориметр установлен на входном порту вакуумной камеры и измеряет мощность пучка на поверхности плазменного столба (Рис. 5 (б)). Выходной калориметр установлен в приёмнике пучка и позволяет оценивать среднюю величину мощности захвата пучка в плазму во время рабочего импульса установки (Рис. 5 (а)). Длина проволоки входного калориметра 846 см, шаг между сегментами 2 см. Длина проволоки выходного калориметра 548 см, шаг между сегментами 5 см. Прозрачность обоих калориметров превышает 99%.

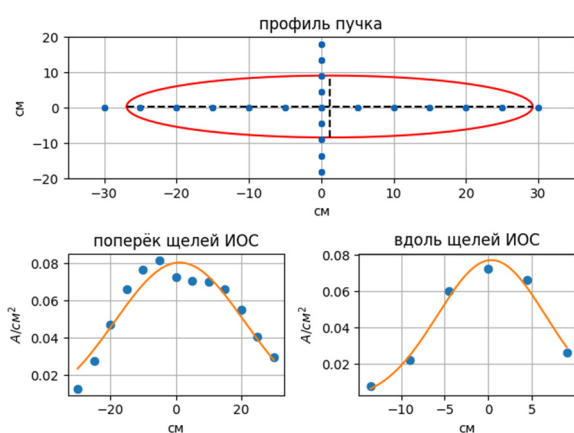


Рисунок 3. Профиль пучка и распределение плотности тока пучка NBI1.

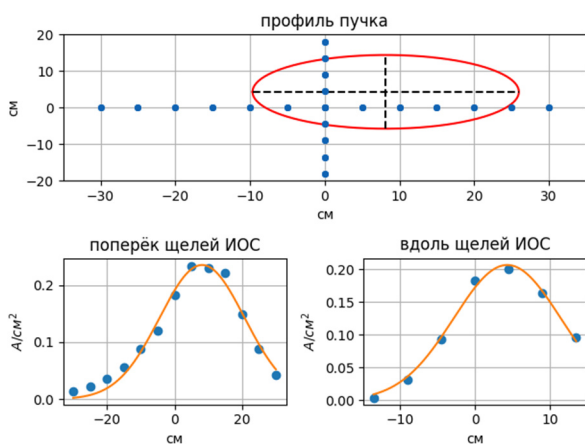


Рисунок 4. Профиль пучка и распределение плотности тока пучка NBI2.



Рисунок 5. (а) – выходной калориметр с массивом вторично-эмиссионных датчиков, (б) – входной калориметр.

Изменение сопротивления проволочного калориметра пропорционально мощности пучка. Для калибровки калориметров был изготовлен стенд, состоящий из конденсаторов, разряжаемых на калориметр и подвергающих его нагрузке, эквивалентной нагрузке пучка. Результаты калибровки показаны на Рис. 6 (а) и 6 (б). По результатам калибровки для входного калориметра получена чувствительность 8,5 МВт·мс/Ом, для выходного – 19 МВт·мс/Ом. Отличие чувствительности входных и выходных калориметров связано с геометрическим фактором.

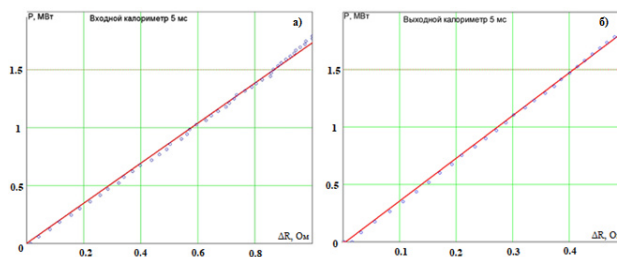


Рисунок 6. Зависимость измеренной мощности пучка от изменения сопротивления калориметра. Точки – результаты измерений, линии – рассчитанная зависимость измеренной мощности от изменения сопротивления калориметра: (а) – для входного калориметра; (б) – для выходного калориметра.

Данные, полученные с калориметров инжекторов NBI1 и NBI2, позволяют оперативно контролировать основные параметры нагревных пучков и эффективность их захвата мишенной плазмой во время рабочего импульса экспериментальной установки.

Магнитные зонды

На установке КОТ разработана, смонтирована и введена в эксплуатацию система магнитных зондов, состоящая из двух отдельных сборок (западная и восточная, названных по стороне расположения), закрепленных вблизи точек остановки ионов компактного плазмоида. Геометрические параметры сборок, расположение датчиков радиальной компоненты электромагнитного поля и обзорная схема расположения приведены на рисунке 7.

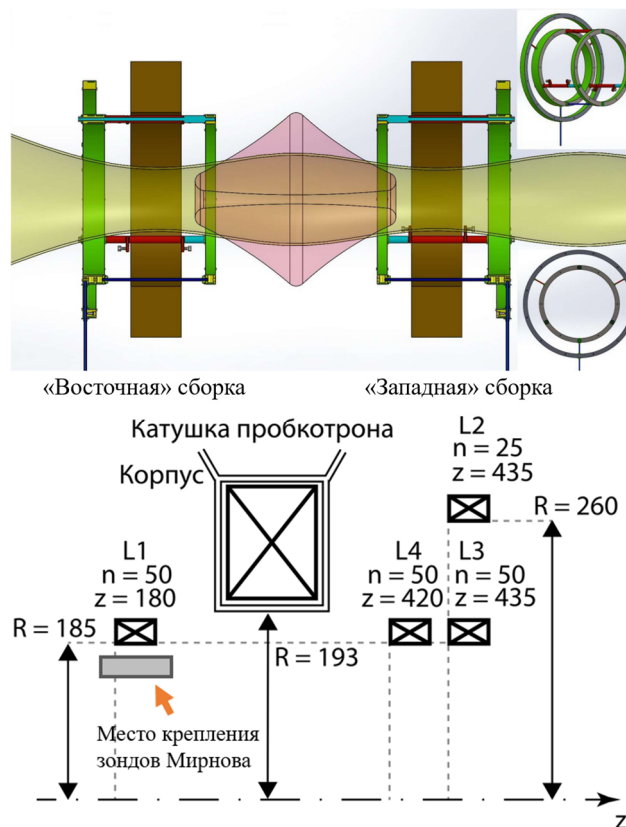


Рисунок 7. Система магнитных зондов установки КОТ.

Каждая сборка состоит из 12 зондов, расположенных эквидистантно на окружности радиусом ~ 185 мм. Количество зондов в сборке позволяет разрешать азимутальные модовые числа $|m| \leq 5$. Каждый зонд является катушкой, намотанной медным проводом ПЭВ2-0,3 на сердечник из полиацетала с внутренним диаметром 40 мм. Зонды восточной сборки имеют $N=100$ витков, зонды западной сборки – $N=4$ витка. От прямого попадания плазмы зонд защищен каркасом из нержавеющей немагнитной стали с радиальным зазором, предотвращающим возникновение вихревых токов. Фото восточной сборки зондов представлено на Рис. 8.

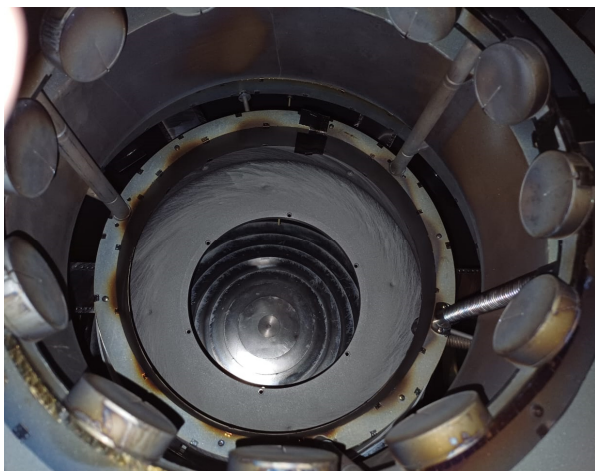


Рисунок 8. Фото установленной восточной сборки в вакуумной камере установки КОТ.

Калибровка зондов производилась при помощи переменного магнитного поля, создаваемого кольцами Гельмгольца. Результатом калибровки является функция отклика $K(f)$, равная отношению измеряемой АЦП амплитуды напряжения к ЭДС $\varepsilon = NS\dot{B}_r$. Графики $K(f)$ для обеих сборок зондов представлены на Рис. 9. Западные зонды способны измерять колебания до 5 МГц по амплитуде и до ~ 8 МГц по фазе сигнала, восточные зонды же – до 800 кГц по амплитуде и ~ 2 МГц по фазе.

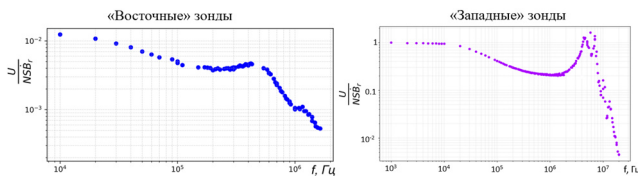


Рисунок 9. Функции отклика магнитных зондов восточной и западной сборки.

Вклад в функцию отклика $K(f)$ вносят два независимых множителя: относительно слабая экранировка поля защитным экраном $K_{screen}(f)$ и АЧХ эквивалентной схемы измерений. Рис. 10 демонстрирует согласованность экспериментальных значений $K_{screen}(f)$ и численного моделирования.

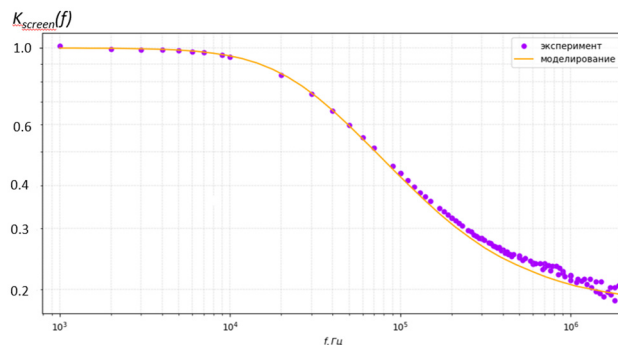


Рисунок 10. Сравнение измеренного коэффициента экранировки защитным экраном с результатами численного моделирования.

Полученный график позволяет заключить, что медленное падение $K(f)$ при $f \sim 10-20$ кГц связано с защитным экраном, в то время как пики на более высоких частотах относятся к резонансам в схеме измерения.

Обработка сигналов с датчиков производилась двумя способами. Первый – двумерное преобразование Фурье по азимутальному углу и по времени вида $B_r(t, \varphi) \rightarrow \hat{B}_r(\omega, m, t_0)e^{im(\varphi-\omega t)}$ со скользящим прямоугольным окном по времени, размер которого выбирается в зависимости от цели эксперимента. Второй – вычисление комплексной функции взаимной когерентности для различных пар сигналов: зондов одной сборки, находящихся напротив друг друга зондов разных сборок, сигналов магнитных зондов и сигналов с тройных ленгмюровских зондов.

Получаемая в результате преобразования Фурье зависимость $|\hat{B}_r(\omega, m, t_0)|$ для удобства восприятия разделяется на отдельные графики для азимутальных модовых чисел $|m| = 0..5$, пример типичного набора таких графиков, построенных на основе данных «хвостовых» зондов в течение одного из выстрелов с ярко выраженными колебаниями, представлен на Рис. 11.

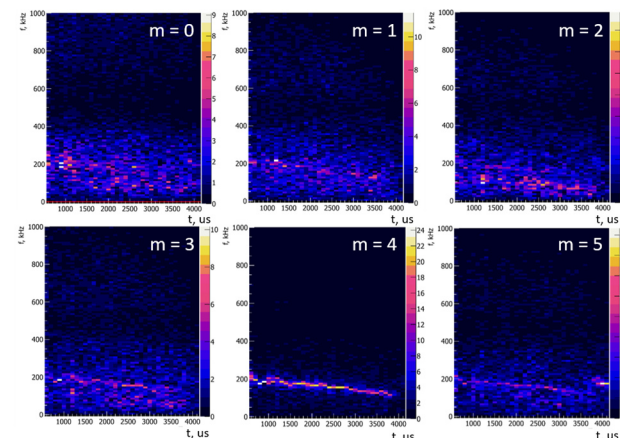


Рисунок 11. Типичная модовая спектрограмма радиальной компоненты диамагнитного поля, зарегистрированная в одном из рабочих выстрелов на установке КОТ.

Наблюдаемые в течение выстрела колебания, меняющие свою частоту (и иногда модовое число) со временем и не приводящие к срыву плазмы, предположительно являются неустойчивостью Кельвина-Гельмгольца, которая развивается благодаря оптимизации генератора плазмы и транспортной секции магнитной системы. Характерная частота неустойчивости Кельвина-Гельмгольца должна быть близка к частоте, определяемой вращением плазмы из-за дрейфа в скрещенных полях. Соответствие частоты наблюдаемых колебаний и частоты вращения, вычисленной независимо, продемонстрировано на Рис. 12. Этот факт говорит об успешном развитии неустойчивости Кельвина-Гельмгольца при работе генератора плазмы кольцевого типа [1].

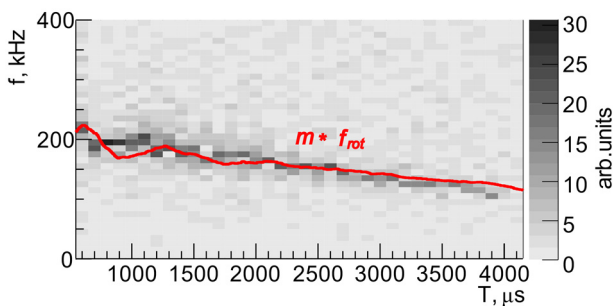


Рисунок 12. Наблюдение магнитными зондами развития неустойчивости Кельвина-Гельмгольца при работе генератора плазмы кольцевого типа.

Недостатком использования преобразования Фурье являются невозможность определить направление движения волны по азимуту. Преимуществами являются простота и быстрота вычисления, построение наглядных графиков для анализа, а также то, что выбор ширины скользящего окна по времени определяется только желаемым разрешением по частоте, что дает возможность видеть быструю динамику развития колебаний.

Второй метод – вычисление комплексной функции когерентности – использовался для определения азимутального модового числа и направления движения по азимуту, а также оценки продольного волнового числа $k_{||}$. На Рис. 13 показаны результаты построения функций комплексной когерентности (под функцией комплексной когерентности $|C|$ понимается нормированная кросс-спектральная плотность, амплитуда которой лежит в интервале $[0, 1]$) для пар сигналов зондов (1, 12), (2, 12), (3, 12) и т. д. до (12, 12). Азимутальный угол 12-го зонда принимается за 0° , строится относительная фаза между сигналами зондов в зависимости от азимутального угла между ними для частот, при которых средняя по всем парам когерентность достигает порогового значения ($|C| \geq 0,9$), то есть для хорошо скоррелированных колебаний. Рис. 14 иллюстрирует направление вращения плазмы в установке и интерпретацию знака модового числа для выбранного направления нумерации зондов. Конкретный знак мо-

дового числа связан с тем, в каком порядке пронумерованы зонды, важность имеет направление относительно вращения плазмы в скрещенных полях E, B.

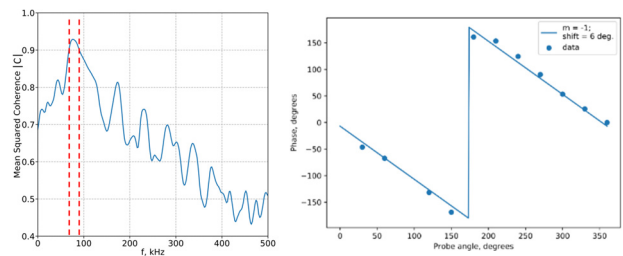
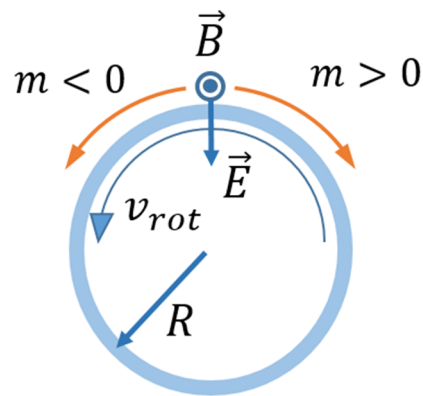


Рисунок 13. Слева: средняя когерентность с выделенным участком $|C| \geq 0,9$, справа: относительные фазы между сигналами в зависимости от азимутального угла для колебаний с $f \sim 83$ кГц с наложением теоретической зависимости при $m = -1$ (вдоль вращения).



$$f_{rot} = \frac{E}{2\pi RB} \approx \frac{U_{arc}}{2\pi R \Delta R \cdot B}$$

Рисунок 14. Связь знака модового числа и направления вращения плазмы.

Второй метод позволяет отделять хорошо скоррелированные сигналы зондов от нескоррелированных помех, позволяет с известной погрешностью определять модовые числа и волновые вектора колебаний, но требует выбора окна преобразования «вручную» для каждого эксперимента, хуже подходит для обзорного наблюдения изменений в составе колебаний и не так нагляден.

Оба метода работают в сочетании друг с другом и позволяют составить более полное представление о развитии колебаний плазмы в установке КОТ.

Список литературы

1. Кабанцев А. А., Таскаев С. Ю. О температуре ионов плазменной струи // Физика плазмы. – 1992. – Т. 18. – С. 635.

МНОГОПРОВОЧНОЕ УДЕРЖАНИЕ ПЛАЗМЫ

Работы на установке ГОЛ-NB

Установка ГОЛ-NB: описание и задачи 2025 г.

Основной научной задачей установки ГОЛ-NB является развитие физики и технологии снижения потерь частиц и энергии из плазмы вдоль магнитного поля за счет применения специальных секций с многопробочным магнитным полем. В случае успеха, такая технология позволит улучшить технико-экономическую привлекательность термоядерных реакторов на основе открытых ловушек. Часто такое поле называется также гофрированным из-за характерной формы силовых линий. Многопробочное магнитное поле имеет три характерных продольных пространственных масштаба: период модуляции поля (длину элементарной ячейки многопробочной ловушки) l , полную длину системы $L = Nl$, где $N \gg 1$ – количество элементарных ячеек в многопробочной системе, и λ – длину свободного пробега ионов плазмы относительно рассеяния на угол порядка единицы. Если плазма является достаточно плотной и выполняется условие соразмерности $\lambda \sim l$, то многопробочная система удерживает плазму наиболее эффективно за счет силы трения, возникающей в каждой ячейке многопробочной системы при столкновениях и обмене импульсом и частицами между популяциями пролетных и локально-запертых частиц. В других терминах то же самое условие можно переписать как $v^* = l/\lambda \sim 1$, где v^* – безразмерная частота столкновений. В двух других предельных случаях, $v^* \ll 1$ и $v^* \gg 1$, многопробочное поле слабо тормозит расширение плазмы.

Установка ГОЛ-NB имеет конфигурацию, моделирующую при сниженных параметрах плазмы конфигурацию установки реакторного класса с центральной ловушкой газодинамического типа и присоединенными к ней секциями с сильным магнитным полем, которые могут включаться как в конфигурации длинного соленоида, так и в многопробочной конфигурации с $N = 13$ с максимальной индукцией $B_{\max} = 4,5$ Тл. Плазма нагревается двумя пучками атомов водорода с энергией 25 кэВ и суммарной мощностью ≈ 1 МВт.

Важной физической задачей проекта ГОЛ-NB является прямое сравнение параметров плазмы в ловушке в соленоидальной и многопробочной конфигурациях. Параметры установки были выбраны так, что условие $l \sim \lambda$ выполняется при плотности $n \approx 3 \times 10^{19} \text{ м}^{-3}$ и температуре ионов $T_i \approx 30$ эВ. В конце 2020 г. установка была собрана в полной проектной конфигурации. Основными задачами работ в 2025 г. являлись уменьшение поперечных потерь быстрых ионов из плазмы, изучение физики накопления плазмы в центральной ловушке, развитие методов нагрева плазмы электронным пучком низкой энергии и электромагнитными волнами в диапазоне ионного циклотронного резонанса.

Уменьшение роли перезарядных потерь в ГОЛ-NB

Важным механизмом, который может существенно влиять на энергобаланс плазмы в открытых ловушках, является перезарядка захваченных в плазму быстрых ионов на нейтральном водороде. Этот процесс приводит к потере быстрых ионов и, соответственно, уменьшению эффективности нагрева плазмы. В первых экспериментах на установке ГОЛ-NB было обнаружено, что доля мощности, теряемая из-за перезарядки, превышает 80% от мощности, вводимой в плазму системой нейтральной инжекции. Обнаружение столь больших перезарядных потерь послужило мотивацией создания системы титанирования поверхности вакуумной камеры на основе дуговых распылителей титана. Данная работа была проведена при экспертной и технической помощи сотрудников Лаб. 9-1. После введения процедуры титанирования стенок центральной ловушки в качестве стандартной процедуры, вакуумные условия во время проведения экспериментов существенно улучшились, что привело в результате к заметному росту температуры плазмы при фиксированных остальных параметрах эксперимента.

На Рис. 1 приведены два энергетических спектра быстрых атомов водорода, покидающих ловушку поперек магнитного поля (нейтралов перезарядки), для экспериментов NB8598 (до начала работы системы титанирования) и NB10594 (после внедрения титанирования в стандартный режим работы установки).

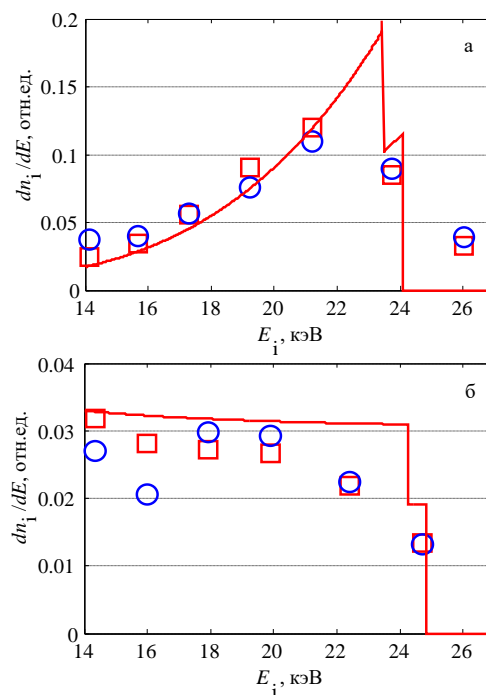


Рисунок 1. Функция распределения быстрых ионов в плазме: а – эксперимент NB8598 (до начала титанирования), б – эксперимент NB10594 (с регулярным титанированием). Линии – восстановленная функция распределения, красные квадраты – расчётные отклики каналов анализатора, синие кружки – измеренные сигналы в каналах анализатора. Ускоряющие напряжения инжекторов несколько отличаются.

Для интерпретации результатов использовалась модель, учитывающая два основных процесса: торможение ионов за счет столкновений с электронами плазмы и потерю ионов вследствие резонансной перезарядки на нейтральном водороде. Анализ динамики функции распределения быстрых нейтралов после выключения инжекции позволяет также определить среднюю концентрацию электронов $\langle n_e \rangle$ и среднюю концентрацию нейтрального водорода $\langle n_{H_2} \rangle$, которые равны $n_{H_2} = (85 \pm 7) \times 10^{16} \text{ м}^{-3}$ и $n_e = (1,7 \pm 0,2) \times 10^{19} \text{ м}^{-3}$ для NB8598 до начала титанирования и $n_{H_2} = (3,5 \pm 0,3) \times 10^{16} \text{ м}^{-3}$ и $n_e = (1,3 \pm 0,3) \times 10^{19} \text{ м}^{-3}$ для NB10594 с регулярным титанированием. Интегрирование полученной функции распределения позволяет найти долю мощности, передаваемой от популяции быстрых ионов электронам плазмы $P_{\text{drag}}/P_{\Sigma}$. Для приведенных экспериментов эти величины составили соответственно 16% и 61%.

Таким образом, снижение потерь на перезарядку быстрых ионов позволило почти в 4 раза увеличить мощность, непосредственно идущую на нагрев плазмы. В новых условиях электронная температура плазмы увеличилась с исходных ≈ 15 эВ до ≈ 25 эВ.

Накопление плазмы в центральной ловушке

Одной из основных целей экспериментов в 2025 году было более детальное изучение динамики накопления и распада плазмы в центральной ловушке. С этой целью была проведена длительная серия экспериментов в одном и том же режиме работы установки. Сценарий эксперимента приведен на Рис. 2. Старт нагревных нейтральных пучков производился одновременно с включением плазменной пушки в $t = 0$, длительность инжекции была 4 мс. Всего программа измерений включала около 250 экспериментов, принятых для последующей обработки.

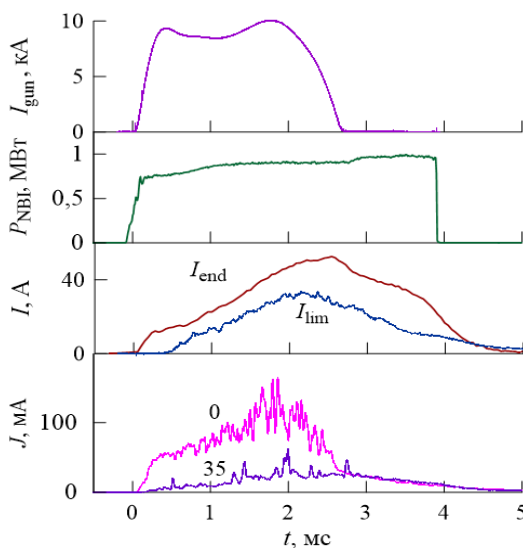


Рисунок 2. Динамика сигналов в базовом сценарии работы установки, сверху вниз: ток плазменной пушки, мощность нейтральной инжекции, токи на лимитеры I_{lim} и на выходной плазмодриемник I_{end} , токи насыщения двойного зонда на координате $z = 0,86$ м на радиусах 0 и 35 мм.

Сигналы различных диагностик демонстрируют существование двух фаз протекания плазменного разряда. При $0 < t < 2,7$ мс наблюдается значительное отличие плотности на оси и в области гало (см. напр., Рис. 3). При этом после $t \approx 2$ мс плотность на оси начинает снижаться, а в области гало еще продолжает расти. После $t \approx 2,7$ мс радиальный профиль плотности становится более плоским. Следует также отметить существенно разный характер флуктуаций плотности на стадиях накопления и распада плазмы, уровень флуктуации существенно выше во время работы плазменной пушки.

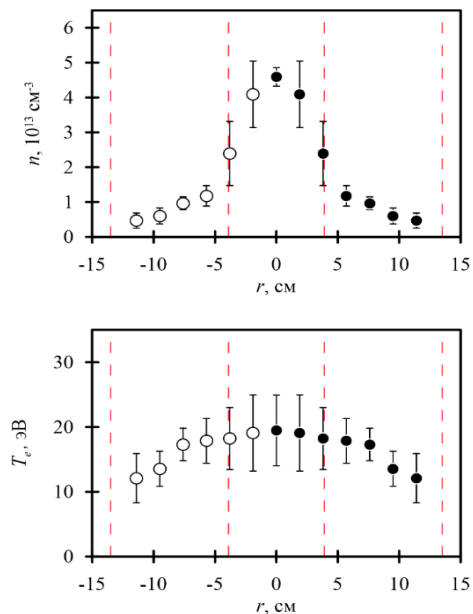


Рисунок 3. Радиальные профили плотности (вверху) и электронной температуры (внизу) по томсоновскому рассеянию для $t = 2,2$ мс, усредненные по серии экспериментов. Сплошные точки – измеренные значения, кружки – симметризованные точки для лучшей визуализации результата. Вертикальные линии: проекция края анода плазменной пушки на $\pm 3,9$ см, проекция лимитера на $\pm 13,5$ см.

В ходе данных экспериментов была измерена не только динамика радиальных профилей параметров плазмы в центральной ловушке, но и радиальные профили плотности, температуры и числа Маха для плазмы в секциях сильного поля с двух сторон от центральной ловушки. Знание динамики потоков частиц позволяет определить величину эффективного коэффициента поперечной диффузии. Работа по обработке экспериментальной информации продолжается.

Электронный пучок низкой энергии

Одной из важных задач развития установки ГОЛ-NB является разработка способов дополнительного нагрева плазмы, которые были бы эффективны на стадии удержания, когда плазменная пушка отключена и плотность плазмы постепенно уменьшается. Нагрев нейтральными пучками в этих условиях становится малоэффективным.

На установке был разработан и смонтирован эмиттер электронного пучка низкой энергии с термокатодом LaB_6 диаметром 50 мм, анодом которого служит ленгмюровский слой плазменного потока, вытекающего из ловушки. В таком источнике электронный пучок может генерировать только во время существования плазмы. Получена устойчивая генерация электронного пучка с током до 100 А при напряжении на катоде до 400 В (Рис. 4) при длительности, превышающей длительность как работы плазменной пушки, так и длительность инъекции нейтральных пучков.

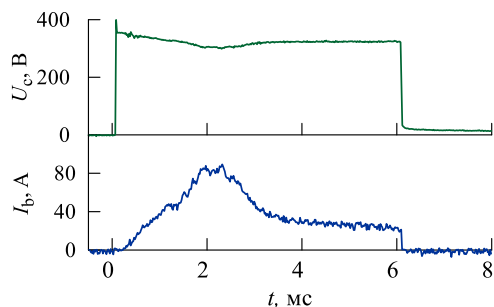


Рисунок 4. Напряжение на катоде и ток электронного пучка в системе с плазменным анодом.

Пучок возникает при появлении плазмы вблизи термокатада, его ток определяется локальной плотностью плазмы. Воздействие такого электронного пучка на плазму привело к улучшению удержания частиц в ловушке и к росту электронной температуры плазмы с 25 до 45 эВ в приосевой области при плотности $\approx 10^{19} \text{ м}^{-3}$ на стадии распада плазмы (Рис. 5). Это обстоятельство мотивирует продолжать работы по данной тематике, поскольку мощность электронного пучка (менее 40 кВт) существенно меньше мощности нагревных нейтральных пучков (1 МВт).

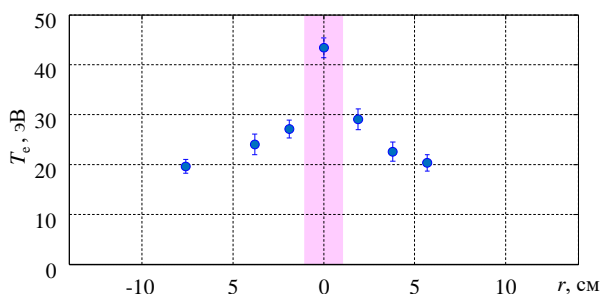


Рисунок 5. Радиальный профиль электронной температуры плазмы в момент $t = 2,9$ мс. Цветной заливкой показано сечение пучка.

Подготовка системы ВЧ-нагрева в диапазоне ИЦР

Второй разрабатываемой системой дополнительного нагрева плазмы на ГОЛ-НВ является ввод электромагнитного излучения в ионно-циклотронном диапазоне частот по схеме «магнитного берега». Из-за особенностей тензора диэлектрической проницаемости анизотропной плазмы, непосредственно поглотить в плазме энергию волны с резонансной ионно-циклотронной ча-

стойкой не удастся. Поэтому в схеме «магнитного берега» возбуждается альфвеновская волна в точке с более сильным полем с частотой, меньшей локальной ионно-циклотронной частоты. Далее эта волна переносит энергию в область ионного циклотронного резонанса и там поглощается.

В отчетном периоде были проведены подготовительные работы и эксперименты с вводом в центральную ловушку электромагнитного излучения с частотой 13,56 МГц (резонансное поле 0,89 Тл) при мощности до 12 кВт. Эксперименты включали в себя серии с измерением распределения высокочастотного магнитного поля в плазме и поиском влияния ввода высокочастотной мощности на плазму в различных режимах.

Было проведено измерение динамики комплексного сопротивления установленной в центральной ловушке антенны для запуска альфвеновской волны в эксперименте с плазмой для различных режимов работы установки. Использовался промышленный генератор COMDEL CXH25K, имеющий $R_{\text{вых}} = 50$ Ом. Согласующее устройство построено по П-образной схеме. Оно должно обеспечивать снижение отраженной мощности ниже порога срабатывания защиты генератора во всем диапазоне изменения импеданса плазменной нагрузки, включая вакуумный случай. Пробов антенны при работе с плазмой не наблюдалось — см. Рис. 6.

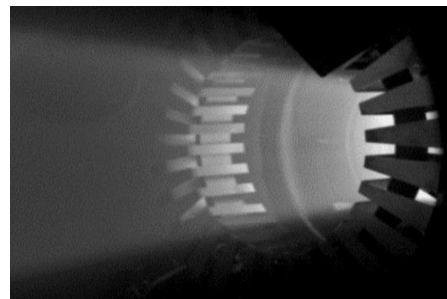


Рисунок 6. Фотография антенны в собственном свечении плазмы.

Один из результатов экспериментов представлен на Рис. 7. Видно, что ввод электромагнитного излучения в плазму оказывает влияние на динамику радиального электрического поля на ее границе. В экспериментах с мощностью 7 кВт радиальное электрическое поле не меняет знак после завершения работы нагревных инжекторов. На мощности 12 кВт также наблюдается эффект поддержания полярности радиального электрического поля при наличии ВЧ, однако он выражен слабее и поле меняет знак после завершения инъекции нейтральных пучков.

Основным результатом работ по данной теме явилась демонстрация безаварийной работы антенны при мощности масштаба 10 кВт, что дает основания для разработки системы ВЧ-нагрева с мощностью до 300 кВт, использование которой должно привести к значительному увеличению ионной температуры и к достижению параметров плазмы, оптимальных для ее удержания в многопробочном магнитном поле.

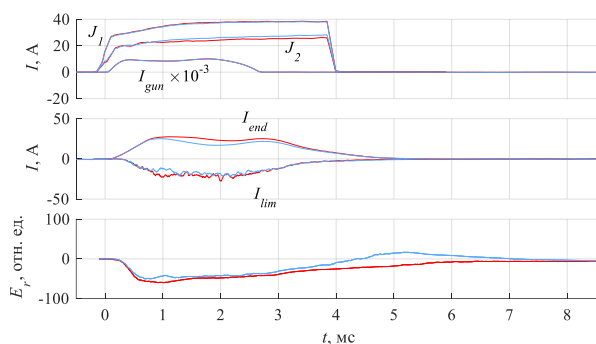


Рисунок 7. Типичные сигналы в экспериментах с вводом электромагнитного излучения, мощность нейтральной инжекции 1 МВт, мощность ВЧ 7 кВт. Красные линии соответствуют выстрелам с вводом ВЧ-мощности, синие – контрольные без ВЧ.

Заключение по работам на установке ГОЛ-NB

В экспериментальном сезоне 2025 года установка ГОЛ-NB работала в конфигурации ловушки с длинными магнитными пробками (секции сильного поля были включены в соленоидальной конфигурации). Основными задачами работ были: уменьшение поперечных потерь быстрых ионов из плазмы за счет улучшения вакуумных условий и снижения рециклинга, изучение физики накопления плазмы в центральной ловушке, развитие методов нагрева плазмы электронным пучком низкой энергии и электромагнитными волнами в диапазоне ионного циклотронного резонанса.

Полученные результаты в целом соответствуют ожидаемому. Улучшение вакуумных условий привело к росту электронной температуры плазмы с 15 до 25 эВ на стадии удержания. При инжекции электронного пучка низкой энергии в приосевой области наблюдалась электронная температура до 45 эВ. Эксперименты с вводом ВЧ-мощности в целом подтвердили правильность принятых технических решений.

Работы на установке СМОЛА

Для улучшения энергетического времени жизни плазмы и повышения термоядерной эффективности открытых ловушек следующего поколения был предложен метод увеличения эффективности многопробочного удержания за счёт вращения плазменного шнура в многопробочном поле с винтовой симметрией магнитного поля. Ключевыми особенностями экспериментов в поддержку проекта ГДМЛ должны являться схожесть магнитных конфигураций, стационарность и близкие значения требуемых безразмерных параметров эксперимента. Экспериментальное исследование винтового удержания ведется в ИЯФ СО РАН на установке СМОЛА. (См. Рис. 8). В установке создавалась плазма плотностью $n = (0,3-6) \cdot 10^{18} \text{ м}^{-3}$ с температурой электронов до $T_e = 30 \text{ эВ}$ и ионов до $T_i = 7 \text{ эВ}$.

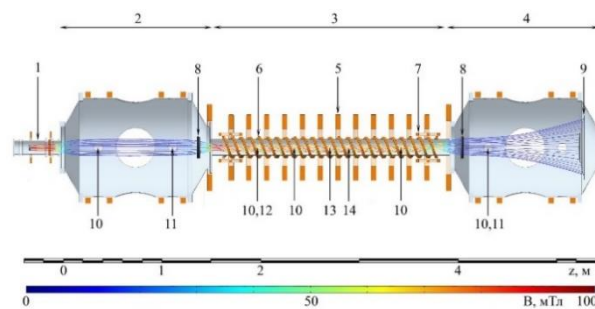


Рисунок 8. Схема установки СМОЛА с используемыми диагностиками. 1 — источник плазмы, 2 — область удержания плазмы, 3 — транспортная секция с винтовым магнитным полем, 4 — выходной расширитель, 5 — соленоид прямого поля, 6 — винтовые обмотки, 7 — катушки коррекции, 8 — лимитеры, 9 — плазмоприёмник, 10 — зондовые модули, 11 — спектрометры с пространственным разрешением, 12 — детектор ультрафиолетового излучения, 13 — блок магнитных диагностик, 14 — СВЧ-интерферометр.

Параметры удержания плазмы от пробочного отношения короткой пробки

Одной из ключевых особенностей современных проектов открытых ловушек является использование сильных магнитных пробок на основе высокотемпературных сверхпроводников с индукцией на оси вакуумной камеры до $B \sim 20 \text{ Тл}$.

Использование винтовых секций в подобной ловушке имеет смысл, если комбинация пробок обеспечивает меньший уровень потерь, чем каждый из методов, применённый по отдельности. Ожидаемое эффективное пробочное отношение лежит в пределах

Ожидаемое эффективное пробочное отношение лежит в пределах

$$\max[R_i] \leq R_{\text{eff}} \leq \prod R_i$$

где R_i — эффективное пробочное отношение i -й составляющей части системы.

Ранее было показано, что магнитная конфигурация с винтовым полем и сильной пробкой обеспечивает лучшее удержание, чем каждый из методов по отдельности.

В последних экспериментах пробочное отношение на входе в транспортную секцию R_1 и на выходе из неё R_2 варьировалось в диапазоне от 1,0 до 2,1, где $R_i = 1$ соответствует равенству ведущих магнитных полей в средней части транспортной секции и на её краю. Примеры продольных распределений ведущего магнитного поля показаны на Рис. 9.

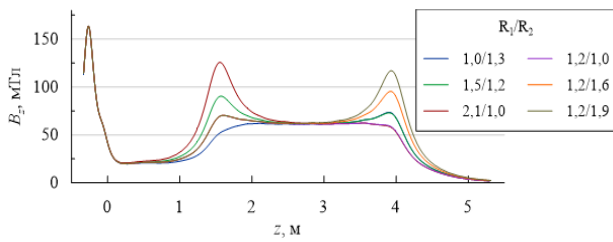


Рисунок 9. Примеры продольных распределений ведущего магнитного поля при различных пробочных отношениях на входе в транспортную секцию и на выходе из неё.

В обсуждаемых экспериментах скорость вращения плазмы, а, следовательно, и продольная скорость магнитных возмущений, была целенаправленно снижена. При этом, в зависимости от пробочного отношения на входе в транспортную секцию, захваченные многопробочной секцией частицы могут оказываться как в конусе потерь короткой пробки, так и вне его. Эффективное пробочное отношение всей системы вследствие малой скорости вращения в большинстве разрядов лежало в диапазоне $R_{eff} = 3-10$.

Угловая скорость вращения плазмы в представленной экспериментальной серии варьировалась в диапазоне $\omega = (2-5) \cdot 10^5 \text{ c}^{-1}$, ионная температура в центре плазменного шнура составляла $T_i = 4 \pm 0,5 \text{ эВ}$. Максимальная линейная скорость достигается при дополнительной пробке на входе в транспортную секцию и ставится равной $V = 3 \cdot 10^6 \text{ см/с}$.

Максимальная скорость была достигнута при соотношении полей $R_2/R_1 = 2$ и составляла $\omega = (3 \pm 0,4) \cdot 10^5 \text{ c}^{-1}$. Ионная температура в различных магнитных конфигурациях изменялась слабо. Скорости вращения периферии не были ограничены ионно-звуковой скоростью, равной $c_s \sim 5 \cdot 10^6 \text{ см/с}$.

Для указанных выше характерных значений тепловой скорости ионов и продольной скорости магнитных возмущений пороговое значение пробочного отношения на входе в транспортную секцию составляет $R_{1,max} \sim 1,15-1,2$.

На Рис. 10 представлена зависимость эффективного пробочного отношения R_{eff} от произведения $3 \cdot R_1 \cdot R_2$. Множитель 3 отвечает пробочному отношению между областью удержания и средней частью транспортной секции. Экспериментальные точки лежат на прямой $x = y$ или несколько выше неё, что отвечает ожидаемому результату.

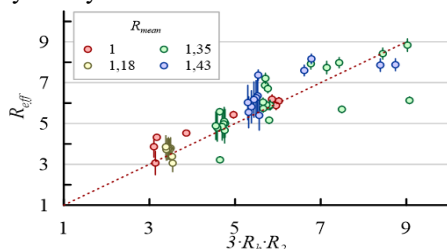


Рисунок 10. Сопоставление расчётного и экспериментально определённого эффективного пробочного отношения без учёта расчётной эффективности пробки на входе в транспортную секцию.

Для выделения эффекта входной пробки построим величину $R_{eff} / (R_1 \cdot R_2)$. В соответствии с исходными предположениями, она должна равняться $\min(R_1, R_1, max)$. Зависимость данной величины от пробочного отношения R_1 показана на Рис. 11. Пунктирной линией показано среднее пороговое значение $R_{1,max}$.

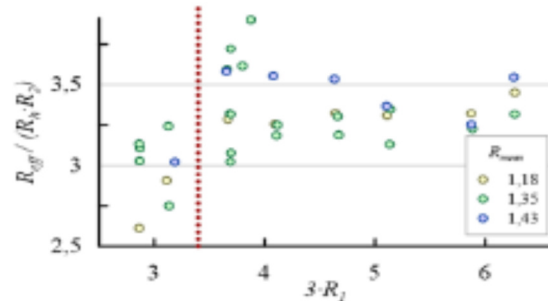


Рисунок 11. Вклад пробки на входе в транспортную секцию в эффективность удержания.

В соответствии с ожидаемым, вклад пробки на входе в суммарную эффективность удержания постоянен при $R_1 > R_{1,max}$ и превышает аналогичный вклад для области $R_1 < R_{1,max}$.

Высокая тепловая скорость ионов в проектируемой установке ГДМЛ приводит к крайне низким пороговым значениям $R_{1,max}$. По этой причине при формулировании требований к винтовой пробочной секции ГДМЛ предполагается, что она должна располагаться между областью удержания и сильной пробкой (режим «пробки на выходе»). В этом случае возникает ограничение только на минимальное магнитное поле, которое должно превышать поле в точке остановки быстрых ионов. При средней по сечению глубине гофрировки $R_{mean} = 1,5-2$ и магнитном поле в точке остановки до 3 Тл это требование означает, что ведущее магнитное поле в многопробочной секции может составлять $B_z > 4,5-6 \text{ Тл}$.

Следующие этапы предполагают проведение экспериментов с более высокой угловой скоростью вращения плазмы, соответствующих $R_{1,max} > 2$. Для достижения подобного пробочного отношения предполагается использовать отдельную секцию магнитовакуумной системы с пробочной катушкой, максимально приближенной к стенке вакуумной камеры.

Модернизация установки СМОЛА для проведения экспериментов следующего поколения

В 2025 году установка СМОЛА была существенно модернизирована. Модернизированная установка, обозначаемая как СМОЛА*, должна обладать следующими особенностями:

- использование двух зеркально-симметричных винтовых пробок. Шаг винтовой обмотки модернизированной установки для совместимости с существующими элементами принят неизменным и равен $h = 18 \text{ см}$. Габаритные ограничения установки позволяют применить две симметричные винтовые пробки с суммарным числом периодов $2 \times N = 2 \times 8$;
- наличие специализированной секции области удержания. Область удержания имеет длину 1200 мм и

состоит из диагностического модуля с индукцией до $B_z = 75$ мТл и модуля ввода ВЧ-мощности для ИЦР-нагрева с индукцией до $B_z = 120$ мТл.

— наличие специализированных коротких пробочных модулей, которые могут быть установлены как между областью удержания и транспортной секцией, так и на выходе из транспортной секции.

Схемы текущей и целевой конфигурации установки показаны на Рис. 12.

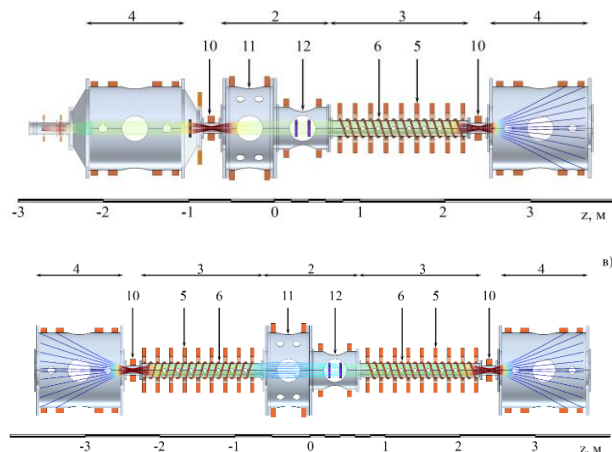


Рисунок 12. Схема установки СМОЛА*. Вверху - промежуточная, внизу - целевая конфигурация. 1 — Источник плазмы, 2 — область удержания плазмы, 3 — транспортная секция с винтовым магнитным полем, 4 — выходной расширитель, 5 — соленоид прямого поля, 6 — винтовые обмотки, 7 — катушки коррекции, 8 — лимитеры, 9 — секционированный плазмодриёмник, 10 — пробочные катушки, 11 — диагностический модуль, 12 — секция ввода ВЧ-мощности.

Существенную роль в работе многопробочного удержания играет рассеяние ионов по углу. Классическая теория многопробочного удержания предполагает, что многопробочная секция эффективна только в случае соразмерности периода модуляции магнитного поля и длины свободного пробега частиц. Поскольку продольные потери являются доминирующими, то улучшение времени жизни плазмы в многопробочных секциях ожидается при развитии в плазме турбулентности любого типа.

Основной целью экспериментов в новой конфигурации будет достижение максимальной эффективности удержания частиц и энергии многопробочным магнитным полем с винтовой симметрией в слабостолкновительном режиме. Для ГДМЛ характерны значения безразмерной кулоновской столкновительности $\nu^* \sim 1/400$. Для снижения кулоновской столкновительности в модельном эксперименте при сохранении приемлемой плотности плазмы необходимо повышение ионной температуры. Безразмерная столкновительность $\nu^* < 1/400$ — при плотности плазмы $n = 0,5 \cdot 10^{18} \text{ м}^{-3}$ и температуре $T_i > 50$ эВ.

При параметрах установки СМОЛА* эффективным способом дополнительного нагрева ионов является ввод ВЧ-мощности на частотах вблизи ионного цикло-

тронного резонанса. В интересующем диапазоне параметров используется нагрев по методу «магнитного берега».

На данном этапе реализована промежуточная конфигурация установки, позволяющая реализовать дополнительный ИЦР-нагрев ионов и оптимизировать его параметры для достижения безразмерной столкновительности $\nu^* \leq 0,05$.

Магнитная система секции ввода ВЧ-мощности установки СМОЛА*

Секция ввода ВЧ-мощности представляет собой вакуумную камеру с катушками магнитного поля, оснащённую антенным узлом. (См. Рис. 13).

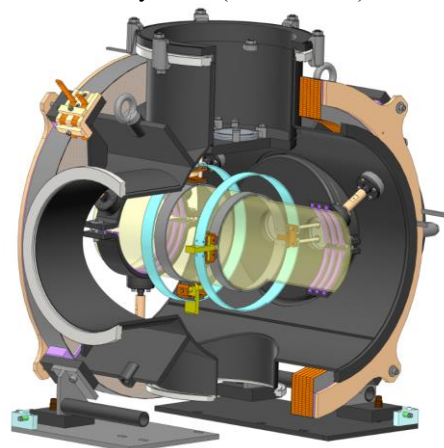


Рисунок 13. Секция ввода ВЧ-мощности. 1 — вакуумная камера, 2 — катушки магнитной системы, 3 — двухполувитковые антенны, 4 — кварцевая разделительная труба.

Длина вакуумной камеры составляет $l = 600$ мм, диаметр 500 мм. Камера имеет четыре боковых порта для установки диагностик и токовыводов.

Внутри камеры монтируются две молибденовые антенны типа double half turn для ввода до 60 кВт ВЧ-мощности на частоте 0,6–2,3 МГц. Антенны отделяются от плазмы кварцевой трубой диаметром 192 мм.

Две зеркально-симметричные секции винтового магнитного поля представляют собой вакуумные камеры с интегрированными спиральными обмотками. Каждая из секций винтового магнитного поля имеет 14 горизонтальных и 5 вертикальных диагностических портов.

Основные спиральные обмотки имеет период $h = 180$ мм, периодов на полной длине камеры — $N = 8$. В четырёх периодах, удалённых от центральной ловушки, поверх основной спиральной обмотки выполнена дополнительная обмотка с числом периодов $N = 4$ тем же шагом спирали.

