

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

УДК 539.1, 539.12, 539.123
Рег. № 125071608537-3
Рег. №



УТВЕРЖДАЮ

И.о. директора ИЯИ РАН,
чл.-кор. РАН

М.В. Либанов

«30» декабря 2025 г.

ОТЧЕТ
О НАУЧНО-ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКОЙ РАБОТЕ

ФИЗИКА И ТЕХНИКА УСКОРИТЕЛЕЙ ЗАРЯЖЕННЫХ ЧАСТИЦ; ФИЗИКА ПУЧКОВ
ЗАРЯЖЕННЫХ ЧАСТИЦ
(промежуточный за 2025, этап 1)

ФЦП

Руководитель НИР,
Зам. директора ИЯИ РАН.,
д-р. физ.-мат. наук,

30.12.2025 А.В. Фещенко

ПОДПИСЬ, ДАТА

Москва 2025

СПИСОК ИСПОЛНИТЕЛЕЙ

Руководитель НИР,
зам. директора по научной
работе, д-р физ.-мат. наук


30.12.2025
подпись, дата

А.В. Фещенко
(введение, раздел 1, 2, 3, заключение)

Исполнители:

Главный инженер Отдела
ускорительного комплекса


30.12.2025
подпись, дата

В.Л. Серов
(введение, раздел 1, 2, заключение)

Вед. науч. сотр.,
д-р. физ.-мат. наук


30.12.2025
подпись, дата


В.В. Парамонов
(введение, раздел 3)

Вед. науч. сотр.,
д-р. физ.-мат. наук


30.12.2025
подпись, дата

Ю.В. Сеничев
(введение, раздел 3)

Заведующий
лабораторией, канд. физ.-
мат. наук


30.12.2025
подпись, дата

А.С. Белов
(введение, раздел 1, 2, 3)

Заведующий
лабораторией, канд. физ.-
мат. наук


30.12.2025
подпись, дата

С.А. Гаврилов
(введение, раздел 1, 2, 3)

Заведующий сектором


30.12.2025
подпись, дата


В.Е. Лоскутов
(раздел 1, 2)

Заведующий сектором,
канд. техн. наук


30.12.2025
подпись, дата

Ю.Ж. Калинин
(раздел 1, 2, 3)

Заведующий сектором,


30.12.2025
подпись, дата


С.А. Давыдов
(раздел 1, 2)

Заведующий сектором


30.12.2025
подпись, дата

В.Н. Леонтьев
(раздел 1, 2)

Заведующая сектором


30.12.2025
подпись, дата

Т.П. Пивоварова
(раздел 1)

Научный сотрудник


30.12.2025
подпись, дата


В.С. Кленов
(раздел 1, 2)

Начальник установок


30.12.2025
подпись, дата


А.Н. Набока
(раздел 1, 2)

Начальник установок


30.12.2025
подпись, дата

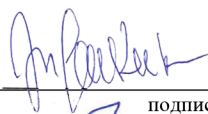
В.Б. Калихов
(раздел 1, 2, 3)

Начальник установок


30.12.2025
подпись, дата

А.М. Прус
(раздел 1, 2)

Ведущий инженер по
эксплуатации ускорителя

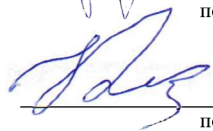


30.12.2025

подпись, дата

И.М. Жвакин
(раздел 1, 2)

Ведущий инженер по
эксплуатации ускорителя



30.12.2025

подпись, дата

В.С. Копин
(раздел 1, 2)

Нормоконтроль



30.12.2025

подпись, дата

О.Н. Либанова

РЕФЕРАТ

Отчет 45 с., 1 кн., 27 рис., 19 источн., 2 прил.

СИЛЬНОТОЧНЫЙ УСКОРИТЕЛЬ, ИСТОЧНИКИ ЧАСТИЦ, АВТОМАТИЗАЦИЯ УСКОРИТЕЛЯ, ДИАГНОСТИКА ПУЧКОВ, СИСТЕМЫ ВЧ ПИТАНИЯ, СИСТЕМЫ АВТОРЕГУЛИРОВАНИЯ, СИСТЕМЫ НИТАНИЯ ЭЛЕКТРОМАГНИТНОГО ОБОРУДОВАНИЯ, УСКОРЯЮЩИЕ СТРУКТУРЫ.

Объектами исследования являются ускорители заряженных частиц, системы и элементы ускорителей.

Цель работы – поддержание работоспособности и обеспечение работы в сеансах сильноточного линейного ускорителя ионов водорода и каналов транспортировки пучков экспериментального комплекса ИЯИ РАН, повышение надежности и устойчивости работы, модернизация систем ускорителя и экспериментального комплекса, повышение параметров и расширение возможностей ускорителя, разработка новых ускорителей и элементов ускорителей.

В процессе и в результате выполнения НИР обеспечена работа сильноточного линейного ускорителя в пяти сеансах общей продолжительностью 1317 часов, направленных на выполнение государственного задания, планов и научной программы Института, соглашений со сторонними организациями. Успешная работа ускорителя стала возможной благодаря постоянно проводимым работам по техническому обслуживанию и модернизации оборудования основных технологических систем ускорителя. Также выполнен ряд работ по разработке новых ускорителей, систем и элементов ускорителей для других ускорительных центров.

Все проводимые работы находят непосредственное практическое применение непосредственно на сильноточном линейном ускорителе ионов водорода ИЯИ РАН либо имеют практическую направленность при их выполнении в сотрудничестве с другими ускорительными центрами.

Значимость выполненных работ определяется тем, что в результате их выполнения обеспечивается успешная работа и проведение исследований на сильноточном линейном ускорителе ионов водорода, являющемся единственным в России и одним из пяти в мире ускорителей этого типа.

СОДЕРЖАНИЕ

СПИСОК ИСПОЛНИТЕЛЕЙ.....	2
РЕФЕРАТ	4
СОДЕРЖАНИЕ.....	5
ВВЕДЕНИЕ.....	6
1. Обеспечение работы сильноточного линейного ускорителя ИЯИ РАН	9
2. Модернизация систем сильноточного линейного ускорителя ионов водорода ИЯИ РАН.....	19
2.1. Стенд источника протонов.....	19
2.2. Модернизация источника отрицательных ионов водорода.....	24
2.3. Модернизация других систем ускорителя.....	27
3. Разработка и создание ускорителей и их элементов	31
ЗАКЛЮЧЕНИЕ.....	37
СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ.....	39
ПРИЛОЖЕНИЕ А Список публикаций исполнителей отчета за 2025 г.	41
ПРИЛОЖЕНИЕ Б Результаты измерений и расчетов выбросов радиоактивных газов и аэрозолей	43

ВВЕДЕНИЕ

1. Задача «Обеспечение работы сильноточного линейного ускорителя ионов водорода ИЯИ РАН»

Линейный ускоритель ионов водорода ИЯИ РАН относится к классу сильноточных линейных ускорителей на средние энергии и совместно с экспериментальным комплексом является уникальной установкой национального и международного значения. Он является единственным в России и одним из пяти в мире ускорителем данного класса. Со времени начала регулярной работы ускорителя на физические и прикладные задачи в 1993 году и по декабрь 2025 года проведено 162 сеанса, общей продолжительностью 55273 часа, в том числе 5 сеансов общей продолжительностью 1317 часов в 2025 году, направленных на выполнение государственного задания, программ РАН, планов и научной программы Института, соглашений со сторонними организациями. На ускорителе постоянно ведутся работы по повышению энергии ускоренного пучка. В 2025 году достигнута энергия 364 МэВ.

Первый сеанс в 2025 году продолжительностью 108 часов был посвящен комплексной наладке оборудования и систем ускорителя, исследованиям режимов работы и настройке ускорителя без потребителей пучка. Ускорение осуществлялось до энергии 267 МэВ. Во втором сеансе продолжительностью 389 часов работы велись на нейтронный источник РАДЭКС с энергией 267 МэВ. В третьем сеансе продолжительностью 152 часа энергия пучка составляла 160 МэВ, и работы велись на комплекс протонной терапии для проведения биологических экспериментов. В четвертом сеансе продолжительностью 252 часа работа велась на изотопный комплекс с энергией пучка 160 МэВ с целью наработки изотопа натрий-22 путем облучения алюминиевой мишени. Также облучалась экспериментальная ториевая мишень для обеспечения отработки технологии получения радиоизотопа актиний-225. В пятом сеансе общей продолжительностью 416 часов работы велись на комплекс протонной терапии (энергия 160 МэВ), нейтронный источник РАДЭКС (энергия 267 МэВ) и нейтронный источник ИН-06 с энергией до 364 МэВ, которая была достигнута в 2025 году после проведения комплекса работ по восстановлению работоспособности и модернизации систем и оборудования ускорителя.

В 2025 году Институтом получено разрешение Ростехнадзора № P091-00109-77/01729671 от 17.01.2025г. на выбросы радиоактивных веществ в атмосферный воздух (срок действия – до 17.01.2032г.). Сеансы проводились с постоянным контролем выбросов, суммарная величина которых при практически реализуемых режимах и длительности сеансов с существенным запасом находится в пределах разрешенных значений.

Обеспечение работы ускорителя стало возможным благодаря постоянно проводимым работам по техническому обслуживанию и модернизации оборудования основных технологических систем ускорителя.

2. Задача «Модернизация систем сильноточного линейного ускорителя ионов водорода ИЯИ РАН»

Основной объем оборудования ускорителя был изготовлен в 80-х годах прошлого столетия. Для обеспечения работы ускорителя постоянно проводятся работы по модернизации. Описаны работы по модернизации систем ускорителя, выполненные в 2025 году. Велись работы по модернизации источников протонов и отрицательных ионов водорода. Для выполнения этих работ, а также работ по созданию новых источников продолжено создание двух исследовательских стендов. Среди других работ по модернизации ускорителя следует выделить модернизацию системы ВЧ питания, системы вакуумной системы, системы терморегулирования собственной частоты ускоряющих резонаторов и других систем.

Сформулировано предложение по модернизации начальной части ускорителя, реализация которого в будущем могла бы существенно улучшить параметры и поднять надежность работы ускорителя.

3. Задача «Разработка и создание ускорителей и их элементов»

В процессе сооружения, запуска, эксплуатации и модернизации ускорителя был достигнут уникальный уровень понимания процессов в ускорителе и накоплен огромный опыт решения практических задач. Это обеспечило международное признание авторитета сотрудников Института и широкое применение их разработок не только в ИЯИ РАН, но и в ведущих ядерно-физических ускорительных научных центрах.

Среди работ, выполненных в 2025 году, следует отметить выполненные в сотрудничестве с ОИЯИ в рамках проекта NICA работы по изучению спин-орбитального движения поляризованных пучков протонов и дейтронов и развитию методов управления поляризацией, а также исследование возможности измерения электрического дипольного момента легких ядер на комплексе NICA. Также проводились работы по источнику поляризованных ионов для ускорительного комплекса Нуклотрон – NICA.

В сотрудничестве с ФГУП «РФЯЦ-ВНИИЭФ», в том числе и в рамках НЦФМ, продолжались работы по разработке устройств и систем диагностики пучка для линейных ускорителей ионов и изготовление ряда устройств.

В сотрудничестве с МИФИ начаты работы по разработке и изготовлению опытных образцов устройств системы диагностики параметров электронного пучка специального линейного ускорителя электронов для лазера на свободных электронах, включая разработку

эскизного проекта СВЧ-дефлектора для комплекса времяразрешающей диагностики параметров электронных сгустков, в рамках проекта по созданию принципиально нового перспективного источника синхротронного излучения, превосходящего по техническим характеристикам действующие и проектируемые международные источники (проект «СИЛА»).

Продолжались исследования в рамках разработки предложения компактного линейного ускорителя на энергию 230 МэВ для протонной терапии, а также исследования и разработка эффективных ускоряющих структур для линейных ускорителей ионов, на основе которых сделано предложение по модернизации начальной части ускорителя ИЯИ РАН.

1. Обеспечение работы сильноточного линейного ускорителя ИЯИ РАН

Линейный ускоритель ионов водорода ИЯИ РАН относится к классу сильноточных линейных ускорителей на средние энергии и совместно с экспериментальным комплексом является уникальной установкой национального и международного значения. Он является единственным в России и одним из пяти в мире ускорителем данного класса. Со времени начала регулярной работы ускорителя на физические и прикладные задачи в 1993 году и по декабрь 2025 года проведено 162 сеанса, общей продолжительностью 55273 часа, в том числе 5 сеансов общей продолжительностью 1317 часов в 2025 году, направленных на выполнение государственного задания, программ РАН, планов и научной программы Института, соглашений со сторонними организациями. На ускорителе постоянно ведутся работы по повышению энергии ускоренного пучка. В 2025 году введен в работу еще один ускоряющий резонатор с соответствующими системами и энергия ускоренного пучка увеличена с 345 МэВ до 364 МэВ.

Первый сеанс в 2025 году продолжительностью 108 часов был посвящен комплексной наладке оборудования и систем ускорителя, исследованиям режимов работы и настройке ускорителя без потребителей пучка. Ускорение осуществлялось до энергии 267 МэВ.

Во втором сеансе продолжительностью 389 часов работы велись на нейтронный источник РАДЭКС с энергией 267 МэВ. Импульсный ток составлял $5\div 6$ мА, длительность импульсов тока пучка $120\div 150$ мкс и частота следования импульсов 50 Гц.

В третьем сеансе продолжительностью 152 часа работы велись на комплекс протонной терапии с энергией ускоренного пучка 160 МэВ. Работы велись в двух режимах: а) со средним током примерно 100 нА, длительностью импульсов до 150 мкс и частотой повторения $1\div 50$ Гц; б) в режиме одиночных импульсов с импульсным током $5\div 10$ мА длительностью $20\div 100$ мкс. Обеспечивалось проведение радиобиологических экспериментов, в том числе с живыми объектами (крысы), включая исследования особенностей метода протонной флэш-терапии.

В четвертом сеансе продолжительностью 252 часа работа велась на изотопный комплекс с энергией пучка 160 МэВ. Основной задачей было обеспечение наработки изотопа натрия-22 путем облучения алюминиевой мишени. Средний ток пучка достигал 80 мкА, однако для обеспечения сохранности мишени регулярная длительная работа велась с током примерно 60 мкА. Всего был наработан интеграл тока 9303,9 микроампер-часов. Второй задачей являлось облучение экспериментальной ториевой мишени и с целью отработки технологии получения радиоизотопа актиний-225. Интенсивность пучка

ограничивалась величиной 2,5 мкА, набранный интеграл составил 10,48 микроампер-часов. Следует отметить, что в этом сеансе впервые за последние примерно десять лет была обеспечена надежность работы в отдельные смены близкая к 100%.

В пятом сеансе общей продолжительностью 416 часов работы велись на комплекс протонной терапии (энергия 160 МэВ), нейтронный источник РАДЭКС и нейтронный источник ИН-06. На РАДЭКС работы велись с энергией 267 МэВ, импульсным током $5\div 10$ мА, частотой повторения импульсов 50 Гц и с двумя длительностями импульсов: 170 мкс и 0,3 мкс. Работы на ИН-06 велись при энергии пучка до 364 МэВ, которая была достигнута в 2025 году после проведения комплекса работ по восстановлению работоспособности и модернизации систем и оборудования ускорителя, импульсном токе $6\div 8$ мА, длительности импульсов $150\div 170$ мкс и частотах повторения импульсов 25 Гц и 50 Гц.

В 2025 году Институтом получено разрешение Ростехнадзора № P091-00109-77/01729671 от 17.01.2025г. на выбросы радиоактивных веществ в атмосферный воздух (срок действия – до 17.01.2032г.). Сеансы проводились с непрерывным контролем таких выбросов. Результаты измерений и расчетов выбросов для второго и четвертого сеансов, предоставленные сектором радиационного мониторинга окружающей среды, приведены в Приложении Б к настоящему отчету. Суммарная величина выбросов при практически реализуемых режимах и длительности сеансов с существенным запасом находится в пределах допустимых $41,69\cdot 10^{14}$ Бк в год. Следует отметить, что выбросы при работе на изотопный комплекс намного превышают выбросы, образующиеся при работе на другие экспериментальные установки. Данные о радиационном фоне в выбросной трубе, через которую происходят выбросы и которые используются для расчета величины выбросов, доступны в онлайн режиме на сайте <https://radioalt.inr.ru/radiometer.html>. В качестве примера таких данных на рисунке 1 представлены показания за 10 октября 2025 года при работе на изотопный комплекс в четвертом сеансе.

Обеспечение работы ускорителя стало возможным благодаря постоянно проводимым работам по техническому обслуживанию и модернизации оборудования основных технологических систем ускорителя.

В течение 2025 года проводились работы по ремонту и техническому обслуживанию всех основных систем ускорителя и экспериментального комплекса: инжектор протонов, инжектор отрицательных ионов водорода, ускоряющая система, система ВЧ питания начальной части ускорителя, система ВЧ питания основной части ускорителя, электротехническая система, вакуумная система, системы охлаждения, система авторегулирования собственных частот ускоряющих резонаторов, система питания

электромагнитного оборудования, система авторегулирования и стабилизации амплитуд и фаз ускоряющих полей, система диагностики пучка, система управления ускорителем, система измерения потерь пучка, система быстрой аварийной защиты.



Рисунок 1 – Информация о выбросах 10 декабря 2025 года

В перерывах между сеансами при работающем инженерном обеспечении проводилось регулярное включение и наладка оборудования. Так каналы усиления систем ВЧ питания регулярно включались на ускоряющие резонаторы с целью как наладки оборудования каналов, так и тренировки и поддержания в рабочем состоянии резонаторов. При работе на резонаторы проводится одновременное включение, проверка и наладка большинства систем ускорителя.

Все работы на ускорителе проводились с соблюдением правил техники безопасности, а также норм и правил радиационной безопасности. В частности, осуществлялась плановая поверка дозиметрических приборов, обеспечение сотрудников индивидуальными дозиметрами, для персонала группы А проводилась проверка знаний правил радиационной безопасности, проводилось измерение радиационной обстановки на ускорителе и на каналах транспортировки в экспериментальном комплексе. Проводилась инвентаризация калибровочных источников, входящих в комплект дозиметрических приборов. Проводилась инвентаризация конструкционных материалов (изделий, узлов, оборудования), временно выведенных из эксплуатации после облучения на линейном ускорителе и в каналах транспортировки пучка.

Одной из наиболее сложных и проблемных систем ускорителя является система ВЧ питания начальной части. Система включает семь четырехкаскадных каналов усиления,

один из которых является резервным. Обеспечение надежной работы системы стало возможным благодаря комплексу выполненных ремонтных и профилактических работ, среди которых следует отметить следующие:

- регулировка узлов ввода мощности в ускоряющие резонаторы с целью обеспечения оптимального согласования резонаторов с подводными фидерами;
- подстройка собственных частот контуров ВЧ генераторов;
- переход с индукционного регулятора на тиристорный для питания цепи накала выходной лампы первого канала;
- ревизия, переборка и ремонт контактных групп в контурах ВЧ генераторов;
- ремонт и модернизация работающих под высоким напряжением цепей смещения мощных модуляторных ламп;
- ревизия и регулировка узлов вывода мощности из ВЧ генераторов;
- ревизия и ремонт высоковольтных узлов и высоковольтных кабелей.

В процессе проведения наладочных и профилактических работ была выявлена причина появления помех во втором канале, приводящая к сбоям в работе систем авторегулирования, синхронизации, отключению данного и других каналов и, в результате, к снижению надежности и простоям ускорителя. Причиной оказался дефект во входном контуре предоконечного каскада усиления, приводящий к недостаточно надежному ВЧ контакту с лампой. Контакт не обеспечивается конструктивно и для его обеспечения необходимо принятие специальных мер при замене лампы. После устранения данной причины устойчивость работы оборудования канала и всего ускорителя в целом была повышена, что совместно с другими принятыми мерами привело к повышению надежности и увеличению полезного времени работы ускорителя.

Энергия пучка на выходе ускорителя определяется числом работающих ускоряющих резонаторов и соответствующих ВЧ каналов системы ВЧ питания основной части ускорителя. Как отмечалось выше, в настоящее время максимальная энергия пучка, которую может обеспечить ускоритель, составляет 364 МэВ. Для получения такой энергии в настоящее время обеспечена работоспособность 19-ти каналов усиления основной части ускорителя (№ 3-1...3-11, 4-1...4-8), для чего в течение года непосредственно на этих каналах, а также на питающих подстанциях проведен комплекс ремонтно-восстановительных, наладочных и регламентных работ. Среди таких работ можно отметить:

- проверка исправности и замена неисправных тиристорных плеч шкафов выпрямителя, разрядных и защитных тиристорных ключей, а также водоохлаждаемых резисторов;

- проверка и настройка устройств защиты и аварийного отключения;
- проверка работоспособности и ремонт шкафного оборудования;
- комплексная проверка и настройка ВЧ каналов совместно с системами АРФА и АРЧТ;
- тренировка ускоряющих резонаторов;
- проверка и профилактика высоковольтного оборудования каналов, включая трансформаторные подстанции;
- проверка и профилактика волноводной системы, включая волноводные переключатели.

В 2025 году также выполнен большой объем работ на трех ВЧ каналах №4-9, 4-10 и 4-11, работоспособность которых должна быть обеспечена для получения энергии пучка 423 МэВ в 2027 году. Сложность выполненных работ обусловлена длительным простоем (примерно 30 лет) и не укомплектованностью оборудования. В результате была достигнута автономная работа каналов при их возбуждении от лабораторного генератора. Более того, была проведена ВЧ тренировка резонаторов до номинального уровня поля и в течение нескольких дневных смен проверена устойчивая работа ВЧ каналов в номинальном режиме подачи мощности в ускоряющие резонаторы. Объем выполненных работ на указанных каналах составляет около 80% того объема, который необходим для полного восстановления их работоспособности. Основные задачи, которые предстоит решить, – это комплексная проверка и наладка каналов совместно с системами АРФА и АРЧТ, а также модернизация формирующих высоковольтных линий модуляторов для увеличения длительности импульсов с целью увеличения длительности импульсов тока пучка до 200 мкс.