Увеличение внутреннего диаметра камеры до $d = 180$ мм позволяет повысить значение средней глубины гофрировки R_{mean} до $\sim 1,75$ – $1,85$ при сохранении расстояния около $\delta \sim 15$ мм между границей плазменного шнура и стенкой вакуумной камеры. (См. рис. 14). Ис-

пользование дополнительной обмотки позволяет компенсировать снижение глубины гофрировки при уменьшении среднего радиуса плазменного шнура.

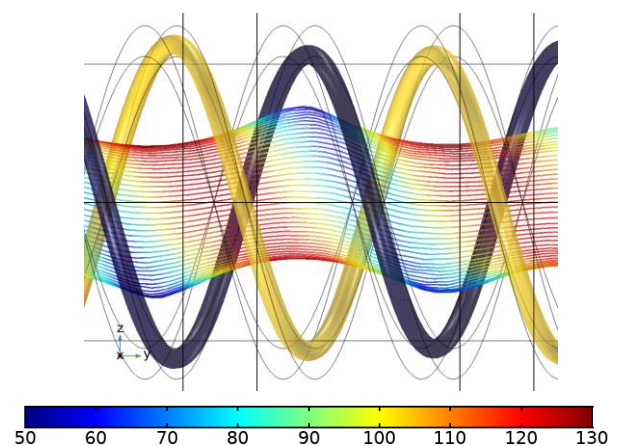


Рисунок 14. Распределение магнитной индукции винтового магнитного поля на границе силовой трубки с радиусом 45 мм. Показаны два периода винтового поля. Жёлтым и тёмно-синим обозначены средние линии тока в винтовых обмотках.

Первая плазма на установке СМОЛА*

Установка СМОЛА* смонтирована в промежуточной конфигурации для дальнейших экспериментов по удержанию плазмы в винтовой ловушке с дополнительным нагревом. В установке получена предварительная плазма. Общий вид установки и фотографии предварительной плазмы показаны на Рис. 15.

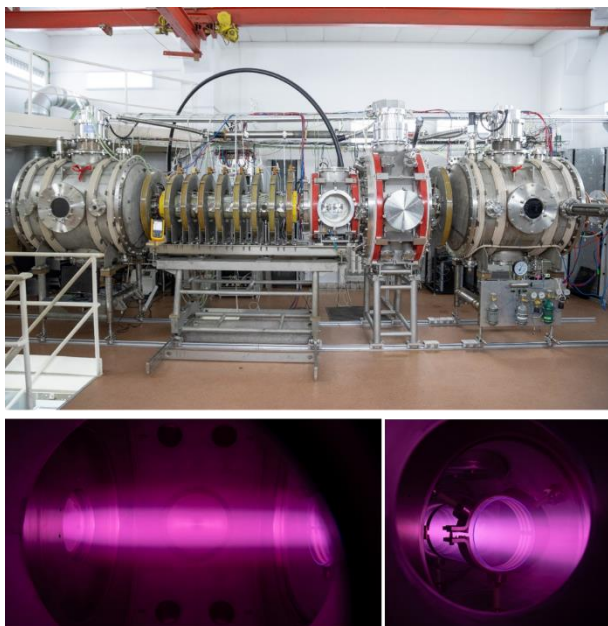


Рисунок 15. Сверху — фотография общего вида установки СМОЛА* в промежуточной конфигурации, снизу — фотографии предварительной плазмы в центральной ловушке (слева) и в области ВЧ-антенн (справа).

Заключение по работам на установке СМОЛА

В результате работ по данной части плана НИР в ходе этапа 2025 г. была получена информация о течении плазмы в винтовой многопробочной секции в комбинации с короткой пробкой при пробочном отношении в диапазоне $R = 1-2$. Показано, что в данном диапазоне параметров эффективное пробочное отношение комбинации винтовой многопробочной секции и коротких пробок равно произведению пробочных отношений отдельных элементов; при этом винтовая многопробочная секция не ограничивает пробочное отношение для пробки на выходе и задаёт предельно допустимое пробочное отношение пробки на входе. Полученные зависимости были использованы для предварительного рассмотрения и моделирования многопробочных секций открытой ловушки ГДМЛ.

Магнитная система установки подготовлена к экспериментам следующего этапа выполнения проекта. Локальное пробочное отношение в короткой пробке может достигать $R_l \sim 5$.

Промежуточная конфигурация установки СМОЛА* с секцией ввода ВЧ-мощности для ИЦР-нагрева собрана. Получена первая плазма.

ГЕНЕРАЦИЯ ПОТОКОВ ММ- И СУБММ- ИЗЛУЧЕНИЯ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ КИЛОАМПЕРНЫХ ПУЧКОВ МЭВ-НЫХ ЭЛЕКТРОНОВ

В настоящее время в ИЯФ СО РАН продолжают исследования по генерации мощных импульсных (~10-100 МВт, ~ 0,1-1 нс) потоков миллиметрового и субмиллиметрового излучения в рамках физических механизмов накачки электромагнитных колебаний в замагниченной плазме, или в вакуумной пространственно развитой электродинамической системе с помощью сильноточных релятивистских электронных пучков (РЭП). Используются пучки с током единицы-десятки килоампер, формируемые на ускорителях прямого действия У-2 и У-3 в магнитно-изолированных диодах при напряжении ~ 1 МВ. Экспериментальные исследования по направлению накачки ЭМ-колебаний в пучково-плазменной системе проводятся на установке ГОЛ-ПЭТ при инжекции электронного пучка из ускорителя У-2 (ток до 20 кА, энергия электронов до 1 МэВ, длительность до 7 нс) в замагниченный (индукция магнитного поля ~ 4 Тл) плазменный столб с плотностью до $4 \cdot 10^{15} \text{ см}^{-3}$. В этих условиях генерируется мощный (~ 10 МВт) поток широкополосного излучения в области частот 0,1–0,6 ТГц, спектр которого зависит от плотности плазмы и индукции магнитного поля. В свою очередь, физические механизмы генерации потока ЭМ-излучения в вакуумной электродинамической системе изучаются в ИЯФ на установке ЭЛМИ, где в планарном лазере на свободных электронах используется пучок с ленточным сечением (0,4×18 см), формируемый на ускорителе У-3 со следующими параметрами: ток 2-7 кА, энергия электронов 0.8-1 МэВ, длительность 5 - 7 нс. Благодаря использованию в электродинамической системе такого генератора пространственно распределённой обратной связи, в нём достигается генерация мультимегаваттного потока излучения миллиметрового диапазона (4-х мм) с узкой спектральной линией.

Генерация субмиллиметрового излучения при релаксации килоамперного РЭП в замагниченном плазменном шнуре

Введение

На установке ГОЛ-ПЭТ ведутся исследования взаимодействия сильноточных пучков электронов с плазмой. В настоящее время фокус этих исследований направлен на изучение механизма формирования направленных потоков излучения мульти-мегаваттного уровня мощности в субтерагерцовом диапазоне частот.

Ранее в экспериментах была показана возможность генерации в пучково-плазменной системе микросекундных импульсов излучения с энергосодержанием в импульсе масштаба 10 Дж. Тем не менее, область наибольшей спектральной плотности мощности излучения соответствовала диапазону 0.15-0.25 ТГц.

Поэтому в 2024 году с целью увеличить основную частоты в потоке генерируемого излучения и расширения частотной области, в которой возможна генерация излучения, научным коллективом было принято решение провести модернизацию системы формирования плазменного разряда.

В прошлом году была проведена доработка системы формирования плазменного разряда, с тем чтобы обеспечить формирование тонкого плазменного шнура с концентрацией масштаба 10^{14} см^{-3} в плазменном разряде и масштаба $(2-5)10^{15} \text{ см}^{-3}$ при инжекции РЭП в плазму. В настоящее время продолжают исследования, направленные доработку системы высоковольтного разряда и отработку сценария формирования плазмы.

Формирование тонкого плазменного шнура и регистрация динамики нейтрализации проходящего по нему сильноточного РЭП

В рамках решения задачи формирования тонкого плазменного шнура с высоким уровнем концентрации была реализована новая конфигурация системы создания плазменного разряда на основе инициации высоковольтного пробоя. С ее использованием была проведена серия экспериментов, посвященная исследованию динамики процессов нейтрализации релятивистского электронного пучка с током масштаба десятка килоампер и длительностью в несколько микросекунд при его инжекции в плазменный шнур. Эти эксперименты осуществлены при длительности фронта импульса тока пучка масштаба 0.1 нс при длительности импульса по основанию около 5-ти нс, в условиях ведущего магнитного поля 4 Тл, диаметре пучка 20 мм и диаметре плазменного шнура 40 мм. Протяженность шнура составляла около 40 см. Схема экспериментов по созданию плазменного шнура, предназначенного для инжекции килоамперного пучка релятивистских электронов на установке ГОЛ-ПЭТ, представлена на рисунке 1.

В этих экспериментах плазменный шнур создаётся сильноточным высоковольтным разрядом в кварцевой трубке в условиях быстрого напуска водорода через специальные коаксиальные щелевые сопла. Сопла вмонтированы в кольцевые электроды, устанавливаемые по концам кварцевой трубки, внутренний диаметр которой составляет 40 мм. Подача водорода от импульсных клапанов в щелевые сопла осуществляется по подводным трубкам. Заполнение трубки водородом происходит распространяющимися навстречу друг другу сверхзвуковыми потоками газа, выходящими из этих сопел.

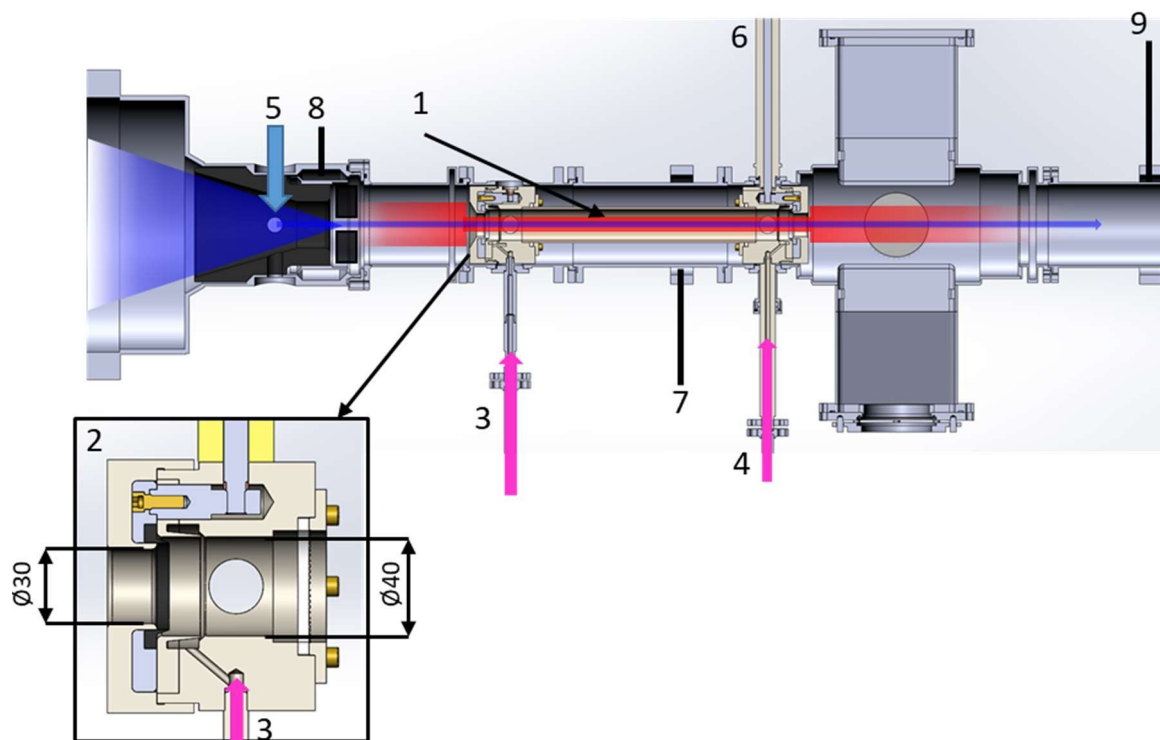


Рисунок 1. Схема эксперимента на установке ГОЛ-ПЭТ: 1 – плазменный шнур, 2 – блок с кольцевым электродом и щелевым соплом для подачи водорода в трубку, 3 – импульсный клапан для подачи водорода в кварцевую трубку со стороны диода ускорителя, 4 – импульсный клапан для подачи водорода в кварцевую трубку со стороны узла вывода излучения, 5 – подача криптона в область сжатия сечения пучка, 6 – подвод напряжения на потенциальный электрод, 7 – регистратор тока I_{tub} в полости трубки, 8 – регистратор тока I_{entr} на входе в трубку, 9 – регистратор тока I_{exit} на выходе из трубки

Дополнительно предусмотрен импульсный напуск тяжёлого газа (криптона) в область сжатия сечения пучка релятивистских электронов. Этот газ позволяет как обеспечить нейтрализацию по заряду электронов в области сжатия, так и препятствует распространению потоков атомарного водорода и плазмы в область диодного промежутка, где происходит генерация пучка электронов. Для инициации пробоя в нейтральном газе используются кольцевые электроды, смонтированные на концах кварцевой трубки и обеспечивающие протекание разрядного тока внутри области ограниченной кварцевой трубкой. Импульс напряжения (до 25 кВ) подавался от конденсаторной батареи ёмкостью 4 мкФ через управляемый разрядник РУ-65. При срабатывании разрядника осуществлялась подача высоковольтного потенциала на электрод, установленный на дальнем от диода конце трубки, из которого пучок выходил в сторону коллектора. В ходе экспериментов осуществлялась регистрация токов в различных узлах установки: разрядный ток I_{tub} , сосредоточенный непосредственно в кварцевой трубке, ток I_{entr} , вытекающий из трубки со стороны земляного электрода, где входит инжектируемый пучок, и ток I_{exit} , вытекающий из трубки на её конце, где установлен потенциальный электрод. Инжекция РЭП в плазменный шнур осуществлялась при различных условиях по импульсному напуску водорода и в разные моменты времени по отношению к началу протекания тока высоковольтного разряда. Для

регистрации геометрических размеров сечения формируемого плазменного шнура использовалась быстрая оптическая камера. В свою очередь, плотность плазмы в этом шнуре измерялась с использованием лазерного интерферометра на длине волны 10.6 мкм. В представляемых экспериментах сечение плазменного шнура имело диаметр 35 мм, что соответствует внутреннему диаметру электродов, по которым протекает ток высоковольтного разряда.

В этих экспериментах изменение условий нейтрализации РЭП осуществлялось путем варьирования концентрации плазмы, которое, в свою очередь, задавалось параметрами напуска нейтрального газа. Так в ходе экспериментов давление газа на входе клапанов поддерживалось постоянным, а варьировались длительность напуска и временная задержка между началом напуска водорода и подачей высоковольтного импульса напряжения для инициации пробоя в нейтральном газе.

Результаты экспериментов по формированию плазменного шнура и инжекции в него РЭП приведены на рисунке 2. В случае формирования плазменного шнура большой плотности продолжительность открытого состояния входного клапана (3) была 2 мс, а выходного клапана (4) – 1.5 мс. В случае формирования плазменного шнура пониженной плотности продолжительность открытого состояния входного клапана (3) была 1.5 мс, а выходного клапана (4) – 1.4 мс. Давление водорода на клапанах в обоих случаях составляло 1 атм.

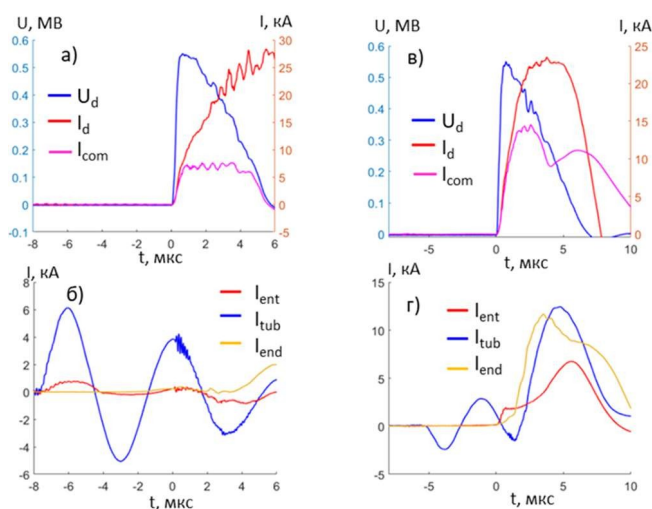


Рисунок 2. Осциллограммы, характеризующие генерацию пучка в диоде ускорителя (а и в) и нейтрализацию тока пучка в плазменном шнуре (б и г) в случае инжекции пучка в третью полуволну разрядного тока в кварцевой трубке. Левая половина рисунка относится к инжекции пучка в плазменный шнур в условиях высокой плотности плазмы (а, б), когда в шнуре обеспечивается полная (100%) нейтрализация пучка по току, правая – к случаю инжекции пучка в шнур с пониженной плотностью плазмы (в, г). За нулевой отсчёт по времени в представляемых осциллограммах принят момент времени, когда начинается импульс тока инжектируемого в плазму пучка.

Для случая большой плотности плазмы, который представлен на рисунке 2(б) осциллограммой полного тока, протекающего внутри кварцевой трубки I_{tub} , отчётливо видно, что ток проходящего по плазменному шнур пучка не вызывает заметных возмущений на осциллограмме тока, который формируется в плазменном шнуре за счёт поступления электрического заряда от накопительной ёмкости. Из этого следует, что индуцированный встречный пучку плазменный ток при плотности тока пучка $\sim 2 \text{ кА/см}^2$ полностью компенсирует ток пучка в пределах сечения плазменного шнура, и магнитное поле тока пучка остаётся внутри сечения этого шнура. Далее, следует дополнительно отметить, что осциллограмма полного тока I_{exit} на участке от выхода из трубки до коллектора, принимающего электронный пучок, демонстрирует отсутствие обрыва обратного тока по плазме, компенсирующего на этом участке ток пучка. Из этого следует, что вытекающий из кварцевой трубки поток плазмы достигает коллектора, обеспечивая хороший электрический контакт между плазменным шнуром в трубке и поверхностью коллектора, поглощающей электроны пучка.

В противоположность случаю с высокой плотностью водорода в трубке, при пониженной в ней плотности водорода протекающий по плазменному шнуру полный ток имеет амплитуду, приближающуюся к току пучка, который инжектируется в шнур от ускорителя после трансформации и сжатия его сечения. Этот факт отчётливо демонстрируют осциллограммы токов,

представленные на рисунке 2(в) и 2(г). Практически полное совпадение амплитуды полного тока в плазменном шнуре с током пучка означает, что плазма в кварцевой трубке обеспечивает нейтрализацию электрического заряда пучка, снимая провисание потенциала по его сечению, но магнитное поле пучка диффундирует из сечения плазменного шнура и индуцирует встречный пучку ток на внутренней поверхности стальной стенки вакуумной камеры. При этом, как демонстрирует осциллограмма полного тока в камере на участке перед входом пучка в плазменный шнур, на этом участке камеры подаётся такое количество криптона, которое при ионизации обеспечивает здесь значительную нейтрализацию и магнитного поля, создаваемого током пучка.

В противоположность описанным выше результатам, свидетельствующим о нейтрализации тока пучка на его входе в кварцевую трубку, магнитное поле тока пучка на выходе из неё не получает значимой компенсации встречным к пучку током по плазменному шнур (см. осциллограмму I_{end} на рисунке 2 (г)). Это означает, что срыв токовой нейтрализации пучка возникает на пути пучка от выхода из кварцевой трубки до поглощающего электроны пучка коллектора. Отсутствие токовой нейтрализации пучка в полной мере отражает осциллограмма полного тока, протекающего в полости кварцевой трубки, который, как оказалось в этих условиях, значительно подрастает, приближаясь к току пучка, который поступает в плазменный шнур от ускорителя У-2 через систему трансформации его сечения.

Варьирование плотности плазмы в шнуре и её распределения по длине трубки также осуществлялось за счёт изменения продолжительности задержки в осуществлении высоковольтного разряда по отношению к началу открывания клапанов для импульсного напуска водорода (т.е. временного интервала опережения напуска газа по отношению к инициации разрядного тока). Для двух величин такого опережения в напуске газа, а именно для 13 и 20 мс, результаты экспериментов приведены на рисунке 3. В этой серии экспериментов проводились регистрация изменений во времени средней по диаметру шнура концентрации плазмы с использованием интерферометра Майкельсона на длине волны 10.53 мкм. Результат этих измерений представлен на рисунке 3 (д).

Представленные на рисунке 3 осциллограммы токов позволяют проследить степень нейтрализации тока пучка в зависимости от плотности плазмы в шнуре в различных условиях, которые характеризуются средней по сечению плотностью плазмы, демонстрируемой подборкой осциллограмм на рисунке 3(д).

Результаты экспериментов представлены для трёх вариантов экспериментальных условий. Вариант 1 (синие линии) – эксперименты с током по плазменному шнур от высоковольтного разряда без инжекции в него сильноточного РЭП; вариант 2 (красные линии) – эксперименты, когда разрядный ток сопровождается инжекцией РЭП при частичной компенсации его потоку (этот режим реализуется, когда опережение подачи газа составляет 13 мс); вариант 3 (зелёные линии)

– эксперименты, когда разрядный ток сопровождается инъекцией РЭП в условиях, близких к случаю практически полной компенсации тока пучка (время опережения – 20 мс).

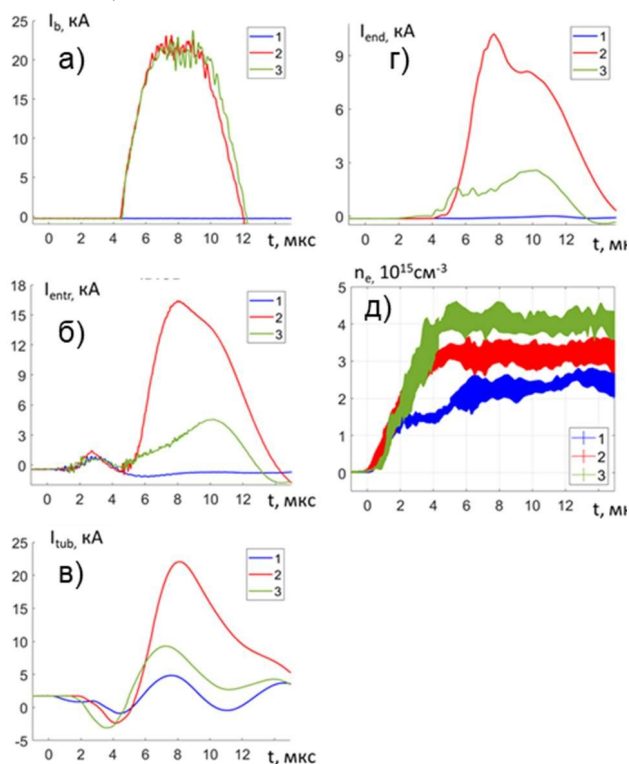


Рисунок 3. Осциллограммы токов и динамика концентрации плазмы в кварцевой трубке, регистрируемая интерферометром. Ток пучка, генерируемого в диоде – а; суммарный ток в области инъекции пучка в плазменный шнур – б; суммарный ток в центральном сечении кварцевой трубки – в; суммарный ток после выхода пучка из кварцевой трубки – г; динамика концентрации плазмы на входе в кварцевую трубку – д.

В случае высокой плотности плазмы, которая задается количеством поступившего в трубку газа, а также высокой амплитудой (~ 5 кА) и продолжительностью в несколько микросекунд протекающего по шнуру тока высоковольтного разряда, достигаются условия полной нейтрализации тока пучка даже тогда, когда его плотность тока поднимается до уровня 2-3 кА/см². При этом, нельзя утверждать о том, что достигается нейтрализация пучка по плотности тока, ибо встречный плазменный ток может занимать всё сечение плазменного шнура с диаметром 3.6 см в то время, как диаметр пучка имеет величину 2 см. Исходя из того, что на всей продолжительности (~ 5 мкс) прохождения пучка по плазменному шнуру ток пучка никак не проявляется при регистрации полного тока, протекающего по газоразрядной трубке (см. осциллограммы на рисунке 3 (в), можно утверждать, что нет обрыва встречного пучку тока на принимающем пучок коллекторе, что обусловлено высокой электропроводностью переходной области между торцом плазменного шнура и коллектором.

Снижение концентрации электронов плазмы в шнуре за счёт понижения количества, поступающего

через импульсные клапаны водорода, приводит к уменьшению степени нейтрализации тока пучка встречным плазменным током, что отражается на поведении во времени полного тока в газоразрядной трубке во время инъекции пучка.

Таким образом, проведённые экспериментальные исследования позволили установить условия для различной степени нейтрализации релятивистского электронного пучка с током ~10 кА при его прохождении по плазменному шнуру в условиях ведущего магнитного, что открывает возможность реализации в пучково-плазменной системе процесса генерации мультимегаваттных потоков излучения на частоте электронных плазменных колебаний терагерцового диапазона.

Регистрация спектрального состава излучения, генерируемого в плазменном шнуре при прохождении сильноточного РЭП

Проведенная серия исследований по нейтрализации релятивистского электронного пучка, инжектируемого в плазму, позволила определить несколько сценариев формирования плазменного шнура, при которых достигается различный уровень концентрации электронов плазмы. В этих режимах работы установки с использованием описанной выше системы формирования плазменного шнура проведены эксперименты по генерации излучения в процессе пучково-плазменного взаимодействия. Результаты измерений спектральной плотности мощности в потоке излучения приведены на рисунке 4. На этом рисунке представлены осциллограммы напряжения на ускорительном диоде, которые задают энергию инжектируемых в плазму электронов, и сигналы спектральной плотности излучения, генерируемого в пучково-плазменной системе. Эти сигналы поступают от частотно селективных каналов восьмиканального полихроматора. Здесь представлены сигналы от трёх каналов, полоса регистрации которых локализована в окрестности трёх значений частоты: 0.15, 0.25 и 0.3 ТГц. При этом, результат регистрации сигналов от этих частотно-селективных каналов представлен здесь для трёх величин плотности плазмы (0.5, 1 и 2) $\times 10^{15}$ см⁻³. Осциллограммы для этих значений плотности плазмы представлены линиями с тремя различными цветами.

На рисунке 5 представлен спектральный состав генерируемого в плазменном шнуре потока излучения при трёх указанных значениях плотности плазмы. Из представленных результатов видно, что с увеличением плотности приводит к смещению частоты, соответствующей максимальной плотности мощности в высокочастотную область спектра. При этом следует отметить, что в определенных условиях была достигнута генерация на частотах выше 0.2 ТГц при отсутствии сигналов в низкочастотной области спектра, которая соответствует циклотронному излучению при данной величине индукции магнитного поля 4 Тл. Обрыв в частотном спектре в области свыше 0.45 ТГц на рисунке 5(в) вызван отсутствием в полихроматоре каналов регистрации в этой спектральной области.

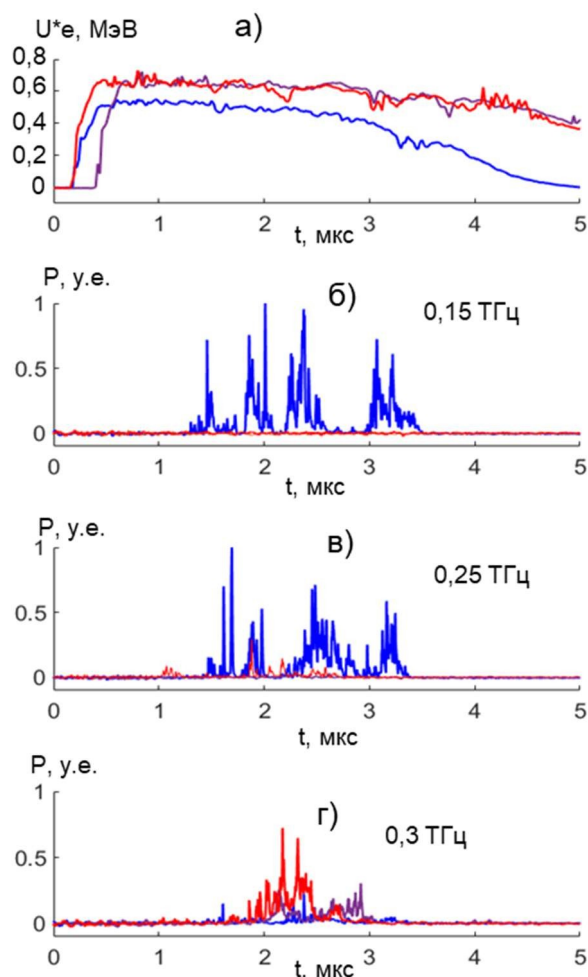


Рисунок 4. Осциллограммы напряжения на ускорительном диоде (а), характеризующую энергию электронов пучка, и сигналов от трех частотно-селективных каналов полихроматора (б-г), ориентированных на частоты 0.15, 0.25 и 0.3 ТГц. Результаты представлены для трех режимов генерации излучения в условиях плотности плазмы $0.5 \cdot 10^{15} \text{ см}^{-3}$, $1 \cdot 10^{15} \text{ см}^{-3}$, $2 \cdot 10^{15} \text{ см}^{-3}$, осциллограммы для которых представлены синими, красными и черными линиями, соответственно.

Заключение

В рамках решения задачи формирования тонкого плазменного шнура с высоким уровнем концентрации была реализована новая конфигурация системы создания плазменного разряда на основе инициации высоковольтного пробоя газа в протяжённой кварцевой трубке.

Варьированием условий импульсного напуска газа в эту трубку и изменением условий протекания разрядного тока в ней обеспечены различные режимы токовой нейтрализации РЭП с током инжекции в шнур около 15 кА.

Варьирование плотности плазменного шнура, по которому проходит пучок с током масштаба 10 кА, в пределах от $0.5 \cdot 10^{15} \text{ см}^{-3}$ до $2 \cdot 10^{15} \text{ см}^{-3}$ позволило осуществить смещение области локализации спектра генерируемого в плазме излучения с 0.15 ТГц до 0.4 ТГц.

Таким образом, в проведенных экспериментах продемонстрирована возможность варьирования спектра излучения, генерируемого в пучково-плазменной системе, в достаточно широких пределах от 0.1 ТГц до 0.4 ТГц за счёт изменения плотности плазмы. Это открывает дополнительные перспективы к использованию получаемых пучков излучения в различных приложениях.

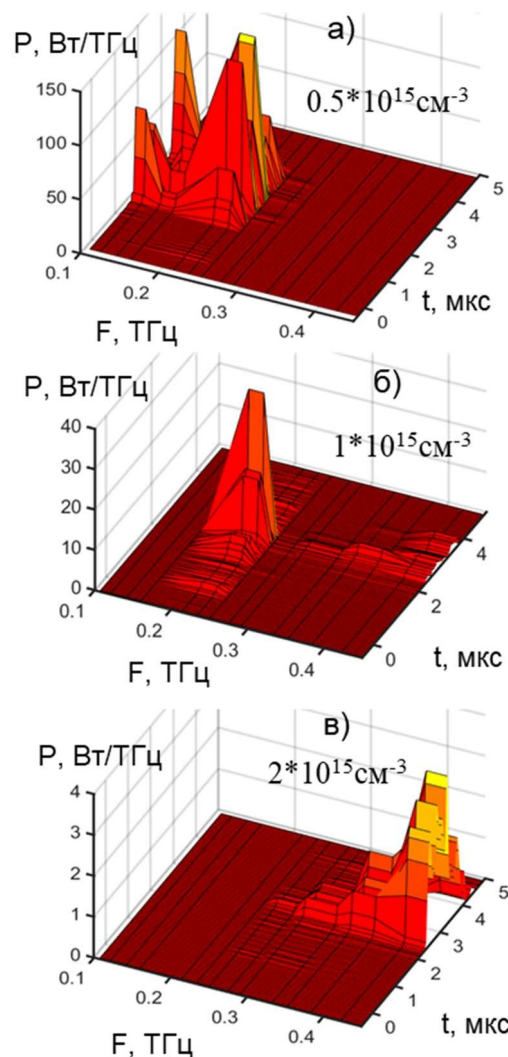


Рисунок 5. Графики спектральной плотности мощности (а-в) для трех режимов генерации излучения в условиях плотности плазмы $0.5 \cdot 10^{15} \text{ см}^{-3}$, $1 \cdot 10^{15} \text{ см}^{-3}$, $2 \cdot 10^{15} \text{ см}^{-3}$

Исследование по генерации мм-излучения в планарном черенковском лазере на установке ЭЛМИ

Введение

В качестве основы данного направления работ положено исследование механизма резонансного взаимодействия пучка релятивистских электронов с попутной электромагнитной волной в условиях близких величин скоростей их распространения в пространстве

взаимодействия (черенковский резонанс). Этот механизм взаимодействия в системе пучок – электромагнитная волна реализуется на установке ЭЛМИ при создании узкополосного генератора потока излучения на основе микросекундных килоамперных релятивистских электронных пучков (РЭП) с ленточным сечением, которые накачивают колебания в вакуумных электродинамических системах планарной геометрии. В рамках данного исследования изучается схема планарного черенковского мазера, возбуждаемого ленточным электронным пучком с энергией 0,8 МэВ, током пучка 2–7 кА, малым разбросом электронов по скоростям и толщиной в несколько миллиметров. Согласно результатам теоретического рассмотрения и компьютерного моделирования, такой мазер способен генерировать узкополосные импульсы мм-излучения субгигаваттной мощности. В качестве замедляющей системы (ЗС) в этом мазере используется брэгговская структура с двумерной синусоидальной гофрировкой одной из широких боковых стенок прямоугольного медного волновода, который служит одновременно и электродинамической системой, и транспортным каналом для ленточного пучка. Часть этого волновода с ЗС также является высокодобротным резонатором для собственной моды, состоящей из четырех парциальных поверхностных волн, создающих кольцо распределенной обратной связи, синхронизирующей ЭМ-колебания на всей области ЗС. В отчете представлены результаты двух серий экспериментов по генерации мощных импульсов мм-излучения и исследованию влияния условий эксперимента на спектр излучения такого генератора. Полученные результаты демонстрируют хорошие перспективы для разработки планарного черенковского мазера для диапазонов частот в окрестности 150 и 300 ГГц.

Описание схемы планарного черенковского генератора на поверхностной волне

Из теоретического анализа работы планарного черенковского мазера в режиме возбуждения пучком поверхностной волны известно, что для эффективной работы такого генератора необходимо транспортировать тонкий (толщиной 1 - 2 мм) ленточный электронный пучок с килоамперным током параллельно поверхности ЗС на минимальном расстоянии (~ 1 мм) от неё. Для выполнения этих требований на установке ЭЛМИ необходимо было осуществить ряд работ: во-первых, требовалось найти геометрию магнитно-изолированного диода ускорителя У-3, способного формировать в электродинамической системе черенковского мазера тонкий ленточный пучок сечением $(1 - 2) \times 150$ мм и током в несколько кА, а во-вторых, требовалось обеспечить параллельность границы пучка и плоскости ЗС. Для решения этих задач были использованы результаты аналитической модели и трехмерного компьютерного моделирования, представленные в годовом отчете за 2024 год. В рамках указанного подхода с помощью пакета CST Studio нами решалась задача о генерации стационарного электронного пучка в ведущем магнитном поле с учётом собственных электрического

и магнитного полей в нескольких вариантах геометрии диода и последующего распространения этого пучка в формирователе ленточной формы его сечения, а затем - в регулярном волноводе мазера. В результате проделанной работы была выбрана наиболее подходящая в условиях нашего эксперимента геометрия катода в виде клина, на вершине которого установлено лезвие в виде половинки диска диаметром 200 мм со скруглёнными краями толщиной 4 мм, которая обеспечила генерацию ленточного пучка нужной формы с током около 8 кА. Оптимальная геометрия анодной щели и следующего за ней формирователя, обрезающего периферийные области поперечного сечения пучка с малой плотностью тока и большой угловой расходимостью, а также конфигурация ведущего магнитного поля, обеспечивающая малый угловой разброс электронов пучка, прошедших через щель коллиматора, были взяты из предыдущих экспериментов. В процессе моделирования было обнаружено два основных эффекта. Благодаря использованию «лезвийного» катода, перед входом пучка в формирователь в поперечном сечении пучка наблюдались две четко выраженные области: первая представляла собой тонкий kern ленточной формы с высокой плотностью тока, а вторая – гало с малой плотностью тока, имевшая форму круга. Второй зарегистрированный эффект - это поворот поперечного сечения пучка как целого на угол около 6° относительно вертикальной плоскости симметрии электродинамической системы мазера при движении электронов замагниченного пучка в ускоряющей промежутке диода вследствие действия собственных ЭМ-полей. Для компенсации этого эффекта и тем самым обеспечения параллельности границы ленточного пучка поверхности ЗС, катод диода был повернут в противоположном направлении на угол -6° относительно указанной вертикальной плоскости симметрии. Такая модификация геометрии катода существенно улучшила эффективность прохождения керн плотности тока через формирователь, вследствие чего ток пучка в электродинамической системе мазера в модельных расчетах вырос с 4,5 до 8,5 кА. Следует отметить, что kern пучка с ленточным сечением в планарной электродинамической системе черенковского мазера в условиях однородного магнитного поля с индукцией 1,2-1,4 Тл имел ширину 150 мм и толщину 1 -1,5 мм. Аналогичное увеличение тока пучка с 3–4 кА до 6–7 кА было зарегистрировано и в экспериментах по проводке пучка последовательно через формирователь и электродинамическую систему мазера.

Электродинамическая система планарного черенковского мазера (см. рисунок 6), которая использовалась в первой серии экспериментов, представляет собой прямоугольный волновод сечением $9,5 \times 176$ мм и длиной около 1 м, образованный хорошо проводящими плоскими стенками.

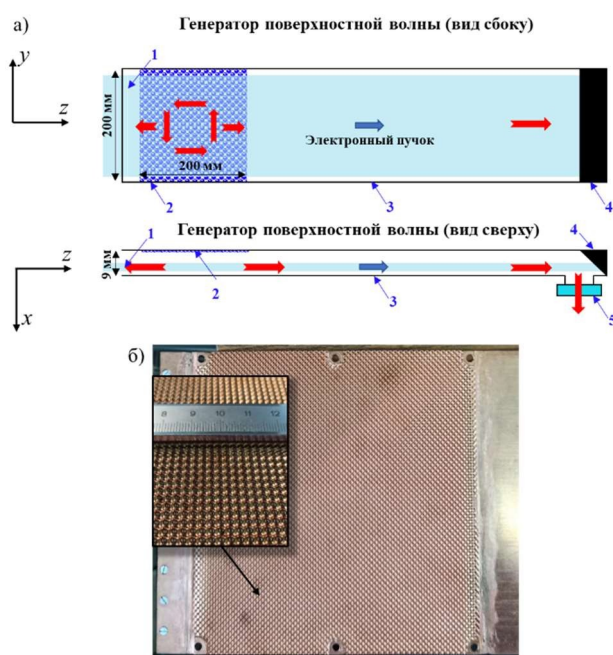


Рисунок 6. (а) Схема электродинамической системы планарного черенковского мазера. Синие стрелки показывают направление движения электронного пучка, красные – область формирования и направления частичных волновых потоков в ЗС, голубым цветом указана область транспортного канала, занимаемая электронным пучком. Цифрами на рисунке обозначены: 1 – гладкий участок регулярного волновода, 2 – ЗС, исполняющая также роль частотно-селективного резонатора, 3 – прямоугольный волновод, служащий для транспортировки волнового потока мм-излучения и электронного пучка к выходу из электродинамической системы, 4 – плоское зеркало (поверхность коллектора пучка), 5 – барьерное окно для вывода излучения в атмосферу. (б) Фотография используемой двоякопериодической синусоидальной брэгговской решётки, на которой реализуется двумерная замедляющая структура

Эта система состоит из следующих основных элементов. На входе пучка в электродинамическую систему установлен гладкий участок регулярного волновода длиной 30 мм (1). После него расположена замедляющая структура (2) с двумерной синусоидальной гофрировкой одной из широких боковых стенок волновода, которая обеспечивает синхронность распространения попутной к пучку поверхностной ЭМ-волны этой структуры с электронным пучком. Эта же структура одновременно является резонатором, осуществляющим селекцию мод за счёт двумерной распределенной обратной связи, реализуемой благодаря взаимному рассеянию на указанной гофрировке четырех частичных поверхностных волн, распространяющихся в попутном, обратном и двух перпендикулярных направлениях. Необходимо отметить, что распространяющиеся поперечно к пучку частичные волны создают условия для синхронной накачки колебаний пространственно-развитым РЭП во всем поперечном сечении электродинамической системы. Параметры

двумерной гофрированной области в наших экспериментах были следующими: ширина – 176 мм, длина – 200 мм, пространственные периоды синусоидальной нарезки в обоих направлениях – 3,76 мм, глубина нарезки – 1,4 мм. Согласование регулярного волновода с гофрированной областью на ее входной и выходной границах обеспечивается плавным уменьшением глубины нарезки в течение пяти периодов колебаний в местах перехода к регулярному волноводу. Таким образом, благодаря двумерной гофрировке боковой стенки волновода, формируется пространство эффективного электронно-волнового взаимодействия, в котором должна осуществляться узкополосная генерация и усиление поверхностной ЭМ-волны. Для препятствия образованию в ЗС стоячих волн в $\pm Y$ направлениях использовалась специальная система двух рассеивателей с нерегулярным («случайным») профилем поверхности, установленных друг против друга на узких, размером 9,5 мм, боковых торцах щелевого канала. Нерегулярный профиль поверхности торцов позволил рассеивать приходящие на них поперечно распространяющиеся волновые потоки, формируемые в 2D брэгговской структуре. После выходного участка электродинамической системы – регулярного волновода (3) расположено плоское зеркало (4), которое попутный электронному пучку поток мм-излучения отражает под углом 90° и направляет через выходное барьерное окно (5) в атмосферу. Это зеркало представляет собой поверхность коллектора пучка, наклоненную под углом 45° к направлению движения пучка. Для регистрации параметров импульса мм-излучения и его спектра небольшая часть потока излучения, прошедшего через окно, направляется с помощью волноводов в экранированную комнату, где расположен диагностический комплекс для регистрации и измерения характеристик волнового потока.

Результаты экспериментов по генерации потока излучения в планарной электродинамической системе на черенковском резонансе в условиях участия объёмных мод

После выполнения подготовительных работ, связанных с модификацией геометрии магнитно-изолированного диода и тестирования генерации и проводки пучка, была проведена серия экспериментов с пошаговым увеличением смещения «лезвийного» катода относительно вертикальной плоскости симметрии транспортного канала пучка, в котором смонтирована электродинамическая система мазера, в направлении оси X с целью постепенного приближения границы керна пучка к поверхности ЗС. Следует отметить, что перед началом этих экспериментов электродинамическая система черенковского мазера была целиком смещена на 1,3 мм в положительном направлении оси X относительно центральной плоскости этого канала и щели формирователя ($X = 0$) шириной 4 мм на его выходном конце. В результате такого смещения граничная поверхность ЗС располагалась немного выше (см. рисунок 7) верхнего края выходной щели формирователя

($X = 2$ мм), и граница керна пучка при любом смещении катода не могла приблизиться к поверхности ЗС на расстояние менее 0,1–0,2 мм. Это смещение было реализовано в конструкции электродинамической системы для того, чтобы замагниченные электроны пучка при движении в ведущем магнитном поле, параллельном оси канала, не могли повредить ЗС.

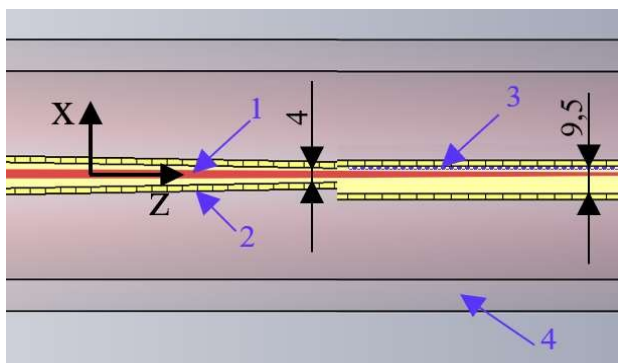
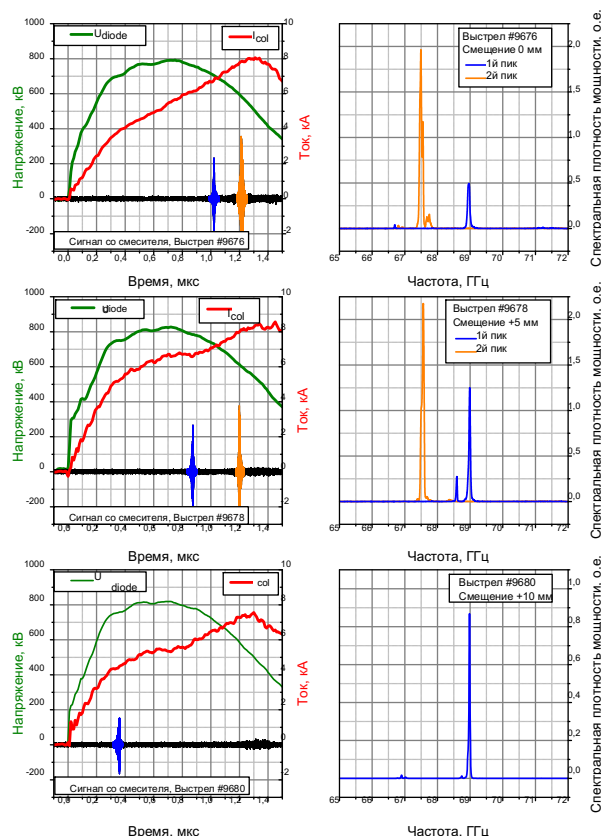


Рисунок 7. Схема переходной области формирователя в прямоугольный волновод электродинамической системы лазера. 1 – траектории электронов керна пучка, 2 – стенки формирователя пучка, 3 – поперечное сечение прямоугольного волновода с размерами 9,5×170 мм, боковая стенка которого образует ЗС, 4 – обмотка соленоида, создающего ведущее магнитное поле в транспортном канале

На рисунке 8 представлена эволюция спектра излучения, генерируемого мазером, при пошаговом смещении центра катода относительно центральной плоскости транспортного канала на 0, 5 и 10 мм вдоль оси X. При этом, смещение на 10 мм соответствует приближению керна с высокой плотностью тока пучка к поверхности ЗС до уровня 0,1–0,2 мм. Эти спектры получены путем усреднения спектральной плотности мощности по серии из пяти выстрелов при одинаковых экспериментальных условиях. Из рисунка видно, что при изменении смещения катода в диапазоне 0 - 5 мм в спектре выходного потока мм-излучения наблюдается несколько узких линий, обусловленных, по нашему мнению, возбуждением пучком квазикритических объемных мод волновода за счет оротронного механизма. С увеличением этого смещения до значения 10 мм эти спектральные линии, постепенно исчезают, все кроме одной - с частотой 69 ГГц, которая связана с возбуждением поверхностной волны при черенковском взаимодействии ее с ленточным пучком. На этом же рисунке представлены типичные осциллограммы напряжения на диоде, тока пучка на коллекторе и сигналов смесителя с гетеродинной диагностики в отдельных выстрелах при различных значениях смещения катода относительно канала транспортировки. В большинстве выстрелов проведенной серии экспериментов наблюдалась генерация в виде нескольких (1–3) коротких (30–100 нс) импульсов квазимонохроматического излучения на частотах в диапазоне 67–70 ГГц.



Ширина спектральных линий в этих выстрелах варьировалась от 20 до 70 МГц. Кроме того, было обнаружено, что с увеличением смещения катода и, соответственно, с приближением керна пучка к поверхности ЗС имеет место сдвиг по времени начала генерации излучения с частотой 69 ГГц с заднего фронта импульса напряжения на его передний фронт. В этот момент времени величина тока пучка заметно меньше, чем эта величина в середине длительности импульса генерации пучка в диоде. По нашему мнению, этот сдвиг по времени начала генерации излучения при приближении границы керна пучка к поверхности замедляющей структуры обусловлен уменьшением стартового тока, необходимого для генерации излучения на пространственной моде, связанной с поверхностной волной этой структуры, с уровня 6 кА до уровня 4 кА.

Аналогичные изменения спектрального состава излучения, генерируемого черенковским мазером при приближении границы пучка к поверхности ЗС, наблюдались и в моделировании взаимодействия ленточного пучка и волн, возбуждаемых в электродинамической системе лазера, которое было выполнено с по-

мощью пакета CST Studio Suite. Так в случае, когда пучок находится далеко от поверхности ЗС, в результате действия оротронного механизма генерации производится преимущественная накачка пучком квазикритических волн с частотами в диапазоне 67-71 ГГц (для параметров решетки, используемой в первой серии экспериментов), которые имеют 4 вариации вдоль оси X и масштаба 20 вариаций по оси Y. В случае, когда граница ленточного пучка максимально приближена к поверхности ЗС, в спектре излучения на выходе из генератора присутствует только одна частота, соответствующая частоте поверхностной волны 69 ГГц. В последнем случае, как следует из результатов расчетов, область максимальных амплитуд полей электромагнитных волн, возбуждаемых пучком в электродинамической системе мазера, локализована в центральной области ЗС, на расстоянии 0 - 2 мм от ее поверхности, и соответствует экспоненциальному характеру спада амплитуды полей с ростом координаты X.