В 2025 году проводились регулярные работы и на инженерных системах линейного ускорителя. Так на системах водоохлаждения помимо регулярных регламентных работ был выполнен ремонт с переборкой и заменой комплектующих нескольких насосов. Также проводилась профилактика и регулировка терморегулирующих установок. Выполнена чистка механических фильтров терморегулирующих установок и фильтров в нескольких системах охлаждения, а также ряд других работ. Работы на системе электропитания вследствие отсутствия сотрудников в электротехнической службе ускорителя выполнялись персоналом служб главного энергетика Института.

В 2025 году регулярно выполнялись профилактические и ремонтные работы на оборудовании инжектора протонов. Надежность работы инжектора протонов при проведении сеансов ускорителя была близка к 100%. Среди выполненных работ можно отметить замену катода в источнике протонов – дуоплазматроне и замену фильтра-

натекателя для подачи чистого водорода в дуоплазматрон. Высокая чистота водорода необходима для обеспечения эмиссионной способности оксидного катода дуоплазматрона, который чувствителен к примесям в газе, подаваемом в разрядный объем ионного источника. Следует отметить, что ресурс работы натекателя водорода является одним из факторов, ограничивающих время безотказной работы инжектора протонов. Схематически фильтр-натекатель водорода показан на рисунке 2.



Рисунок 2 – Схема фильтра-накателя водорода в дуоплазматрон

Фильтром водорода является тонкостенная никелевая трубка, помещенная в баллон, в который напускается технический водород, содержащий примеси. Наружный диаметр трубки равен 4 мм, внутренний диаметр – 3 мм, длина 300 мм. Торцы трубки загерметизированы, так что водород может проникать внутрь никелевой трубки только через ее стенки. Такое проникновение становится возможным при нагреве трубки до температуры 700°C и выше. При этом проникновение молекул и атомов других газов практически не происходит, то есть пропускаются только молекулы водорода, и нагретые стенки трубки действуют как практически идеальный фильтр для водорода. Нагрев трубки осуществляется пропусканием через трубку тока величиной $30\div 35\text{ А}$, при этом выделяемая в трубке мощность равна $150\div 200\text{ Вт}$. При этом в дуоплазматрон поступает поток водорода, достаточный для нормальной горения разряда с напряжением разряда около 100 В.

Однако опыт эксплуатации фильтра-накателя такой конструкции показывает, что при нагреве в атмосфере водорода под давлением более 1 атм. происходит деформация формы нагретой никелевой трубки, что связано, очевидно, с повышением пластичности ее стенок при нагреве. На рисунке 3 показана фотография никелевой трубки после длительной эксплуатации рядом с трубкой, которая еще не устанавливалась в натекатель водорода.



Рисунок 3 – Никелевые трубки фильтра водорода до (слева) и после (справа) работы в натекателе водорода

Деформация никелевой трубки приводит к снижению величины фильтруемого потока водорода, из-за чего приходится увеличивать нагрев трубки, что приводит к еще более значительной деформации и т. д. В конце концов происходит нарушение герметичности трубки, и становится необходима ее замена.

Для увеличения ресурса непрерывной работы инжектора протонов конструкция натекателя была дополнена установкой в никелевую трубку корундовой керамической трубки с внешним диаметром 2 мм, внутренним – 1 мм. Фотография фильтра-натекателя с корундовой трубкой показана на рисунке 4.



Рисунок 4 – установка корундовой трубки в никелевый фильтр-натекатель

Максимально допустимая температура корундовой трубки – 1700°C . После установки трубки в натекатель в вакууме при температуре 700°C происходит ее быстрое обезгаживание, и установка трубки не влияет заметным образом на чистоту водорода, напускаемого через фильтр-натекатель в ионный источник, но препятствует сильной

механической деформации никелевой трубки. Были выполнены испытания фильтра-натекателя, которые подтвердили нормальную работу фильтра-натекателя данной конструкции. Проверка ресурса работы фильтра-натекателя будет проводиться в режиме эксплуатации инжектора протонов.

Благодаря регулярному обслуживанию и ремонту оборудования системы диагностики пучка в 2025 году во всех сеансах была обеспечена ее бесперебойная работа. Также была обеспечена бесперебойная работа системы автоматизированного управления и системы синхронизации оборудования ускорителя.

Среди выполненных работ следует отметить изготовление и установку нового крейта многоканальной интегрирующей электроники многопроволочного профилометра изотопного комплекса. Необходимость выполнения этой работы было обусловлена длительным перерывом в работе ускорителя на изотопный комплекс.

В течение года регулярно проводились работы по ремонту, поддержанию работоспособности и расширению возможностей системы автоматизированного управления, а также системы синхронизации ускорительного комплекса. Среди таких работ можно отметить:

- наладку управления новыми источниками постоянного тока для фокусирующей системы изотопного и экспериментального комплексов;
- наладку оборудования АСУ на ВЧ-каналах 4-8 – 4-11 основной части ЛУ в рамках комплекса работ по получению пучка с энергией 423 МэВ;
- наладку оборудования и программного обеспечения АСУ для контроля параметров изотопного комплекса;
- пуско-наладочные работы оборудования новой системы синхронизации на основной части линейного ускорителя, полученного в рамках программы обновления приборной базы;
- модернизацию программного обеспечения для управления новой системой синхронизации;
- обслуживание сетевого оборудования ОУК и пользовательских ПК.

Для обеспечения функционирования системы автоматического регулирования собственных частот резонаторов (АРЧТ) регулярно выполнялись работы по настройке и регулировке, а также ремонту оборудования (клапаны терморегулирующих установок, токоведущие элементы электронагревателей, сигнализаторы уровней, пульта и пр.). До 2025 года стабилизация собственных частот ускоряющих резонаторов четвертого сектора осуществлялась путем стабилизации их температуры, что было не вполне достаточно для обеспечения стабильного ускорения пучка. В 2025 году на системах АРЧТ №4-1÷№4-6 (ВЧ

канал №4-8, энергия 364 МэВ) налажена стабилизация собственных частот и по фазе отраженной волны.

По системе АРФА выполнен большой объем работ по ремонту, наладке и замене электронных ячеек и источников питания в шкафах системы. Проведена профилактика и ремонт фазостабильных кабелей и разъемов с их заменой в случае необходимости. Завершены работы по ремонту и профилактике механических фазовращателей, используемых для установки и регулирования фаз ускоряющих полей, с заменой прецизионных многооборотных потенциометров, служащих для определения фазового положения. Такой ремонт фазовращателей выполнялся и для системы АРЧТ, где они используются для задания и контроля рабочей точки системы стабилизации собственной частоты резонаторов по фазе отраженной волны, а также для системы АРФ-П. Для контроля качества регулировки фазовращателей и правильности отображения фазового положения с помощью прецизионных многооборотных потенциометров был создан специальный стенд. Непосредственно перед пятым сеансом для обеспечения ускорения пучка до 364 МэВ выполнены работы по восстановлению и наладке системы АРФА на ВЧ канале №4-8.

Для обеспечения надежной работы ускорителя, который является источником ионизирующего излучения, необходимо обеспечить надежную работу таких систем как система быстрой аварийной защиты (БАЗ), система измерения потерь ионов (СИПИ), система нейтронного мониторинга, автоматизированная система радиационного контроля «Фрегат» (экспериментальный комплекс), система дозиметрического контроля на ускорителе, системы блокировок и сигнализации на ускорителе (СБС) и в экспериментальном комплексе (СКУТО), система защитных дверей. В 2025 году проведен комплекс ремонтно-профилактических работ на указанных системах, включая ремонт блоков с фотоэлектронными умножителями, ремонт предварительных усилителей сигналов с датчиков, ремонт блоков питания в том числе высоковольтных, измерение чувствительности и калибровка датчиков, ремонт нейтронных датчиков и другие работы.

По системе питания электромагнитного оборудования были продолжены работы по вводу в эксплуатацию современных источников питания, полученных ранее по программе обновления приборной базы. Для подключения источников были проложены и подключена дополнительные кабели, обеспечено дистанционное управление источников, заведены блокировки от реле протока воды в обмотках электромагнитных устройств. Своими силами выполнен ремонт трех импортных источников питания, приобретенных ранее. На экспериментальном комплексе наряду с вводом в эксплуатацию современных источников питания продолжались работы по поддержанию в рабочем состоянии, а также частичная модернизация штатных источников ИСТЭ-1000/115, в частности электронных блоков МП-

12. Это позволяет создать резерв источников питания, что дает возможность быстрого восстановления работоспособности системы в сеансах работы ускорителя. Перед четвертым сеансом, в котором работа велась на изотопный комплекс после длительного перерыва, проведена проверка и восстановление работоспособности системы быстрой развертки пучка на мишени.

В 2025 году продолжались работы по измерению магнитных характеристик трубок дрейфа, изготовленных ранее, но дорабатываемых в настоящее время на предприятии АО «НПП «ТОРИЙ». В качестве примера на рисунке 5 показана магнитная система квадрупольной трубки №109.

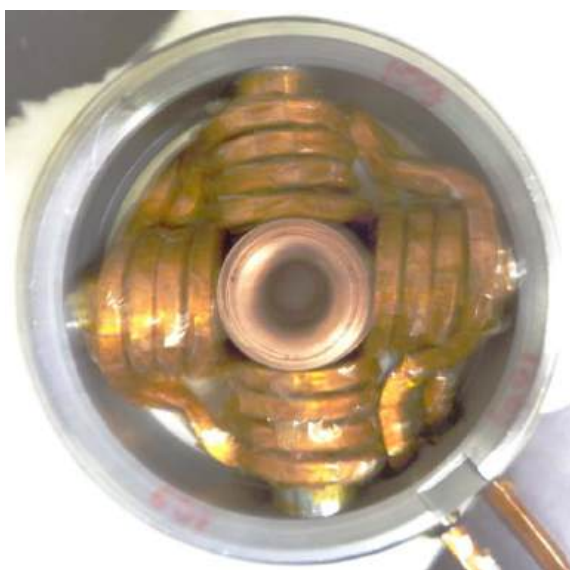


Рисунок 5 – Магнитная система квадрупольной линзы трубки дрейфа №109

Одной из базовой систем в ускорителях заряженных частиц является вакуумная система. В 2025 году обеспечена устойчивая работа вакуумной системы и обеспечен рабочий вакуум в ускорителе и каналах транспортировки экспериментального комплекса. Выполнен большой объем работ по ремонту и восстановлению работоспособности вакуумных устройств, включая магниторазрядные и турбомолекулярные насосы, поиск и устранение течей, монтаж/демонтаж различных устройств на ускорителе и экспериментальном комплексе, проверка на герметичность вакуумных узлов и элементов, в том числе создаваемых и для сторонних организаций и другие работы.

2. Модернизация систем сильноточного линейного ускорителя ионов водорода ИЯИ РАН

Основной объем оборудования ускорителя был изготовлен в 80-х годах прошлого столетия. Для обеспечения работы ускорителя постоянно проводятся работы по модернизации. Рассмотрим работы по модернизации некоторых систем, выполненные в 2025 году.

2.1. Стенд источника протонов

В 2025 году были продолжены работы по созданию стенда источника протонов. На стенде предполагается проводить исследовательские работы по совершенствованию дуоплазматрона, в котором генерируется пучок протонов для линейного ускорителя ИЯИ РАН. Стенд также будет использоваться для выполнения работ по созданию и исследованию и других ионных источников. В частности в настоящее время уже ведутся работы по созданию источника для ускорителя, предназначенного для протонной терапии, с параметрами: импульсный ток до 40 мА, длительность импульса 1,2 мкс, частота повторения до 1 Гц, нормализованный эмиттанс не более $0.5 \text{ п} \cdot \text{мм} \cdot \text{мрад}$.

Конструкция источника протонов, описание схемы питания и расположение оборудования источника протонов представлено в Отчете ОУК по госзаданию за 2024 год.

В 2025 году была выполнена поузловая сборка источника протонов и диагностической аппаратуры, выполнены вакуумные испытания. На рисунке 6 показана фотография источника протонов перед установкой в вакуумную камеру на стенде. Источник собран на фланце, который является изолятором на 45 кВ, поскольку на такие части источника как газовый клапан и генератор плазмы прикладывается импульсное напряжение +45 кВ от генератора высоковольтных импульсов (ГВВИ). В источнике используется четырехэлектродная ионно-оптическая система (ИОС) ускорения и формирования пучка протонов. Первый (плазменный) электрод ИОС находится под плавающим потенциалом, но поток плазмы придает ему потенциал, близкий к +45кВ.



Рисунок 6 – Фотография источника протонов перед установкой в вакуумную камеру на стенде

На второй (вытягивающий) электрод ИОС прикладывается отрицательное напряжение по отношению к плазменному электроду до -25 кВ и в зазоре между плазменным и вытягивающим электродом создается ускоряющее поле для протонов. Четвертый электрод находится под потенциалом земли, а на третий (запирающий) электрод ИОС подается напряжение минус 3 кВ от блока питания, установленного под потенциалом земли. Источник протонов, установленный в вакуумной камере, показан на рисунке 7.



Рисунок 7 – Фотография источника протонов, установленного в вакуумную камеру

В 2025 году на стенде были выполнены работы по монтажу систем электроснабжения, газоснабжения, водоохлаждения, а также изготовлению генератора высоковольтных импульсов + 45 кВ, наладке и запуску других нестандартных блоков питания источника протонов, включая блок питания клапана, генератор тока разряда.

На рисунке 8 представлены данные по изменению давления водорода в вакуумной камере источника протонов после напуска газа в источник плазмы при срабатывании газового электромагнитного клапана.

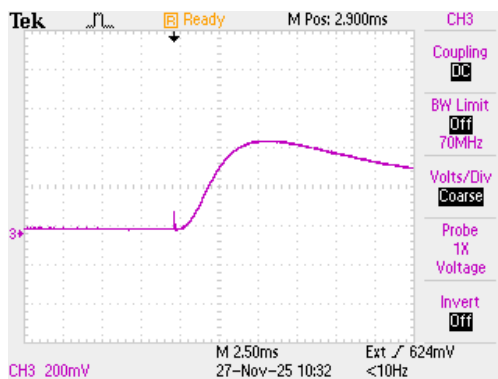


Рисунок 8 – Изменение давления в вакуумной камере источника протонов после напуска газа в источник плазмы при срабатывании газового электромагнитного клапана

Из рисунка 8 следует, что характерное время напуска и вытекания газа в источник и из источника плазмы равно ~ 4 мс. Этот параметр зависит от давления газа в электромагнитном клапане и имеет значение для настройки времени задержки между импульсами клапана и тока разряда.

Пример типичной осциллограммы тока разряда приведен на рисунке 8.

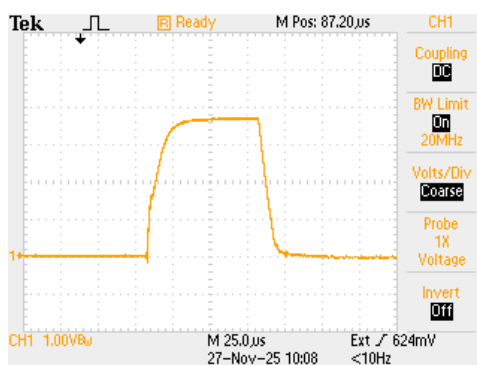


Рисунок 9 – Осциллограмма тока разряда генератора плазмы

На рисунке 9 амплитуда тока разряда в генераторе плазмы равна 370 А, длительность импульса тока разряда – 50 мкс.

На рисунке 10 показана осциллограммы импульсных напряжений ГВВИ.

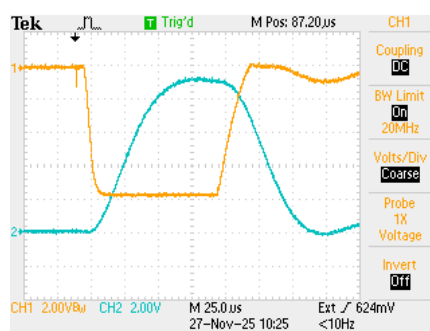


Рисунок 10 – Осциллограммы ГВВИ

Желтым цветом выделена осциллограмма напряжения на первичной обмотке импульсного высоковольтного трансформатора (- 19 кВ), бирюзовым – осциллограмма выходного напряжения ГВВИ (+45 кВ).

Для измерения параметров пучка ионного пучка был разработан и изготовлен блок диагностики, показанный на рисунке 11.

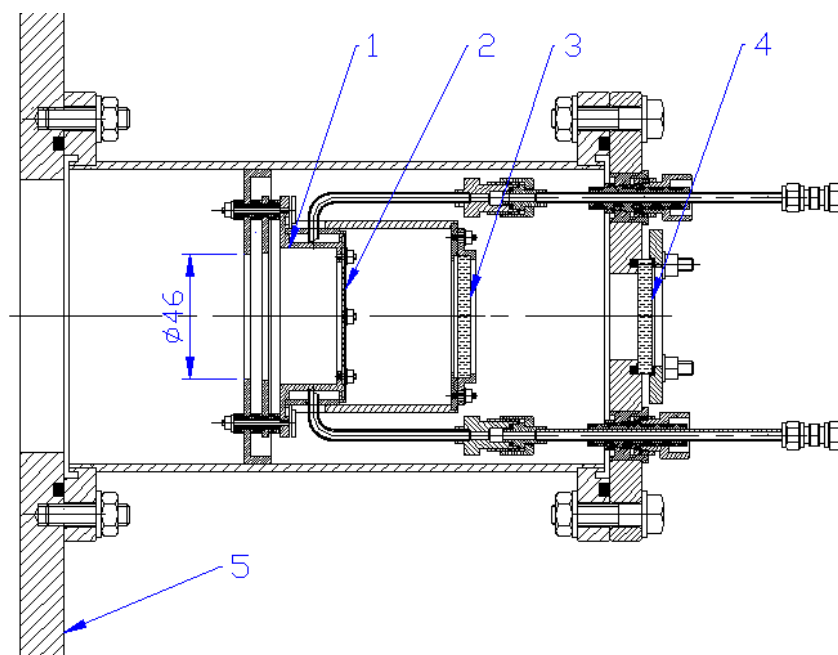


Рисунок 11 – Блок диагностики ионного пучка. 1- цилиндр Фарадея, 2,3 – измеритель эмиттанса, 4 – смотровое окно, 5 – фланец вакуумной камеры источника протонов

Блок диагностики включает водоохлаждаемый цилиндр Фарадея с запирающим вторичных электронов (1). Измеритель эмиттанса по типу «перечницы» включает коллектор (2) с 309 отверстиями диаметром 0,4 мм, расположенными рядами с расстояниями между центрами отверстий 2 мм, и сцинтиллятора из кварца (3). Расстояние между коллектором и сцинтиллятором равно 40 мм. Изображения на сцинтилляторе, созданные ионами водорода, проходящими через отверстия в коллекторе, содержат информацию о фазовом портрете исходного ионного пучка. Изображение регистрируется видеокамерой через смотровое окно (4). Блок диагностики устанавливается на фланце (5)

вакуумной камеры источника протонов. Фотография блока диагностики, смонтированного на вакуумной камере источника протонов, показана на рисунке 12.

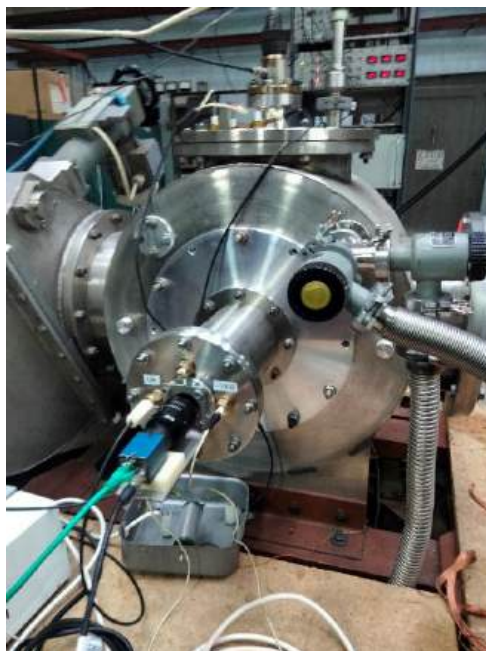


Рисунок 12 – Блок диагностики ионного пучка

Сигналы тока пучка с цилиндра Фарадея и изображения с «перечницы» блока диагностики показаны на рисунке 13.

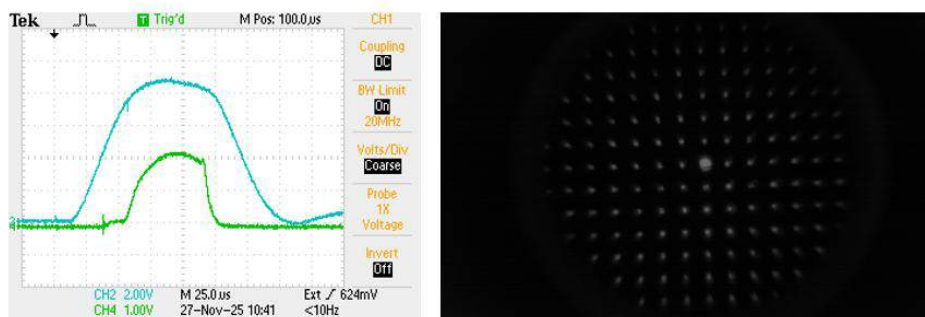


Рисунок 13 – Осциллограммы тока пучка протонов на цф (слева, зеленая кривая) и изображение пучка на сцинтиляторе после прохождения «перечницы» (справа)

Видеокамерой регистрировалось также свечение разряда в дуговом источнике плазмы, которое для измерений эмиттанса является фоновым изображением. Для устранения этого фона триггерный запуск видеокамеры настраивался на момент времени после окончания тока разряда, при этом фон от свечения разряда уже не наблюдался, а изображение «перечницы» от тока пучка сохранялось благодаря известному эффекту послесвечения сцинтиллятора.