Результаты серии экспериментов в условиях модернизированной электродинамической системы применительно к подъёму генерируемой мощности при резонансе пучка с поверхностной модой

Перед проведением второй серии экспериментов электродинамическая система планарного черенковского мазера была модернизирована следующим образом (см. схему на рисунке 9).

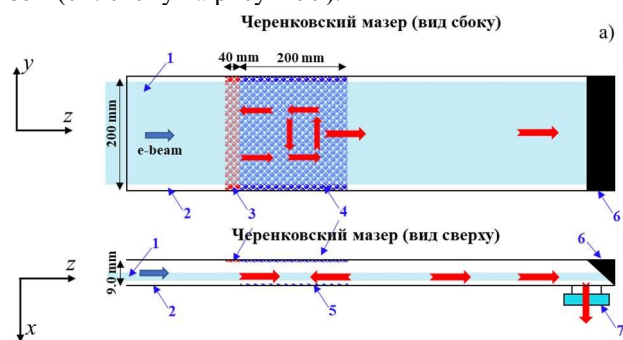


Рисунок 9. (а) Схема модернизированной электродинамической системы планарного черенковского мазера. 1 – ленточный электронный пучок после формирования, 2 – прямоугольный волновод, одновременно служащий каналом транспортировки пучка, 3 – двумерный брэгговский отражатель, 4 – ЗС, 5 – гребенчатая структура (поверхность напротив ЗС), 6 – плоское зеркало (поверхность коллектора пучка), 7 – барьерное окно для вывода излучения в атмосферу. Синие стрелки показывают направление движения электронного пучка, красные – область формирования и направления парциальных волновых потоков в ЗС.

Во-первых, для защиты ЗС от воздействия плазмы, образующейся при поглощении части ленточного пучка в стенках формирователя, область расположения ЗС была отодвинута от формирователя на расстояние 200 мм по направлению движения пучка. Во-вторых, в электродинамическую систему мазера в области слева от ЗС был добавлен брэгговский отражатель (3), представляющий собой участок широкой стенки волновода

длиной 40 мм с двумерной гофрировкой поверхности, имеющей те же значения пространственных периодов, что и ЗС, но с увеличенной глубиной нарезки – 2,8 мм. В-третьих, на противоположной по отношению к ЗС стенке волновода была установлена медная пластина с гофрировкой в виде одномерной гребенчатой структуры с периодом 20 мм, предназначенной для рассеяния квазикритических волн в попутном с пучком направлении для снижения их добротности и увеличения значения их стартового тока.

С использованием модернизированной электродинамической системы была проведена вторая серия экспериментов по генерации мм-излучения в планарном черенковском мазере, в ходе которой расстояние от границы керна с высокой плотностью тока пучка до поверхности ЗС варьировалось в тех же пределах, что и в первой серии экспериментов. Прежде всего, необходимо отметить, что в этих экспериментах мощность СВЧ-сигналов на выходе из черенковского мазера с модернизированной электродинамической системой выросла не менее, чем на порядок величины по отношению к результатам первой серии экспериментов. По нашему мнению, этот рост обусловлен использованием брэгговского отражателя в электродинамической системе мазера. Также несколько изменился частотный спектр излучения (см. рисунок 10).

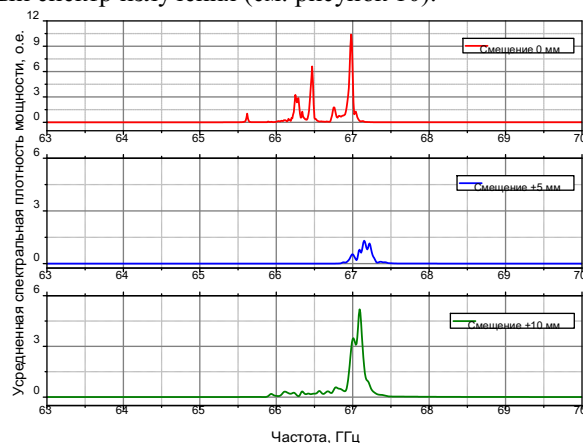


Рисунок 10. Усредненная по серии импульсов спектральная плотность мощности потока излучения черенковского мазера при трёх значениях смещения центра катода относительно центра канала во второй серии экспериментов

При этом общий характер и динамика генерации излучения при смещении катода относительно центральной плоскости симметрии канала остались прежними: при нулевом смещении катода (см. рисунок 10(а)) на заднем фронте импульса напряжения наблюдались серии из нескольких импульсов генерации длительностью 30–50 нс в частотном интервале 66–67 ГГц. При смещении катода на 10 мм от центра транспортного канала и, соответственно, распространения керна пучка в непосредственной близости от поверхности ЗС (см. рисунок 10 (в)), начало генерации импульса излучения по времени наблюдается на переднем фронте напряжения на диоде, а количество ли-

ний в частотном спектре уменьшается до одной, расположенной вблизи частоты 67 ГГц, которая соответствует резонансной частоте новой ЗС, снабженной брэгговским двумерным отражателем. При вскрытии электродинамической системы после двух десятков выстрелов пучком было обнаружено, что центральная область ЗС по координате Y шириной около 5 см покрыта темным налетом с интенсивностью, модулированной вдоль направления движения пучка с пространственным периодом 20 мм, который совпадает с периодом нарезки гребенчатой структуры, установленной на противоположной к ЗС стенке волновода. По нашему мнению, такой характер запыления ЗС свидетельствует о возникновении СВЧ-пробоя в области повышенной плотности энергии колебаний поверхностной волны, а его модуляция связана с инициацией этого пробоя остриями на поверхности гребенчатой структуры. Возникновение СВЧ-пробоя также подтверждено резким нарастанием локализованного свечения плазмы на участке канала, где размещена замедляющая структура, в момент времени срыва генерации импульсов мм-излучения. Локальный вывод светового излучения из различных сечений канала обеспечивался коллимированными по входу световодами, регистрация импульсов света осуществлялась с помощью ФЭУ. Повышение импульсной мощности в экспериментах после модификации диодного узла ускорителя и электродинамической системы мазера сопровождалось, как правило, сокращением длительности импульса генерируемого излучения. Таким образом, при высоком уровне мощности длительность импульса ограничена возникновением СВЧ-пробоя в пространственной области двумерной решётки, выполняющей роль замедляющей структуры. Для предотвращения этого пробоя в дальнейшем предусматривается дополнительная модификация электродинамической системы мазера и диодного узла ускорителя, что должно позволить достижение более высокого уровня мощности импульсов мм-излучения, а также повышения их длительности.

Заключение

1. В результате проведения модельных расчётов найдена оптимальная конструкция ленточного магнитно-изолированного диода и щелевого канала транспортировки пучка в условиях установки ЭЛМИ, обеспечивающая в эксперименте формирование тонкого ленточного пучка с сечением керна $1,5 \text{ мм} \times 150 \text{ мм}$ и током до 8 кА при энергии электронов до 0,8 МэВ и транспортировку его на малом расстоянии от гофрированной поверхности замедляющей структуры мазера параллельно её поверхности в электродинамической системе планарного черенковского мазера.

2. Проведена серия экспериментов в условиях пошагового изменения расстояния между границей керна ленточного пучка и поверхностью замедляющей структуры планарного черенковского мазера. В результате этих экспериментов, при зазоре между границей керна и поверхностью замедляющей структуры в несколько десятых долей миллиметра достигнут одно-

частотный режим генерации мм-излучения на резонансной частоте поверхностной волны замедляющей структуры 69 ГГц, а также получены мощные импульсы узкополосного мм-излучения с длительностью до 100 нс и шириной спектра около 20 МГц.

3. Сопоставление полученных экспериментальных данных с результатами моделирования работы планарного черенковского мазера продемонстрировало их хорошее согласие на качественном уровне.

4. Проведена модернизация электродинамической системы планарного черенковского мазера, при которой замедляющая структура дополнена двумерным брэгговским отражателем, предназначенным для перенаправления встречной к пучку волны в направлении его распространения, и гладкая стенка волновода, расположенная напротив ЗС, заменена на гребенчатую структуру, призванную уменьшить добротность квазикритических мод волновода с целью подъёма стартового тока пучка при оротронном режиме генерации излучения.

5. В серии экспериментов по генерации излучения в черенковском мазере с модернизированной электродинамической системой зарегистрирован подъём импульсной мощности излучения на порядок величины в потоке излучения на выходе мазера. Подъём мощности сопровождался сокращением длительности импульса излучения и появлением следов возникновения СВЧ-пробоя в пространственной области замедляющей структуры, где локализуется повышенная плотность энергии электромагнитного поля поверхностной волны. При величине зазора между границей керна пучка и двумерно-гофрированной поверхностью ЗС в пределах от 0.2 до 1 мм в большинстве выстрелов пучком наблюдался режим одночастотной генерации мощных импульсов мм-излучения на частоте 67 ГГц при длительности импульса около 50 нс.

6. В экспериментах с использованием калиброванного СВЧ-калориметра проведены предварительные измерения импульсной мощности потока излучения мазера на выходе его в атмосферу, которые дали оценку уровня мощности генерируемого излучения в несколько десятков МВт.

ВЗАИМОДЕЙСТВИЕ ПЛАЗМЫ С ПОВЕРХНОСТЬЮ

Двухцветный пирометр для определения температуры поверхности керамических образцов

На лазерном стенде экспериментального комплекса БЕТА был создан двухцветный пирометр для определения температуры поверхности керамик во время их быстрого нагрева. Основная проблема пирометрии заключается в необходимости знания точных значений спектральной излучательной способности $\varepsilon(\lambda, T)$ материала в интересующих диапазонах длин волн и температур. В случае измерений одноцветным методом его точность зависит от калибровки или от изначальных предположенных значений спектральной излучательной способности $\varepsilon(\lambda, T)$ изучаемого материала. Для решения этих проблем может быть использована двухцветная пирометрия. Данный метод основывается на анализе отношений мощностей тепловых излучений, измеренных в разных диапазонах длин волн. Предполагается, что если взять достаточно близкие диапазоны длин волн, то для них мало отличаются друг от друга значения $\varepsilon(\lambda, T)$. И тогда двухцветный метод может обладать высокой точностью измерения температуры, при этом не требуя знания $\varepsilon(\lambda, T)$ изучаемого материала.

На рисунке 1 представлена оптическая схема двухцветного пирометра. В качестве светочувствительных детекторов использовались два фотодиода на основе Thorlabs PDA10CS2 на основе InGaAs-детекторов, работающие в ближней ИК области (0,9 – 1,8 мкм). Для создания подходящих спектральных чувствительностей использовались оптические фильтры из цветных стёкол, для первого фотодиода это сине-зелёное стекло СЗС20, для второго – сине-зелёное стекло СЗС23. Итоговые спектральные чувствительности с FWHM ≈ 0.2 мкм показаны на рисунке 2.

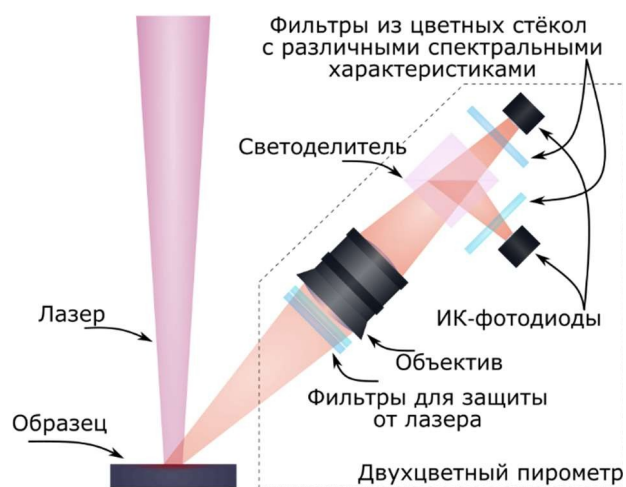


Рисунок 1. Оптическая схема двухцветного пирометра, установленного на лазерном стенде.

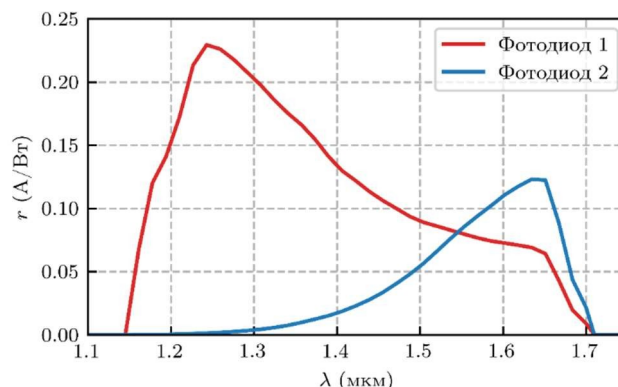


Рисунок 2. Спектральные чувствительности фотодиодов с учетом оптических фильтров.

Для разделения световых потоков использовался светоделительный куб Thorlabs BS033. Куб устанавливался на одинаковом расстоянии от фотодиодов. Так как в экспериментах на стенде для быстрого нагрева используется инфракрасный лазер большой мощности, то необходимо защищать диагностику, так как паразитно-рассеянное излучение может не только исказить результаты пирометрии, но и повредить оптику и фотодиоды. Поэтому для защиты использовался отсекающий фильтр Thorlabs FELH1150, который подавлял излучение с длиной волны до 1150 нм.

Для фокусировки теплового излучения использовался объектив Индустар-51 с фокусным расстоянием 210 мм, который размещался примерно на 280 мм от поверхности исследуемых образцов. Настройка фокусировки системы диагностики производилась с помощью камеры Xenics Bobcat 320 на основе InGaAs-детектора, которая во время процесса размещалась на месте одного из фотодиодов. С помощью снимков, полученных с помощью этой камеры был определен коэффициент линейного увеличения оптической системы, который был равен 1.69. Прицеливание пирометра на нужную область образца производилось с помощью вспомогательного красного непрерывного лазера малой мощности.

Созданный двухцветный пирометр был испытан на лазерном стенде в ходе измерений температуры различных материалов. Для испытаний использовались три керамических образца из карбида бора (B_4C), карбида кремния (SiC) и диборида циркония (ZrB_2). Также для сравнения результатов использовался металлический образец из вольфрама (W). Для оценки возможностей двухцветного пирометра использовались публично доступные литературные данные спектральных излучательных способностей $\varepsilon(\lambda, T)$.

Результаты показывают, что при исследовании стойкости к термоударам таких керамических материалов, как B_4C , SiC и ZrB_2 , допустимо использовать метод двухцветной пирометрии для определения температуры во время процесса нагрева. Так как обсуждается возможность применения этих материалов в качестве первой стенки термоядерных реакторов, то применение двухцветной пирометрии при исследовании таких материалов упрощает задачу измерения

температуры и связанных с ней других физических величин и параметров материала, так как данный метод будет иметь точность, сравнимую с обычной одноцветной, но при этом не потребуются знание $\epsilon(\lambda, T)$ в широких диапазонах длин и температур для этих материалов.

Описание двухцветного пирометра, а также исследования его точности измерения температуры опубликованы в статье [Ryzhkov G. A. et al. Fusion Eng. Des. 222 (2026) 115545]. Результат применения двухцветного пирометра для измерения температуры тонкого покрытия В₄С на вольфраме при исследовании воздействия на него тепловых ударов также опубликовано в статье [Cherapanov D. E. et al. Plasma Science and Technology 27.12 (2025) 125601].

РАБОТЫ ПО ПРОЕКТУ ИТЭР

ИЯФ СО РАН интегрирует и начал изготовление четырех диагностических портов ИТЭР (экваториальный порт №11 (ЭП-11), верхние порты №02, 08 и 07), разрабатывает и начал производство элементов трех российских диагностических систем (диверторный монитор нейтронного потока (ДМНП), вертикальная нейтронная камера (ВНК), анализатор нейтральных частиц (АНЧ)) для определения параметров плазмы в международном термоядерном реакторе ИТЭР, который строится на юге Франции. Несмотря на политическую ситуацию в мире, сотрудничество Российской Федерации с другими странами в рамках проекта ИТЭР продолжается.

Интеграция диагностических портов ИТЭР и первые стадии их производства

Диагностические порты ИТЭР состоят из порт-плага, который устанавливается в вакуумную камеру ИТЭР, околопортного пространства, биозащиты и портовой ячейки для оборудования. Внутри порт-плага вставлены Диагностические защитные модули (ДЗМ).

Для экваториального порта №11 продолжается изготовление компонентов ДЗМ (Рис. 1), включая глубокое сверление каналов охлаждения. Так как все компоненты ДЗМ будут располагаться в сильном магнитном поле, требуется чтобы все компоненты, включая сварные соединения, в ходе изготовления сохраняли магнитную проницаемость ниже 1,03.

В результате подготовки к защите производства по специальным процессам (сварка крышек каналов водяного охлаждения, защитных лотков и элементов несущей конструкции ДЗМ) Организацией ИТЭР было выдвинуто дополнительное условие по квалификации сварочного процесса крышек каналов водяного охлаждения. Согласно опыту, полученному в результате предыдущих квалификаций подобных соединений, в рамках проекта ИТЭР, Организация ИТЭР настаивает на создании дополнительного квалификационного макета для сварки крышек каналов охлаждения. На данном макете предполагается продемонстрировать правильность подбора режимов сварки: тока, скорости перемещения электрода и скорости поддува защитного газа. На основании вышеперечисленных требований было принято решение изготовить блоки контрольные ДЗМ (2 шт.), содержащие основные виды крышек водяных каналов большого ДЗМ, подходящие по размерам для всех видов контроля сварных соединений и для контроля герметичности (Рис. 2).

ООО Вириал продолжает производство блоков из керамики карбида бора для внутривакуумной нейтронной защиты портов и оборудования в них. В 2025 году Организация ИТЭР утвердила Отчеты об изготовлении всех партий керамики карбида бора для экваториального порта №11 (более 40 тысяч блоков). Отчеты об изготовлении содержат в себе подробные данные о всех этапах изготовления и тестирования компонент: прото-

колы входного контроля сырья, сканы Планов изготовления и контроля с отметками на каждом этапе, протоколы визуального контроля, измерения химического состава, механических тестов, и итоговые сертификаты.

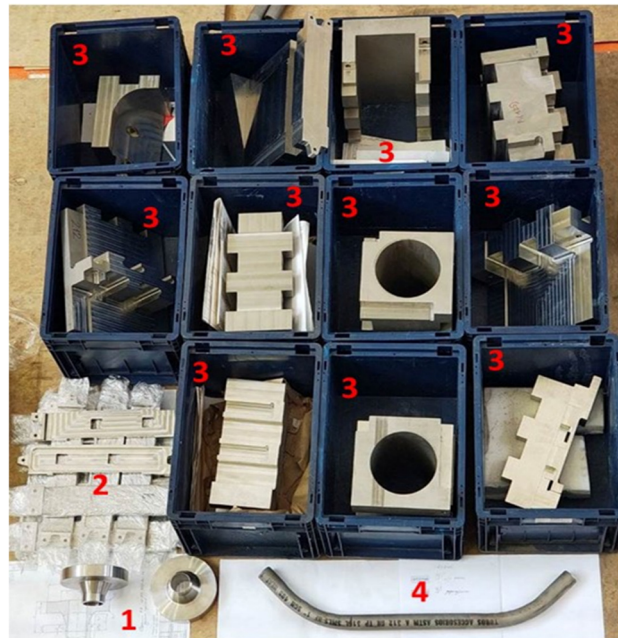


Рисунок 1. Элементы для сборки ДЗМ №2 экваториального порта №11 ИТЭР: 1 – фланцы (2 шт); 2 – лотки кассет нейтронной защиты (14 шт); 3 – заполнители радиационной защиты (11 шт); 4 – труба водяного охлаждения.



Рисунок 2. Блок контрольный, содержащий основные виды крышек водяных каналов ДЗМ, подходящие по размерам для всех видов контроля сварных соединений и для контроля герметичности.

В 2025 году продолжились работы по разработке документации для разрешения на начало производства компонентов верхних порт-плагов №02 и 08, изготовлению заготовок для верхнего порт-плага №07 и проведению инженерных расчетов (тепловые, электромагнитные и сейсмические расчеты), обновлялись 3D модели размещения оборудования (Рис. 3).

ООО «Завод Универсального Машиностроения» изготовил специальное оборудование для кантования порт-плага верхнего порта: оборудование для проведения операции перемещения порт-плага верхних портов установки ИТЭР. Оборудование состоит двух подставок для порт-плага верхнего порта, которые крепятся к его фланцу (Рис. 4а) и боковой стороне (Рис. 4б).

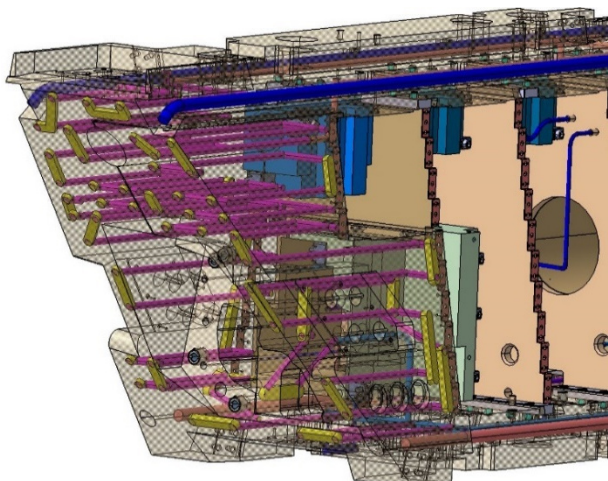


Рисунок 3. Переработанная конструкция системы водяного охлаждения передней части ДЗМ верхнего порта №02. Горячая плазма будет располагаться с левой стороны.



а)



б)

Рисунок 4. Вспомогательное оборудование для работы с диагностическим защитным модулем порт-плага верхнего порта №02.

Разработка диагностик ИТЭР и их производство

Для диагностики ДМНП в 2025 году выполнена подготовка к производству внутрикамерных элементов, изготовлены полуфабрикаты фланцев для приварки трубок сервисного вакуума к блокам детектирования и

продолжалась разработка защитного шкафа для электроники ДМНП в порт-камере.

Для диагностики ВНК изготовлены заготовки нейтронной защиты детекторного модуля верхней ВНК и проведены прочностные расчёты обновлённой модели защитного шкафа верхней ВНК (Рис. 5).

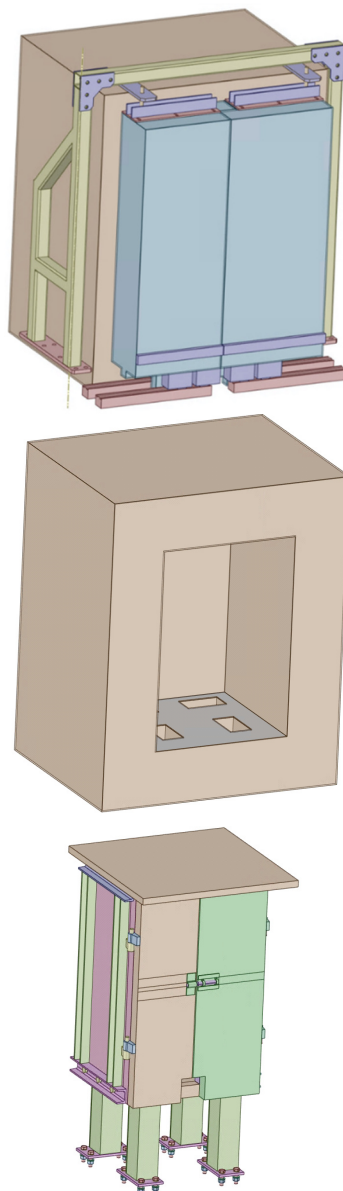


Рисунок 5. Модель вневакуумных компонентов верхней вертикальной нейтронной камеры в сборе (сверху). Конструкция состоит из сдвижных дверей, защитной оболочки из борированного полиэтилена (показана в центре рисунка) и защитного шкафа диагностики (снизу рисунка).

ТЕОРИЯ ПЛАЗМЫ

Равновесие плазмы в режиме диамагнитного удержания

Газодинамическая многопробочная ловушка (ГДМЛ) [1] – открытая ловушка нового поколения, разрабатываемая в ИЯФ СО РАН. Одной из задач ГДМЛ является экспериментальное исследование режима диамагнитного удержания [2-4]. Основная идея этого режима состоит в создании так называемого диамагнитного пузыря в центральной части ловушки. Внутри пузыря находится ядро, в котором давление плазмы достигает предела, соответствующего $\beta \sim 1$ (β – отношение давления плазмы к давлению магнитного поля), а магнитное поле практически полностью вытеснено вследствие диамагнетизма. Конфигурация поддерживается диамагнитными токами плазмы, сконцентрированными в относительно тонком переходном слое снаружи ядра пузыря. Теоретические оценки [2] предсказывают улучшенное удержание в диамагнитном пузыре по сравнению с газодинамическим режимом, что делает диамагнитное удержание привлекательным для практического применения в открытых ловушках.

Равновесие диамагнитного пузыря в газодинамической многопробочной ловушке

Проведено детальное теоретическое исследование равновесия плазмы в ГДМЛ в режиме диамагнитного удержания. Построены и проанализированы различные равновесные конфигурации диамагнитного пузыря в ГДМЛ, изучена зависимость равновесия от внешних свободных параметров – вакуумного магнитного поля, мощности и энергии инжекции нейтрального пучка и др.

Для этого использовалась теоретическая модель равновесия плазмы в диамагнитной ловушке с инжекцией нейтрального пучка, построенная в [3]. В этой модели плазма состоит из двух компонент: горячих ионов, образующихся в результате инжекции нейтрального пучка, и фоновой тёплой плазмы. Горячие ионы имеют функцию распределения отличную от максвелловской, тёплая плазма находится в локальном тепловом равновесии. Модель учитывает неадиабатические потери [4]. Эффекты вращения тёплой плазмы и электростатического поля не учитываются. Равновесное магнитное поле определяется уравнением Максвелла.

В дополнение к классической спицевой диффузии, рассмотренной в статье [3], также была рассмотрена неклассическая диффузия в форме Бома, которая может оказаться более естественной для экзотических условий диамагнитного удержания и должна приводить к значительному росту радиального переноса тёплой плазмы. Учтена конечная эффективность инжекции нейтрального пучка. Для этого использовалась аналитическая аппроксимация эффективного сечения захвата пучка, построенная в [5].

Влияние вращения плазмы на диамагнитное удержание

Существует ряд работ, посвящённых теоретическому исследованию равновесия плазмы в режиме диамагнитного удержания. В статье [2] рассмотрена простая одномерная цилиндрическая МГД-модель диамагнитного пузыря, расширенная в [3] до двумерного осесимметричного случая. В [6] построена полностью кинетическая модель равновесия с изотропной функцией распределения в центральной плоскости. В статье [7] разработана цилиндрическая модель, учитывающая горячие ионы от инжекции нейтрального пучка и неадиабатические потери, предсказанные в [4]. Однако вращение плазмы в режиме диамагнитного удержания до сих пор не рассматривалось подробно.

Изучено влияние вращения диамагнитного пузыря на равновесие и удержание плазмы. Построена стационарная модель равновесия вращающегося цилиндрического пузыря. Плазма в пузыре разделена на две фракции: плазма ядра, состоящая из частиц, пролетающих через ядро пузыря, и внешняя плазма, удерживаемая в магнитном поле в переходном слое снаружи ядра. Плазма ядра имеет максвелл-болцмановскую функцию распределения с учётом твердотельного вращения. Учтена хаотическая динамика частиц ядра, приводящая к неадиабатическим потерям, асимметричным по моменту импульса (см. [4]). Внешняя замагнитненная плазма описывалась уравнениями МГД, включающими баланс сил для ионов и электронов и сохранение массы. Учтены вязкие силы в переходном слое, а также трение плазмы ядра о внешнюю плазму. Равновесное магнитное поле определяется уравнением Максвелла. Система дополнена уравнением непрерывности для плазменных токов, из которого определяется распределение электростатического потенциала снаружи ядра пузыря. Внутри ядра потенциал задаётся условием квазинейтральности.

- [1] D.I. Skovorodin, et al., Plasma Physics Reports, 49(9), 1039–1086 (2023).
- [2] A.D. Beklemishev, Physics of Plasmas, 23(8), 082506 (2016).
- [3] M.S. Khristo and A. D. Beklemishev, Plasma Physics and Controlled Fusion, 64(9), 095019 (2022).
- [4] I.S. Chernoshtanov, Plasma Physics Reports, 48(2), 79–90 (2022).
- [5] S. Suzuki, et al. Plasma Physics and Controlled Fusion, 40(12), 2097–2111 (1998).
- [6] I.A. Kotelnikov, Plasma Physics and Controlled Fusion, 62(7), 075002 (2020).
- [7] M.S. Khristo and A. D. Beklemishev, Journal of Plasma Physics, 91(1), E3 (2025).

Развитие модели вихревого удержания для неоднородной плазмы и исследование влияния схемы включения потенциалов на удержание

Представлено обобщение модели вихревого удержания, включающее эффекты неоднородной плотности плазмы и электронной температуры. Исследованы дополнительные источники поляризации плазмы, связанные с центробежной и электронно-градиентной неустойчивостями желобкового типа. Показано, что центробежная мода эффективно стабилизируется эффектом КЛР, в то время как газодинамические потери существенно снижают темпы роста электронно-градиентной моды. Обнаружены три типа аномального транспорта в вихревом транспортном барьере неоднородной плазмы и исследованы условия их установления. Выявлена общая тенденция сужения вихревого транспортного барьера при наличии градиента плотности вне зависимости от модели источников и равновесия. На основе обобщенной модели исследовано влияние дополнительных эффектов поляризации плазмы на качество вихревого удержания в ГДЛ. Показано, что центробежная и электронно-градиентная неустойчивости приводят к уменьшению среднего времени удержания плазмы в среднем на 3% по отношению к модели с однородными плотностью и поперечной электронной температурой.

Проведено сравнение обобщенной модели вихревого удержания в различных схемах включения внешних потенциалов – когда лимитер и последняя пластина плазмодриемника находятся под положительным потенциалом относительно центра плазмы (схема с зазором); и когда только лимитер находится под положительным потенциалом, а плазмодриемник полностью заземлен (схема без зазора). В схеме с зазором наблюдается нелинейное насыщение глобальной желобковой моды, как должно происходить при вихревом удержании. В схеме без зазора возникает неустойчивость края плазмы, связанная с различными квазиравновесиями плазмы внутри и снаружи проекции лимитера. Неустойчивость имеет характерные частоты, сопоставимые с экспериментальными данными диагностических ГДЛ, а модельное энергетическое время жизни плазмы в среднем уменьшается на 10%. Для параметров ГДЛ построена зависимость энергетического времени жизни плазмы от размера зазора, определены условия стабилизации и оптимальная ширина зазора.

S.E. Konstantinov, The hybrid extension of Vortex Confinement and the gap effect of potential biasing», Journal of Plasma Physics, doi: 10.1017/S0022377826101263.

Исследование баллонных возмущений в газодинамической ловушке

В 2025 году были продолжены исследования методов МГД-стабилизации баллонных возмущений с азимутальным волновым числом $m = 1$ в осесимметрич-

ных линейных ловушках с предельно высокой β – отношением давления плазмы к давлению магнитного поля. Предполагается, что мелкомасштабные моды с азимутальным числом $|m| > 1$ подавлены эффектами конечного ларморовского радиуса, поэтому стабилизация моды $m = 1$ означала бы стабилизацию почти всех наиболее опасных МГД-неустойчивостей.

Государственным заданием на 2025 год предусматривалось проектирование бокового МГД-стабилизатора (проводящего кожуха, окружающего столб плазмы) для достижения предельной β . С помощью пакета РЕК будет выбран аксиальный профиль МГД-стабилизатора, то есть зависимость радиуса проводящего цилиндра от координаты z вдоль оси открытой ловушки ГДЛ с учетом размещения технологических окон для нагревных пучков нейтральных атомов и различных диагностик, а также разных вариантов коммутаций катушек магнитной системы. На основе результатов выполненных расчетов были выработаны рекомендации по выбору формы проводящего кожуха для установки ГДЛ. На Рис. 1 показаны два из обследованных профилей проводящего кожуха.

В 2025 году начата разработка второй версии пакета программ РЕК. Она должна включить учет диссипативных эффектов в проводящем кожухе, которые снижают эффективность стабилизации баллонных колебаний из-за затухания токов изображения в проводящих стенках вследствие омического сопротивления.

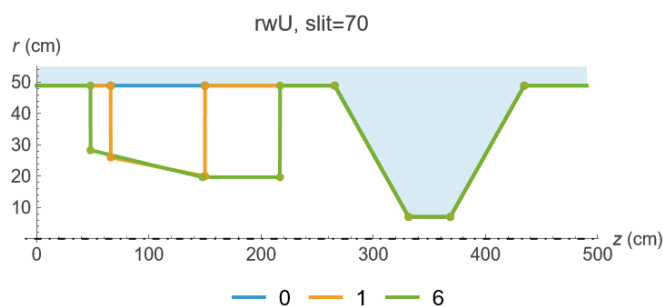


Рисунок 1. Аксиальный профиль бокового МГД-стабилизатора: 0 – вакуумная камера, 1 – первый вариант проводящего кожуха, 6 – окончательный вариант проводящего кожуха.

Равновесие в диамагнитной ловушке с популяцией плещущихся ионов

Разработан метод расчета равновесия в осесимметричной ловушке с популяцией быстрых плещущихся ионов с высоким относительным давлением. Поскольку в режиме диамагнитного удержания напряженность магнитного поля в занятой плазмой области мала, магнитный момент у быстрых ионов не сохраняется, что в общем случае приводит к хаотическому движению. Тем не менее, при внеосевой атомарной инжекции с прицельным параметром, примерно равным ларморовскому радиусу быстрого иона, может формироваться популяция быстрых ионов, у которых сохраняется (помимо азимутальной компоненты момента импульса p_θ , являющегося точным интегралом движе-

ния) адиабатический инвариант $I = \int p r dr$, здесь pr – радиальная компонента импульса иона. Сохранение инварианта I возможно, если вакуумное магнитное поле достаточно плавно меняется в продольном направлении. При этом период малых радиальных колебаний иона (обратный бетатронной частоте) может быть мал по сравнению с характерным временем, за которое изменяется магнитное поле в точках, где радиальная скорость иона обращается в ноль.

Рассмотрена популяция быстрых ионов с малой (по сравнению с азимутальной компонентой) радиальной компонентой скорости, $pr \ll p\theta$. Найдено приближенное выражение для адиабатического инварианта I . Для модельной функции распределения быстрых ионов (сумма функций, каждое слагаемое описывает моноэнергетическое распределение ионов с одинаковым $p\theta$ и сдвинутым гауссовым распределением по продольной скорости) найдено явное выражение для концентрации и плотности тока. В предположении, что создаваемый электронами ток мал, построена итерационная схема численного решения уравнения Греда-Шафранова. Построены примеры равновесий с различными распределениями по продольной скорости. Обнаружено, что из-за пикирования концентрации быстрых ионов в окрестности точек остановки продольный профиль магнитного поля на оси уплощается при увеличении давления быстрых ионов; при $\beta \approx 1$ в окрестности точек остановки может формироваться конфигурация с обращенным полем. Путем прямого численного интегрирования уравнений движения построены сечения Пуанкаре и показано, что даже при $\beta \approx 1$ большинство быстрых ионов действительно двигаются адиабатически.

Полученные результаты опубликованы в виде препринта на сайте arXiv.org (ссылка <http://arxiv.org/abs/2512.01780>).

ИНЖЕКТОРЫ ПУЧКОВ БЫСТРЫХ АТОМОВ

Мощные атомарные инжекторы для нагрева плазмы

В 2025 году проводились эксперименты по удлинению рабочего импульса на модернизированном атомарном инжекторе с энергией 15 кэВ и током пучка 150 А (см. Рис. 2), изготовленного ранее в рамках прикладного государственного задания "Разработка и испытание мощных систем инжекции атомарных пучков для нагрева плазмы и поддержания тока, в том числе стационарных". В описываемых экспериментах полученную проектную длительность пучка 30 мс удалось увеличить до 300 мс.

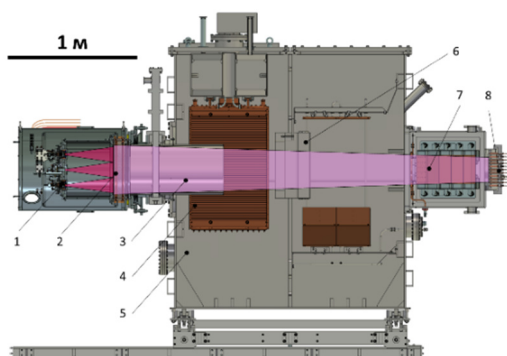


Рисунок 2. Схема инжектора для тестирования в режиме с увеличением длительности импульса пучка: 1 – дуговые генераторы плазмы; 2 – электроды ИОС; 3 – нейтрализатор; 4 – криосорбционный насос; 5 – вакуумная камера; 6 – отклоняющий магнит; 7 – раздвижной калориметр-приемник пучка; 8 – измеритель профиля мощности пучка.

Ограничение по длительности инжекции в 30 мс было обусловлено высоким энерговыделением на прикатодных узлах дуговых генераторов плазмы. Их перегрев приводил к резкому уменьшению ресурса работы генератора. В целях увеличения длительности была изменена конструкция генераторов и применены более термостойкие материалы, что позволило получить пучки длительностью до 300 мс. Ограничение в 300 мс связано с ростом температуры и деформацией электродов ионно-оптической системы (ИОС) во время работы, а также с возможностями системы питания.

При работе на электродах ИОС выделяется значительная мощность, по оценкам до 1% мощности пучка. На Рис. 3 показаны примеры моделирования нагрева и деформаций электрода ИОС. Увеличение температуры электрода составляет около 12 градусов (см. Рис.3а), и этого достаточно, чтобы изменить стрелку прогиба полусферы электрода на 0.6 мм при фиксированной границе электрода (см. Рис.3б) и более чем на порядок меньше при свободном граничном условии (см. Рис.3в). Характерное раздвоение максимумов термодформации сеток в направлении поперек щелей ИОС (рис. 3в) обусловлено изменением жесткости фиксации продольных перемычек щелей на краях сеток – более свободное граничное условие для перемычек около

центра и жесткое для коротких перемычек слева и справа от центра.

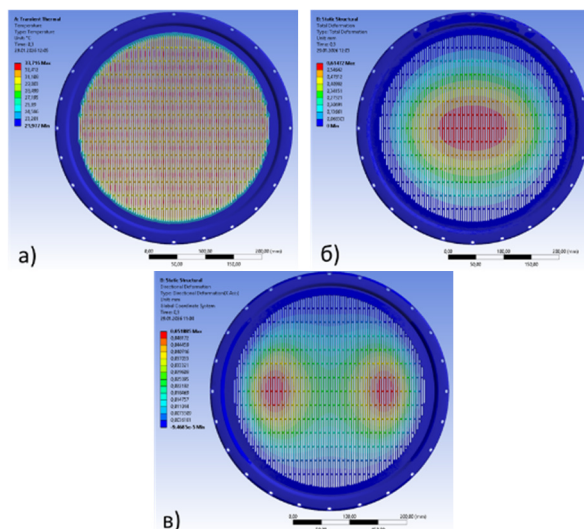


Рисунок 3. Температура (а) и деформация высоковольтного электрода (б, в) ИОС к концу 300 мс импульса при мощности пучка 1,7 МВт.

Деформации прогиба электродов прежде всего проявляются в изменении зазоров и фокусного расстояния ИОС, что приведет к ухудшению формирования пучка и его уширению в тракте. Поэтому по измерениям профиля пучка в заданной точке пучкового тракта можно обнаружить и оценить деформацию электродов ИОС.

Прямое измерение профиля пучка в течении 300 мс импульса затруднено перегревом датчиков приемника пучка. Для определения наличия деформаций ИОС в длинных импульсах пучок инжектировался сначала на мощный приемник-поглотитель, а уже затем в отдельном коротком импульсе при неостывших сетках ИОС – на измеритель профиля. Измерение динамики профиля при увеличении длительности импульса до 300 мс показало, что размер пучка менялся слабо в течение импульса, что говорит об отсутствии значимой деформации ИОС.

На Рис. 4 показаны осциллограммы тока и напряжения высоковольтного электрода по мере увеличения длительности импульса инжекции. В ходе экспериментов был получен атомарный пучок водорода мощностью 1,7 МВт и длительностью импульса 300 мс.

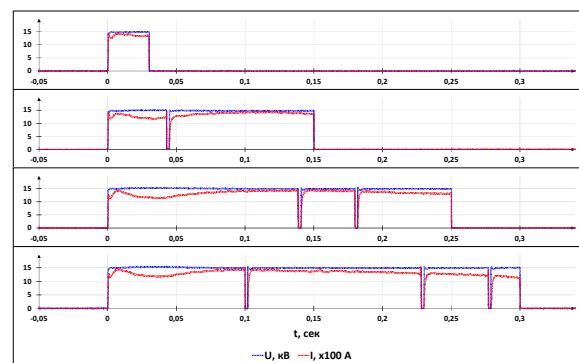


Рисунок 4. Осциллограммы пучка 15 кэВ, 125÷140 А, 30-300 мс.

Двухкоординатная доплеровская спектроскопия пучка быстрых атомов водорода для измерения угловой расходимости

Диагностика мощных атомарных пучков для нагрева плазмы сильно затруднена экстремально высокой мощностью пучка. Ситуация усугубляется с ростом длительности экспериментов УТС, а также становится востребован контроль параметров пучков в режиме реального времени. Это делает привлекательными бесконтактные оптические методы диагностики.

Критически важным параметром является угловая расходимость пучка, определяющая его транспортировку в плазменную установку.

Для измерения угловой расходимости атомарного пучка, сформированного в щелевой ИОС, предложен и применен бесконтактный метод – 2-координатная доплеровская спектроскопия. Схема эксперимента показана на Рис. 5. В ИОС с щелевой структурой угловая расходимость пучка имеет разные значения по направлениям вдоль и поперёк щелей.

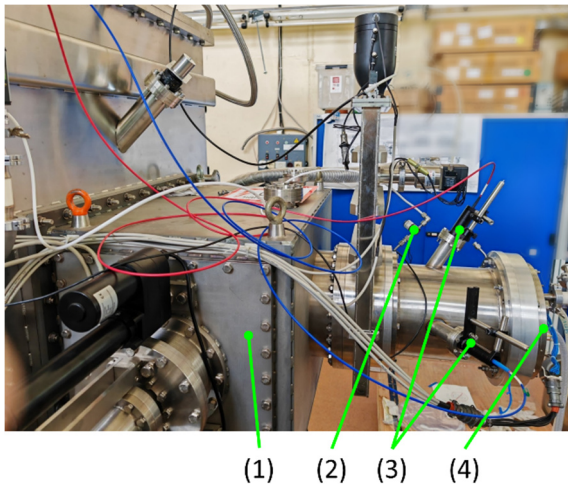


Рисунок 5. Схема эксперимента: 1 – раздвижной калориметр-приемник пучка; 2 – импульсный клапан создания газовой мишени в пучковом тракте; 3 – объективы со световодами в пучковом тракте инжектора; 4 – линейки (“крест”) вторично-эмиссионных датчиков независимого измерения угловой расходимости пучка.

Для их измерения можно использовать уширение δ смещенной линии H_α в спектре водородного пучка в плоскостях перпендикулярно и параллельно щелям ИОС.

Однако в уширение линий дают вклад несколько факторов, среди которых уширение, связанное с угловой расходимостью $\epsilon_{ИОС}$, которое трудно или невозможно выделить.

Идея 2-координатной доплеровской спектроскопии заключается в измерении разности уширения линий пучка при их наблюдении параллельно и перпендикулярно щелям ИОС. Результирующий профиль линии при воздействии нескольких факторов с хорошей точностью описывается гауссовой функцией с суммирова-

нием квадратичных факторов уширения. При измерении разностного фактора уширений $\epsilon_{ИОС}$ по 2 координатам одинаковые слагаемые сокращаются:

$$D^2 = \epsilon^2_{ИОС\perp} - \epsilon^2_{ИОС\parallel} = (\delta_x^2 - \delta_y^2) / (\Delta\lambda_0 \cdot \text{tg}\theta_0)^2,$$

что позволяет измерить поперечную угловую расходимость $\epsilon_{bx} = \sqrt{D^2 + \epsilon^2_{by}}$.

Диагностика, основанная на предложенном методе, успешно опробована на пучке для нагрева плазмы мощностью 1,7 МВт. В ходе экспериментов были оптимизированы условия наблюдения для повышения разрешения метода: угол наблюдения был увеличен с 20° до 62° , входная щель спектрометра уменьшена до 5 мкм, введена регулировка газовой мишени для повышения яркости линии. Пример спектрограммы линии H_α основной фракции пучка (атомы с полной энергией) при разных токах и угловой расходимости пучка показан на Рис. 6.

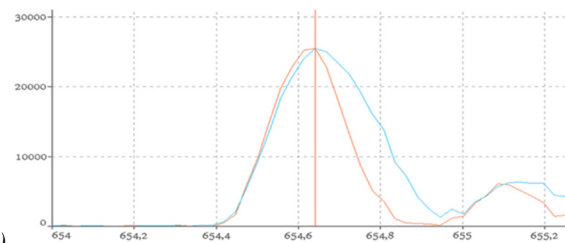


Рисунок 6. Линии наблюдения в плоскости поперек (синим цветом) и вдоль (красным цветом) щелей ИОС под углом 62° к оси пучка.

Нормированная разность квадратичных уширений D в данном примере составила 33,5 мрад, что с учетом известной расходимости 12 мрад вдоль щелей ИОС соответствует поперечной расходимости 35,6 мрад.

Метод опробован также на пучках не водородных атомов (инертных газов), при этом достаточно выбрать удобную оптическую линию в спектре пучка и оптимизировать угол наблюдения.

Получение и ускорение пучка отрицательных ионов на ускорительном стенде инжектора в защищенном зале здания 20

В 2025 году на ускорительном стенде высокоэнергетического инжектора нейтралов в защищенном зале здания ДОЛ были продолжены работы по модернизации многоапертурного 1,5 А, 120 кэВ источника отрицательных ионов (ОИ) и проведены эксперименты по ускорению пучка ОИ с током 1 А в широкоапертурном ускорителе. Были проведены и исследованы следующие усовершенствования в источнике ионов:

5-щелевой ускоряющий электрод ионно-оптической системы (ИОС) источника был заменен на электрод с 25 круглыми апертурами. Главным эффектом такой замены явилось уменьшение угловой расходимости получаемого пучка.

Модернизирована конструкция высокочастотного генератора плазмы источника (ВЧ драйвера):

- на заднем фланце ВЧ драйвера установлены магниты с квадрупольной конфигурацией магнитного поля, что увеличило удержание плазмы в драйвере,

увеличило ее поток на эмитирующий ОИ плазменный электрод и привело к росту вытягиваемого тока ОИ.

- для регулировки температуры защитного экрана ВЧ драйвера установлена система термостабилизации, обеспечивающая прокачку дистиллированной воды с регулируемой температурой. Нагрев экрана позволил предотвратить накопление цезия в полостях драйвера и увеличил стабильность работы ВЧ разряда.

Перечисленные изменения позволили получить пучок ОИ с расчетными параметрами 1,5 А, 119 кэВ, 6 с при мощности ВЧ разряда 53 кВт, как это проиллюстрировано на осциллограммах Рис. 7.

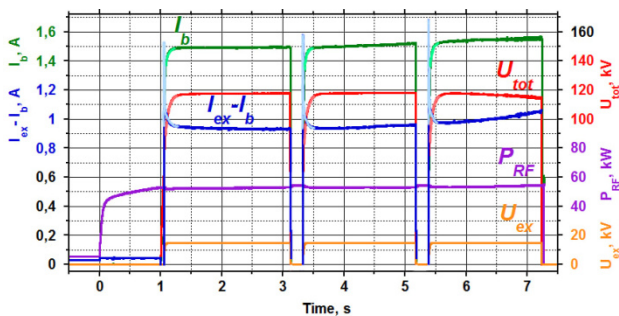


Рисунок 7. Осциллограммы импульса источника длительностью 6 сек с получением 1,5 А, 119 кэВ пучка ионов H^- . Пробои ИОС на третьей и пятой секундах импульса успешно обработаны системой защиты источника.

Осциллограммы Рис. 7 также демонстрируют эффективность работы защиты источника с кратковременным выключением вытягивающего и ускоряющего напряжений при эпизодических пробоях ИОС на 3 и 5 секунде импульса.

На Рис. 8 показан поперечный горизонтальный размер пучка на расстоянии 2,5 м от источника, измеренный передвигаемым цилиндром Фарадея при различных вытягивающих напряжениях на ИОС.

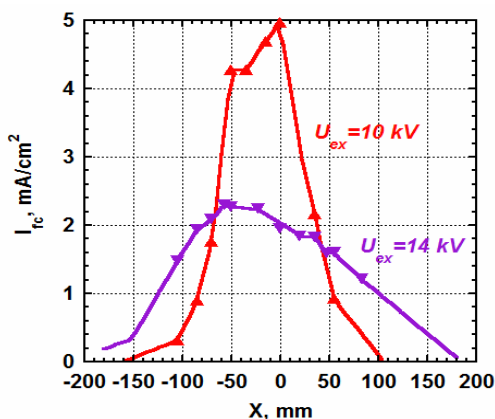


Рисунок 8. Поперечный горизонтальный профиль пучка ионов H^- с энергией 112 кэВ при транспортировке на расстояние 2 м от источника при вытягивающем напряжении 10 и 14 кВ. Красная кривая – $U_{ex}=10$ кВ, $I_b = 1$ А, $I_{FC} = 0.76$ А, синяя – $U_{ex}=14$ кВ, $I_b = 1.5$ А, $I_{FC} = 0.6$ А. Входное окно цилиндра Фарадея $\varnothing 170$ мм.

При увеличении вытягивающего напряжения до 14 кВ увеличивается ток пучка, ускоряемого из источника (I_b с 1 А до 1,5 А), однако увеличивается и его размер на расстоянии 2 м (FWHM с 96 мм до 215 мм), при этом максимальная плотность тока пучка снижается с 5 mA/cm^2 до 2,4 mA/cm^2 . Оптимальным для транспортировки и ускорения пучка является вытягивающее напряжение 10 кВ. При токе пучка из источника 1 А и вытягивающем напряжении 10 кВ ток пучка на цилиндр Фарадея с входным окном $\varnothing 170$ мм, установленным на расстоянии 2 м от источника, составил $I_{FC}=0,76$ А, тогда как при вытягивающем напряжении 14 кВ ток на цилиндр Фарадея составил всего 0,6 А. Основная часть потерь пучка (24%) при транспортировке на расстояние 2 м вызвана обдиркой ОИ на выходящем газе, давление которого в LEBT при откачке крионасосом со скоростью откачки 100 m^3/c составило $1 \cdot 10^{-3}$ Па.

Была отработана процедура прицеливания пучка на ось ускорителя, осуществляемая регулировкой тока катушек поворотных магнитов Mag_1 и Mag_2 , расположенных в вакуумной камере LEBT (low energy beam transport), с регистрацией проводимого пучка вторично-эмиссионными датчиками (SED), расположенными на выходе LEBT. Процедура такого прицеливания проиллюстрирована на Рис. 9. В верхней части Рис. 9 показано изменение токов верхнего (top), правого (right), нижнего (bot) и левого (left) вторично-эмиссионных датчиков при возрастании тока в первом магните Mag_1 при фиксированном токе второго магнита Mag_2 , в нижней части Рис. 9 – при возрастании тока во втором магните при фиксированном токе первого. Оптимальному положению и углу ввода пучка в ускоритель соответствует точка совпадения токов на правом и левом датчиках SED: в случае Рис. 9 для тока первого магнита Mag_1 110 А, и тока второго магнита Mag_2 185 А.

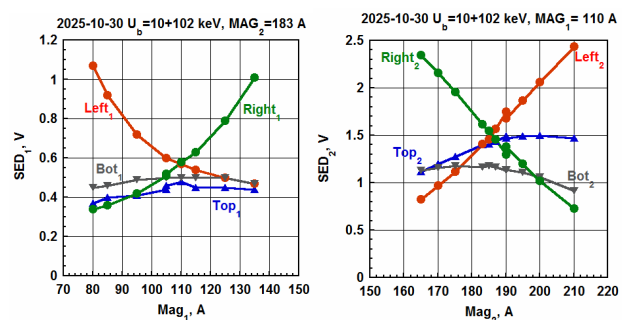


Рисунок 9. Процедура прицеливания 1А, 112 кэВ пучка на ось ускорителя. Вверху – изменение токов на вторично-эмиссионные датчики, установленные на выходе LEBT при увеличении тока первого магнита, внизу – тоже при увеличении тока второго магнита. Оптимальное прицеливание – при равенстве токов левого и правого датчиков.

В ускорительных экспериментах 2025 года были задействованы первые шесть зазоров девятиэлектродной ускорительной трубки по схеме подключения, показанной на Рис. 10, и были проведены работы по транспортировке через LEBT и ускорению выходящего из

источника пучка отрицательных ионов током 1,1 А и энергией 112 кэВ.

Как показано на схеме Рис. 10, в процессе экспериментов регистрировались следующие токи: I_b – ток пучка отрицательных ионов на выходе из источника, I_p – полный ток, поступающий на фланец и входное окно первого электрода ускорителя (ток «платформы», т.е. ток первой ступени высоковольтного источника питания), I_{HV} – ток на выходе из ускорителя (ток в цепи последней ступени высоковольтного источника, включающий в себя ускоряемый пучок и токи оседания на 7-9 электроды ускорителя).

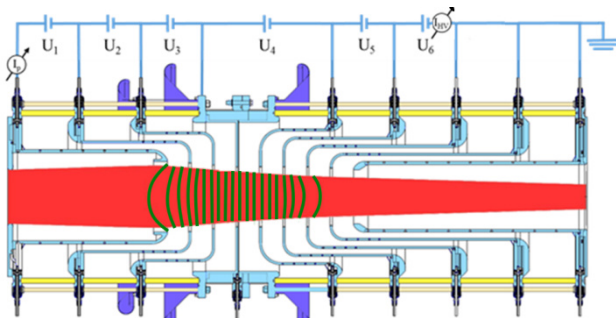


Рисунок 10. Схема последовательного подключения шести высоковольтных выпрямителей к электродам ускорительной трубки. Измерение токов I_p и I_{HV} в цепях ускоряющих электродов использовалось для определения тока на входе и выходе ускорителя. Красные линии – траектории ускоряемых ионов без учета пространственного заряда пучка с входным током 1 А, энергией 120 кэВ (расчет кодом IBSimu).

Осциллограммы токов в ускорителе при ускорении выходящего из источника 1,1 А, 110 кэВ пучка показана на Рис. 11 (энергия ускоренного пучка 410 кэВ). Как видно из Рис. 11, 70 % пучка ($I_p = 0,75$ А) было проведено через LEVT на вход ускорительной трубки, а до энергии 410 кэВ ускорен пучок интенсивностью $I_{HV} \sim 0,7$ А. Ускоренный ток 0,7 А может включать в себя электроны обдирки и вторичные электроны, образующиеся на кромках электродов.

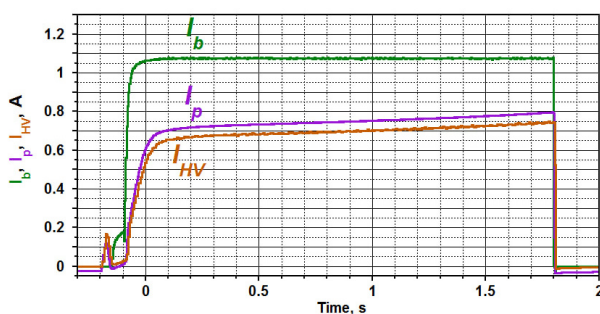


Рисунок 11. Осциллограммы тока из источника I_b , тока на вход ускорителя I_p и тока ускоренного пучка I_{HV} , полученные в импульсе длительностью 1,8 сек при энергии ускоренного пучка 410 кэВ.

Измерения мощности и тока ускоренного пучка (ионов и атомов перезарядки) производились с помощью калориметра, охлаждаемого прокачкой дистиллированной воды и датчиков температуры воды на вы-

ходе калориметра. На Рис. 12 показаны осциллограммы датчиков температуры воды, установленных на выходе левой и правой створок калориметра при охлаждении потоком воды 260 л/мин для пучка длительностью 10 сек.

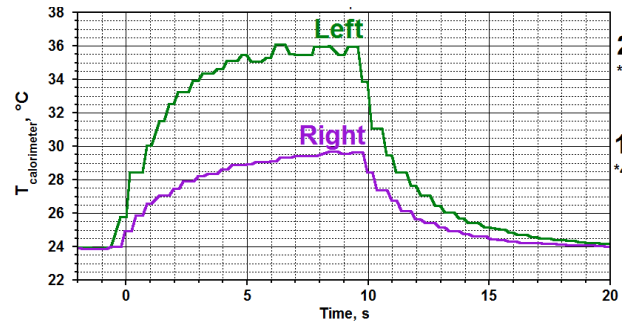


Рисунок 12. Температура воды, измеренная датчиками на выходе левой и правой створок калориметра в импульсе длительностью 10 сек с пучком ОИ током 0,7А, ускоряемым до энергии 410 кэВ.

Как видно из Рис. 12, температура воды в створках калориметра выходит на стационарный уровень 30-36 °С через ~7-8 сек от начала импульса. При энергии частиц пучка 410 кэВ приведенной мощности теплоотдача соответствует поток частиц на калориметр эквивалентным током 0,4 А (~0,27 А слева, и ~0,13 А – справа), что составляет ~57% от ускоряемого тока $I_{HV} = 0,7$ А. Проведенный к калориметру пучок в основном состоит от отрицательных ионов, и на ~4 % – из атомов перезарядки, получаемых при обдирке ОИ на остаточном газе на 4,5 м участке тракта высокой энергии.

Разработка ионного источника каспового типа

В настоящее время в имплантерах используются ионные источники Фримана и Бернаса. Они работают в магнитном поле, создаваемом внешним магнитом, вес которого растет в кубической зависимости от ширины ленточного пучка и может достигать нескольких сотен килограмм. Расположение такой конструкции под потенциалом в сотни киловольт и даже мегавольта становится проблематичным. Использование мультипольных магнитных полей в ионном источнике открывает новые возможности. В частности, одной из простейших магнитных конфигураций является квадрупольная, так называемый «касп». В ионном источнике с такой конфигурацией возможно формирование ленточного пучка.

В ИЯФ СО РАН разработан и исследован такой источник, формирующий ленточный пучок. Он обеспечивает высокую равномерность распределения плотности ионного тока вдоль ширины пучка и высокую временную стабильность. Конструкция источника сочетает в себе модифицированную ловушку Пеннинга с магнитным каспом, а её магнитная система позволяет расширять линейные источники до пучка метрового масштаба ширины.

На Рис. 13 и Рис. 14 приведены фотографии источника с ионно-оптической системой и источника плазмы, а на Рис. 15 показана схема каспового ионного источника с триодной ионно-оптической системой. Поперечное сечение касповой ячейки с магнитной системой показано на Рис.16.

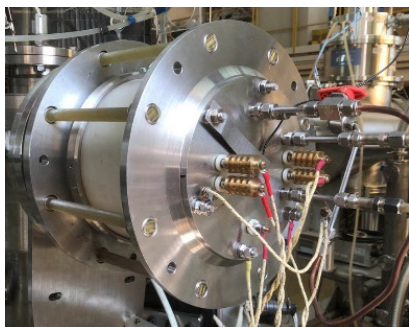


Рисунок 13. Касповый ионный источник на стенде.

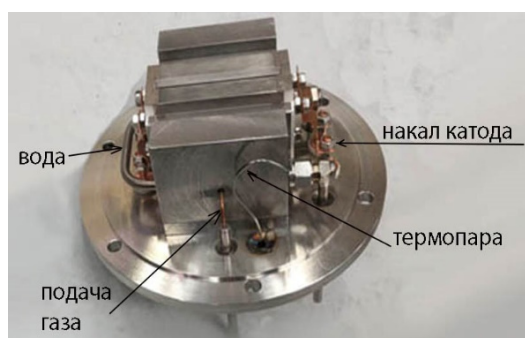


Рисунок 14. Источник плазмы каспового ионного источника.

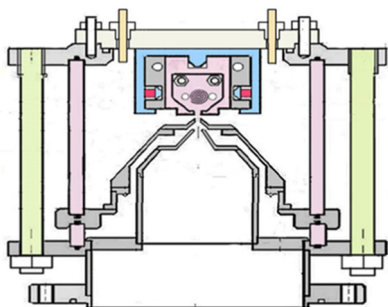


Рисунок 15. Схема каспового ионного источника с ионно-оптической системой.

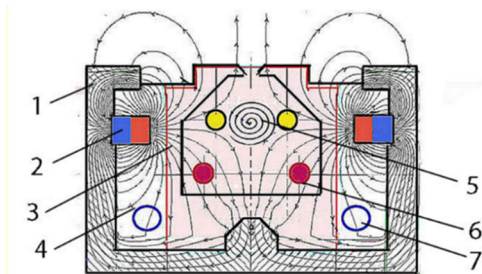


Рисунок 16. Поперечное сечение касповой ячейки с магнитной системой: 1 – магнитное ярмо, 2 – постоянные магниты, 3 – керамический держатель катодов, 4 – газоразрядная камера, 5 – катод, 6 – анодные стержни, 7 – отверстия для водяного охлаждения.

Газоразрядная камера с внутренним поперечным сечением около 10 см^2 изготовлена из немагнитной нержавеющей стали. На ее внешних боковых поверхностях имеются длинные прорезы, в которые вставлены постоянные магниты. Камера имеет каналы для водяного охлаждения. Охлаждаемый корпус окружен магнитной системой, включающей в себя постоянные магниты из Nd-Fe-B для создания приблизительно квадрупольного поля, равномерно проходящего по всей длине газоразрядной камеры.

Магнитное ярмо окружает дуговую камеру с трех половиной сторон, обеспечивает дискретный южный полюс у основания и два элементарных слабых южных полюса по обе стороны от щели для выхода пучка. Это создает квадрупольное поле со значительной секступольной составляющей. Нулевое значение близко к выходу газоразрядной камеры, а максимальное поле – вблизи анодов.

В местах максимального поля по всей длине дуговой камеры расположены металлические стержни диаметром 4 мм при анодном напряжении от +70 до 130 В. Они образуют анод, а все остальные поверхности имеют потенциал катода. В конструкции установлены два термоэмиссионных катода, расположенные в противоположных торцах газоразрядной камеры. Термоэмиссионные катоды изготовлены из чистого вольфрама. Держатели катодов закреплены на пластинах из жаропрочной высокоглиноземной керамики. На Рис. 17 показана фотография катодного узла.



Рисунок 17. Вольфрамовый катод на алундовой пластине.

Одним из важнейших параметров таких источников является равномерность эмиссии ионов вдоль щели. С помощью профилометра была измерена эмиссия ионов вдоль щели (см. Рис.18).

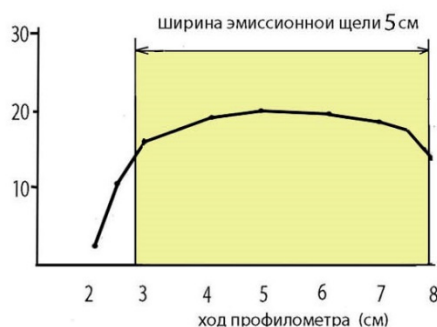


Рисунок 18. Распределение плотности тока вдоль щели, измеренное профилометром.

По результатам измерений получено, что ленточный пучок ионов аргона из каспового источника имеет плотность тока вдоль ширины пучка ~ 10 мА/см.

Также был разработан метод измерений, позволяющий наблюдать динамику пучка во времени и задать режим работы источника, обеспечивающий бесшумный ионный пучок с равномерным распределением плотности.

Идея метода состоит в том, что в приёмной мишени из пучка вырезаются 32 струйки ионов круглого сечения с диаметром около 1 мм и направляются на измерительную металлокерамическую линейку длиной 70 мм, состоящую из 32 ламелей, сигнал с которых поступает на регистрирующую аппаратуру.

При энергии 6 кэВ получена эмиссия ионов ~ 10 мА/см. Для получения высокой однородности распределения тока вдоль ширины щели осуществляется дополнительный контроль, который заключается в подборе тока накала катода и тока дуги.

Исследования каспового ионного источника на стенде показали, что он работает в широком диапазоне режимов питания.

ВЧ ПЛАЗМЕННЫЕ ИСТОЧНИКИ НА ОСНОВЕ ГЕЛИКОННОГО РАЗРЯДА ДЛЯ МАТЕРИАЛОВЕДЧЕСКИХ ИССЛЕДОВАНИЙ

Введение

Для развития термоядерной энергетики необходимы материаловедческие исследования по взаимодействию плазмы с материалами стенок термоядерного реактора. Проблема первой стенки требует проведения симуляции плазменных нагрузок в линейных материаловедческих установках. Источник плазмы для таких установок должен отвечать критериям эффективности вкладываемой энергии по отношению к создаваемому плазменному потоку, стационарности режима генерации плазмы, а также чистоте плазмы. В частности, геликонные источники плазмы все чаще используются на материаловедческих установках с высоким и средним потоком мощности на мишень.

В лаб. 9-0 ведутся исследования на экспериментальном стенде с геликонным ВЧ разрядом, которые можно разделить на два направления.

1) Исследование геликонного разряда и повышение эффективности генерации плазмы;

2) Материаловедческие исследования взаимодействия плазмы и термостойких материалов первой стенки термоядерных установок (ТЯУ).

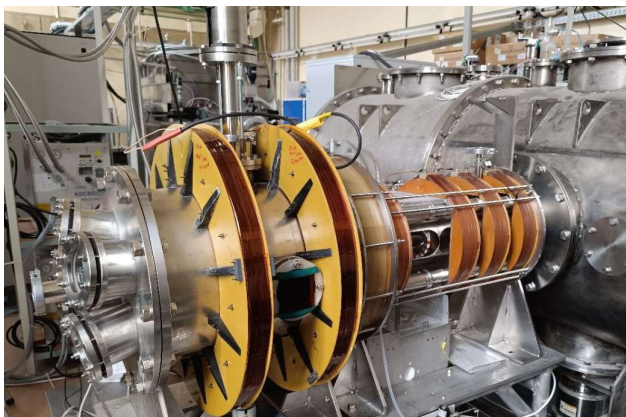


Рисунок 1. Фото установки ГИМП-1.

Модернизация магнитной системы установки ГИМП-1

Параметры установка ГИМП-1 (Геликонный Источник для Материаловедческих Приложений) показаны в табл. 1. Ранее магнитная система источника состояла из пяти соленоидов (рис. 2). В целях использования расширителя установки для облучения материалов плазмой, в 2025 году был выполнен проект по конструированию и монтажу двух дополнительных катушек для фокусировки поля в расширителе. Далее были проведены эксперименты по измерению профилей плотности в расширителе для новой магнитной конфигурации. Наибольшая плотность плазмы достигается для конфигурации сходящегося поля, когда ток есть

только в катушках расширительного объема. В расширителе аксиальное распределение плазмы однородно на масштабе 20-30 см, что упрощает использование источника для материаловедческих исследований. Распределение по радиусу несимметрично относительно оси при высокой мощности (>3 кВт), размер плазмы, где плотность квазиоднородна (перепад плотности <30%) ~40 мм.

Таблица 1. Параметры установки ГИМП-1.

Параметры	Значение
Частота, МГц	13.56
Мощность, кВт	до 25
Давление газа, мТорр	8-50 мТорр
Магнитное поле, Гс	50-1000 Гс
Длительность разряда, с	0.5-20
Плотность плазмы, см ⁻³	< 3·10 ¹³
Электронная температура, эВ	5-15
Энергия ионов (смещение), эВ	<300
Диаметр плазмы, см	4-5
Ионный поток, м ⁻² с ⁻¹	10 ²¹ -10 ²³

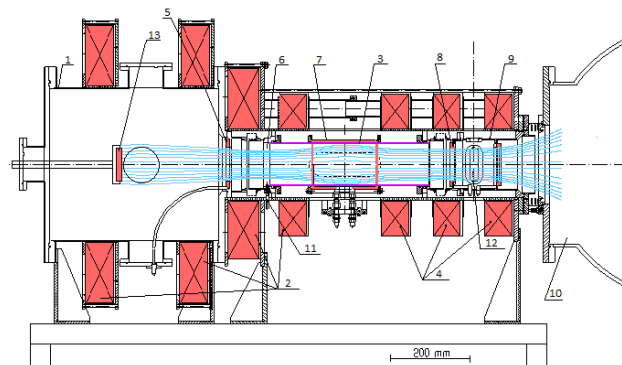


Рисунок 2. Схема ГИМП-1: 1 - расширительный объем; 2, 4 - катушки магнитного поля; 3 - кварцевая камера (длина 400 мм, внешний диаметр 108 мм, толщина стенки 2.5 мм); 5, 8 - лимитеры; 6 - импульсный клапан напуска газа; 7 - геликонная антенна; 9 - диагностическая камера; 10 - вакуумный объем стенда; 11 - поджиг; 12 - ось ввода ленгмюровского зонда (расстояние до центра антенны 326 мм), 13 - образец на подвижке.

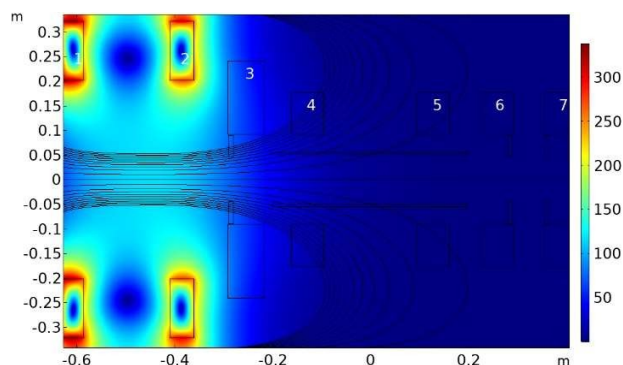


Рисунок 3. Распределение внешнего магнитного поля в геликонном источнике в конфигурации со сходящимся магнитным полем ($I_1=I_2=-7$ А, $I_{3,7}=0$ А).

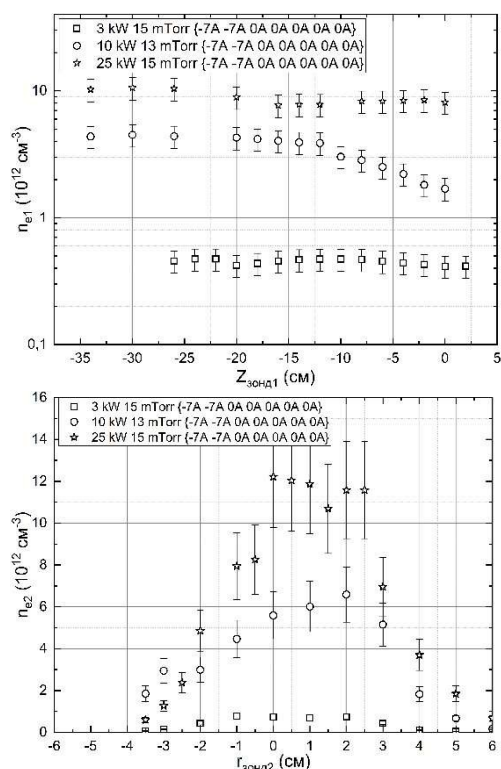


Рисунок 4. Аксиальное и радиальное ($z=-20$ см) распределение плотности в источнике в сходящейся конфигурации при разной мощности генерации плазмы ($z=0$ соответствует плоскости лимитера).

Взаимодействие плазмы с поверхностью материалов

Основная задача для разрабатываемых источников – материаловедческие исследования по плазменному воздействию на различные материалы, которые могут быть использованы в качестве первой стенки ТЯУ. В 2025 году на установке ГИМП-1 были проведены первые успешные эксперименты по облучению водородной плазмой высокотемпературных керамик.

Для облучения мишени был разработан мишенедержатель, представленный на рис. 5 (а). Зажимы выполнены из нитрида бора (BN) 1, являющегося изолятором для исключения вытягивания дополнительного тока. Мишень 3 имеет контакт с металлической подложкой 2 для подачи смещения и контакта термодатчика 4. Конструкция находится на развязанной штанге, которую можно двигать по оси z . Дополнительно температура образца контролируется с помощью ИК съемки. Поток ионов измерялся с помощью измерения токов на образец двумя способами - с помощью шунта и датчика Холла (рис. 5 (б)). При исследовании материала весьма информативным является спектроскопический анализ продуктов эрозии. В эксперименте использовался спектрометр Thorlabs CCS200 с областью чувствительности 200-1000 нм и спектральным разрешением <2 нм и с минимальной длительностью экспозиции 10 мс.

На гелийном источнике плазмы для материаловедческих применений (ГИМП-1) проведены эксперименты по облучению карбида бора (В4С), изготовленного методами горячего прессования и спекания,

ионами водородной плазмы с флюенсом и потоками, соответствующими нагрузке первой стенке при воздействии плазмы в термоядерном реакторе. В эксперименте варьировались следующие параметры: энергия ионов (10-200 эВ), ионный поток (10^{21} - 10^{23} м⁻²с⁻¹), ионный флюенс (10^{23} - 10^{25} м⁻²). При облучении В4С достигнут флюенс 10^{25} м⁻² при потоке $(5.2 \pm 1.9) \cdot 10^{21}$ м⁻²с⁻¹ ионами водорода с энергией 25 эВ (рис. 6). Определен коэффициент распыления В4С: $Y = (2.79 \pm 0.43) \times 10^{-3}$ атом/ион.

При варьировании потока на образец в диапазоне 10^{21} - 10^{23} м⁻²с⁻¹ обнаружена высокая вероятность образования униполярных дуг при потоке выше 10^{22} м⁻²с⁻¹. При потоках ниже границы дугообразования не наблюдается существенного изменения морфологии поверхности материала и его атомного состава, который был определен при анализе поверхности образцов сканирующим электронным микроскопом, результат которого показан на рис. 8.

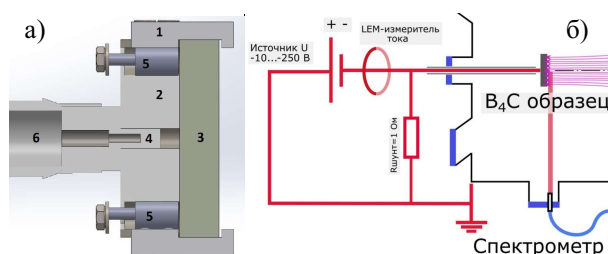


Рисунок 5. а) Схема мишенедержателя: 1 - фиксаторы из NB, 2 - подложка из 12X18N10, 3 - образец, 4 - контакт термодатчика, 5 - прижимные болты, 6 – штанга; б) Схема подачи смещения и измерения ионного тока, расположение спектрометра.

В эксперименте измерялись спектральные линии во время облучения плазмой (рис. 7). Среди наиболее важных зафиксированных линий: CH, CI, CII, VI, VO, а также множество линий Fe, Cr и Ni от нержавеющей подложки.

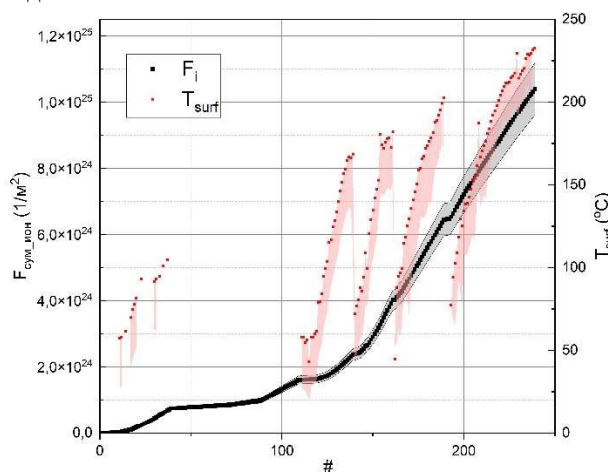


Рисунок 6. Флюенс, набранный на мишени В4С и температура на поверхности образца.

Возможно несколько сценариев эрозии карбида бора: химическое травление и физическое распыление. По интенсивности линии CH можно полагать, что хи-

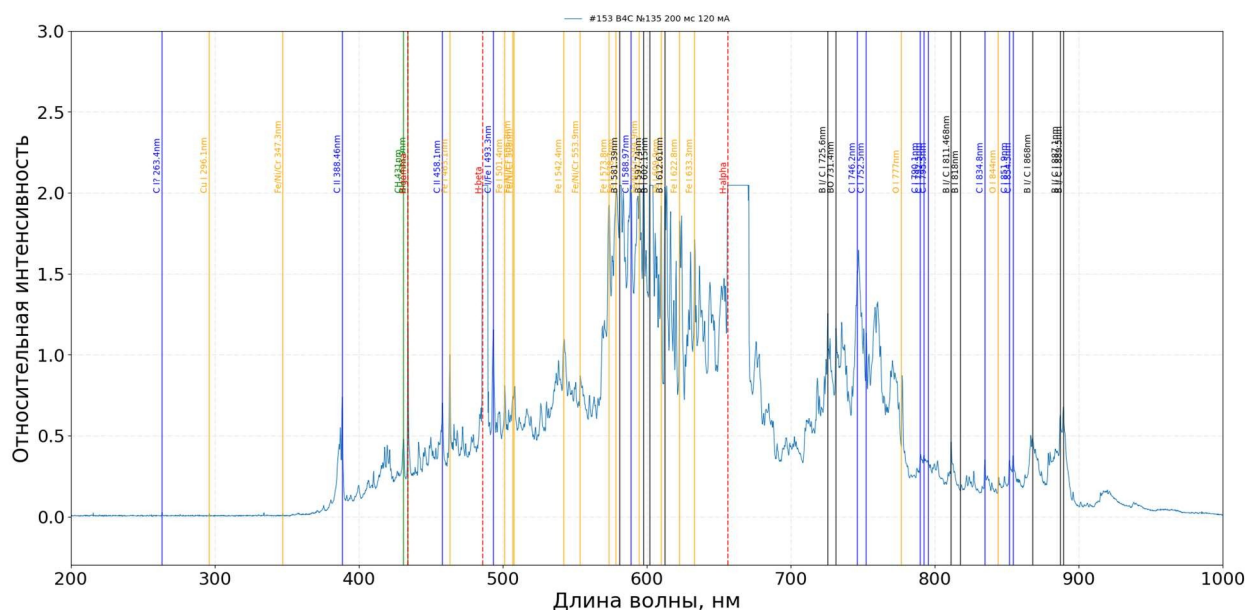
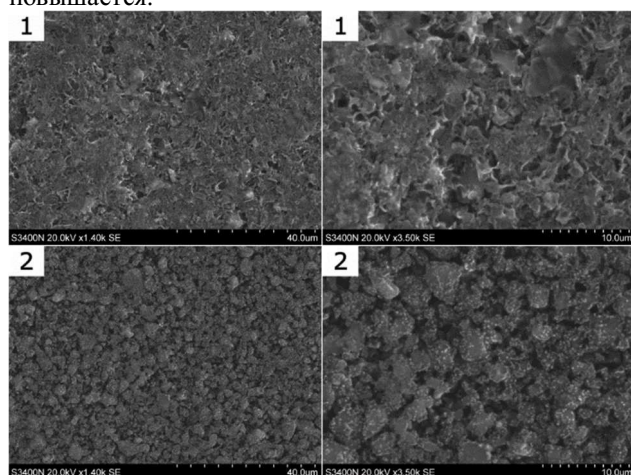


Рисунок 7. Спектр карбида бора при облучении водородной плазмой.

мическое травление не является существенным механизмом распыления для B_4C , поскольку, во-первых, по сравнению с линиями углерода и бора эта линия значительно слабее. Во-вторых, борных гидридов в эксперименте не обнаружено, что говорит об отсутствии удаления бора за счет образования связей с водородом. В-третьих, по результатам СЭМ сканирования не обнаружено заметного отклонения от стехиометрического состава B_4C , значит на поверхности не образуется углеродного слоя (этот факт согласуется с показаниями спектроскопии, поскольку линия С не превосходит линии В), а значит вероятность химического травления не повышается.

Рисунок 8. Фото образца B_4C , полученные на сканирующем электронном микроскопе. 1 – область, защищенная от плазменного воздействия; 2 – центральная область образца, подвергавшаяся плазменному воздействию.

Это позволяет сделать вывод о том, что: 1) на поверхности с большой вероятностью не образуется углеродных пленок (что критически важно в вопросе накопления изотопов водорода); 2) эрозия карбида бора идет за счет физического распыления, что значительно упрощает предсказуемость скорости распыления и эрозии материала, которая будет зависеть в большей степени от энергии ионов.

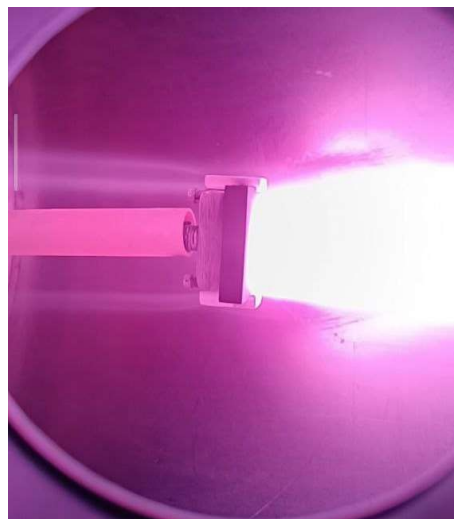


Рисунок 9. Облучение карбида бора водородной плазмой (режим 5 кВт).

РАБОТА КОМПЛЕКСА ВЭПП-2000 В 2025 ГОДУ

Набор интеграла светимости на ВЭПП-2000 в соответствии с планом детекторов КМД-3 и СНД

Физическая программа на коллайдере ВЭПП-2000 в 2025 году подразумевала набор интеграла светимости 32 пб^{-1} на каждый детектор в диапазоне энергий пучка 350–410 МэВ при сканировании энергией вниз.

Экспериментальный сезон начинался в октябре 2024 года с подготовки ускорительного комплекса к работе. Параллельно с запуском инжекционного комплекса (ИК) на комплексе ВЭПП-2000 идет включение различных подсистем (система питания ведущего поля БЭП и ВЭПП-2000; система питания квадрупольных линз и слаботочные коррекции; системы импульсного питания и системы впуска выпуска; ускоряющие ВЧ системы; все системы диагностики пучка; инженерные системы охлаждения и вентиляции и др.), что занимает от нескольких дней до недели. После получения пучков заряженных частиц от ИК начинается работа по обезгаживанию вакуумной камеры бустера и коллайдера синхротронным излучением, когда синхротронное излучение, падая на стенки камеры, нагревает их и стимулирует выделение адсорбированных газов, которые затем откачиваются, что позволяет достичь и поддерживать сверхвысокий вакуум во время работы на светимости. В сезоне 2024–2025 года в процессе обезгаживания был набран интеграл тока $29,5 \text{ А}\cdot\text{ч}$ (поровну для электронного и позитронного пучков), что позволило улучшить вакуумные условия почти на порядок в новом сезоне. В процессе обезгаживания заполняют несколько последовательных сепаратрис в кольце коллайдера, чтобы увеличить общую интенсивность синхротронного излучения (СИ). На Рис. 1 показано распределение заряда по сепаратрисам (всего 14) измеренное на датчике положения пучка, работающего в стробоскопическом режиме при полном суммарном токе 450–500 мА.

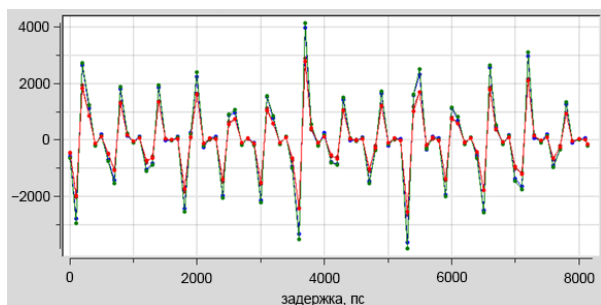


Рисунок 1. Относительная интенсивность сгустков в кольце коллайдера в режиме обезгаживания.

После окончания обезгаживания камеры коллайдера ВЭПП-2000 начался экспериментальный заход по столкновению электронов и позитронов на энергии 410 МэВ, который продлился до начала декабря 2024 года.

Существенной особенностью работы в этот период являлась минимизация фоновых условий для работы детекторов КМД-3 и СНД при работе со значительной разностью интенсивностей сталкивающихся сгустков (на Рис. 2 интенсивность позитронного пучка в 1,5 раза выше, чем интенсивность электронного пучка).

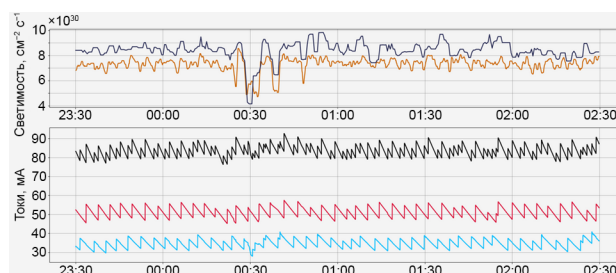


Рисунок 2. Пример работы комплекса ВЭПП-2000 на энергии 400 МэВ при наборе интеграла светимости $0,3 \text{ пб}^{-1}$ за сутки.

С начала декабря 2024 г. для перекрёстной проверки результатов КМД-3 было применено изменение направления вращения пучка на ВЭПП-2000, что эквивалентно развороту детектора и позволяет оценить систематические эффекты от неоднородности эффективности. Наиболее чувствительным индикатором служит асимметрия по зарядам в процессе $e^+e^- \rightarrow \pi^+\pi^-$, которая должна менять знак при изменении направления вращения пучков. Для реализации изменения направления вращения пучка пришлось полностью изменить полярность магнитной структуры коллайдера, за исключением сверхпроводящих соленоидов финального фокуса, модифицировать каналы транспортировки пучка и обновить управляющее программное обеспечение. Указанный режим работы планировалось использовать в течение 1 рабочего сезона работы установки.

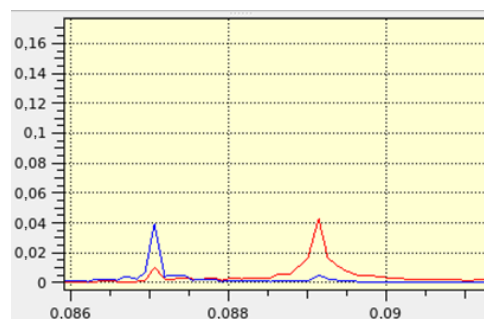


Рисунок 3. Спектр частот поперечных бетатронных колебаний пучка в режиме столкновения на энергии 380 МэВ.

В этот период выбор рабочей точки бетатронных колебаний оказался критически для достижения высокого уровня светимости. Экспериментально выявлено драматическое увеличение фона детекторов даже при небольших (порядка нескольких тысячных) смещениях рабочей точки от оптимальной. При работе коллайдера в режиме полного разворота направления вращения сталкивающихся сгустков применяется режим работы коллайдера с частотой бетатронных колебаний

вблизи значения 0,088 (см. Рис. 3). Тогда как при работе в этом же диапазоне энергий (350–400 МэВ) в предыдущие годы был выбран и хорошо оптимизирован режим работы с частотой бетатронных колебаний вблизи 0,138.

В отличие от предыдущего периода работы фоновые условия детекторов оказались минимальны при ровно противоположном соотношении интенсивностей сталкивающихся сгустков (см. Рис. 2. и Рис. 4, на последнем интенсивность позитронного пучка в 1,5 раза меньше, чем интенсивность электронного пучка).

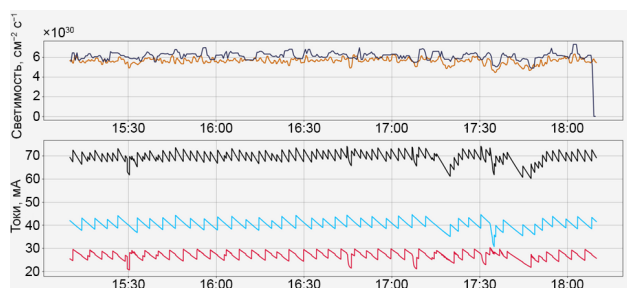


Рисунок 4. Пример работы комплекса ВЭПП-2000 на энергии 380 МэВ после смены направления вращения сталкивающихся сгустков.

Данное различие в интенсивностях сталкивающихся сгустков не удалось в полной мере объяснить, но, по-видимому, есть существенное различие в продольной динамике для разных пучков — электронного и позитронного, что потенциально может быть связано с отличием продольного импеданса (для разных направлений вращений) ВЧ резонатора после ремонта (с заменой ввода мощности в ВЧ резонатор, после его электрического пробоя в 2022 г.). Это различие могло быть усилено вследствие больших неустраняемых искажений орбиты пучка в ВЧ резонаторе (см. участок 3М2–4М2 на Рис. 5) после смены направления вращения сгустков. В ранние годы эксплуатации коллайдера ВЭПП-2000 было экспериментально показано, что требуется аккуратная выставка сверхпроводящих соленоидов финального фокуса для того, чтобы неточности в развороте не приводили к очень большим (порядка 3–5 мм) неустраняемым искажениям орбиты пучка. В указанный момент эксплуатации коллайдера перевыставка соленоидов не производилась ввиду значительной длительности и сложности этой процедуры.

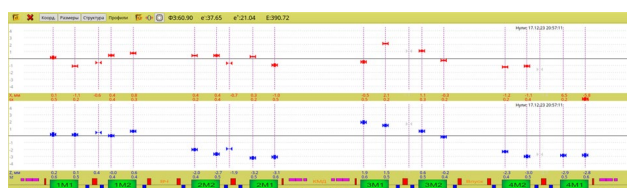


Рисунок 5. Горизонтальная (вверху) и вертикальная орбита пучка на энергии 380 МэВ после смены направления вращения сталкивающихся сгустков.

В работе комплекса ВЭПП-2000 в 2024–2025 году значительных неисправностей или остановок комплекса на длительный срок не было. Стабильная и продуктивная работа ИК, который поставлял в избытке

электроны и позитроны, способствовала работе в режиме предела по эффектам встречи, даже с не всегда оптимальной полной эффективностью их доставки на ВЭПП-2000. Это позволило достичь максимальный суточный интеграл, но главное — позволило оператору постоянно оптимизировать машину в сторону повышения пиковой светимости.

Результаты работы комплекса ВЭПП-2000 приведены на Рис. 6, Рис. 7 и Рис. 8 ниже для детектора КМД-3. Данные с детектора СНД при различных энергиях отличаются не более чем на 5–10% и обусловлены эффективностью регистрации, производительностью считывающей электроники разных подсистем детектора, а также незначительным отличием размеров сталкивающихся сгустков (в детекторе КМД-3 присутствует свой собственный соленоид, создающий дополнительную фокусировку, а значит меньший размер пучка).

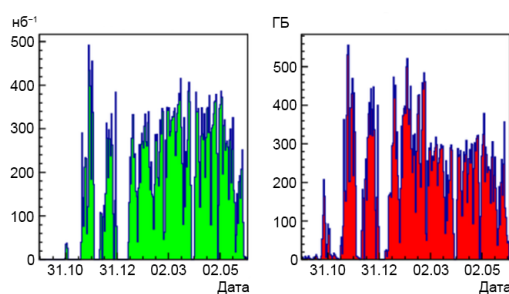


Рисунок 6. Суточные интеграл светимости (слева) и объем данных (справа).

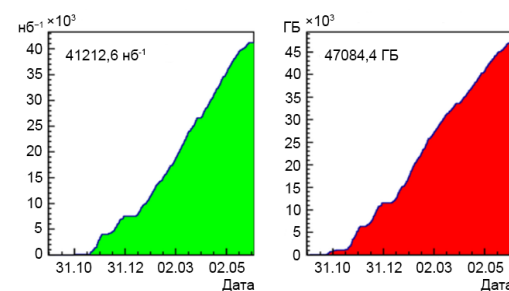


Рисунок 7. Суммарные интеграл светимости (слева) и объем данных (справа).

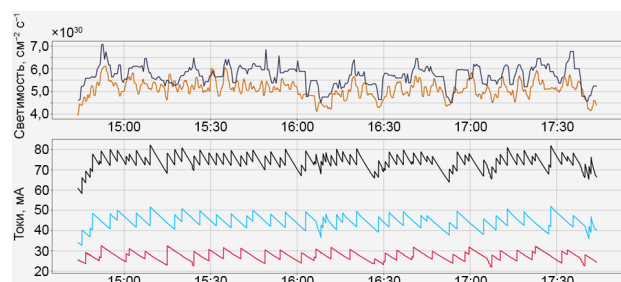


Рисунок 8. Пример работы комплекса ВЭПП-2000 на энергии 390 МэВ при наборе интеграла светимости 0,4 пб⁻¹ за сутки.

Набор данных стартовал успешно, после начала работы оперативно был достигнут хороший темп

набора интеграла светимости, порядка $0,3 \text{ пб}^{-1}/\text{сутки}$. Это позволило до конца года выполнить не менее 110% программы, запрошенной детекторами.

Величины средних светимостей по 10% лучших заходов для всех энергий за 2025 экспериментальный год представлены на Рис. 9. Общий интеграл данных, набранных в сезоне 2025, к сожалению, не превысил показателей прошлого года, однако полученные интегралы входят в четверку лучших интегралов за все сезоны. В целом, за последний сезон набраны интегралы светимости: КМД-3 — 41 пб^{-1} , СНД — 37 пб^{-1} .

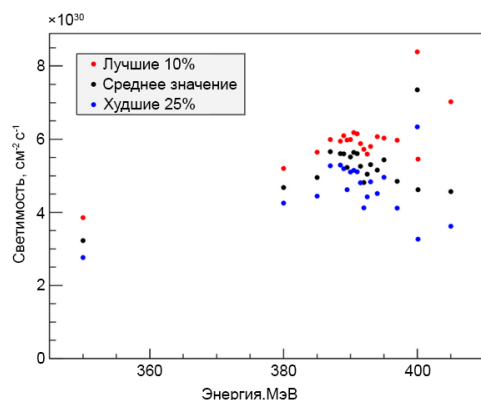


Рисунок 9. Величины средних светимостей по 10% лучших за 2025 год.

После окончания основной программы работ коллайдера по набору интеграла светимости на детекторах СНД и КМД-3 в соответствии с планами на коллайдере проводилась экспериментальная работа по изучению влияния близости бетатронных резонансов (вертикального движения в первую очередь) на величину потери степени спиновой поляризации при его пересечении, а также по прецизионному измерению энергии пучка.

Экспериментальный сезон 2025 года на коллайдере ВЭПП-2000 приостановлен в связи с летней профилактикой в середине июня и продолжился в октябре 2025 года.

Развитие методов оптической диагностики на ВЭПП-2000

Одним из важнейших аспектов успешного функционирования электрон-позитронного коллайдера ВЭПП-2000 является оптическая диагностика пучка с использованием синхротронного излучения (СИ), повторяющего профиль распределения частиц в пучке. Всего на коллайдере имеется 16 выводов оптической части спектра СИ, по два вывода из каждого из восьми поворотных магнитов (см Рис. 10).

Для рутинного наблюдения за пучком используются ПЗС-камеры (поперечный профиль пучка) и диссекторы (продольный профиль пучка): по 8 камер и по одному диссектору на каждый из сортов частиц. Регистрация размеров пучков позволяет проводить как ручную, так и автоматизированную настройку подсистем коллайдера с целью оптимизации светимости. На каждом выводе можно расположить несколько приборов, используя полупрозрачные зеркала для деления света.

Также на выводах СИ эпизодически используется ряд других приборов для специфических экспериментов с пучком с целью изучения его динамики: стрик-камера; быстрозатворная камера Наногейт-38; прибор на основе линейки фотодиодов (ФДЛ).

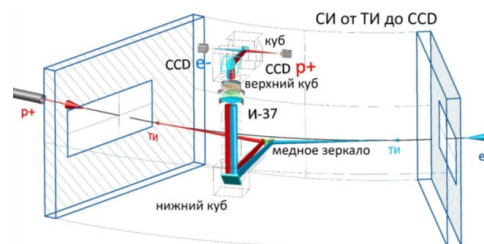


Рисунок 10. Схема вывода СИ пучка с равновесной орбиты к точкам наблюдения; И-37 — объектив Индустар-37 для формирования изображения пучка; CCD — ПЗС-камеры; куб — элемент с полупрозрачным зеркалом для формирования оптического тракта.

В рамках данной работы рассматривался вопрос создания системы вывода видимой части спектра СИ из вакуумной камеры ВЭПП-2000 в специальное помещение — Бункер СИ, который является частично радиационно-защищенной зоной, с целью развития оптической диагностики пучка. На одном из имеющихся выводов проектируется специальный Канал, транспортирующий СИ в Бункер (см Рис. 11 и Рис. 12).

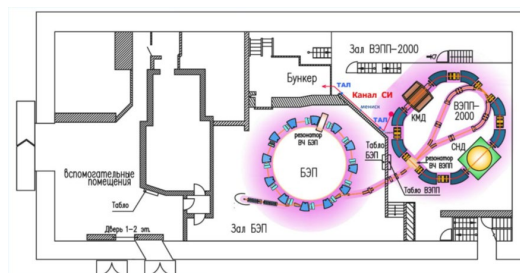


Рисунок 11. Схема экспериментального зала ВЭПП-2000 с Бункером СИ (красной линией обозначено положение Канала).

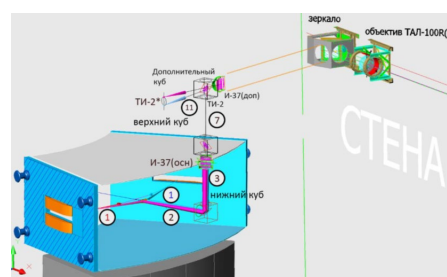


Рисунок 12. Трехмерный эскиз начала Канала. Канал прикреплен к стене экспериментального зала.

В настоящий момент все элементы оптической диагностики расположены непосредственно вблизи выводов СИ и организованы в фиксированных местах; также нет возможности оперативной и гибкой установки новых приборов для их тестирования и проведения экспериментов. Установка каждого нового прибора сопряжена с трудностями его размещения

и настройки, поскольку зачастую прибор расположен на высоте порядка двух метров. В Бункер же планируется подвести световой пучок таким образом, чтобы все новые приборы, а также ряд используемых в данный момент, можно было расположить на оптическом столе в большом количестве с использованием стандартизованного оптического оборудования (направляющие, подставки, кронштейны, подвижки, оправы с линзами). Размещение на оптическом столе, без жесткого ограничения в отличие от размещения на штатных выводах вблизи поворотных магнитов, обеспечивает гибкость и доступность юстировки, не загромождая пространство вокруг кольца коллайдера, что многократно сократит время на разработку оптических трактов отдельных приборов.