По результатам измерений импульсный ток пучка, регистрируемый цилиндром Фарадея с запирающим вторичных электронов и с сопротивлением 50 Ом, равен 40 мА.

Радиус пучка по изображению на кварцевом сцинтилляторе равен 12 мм, расходимость – 80 мрад. Разброс расходимости по предварительному анализу данных измерений не превышает 5 мрад, нормализованный эмиттанс – менее $0,6 \pi \cdot \text{мм} \cdot \text{мрад}$. Испытания источника, а также совершенствование ГВВИ и другой аппаратуры источника протонов на стенде продолжают.

2.2. Модернизация источника отрицательных ионов водорода

Поскольку в ядерной физике имеются задачи, требующие ускоренного пучка отрицательных ионов водорода, проводились работы по повышению интенсивности и надежности работы источника отрицательных ионов. С этой целью была разработана рабочая конструкторская документация на узлы и комплектующие детали нового источника отрицательных ионов водорода на основе проведенного эскизного 3 - D проектирования, выполненного в программе Solidworks и мультифизического моделирования, проведенного в программе COMSOL Multiphysics. Разработанный сборочный чертеж источника отрицательных ионов схематически изображен на рисунке 14.

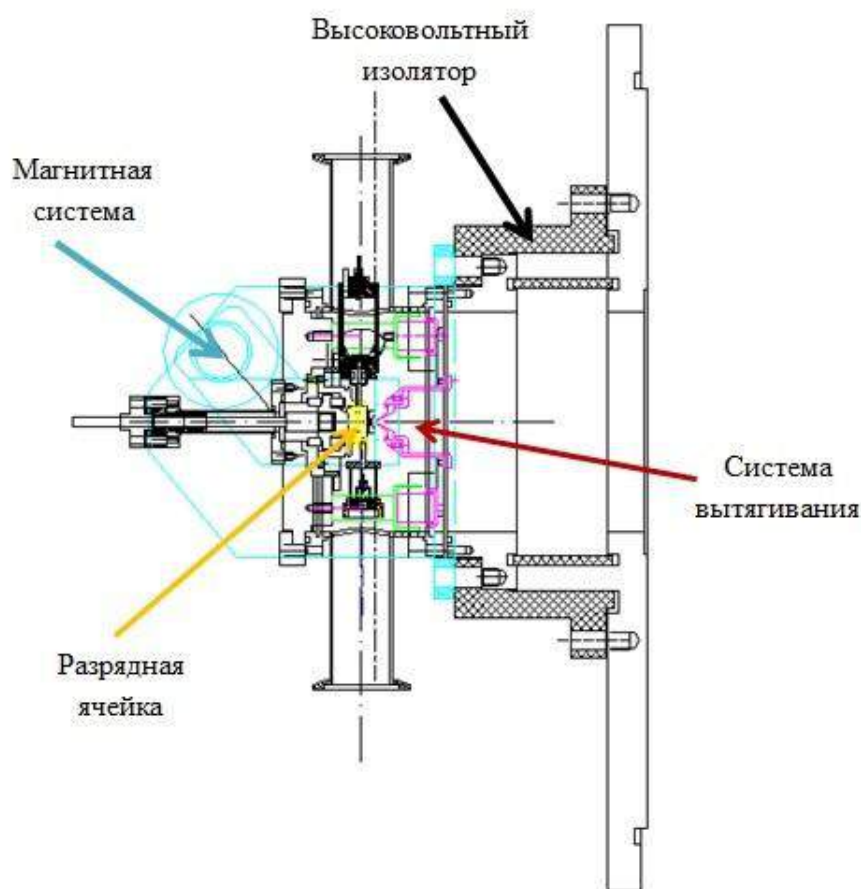


Рисунок 14 – Осесимметричный источник отрицательных ионов на фланце вакуумной камеры стенда источника отрицательных ионов

Основные особенности данного источника, отличающие его от источника отрицательных ионов, используемого до настоящего времени в инжекторе отрицательных ионов ЛУ ИЯИ РАН – это осесимметричная система формирования пучка, исключение из состава источника 90-градусного поворотного магнита и расположение катушки магнитной системы снаружи вакуумной камеры. Расположение магнитной катушки на воздухе и значительное уменьшение числа её ампервитков позволяет отказаться от водяного охлаждения, что значительно повышает надежность и простоту эксплуатации всего источника.

На основе разработанной конструкторской документации в Опытном производстве ИЯИ были изготовлены детали узлов источника отрицательных ионов, включая магнитную систему, газоразрядную камеру с пеннинговской геометрией, электроды системы вытягивания, вводы питания газового разряда и электромагнитного газового клапана.

После изготовления деталей была произведена сборка ионного источника на вакуумной камере стенда источника отрицательных ионов и проведены вакуумные испытания. При работе турбомолекулярного насоса КУКУ FF200/1300Е, имеющего паспортную производительность 1300 л/сек, вакуум в системе составил $1,5 \times 10^{-5}$ торр. Общий вид источника ионов, смонтированного на вакуумной камере, приведен на рисунке 15. Общий вид стенда для испытаний источника отрицательных ионов с системой питания ионного источника приведен на рисунке 16.

Для подачи водорода в газоразрядную камеру используется импульсный электромагнитный клапан, на который подаются управляющие токовые импульсы амплитудой до 30 А от блока питания клапана. Водород чистотой 99,99% подается через газовую систему из баллона емкостью 2 л. Высоковольтные изоляторы системы вытягивания (поз. 1 на рисунке 15) изготовлены из капролона. Магнитное поле в пеннинговской газоразрядной ячейке создается катушкой (поз. 2 на рисунке 15). В данной конструкции газоразрядная ячейка и магнитная система при работе источника должны находиться под вытягивающим потенциалом величиной до 20 кВ. Для питания магнитной катушки постоянным током был изготовлен выпрямитель, расположенный на изоляторе под вытягивающим потенциалом, а для его питания использован изолирующий трансформатор. Выпрямитель питания магнитной катушки показан рисунке 16, позиция 1. Разрядное напряжение подается между анодом и катодом разрядной ячейки от блока питания разряда поз. 3 на рисунке 16. Для синхронизации работы импульсных устройств системы питания источника ионов используется генератор задающих импульсов ГИ-6 (поз. 4 на рисунке 16).

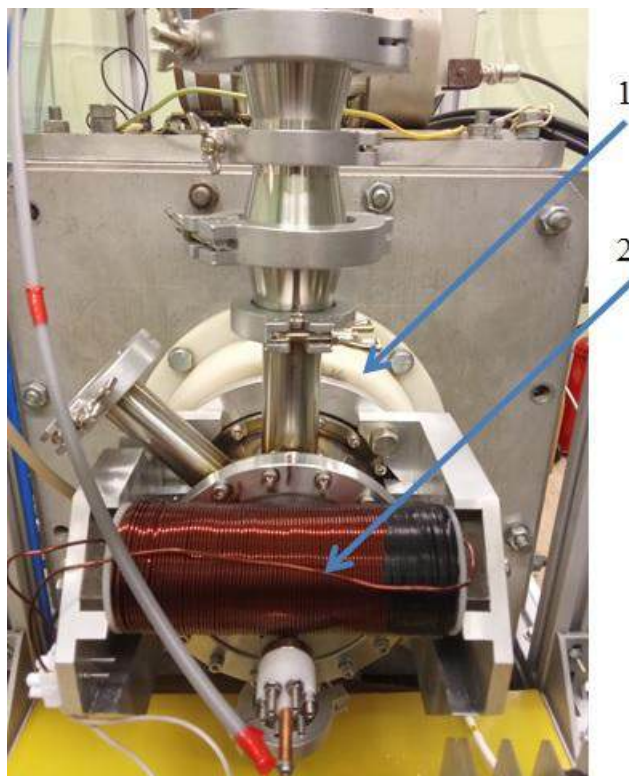


Рисунок 15 – Общий вид источника ионов, смонтированного на вакуумной камере

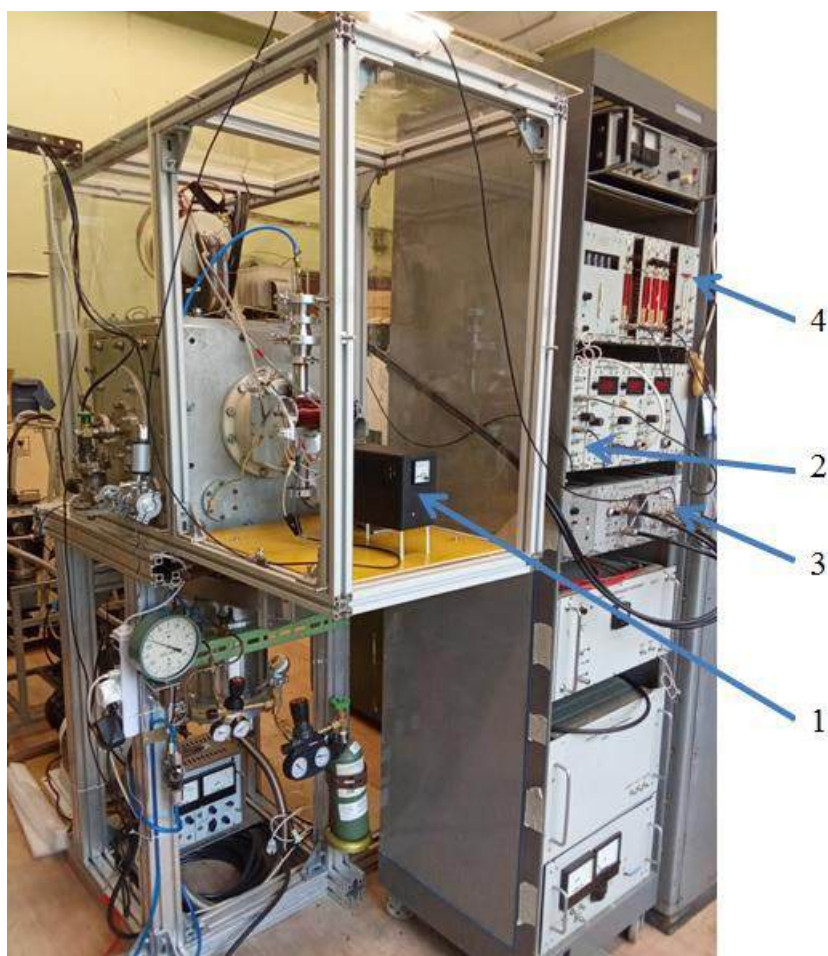


Рисунок 16 – Общий вид стенда для испытаний источника отрицательных ионов с системой питания ионного источника

Было проведено пробное включение блока питания разряда на разрядную ячейку для проверки правильности сборки узлов источника и соответствия параметров магнитного поля и плотности водорода, создаваемых в разрядной ячейке, параметрам зажигания разряда. При этом регистрировались напряжение на промежутке катод – анод делителем напряжения 1В/100В и ток разряда трансформатором тока с чувствительностью 1В/20А. Одна из зарегистрированных осциллограмм приведена на рисунке 17. Верхний луч – напряжение на разрядном промежутке при чувствительности 200 В на клетку. Нижний луч – ток в разрядном промежутке при чувствительности 10 А на клетку.

Пробное включение позволило сделать вывод о правильности сборки узлов источника, отсутствии короткого замыкания в разрядной ячейке, достаточности подачи водорода и магнитного поля для поджигания разряда.

Следующим этапом испытаний источника будет получение стабильного высоковольтного тлеющего разряда, испытания вытягивающей системы с подачей на вытягивающий промежуток высоковольтного напряжения и получения пучка отрицательных ионов.



Рисунок 17 – Осциллограммы напряжения на разряде (верхний луч) и тока разряда (нижний луч)

По результатам работ был подготовлен доклад «Состояние разработки инжектора отрицательных ионов водорода линейного ускорителя ИЯИ РАН». Авторы А.С. Белов, В.Н. Зубец, В.С. Кленов, Л.В.Кравчук, А.В. Фещенко. Доклад был представлен на международную научно-техническую конференцию «Ядерные и электрофизические установки – источники мощных ионизирующих излучений для фундаментальных и прикладных исследований», проходившую с 29 сентября по 3 октября 2025 в РФЯЦ-ВНИИЭФ в г. Сарове.

2.3. Модернизация других систем ускорителя

В 2025 году проводилась модернизация и исследование ряда систем ускорителя.

По системе ВЧ питания начальной части ускорителя были продолжены исследования и доработки с целью повышения надежности работы каналов усиления. Серьезные проблемы, возникли после вынужденного перехода в мощном импульсном модуляторе на генераторную лампу ГИ-71А вместо модуляторной лампы ГМИ-44А, снятой с производства.

Генераторная лампа ГИ-71А в качестве модуляторной обладает двумя существенными недостатками. Большое остаточное напряжение анод-катод приводит к необходимости повышения анодного напряжения на 5-7 кВ, что, безусловно, повышает вероятность пробоев, но не является критичным. Наиболее критичным фактором являются большой сеточный ток и недостаточная электропрочность зазора сетка-катод. Большой сеточный ток требует повышения мощности импульса управления, что в случае пробоев приводит к чрезмерному выделению мощности на сетке и в цепи управления. Вероятность же таких пробоев оказывается существенной из-за недостаточной электропрочности.

Производителем лампы ГИ-71А АО "С.Е.Д.-СПБ" (Санкт-Петербург) было предложено проверить возможность использования вместо одной лампы ГИ-71А нескольких параллельно включенных ламп, которые в таком случае суммарно обеспечивают требуемые токи в нагрузке. В таких лампах, опытные образцы которых АО "С.Е.Д.-СПБ" изготавливает на базе приборов ГК-12А, используется магнитная фокусировка электронного потока, что снижает сеточные токи и указанная выше проблема может быть преодолена.

Для проверки указанной возможности в 2025 году АО "С.Е.Д.-СПБ" безвозмездно передало ИЯИ РАН во временное пользование четыре триода с магнитной фокусировкой электронного потока на базе приборов ГК-12А. Нами были разработаны и изготовлены специальные устройства для установки таких ламп в модуляторы. Реализовано требование установки в существующие шкафы модуляторов, предусмотрена подача высоких напряжений на электроды ламп, а также токов накала, обеспечено подключение к системе охлаждения, обеспечено измерение электрических параметров, предусмотрена установка магнитов для создания магнитного поля. Накалы ламп запитывались параллельно от штатного высоковольтного накального трансформатора. Для удовлетворения условия плавности изменения тока накала, что необходимо для ламп, работающих в магнитных полях, была доработана цепь запитки первичной обмотки накального трансформатора путем внесения мощных балластных сопротивлений, которые коммутировались с помощью реле времени, обеспечивая трехступенчатое включение накала и исключение бросков тока в начальный момент.

На рисунке 18 показана сборка из четырех ламп перед установкой в модулятор. Данная сборка была установлена модулятор резервного канала усиления КУ2-6.



Рисунок 18 – Сборка из четырех ламп перед установкой в модулятор

Испытания проводились совместно с представителями АО "С.Е.Д.-СПБ". Подбором магнитов было получено реальное уменьшение сеточных токов. Так для четырех ламп ток составил 16 А, что более, чем в 2 раза меньше, чем для одной лампы ГИ-71А. К сожалению, анодное напряжение поднять до требуемых рабочих значений не удалось, происходили пробой в лампах. При включении канала на второй ускоряющий резонатор максимальный уровень поля, который удалось достичь, составил, 84% от номинального значения, что, особенно с учетом необходимости запаса на авторегулирование, не достаточно. Было принято решение о доработке ламп с целью повышения электропрочности. Лампы были демонтированы и отправлены изготовителю для доработки. Работы будут продолжены после получения доработанных ламп.

Среди работ, выполненных по модернизации вакуумной системы, можно отметить модернизацию поста предварительной откачки в экспериментальном комплексе на канале нейтронного источника «РАДЕКС». Выполнен монтаж вакуумного оборудования (новые насосы, затвор, аварийный клапан, соединительная арматура), проложены и подключены силовые и контрольные кабели для местного и дистанционного постом. Проведены

наладочные работы. Внешний вид поста и пульта управления постами показан на рисунке 19.



Рисунок 19 – Пост предварительной откачки на канале нейтронного источника «РАДЭКС» и пульт дистанционного управления постами

Продолжались работы и по модернизации системы АРЧТ. Разработаны и изготовлены ячейки управления на основе настраиваемых цифровых микропроцессорных измерителей-регуляторов типа ТРМ-12, ТРМ 202 и ТРМ 212. Ячейки установлены в шкафах МГ2.Т4 на шести системах АРЧТ четвертого сектора, обеспечена стабилизация собственных частот ускоряющих резонаторов по температуре и по фазе отраженной волны до энергии 364 МэВ.

В 2025 году продолжались работы и по модернизации терморегулирующих установок (ТРУ) системы АРЧТ. Работы выполнены на ТРУ №4-4, 4-5 и 4-6. Энергия пучка на выходе ускоряющего резонатора, охлаждаемого установкой №4-6 равна 364 МэВ. В результате модернизации значительно упрощена компоновка ТРУ, что облегчает их техническое обслуживание, ремонт и настройку режимов теплообмена. На рисунке 20 приведены фотографии одной из установок до и после модернизации.

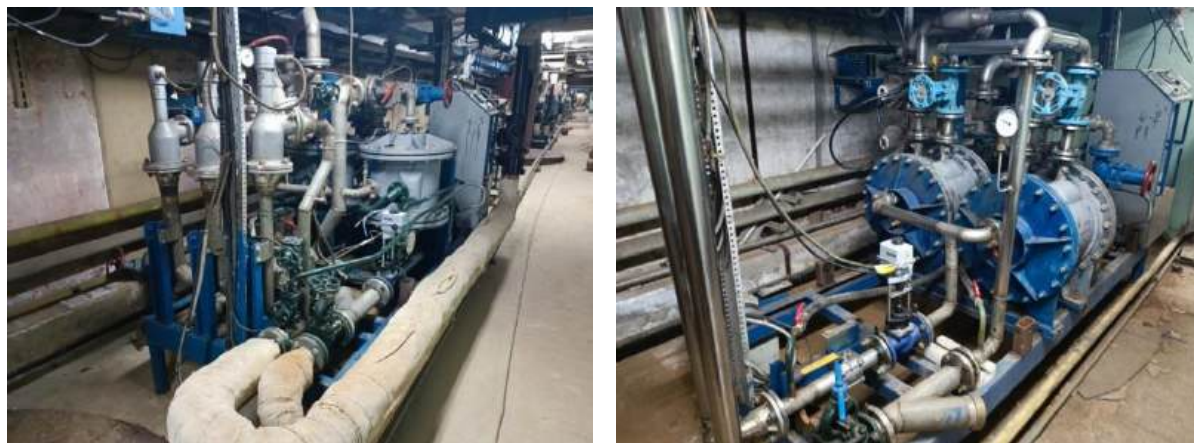


Рисунок 20 – Вид терморегулирующей установки до (слева) и после (справа) модернизации

3. Разработка и создание ускорителей и их элементов

В 2025 году выполнялись работы по разработке и созданию новых ускорителей и их элементов, в том числе и в сотрудничестве с другими ускорительными центрами.

Продолжены исследования в рамках разработки предложения компактного линейного ускорителя на энергию 230 МэВ для протонной терапии [1]. Практически реализуемым решением для фокусирующих элементов являются квадрупольные линзы на основе постоянных магнитов (Permanent Magnet Quadrupole – PMQ). Проведено исследование [2] характеристик различных вариантов PMQ в широком диапазоне изменения размеров элементов. Введение полюсов из изотропного ферромагнетика позволяет кратно повысить величину фокусирующего градиента G при одновременной минимизации уровня высших добавок в фокусирующем поле. Детально проработана простейшая по конструкции линза с четырьмя РМ сегментами. Разработана методика объединения линз PMQ в дублеты и триплеты. Для медицинского ЛУ предложены дублеты длиной $L=58$ мм, с диаметром апертуры $2r=7$ мм, внешним диаметром $2R=49$ мм с градиентом линз $G=450$ Т/м и интегральным градиентом $G_i=11$ Т (рисунок 21 а). Предлагаемые фокусирующие элементы применимы и в начальных частях ЛУ ионов с параметрами $L=87$ мм, $2r=20$ мм, $2R=80$ мм, $G=93$ Т/м и $G_i=3$ Т, [3] (рисунок 21 б).

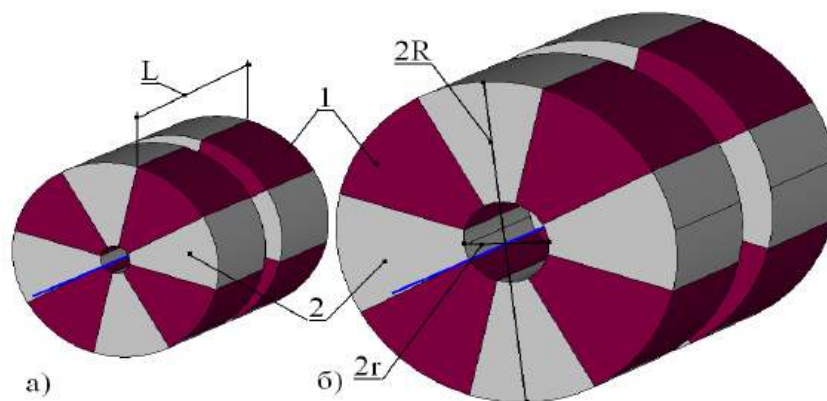


Рисунок 21 – Дублеты гибридных линз PMQ для применения в медицинском ЛУ (а) и ЛУ интенсивных пучков ионов (б). 1- постоянно намагниченные сегменты, 2 – сегменты из ферромагнетика

Продолжены исследования эффективных ускоряющих структур. реализована методика объединения коротких секций структуры SDTL (Separated Drift Tube Linac) с размещенными между ними фокусирующими элементами в единый резонатор [4]. Разработана методика выбора параметров фокусирующих элементов [5]. На рабочей частоте ~ 325 МГц с различными ячейками связи может быть реализовано как противофазное, так и синфазное распределение ускоряющего поля (рисунок 22). Применение резонаторов в начальных частях ЛУ ионов дает технико-экономические

преимущества при сооружении, настройке и эксплуатации, упрощает системы ВЧ питания, диагностики и автоматического управления ЛУ [6].