Для реализации концепции с Бункером была разработана оптическая схема по принципу работы перископа, которая транспортирует изображение пучка в масштабе 1:1. Также спроектированы конструкции всех отдельных элементов Канала, содержащих все необходимые компоненты: дополнительный объектив Индустар-37; подвижные зеркала; оправы двух объективов ТАЛ-100R; оправа полевой линзы. В конструкции канала предусмотрена отдельная независимая юстировка СИ позитронного и электронного пучков. Продолжением работы будут: изготовление элементов Канала, их монтаж и юстировка; ремонт помещения бункера; проектирование оптического стола; закупка оптических элементов; обеспечение рабочего места в Бункере и подведение необходимых коммуникаций.

Пересечение спин-бетатронных резонансов

В 2025 году проводились эксперименты по исследованию пересечения спин-бетатронных резонансов на ВЭПП-2000. Главной задачей было измерение энергии пучка позитронов методом резонансной деполяризации и сопоставление найденного значения с её измерением методом ОКР. Вторая задача — изучение влияния близкого к спиновой частоте бетатронного вертикального резонанса и измерение потери степени поляризации при его пересечении.

Для проведения данных экспериментов использовалась специальная фокусирующая структура накопительного кольца в режиме с выключенными соленоидами в промежутках детекторов СНД и КМД-3. В этом, так называемом «теплом» режиме, ничто не мешало пучку само-поляризоваться до высокой степени, вплоть до предельных 92,4%, благодаря механизму Соколова–Тернова.

Все эксперименты велись на энергиях 707–715 МэВ, на которых время поляризации составляет около 70 минут. Измерения начинались обычно через 1,5 часа после инъекции большого тока свежих неполяризованных позитронов, составляющего обычно 120–140 мА. Время сканирования частотой деполяризатора составляло как правило 40–60 минут, при этом резонанс с частотой спиновой прецессии пересекался примерно через 30 минут после начала сканирования.

Первые попытки наблюдения деполяризации пучка раскачкой малых вертикальных колебаний поперечным магнитным полем, создаваемым ВЧ-кикером на основе полосковой линии, были предприняты в июне 2025 года в конце полугодичного периода набора данных с детекторами коллайдера в режиме встречных пучков. Планировалось увидеть изменение времени жизни пучка в результате его деполяризации. Эффект по предварительным расчетам должен был составить около 2%. Ток пучка и его время жизни контролировались бесконтактным измерителем тока на основе феррозонда. В течение недели было проведено более 30 сеансов таких измерений, но в итоге достоверных свидетельств резонансной деполяризации пучка обнаружено не было. Причина была в недостаточной статистической точности измерения времени жизни тока при его малых значениях, так как к моменту пересечения резонанса оставалось лишь около 15–20 мА и менее.

Следующая серия поляризационных экспериментов была предпринята в начале сезона 2025/2026 в ноябре 2025 года в диапазоне энергий 710–720 МэВ. К этому моменту на кольцо были установлены два сцинтилляционных счетчика позитронов, выбывших из пучка: один внутри кольца и один снаружи. Скорость счета частиц, испытывавших внутри-пучковое тушековское рассеяние, пропорциональна сечению этого процесса, зависящего от степени поляризации (отрицательная поляризационная добавка к сечению составляет около 5–6 %) и обратно-пропорциональна квадрату тока пучка.

В ходе экспериментов примерно каждую секунду измерялся ток пучка и загрузка одного или обоих счетчиков потерянными частицами. В процессе сканирования частотой деполяризатора рисовался график изменения нормированной на квадрат тока пучка загрузки счетчика. Пример такого графика представлен на Рис. 13.

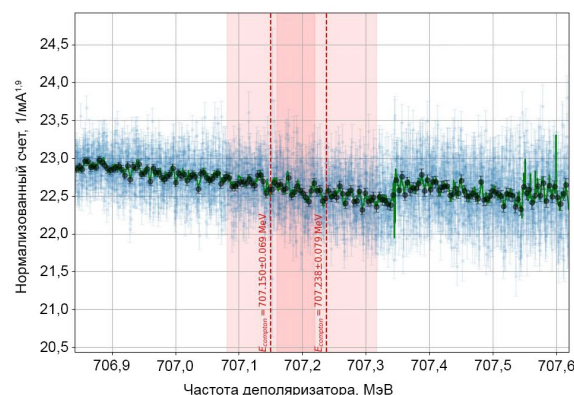


Рисунок 13. Нормированный счет детектора выбывших частиц как функция частоты деполяризатора, преобразованной в соответствующую этой частоте энергию. Пунктирными маркерами показаны ближайшие по времени измерения энергии методом ОКР. Наблюдается систематическая разница энергий, определенных методами ОКР и РДП — резонансная деполяризация пучка выдает сдвиг примерно на 150–180 кэВ относительно Комптона.

Было выполнено около 50 заходов по обнаружению факта деполаризации пучка при медленном сканировании частотой деполаризатора. В первых заходах, как и в летнем сеансе 2025 года, никаких признаков деполаризации не наблюдалось. Возникло предположение — а есть ли вообще поляризация в пучке, и не нарушается ли она из-за чрезмерной близости к спин-бетатронному резонансу.

Для проверки этого предположения была проведена серия специальных заходов без попыток разрушения поляризации ВЧ-деполаризатором, а просто сравнивая нормированные скорости счета выбывших частиц из поляризованного и свежего неполяризованного пучков, инжестируя последний в конце поляризационного захода с примерно тем же числом частиц, чтобы сравнение счетов производить в равных условиях. Эти измерения достоверно показали наличие достаточно высокой степени поляризации, т. к. разница скоростей счета составила более 5% (см. Рис. 14).

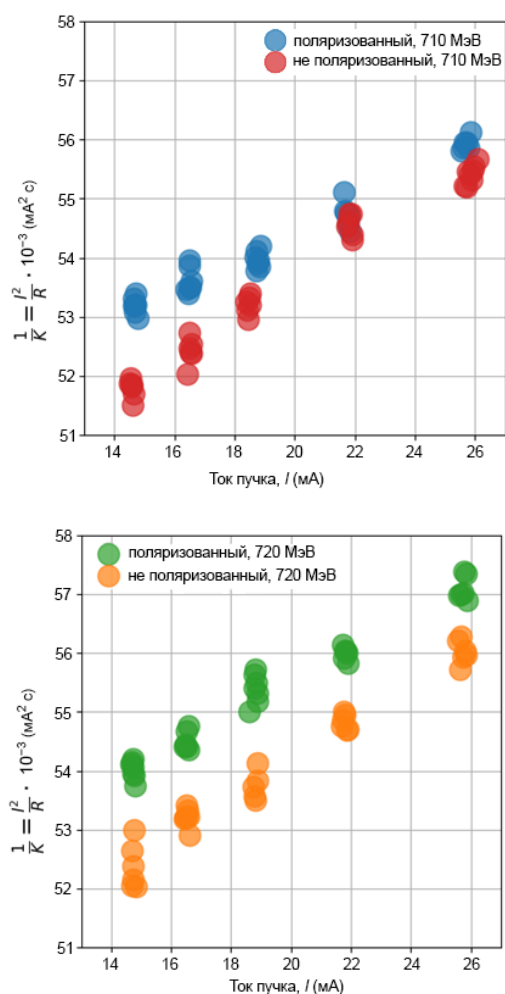


Рисунок 14. Сравнение скорости счета R выбывших позитронов в конце поляризационного захода и нового неполяризованного пучка примерно той же интенсивности, инжестированного после сброса поляризованного пучка. Заметим, поляризованный пучок с конечным током 15 мА прожил в кольце примерно на 30 мин дольше, чем поляризованный пучок с током 26 мА, т. е. на этих двух графиках время течёт справа налево.

Как видно, на обеих энергиях — 710 и 720 МэВ наблюдается заметная разница в скорости счета выбывших частиц, достигающая 4–5%, что неплохо согласуется с нашими оценками. Причем на энергии 710 МэВ, которая стоит ближе к положению спин-бетатронного резонанса: $v_z = 1,457$, $(3 - v_z) \cdot 440,65 = 680$ МэВ, разница в счете для поляризованного и неполяризованного пучков несколько меньше, что можно, по-видимому, объяснить деполаризирующим действием этого резонанса.

Прорыв в поисках скачка в нормированном счете произошел после увеличения до технического предела напряжения на выходе усилителя мощности деполаризатора. Амплитуда ВЧ была увеличена до 150 В. После этого во всех заходах наблюдался скачок в нормированной на ток пучка в степени 1,9 (меньше наклон, чем при нормировке на квадрат тока) скорости счета (см. Рис. 13).

На верхнем графике на Рис. 15 видно, что счет событий от неполяризованного пучка примерно на 6% превышает счет при тех же токах для поляризованного пучка. Это подтверждает наличие поляризации в пучке и задает ожидаемый уровень скачка при сканировании частотой деполаризатора. На нижнем графике виден достоверный скачок величиной примерно в 2% (синий цвет) в момент, когда в пучке оставался ток 16 мА, и, очевидно, пучок деполаризовался не полностью, т. к. счет событий от свежего неполяризованного пучка (желтый цвет) оказался еще на 3,5% выше.

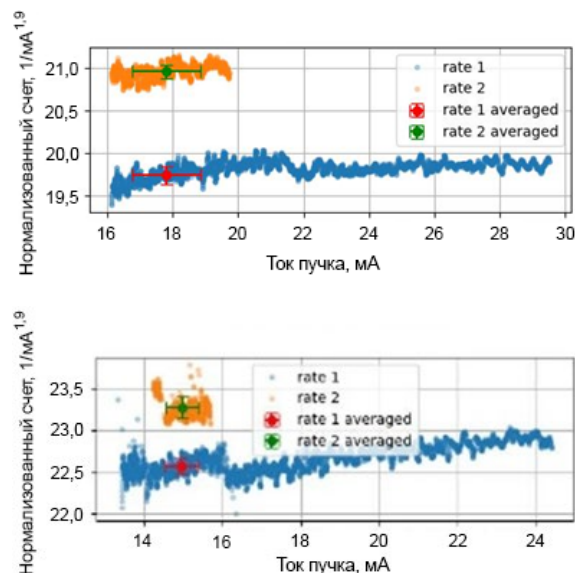


Рисунок 15. Сравнение нормированного счета для поляризованного (синий цвет) и для неполяризованного (желтый) пучков.

Планируется улучшить конструкцию счетчиков потерь частиц, в частности, сделать их положение дистанционно управляемым, а также удвоить их количество. Также необходимо значительно увеличить время, отведенное на проведение поляризационных экспериментов — двух недель явно недостаточно. Следующая серия измерений намечена на май-июнь 2026 года.

Модернизация системы питания ВЧ резонатора бустера БЭП

Замена устаревшего лампового каскада на ГУ-92А современным полупроводниковым усилителем была необходима для повышения надежности ВЧ системы БЭП. При работе в последние годы комплекса ВЭПП-2000 с высокой интенсивностью сталкивающихся сгустков (особенно на высоких энергиях) необходимо регулярно и оперативно получать, охлаждать и ускорять до энергии эксперимента попеременно то электроны, то позитроны без потерь. Поэтому ВЧ система (в особенности лампа ГУ-92А) постоянно работает в режиме полной нагрузки, что существенно ограничивает ресурс её работы. За последние 10 лет было экспериментально установлено, что каждый рабочий сезон комплекса ВЭПП-2000 требует замены лампы ГУ-92А в ВЧ системе БЭП на новую. Твердотельная же схема обеспечивает долгий срок службы, стабильность параметров и мгновенную готовность, устраняя риски внезапного отказа, присущие лампам. Это также дает значительный выигрыш в энергоэффективности, компактности и позволяет внедрить системы цифрового контроля и защиты.

ВЧ-система БЭП работает на частоте 174,4 МГц, на 13-й гармонике частоты обращения пучка в БЭП. ВЧ-система БЭП состоит из генератора ВЧ мощности, фидерной линии, одного ускоряющего резонатора и системы управления.

Генератор ВЧ мощности состоит из модулятора и каскада усилителей. Напряжение на зазоре ускоряющего резонатора изменяется путем регулировки мощности управляющего сигнала на выходе модулятора от 0 до 5 Вт. Выход модулятора подключен к каскаду усилителей. Предыдущий каскад был выполнен на тетроде ГУ-92А, максимальная выходная мощность которого достигала 16 кВт. В связи с ограниченностью запасов таких ламп и частой их поломкой было принято решение о модернизации усилителя ВЧ мощности БЭП путем замены каскада с лампой ГУ-92А на полупроводниковый усилитель ISM.30K.174 производства фирмы «НПП Триада-ТВ».

Основные параметры модернизированной ВЧ-системы БЭП представлены в Таб. 1. Внешний вид полупроводникового усилителя представлен на Рис. 16.

Таблица 1. Основные характеристики ВЧ системы БЭП.

Гармоника	13
Частота ВЧ системы	174,3755 МГц
Диапазон рабочих частот	172–176 МГц
Потребляемая мощность	<60 кВт
Выходная мощность	30 кВт
Электропитание	400 В±15%, 47–53 Гц
Устойчивость к отраженной мощности	Возможность работы с КСВН>2 при мощности <30% от номинальной
Исполнение	Стойка 19"
Габариты	1200×1000×1900 мм
Охлаждение	Жидкостное

Управление	Контроль и локальная индикация состояния и параметров усилителей
Удаленное управление	Ethernet интерфейс + ПО для удаленного контроля и мониторинга (WEB)
Ток пучка	0,2 А
Энергия пучка	1000 МэВ
Потери энергии за оборот ($E=1$ ГэВ)	69,2 кэВ
Максимальное напряжение на резонаторе	112 кВ
Потери мощности на СИ	13,8 кВт
Потери в стенках резонатора	4,5 кВт



Рисунок 16. Внешний вид полупроводникового усилителя ISM.30K.174 производства фирмы «НПП Триада-ТВ».

Летом 2025 года проведена замена каскада с лампой ГУ-92А на полупроводниковый усилитель, и вся система успешно внедрена в работу.

Модернизация программного обеспечения обновленной системы ВЧ БЭП

Для работы с модернизированной системой питания ВЧ резонатора БЭП были внесены соответствующие изменения в программный комплекс для управления работой ВЧ-систем ускорительного комплекса ВЭПП-2000.

Программный комплекс представляет собой клиент-серверное приложение, реализованное на базе фреймворка для создания распределенных систем управления Tango Controls. Серверная часть состоит из набора микросервисов, каждый из которых отвечает за работу одного электронного блока управления, и программы-контроллера, которая управляет микросервисами, а также отправляет измеренные с электронных блоков значения в базу данных, в которой хранятся показания работы измеряющих и управляющих электронных устройств всего комплекса ВЭПП-2000.

Новые полупроводниковые усилители позволили сделать изменение напряжения резонатора более плавным, как показано на Рис. 17, что может положительно сказаться на улучшении характеристик пучка, транспортируемого из БЭП в ВЭПП-2000.

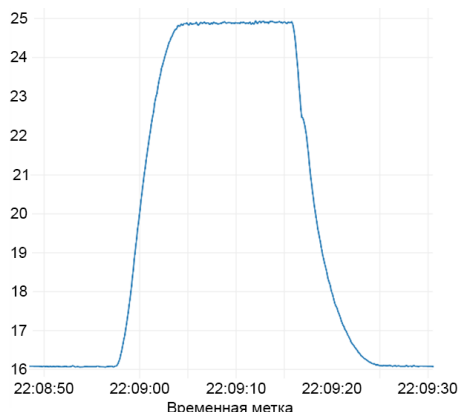


Рисунок 17. График изменения напряжения резонатора БЭП с 16 до 25 кВ и обратно.

В программу управления ВЧ-системой была добавлена функция «Проброс», при активации которой напряжение на модуляторе резонатора с определенной

периодичностью сбрасывается до нуля. Эта функция необходима для сброса накопленного пучка в кольце БЭП. Она может потребоваться для того, чтобы войти в главный зал, где расположены бустер БЭП и коллайдер ВЭПП-2000, без выключения всей системы питания ВЧ БЭП. Для активации включения/выключения функции «Проброс» необходимо нажать/отжать кнопку Probros в главном окне операторского приложения для управления ВЧ-системой, представленном на Рис. 18.

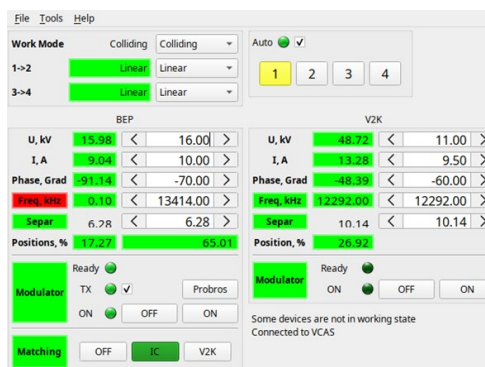


Рисунок 18. Главное окно операторского приложения для управления ВЧ-системой.

ИНЖЕКЦИОННЫЙ КОМПЛЕКС

Введение

На инжекционном комплексе ИЯФ СО РАН и в рамках исследования новых методов ускорения силами сотрудников лаборатории 5 велись следующие работы:

1) Проектирование и расчеты новой системы сбора позитронов на конверсионной мишени.

2) Разработка и проектирование новых твердотельных модуляторов, новых элементов СВЧ-тракта для модернизации системы высоковольтного питания клистронов инжекционного комплекса.

3) Обновление и расширение возможностей программного обеспечения системы управления инжекционного комплекса.

4) Участие в международном эксперименте AWAKE по исследованию оптимальных режимов плазменного кильватерного ускорения электронов с протонным драйвером.

Инжекционный комплекс

Инжекционный комплекс (ИК) ВЭПП-5 в ИЯФ СО РАН снабжает коллайдеры ВЭПП-4М и ВЭПП-2000, пучками электронов и позитронов. Комплекс состоит из преинжектора, включающего в себя источник электронов, электронный линейный ускоритель электронов, конверсионный узел, позитронный линейный ускоритель; накопителя-охладителя и транспортных каналов, по которым накопленные пучки доставляются потребителям.

Основа линейных ускорителей – 14 ускоряющих структур на бегущей волне типа круглый диафрагмированный волновод, работающих на частоте 2855,5 МГц и запитанных от четырех клистронов SLAC 5045 с использованием умножителей мощности типа SLED. Электронный линейный ускоритель производит пучок с энергией около 270 МэВ, который попадает на конверсионную мишень или обходит её. Позитронный линейный ускоритель ускоряет частицы до энергии 430 МэВ.

После ускорения пучки поступают в накопитель-охладитель с периметром 27,4 м, а после завершения цикла накопления направляются на ВЭПП 3 либо ВЭПП 2000 по системе транспортных каналов К-500.

Достижимые на данный момент скорости накопления частиц в накопителе-охладителе составляют $1,1 \cdot 10^{11}$ e-/с и $1,2 \cdot 10^{10}$ e+/с при частоте инъекций 12,5 Гц. Имеющийся набор оборудования позволяет переключать вид частиц за 26 секунд и переходить между потребителями за 52 секунды.

Модернизация системы сбора позитронов

Система сбора позитронов инжекционного комплекса состоит из мишени, концентратора потока, 3-х секционного соленоида сопровождения и ускоряющей структуры, вставленной в соленоид. В текущей конфигурации система имеет ряд недостатков.

Общий вид и расположение элементов конверсионной системы для производства позитронных сгустков приведен на Рис. 1.

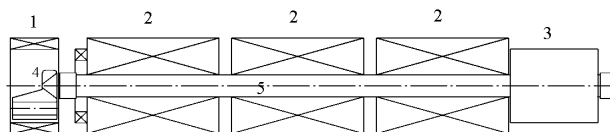


Рисунок 1. Общая схема расположения магнитных элементов. 1 - компенсирующая катушка, 2 - соленоид, 3 - квадруполь, 4 - импульсный согласующий магнит, 5 - ускоряющая структура.

Продольное магнитное поле соленоида сопровождения представлено на Рис. 2. Поле имеет характерные провалы в местах сочленения отдельных секций соленоида. Кроме того, у соленоида отсутствует магнитный экран для предотвращения влияния поля на остальные фокусирующие элементы ускорителя.

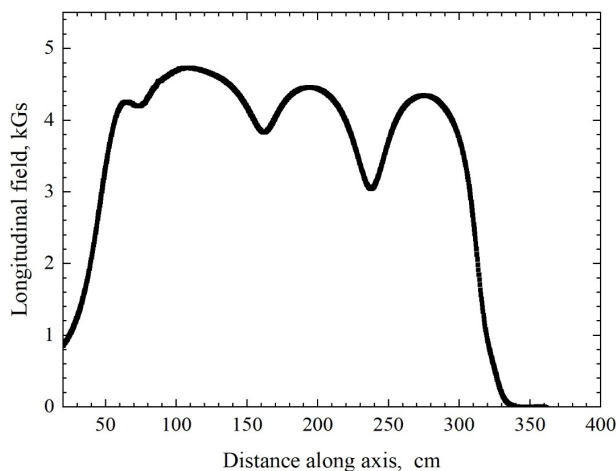


Рисунок 2. Распределение магнитного поля вдоль оси ускорителя.

Позитроны, выходящие из конверсионной мишени, имеют очень большую угловую расходимость, которая составляет конус со среднеквадратичным углом примерно 72° . Для сбора позитронов используется концентратор потока – импульсный магнит с высоким полем в районе мишени и быстрым спадом к ускоряющей структуре. Концентратор потока имеет две полости, первая цилиндрическая служит для расположения в ней импульсной катушки возбуждения, вторая коническая предназначена для формирования спадающего поля и прохождения сквозь нее позитронного сгустка.

Концентратор потока инжектора в сборе с конверсионной мишенью и вакуумным фланцем приведен на Рис. 3. Обе полости соединены между собой тонким разрезом шириной 0,4 мм. Данный разрез является неотъемлемым функциональным элементом концентратора потока и осуществляет электрическую связь двух полостей концентратора. Наличие разреза приводит к тому, что на оси

конической полости концентратора появляется дипольная компонента магнитного поля.

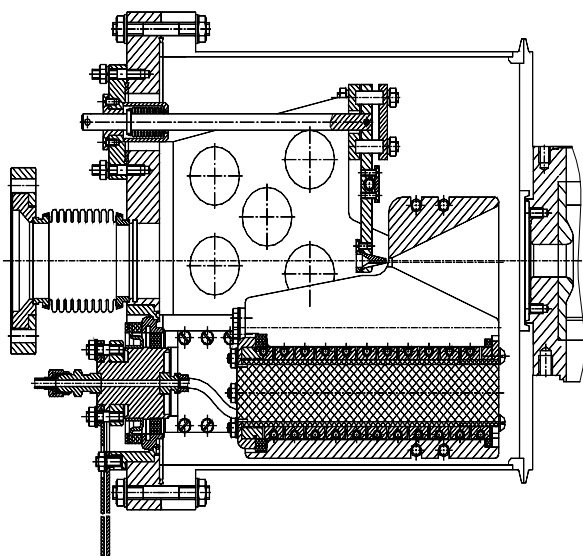


Рисунок 3. Концентратор потока инжектора ВЭПП-5 в сборе с конверсионной мишенью и вакуумным фланцем.

Распределение продольного поля (синяя) и дополнительной дипольной компоненты поля (красная) на оси конической полости концентратора потока представлено на Рис. 4.

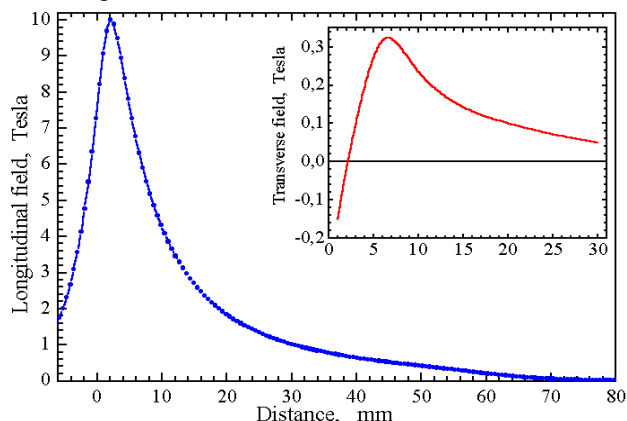


Рисунок 4. Распределение продольного поля (синяя) и дополнительной дипольной компоненты поля (красная) на оси конической полости концентратора потока

Модернизация позитронного источника включает в себя замену предыдущего соленоида на новый, дополнительно устанавливается магнитный экран, который защищает все остальные компоненты и узлы линейного ускорителя от рассеянных полей соленоидального поля. Соленоид, состоящий из 3-х секций будет заменен на многосекционный соленоид, содержащий из 16 отдельных катушек длиной 144 мм (см. Рис. 1.5). Общая длина нового соленоида остается точно такой же, как и у предыдущего. Компенсирующая катушка, в которую помещен концентратор потока с вакуумной камерой, не меняется. Такая конструкция соленоида позволяет

создать более равномерное продольное поле. Дополнительные зазоры между отдельными катушками необходимы для поддержки и крепежа ускоряющей структуры.

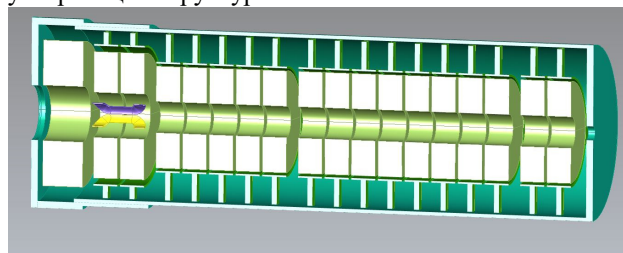


Рисунок 5. Модель соленоидальной системы с корректорами.

На Рис. 6 представлено распределение продольного магнитного поля соленоида вдоль оси ускоряющего канала.

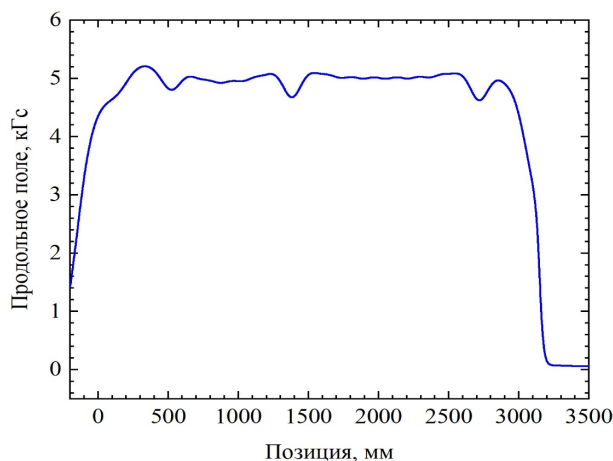


Рисунок 6. Распределение продольного поля соленоида конверсионной системы.

В местах расположения элементов крепежа и поддержки ускоряющей структуры наблюдаются незначительные провалы поля соленоида примерно 200 Гс.

Первые две катушки нового соленоида имеют увеличенный внешний и внутренний диаметр. Это связано с тем, что необходимо иметь дополнительное место для размещения вертикального и горизонтального безжелезного дипольного корректора в зазоре между ускоряющей структурой и катушками. Дипольный корректор необходим для того, чтобы выровнять позитронный ступок с продольной осью ускоряющей структуры. Смещение позитронного ступка на 1 мм происходит в результате того, что концентратор потока имеет дипольную компоненту на оси ускоряющего канала.

Общий вид седлообразного дипольного корректора представлен на Рис. 7.

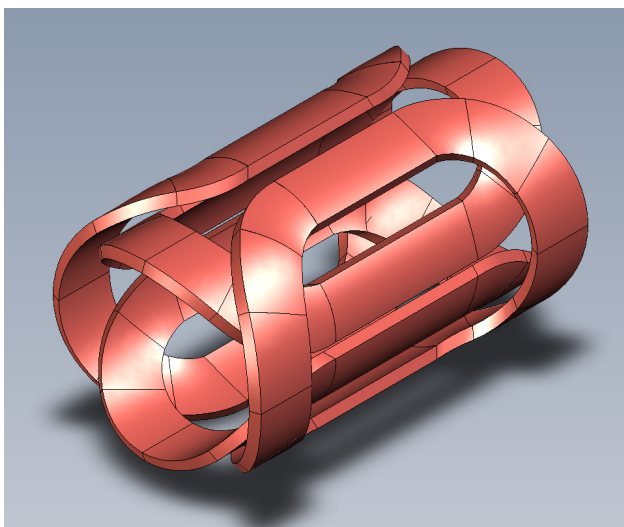


Рисунок 7. Модель корректирующих катушек.

Разработка и производство новых датчиков положения пучка для транспортного канала К-500

Разработаны и направлены на изготовление новые полосковые датчики положения пучка (ДПП) в транспортном канале К-500 для перенаправления пучков от инжекционного комплекса к установкам-потребителям. Основная часть новых датчиков будет размещена рядом с действующими датчиками положения пучка, разработанными В.П. Черепановым [1], один из новых датчиков заменит действующий ввиду нехватки места, и ещё один будет размещен в новом месте в начале подъема из транспортного канала к синхротрону ВЭПП-3 для получения дополнительной информации и упрощения настройки при транспортировке пучка.

Всего предполагается к изготовлению и установке 13 новых ДПП с апертурой 50 мм и 6 датчиков с апертурой 25 мм. Внешний вид датчиков представлен на Рис. 8.

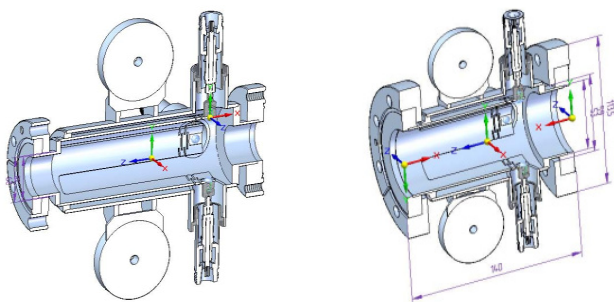


Рисунок 8. Вид новых датчиков положения пучка для вакуумной камеры с апертурой 25 мм (слева) и 50 мм (справа).

Описание блока электроники для датчиков положения пучка

Для новых ДПП разработана управляющая электроника, которая позволит решать более широкий

спектр задач по обработке данных и диагностике пучка.

Блок электроники “Channel BPM Processor” (или пикап-станция) предназначен для измерения координат пучка на основе измерения величин сигналов с 4-х электродов датчика (пикапа). Блок выполнен в корпусе 1U евромеханики шириной 19 дюймов и глубиной 280 мм. Фото блока электроники “Beam charge monitor” представлено на Рис. 9 и Рис. 10.



Рисунок 9. Блок “Channel BPM Processor” – вид спереди.

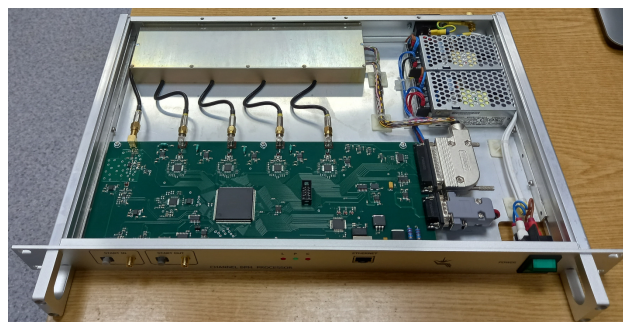


Рисунок 10. Блок “Channel BPM Processor” – вид сверху.

Блок подключается к сети Ethernet 100 Мб/сек. Питается он от сети 220В 50 Гц.

На передней панели находятся 2 разъема типа SMA, 2 световых разъема, 3 светодиода (2 красных и 1 зеленый), гнездо для подключения кабеля Ethernet и выключатель питания (см. Рис. 1.11). SMA разъем и световой разъем с надписью “START IN” предназначены для подачи синхроимпульса “Перепуск”, привязанного по времени с перепуском пучка. Амплитуда синхроимпульса “Перепуск” на SMA разъеме “START IN” от ~2 В до ~3.3 В, длительность – от 40 нс. Световой сигнал на оптическом разъеме “START IN” типа “versatile link” должен быть с длиной волны 650 нм. SMA разъем и световой разъем с надписью “START OUT” – выходные, на них выводится синхроимпульс “Перепуск” при подаче данного синхроимпульса на один из входов “START IN”. Это позволяет, подав синхроимпульс “Перепуск” на вход одного из блоков “Channel BPM Processor”, на остальные блоки подавать этот синхросигнал “по цепочке”, соединяя выходы “START OUT” со входами “START IN”. Гнездо Ethernet через кабель соединяется с локальной сетью, частота работы 100 Мбит/сек. Назначение светодиодов:

- зеленый светодиод “Р” горит при включении питания и правильном конфигурировании FPGA;

- левый красный светодиод “L” загорается, когда появляется связь блока с Ethernet сетью (наличие “Link”);
- правый красный светодиод “C” загорается во время цикла измерения.
- На задней панели находятся 4 разъема типа SMA для соединения с пикапом и гнездо сетевого питания 220 В.

Принцип действия блока электроники “Channel BPM Processor”

Блок-схема блока электроники “Channel BPM Processor” представлена на Рис. 11.

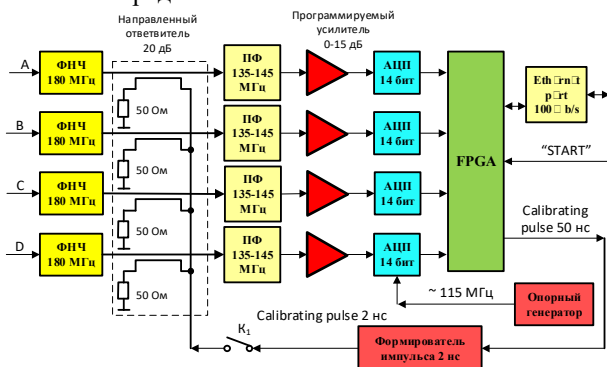


Рисунок 11. Блок-схема блока электроники “Channel BPM Processor”

Рабочая полоса 135-145 МГц формируется с помощью узкополосных ПАВ фильтров. Вид сигнала от одиночного сгустка показан на Рис. 12.

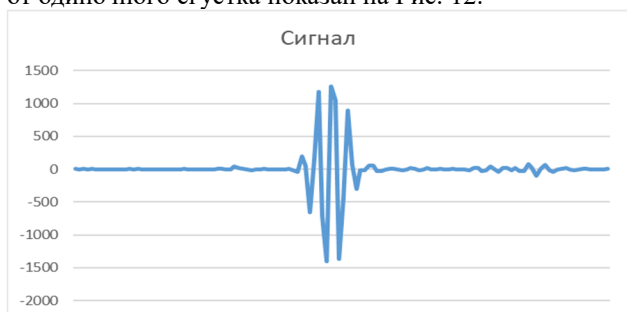


Рисунок 12. Вид сигнала на входе АЦП.

Сигналы имеют колоколообразную огибающую и ВЧ заполнение частотой около 140 МГц. Эти сигналы усиливаются усилителем с программируемым коэффициентом усиления 0-15 дБ, что позволяет работать в широком диапазоне заряда пучка. Далее сигналы оцифровываются с помощью 14-разрядного АЦП с частотой выборок ФАЦП ≈ 115 МГц и затем передаются в FPGA, где записываются в буфер памяти емкостью 8К четверок 2-х байтовых чисел в шкале АЦП.

Основной особенностью блока электроники “Channel BPM Processor” является использование калибровочных сигналов. Калибровочные сигналы представляют собой узкие прямоугольные импульсы длительностью около 2 нс, примерно равные длительности сигнала от пучка в ЭОК-2. Калибровочные импульсы подаются на каждый из 4-х

входов блока через направленные ответвители. Через интервал времени в несколько миллисекунд после окончания регистрации сигнала от пучка (после полного заполнения буфера АЦП) на входы 4-х каналов блока через ключ K1 и направленные ответвители подается цепочка из 64-х калибровочных импульсов с одновременной регистрацией сигналов от этих импульсов.

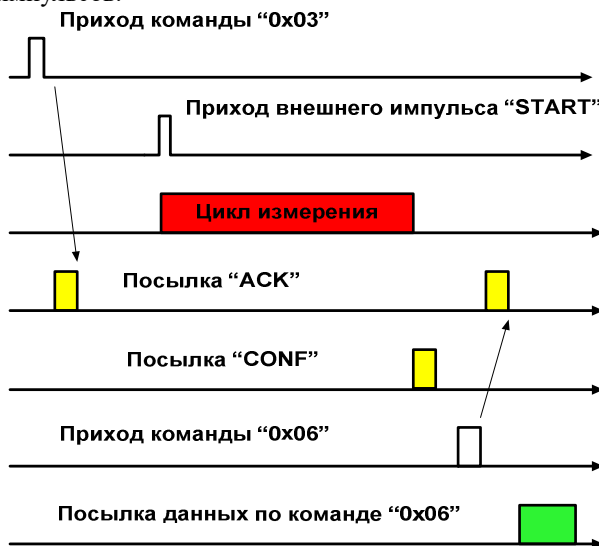


Рисунок 13. Временная диаграмма работы пикап-станции с внешним запуском.

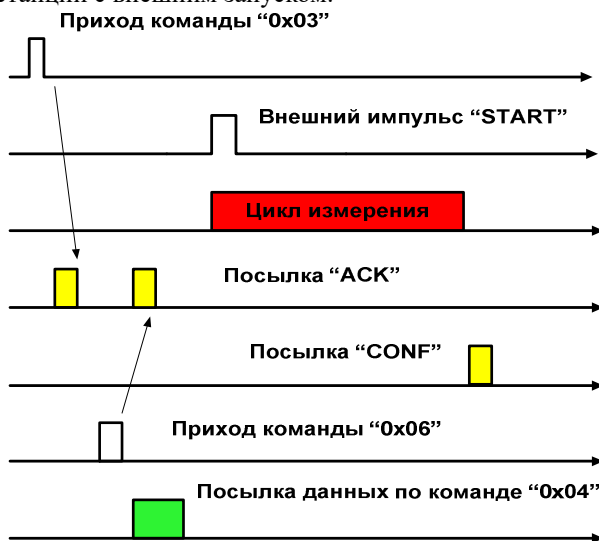


Рисунок 14. Временная диаграмма работы пикап-станции в режиме ожидания внешнего запуска

Сигналы от 64-х калибровочных импульсов суммируются, что увеличивает отношение сигнала к шуму просуммированного калибровочного сигнала примерно в 8 раз по сравнению с одиночным сигналом. На основании измеренных калибровочных сигналов U_{cal_i} вычисляются калибровочные коэффициенты: $K_i = U_{cal_av}/U_{cal_i}$, где i – номер канала, $U_{cal_av} = (U_{cal_0} + U_{cal_1} + U_{cal_2} + U_{cal_3})/4$. После измерения сигналов от пучка U_i далее вычисляются скорректированные сигналы $U_{i_cor} = U_i \times K_i$, которые потом и используются для вычисления координат

пучка. Использование такой цепочки калибровочных сигналов позволяет скомпенсировать неодинаковость коэффициентов передач каналов блока и за счет этого – существенно уменьшить зависимость результатов измерений от температуры.

Запуск измерения пикап-станции может быть внутренним – сразу после прихода соответствующей команды, или внешним – по приходу внешнего синхроимпульса “Перепуск”, привязанного к моменту перепуска пучка. На Рис. 13 показана временная диаграмма работы пикап-станции в режиме работы с внешним запуском, а на Рис. 14 – временная диаграмма работы в режиме ожидания внешнего запуска.

Разработка и проектирование новых источников питания

Для повышения стабильности работы комплекса, уменьшения количества отказов в работе систем требуется обновление источников питания, приближающихся к выработке временного ресурса. Для инжекционного комплекса в настоящее время целесообразна замена 25 источников питания магнитных линз линейного ускорителя из серии ВЧ-300, на более современные, с высокой стабильностью выходных параметров. В 2025 году, в рамках модернизации комплекса, начато изготовление разработанных в ИЯФ прецизионных источников питания ВЧ-500-20.

Внешний вид источника представлен на Рис. 15.



Рисунок 15. Источник питания ВЧ-500-20

Технические характеристики источников приведены в Табл. 1.

Таблица 1. Технические характеристики прецизионного источника ВЧ-500-20.

Выходное напряжение	0-20 В
Выходной ток	0-500 А
Напряжение питания	380 В (3 фазы)
Нестабильность выходного тока	0,05% (при номинальном токе)
Пульсации выходного напряжения	Не более 10% мВ в полосе 0–300 Гц

Коммутационные пульсации	Не более 300 мВ в полосе 0-40кГц
Охлаждение	Водяное
Габариты	634*482,5*177 (мм)

Обновление системы временного контроля на инжекционном комплексе

Линейный ускоритель инжекционного комплекса имеет в своем составе большое количество импульсных систем. Точность временных параметров импульсных систем необходимо контролировать во всех режимах работы комплекса. Инжекционный комплекс ВЭПП-5 работает с потребителями в четырех режимах.

ВЭПП-2000:

- Накопление электронов. Выпуск электронов.
- Накопление позитронов. Выпуск позитронов.

ВЭПП-4М:

- Накопление электронов. Выпуск электронов.
- Накопление позитронов. Выпуск позитронов.

Разрабатываемая система измерения контрольных времен позволит за короткое время измерить временную диаграмму основных систем инжекционного комплекса. Для каждого из четырех режимов временная диаграмма имеет свою специфику. Режим работы комплекса выбирается в зависимости от потребителя. Для контроля конкретного параметра режима контрольно-измерительная система переключается на измерение работающего режима комплекса. После измерения временные параметры сравниваются с параметрами настроенного режима. Это позволит сократить поиск неисправностей, возникших в системе управления комплексом. Диаграмма переключения процедур временных измерений представлена на Рис. 16.

В состав системы измерения контрольных времен входят блок мультиплексор Control Time и два блока время-цифровых преобразователей Т24х4. Время-цифровой преобразователь Time24к4 и мультиплексор Control Time изготовлены в стандарте КАМАК. Функциональная схема системы измерений контрольных времен в конструктиве КАМАК представлена на Рис. 17. На Рис. 18 представлен крейт с измерителями времени установленный в радиопультовой инжекционного комплекса.

Блок мультиплексор Control Time подключает внешние сигналы input в зависимости от выбранного режима к измерителям Т24х4. Преобразователь номер один Т24х4 измеряет сигналы процедур накопления в накопитель-охладитель. Преобразователь номер два Т24х4 измеряет сигналы процедуры выпуска (перепуска) частиц потребителям.

Проведены тестовые измерения двух блоков преобразователей Т24х4. Для проверки точности прибора проведены одновременные измерения временной задержки от блока DL10р осциллографом

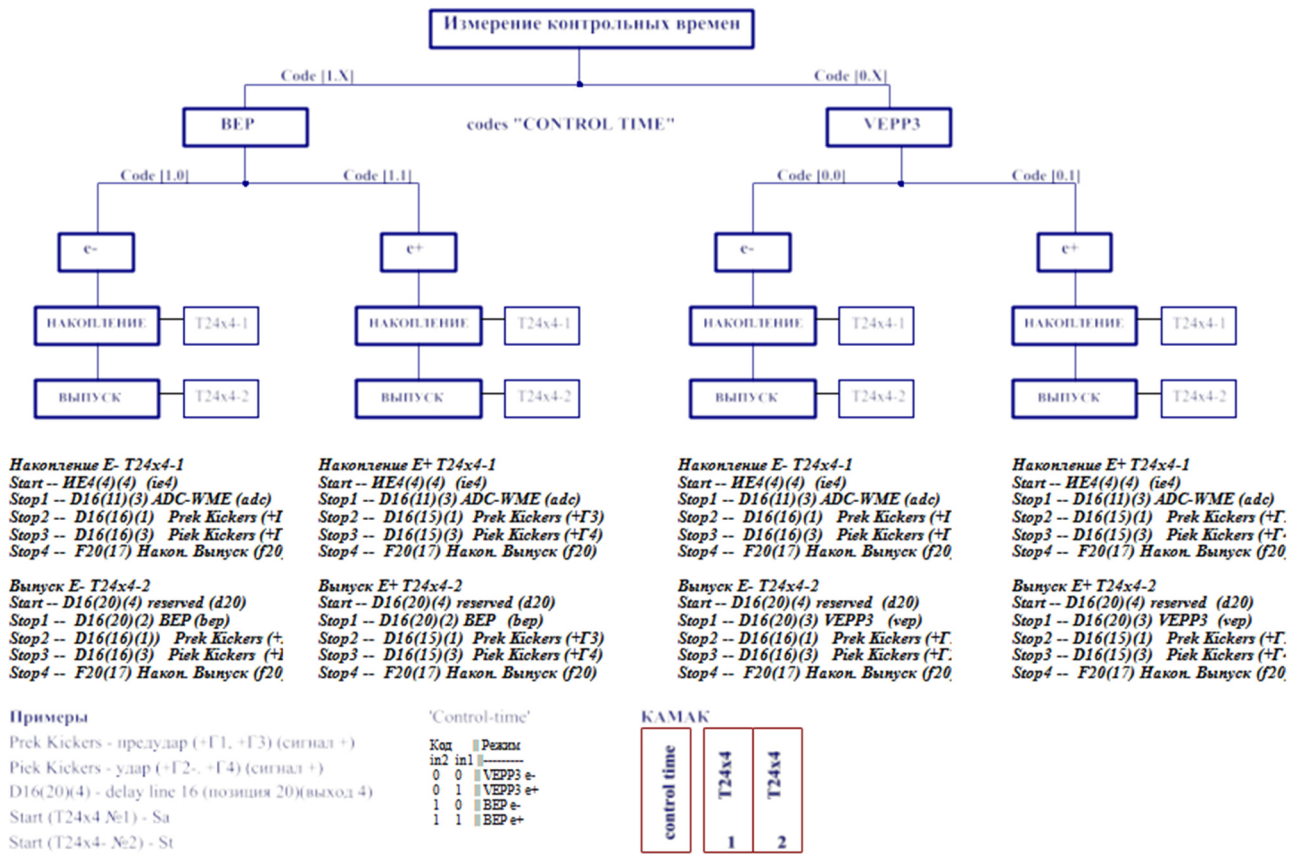


Рисунок 16. Диаграмма переключения временных измерений

DSO9404A и измерителями stop1÷4 преобразователя T24x4. На Рис. 19 представлены графики разности величины временной задержки, измеренной осциллографом DSO9404A и величин измерений stop1÷4 от четырех измерителей прибора T24x4.

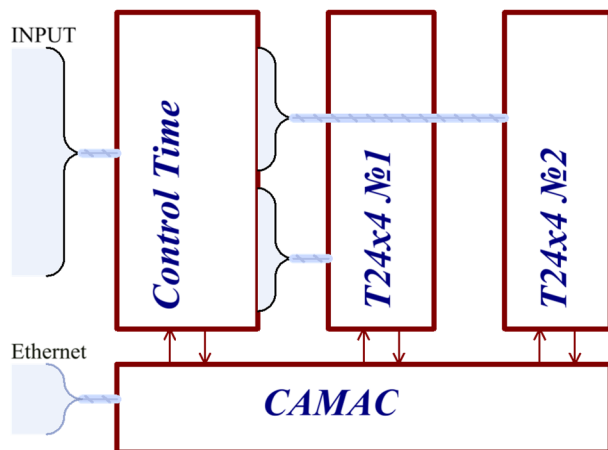


Рисунок 17. Схема измерений контрольных времен.



Рисунок 18. Крейт с блоками системы.

Максимальная разница средневзвешенных значений величин, измеренных преобразователем T24x4 от измерений, проведенных осциллографом DSO9404A, не превысила ±60 пс. Проведено сравнение измерений преобразователя T24x4 с осциллографом DSO9404A на предмет точности измерения среднего значения временного спектра от количества событий в измерении.

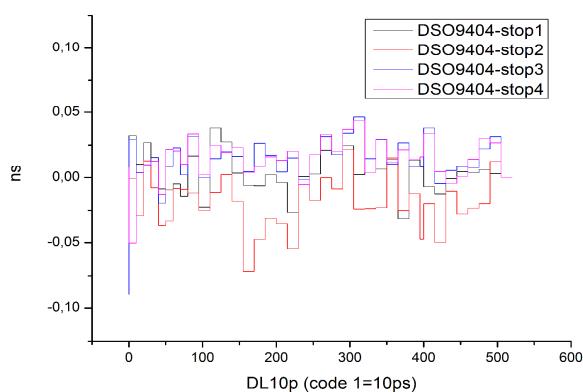


Рисунок 19. Сравнение DSO9404A с stop1÷4.

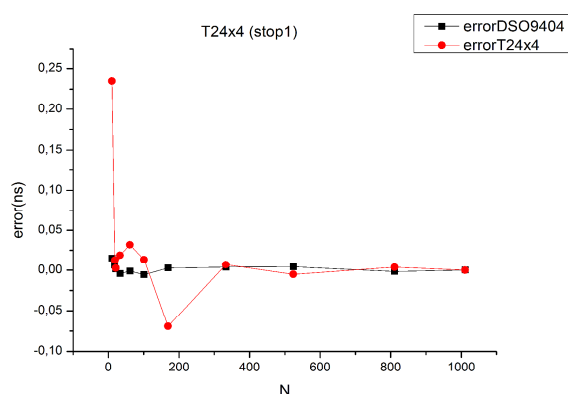


Рисунок 20. Ошибка измерения среднего.