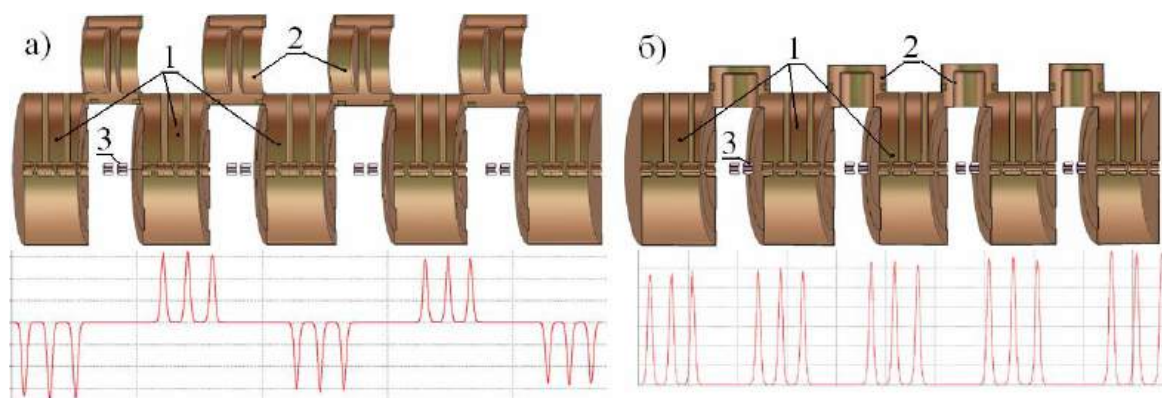


Рисунок 22 – Резонаторы SDTL с противофазным (а) и синфазным (б) распределениями ускоряющего поля (1-секции SDTL, 2- ячейки связи, 3- фокусирующие элементы)

На основе проведенных исследований, изложенных в работах [3], [6] и [7] сформулировано предложение одного из возможных сценариев модернизации начальной части линейного ускорителя ионов водорода ИЯИ РАН (рисунок 23). Начальная часть ускорителя является наиболее проблемным участком. В случае масштабной модернизации ускорителя целесообразна замена всей начальной части. Предлагается увеличить частоту ускоряющего поля, уменьшив кратность частот в начальной и основной частях с пяти в настоящее время до трех. Также предлагается увеличить энергию на выходе начальной части до 113 МэВ и исключить первый резонатор основной части, являющийся в настоящее время наиболее проблемным среди резонаторов основной части.

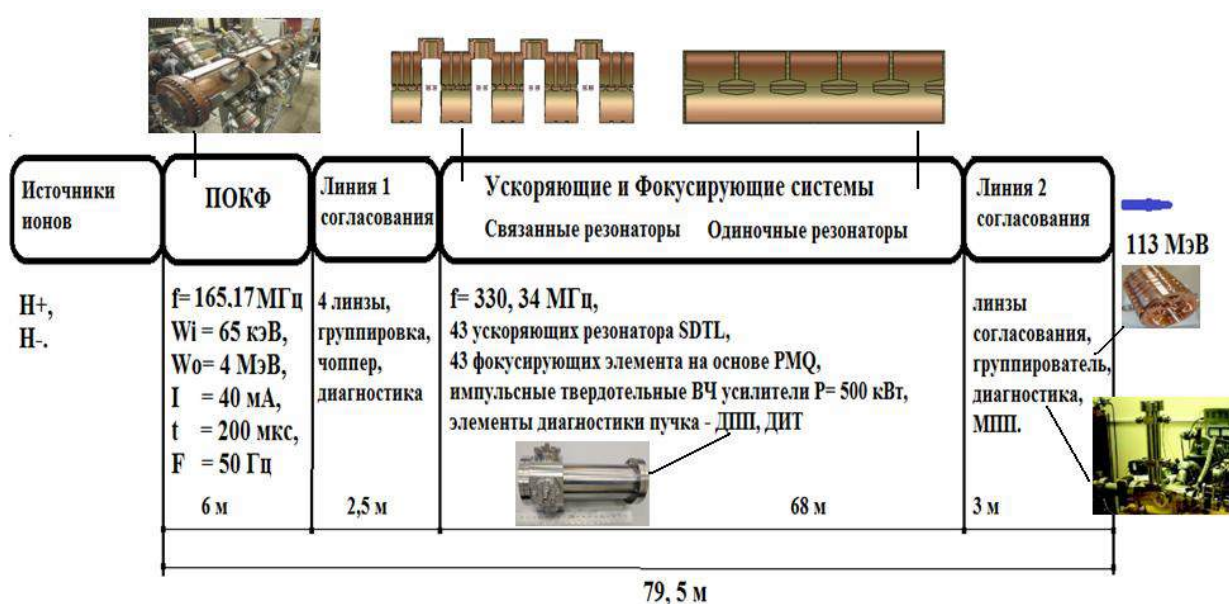


Рисунок 23 – Один из возможных сценариев модернизации начальной части ЛУ ИЯИ РАН

В сотрудничестве с МИФИ начаты работы по разработке и изготовлению опытных образцов устройств системы диагностики параметров электронного пучка специального линейного ускорителя электронов для лазера на свободных электронах, включая разработку эскизного проекта СВЧ-дефлектора для комплекса времяразрешающей диагностики параметров электронных сгустков, в рамках проекта по созданию принципиально нового перспективного источника синхротронного излучения, превосходящего по техническим характеристикам действующие и проектируемые международные источники (проект «СИЛА»). Начаты исследования электродинамических характеристик отклоняющих структур для диагностики продольного распределения частиц в коротких сгустках электронов для лазеров на свободных электронах. Рассмотрено несколько структур и проведено исследование их характеристик в широких пределах изменения размеров элементов. Результаты предварительных расчетов указывают на возможность создания структур в разы превосходящих по ВЧ эффективности известные аналоги.

В течение 2025 года был выполнен комплекс работ по разработке и созданию систем диагностики для существующих и проектируемых в России линейных ускорителей протонов и легких ионов:

- в рамках реализации мероприятий Национального центра физики и математики были проведены испытания датчиков тока, положения, фазы, профиля и поперечного сечения пучка на пучке ускорителе протонов и отрицательных ионов водорода ИЯИ РАН (рисунки 24 и 25);

- изготовлена третья очередь устройств системы диагностики линейного ускорителя протонов и легких ионов в составе исследовательского ускорительного комплекса РФЯЦ-ВНИИЭФ: ионизационные мониторы и фазовый анализатор сгустков пучка (рисунок 26).

Основные результаты указанных работ представлены в работах [8-10]. Также оформлен один секрет производства (ноу-хау): «Блок управления предварительным усилителем индукционного датчика тока пучка заряженных частиц» для регулирования параметров предварительного усилителя. Авторы – сотрудники ОУК ИЯИ РАН: В. А. Гайдаш, С. А. Гаврилов.

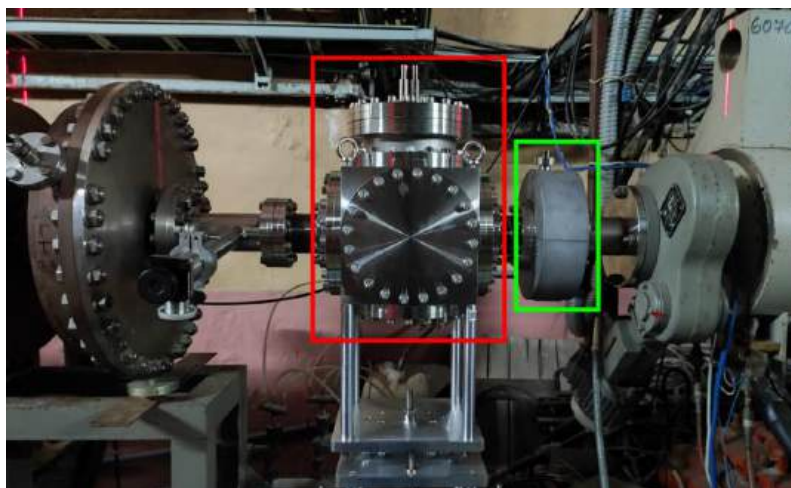


Рисунок 24 – Ионизационный монитор (в красной рамке) и индукционный датчик тока (в зеленой рамке), установленные для испытаний на пучках ускорителя ИЯИ РАН

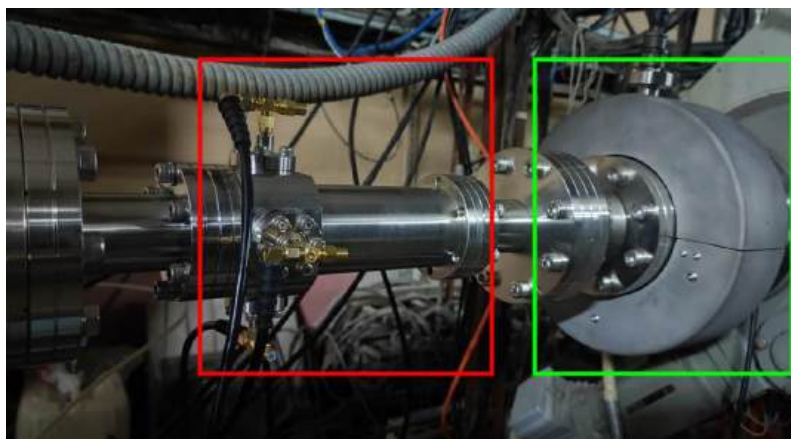


Рисунок 25 – Датчик положения и фазы пучка (в красной рамке) и индукционный датчик тока (в зеленой рамке), установленные для испытаний на пучках ускорителя ИЯИ РАН



Рисунок 26 – Фазовый анализатор сгустков (слева) и два ионизационных монитора (справа) на испытательном лабораторном стенде

Продолжено изучение спин-орбитального движения поляризованных пучков протонов и дейтронов и развитие методов управления поляризацией, а также исследование возможности измерения электрического дипольного момента легких ядер на комплексе NICA [11-17]. В частности, в 2025 году:

- проведены исследования спин-орбитальной динамики поляризованного пучка в электростатическом и магнитостатическом полях, на основе которых сделаны выводы по декогеренции спина в этих полях;
- исследован метод компенсации влияния несовершенств структуры на спиновую динамику;
- разработан метод экранирования и определения частоты прецессии для одного из сгустков в накопительном кольце. Определение частоты спин-прецессии для одного из сгустков необходимо для точного соблюдения условия ВЧ-спинового резонанса при управлении поляризацией сигнального сгустка, что необходимо для проведения прецизионных экспериментов с поляризованными пучками, такими как поиск ЭДМ;
- продемонстрирована возможность синхронизации фазы спинового движения и фазы ВЧ поля спинового ротатора с помощью системы обратной связи. Что было продемонстрировано в эксперименте по прямому измерению ЭДМ дейтрона на ускорителе COSY и будет реализовано в рамках поляризованной программы комплексов NICA и EIC.