Количество событий для преобразователя T24x4 и для осциллографа DSO9404A (в каждом измерении) набиралось равное. Измерения проводились одновременно ВЦП и осциллографом постоянной (неизменяемой) временной задержки. Среднее значение спектров $T1_{cp}$, измеренных ВЦП T24x4, вычислялось с помощью формулы (1). Среднее значение временной задержки $T1_{cp}$, измеренной осциллографом DSO9404A, вычислялась программным пакетом EZJIT Jitter Analysis. Величина отклонения среднего при (N) событиях вычислялась как разница от средней величины, полученной при максимальном количестве событий N равно 1011 событиям. На Рис. 19 и Рис. 20 представлены результаты эксперимента. Минимальное количество событий N в эксперименте равно 10. Максимальное количество событий в эксперименте равно 1011. При количестве измеренных событий $N \geq 350$ отличия измерений преобразователя T24x4 от измерений осциллографа составили ± 10 пс.

$$T1_{cp} = t_0 \times \frac{n1_{k-1} \times (K-1) + n1_k \times K}{n1_{k-1} + n1_k} \quad (1)$$

Основной режим работы прибора T24x4 непрерывный, но прибор может работать и в режиме однократного запуска, для этого командой дается разрешение на запуск измерения. Если разрешен набор статистики, то он производится как в непрерывном режиме, так и в однократном режиме. Для записи статистики каждому измерителю stop1÷4 в памяти

прибора отведена страница шириной 11 бит и глубиной 10 бит. После набора 1023 событий по любому из адресов всех страниц набор статистики останавливается с сообщением в статусный регистр.

Основные параметры прибора T24x4:

1. Шкала 24 бита;
2. Четыре измерителя stop1÷4;
3. Временное разрешение 1.25 нс и 1.428 нс;
4. Максимальный временной интервал 20.97 мс и 23.8 мс;
5. Неравномерность ширины каналов измерителей 6.6%;
6. Интегральная нелинейность на 90% шкалы лучше 0.001%;
7. Набор статистики: четыре страницы шириной 11 бит и глубиной 10 бит;
8. Вход для внешней тактовой частоты и выход тактовой частоты;
9. Потенциальные возможности этого проекта:
 - а. Возможность подключать любые сигналы импульсных систем. Шкала измерителя перекрывает время цикла накопления и цикла перепуска для четырех режимов работы инжекционного комплекса ВЭПП-5;
 - б. Временное разрешение можно улучшить за счёт набора статистики и вычисления центра временного спектра. Внешний вход тактовой частоты позволяет использовать прецизионный генератор частоты инжекционного комплекса. Временное разрешение прибора T24x4 можно изменять от 3.125 нс до 0.868 нс при использовании внешнего генератора с частотой от 10 МГц до 36 МГц.

Развитие системы управления на инжекционном комплексе

В 2025 году развитие базового программного обеспечения (ПО) системы управления (СУ) шло в направлении расширения номенклатуры поддерживаемой управляюще-измерительной электроники, создания новых пользовательских приложений для операторов комплекса.

Поддержка стандарта `dbus` системой управления

Несмотря на то, что стандарт Modbus[2] был создан в 1979 году и обладает рядом существенных недостатков, он является наиболее простым решением для разработчиков электроники, способной размещаться на большом удалении от управляющего компьютера, и потому этот протокол до сих пор широко применяется, как в варианте Modbus-TCP (через сеть Ethernet), так и в вариантах Modbus-RTU и Modbus-ASCII (поверх линий RS232/RS485), в том числе в новых устройствах. Драйвер `modbus_tcp_drv.c` для работы с Modbus-TCP для используемого на инжекционном комплексе фреймворка CXv4 был создан в 2023 году. В 2025 году функциональность драйвера была значительно расширена.

Разделение драйвера на 2 части

Был проведён рефакторинг драйвера `modbus_tcp_drv.c` с разделением его на 2 части:

1. Модуль доступа к линии – `modbus_lyr.c`
2. Собственно, драйвер – `modbus_drv.c`

Первый модуль ("layer" в терминологии CXv4) обеспечивает "транспорт" – поддержание соединения, отправку и приём пакетов, а главное – арбитраж доступа к одной линии связи нескольких драйверов (что необходимо, когда, например, к одной линии RS485 подключено несколько разных устройств).

Драйвер же занимается взаимодействием с одним экземпляром устройства.

В модуль доступа к линии также была добавлена поддержка протоколов Modbus-RTU и Modbus-ASCII, причём в 2 вариантах:

1. С транспортом по последовательной линии (RS232/RS485). Это включает функциональность соответствующей настройки линии – скорость, число бит и т.д.; для указания параметров используется ставший стандартом де-факто синтаксис утилиты MS-DOS MODE – параметры перечисляются через запятую, например, "19200,8,n,1" (скорость 19200 бод, 8 бит данных, нет чётности, 1 стоповый бит).

2. С транспортом по TCP. Этот вариант часто используется для удалённого подключения устройств с Modbus-RTU или Modbus-ASCII через специальное устройство "конвертер интерфейсов" (например, семейства MOXA nPort). При этом до "конвертера интерфейсов" идёт Ethernet, а от него до устройств уже RS485.

Такое расширение функциональности подсистемы Modbus уже позволило реализовать работу с управляюще-измерительной электроникой модуляторов клистронов нового поколения (использующей Modbus-RTU и 2 устройства на линии RS485), а также с перспективными источниками питания магнитоэлектрических насосов (в ВИП-45/48/50 через Modbus-TCP доступны 5 формально независимых устройств с идентификаторами от 1 до 5).

Также выделение доступа к линии в отдельный модуль позволит в будущем, в случае возникновения такой потребности, реализовать другие драйверы, работающие с Modbus-устройствами (например, использующие иную парадигму взаимодействия с устройствами, чем взаимно-однозначное отображение между регистрами устройства и каналами СУ).

Выбор и тестирование контроллеров шаговых двигателей для управления подвижками

На инжекционном комплексе используются разнообразные подвижки, в первую очередь для ввода/вывода элементов диагностики в тракт пучка. Управление этими подвижками выполнено на широкой номенклатуре драйверов и контроллеров. Большая их часть имеет возраст в десятки лет, с неопределённым остаточным ресурсом. Подключение контроллеров к системе управления выполнено по разным интерфейсам, включая RS485 и CAN. В свете вышеизложенного есть необходимость в выборе

современного решения для замены имеющихся устаревших контроллеров.

Выбор контроллеров

После консультации с коллегами из лаб.1-3 (установки ВЭПП-3/ВЭПП-4М) решено было обратить внимание на контроллеры шаговых двигателей производства Санкт-Петербургской фирмы "Электропривод".

Наиболее подходящими по параметрам выглядят контроллеры линейки SMSD-4.2 (они же "БУШД-4.2", "БУШД" означает "Блок Управления Шаговым Двигателем"), рассчитанные на ток до 4.2А. Эта линейка состоит из 4 моделей:

1. SMSD-4.2LAN, он же БУШД-4.2LAN с подключением через Ethernet по витой паре и протоколом собственной разработки ООО "Электропривод".

2. SMSD-4.2LAN Modbus, он же БУШД-4.2LAN Modbus с подключением через Ethernet по витой паре и протоколом Modbus-TCP.

3. SMSD-4.2Modbus с подключением через RS485 и протоколом Modbus-RTU.

4. SMSD-4.2CAN с подключением через CAN-bus и протоколом CANopen.

Несмотря на схожесть названий, реализация протоколов Modbus в БУШД-4.2LAN Modbus и SMSD-4.2Modbus не имеет ничего общего: различаются не только карты регистров Modbus, но и парадигмы работы и даже численные ограничения (такие, как максимальные скорости и ускорения). Фактически, это два совершенно разных устройства с похожими названиями.

Поскольку при выборе устройств для замены устаревших желательнее использование современных шин, интерфейсов и протоколов, решено было рассмотреть варианты SMSD-4.2Modbus и SMSD-4.2CAN не рассматривать, т.к. линии RS485 и CAN, построенные по топологии "общая шина", подвержены проблемам при выходе из строя любого узла и при повреждении в любом месте выходит из строя вся линия; Ethernet на витой паре этих проблем не имеет и для него существует широкая номенклатура коммуникационных устройств, а средства диагностики повсеместны. Кроме того, протокол CANopen нигде на инжекционном комплексе не используется, и его поддержка потребовала бы избыточных трудозатрат.

БУШД-4.2LAN и БУШД-4.2LAN Modbus являются по сути одним устройством, а различаются они лишь прошивками: в варианте "LAN" подключение к устройству реализуется через TCP-порт 5000 и проприетарный протокол фирмы "Электропривод", а в варианте "LAN Modbus" через TCP-порт 502 и протокол Modbus-TCP.

В свете вышеизложенных соображений решено было обратить внимание на модели SMSD-4.2LAN и SMSD-4.2LAN Modbus.

Реализация поддержки

Работа с обоими вариантами велась параллельно. Для SMSD-4.2LAN потребовалось разработать

специальный драйвер `smsd_xx_lan_drv.c`, а для SMSD-4.2LAN Modbus удалось использовать штатный для CXv4 драйвер `modbus_drv`, для которого достаточно было создать файл описания устройства `smsd_xx_lan_modbus.devtype` (описывающий отображение Modbus-регистров устройства на каналы CXv4 и особенности взаимодействия с конкретным типом устройства).

Реализация драйвера `smsd_xx_lan_drv.c` была довольно трудоёмкой вследствие особенностей протокола. Во-первых, протокол "не ортогонален": часть параметров можно как писать, так и читать, а другую часть только писать – на операции их чтения не хватило кодов команд, т.к. код команды занимает всего 6 бит. Во-вторых, протокол "несимметричен": нет взаимно-однозначного соответствия между пакетами запросов и ответными пакетами. В-третьих, в самом формате пакетов многие параметры (такие, как код команды, количество шагов и т.п.) размещаются не в отдельных байтах, а упаковываются в битовые поля различной длины, что существенно усложняет обычно простые действия (такие, как сравнение кодов команд пакетов).

Такое устройство протокола делает его реализацию в виде отдельного драйвера трудоёмкой, а в виде описания для модулей В/В общего назначения, таких, как `StreamDevice` в EPICS, реализация практически невозможна из-за использования протоколом битовых полей.

После создания драйвера `smsd_xx_lan_drv.c` и файла описания устройства `smsd_xx_lan_modbus.devtype` были созданы инженерные панели программ, позволяющие пользоваться всей функциональностью контроллеров. Затем была успешно проверена работа с обоими вариантами контроллера.

Поддержка перспективных источников питания магниторазрядных насосов

В настоящее время на Инжекционном комплексе используется 2 вида источников питания магниторазрядных насосов:

1. ВИП-27 разработки НПО "Основа". Это 4-канальный источник, управляемый при помощи контроллера SEAC124 через сеть CAN-bus. Он был разработан в конце 2000-х годов для замены более старых источников CAN-ИВА и ИВА-16 и с точки зрения управления и измерений реализует аналогичный им интерфейс: линейные измерения тока и напряжения.

2. CAN-ИВА разработки ИЯФ СО РАН. Это 16-канальный источник со встроенным контроллером с подключением через сеть CAN-bus. Он был разработан в начале 2000-х годов для замены САМАС-устройства ИВА-16 (Ц0602).

В ВИП-27, аналогично более ранним моделям, измерения токов и напряжений МРН выполняются путём оцифровки имеющимися в составе SEAC124 АЦП аналоговых сигналов, выдаваемых на внутреннюю шину.

Недостатком данной схемы измерения является то, что аналоговые сигналы линейны (в то время как показания вакуума обычно требуются в логарифмической шкале) и точности оцифровки оказывается недостаточно в районе малых значений (где точность наиболее важна), поэтому малые значения измеряются как просто нулевые.

В более современных источниках измерения сразу выдаются в формате вещественных чисел с плавающей точкой (экспоненциальное представление). Это позволяет представлять как большие значения ("плохой вакуум"), так и малые значения ("хороший вакуум") с достаточной точностью.

Были протестированы 2 модели источников питания МРН с подключением через Ethernet и протоколом Modbus-TCP:

1. ВИП-45 разработки НПО "Основа" (г. Выборг).
2. ИП-МРН-20 производства ООО "Диком" (г. Москва).

У обоих типов источников в реализации Modbus-TCP есть отступления от стандарта (как и у большинства устройств с протоколом Modbus).

В результате удалось реализовать для CXv4 поддержку как ВИП-45 (и программно-идентичных ему ВИП-48 и ВИП-50, а также его варианта ВИП-45К с иным форматом измерений), так и ИП-МРН-20.

По результатам тестирования и анализа с точки зрения СУ наиболее предпочтительным в будущем является использование источников ИП-МРН-20 производства ООО "Диком". Это обусловлено в первую очередь неудовлетворительной реализацией интерфейса Ethernet в продуктах НПО "Основа" (нарушающей требования стандарта TCP/IP), а также высокой трудоёмкостью его настройки (требует индивидуального подключения к компьютеру один-на-один и двухкратного извлечения управляющей платы (для перевода в режим программирования и затем обратно)).

Разработка операторского ПО для ИК ВЭПП-5 с возможностью разграничения доступа

В настоящий момент для управления инжекционным комплексом в основном используются инженерные приложения. Неудобство их использования заключается в том, что имеется большое количество оконных приложений, элементы которых отображаются в порядке электрического подключения, а не в порядке их следования в магнитной системе. Более того, например, для управления магнитной системой транспортного канала К-500 используются несколько оконных приложений, по которым рассеяны элементы управления. Кроме того, существует потребность в разграничении доступа к управлению: требуется знать кем и что было изменено в параметрах комплекса.

Структура программного обеспечения

Оконное приложение «AppAuthorize» (см. Рис. 21) предназначено для авторизации пользователей и предоставляет возможность ввода логина и пароля пользователя. Затем эта информация передается с помощью СХ службе (daemon), которая сравнивает введенные данные с теми, что хранятся в базе данных. При корректном вводе логина и пароля пользователю предоставляется либо полный доступ к управлению системой (read/write), либо только доступ к чтению (read) информации. Другой способ авторизоваться – это считать свою карту доступа предназначенным для этого сканером. На этом этапе служба проверит наличие идентификационного номера в БД и авторизует того пользователя, которому эта карта принадлежит. Детальная проработка системы аутентификации на данный момент ведется.

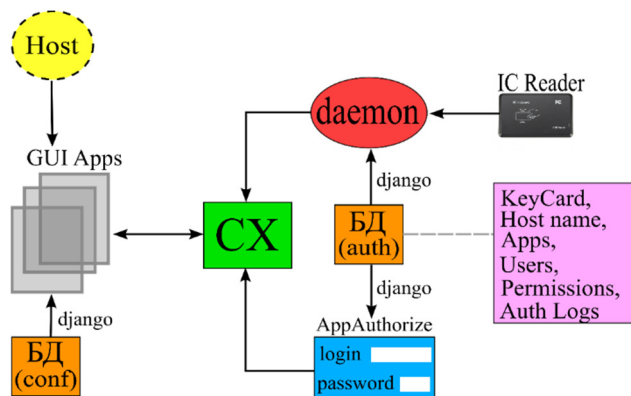


Рисунок 21. Общая структура программного обеспечения.

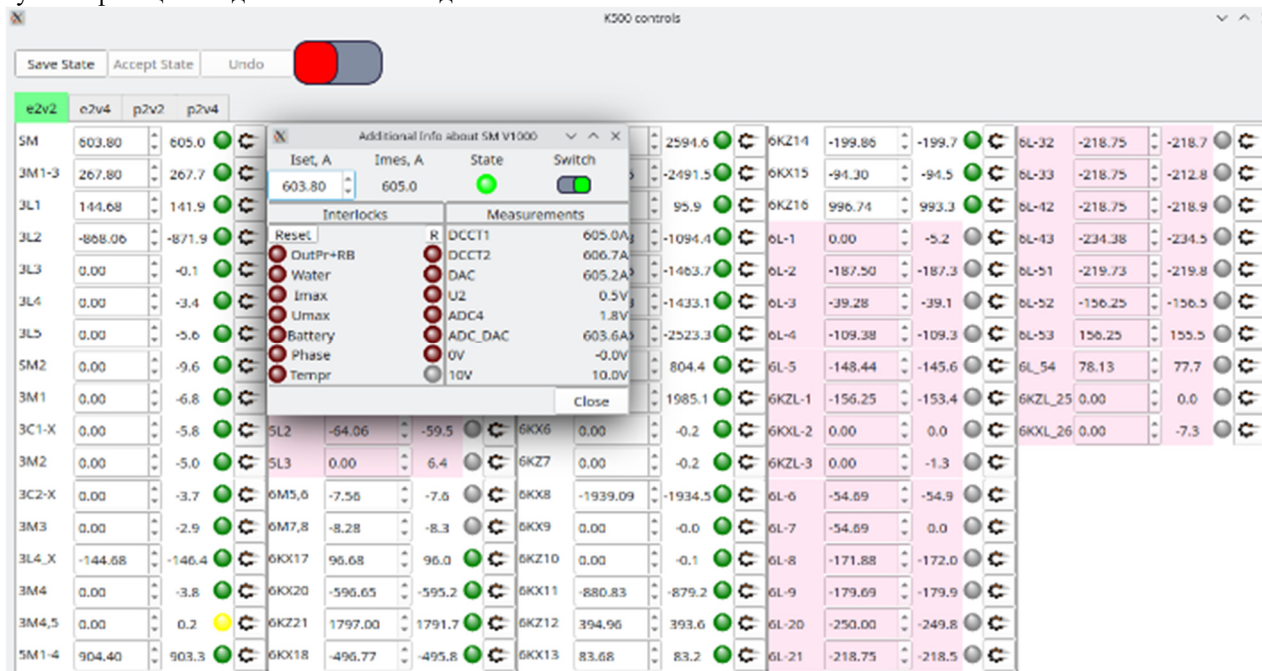


Рисунок 22. Внешний вид оконного приложения для управления магнитной системой канала К-500.

Операторские приложения

«K500 controls» (см. Рис. 22) является примером оконного приложения «GUI apps» для управления магнитной системой транспортного канала К-500. Оно было сконфигурировано при помощи базы данных через фреймворк Django: сначала по id подсистемы получают все устройства магнитной системы транспортного канала К-500, затем типы этих устройств и относящиеся к ним каналы. Информация о том, какие виджеты использовать для взаимодействия с каналами также содержится в БД, указывая какой из «схwidget» нужно использовать для этого.

Удобство этого приложения по сравнению с инженерными заключается в нескольких факторах:

- 1) Порядок элементов магнитной системы соответствует порядку, в котором пучок заряженных частиц проходит их при транспортировке;
- 2) Все элементы находятся внутри одного окна, а не распределены по нескольким;

3) Развитие режимов работы ускорителя по вкладкам (e2v2, e2v4, p2v2, p2v4) с отображением только тех элементов, которые ему соответствуют;

4) Отображение статуса элемента с помощью специализированного виджета «CXErrorLed»;

5) Реализация сохранения текущих уставок, применение изменений и сброса проделанных настроек при настройке ускорителя (кнопки «Save state», «Accept state» и «Undo»).

Система журналирования данных ИК ВЭПП-5

Для ИК была разработана и развернута система журналирования данных, включающая в себя службу записи данных, приложение для просмотра данных и веб-приложение с автоматически генерируемыми отчетами о работе комплекса. Структура системы представлена на Рис. 23. Для этого созданы две специализированные базы данных: первая – для управления конфигурацией каналов журналирования и хранения записанных данных, вторая – для сохранения

сформированных отчётов. В качестве СУБД применена уже используемая на ИК PostgreSQL. Операционные данные представляют собой временные ряды, поэтому для их хранения использовано расширение TimescaleDB, которое позволяет создавать таблицы, оптимизированные для этого случая. При записи используются дополнительные механизмы редукции данных. Конфигурация каналов синхронизируется с основной конфигурационной базой данных ИК, содержащей актуальные сведения об устройствах. Для этого используется скрипт, который извлекает данные о каналах и параметры записи из общей конфигурационной БД и обновляет записи о каналах в специализированном хранилище. При этом устаревшие записи сохраняются, но отмечаются как вышедшие из работы. Такой подход не только обеспечивает актуальность данных при изменениях в инфраструктуре ИК, но и упрощает работу с записанными данными за счёт чёткого разделения конфигурационных данных и данных, предназначенных для настройки журналирования.



Рисунок 23. Схема компонент программного обеспечения.

Система рабочих отчётов инжекционного комплекса

На ИК была разработана и развёрнута система рабочих отчётов. В ее состав входят служба генерации отчётов, база данных и веб-сайта для представления данных. Служба генерации запускается каждую смену и выполняет предварительную обработку необходимых данных для смены и записывает их в отдельную БД с данными отчётов. Отчёты за более крупные периоды создаются на основе обработанных ранее частей составных частей. При этом для интервалов времени (смены, дни, недели, месяцы, годы, рабочие недели и сезоны) применена древовидная структура, по которой определяется какие данные необходимо изменять при обработке новой смены. Данные представляются в виде веб-сайта, на главной странице которого есть два блока для быстрой навигации к интересующему отчёту:

- Блок визуализации рабочей активности за год – отображает отношение времени работы на потребителей к общему времени работы ИК в виде цветовой шкалы (оттенки зелёного), с возможностью переключения режима отображения день/смены. Блок также используется для навигации – есть возможность быстрого перехода на конкретный отчёт.

- Блок фильтрации отчётов – позволяет отбирать отчёты по типу (ежедневные, ежемесячные и др.) и ограничивать выбор заданным временным интервалом.

Так же на главной странице представлены кратные сводки по отчётам, попавшим в критерии фильтрации, либо по умолчанию отображаются страницы с отчётами, созданными в течении недели. Внешний вид сайта представлен на Рис. 24. Для каждого отчёта есть страница с подробными данными, на которой представлены основные метрики работы инжекционного комплекса в виде набора таблиц и интерактивных графиков.

Проектирование и разработка новых элементов для модернизации высокоомощной системы СВЧ питания линейного ускорителя инжекционного комплекса ВЭПП-5

В ИЯФ СО РАН ведётся разработка систем СВЧ-питания нового поколения: создан клистрон "Клён" и модулятор для него, а также управляющая электроника для них. В рамках модернизации СВЧ-систем линейного ускорителя комплекса рассмотрена возможность их использования.

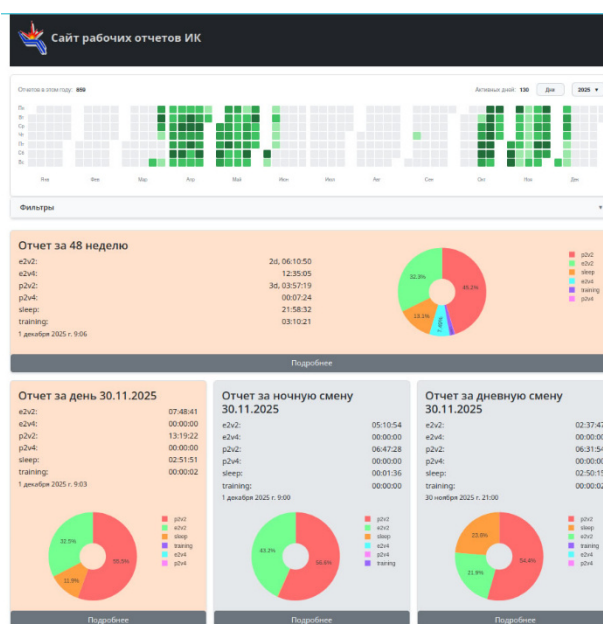


Рисунок 24. – Главная страница сайта рабочих отчётов ИК.

Система СВЧ питания инжекционного комплекса ВЭПП-5

Система СВЧ питания инжекционного комплекса ВЭПП-5 состоит из 4-х усилительных клистронов, возбуждающих предусилителей и непрерывного маломощного задающего СВЧ сигнала. Схема одного такого СВЧ модуля показана на Рис. 25.

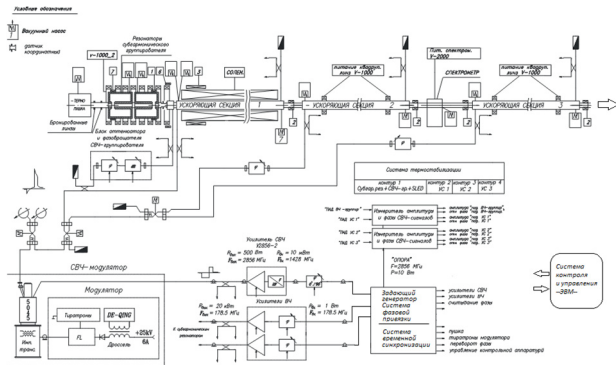


Рисунок 25. Схема СВЧ модуля.

В качестве клистронов используются модели 5045, изготовленные в SLAC (Stanford Linear Accelerator Center) более 30 лет тому назад. Их выходные параметры представлены в Табл. 2. Со временем эксплуатации параметры клистронов стали ухудшаться: выходной ток пучка был снижен до 350 А, а выходная СВЧ мощность приблизилась к 50 МВт. На Рис. 26 показаны измеренные ток и напряжение одного из клистронов, а на Рис. 27 – измеренная выходная СВЧ мощность в волноводном тракте.

Таблица 2. Параметры клистронов SLAC 5045

Параметры	Значение
Частота	2856 МГц
Выходная импульсная мощность	60 МВт
Входная мощность	500 Вт
Длительность СВЧ импульса	3.5 мкс
Частота повторения	До 120 Гц
Ток пучка	400 А
Высокое напряжение анода	350 кВ

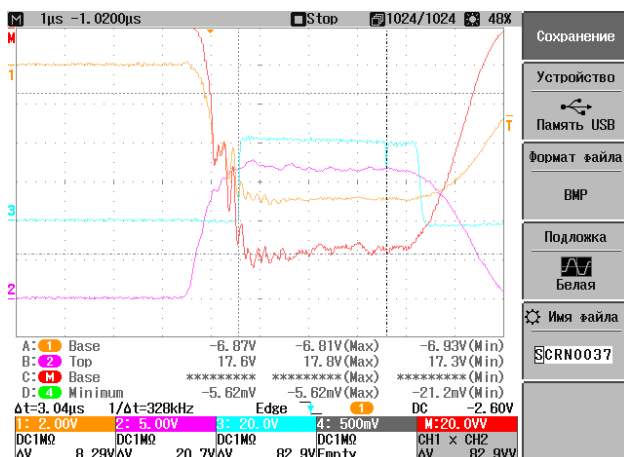


Рисунок 26. Измеренные характеристики клистрона. 1 – огибающая напряжения катода 350 В, 2 – огибающая тока катода 350 А, М – огибающая произведения тока на напряжение клистрона, 3 – огибающая возбуждающего предусилителя клистрона.

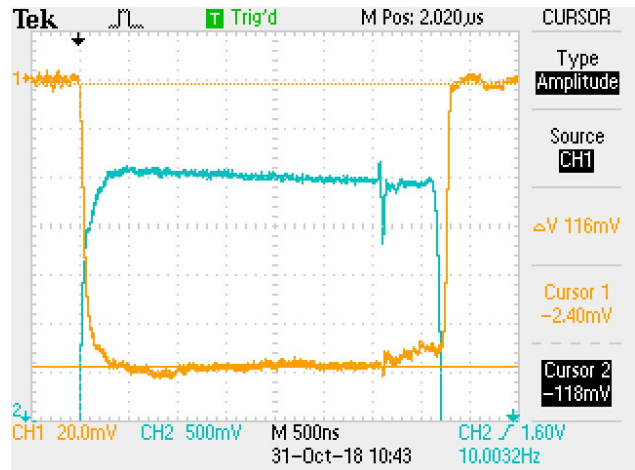


Рисунок 27. Измеренная с помощью калиброванной диодной головки огибающая СВЧ мощности волноводного тракта клистрона 5045 инжекционного комплекса ВЭПП-5: 1 – огибающая СВЧ мощности в волноводном тракте 50 МВт, 2 – огибающая СВЧ мощности возбуждающего предусилителя 300 Вт.

В качестве предусилителей клистронов используются трехкаскадные полупроводниковые усилители, разработанные более 10 лет тому назад. Их вид продемонстрирован на Рис. 28. Выходная импульсная мощность находится в районе 300 Вт. На Рис. 29 показана измеренная зависимость выходной мощности клистрона 5045 от входной для разных напряжений для случая микроперванса 2 мкА/В3/2. Из приведенных данных видно, что входной СВЧ мощности 300 Вт достаточно, для получения максимального усиления при максимальном напряжении 350 кВ. Однако, при сниженном напряжении значение входной мощности 300 Вт находится на границе допустимого значения. Как отмечалось ранее, в нашем случае микроперванс клистронов уменьшился и составляет не более 1.7 мкА/В3/2. В данном случае целесообразно входную СВЧ мощность возбуждающего усилителя иметь выше 300 Вт.



Рисунок 28. Вид используемых возбуждающих предусилителей (использованы корпуса от персональных компьютеров – слева, запасной блок в новом корпусе – справа).

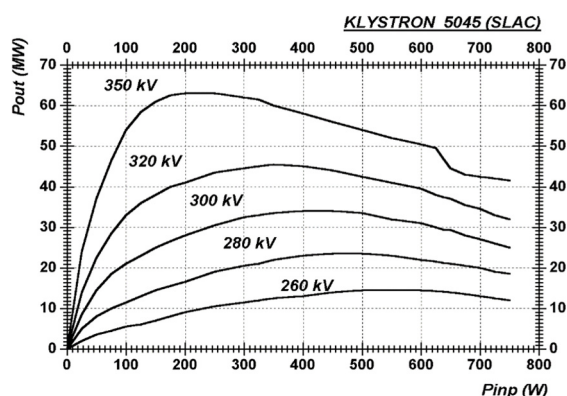


Рисунок 29. Зависимость выходной мощности клистрона 5045 от входной для разных напряжений для случая микроперванса 2 мкА/В^{3/2}.

Элементы новой схемы СВЧ питания комплекса ВЭПП-5

В ИЯФ СО РАН ранее был разработан собственный клистрон [3], параметры которого приведены в Табл. 3. Кроме этого, были изготовлены дополнительные клистроны для линейного ускорителя инжекционного комплекса ЦКП СКИФ.

Таблица 3. Параметры клистрона.

Параметры	Значения
Частота	2856±4 МГц
Выходная СВЧ мощность	50±4 МВт
Входная СВЧ мощность	350 Вт
Длительность СВЧ импульса	1.5 мкс
Ток пучка	310 А
Напряжение катода	350 кВ

Для возбуждения клистронов был также разработан предусилитель мощности. Вид предусилителя показан на Рис. 30, а выходная мощность – на Рис. 31.



Рисунок 30. Изготовленный предусилитель клистрона.

Таким образом, проект модернизации элементов высокоомощной системы СВЧ питания линейного ускорителя инжекционного комплекса ВЭПП-5 можно выполнить, опираясь на разработанные и вышеперечисленные СВЧ устройства. Для возбуждающего предусилителя разработано техническое задание, представленное ниже. В

настоящее время идет закупка материалов для усилителя и формируются печатные платы.

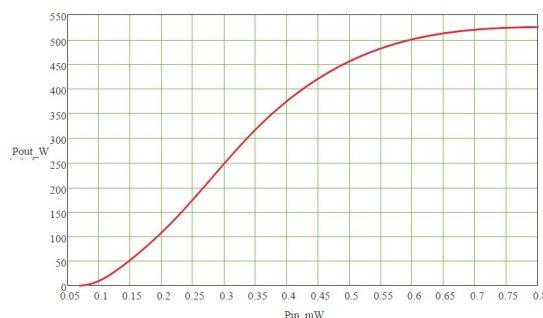


Рисунок 31. Зависимость выходной СВЧ мощности предусилителя от входной.

Техническое задание на возбуждающий усилитель клистронов ВЭПП-5:

1. Входной сигнал: непрерывный режим с частотой 1428 МГц, мощностью 5-10 мВт с возможностью переворота фазы на 180°.
2. Удвоение частоты в блоке усилителя до 2856 МГц: чистота спектра -40 дБ по отношению к основной гармонике, нестабильность частоты не хуже 1 кГц.
3. Модуляция непрерывного СВЧ сигнала в импульсный внутри усилителя: времена фронта не более 0.1 мкс, спад вершины не более 5%.
4. Выходной сигнал должен быть не короче 4 мкс.
5. Частота следования импульсов вырабатывается внешним запуском до 50 Гц. Стабильность должна соответствовать внешнему запуску.
6. Конструктив блока усилителя должен обеспечивать: регулировку амплитуды, внешнюю регулировку амплитуды, внешний запуск с напряжением не менее 10 В, аналоговый выход для огибающей выходного импульса.
7. Условия эксплуатации – комнатное помещение.
8. Время работы прибора непрерывное и должно быть не меньше 10 000 часов.
9. При перевороте фазы внешнего сигнала на 180° переходной процесс в усилителе не должен занимать времени больше 10 нс.
10. Усилитель предназначен для работы с мощным клистроном и должен иметь на выходе защиту от отраженного сигнала с частотой 2856 МГц не хуже -16 дБ.

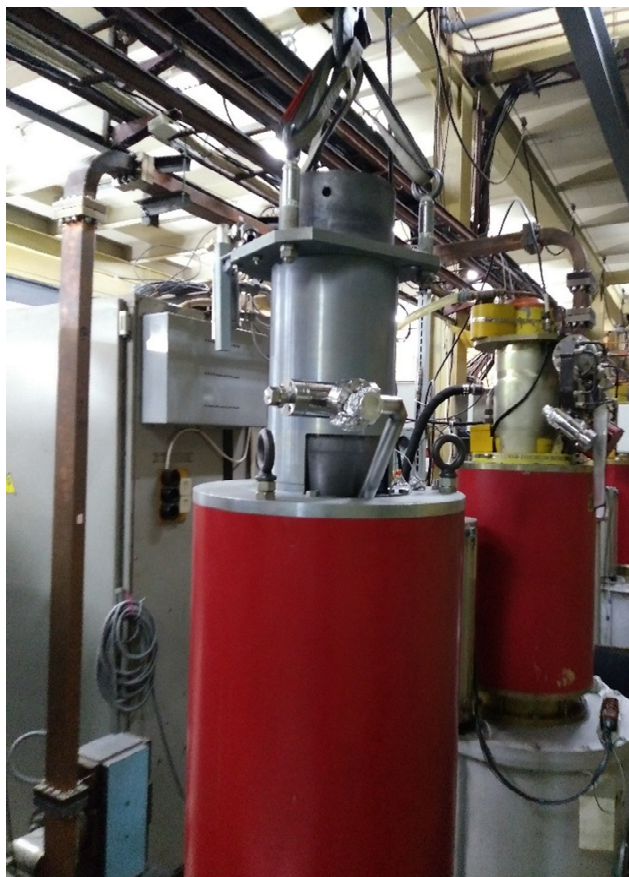


Рисунок 32. Разработанный клистрон в ИЯФ СО РАН в клистронной галерее инжекционного комплекса ВЭПП-5.

При разработке собственного клистрона специально отдельное внимание уделялось возможности использования инфраструктуры инжекционного комплекса ВЭПП 5, чтобы применять уже имеющиеся решения на комплексе. В результате один из изготовленных макетов клистрона при тренировке размещался в клистронной галерее комплекса ВЭПП-5 и полностью использовал имеющуюся инфраструктуру комплекса, что видно на Рис. 32.

Разработанный клистрон и возбуждающий усилитель не только продемонстрировали свои актуальные для инжекционного комплекса параметры, но и показали возможность их встраивания в схему комплекса без каких-либо существенных изменений, что значительно упрощает и удешевляет замену схемы СВЧ-питания ВЭПП-5 на собственные разработанные компоненты и решения.

Разработка и проектирование новых твердотельных модуляторов на современной элементной базе для получения высокого напряжения питания клистронов инжекционного комплекса ВЭПП-5

Модуляторы для питания источников СВЧ энергии в ускорителях заряженных частиц являются одним из наиболее дорогостоящих и критически важных узлов, поэтому внимание, уделяемое разработке модуляторов

во всем мире очень велико. Для ИК ВЭПП 5 в ИЯФ СО РАН была разработана и спроектирована уникальная конструкция модулятора по схеме индукционного сумматора напряжения на основе полупроводниковых коммутаторов. Изготовлен и успешно испытан прототип одной индукторной секции из тринадцати необходимых для полноценной сборки модулятора (см. Рис. 33).

Изготовлена система управления и блокировок модулятором (см. Рис. 35). Осуществлена закупка основных комплектующих модуляторов. Начато производство элементов модуляторов на площадке экспериментального производства ИЯФ СО РАН.

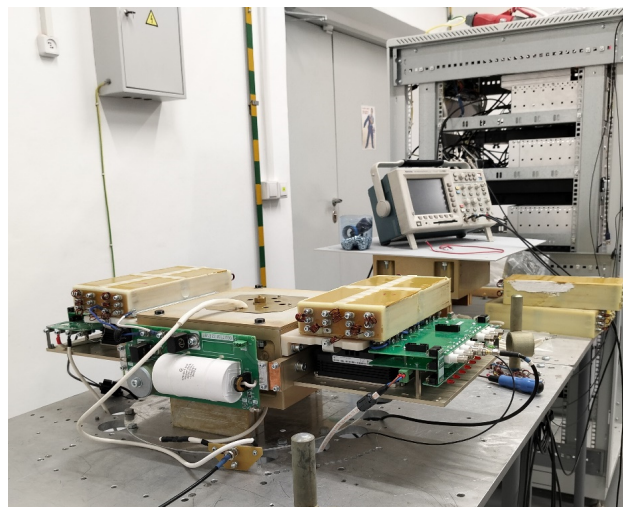


Рисунок 33. Стенд испытаний прототипа индукторной секции твердотельного модулятора.

Основные технические характеристики модулятора приведены в Табл. 4.

Таблица 4. Основные технические характеристики модулятора.

Параметр	Ном.	Максим.	Ед. изм.
Выходное напряжения модулятора	23.5	24	кВ
Выходной ток модулятора	5500	6000	А
Длительность вершины импульса	4.6	4.8	мкс
Частота следования	10	15	Гц
Нестабильность вершины импульса		+/-0.3	%
Джиттер		+/-10 нс	
Средняя выходная мощность модулятора	6440	10080	Вт
Габарит (ШхДхВ) шкаф модулятора	1000 x 1200 x 2000		мм
Габарит (ШхДхВ) шкаф системы управления	600 x 800 x 1625		мм

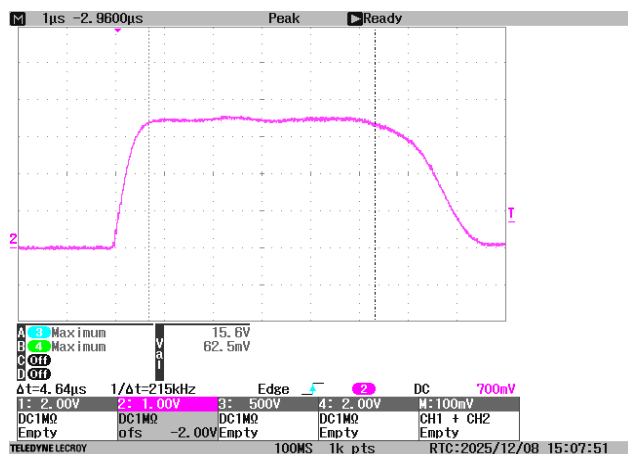


Рисунок 34. Осциллограмма импульса напряжения на нагрузке.

Разработанная топология твердотельного модулятора на основе схемы индукционного сумматора обладает рядом неоспоримых преимуществ в отличие от традиционной резонансной схемы модулятора с коммутатором на тиратроне:

Во-первых, замена коммутатора на тиратроне на полупроводниковые ключи в разы увеличивает ресурс надежной работы всего модулятора;

Во-вторых, в разработанном модуляторе понижено высокое напряжение на силовых элементах модулятора в 13 раз в отличие от схемы традиционного модулятора;

В-третьих, габаритные размеры твердотельного модулятора почти в пять раз меньше габаритных размеров традиционного модулятора при равных значениях их выходной средней мощности.

Данная топология твердотельного модулятора универсальна и способна удовлетворить требования для многих приложений импульсных устройств, в том числе для систем инжекционного комплекса.

Программное обеспечение для управления модуляторами клистронов нового поколения

В связи с предполагаемым использованием новых СВЧ-систем на инжекционном комплексе, потребовалось создать программную поддержку в системе управления (СУ) комплекса для работы с управляющей электроникой новых элементов.

Эта работа велась на стенде модуляторов и клистронов совместно с командой автоматизации ЦКП "СКИФ", где такие модуляторы и клистроны уже используются. Программное обеспечение для работы с модуляторами в составе системы управления находится в стадии разработки и тестирования.

Состав системы

В состав измерительно-управляющей электроники, установленной в стойке управления модулятором, входят (см. Рис. 36):

1. Источник питания высокого напряжения Инситек ИПВ-4 для питания модулятора.



Рисунок 35. Система управления и блокировок твердотельным модулятором.

2. Источник питания магниторазрядных насосов Арстерм ИП-МРН20 для питания магниторазрядных насосов, обеспечивающих вакуум клистрона.

3. Модуль управления и блокировок клистрона УБК, собирающий блокировки и выдающий разрешение работы источника питания высокого напряжения.

4. Контроллер на основе одноплатного компьютера (система на модуле, SoM) i.MX8 производства Variscite с процессором архитектуры ARM64, снабжённый устройствами ввода-вывода, включая порты UART. Контроллер работает под управлением ОС Linux.

УБК и контроллер установлены в евромеханической корзине высотой 3U. ИП МРН20 и ИПВ-4 расположены на отдельных этажах стойки.

Связь контроллера с модулем УБК ведётся по линии UART по специально разработанному протоколу на скорости 115200 бод. Топология подключения "точка-точка".

ИП-МРН20 и ИПВ-4 оснащены портами RS485 и поддерживают протокол Modbus-RTU; они подключаются последовательно. Для связи с ними на скорости 19200 бод используется вторая линия UART, подключенная в преобразователь UART-RS485, установленный в модуле УБК (этот преобразователь логически никак не связан с УБК, а размещён там лишь для удобства компоновки и использует электрическое питание от УБК).

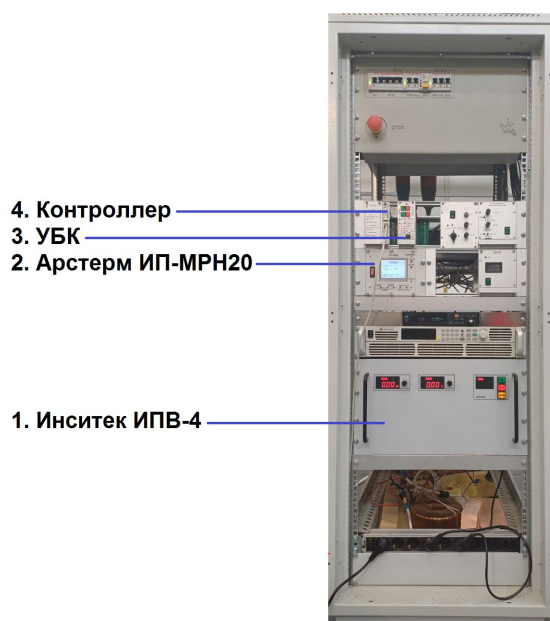


Рисунок 36. Стойка управления модулятором и клистроном.

Реализация поддержки в СУ

Поскольку в контроллере работает ОС Linux, а архитектура ARM64 поддерживается используемым на Инжекционном комплексе фреймворком CXv4, то было решено разместить CXv4-сервер непосредственно в контроллере. Таким образом, требовалась реализация поддержки УБК, ИП-МРН20 и ИПВ-4 для CXv4.

Для УБК был создан полноценный драйвер, реализующий работу по специфичному протоколу. Для ИП-МРН20 и ИПВ-4 был использован штатный Modbus-драйвер CXv4 (см. подраздел 2.4.1); для этих устройств были созданы файлы описания соответствия регистров устройств каналам СУ.

Первоначально работа ПО со всеми устройствами была проверена по отдельности через адаптеры USB-RS485 и USB-UART, подключенные к обычному ПК с Linux.

Затем был собран полный комплект ПО под ARM64 для запуска в контроллере на базе i.MX8.

При работе в этой конфигурации обнаружили недостатки в работе всех трёх управляемых устройств:

1. УБК при подключении к UART i.MX8 игнорирует все послышки от контроллера пока на УБК не будет нажата кнопка Reset. Для обхода этой проблемы в прошивку микроконтроллера УБК разработчиками добавлена пауза в 20 секунд после

включения питания перед инициализацией чипа UART; это является временным решением до нахождения реальной причины проблемы.

2. ИП-МРН20 перед отправкой ему пакета запроса требует паузы после предыдущего пакета в линии не менее 16 миллисекунд, если предыдущий обмен был с другим устройством. Это противоречит требованиям протокола Modbus RTU, предписывающему для скорости 19200 бод паузу 2 миллисекунды. Поэтому в конфигурации линии Modbus была настроена пауза 16 миллисекунд после обменов с ИПВ-4 (являющимся вышеупомянутым другим устройством).

3. ИПВ-4 некорректно отвечает на команды записи регистров типа COIL, используемых для команд включения и выключения высокого напряжения, если запись осуществляется кодом функции 15 (запись множественных регистров). Решением было выполнение записи кодом функции 5 (запись одиночного COIL-регистра), что указывается в файле описания устройства.

После внедрения методов обхода проблем весь комплект ПО и электроники продемонстрировал успешную совместную работу в той степени, в которой позволяет оборудование стенда.

В частности, полноценно проверить взаимодействие с Инситек ИПВ-4 при работе на полных напряжении и токе не было возможности из-за отсутствия нагрузки, пришлось ограничиться напряжением 0.5kV.

Также из-за отсутствия нагрузки не удалось проверить работу функциональности автоматической тренировки клистрона, построенной на базе драйвера trainer_dgv (см. подраздел 2.4.3).

Драйвер для тренировки высоковольтного оборудования

Для высоковольтных устройств используется процедура так называемой "тренировки", когда рабочее напряжение плавно повышается до номинального, а при пробоях снижается и после небольшой паузы опять плавно повышается. Она позволяет эффективно вывести устройство на рабочий режим.

Зачастую такая тренировка выполняется оператором вручную. Однако, поскольку эта процедура поддается алгоритмизации и, как следствие, автоматизации, то рациональным было бы создание алгоритма автоматической тренировки.

В 2023г главой команды разработчиков клистрона "Клён" А.Е. Левичевым был предложен следующий алгоритм тренировки клистрона:

Пользователь должен задавать следующие параметры:

1. Максимальное напряжение зарядного устройства, до которого программа может его поднимать (или это считывается из уставки программы авторства С. Воцина по управлению модулятором);
2. Порог вакуума, при котором происходит сброс напряжения;

3. Уровень вакуума на МРН клистрона, после которого начинается рост напряжения (может быть вшита в программу, текущее значение - 20 мкА);

4. Уровень напряжения зарядного устройства, до которого происходит сброс напряжения;

5. Шаг подъема напряжения (может быть вшито в программу, текущее значение – 0.1 кВ);

6. Максимальный уровень напряжения (или битов АЦП) отраженного сигнала, после которого происходит сброс напряжения высокого клистрона.

Далее описан принцип действия программы. Пользователь включает клистрон и поднимается до определенного им напряжения на клистроне и включает программу тренировки. Если произошло превышение п.2 или п.6, то программа сбрасывает напряжения до заданного нижнего порога п.4. После этого она определяет вакуум в насосе (ток насоса). Если он выше порога п.3, то программа ничего не делает, если он ниже, то начинает поднимать напряжение. Поднимает напряжение с шагом п.5, ждет 5 импульсов, после этого снова поднимает, то есть шаг за пять импульсов. На каждом этапе программа определяет максимальное напряжение отраженной волны п.6 и уровень вакуума п.2. Если один из показателей превышен (п.2 или п.6), то программа опять сбрасывает напряжение до указанного уровня п.4 и все повторяется. За последний шаг до максимального заданного напряжения программа автоматически уменьшает шаг подъема напряжения на заданный п.5 в десять раз. Уже с меньшим шагом поднимается до указанного значения с тем же алгоритмом. Если на стадии подъема ни один показатель не превышен, то программа поднимает до максимального уровня п. 1 и останавливается либо до срабатывания превышения заданных уровней п.2 или п.6, либо до изменения пользователем максимального уровня напряжения п.1.

Вышеприведенный алгоритм предполагает линейное последовательное исполнение. В системах управления же используется событийная модель. Поэтому была произведена трансформация предложенного алгоритма в архитектуру, управляемую событиями:

А. Программа постоянно мониторит все задействованные каналы, в т. ч. текущие значения вакуума, высокого напряжения и состояние блокировок.

В. По приходу измеренных значений вакуума и напряжения они сравниваются с установленными границами п.2 и п.6 соответственно, и в случае превышения границ производится сброс уставки напряжения до значения из п.4.

С. Если текущее значение уставки напряжения ниже рабочего уровня (п.1), то производится подъём; процедура "сделать шаг подъёма" выполняется с некоторой периодичностью – например, по событию "выстрел".

С.1. Для того, чтобы делать шаги не каждый выстрел/период, а с некоторыми паузами, вводится переменная-счётчик, в которую после изменения уставки записывается число импульсов, сколько надо

пропустить (например, 5), а при каждом импульсе она уменьшается на 1 и следующий шаг уставки производится в случае, если значение счётчика уменьшилось до 0.

Этот же счётчик позволяет организовать паузу между сбросом уставки (по превышению вакуума или напряжения) и началом её подъёма: в момент сброса уставки в него записывается число импульсов, сколько надо подождать (например, 20).

С.2. Процедура выполнения шага подъёма:

С.2.a: если уставка уже почти дошла до номинала – разница между рабочим напряжением (п.1) и текущей уставкой меньше шага подъёма (п.5), то уставка увеличивается на 1/10 шага (но если разница меньше 1/10 шага, то ставится номинал), в противном случае...

С.2.b: ...уставка увеличивается на 1 шаг.

Таким образом, алгоритм разбивается на несколько простых действий (проверку текущих значений измерений и выполнение шага подъёма напряжения), выполняемых независимо. И при этом требование "при изменении пользователем максимального значения напряжения п.1 произвести подъём уставки напряжения до нового максимума" выполняется автоматически.

В 2025 году на основе этой модели был создан драйвер `trainer_drv` для фреймворка `CXv4`. От приведённого выше алгоритма (в варианте, управляемом событиями) есть следующие отличия:

1. Для общности вместо некоей "блокировки клистрона" производится мониторинг 3 булевских (бинарных) каналов-параметров: а) внешняя блокировка для уменьшения уставки на фиксированную величину ("отступ назад"); б) внешняя блокировка для сброса уставки на минимальное значение; в) внешняя блокировка для полного отключения работы (аварийного прекращения тренировки).

Каналы, мониторируемые в качестве блокировок, указываются драйверу в конфигурации и являются опциональными; при неуказанности соответствующая реакция на блокировку не производится.

2. Для "прореживания" шагов подъёма (выполнения их не каждый импульс) и для пауз после сброса уставки используются 2 отдельных счётчика, а не 1, как в пункте С.1 алгоритма. Это устранило конфликт между действиями, требуемыми в этих двух случаях; в частности, проще решается проблема "дребезг блокировки", когда блокировка быстро переключается между состояниями "есть" и "нет", что часто бывает в граничных состояниях.

В настоящее время драйвер протестирован на эмулируемой аппаратуре, т.к. он предназначен в первую очередь для автоматической тренировки клистронов.

Разработанное в ИЯФ программное обеспечение позволяет успешно внедрить в систему управления инжекционного комплекса новые СВЧ-элементы.

Адаптация программного комплекса Lcode к конкретным задачам плазменного кильватерного ускорения

Эксперимент AWAKE

В эксперименте AWAKE в ЦЕРНе (Швейцария-Франция) исследуется возбуждение плазменной кильватерной волны протонным пучком с целью отработки методики достижения рекордных энергий электронов. На следующем этапе развития установки (Run2c) протонный пучок будет последовательно проходить через две плазменные секции (см. Рис. 37(a)). В первой секции пучок самомодулируется, то есть разбивается на микросгустки. Эти микросгустки синхронизированы по фазе с возмущением, создаваемым в плазме низкоэнергетичным электронным пучком-затравкой. В вакуумном зазоре между плазменными секциями остатки затравочного электронного пучка отклоняются в сторону, и на ось системы поперечным магнитным полем добавляется высококачественный электронный сгусток для ускорения (витнесс). Затем витнесс ускоряется во второй плазменной секции кильватерной волной модулированного протонного пучка. Во второй плазменной секции можно создать постоянный градиент плотности. Задача исследования состояла в варьировании плотности плазмы на концах второй секции с целью максимизации энергии витнесса.

Ключевым и самым ресурсоемким элементом работы стал подбор параметров профиля плотности плазмы в первой секции, обеспечивающих правильную самомодуляцию протонного пучка. При использовании программы Lcode [4] расчет одного варианта требует около 300 часов процессорного времени на вычислительном кластере «Академик В.М. Матросов». В результате трехпараметрической оптимизации был найден оптимальный профиль плотности (см. Рис. 37(b)), обеспечивающий средний темп ускорения во второй секции 380 МэВ/м при длине вакуумного промежутка между секциями 1 м и плотности плазмы во второй секции $2.11 \cdot 10^{14} \text{ см}^{-3}$.

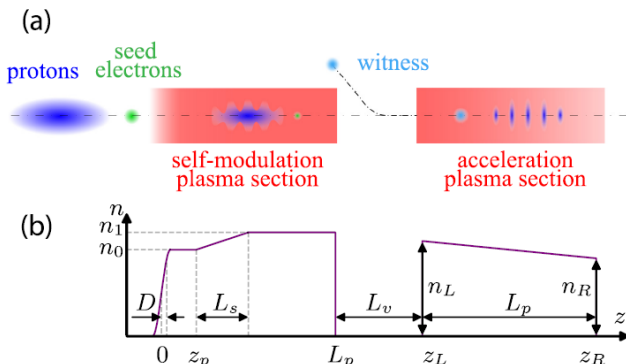


Рисунок 37. (a) Исследуемая конфигурация плазмы и (b) продольный профиль плотности плазмы (не в масштабе).

Относительно небольшой темп ускорения в этих расчетах обусловлен небольшой плотностью плазмы и наличием вакуумного промежутка. Выбор низкой

плотности плазмы удобен с точки зрения возможной экспериментальной проверки, поскольку он облегчает юстировку пучков и их диагностику. Вакуумный промежуток приводит к ухудшению пучка-драйвера и должен быть минимизирован; значение 1 м относится к ранним версиям проекта эксперимента. В современной версии проекта он составляет 30 см [28], и усилия по его уменьшению были предприняты на основании численного моделирования программой Lcode. При высокой плотности плазмы ($7 \cdot 10^{14} \text{ см}^{-3}$) и пренебрежимо малом вакуумном промежутке темп ускорения достигает 1.2 ГэВ/м (см. Рис. 38).

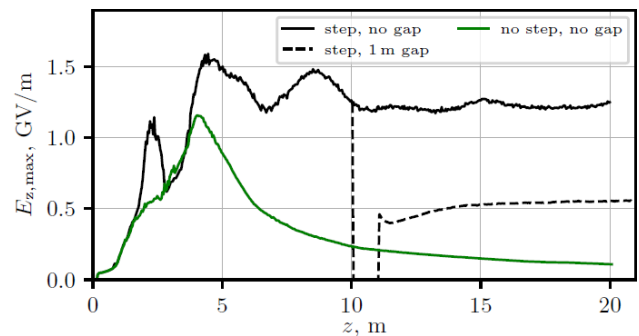


Рисунок 38. Влияние правильного выбора профиля плотности плазмы (скачка плотности) в первой секции и вакуумного промежутка на темп ускорения во второй плазменной секции.

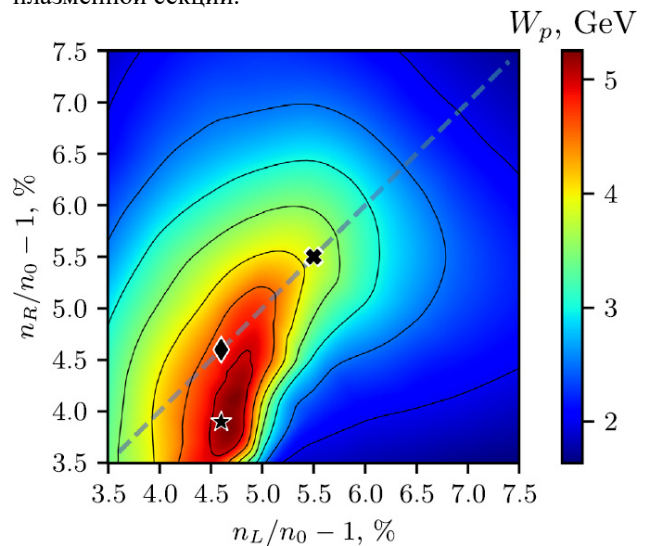


Рисунок 39. Максимальный расчетный набор энергии витнесса W_p как функция плотности плазмы n_L и n_R на концах второй плазменной секции. Крестик, ромб и звездочка обозначают базовый, плоский и оптимальный варианты соответственно. Пунктирная диагональ соответствует вариантам без градиента.

Вариация параметров градиента плотности во второй секции позволила в варианте с низкой плотностью увеличить темп ускорения на 33% (см. Рис. 39) и разобраться в причинах такого увеличения. Эффект достаточно велик и может быть надежно зафиксирован по измерениям энергии витнесса. Примечательно, что для проверки теоретических предсказаний не требуется существенной модификации

экспериментальной установки. Согласие с моделированием будет свидетельствовать о достигнутом понимании происходящих в плазме процессов, а различие – укажет на наличие важных неучтенных эффектов.

Мелкомасштабный шум кильватерного поля при моделировании самомодуляции длинных пучков

Из-за того, что сила между близко расположенными частицами плазмы в расчетных программах, использующих метод частиц в ячейке, не может быть корректно вычислена, при моделировании долговременной динамики кильватерной волны имеет место эффект кластеризации (слипания) частиц (см. Рис. 40), который приводит к появлению нефизического мелкомасштабного шума плотности плазмы и электромагнитного поля. Рекомендуемые способы преодоления этой проблемы (разрешение длины Дебая или повышение температуры плазмы) не работают для кильватерного ускорения. Начальная температура электронов плазмы очень низкая (обычно 5 эВ), и важно поддерживать ее на низком уровне, чтобы правильно смоделировать долговременную эволюцию волны. Длина Дебая для этой температуры в 300 раз меньше толщины скин-слоя – минимального масштаба, обычно разрешаемого в моделировании, поэтому уменьшение шага сетки тоже не вариант. В Lcode для подавления шумов используется новый метод [К6], называемый «декластеризацией», суть которого состоит в модификации закона взаимодействия частиц на близких расстояниях.

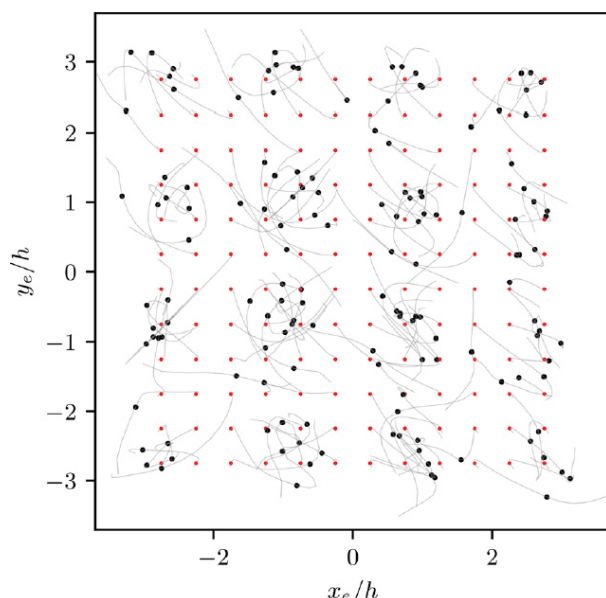


Рисунок 40. Изменение во времени относительного положения отдельных электронов плазмы в кильватерной волне. Расстояния x_e и y_e измеряются от центра масс показанной группы электронов, что позволяет исключить колебания этих электронов в целом в плазменной волне. Красные точки показывают начальные положения электронов, черные – положения электронов спустя 100 периодов колебаний, а линии – траектории электронов.

Если не предпринимать специальных усилий по подавлению кластеризации частиц, то при моделировании самомодуляции длинных пучков заряженных частиц в плазме развиваются численные шумы электронной плотности (см. Рис. 41(a)) и поперечного электрического поля (см. Рис. 42). Последние особенно опасны при исследованиях плазменного кильватерного ускорения, поскольку приводят к нефизическому ухудшению качества (увеличению эмиттанса) пучков. Новый программный комплекс Lcode3d, благодаря алгоритму декластеризации, свободен от этой проблемы и позволяет проводить моделирование с малым уровнем численных шумов (см. Рис. 41(b)).

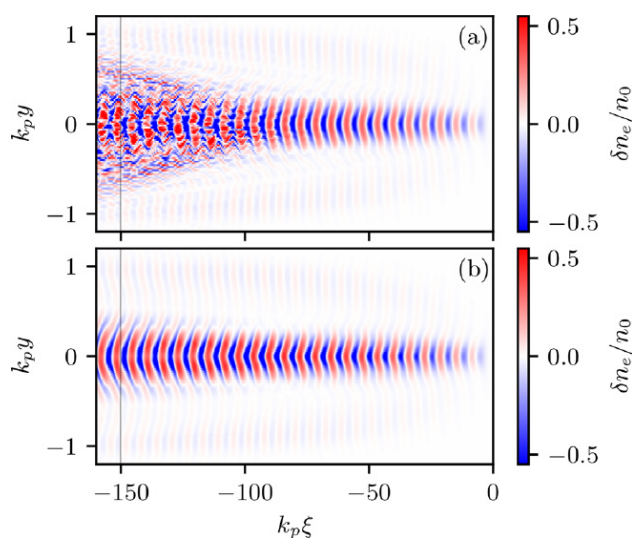


Рисунок 41. Возмущение плотности электронов плазмы в кильватерной волне самомодулирующегося позитронного пучка без декластеризации (a) и с ней (b).

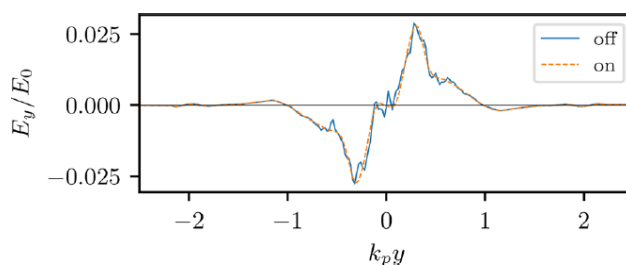


Рисунок 42. Поперечное электрическое поле вдоль тонкой вертикальной линии, отмеченной на Рис. 3.5, с декластеризацией и без нее.

Поперечное опрокидывание кильватерной волны

Поперечное опрокидывание – это событие, при котором траектории электронов плазмы, изначально находившихся на разных радиусах, пересекаются, в результате чего один или оба электрона выпадают из коллективного движения в волне (см. Рис. 43). Поперечное опрокидывание играет важную роль в плазменном кильватерном ускорении, поскольку может приводить к захвату и ускорению электронов

волной, диссипации энергии волны, появлению радиально выбрасываемых электронов и даже росту поля. Поэтому моделирующие программы должны быть способны предсказывать, где и когда происходит опрокидывание волны.

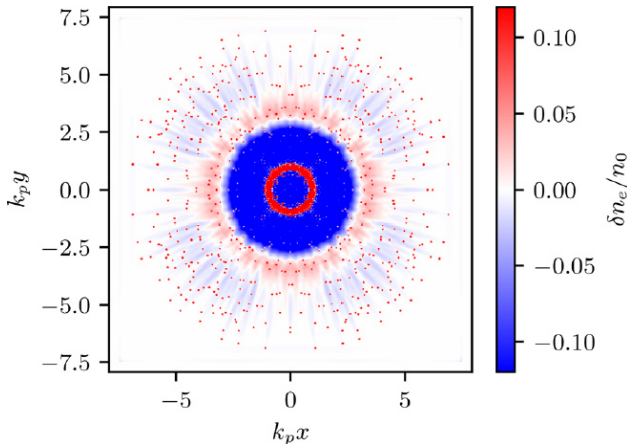


Рисунок 43. Поперечное опрокидывание кильватерной волны, как оно выглядит в трехмерном моделировании. Показано возмущение плотности электронов вскоре после момента опрокидывания. Красные точки – это отдельные макрочастицы, вылетевшие из волны вследствие опрокидывания.

Ожидаемым образом поперечное опрокидывание зависит от кластеризации макрочастиц. Наблюдаемый момент опрокидывания также зависит от шага сетки. Волна опрокидывается раньше при большем шаге. По мере уменьшения шага сетки момент опрокидывания в трехмерном моделировании приближается к результатам высокоточного двумерного моделирования (с очень малым шагом сетки), но только при подавлении кластеризации (см. Рис. 44). В присутствии кластеризации численные шумы вызывают раннее опрокидывание волны при любом разрешении. Поэтому моделирование, выполненное без декластеризации, может переоценивать многие важные физические эффекты, связанные с опрокидыванием волны.

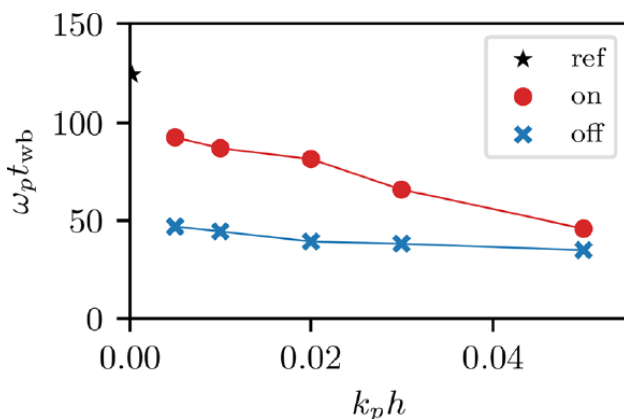


Рисунок 44 – Зависимость момента опрокидывания от шага сетки со включенным подавлением кластеризации (on) и без него (off). Звездочка

показывает результат двумерного моделирования с высоким разрешением.

Благодаря уникальному алгоритму подавления численных шумов и использованному квазистатическому приближению, программный комплекс Lcode является самым мощным в мире инструментом для исследования долговременной динамики плазменной волны в кильватерных ускорителях. Результаты расчетов, сделанных с использованием Lcode и опубликованных в 2025 году, не могут быть повторены конкурирующими программами.

- [1] В.П. Черепанов. Датчик тока изображения для измерения параметров сгруппированного пучка, ГИЦ РФ ИЯФ (1995).
 [2] Modbus Protocol Specification, <https://www.modbus.org/file/secure/modbusprotocollspecification.pdf>
 [3] Levichev, A., Barnyakov, A., Samoylov, et al. Development and testing of a high-power S-band klystron at BINP SB RAS. Nuclear Science and Techniques, 2024, Vol. 35. No. 7, article No 117.
 [4] <https://lcode.info/>

ЭЛЕКТРОННОЕ ОХЛАЖДЕНИЕ

Введение

Задача по охлаждению пучков ионов в комплексе NICA крайне важна с точки зрения реализации планируемой экспериментальной программы. Охлаждение позволит эффективно накапливать ионы в Бустере и Коллайдере и обеспечит сохранение эмиттансов встречных пучков в коллайдере непосредственно в процессе столкновений, что позволит добиться требуемой светимости. С этой целью в комплексе будут использоваться несколько систем электронного и стохастического охлаждения.

За электронное охлаждение будут отвечать две системы: низковольтная система электронного охлаждения (СЭО) на Бустере и высоковольтная СЭО в Коллайдере. Низковольтная система обеспечивает пучок электронов с энергией до 50 кэВ с током до 1 А и предназначена для работы на энергии инжекции при накоплении ионов в Бустере и на промежуточной энергии для подготовки пучка к выводу из кольца. Данная система была разработана и изготовлена в ИЯФ СО РАН и использовалась в нескольких сеансах работы комплекса [1].

Эксперименты на СЭО Бустера

Накопление в Бустере NICA планируется обеспечить за счет разделения основного пучка и нового инжектируемого сгустка вдоль орбиты. Половина орбиты будет занята основным пучком, сгруппированным ВЧ системой на первой гармонике, а в свободную часть орбиты будет вводиться новая порция инжекции [2]. Под действием электронного охлаждения инжектированный сгусток будет втягиваться внутрь ВЧ сепаратрисы, освобождая место под новую порцию инжекции.

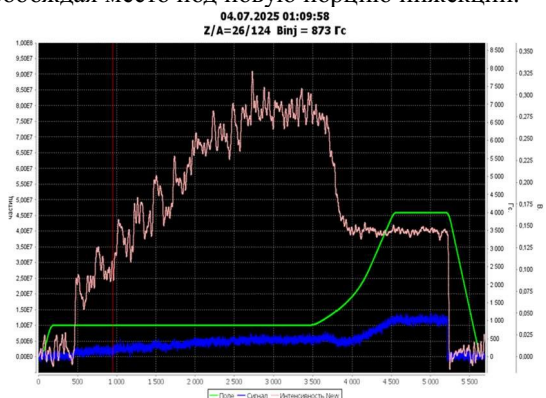


Рисунок 1. Накопление ионов в Бустере с использованием электронного охлаждения. Начиная с 500 мс производится 10 импульсов инжекции с периодом 250 мс. Синий – сигнал с датчика тока (пересчитанный в число частиц), розовый – число частиц, зеленый – поле в магнитах.

На рис. 1 показан результат измерения тока пучка $^{124}\text{Xe}^{26+}$ при накоплении 10 порций инжекции во время RUN-V в 2025 г. Первая порция инжектируется непо-

средственно внутрь сепаратрисы, остальные – в свободную часть орбиты. Видно, что интенсивность накопленного пучка примерно в 4 раза больше, чем интенсивность одной инжекции. Период между инжекциями 250 мс подобран так, чтобы новая порция успела полностью охладиться в сепаратрису до следующей инжекции.

Поскольку в описанных экспериментах в Бустере стояла задача добиться эффективного накопления ионов, то не проводилась настройка максимально эффективного ускорения пучка после накопления. Это видно на рис. 1, где примерно с 3500 мс начинается процесс ускорения пучка, в результате которого теряется примерно половина интенсивности ионов.

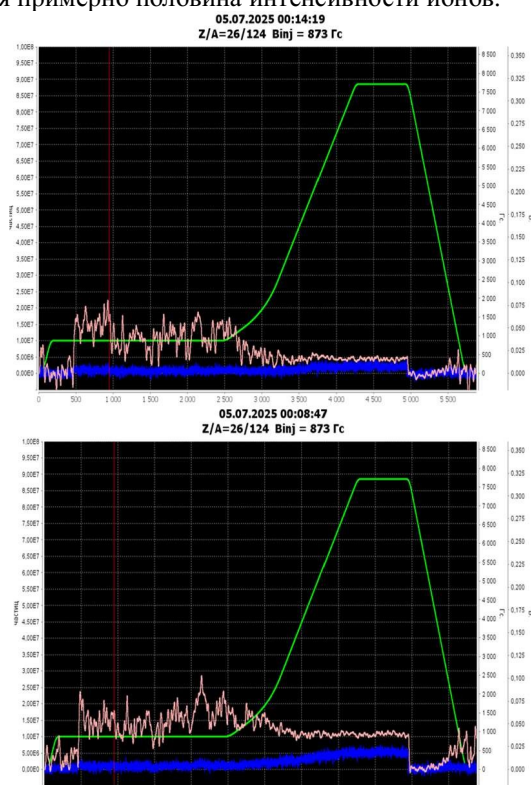


Рисунок 2. Однократная инжекция в Бустер. Сверху – без электронного охлаждения, снизу – с электронным охлаждением. Синий – сигнал с датчика тока (пересчитанный в число частиц), розовый – число частиц, зеленый – поле в магнитах.

Полезное влияние электронного охлаждения может быть продемонстрировано даже при однократной инжекции. В описанных экспериментах в Бустере стояла задача добиться эффективного накопления ионов, но не проводилась настройка максимально эффективного ускорения пучка после накопления. Это видно на рис. 1, где примерно с 3500 мс начинается процесс ускорения пучка, в результате которого теряется примерно половина интенсивности ионов. На рис. 2 можно увидеть, что уменьшение продольного фазового объема за счет электронного охлаждения может уменьшить эти потери. Сверху показан процесс однократной инжекции с последующим ускорением без электронного

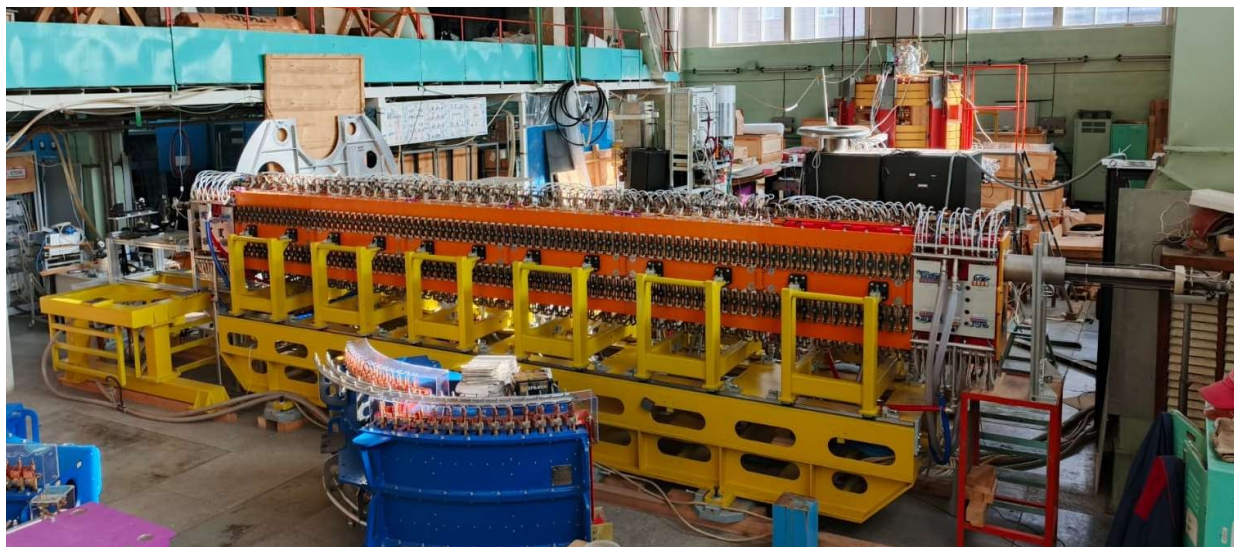


Рисунок 3. Фотография соленоида охлаждения в процессе магнитных измерений. На переднем плане виден тороид, который предназначен для сведения электронного и ионного пучков.

охлаждения. Как и на рис. 1, при ускорении теряется примерно половина ионов. На рис. 2 снизу показан тот же процесс с включенным электронным охлаждением. Видно, что при примерно такой же интенсивности инжектированного пучка, после ускорения сохранилось примерно в 2 раза больше ионов. Т.е. даже при неидеальной настройке инжекции и ВЧ ускорения электронное охлаждение позволяет добиться гораздо лучшего захвата пучка в ВЧ сепаратисту и уменьшить потери.

СЭО коллайдера

В ИЯФ СО РАН работы по созданию высоковольтной СЭО с энергией электронов до 2.5 МэВ и током пучка до 1 А находятся в завершающей стадии. На данный момент изготовлены и испытаны практически все магниты и большая часть оборудования. Данная система будет использоваться для накопления ионов в Коллайдере при инжекции из Нуклотрона и непосредственно в процессе столкновений для компенсации роста эмиттансов и разброса импульсов в ионных пучках [3].

Установка СЭО для коллайдера имеет компоновку с продольным магнитным полем и двумя секциями для охлаждения встречных пучков с малым расстоянием между собой (32 см), что сильно осложнило ее техническое проектирование и производство. На рисунке 3 показан основной соленоид СЭО в котором происходит взаимодействие электронного и ионного пучков в процессе магнитных измерений.

Для испытаний высоковольтного оборудования была собрана тестовая система, состоящая из части высоковольтной колонны (с промежуточной секцией) и высоковольтного терминала с частью высоковольтного оборудования (рис. 4). Оборудование данной тестовой системы питается от прототипа каскадного трансформатора, который запитан от штатного источника питания будущей СЭО [3]. Целью испытаний является согласо-

вание электронных блоков с каскадным трансформатором, проверка работоспособности блоков и испытание их устойчивости к высоковольтным пробоям.

На колонне данной тестовой системы были проведены испытания электронных блоков высоковольтных секций и промежуточной секции колонны, а также проведены испытания электроники колонны на высоковольтный пробой при напряжении 100 кВ.

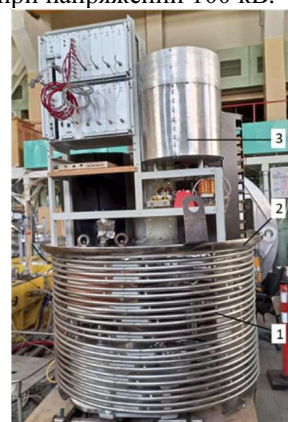


Рисунок 4. Тестовая система для испытаний высоковольтного оборудования. 1 – высоковольтная колонна (укороченная), 2 – дно высоковольтного терминала, 3 – оборудование высоковольтного терминала.

- [1] М. И.Брызгунов, А.В.Бублей, В.А.Лебедев, И.Н. Мешков и др. Первые эксперименты по электронному охлаждению ионов в бустере NICA. (2024). Письма в ЭЧАЯ, 21(3), стр. 342–351.
- [2] Syresin E., Tamashevich Y., Lebedev V., Butenko A., et al. Electron and stochastic beam cooling for intensive heavy ion beams at NICA complex: Experiments and plans Chinese Physics C. - 2025. - Vol. 49, Is. 7, 074003.
- [3] M. Bryzgunov, A. Bublely, A. Denisov et al., Elements of High Voltage Electron Cooling System for NICA Collider, 13th International Workshop on Beam Cooling and Related Topics, COOL 2021 - Novosibirsk, Russian Federation, 1 Nov 2021 → 5 Nov 2021.

РАБОТА НА ПУЧКАХ СИ

Введение

Работы с использованием синхротронного излучения (СИ) в 2025 проводились одновременно на двух накопительных кольцах ВЭПП-3 и ВЭПП-4М.

Работы с использованием СИ велись в рамках общего распределения операционного времени работы ускорительных комплексов между различными исследовательскими программами. В частности, во второй половине года много операционного времени ВЭПП-3 было выделено на экспериментальную программу измерения электромагнитного форм-фактора дейтрона, что исключало возможность работ с использованием СИ на ВЭПП-3 и возможность инжекции пучков в коллайдер ВЭПП-4М.

Кроме того, ввиду изношенности оборудования накопителей, большая часть времени была израсходована на ремонт возникающих поломок отдельных систем. Поэтому общее время работ на исследования с использованием СИ в 2025 году оказалось наименьшим за последние четыре года.

Графики набора интегралов операционного времени за последние несколько лет (начиная с 2022 года) показаны на Рисунке 1.

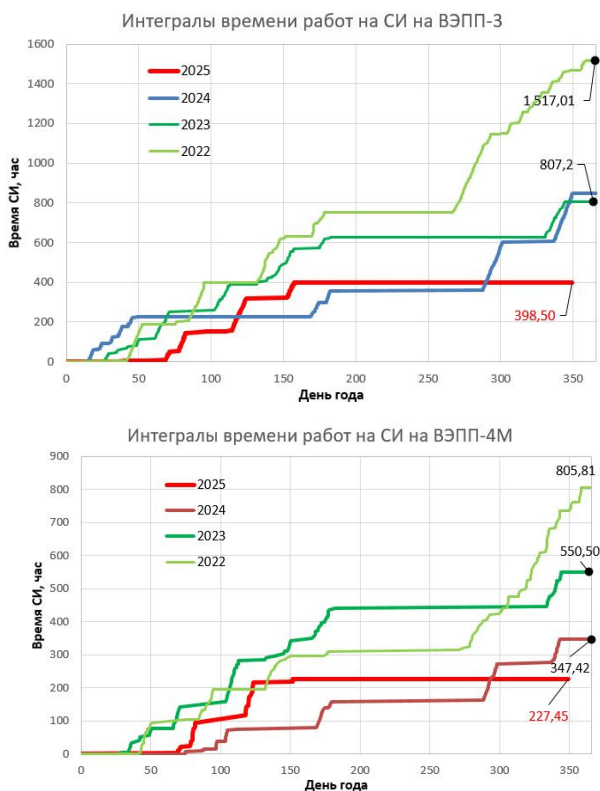


Рисунок 1. Графики набора интегралов операционного времени комплекса ВЭПП-3/ВЭПП4-М для работ с использованием синхротронного излучения за период 2022 – 2024 гг.

Таким образом в 2025 году на ВЭПП-3 было отработано около 400 часов на накопителе ВЭПП-3 и около 230 часов на коллайдере ВЭПП-4М.

Работы на ВЭПП-3 в 2025 году проводились только с энергией пучков 2 ГэВ. На коллайдере ВЭПП-4 большая часть работ проводилась на энергии инжекции (1,9 ГэВ), т.к. ввиду проблем, связанных с обеспечением вакуума работа на высокой энергии (4,5 ГэВ), также была невозможна.

Исследования проводились на 16 экспериментальных станциях СИ. В 2025 г. услугами Центра воспользовалось 46 организаций в рамках реализации около 52 исследовательских программ, проектов, грантов, договоров о научно-техническом сотрудничестве, тематических планов бюджетных организаций. В настоящее время имеется 47 договоров о сотрудничестве с различными научными и производственными организациями. Исследования покрывают широкий спектр по пяти приоритетным направлениям развития науки, технологий и техники РФ.

Результаты работ по использованию экспериментальных станций и их модификации проводимые в рамках реализации государственного задания.

Работы на станциях СИ

Станция EXAFS спектроскопии (канал 8 ВЭПП-3)

В 2025 году на станции были проведены следующие работы.

Выполнено исследование функциональных материалов, приготовленных на базе оксидной системы $\text{La}_{0.65}\text{Ca}_{0.35}\text{Fe}_{0.8-x}\text{Co}_{0.2}\text{Cu}_x\text{O}_3\text{-delta}$. Данные оксиды рассматриваются как перспективные электродные материалы для твердооксидных топливных элементов (ТОТЭ) и твердооксидных электролизеров. Изучалось состояние и локальное окружение переходных металлов в монофазных образцах, согласно данным рентгеновского анализа. Работа выполнена в рамках госзадания ИХТТМ СО РАН.

Выполнено исследование модельной системы Au-Pt, перспективной для разработки методик анализа спектров, имеющих области перекрывающихся сигналов. Работа выполнена при поддержке Министерства науки и высшего образования РФ в рамках государственного задания ЦКП «СКИФ» Института катализа СО РАН. В работе использовалось оборудование ЦКП «СЦСТИ» на базе УНУ "Комплекс ВЭПП-4–ВЭПП-2000" в ИЯФ СО РАН. Исследование выполнено с использованием оборудования ЦКП УдмФИЦ УрО РАН в рамках темы государственного задания Отдела ФХП ФТИ УдмФИЦ УрО РАН (№124021900017-1).

Проведено исследование наноматериалов MoS_2 и WoS_2 , допированных атомами Ni и Co. Изучение строения активного каталитического центра в зависимости от условий синтеза и концентрации допированных элементов. Выполнено исследование структуры сенсоров на основе Ni/ MoS_2 до и после взаимодействия наноматериала с аммиаком (грант РФФ 23-73-00048, «Синтез, электронная структура и функциональные свойства наноматериалов на основе MoS_2 и WS_2 », руководитель д.х.н. Булушева Л.Г. №79 -Конкурс 2023 года по мероприятию «Проведение исследований на базе существующей научной инфраструктуры мирового уровня»).

Выполнено исследование структуры новых координационных соединений Fe(II) с 2,6-бис(1H-имидазол-2-ил)-4-хлорпиридином, обладающих свойством спин-кроссовера. Изучение изменения электронного строения и структуры координационного узла Fe в зависимости от типа противоиона (NO_3 , SO_4 , Cl_2) (работа выполнена в рамках госзадания ИХ СО РАН, проект 125021302132-4).

Проведено исследование пространственной и электронной структуры атомов Fe, Cu, Ni в искусственных сульфидно-гидроксидных минералах со слоистой структурой (валлериит и точиллинит), состоящей из бруситоподобного гидроксида Mg и Al и Cu-Fe-S сульфидных слоев с переменным составом. Данные материалы обладают уникальными свойствами, представляющими интерес в различных областях, например, в электро- и фотокатализе, электрохимическом хранении энергии, электронике и так далее, и в настоящее время активно исследуются (грант РФФ 22-13-00321 «Новые многофункциональные двумерные материалы, образованные монослоями сульфидов и гидроксидов металлов: синтез, свойства, перспективы применения», руководитель к.х.н. Лихацкий Максим Николаевич, ФИЦ Красноярский научный центр СО РАН).

Станция «Рентгено-флуоресцентный элементный анализ» (канал 3, ВЭПП-3)

На станции выполнялись работы в рамках следующих проектов:

Грант РФФ №23-63-10017 «Уникальный Томторский тип стратигического(REE-Nb-Sc-Mn) сырья: роль эндо-, экзо- и биогенных факторов в формировании; физио-химические условия возникновения и специфика руд; инновационные технологии переработки» Сроки выполнения 2023-2026 г.г.

Проект РФФ № 24-78-10006, «Палеолитическая летопись Денисовой пещеры: условия формирования, тафономия, культурная и палеогеографическая характеристика плейстоценовых отложений». Целью работы является тестирование методики геохимического профилирования пещерных осадков с высоким разрешением. Выявление геохимически контрастных микроритмов с целью интерпретации условий образования соответствующих осадков и источников вещества.

Проект РФФ (проект № 21-77-20025) «Атмосферный аэрозоль в высокоширотных районах Мирового океана: физико-химический состав, географическое распределение, основные источники и факторы изменчивости».

Оценка возможности определения благородных металлов в геологических объектах (золотосодержащих рудах и продуктах их переработки – хвостах обогащения) методом рентгенофлуоресцентного анализа с использованием синхротронного излучения (РФА-СИ).

Поиск доступных маркеров для ранней диагностики и контроля эффектов воздействия полихимиотерапии (ПХТ) в лечении онкогематологических патологий.

Диагностика и хронология глобальных и локальных событий в летописи континентальных осадочных бассейнов.

Результаты работ были представлены в шести докладах на научных конференциях 2025 года.

Станция «Жесткой рентгеноסקопии» (ВЭПП-4М)

На станции проводились исследования в рамках мероприятия 1.1.1 «Исследование методом синхротронного рентгенофлуоресцентного элементного анализа возможности использования рекомбинантных онколитических вирусов осповакцины, экспрессирующих уникальные комбинации трансонов, для тераностики опухолей человека» по Соглашению от 30.05.2025 № 075-15-2025-452, заключенному между ФБУН ГНЦ ВБ «Вектор» Роспотребнадзора и Министерством науки и высшего образования Российской Федерации по выполнению исследовательской программы (проекта) по теме «Применение синхротронного излучения для вирусологических исследований в целях разработки новых иммунологических препаратов» в рамках реализации отдельных мероприятий Федеральной научно-технической программы развития синхротронных и нейтронных исследований и исследовательской инфраструктуры на период до 2030 года и дальнейшую перспективу.

Станция «Дифракционное кино» (канал 6-Б, ВЭПП-3)

На станции в 2025 году проводились следующие работы.

Определение *in situ* границ температурной устойчивости порошковых материалов состава Ti+Al(B, C).

В АлтГТУ проводятся работы по выявлению *in situ* областей температурной устойчивости синтезированных продуктов состава Ti+Al (B, C), полученных методом СВС в условиях динамического нагрева электромагнитными полями.

Проведен *in situ* контролируемый отжиг образцов систем Ti-Al, Ti-Al-C, Ti-Al-B. Исследовались механокомпозиты и спеченные из них образцы, с частично разупорядоченной структурой, после экстремального термического воздействия.

Для системы Ti-Al выявлено, что уже на этапе медленного нагрева происходят процессы, связанные с упорядочением структуры. Для механокомпозита, начиная с $T=1112$ С, из «размытой» области появляется линия, соответствующая твердому раствору на основе Ti. С температуры $T=1260$ С возрастает интенсивность линий интерметаллидных соединений TiAl и TiAl₃. С начала отжига при $T=1350$ С появляются дополнительные слабо выраженные линии TiAl₃ и TiAl. Для спеченного образца при температуре 1287 С, на этапе медленного нагрева появляются «размытые» дополнительные линии TiAl. После начала отжига при $T=1350$ С, на дифракционном поле регистрируется ярко выраженная линия дополнительного пика TiAl₃, возрастает интенсивность, также появляются слабо выраженные дополнительные линии TiAl₃ (208) и TiAl₃(1011). В состав конечных образцов входят: TiAl, TiAl и твердый раствор Ti.

В системе Ti-Al-B, установлено, что на этапе медленного нагрева дифракционная картина не меняется.

Незначительные изменения происходят на этапе отжига. При $T=1350$ °C становится более чёткой линия на образце механокомпозиата, соответствующая $TiV_2(101)$. На образце спечённого продукта на участке отжига появляются дополнительные линии $TiAl_3$, наблюдается «размытие» линии $Ti(102)$, вероятно связанные с формированием твёрдого раствора на основе титана. В фазовый состав охлаждённых образцов входят: $TiAl_3$, TiV_2 и твёрдый раствор Ti .

Для системы $Ti-Al-C$ при проведении *in situ* отжига структурно-фазовых изменений не происходит. Дифракционная картина у обоих образцов во время проведения отжига не меняется. Профили пиков фаз в охлаждённых образцах практически не отличаются от исходных, в состав образцов входят TiC и $TiAl_3$.

Эксперименты проведены в рамках Государственного задания Министерства науки и высшего образования ОСНП FZMM-2023-0003.

Влияние борной кислоты на фазообразование в системе «гидроксид кальция-нанопорошок алюминия» *in situ*.

Исследовалось влияние H_3BO_3 (плавня) на процессы фазообразования алюмината кальция в системе $Ca(OH)_2 - Al_{III}$ методом *in situ* дифрактометрии СИ.

Проведённое исследование показало влияние борной кислоты на фазообразование алюминатов кальция в системе $Ca(OH)_2 - Al_{III}$ при использовании наноразмерного порошка алюминия. В результате работы удалось выявить ряд особенностей, возникающих в результате действия плавня на компоненты системы и оценить его влияние на процессы сокристаллизации алюминатных фаз. К наиболее интересным процессам можно отнести следующее.

Образованная при плавлении H_3BO_3 стеклофаза B_2O_3 образует защитный слой на поверхности частиц гидроксида кальция, препятствуя диффузии атмосферного CO_2 и значительно снижая интенсивность нежелательного образования $CaCO_3$ в температурном диапазоне 480–550 °C.

В системе с добавлением H_3BO_3 образуется фаза $Ca_3V_2O_6$, которая участвует в процессах диффузионного переноса и способствует формированию целевых алюминатных фаз благодаря анионам $[VO_3]_3^-$, обеспечивающим перенос заряда между ионами кислорода вместо 1330 °C в системе без плавня – снижение на ~70–85 °C, что значительно снижает энергетические затраты при возможном масштабировании процесса.

При формировании $CaAl_4O_7$ фаза $Ca_3V_2O_6$ отсутствует на дифрактограмме вследствие диффузионного взаимодействия с оставшимся в системе Al_2O_3 с образованием промежуточного тройного соединения системы, переходящего в стеклофазу.

В целом, воздействие плавня на систему $Ca(OH)_2 - Al_{III}$ с металлическим Al аналогично его поведению в структурах с Al_2O_3 : снижение температур фазообразования $CaAl_2O_4$ и $CaAl_4O_7$ обусловлено активацией межзеренной диффузии в расплаве B_2O_3 .

Таким образом, предложен механизм действия плавня, предполагающий улучшение контакта между

твёрдыми фазами в жидком расплаве B_2O_3 и лучшей диффузии кислорода в промежуточной фазе $Ca_3V_2O_6$.

Полученные результаты имеют практическое значение для оптимизации синтеза люминесцентных материалов на основе алюминатов кальция и расчёта исходного состава компонентов при использовании твердофазного метода синтеза.

Работы проведены в рамках Государственного задания Министерства науки и высшего образования FEWM 2024–0004.

Станция «Дифрактометрия при высоких давлениях», (канал 4, ВЭЭП-3)

На станции проводились работы по двум направлениям:

1. модернизация оборудования станции проведена при сотрудничестве с Институтом геологии и минералогии им. В.С. Соболева (ИГМ) СО РАН;
2. исследования $(NH_4)_3Ti_xSn_{1-x}F_7$ в алмазной наковальне при сотрудничестве с Институтом физики им. Л.В. Киренского (ИФ) СО РАН.

Список проектов, для реализации которых привлекалось оборудование станции в 2025 году:

- программа государственного задания Института геологии и минералогии им. В.С. Соболева (ИГМ) СО РАН «Закономерности минерально-структурных преобразований в метаморфических процессах и массотеплоперенос в масштабе от кристаллической решётки до геологических тел» (шифр FWZN-2022-0026, номер гос. учёта 122041400176-0);
- программа Государственного задания Института теоретической и прикладной механики имени С.А. Христиановича (ИТПМ) СО РАН «Разработка научных основ применения лазерного излучения для создания новых объёмно-структурированных гетерогенных материалов с заданными свойствами и синхротронного излучения для определения их фазового состава» (шифр FWNE-2021-0019, номер гос. учёта 124021500015-1);
- – проект ИТПМ СО РАН по гранту Российского научного фонда «Исследование эволюции фазового состава лазерных сварных соединений $Al-Li$ сплавов 3-го поколения с применением синхротронного излучения, в том числе и *in situ*, с целью достижения максимальных циклических, динамических и статических механических характеристик» (№23-79-00037)
- проект по гранту Минобрнауки России в форме субсидии «Научное обоснование и создание инфраструктуры на основе использования синхротронного излучения для диагностики функционально-градиентных материалов» (№ 075-15-2025-459);
- программа государственного задания Института физики им. Л.В. Киренского (ИФ) СО РАН «Исследование упорядоченных состояний в конденсированных веществах: синтез новых материалов, эксперимент и теория» (шифр FWES-2024-0002).

Исследования $(\text{NH}_4)_3\text{Ti}_x\text{Sn}_{1-x}\text{F}_7$ в алмазной наковальне

Недавние исследования показали, что в кристаллах $(\text{NH}_4)_3\text{SnF}_7$ исходная кубическая фаза Pm-3m, характеризуется значительным беспорядком структурных элементов. При охлаждении наблюдается структурное превращение в низкотемпературную кубическую фазу Pa-3 ($Z = 8$), которая полностью упорядочена. Поскольку обе кубические фазы не связаны друг с другом соотношением группа-подгруппа, фазовый переход между ними был охарактеризован как реконструктивное превращение. Изменение химического давления, связанное с уменьшением объема элементарной ячейки в результате катионного замещения Ti ($R = 0,605 \text{ \AA}$) \rightarrow Sn ($R = 0,690 \text{ \AA}$), приводит к особенностям формирования структуры в родственном гептафториде $(\text{NH}_4)_3\text{SnF}_7$. Кубическая фаза Pa-3 также обнаружена в этом гептафториде, но только ниже комнатной температуры, и при нагревании она претерпевает последовательные фазовые переходы, сопровождающиеся следующими изменениями симметрии Pa-3 \leftrightarrow P4/mnc \leftrightarrow P4/mbm. Пространственные группы обеих тетрагональных фаз являются производными группы Pm-3m, и превращение между ними носит сегнетоэластический характер.

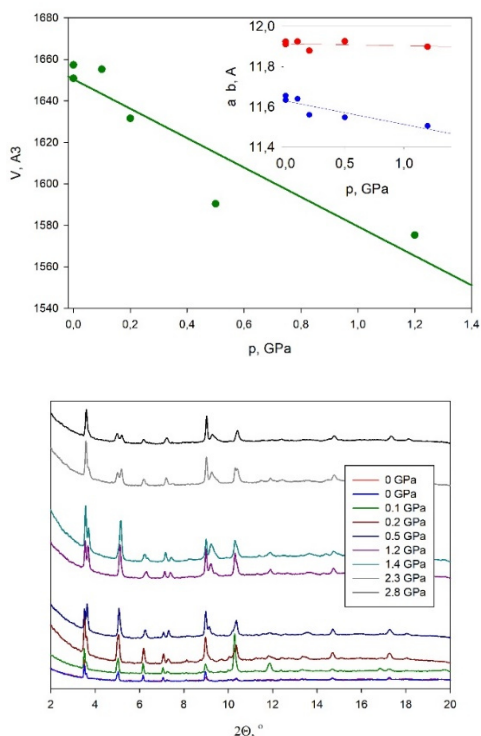


Рисунок 2. Эволюция дифракционной картины тетрагональной фазы $(\text{NH}_4)_3\text{SnF}_7$ при увеличении давления до 3 ГПа (слева) и Барические зависимости объёма и параметров (на вставке) элементарной ячейки $(\text{NH}_4)_3\text{SnF}_7$ (справа).

В работе выполнены исследования влияния давления на структуру и параметры решётки $(\text{NH}_4)_3\text{Ti}_x\text{Sn}_{1-x}\text{F}_7$ ($x = 0, 1$) методом *in situ* порошковой рентгеновской дифракции ($\lambda = 0.3685 \text{ \AA}$) в сочетании с нагреваемой

алмазной ячейкой. Измерения проводились при повышении давления до 3 ГПа при комнатной ($T = 298 \text{ K}$) и более высоких температурах ($T = 347$ и 354 K) (см. Рисунок 2).

Установлено, что в кристаллах $(\text{NH}_4)_3\text{Ti}_x\text{Sn}_{1-x}\text{F}_7$ сохраняется тетрагональная и кубическая симметрии при давлениях до 2 ГПа для $x = 0$ и 1 соответственно. При проведении экспериментов обнаружена существенная деградация кристаллических образцов как при увеличении давления, так и при приложении повышенной температуры. Это может быть связано со свойствами передающей давление среды, не совсем подходящей для данного типа аммоний-содержащих соединений.

В результате анализа массива экспериментальных данных определены объёмные ($dV/dp = -74 \text{ \AA}^3/\text{ГПа}$ и $dV/dp = -71 \text{ \AA}^3/\text{ГПа}$) и одноосные ($da/dp = -0.17 \text{ \AA}/\text{ГПа}$ и $da/dp = -0.01 \text{ \AA}/\text{ГПа}$ и $db/dp = -0.16 \text{ \AA}/\text{ГПа}$) барические коэффициенты при приложении внешнего гидростатического давления при $T = 298 \text{ K}$ для $(\text{NH}_4)_3\text{TiF}_7$ и $(\text{NH}_4)_3\text{SnF}_7$ соответственно. Для кристаллов $(\text{NH}_4)_3\text{TiF}_7$ выполнены оценки барических коэффициентов ($dV/dp = -43 \text{ \AA}^3/\text{ГПа}$ и $dV/dp = -38 \text{ \AA}^3/\text{ГПа}$) при повышенных температурах ($T = 347$ и 354 K), а также определена величина сжимаемости ($dV/dT = -0.26 \text{ \AA}^3/\text{K}$) при избыточном давлении $p = 1.3 \text{ ГПа}$.

Проведённые исследования позволяют более качественно определить параметры барокалорической эффективности материалов на основе $(\text{NH}_4)_3\text{Ti}_x\text{Sn}_{1-x}\text{F}_7$. Результаты исследования готовятся к публикации.

Дифракционные *in situ* исследования процесса заряда-разряда с ИХТТМ СО РАН

Лабораторией ионики твёрдого тела ИХТТМ СО РАН при сопровождении Лаборатории методов синхротронного излучения ИХТТМ СО РАН проведены исследования структурных изменений анодного материала CuSnO_3 для литий-ионных аккумуляторов в ходе процесса первого заряда-разряда на разработанной и испытанной в 2024 году электрохимической ячейке для изучения *in situ* дифракционных экспериментов.

Было выявлено постепенное образование интерметаллида Li_xSn_y при изменении напряжения (Рисунок 3). Также начались работы по электроосаждению анодного материала для магниевых батарей Mg_2Sn . Предварительные *ex situ* эксперименты показали, что из раствора электролита на медную, углеродную и алюминиевую фольгу осаждается Mg_2Sn . Получены данные *in situ* рентгеновского дифракционного исследования.

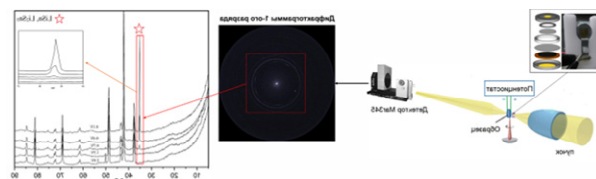


Рисунок 3. Схема эксперимента и краткие результаты *in situ* дифракционного эксперимента зарядки-разрядки.

Полученные результаты готовятся к публикации, а также представлены на конференции: «V Всероссийская с международным участием школа молодых учёных «Электрохимические устройства: процессы, материалы, технологии». – Новосибирск, Россия, 22 – 24 сентября 2025 г.

Исследование аддитивных структур и сварных соединений с ИТПМ СО РАН

При сотрудничестве с Лабораторией лазерных технологий ИТПМ СО РАН проводятся систематические исследования различных материалов, полученных с применением высокоинтенсивных лазерных пучков. В этом году исследования касались формируемых методом аддитивного лазерного выращивания структур на базе никель-хромовых сплавов Inconel 718, 738, 792 и Rene N5, а также железных сплавов Р6М5 и ПР-Х5 с добавлением WC, и лазерных сварных соединений титановых сплавов ВТ-6 и алюминиевых сплавов В-1424, 1441, 1461, 1469 и Al-Mg-Li.

Полученные в этом году результаты исследований по этому и другим направлениям, а также результаты более ранних исследований, представлены на конференциях 2025 года в 25 докладах.

Станция «Рентгеновская микроскопия и томография» (канал 5-А, ВЭПП-3)

На станции применялся метод рентгеновской рефлектометрии для исследования свойств тонких пленок, полученных при вакуумном напылении.

Совместно с институтом ИХТТ Уро РАН проводилось исследование эволюции структуры микрочастиц гексафферита ($\text{SrFe}_{12}\text{O}_{19}$) участвующих в реакции химического циклирования с риформингом и расщеплением воды (Chemical looping reforming with water splitting). Технология подразумевает циркуляции оксидных частиц между 3 реакторами для получения синтез-газа ($\text{H}_2 + \text{CO}$) и чистого водорода (Рисунок 4).

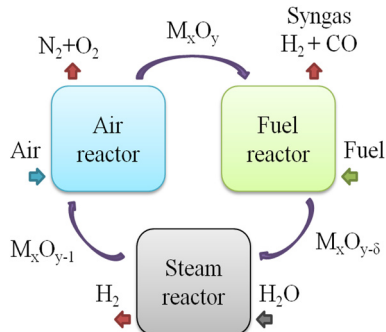


Рисунок 4. Схема получения синтез-газа с использованием химического циклирования с риформингом и расщеплением воды.

В процессе такой циркуляции оксидный материал деградирует в результате спекания, агломерации и образования фаз, препятствующих кислородному обмену. На Рисунке 5 приведена микроструктура частицы до химического циклирования и после него.



Рисунок 5. (а) микроструктура частицы гексафферита до химического циклирования и (б) после.

В следующих разделах представлены результаты работ по модернизации отдельных станций которые были запланированы в рамках выполнения государственного задания.

Модернизация технологической станции

Разработана и внедрена процедура многоэлементного анализа для серийного исследования биологических образцов.

Рентгенофлуоресцентный элементный анализ (РФА) является одной из наиболее востребованных методик в Сибирском центре синхротронного и терагерцового излучения (ЦКП «СЦСТИ»). «Технологическая станция» на канале №1 вывода синхротронного излучения из накопителя ВЭПП-4М позволяет существенно расширить аналитический диапазон определяемых элементов в сторону лёгких ($Z < 20$), флуоресценция которых в воздушной среде подвергается сильному поглощению. Для повышения эффективности и воспроизводимости экспериментов возникла необходимость в создании автоматизированного узла смены образцов в вакууме, а также в разработке процедуры синхронизации управления оборудованием. «Технологическая станция СИ», оснащена двухкристалльным разрезным монохроматором Si(111) и энергодисперсионным детектором Amptek X-123, размещёнными в вакуумируемых камерах (см. Рисунок 6).

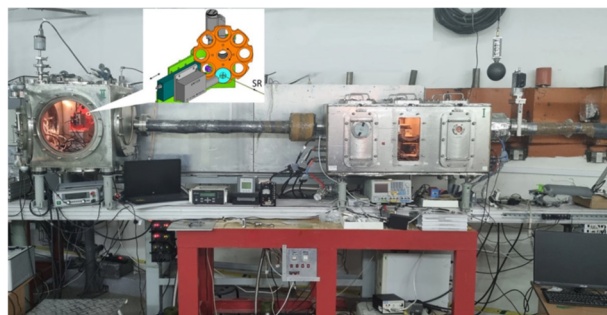


Рисунок 6. Общий вид «Технологической станции СИ». На врезке – узел смены образцов.

Создание в камере с образцами и детектором разреженной атмосферы гелия при давлении ~ 10 кПа позволяет значительно снизить поглощение флуоресценции лёгких элементов, уменьшить фон и улучшить соотношение сигнал/шум. Кроме того, гелиевая атмосфера

обеспечивает эффективное охлаждение детектора. Однако ручная процедура замены образца, включающая циклы вакуумирования, напуска гелия и последующего возврата к атмосферному давлению, занимала около 20 минут на один образец, что ограничивало пропускную способность станции.

Для решения этой задачи был разработан автоматизированный узел смены образцов и написано специализированное программное обеспечение. Узел смены образцов состоит из карусельного держателя на 8 позиций, установленного на вращающейся платформе и линейной подвижки для регулировки зазора образец-детектор (Рисунок 7).

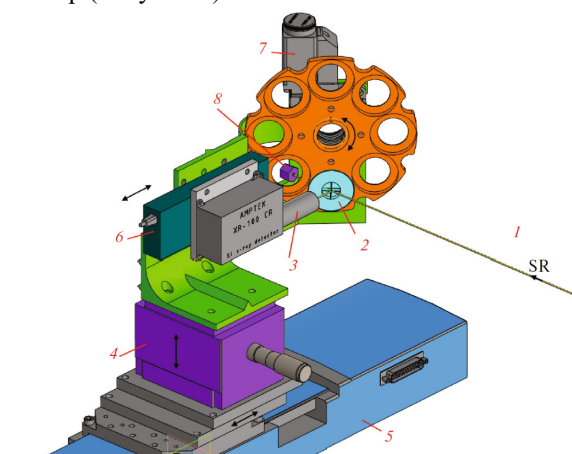


Рисунок 7. Узел смены образцов: (1) возбуждающий пучок СИ, (2) образец, (3) ЭДС детектор, (4) вертикальный позиционер, (5) горизонтальный позиционер, (6) позиционер для регулировки зазора между образцом и детектором, (7) гониометр для смены образцов, и (8) фотодиодный детектор для контроля совмещения с пучком СИ.

Устройство однократно совмещается с пучком СИ. Смена образца осуществляется после завершения регистрации спектра по команде управляющей программы путём поворота держателя на 45° . Это обеспечивает идентичные условия экспонирования для каждого последующего образца. Таким образом, за один цикл загрузки возможно получить спектры для восьми различных образцов. При необходимости для каждого образца можно провести серию измерений с небольшим смещением положения пучка путём дополнительного поворота держателя на $\sim 5^\circ$.

Для управления экспериментом создано программное обеспечение интегрирующее управление энергодисперсионным детектором Amptek X-123, управление механизмом смены образцов и ведение протокола экспериментов. Результатом работы программы являются спектры в файлах формата .mca, совместимые с программами обработки данных детектора Amptek и журнал экспериментов в формате xls.

Основные функции программы включают:

- Отображение ключевых параметров детектора и накапливаемого спектра в реальном времени.
- Преобразование шкалы каналов в энергетическую.

- Задание критерия завершения сбора данных: по общему или живому времени, либо по интегральному количеству отсчётов в заданной области интереса (ROI).
- Автоматический запуск и остановка сбора данных при достижении установленного критерия.
- Уведомление оператора о завершении набора спектра.
- Формирование детального протокола эксперимента с сохранением всех параметров (дата, время, идентификатор образца, общее число отсчётов, временные параметры детектора, накопленный заряд, энергия возбуждения, параметры атмосферы в камере, энергия электронов в накопителе и др.) в файл формата Excel (.xls).
- Сохранение спектральных данных в файл с расширением .mca в формате ASCII, включая заголовок с параметрами калибровки, областями интереса и конфигурацией детектора, для совместимости с распространённым ПО для анализа спектров.
- Автоматический поворот карусельного держателя для установки нового образца в позицию облучения и инициализация следующего цикла измерений.

Практическая апробация разработанного программно-аппаратного комплекса продемонстрировала ряд преимуществ по сравнению со стандартным ПО детектора Amptek: сократилось время на измерения спектров, сократилось время на ведение протокола, уменьшилось количество операторских ошибок (особенно в ходе длительных сеансов), расширился набор регистрируемых в протоколе параметров эксперимента, что повысило полноту и достоверность последующего анализа данных.

Результаты работы были представлены на конференции IEEE 26th International Conference of Young Professionals in Electron Devices and Materials (EDM-2025).

Полученный опыт разработки программно-аппаратного комплекса для автоматизации экспериментальной станции СИ будет востребован при создании и эксплуатации станций в рамках проекта «Сибирский кольцевой источник фотонов» (СКИФ).

Модернизация станции «Космос»

Реализовано расширение возможностей детектирующих систем метрологической станции «Космос-М»: произведена сборка и ввод в эксплуатацию пропорционального счётчика. Пропорциональный счётчик. Внешний вид пропорционального счётчика представлен на Рисунке 8.

Квантовая эффективность счётчика была измерена путём сравнения его счета с мощностью потока фотонов, измеренного с помощью эталонного детектора ФДУК-100УВ. В результате испытаний на энергиях 2.4 – 2.6 кэВ счётчик показал квантовую эффективность порядка 25%, что, как показывает моделирование, позволит проводить измерения и на более низких энергиях, вплоть до 500 эВ.

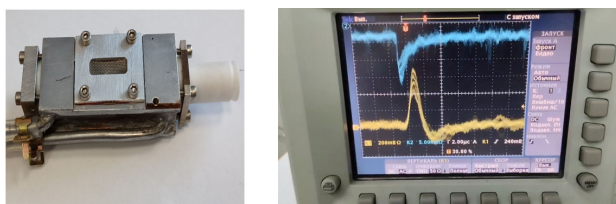


Рисунок 8. Пропорциональный счётчик и вид сигнала с него на осциллографе.

Проведена модернизация автоматизации экспериментов с использованием двухкристального монохроматора: реализован запуск системы автоматической корректировки положения кристаллов относительно первичного пучка СИ и блокирующей его защитной шторки. Ранее на станции для работы использовался широкодиапазонный монохроматор, собранный на шасси двухзеркального монохроматора, использующего многослойные зеркала. Однако, для получения спектров, позволяющих расшифровывать тонкую структуру химических соединений, потребовалось изменение кинематической схемы и для работы в диапазоне 2 – 10 кэВ (так называемый “tender X-ray” или TXR диапазон) на станции «Космос» был собран двухкристальный монохроматор на основе пары кристаллов Si(111). Монохроматор имеет кинематическую схему, аналогичную широко известной конструкции типа «channel-cut», где два кристалла установлены параллельно друг другу на общем основании, закреплённом на гониометре (Рисунок 9).

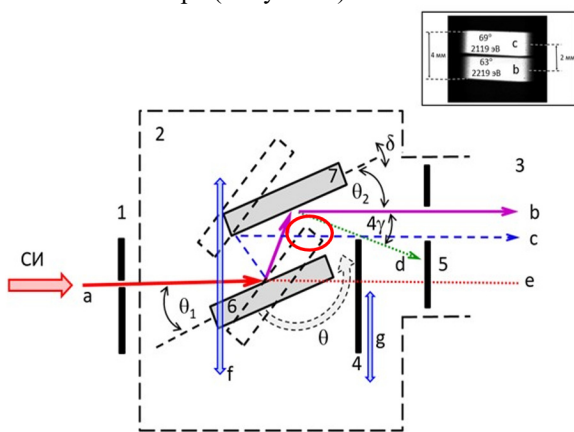


Рисунок 9. Схема эксперимента с двухкристальным монохроматором. Обозначения: 1 – входные щели, 2 – вакуумный объем монохроматора, 3 – экспериментальный объем, 4 – блокирующий белый пучок экран, 5 – щели-коллиматоры, 6 и 7 – первый и второй кристаллы. Направление лучей: a – первичный «белый» пучок, b – монохроматический пучок, c – монохроматический пучок после перестройки монохроматора на другую, более низкую энергию, d – луч полного внешнего отражения, e – продолжение «белого» пучка. Буквами f и g обозначены направления вертикальной подстройки всего монохроматора и блокирующего прямой пучок экрана 4, соответственно. Вставка (справа вверху) показывает смещение пучка при изменении угла монохроматора (угол $\theta = 63^\circ$ и 69° , энергии

2219 эВ и 2118 эВ). Измерения проведены на станции «Космос». Красным кругом обозначено положение монохроматора, при котором первый кристалл затеняет выходящий монохроматический пучок.

Пучок СИ, отражаясь от первого кристалла, затем попадает на второй и восстанавливает свое первоначальное направление, смещаясь по вертикали на величину h:

$$h = 2 \cdot l \cdot \cos(\theta),$$

где l – расстояние между кристаллами (в данном случае $l = 10$ мм), θ – угол между пучком и поверхностью кристалла.

Таким образом, вертикальное смещение выходного пучка зависит от угла θ и меняется при сканировании по спектру, что является характерным недостатком схемы «channel cut». Ограничения на угол θ связаны с тем, что при малых углах однократно отражённый пучок выходит за пределы второго кристалла, а при больших углах – первый кристалл затеняет дважды отражённый пучок (луч c и красный кружок на Рис. 5-2). В этой геометрии был получен ряд качественных измерений, результаты которых опубликованы в реферируемых журналах. Неудобство схемы состояло в том, что при переходе от схемы малых углов ($\theta = 15^\circ \div 40^\circ$) к схеме больших углов ($\theta = 35^\circ \div 60^\circ$), приходилось вскрывать объем монохроматора и вручную смещать его по вертикали. Для того, чтобы избежать, в настоящей версии предусмотрена возможность смещения всей конструкции монохроматора вверх без нарушения вакуума. Такой подход обеспечивает рабочий диапазон углов $11^\circ - 80^\circ$. Это, в соответствии с законом Вульфа-Брэгга, позволяет охватить спектральный диапазон от 10 634 до 2 008 эВ. За первым кристаллом установлен стальной экран толщиной 3 мм, блокирующий прохождение прямого пучка СИ и его рассеянной компоненты. Вертикальное положение экрана также меняется в зависимости от положения монохроматора так, чтобы он находился на расстоянии 1-2 мм от верхней кромки монохроматического пучка. Наиболее выраженное смещение пучка по вертикали наблюдается в области низких энергий. На вставке рисунка показано положение пучка на двухкоординатном детекторе при перестройке энергии монохроматора от 2118 эВ до 2219 эВ, при этом перемещение выходного пучка составляет около 2 мм. Всего в рабочем диапазоне монохроматора (2-10 кэВ) смещение пучка находится в пределах от 6.5 до 19.5 мм. Составлена таблица соответствия между углом θ и положением обоих экранов. Значения таблицы введены в рабочую программу управления станцией и реализована возможность автоматизации установки этих значений в ходе сканирования по спектру. Конструкция показала свою работоспособность. Проведён ряд работ, результаты опубликованы. Отметим, что изменение вертикального положения монохроматического пучка также приводит к необходимости перемещать образцы и детекторы в экспериментальном объёме. Эта возможность реализо-

вана с использованием трёх независимых двухкоординатных манипуляторов на основе шести линейных подвижек Newport и также выполняется автоматически.

Модернизация оборудования станции

Модернизация оборудования станции проводилась в рамках государственного задания Института ядерной физики им. Г.И. Будкера СО РАН. Изготовление алмазных наковален проведено при сотрудничестве с ИГМ СО РАН.

Модернизированная станция «Дифрактометрия при высоких давлениях» (ВЭПП-3), позволяющая повысить эффективность использования оборудования и качество получаемых результатов

Техника использования алмазных наковален для получения экстремальных условий (высокие давления и высокие температуры) а также возможности синхротронного излучения, позволяют изучать процессы структурных изменений вещества в таких условиях. Востребованность данной методики подтверждается большим интересом исследователей в геологии и материаловедении. Проведенная модернизация (приобретение алмазных наковален) позволила повысить износостойкость аппарата высокого давления и, соответственно, эффективность данной методики (см Рисунок 10).

Эксперимент in situ: дифракционные измерения при высоких P,T-параметрах в алмазной ячейке резистивного нагрева

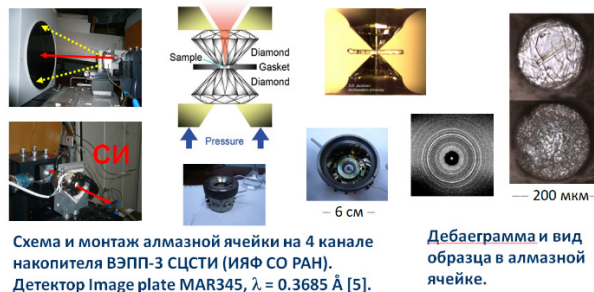


Рисунок 10. Обзорное представление результатов исследований с применением новых алмазных наковален.

На обновлённой установке высокого давления методом порошковой рентгеновской дифракции изучались фазовые диаграммы бинарных соединений FeRh и MnAs, в связи с их специфическими магнитными фазовыми превращениями, сопровождающимися энтропийными эффектами и изменением кристаллической структуры под действием температуры и давления. Изучались также комплексные фториды NH_4SnF_4 и NH_4TiF_4 , демонстрирующие значительный барокалорический эффект при переходе из кубической в тетрагональную фазу в области высоких давлений (до 2 ГПа) и температур (до 100 С).

Показано, что повышение содержания Rh в сплаве железо-родий существенно (на 200 С) снижает T_0 перехода из ферромагнитной (FM) в парамагнитную (PM) фазу и, таким образом, сокращает температурный диапазон устойчивости FM фазы в области 1–5 ГПа.

В MnAs в области существования высокobarической ферромагнитной фазы FM-1 при 4.5 ГПа обнаружен переход из упорядоченной (простр. группа Pnma) в разупорядоченную (простр. группа Pna21) орторомбическую фазу с кратно увеличенным объёмом ячейки и модуляцией заселенности атомных позиций. Появление такой структуры, вероятно, приводит к аномалии магнитных свойств MnAs (появление волны зарядовой плотности), которая наблюдалась ранее в области 10 ГПа.

Таким образом, применение методики алмазной ячейки DAC в сочетании с синхротронным излучением позволило сделать существенный шаг на пути развития P-T фазовых диаграмм соединений, исследованных в настоящей работе.

Установка дополнительных элементов радиационной защиты (см. Рисунок 11) позволяет теперь провести дальнейшую модернизацию по улучшению системы управления параметрами СИ для расширения возможностей постановки экспериментов – увеличение интенсивности СИ за счёт управляемого расширения входящей апертуры монохроматора станции и использования изогнутого кристалла для фокусировки при монохроматизации в области постановки эксперимента.

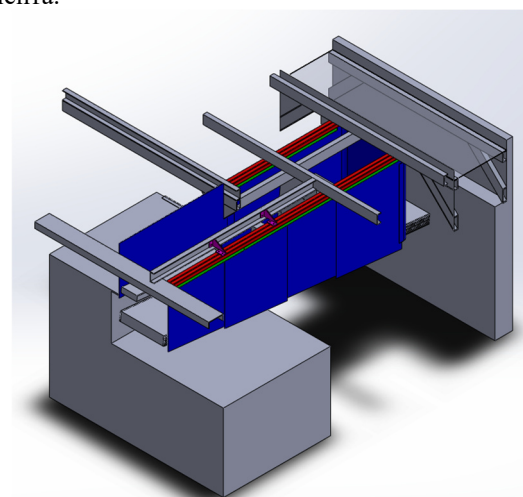


Рисунок 11. Обзорный вид модели радиационной защиты станции: серый – элементы окружения и оборудования станции до установки радиационной защиты, красный – балка крепления рельсовых направляющих, зелёный – рельсовые направляющие, синий – подвесные и стационарные щитки радиационной защиты.

СВЕРХПРОВОДЯЩИЕ МАГНИТНЫЕ СИСТЕМЫ

Введение

Работа по теме сверхпроводящие магнитные системы проводилась группой сотрудников лаб. 8-2 и была связана с созданием сверхпроводящих вставных устройств для синхротрона ЦКП СКИФ.

Сверхпроводящие вставные устройства для ЦКП СКИФ

В 2025 было продолжено изготовление сверхпроводящих вставных устройств для синхротрона СКИФ, которые будут использоваться как основные источники для генерации излучения. Всего в первой очереди будет установлено 5 сверхпроводящих вставных устройств (вигглеров и ондуляторов), параметры которых представлены в Таблице 1. Все сверхпроводящие устройства будут работать без расхода жидкого гелия в криостатах на основе косвенного охлаждения, что обеспечивает их долговременную автономную эксплуатацию в течение нескольких лет.

Таблица.1. Основные параметры сверхпроводящих вставных устройств для ЦКП СКИФ

Устройство	Поле, Тл	Период, мм	Число периодов	Мощность излучения, кВт
Ондулятор	1,25	15,6	128	7,66
Ондулятор	1,25	15,6	128	7,66
Вигглер	2,7	27	74	33,1
Ондулятор	1,6	18	111	11,75
Вигглер	4,5	48	18	39

Полноразмерная 148–полюсная магнитная структура вигглера с проектным полем 2,7 Тл и периодом 27 мм для станции 1-3 СКИФ была успешно испытана в собственном криостате и был проведён полный цикл магнитных измерений. Внешний вид сверхпроводящей магнитной системы вигглера в процессе сборки представлен на Рис. 1. В процессе тренировки был получен уровень магнитного поля 3,18 Тл, что является на сегодняшний день рекордными с точки зрения достижения максимально возможного уровня поля при минимальной величине периода.

Полноразмерная 40 – полюсная магнитная система сверхпроводящего вигглера с полем 4,5 Тл и периодом 48 мм для станции 1-5 СКИФ была успешно испытана в 2025 году в собственном криостате. Был проведён полный цикл испытаний в собственном криостате. В процессе тренировки был достигнут уровень магнитного поля 4,8 Тл. Внешний вид сверхпроводящего магнита с рабочим полем 4,5 Тл и периодом 48 мм, установленного в корпус собственного криостата представлен на Рис.2.



Рисунок 1. Внешний вид сверхпроводящего магнита с рабочим полем 2,7 Тл и периодом 27 мм в процессе сборки.

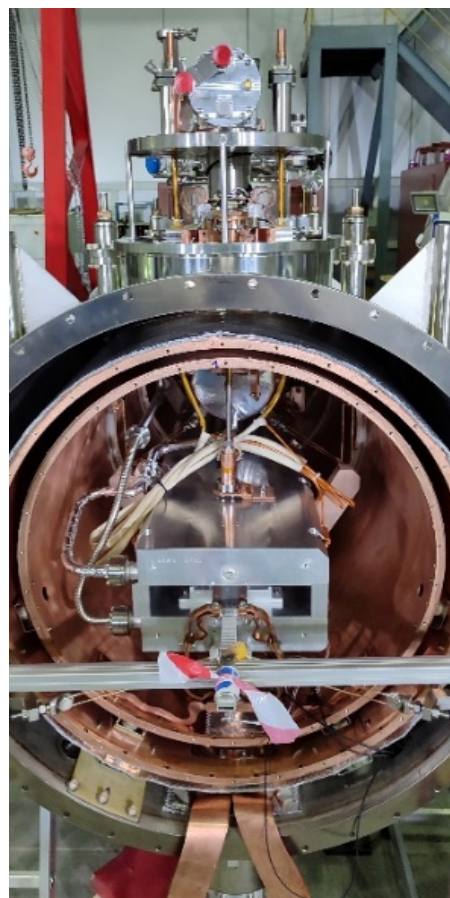


Рисунок 2. Внешний вид сверхпроводящего магнита с рабочим полем 4,5 Тл и периодом 48 мм, установленного в корпус собственного криостата.

В процессе тренировки магнитных систем двух сверхпроводящих ондуляторов с периодом 15,6 мм и уровнем поля 1,25 Тл для станций 1-1 и 1-2 СКИФ было достигнуто поле 1,35 Тл, что является рекордным для такого рода магнитных систем. На Рис.3 показан внешний вид магнитной системы одного из этих ондуляторов. Окончательная сборка и запуск всех сверхпроводящих вставных устройств будет проведена на источнике СКИФ в 2026 году.

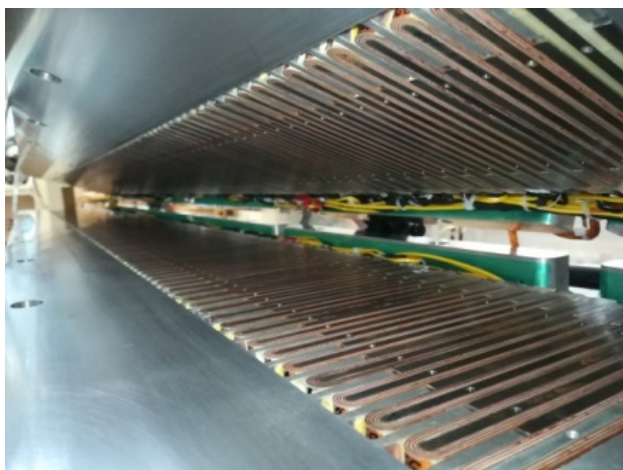


Рисунок 3. Внешний вид сверхпроводящего ондулятора станции 1-1 с рабочим полем 1,25 Тл и периодом 15,6 мм в процессе сборки.

УСКОРИТЕЛИ ТИПА ИЛУ

Введение

Мощные высокочастотные ускорители ИЛУ разрабатываются и производятся в ИЯФе с 70-х годов XX века. Первый ускоритель ИЛУ-6 имел диапазон энергии 1,5-2 МэВ и мощность до 40 кВт. Затем были разработаны ускорители ИЛУ-8, ИЛУ-10, ИЛУ-12 и ИЛУ-14. В настоящее время диапазон энергии ускорителей ИЛУ простирается от 0,8 МэВ до 10 МэВ, максимальная мощность – до 100 кВт.

Основные направления работы Лаб 14 в 2025 году – модернизация систем выпуска электронного пучка в атмосферу, системы ВЧ питания ускорителей ИЛУ-12 и ИЛУ-14 и систем управления ускорителями.

Лаб 14 выполняет контрактные работы. В 2025 году был изготовлен, собран и налажен ускоритель ИЛУ-14 для вьетнамской фирмы Anh Duong Company. После сдачи ускорителя заказчику ускоритель был демонтирован, отправлен во Вьетнам и установлен на месте работы в облучательном центре. Также в 2025 году были продолжены по изготовлению ускорителя электронов ИЛУ-12 для АО РТЗ (дочерняя структура Росатома).

В Лаб 14 на протяжении десятилетий ведутся исследования взаимодействия электронного пучка с различными веществами и материалами и отрабатываются процессы радиационной модификации.

Модернизация системы сканирования электронного пучка

Система сканирования мощного электронного пучка является крайне важным элементом мощных ускорителей электронов – она обеспечивает сканирование электронного пучка вдоль выпускного окна и вывод его в атмосферу. Основные требования к этой системе – точность, надёжность и стабильность работы. В случае неточной или нестабильной её работы мощный электронный пучок может попасть на стены выпускного устройства или прожечь фольгу выпускного окна. В таких случаях ускоритель выходит из строя и требует продолжительного ремонта.

Блок питания сканирующих магнитов системы развертки пучка разрабатывается для модернизации и замены работающих старых аналоговичных модулей, ставших недоступными. Задача блока – сформировать пилообразный ток через обмотку электромагнита с нарастанием от -5 А до $+5\text{ А}$ за $0,5\text{ мс}$. Сопротивление обмотки $0,8\text{ Ом}$, индуктивность 130 мкГ . Для предварительной накачки тока в обмотку электромагнита непосредственно перед передним фронтом импульса тока пучка к обмотке через демпфер (демпфер) подключается выход источника напряжения ($87\text{-}90\text{ В}$) с параллельно подключенным конденсатором.

Сборка ускорителя ИЛУ-12

В 2025 году была начата сборка ускоряющей структуры (Рисунок 1) и элементов ВЧ системы ускорителя ИЛУ-12.

Процесс измерения параметров узла ввода ВЧ мощности в ускоряющую структуру для создаваемой цифровой модели ускорителей показан на Рисунке 2.



Рисунок 1. Ускоряющая структура ИЛУ-12



Рисунок 2. Измерение параметров узла ввода ВЧ мощности в ускоряющую структуру.

Исследование взаимодействия электронного пучка с веществом

На ускорителе ИЛУ-6 в ИЯФе постоянно проводится радиационная обработка различных образцов. Эти работы важны для обеспечения технологической и продовольственной безопасности России и исследования физических и химических процессов, протекающих при взаимодействии мощных электронных пучков с различными веществами.

Был проверен процесс радиационной модификации полупроводниковых приборов – пластин с изготовленными структурами и стабилитронов в корпусах, изготовленными АО «Новосибирский завод полупроводниковых приборов» (АО «НЗПП-Восток»). После радиационной обработки параметры отбракованных образцов вошли в пределы допустимых значений, иными словами, в результате результативность процесса имплантации повысилась до 100%.

В рамках гранта РФФИ № 23-73-00045 от 13.04.23 совместно с Институтом катализа СО РАН (ИК СО РАН) проводились исследования радиационно-термического способа получения технологических материалов для твердотельных топливных элементов и кислородопроницающих мембран для водородной энергетики.

Совместно с Институтом химии твёрдого тела и механохимии СО РАН (ИХТТИМ СО РАН) проводились исследования радиационно-химического способа получения различных сополимеров, в том числе сополимера полимолочной кислоты с арабиногалактаном. Полученные образцы показали уменьшение скорости кристаллизации, приводящей к постепенному охрупчиванию. Была проверена возможность радиационной стерилизации сополимера полимолочной кислоты с арабиногалактаном. Этот полимер используется для создания протезов.

Совместно с Лабораторией 8-2 и с ИХТТИМ были проведены работы по радиационной инициации полимеризации метилметакрилата и исследованию влияния пространственного строения молекул метакрилатов и их взаимодействия на реакционную способность мономеров.

Новый анодный изолятор для ВЧ генераторов, применяемых в ускорителях ИЛУ-10 и ИЛУ-6, был изготовлен из полиметилметакрилата со сверхвысокой молекулярной массой. Внешний вид изолятора показан на Рисунке 3.

Для получения такого полиметилметакрилата использовалась радиационная обработка на установке «Ускоритель ИЛУ-6» в ИЯФе. После изготовления изолятор был установлен на ускорителе ИЛУ-6.

После завершения процесса дегазации ускоритель с новым изолятором заработал нормально. Изначально на протяжении 50 лет изолятор изготавливали из полиэтилена. Текучесть полиметилметакрилата под механической нагрузкой существенно ниже, чем у полиэтилена, а температуры размягчения по Вика у них не менее 100°C и 82°C соответственно.

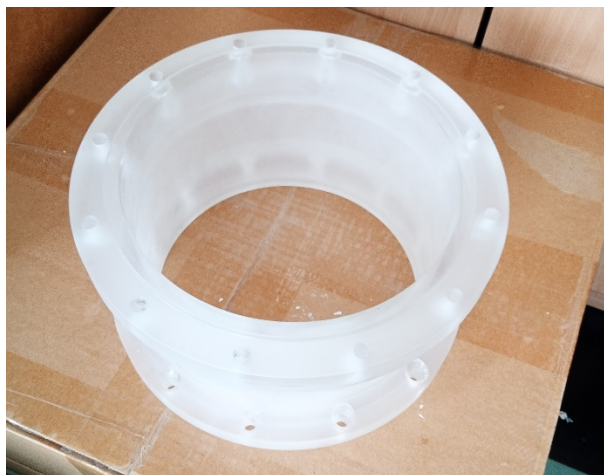


Рисунок 3. Анодный изолятор ВЧ генератора.

Начальные грубая и точная настройка ВЧ системы и в том числе связи ВЧ генератора с резонатором осуществляется на воздухе, до откачки ускоряющей структуры.

После откачки ускоряющей структуры резонатор деформируется под действием разности давлений снаружи в ВЧ генераторе (1 атмосфера) и вакуума внутри ускорителя, и существенно более высокая жёсткость полиметилметакрилата по сравнению с полиэтиленом позволяет снизить уход настроек.

Изолятор из полиметилметакрилата позволяет более точно настраивать связь ВЧ генераторов с резонатором.

Полиметилметакрилат со сверхвысокой молекулярной массой интересен и для многих других вакуумных установок.

На установке «Ускоритель ИЛУ-6» были проведены исследования возможности применения керамики ВК-95-1 в люминофорных пробниках ускорителей элементарных частиц для визуализации электронных пучков. Результаты работы планируется применить для диагностики пучков на Сибирском кольцевом источнике фотонов СКИФ.

Заключение

Результаты работ по развитию и модернизации ускорителей ИЛУ были представлены на международных и российских форумах и конференциях.

Проведённые на ускорителе ИЛУ-6 исследовательские работы обогатили знания о процессах взаимодействия интенсивного электронного пучка с различными материалами.

УСКОРИТЕЛЬНЫЙ ИСТОЧНИК НЕЙТРОНОВ ДЛЯ БОР-НЕЙТРОЗАХВАТНОЙ ТЕРАПИИ И ДРУГИХ ПРИЛОЖЕНИЙ

В ИЯФ СО РАН предложен, создан и функционирует источник нейтронов VITA на основе электростатического тандемного ускорителя заряженных частиц оригинальной конструкции (ускорителя-тандема с вакуумной изоляцией) и тонкой литиевой мишени. В ускорителе получают стационарный пучок протонов или дейтронов с энергией от 0,1 до 2,3 МэВ при стабильности и моноэнергетичности 0,1 %, с током до 10 мА при стабильности до 0,4 %. На установке получают потоки нейтронов различного энергетического диапазона: холодных, тепловых, эпитепловых, надэпитепловых, моноэнергетических или быстрых, а также генерируют 478 кэВ или 511 кэВ фотоны, α -частицы, позитроны.

Ускорительный источник нейтронов VITA-IIβ для клиники БНЗТ в Москве

В рамках исполнения перечня поручений Председателя Правительства Российской Федерации М.В. Мишустина институт реализует мероприятия по разработке, изготовлению и поставке в НМИЦ онкологии им. Н.Н. Блохина Минздрава РФ ускорительного источника нейтронов для клинических испытаний методики бор-нейтронозахватной терапии онкологических заболеваний.

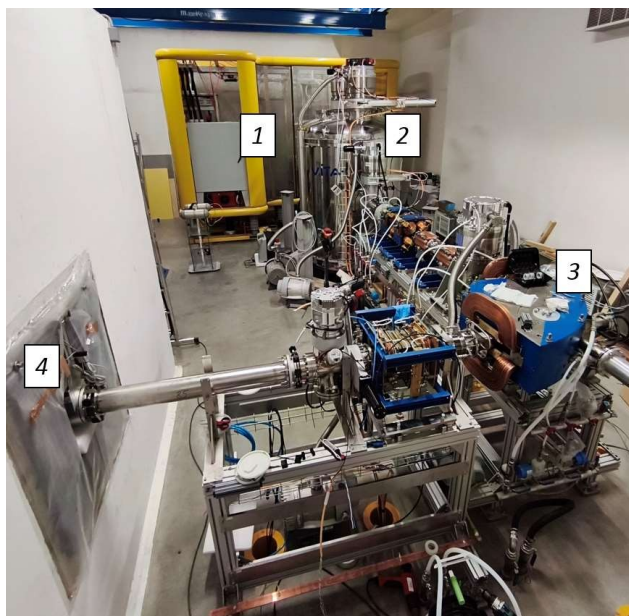


Рисунок 1. Фотография ускорительного источника нейтронов VITA-IIβ в НМИЦ онкологии им. Н.Н. Блохина: 1 – высоковольтная платформа ионного источника, 2 – ускоритель-тандем с вакуумной изоляцией, 3 – поворотный магнит, 4 – литиевая мишень в системе формирования пучка нейтронов

В течение 2025 г. ускорительный источник нейтронов VITA-IIβ перевезен из Новосибирска в Москву, собран на площадке НМИЦ онкологии им. Н.Н. Блохина, осуществлены пуско-наладочные работы, получен пучок протонов, осуществлена генерация нейтронов, ведутся работы по вводу источника нейтронов в эксплуатацию. Создана специализированная «Система дозиметрического планирования VITA», зарегистрированная в государственном реестре программ для ЭВМ. Планируется приступить к клиническим испытаниям методики БНЗТ в России в 2026 г.

В клинике БНЗТ г. Сямынь (Китай), оснащенной ускорительным источником нейтронов VITA-IIα, успешно проводят клинические испытания методики БНЗТ и планируют их завершить весной 2026 г.

Ускорительный источник нейтронов VITA

Ускорительный источник нейтронов VITA на площадке ИЯФ СО РАН активно используют для: i) измерения сечения ядерных реакций, ii) разработки средств и методов дозиметрии для БНЗТ, iii) разработки литий-нейтронозахватной терапии, iv) проведения исследования с клеточными культурами и лабораторными животными, v) лечения крупных домашних животных со спонтанными опухолями, vi) получения холодных нейтронов для повторения опыта Штерна-Герлаха, vii) измерения энергетического спектра нейтронов, viii) радиационного тестирования материалов и оборудования, ix) разработки ускорительного источника нейтронов следующего поколения.



Рисунок 2. Фотография ускорительного источника нейтронов VITA на площадке в ИЯФ СО РАН: 1 – ускоритель-тандем с вакуумной изоляцией, 2 – поворотный магнит, 3 – литиевая мишень

Ускорительный источник нейтронов ВИТА-III

Проводятся исследования по разработке источника нейтронов следующего поколения для широкого внедрения методики БНЗТ в клиническую практику.

С применением разработанного измерителя эмиттанса (Патент РФ № 2839258, 28.04.2025) измерены фазовые портреты пучков протонов в ускорителе ВИТА, используемом в ИЯФ СО РАН, и в ускорителе ВИТА-III с предускорением, сделанным для НМИЦ онкологии им. Н.Н. Блохина Минздрава России в Москве. Установлено, что использование предускорения дает как положительный, так и отрицательный эффекты. Положительный эффект состоит в том, что энергия протонов увеличена на 100 кэВ и не происходит нагрева неохлаждаемых диафрагм ускорителя из-за меньшего размера пучка ионов в ускорителе. Отрицательный эффект состоит в том, что ухудшилось качество получаемого пучка протонов: он стал больше в размере, его расходимость стала больше, и он стал неоднородным. Получение такого пучка усложняет установку, поскольку для его транспортировки требуются средства фокусировки. Также усложняет установку само использование предускорения – требуются высоковольтная платформа, развязывающий трансформатор и дополнительный чиллер на платформе. Нами предложено решение (Патент РФ № 2852336, 08.12.2025), позволяющее и уменьшить нагрев неохлаждаемых диафрагм и на выходе получить параллельный пучок протонов – вместо предускорения следует применить предторможение. В этом случае можно, фокусируя инжектируемый пучок на входное отверстие охлаждаемой диафрагмы ускорителя и замедляя пучок подачей отрицательного потенциала на диафрагму, предварительно ее электрически изолировав, изменять поперечный импульс ионов и, как следствие, изменять расходимость пучка протонов на выходе из ускорителя.

Замена газовой обдирочной мишени в ускорителе на новую с меньшей длиной (300 мм вместо 400 мм) и с меньшим диаметром отверстия (12 мм вместо 16 мм) не привела ни к каким негативным последствиям, зато экспериментально продемонстрировала возможность проектирования более компактного ускорителя, либо добавления еще одного, седьмого, ускоряющего зазора для более быстрого и надежного получения требуемого напряжения в ускорителе без увеличения его размера.

Подсоединение в контур охлаждения газовой обдирочной мишени высоковольтного электрода с диафрагмами дало положительный эффект – возможность стабильной работы с большим током.

Мгновенная гамма-спектрометрия

Планомерное проведение терапии домашних животных со спонтанными опухолями (кошки и собаки) с контролем в режиме реального времени борной дозы методом мгновенной γ -спектрометрии и контролем полной поглощенной дозы химическим дозиметром Фрикке, а также наблюдением за состоянием животных

после облучения позволило оптимизировать облучение и получить значимые результаты, один из которых состоит в том, что через месяц после разового облучения кота с остеосаркомой нижней челюсти объем опухоли уменьшился в 26 раз: с 11,6 г до 0,44 г.

Фундаментальные знания

С использованием α - и γ -спектрометров и мишени, обогащенной изотопом литий-6, измерены сечения ядерных реакций ${}^6\text{Li}(d,\alpha){}^4\text{He}$, ${}^6\text{Li}(d,p){}^7\text{Li}$, ${}^6\text{Li}(d,p){}^7\text{Li}^*$ и впервые ${}^6\text{Li}(d,n){}^7\text{Be}$.

Литий-нейтронозахватная терапия

Продолжается проведение фундаментальных научных исследований по разработке литий-нейтронозахватной терапии, несущей новое качество – 100% дозу дозы в клетки опухоли. На лабораторных животных с привитой опухолью проведена литий-нейтронозахватная терапия с применением хлорида лития, обогащенного легким изотопом, и получены обнадеживающие результаты: достоверное увеличение выживаемости и статистически значимое снижение роста объемов опухоли.

Школа молодых ученых по БНЗТ

В Москве провели 7-ю Всероссийскую Школу молодых ученых по бор-нейтронозахватной терапии, в которой приняли участие 117 ученых, из них 104 российских ученых из Дубны, Москвы, Обнинска, Иркутска, Новосибирска, Томска, Владивостока, Нового Уренгоя, Санкт-Петербурга, Нижнего Новгорода, Долгопрудного, Владикавказа, Уфы, Балашихи, Дмитровграда, Тольятти, Саратова, Ставрополя и 13 зарубежных ученых из Азербайджана, Беларуси, Германии, Казахстана, Китая, Узбекистана, Кыргызстана и Монголии.

Представление научных результатов

По результатам проведенных исследований опубликованы монография, 23 статьи в научных журналах, получены 2 патента на изобретения России, 1 патент США, 3 свидетельства о государственной регистрации программы для ЭВМ; представлено 27 докладов на международных и всероссийских конференциях.

А.А. Шуклина удостоена стипендии Губернатора Новосибирской области, стипендии Фонда Потанина, стипендии Президента Российской Федерации и получила поддержку в конкурсе Фонда Потанина «Практики личной филантропии и альтруизма». С.Ю. Таскаев стал лауреатом Национальной премии Агентства стратегических инициатив "Страну меняют люди".

Финансовое обеспечение

Научные исследования поддержаны грантом РФФИ № 19-72-30005 (лаборатория мирового уровня) и государственным заданием FWGM-2025-0046.

ДЕТЕКТОРЫ ДЛЯ МЕДИЦИНЫ

Для исследования методики БНЗТ в Институте ядерной физики им. Г.И. Будкера СО РАН был создан ускорительный источник нейтронов ВИТА. Высокая планируемая интенсивность разрабатываемых ускорительных источников нейтронов привела к необходимости создания нового поколения сопутствующего диагностического оборудования. Так для независимого контроля стабильности потока генерируемых частиц был разработан быстрый детектор нейтронов (БДН).

Первая версия электроники регистрации детектора была разработана на основе специализированных микросхем для работы с микропиксельными лавинными фотодиодами OMEGA EASIROC. На основе опыта, полученного в процессе эксплуатации этого детектора, а также с учетом недоступности использованных в нем электронных компонент было принято решение о разработке нового варианта системы регистрации с повышенным, по сравнению с предыдущей версией, быстродействием – БДН-2. На рисунке 1 показана счетная характеристика этого детектора. Просчеты электроники регистрации описываются непродлевающим мертвым временем $\tau=24.6 \pm 0.1$ нс и при входном потоке 10 МГц составляют $\approx 20\%$.

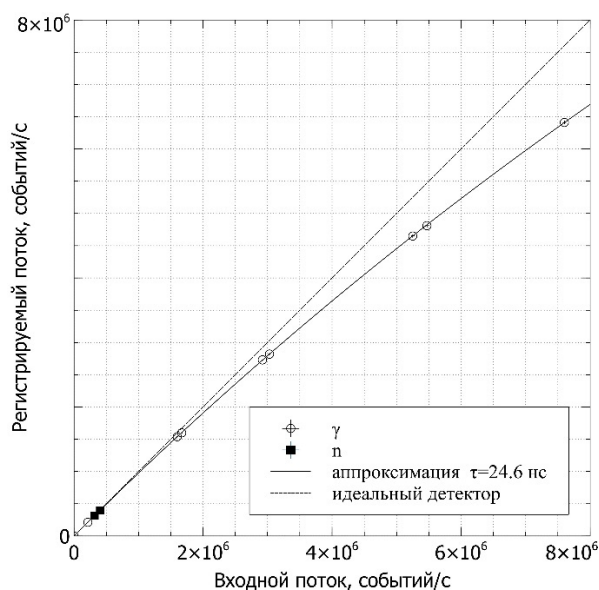


Рисунок 1. Зависимость скорости счета детектора от входной загрузки для идеального детектора без просчетов и детектора БДН-2. Показаны результаты измерений с нейтронами (черные точки) и рентгеновскими фотонами (кружки).

Для использования на ускорительном источнике нейтронов ВИТА в ФБГУ «НМИЦ онкологии имени Н.Н. Блохина», было изготовлено две таких системы измерения потока нейтронов БДН-2, а также проведено их испытание на ускорительном источнике нейтронов в ИЯФ СО РАН.



Рисунок 2. Фотография БДН-2 в процессе тестирования на источнике ВИТА.

Научное руководство ИЯФ СО РАН

Члены Российской академии наук

Академики:

Бондарь Александр Евгеньевич
Диканский Николай Сергеевич
Кулипанов Геннадий Николаевич
Левичев Евгений Борисович
Логачев Павел Владимирович
Пархомчук Василий Васильевич
Скринский Александр Николаевич

и.о. Директора:

Логачев Павел Владимирович

Научный руководитель:

Скринский Александр Николаевич

Научные руководители направлений:

Кулипанов Геннадий Николаевич
Тихонов Юрий Анатольевич

Учёный секретарь:

Резниченко Алексей Викторович

Члены-корреспонденты РАН:

Винокуров Николай Александрович
Логашенко Иван Борисович
Тихонов Юрий Анатольевич
Фадин Виктор Сергеевич
Шатунов Юрий Михайлович

Заместители директора по научной работе:

Багрянский Пётр Андреевич
Левичев Евгений Борисович
Логашенко Иван Борисович

Заместитель директора

Беркаев Дмитрий Евгеньевич

Заместитель директора по производству

Стешов Андрей Георгиевич

Заместитель директора-главный инженер

Чуркин Игорь Николаевич

Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт ядерной физики им. Г. И. Будкера Сибирского отделения Российской академии наук (ИЯФ СО РАН)

Юридический/фактический адрес:
630090, Новосибирская область,
г. Новосибирск, пр. ак. Лаврентьева, 11
ИНН/КПП 5408105577/540801001

Приемная: (383) 330-60-31, 329-47-60

Факс: (383) 330-71-63

Электронная почта: inp@inp.nsk.su

Сайт: www.inp.nsk.su

Справочная служба института: (383) 329-40-00

Электронный телефонный справочник: <https://irma.inp.nsk.su/db/phbook/>

Федеральное государственное бюджетное учреждение науки
ИНСТИТУТ ЯДЕРНОЙ ФИЗИКИ им. Г.И. БУДКЕРА
Сибирского отделения Российской академии наук

ЕЖЕГОДНЫЙ ОТЧЕТ
2025

Обложка Е.Д. Бендер

Ответственный за выпуск А.В. Резниченко

Работа поступила 1.02.2026 г.

Подписано в печать 29.06.2026 г.

Формат 60x90 1/16 Объем 14 печ.л., 12 уч.-изд.л.

Тираж 120 экз. Бесплатно.

Отпечатано в Типографии ООО «Техноком-Сибирь»
Новосибирск, 630090, ул. Демакова, 27, корп. 1, оф. 11.