Продолжено сотрудничество с ОИЯИ по источнику поляризованных ионов для ускорительного комплекса Нуклотрон – NICA. Сотрудничество ведется в рамках гранта РФФИ № 25-72-30005, <https://rscf.ru/project/25-72-30005/>, а также рамках договора по модернизации источника поляризованных ионов ЛФВЭ ОИЯИ. Для выполнения этих работ в ИЯИ РАН была восстановлена работа стенда источника поляризованных протонов в режиме продольной инжекции пучка поляризованных атомов в накопительную ячейку, установленную в перезарядном плазменном ионизаторе. Фотография стенда приведена на рисунке 27.



Рисунок 27 – Фотография стенда источника поляризованных протонов ИЯИ РАН

В соответствии с заключенным в 2022 г. Меморандумом о сотрудничестве между Институтом современной физики, Китай, Китайская Академия Наук и ИЯИ РАН в области развития ускорителей, ионных источников и источников поляризованных ионов продолжались консультации по проблемам, связанным с разработкой источника поляризованных ионов для Института современной физики. В Институте современной физики разрабатывается источник поляризованных протонов и дейтронов с использованием перезарядки поляризованных атомов на ионах изотопа по отношению к поляризованным атомам в плазменном перезарядном ионизаторе. Источник такого типа был разработан в ИЯИ РАН [18, 19], и теперь создается в Китае. В 2025 году источник находится на этапе наладки и измерения параметров полученного пучка поляризованных ионов.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

План работ на 2025 год выполнен. Получены значимые научные результаты.

1. Задача «Обеспечение работы сильноточного линейного ускорителя ионов водорода ИЯИ РАН»

В 2025 году проведено 5 сеансов общей продолжительностью 1317 часов, направленных на выполнение государственного задания, программ РАН, планов и научной программы Института, соглашений со сторонними организациями. В четырех сеансах работы велись на изотопный комплекс с энергией пучка 160 МэВ, нейтронный источник РАДЭКС с энергией 267 МэВ, комплекс протонной терапии с энергией 160 МэВ и нейтронный источник ИН-06 с энергией до 364 МэВ, которая была достигнута в 2025 году после проведения комплекса работ по восстановлению работоспособности и модернизации систем и оборудования ускорителя. Один сеанс был посвящен комплексной наладке оборудования и систем ускорителя, исследованиям режимов работы и настройке ускорителя без потребителей пучка. Интенсивность пучка в зависимости от потребителя варьировалась в пределах от 100 нА до 80 мкА, частота следования импульсов от одиночных импульсов до 50 Гц, длительность импульсов от 0,3 мкс до 170 мкс, импульсный ток – до 8 мА.

Во время сеансов проводился непрерывный контроль выбросов радиоактивных веществ в атмосферный воздух. В 2025 году было получено разрешение Ростехнадзора на выбросы № P091-00109-77/01729671 от 17.01.2025г. сроком на 7 лет.

Обеспечение работы ускорителя стало возможным благодаря постоянно проводимым работам по техническому обслуживанию и модернизации оборудования основных технологических систем ускорителя.

2. Задача «Модернизация систем сильноточного линейного ускорителя ионов водорода ИЯИ РАН»

Основной объем оборудования ускорителя был изготовлен в 80-х годах прошлого столетия. Для обеспечения работы ускорителя постоянно проводятся работы по модернизации. Описаны работы по модернизации систем ускорителя, выполненные в 2025 году. Велись работы по модернизации источников протонов и отрицательных ионов водорода. Для выполнения этих работ, а также работ по созданию новых источников начато создание двух исследовательских стендов. Среди других работ по модернизации ускорителя следует отметить модернизацию системы ВЧ питания, системы вакуумной системы, системы терморегулирования собственной частоты ускоряющих резонаторов и других систем.

Сформулировано предложение по модернизации начальной части ускорителя, реализация которого в будущем могла бы существенно улучшить параметры и поднять надежность работы ускорителя.

3. Задача «Разработка и создание ускорителей и их элементов»

Среди работ, выполненных в 2025 году, следует отметить выполненные в сотрудничестве с ОИЯИ в рамках проекта NICA работы по изучению спин-орбитального движения поляризованных пучков протонов и дейтронов и развитию методов управления поляризацией, а также исследование возможности измерения электрического дипольного момента легких ядер на комплексе NICA. Также проводились работы по источнику поляризованных ионов для ускорительного комплекса Нуклотрон – NICA. В сотрудничестве с ФГУП «РФЯЦ-ВНИИЭФ», в том числе и в рамках НЦФМ, продолжались работы по разработке устройств и систем диагностики пучка для линейных ускорителей ионов и изготовление ряда устройств. В сотрудничестве с МИФИ начаты работы по разработке и изготовлению опытных образцов устройств системы диагностики параметров электронного пучка специального линейного ускорителя электронов для лазера на свободных электронах, включая разработку эскизного проекта СВЧ-дефлектора для комплекса времяразрешающей диагностики параметров электронных сгустков, в рамках проекта по созданию принципиально нового перспективного источника синхротронного излучения, превосходящего по техническим характеристикам действующие и проектируемые международные источники (проект «СИЛА»). Продолжались исследования в рамках разработки предложения компактного линейного ускорителя на энергию 230 МэВ для протонной терапии, а также исследования и разработка эффективных ускоряющих структур для линейных ускорителей ионов, на основе которых сделано предложение по модернизации начальной части ускорителя ИЯИ РАН.

Продолжалось сотрудничество ИЯИ РАН и Институтом современной физики Китайской Академии Наук, где создается источник поляризованных ионов такого же типа, который был разработан в ИЯИ РАН.

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

1. Paramonov V.V., Durkin A.P., Kolomiets A. A Linear Accelerator for Proton Therapy // Proc. RuPAC2021, FRB04. – 2021. – P. 117. – doi:10.18429/JACoW-RuPAC2021-FRB04.
2. Л.Ю. Овчинникова, В.В. Парамонов. Анализ характеристик компактных квадрупольей на основе постоянных магнитов // Труды 11-й Международной конференции «Лазерные, плазменные исследования и технологии ЛаПлаз-2025», 2025. –стр. 256. – <https://laplas.mephi.ru/laplas2025/theses25/>.
3. Овчинникова Л.Ю., Парамонов В.В. Гибридные фокусирующие элементы на основе постоянных магнитов. // 29 Международная Российская конференция по ускорителям заряженных частиц RuPAC2025, 2025. – стр. 180. – <https://indico.inp.nsk.su/event/131/attachments/1754/2658/RuPAC25-Book-of-Abstracts.pdf>.
4. Рыбаков И.В., Парамонов В.В. Объединение секций структуры SDTL в резонансную систему // Труды 11-й Международной конференции «Лазерные, плазменные исследования и технологии ЛаПлаз-2025», 2025. – стр. 230. – <https://laplas.mephi.ru/wp-content/uploads/2025/02/Theses2025.pdf>.
5. Дуркин А.П., Парамонов В.В. Методика предварительного анализа параметров ускоряюще-фокусирующего канала линейного ускорителя ионов на низкие энергии // Труды 11-й Международной конференции «Лазерные, плазменные исследования и технологии ЛаПлаз-2025», 2025. – стр. 225. – <https://laplas.mephi.ru/wp-content/uploads/2025/02/Theses2025.pdf>.
6. Парамонов В.В., Дуркин А.П., Овчинникова Л.Ю., Рыбаков И.В. Ускоряющие резонаторы на основе секций структуры SDTL для участков низких энергий ионов водорода // 29 Международная Российская конференция по ускорителям заряженных частиц RuPAC2025, 2025. – стр. 181. – <https://indico.inp.nsk.su/event/131/attachments/1754/2658/RuPAC25-Book-of-Abstracts.pdf>.
7. Paramonov V. V., Durkin A. P., Ovchinnikova L. Yu., Rybakov I. V. Construction of the Initial Part of a Ion Linear Accelerator from Similar Short Cavities [Электронный ресурс] // arXiv:2309.11431 [physics.acc-ph]. – 2023. – <https://doi.org/10.48550/arXiv.2309.11431>.
8. Amosova V., Gavrilov S. Features of simulation, design and development of stripline beam position monitors for ion linear accelerators // Journal of instrumentation. – 2025. – P. 09005. – DOI: 10.1088/1748-0221/20/06/P06028.
9. Amosova V.E., Gavrilov S.A. Development of stripline beam position monitor for linear ion accelerators // Physics of Atomic Nuclei. – 2025. – V. 88. (Выход – 12.2025).
10. Polonik I.I., Gavrilov S.A. Development of an integrating current transformer for picosecond electron bunches // Physics of Atomic Nuclei. – 2025. – V. 88. (Выход – 12.2025).

11. Features of the Spin-orbital Dynamics of a Polarized Beam in Electrostatic and Magnetostatic Fields in the Study of the Electric Dipole Moment of light Nuclei. / Senichev Y. [et al.] // Phys. Atom. Nuclei. – 2024. – V. 87. – P. 1467–1472. Published Feb 19, 2025. <https://doi.org/10.1134/S1063778824100454>.
12. Maintaining a resonance condition of an rf spin rotator through a feedback loop in a storage ring / Hejny V. [et al.] // Physical Review Accelerators and Beams. – 2025 – Vol. 28, iss. 6 –062801. – pp. 13. – <https://doi.org/10.1103/PhysRevAccelBeams.28.062801>.
13. Proof-of-principle demonstration of a pilot bunch comagnetometer in a stored beam / Slim J. [et al.] // Physical Review Research. – 2025. – Vol. 7, iss. 2. – 023257. – pp. 11. – [10.1103/PhysRevResearch.7.023257](https://doi.org/10.1103/PhysRevResearch.7.023257).
14. Realizing the Scientific Program with Polarized Ion Beams at EIC / Atoian G. [et al.] (The EPIOS Scientific Consortium) // submitted to Physical Review C. – Oct. 2025. – <https://arxiv.org/abs/2510.10794>.
15. Compensation of the Effect of the Imperfection of the Nuclotron/JINR Lattice on the Proton Polarization near an Integer Spin Resonance (Brief Review) / Filatov Y.N. [et al.] // JETP Lett. – 2024. – Vol. 120. – P. 779–787. Published 10 January 2025. <https://doi.org/10.1134/S0021364024603695>.
16. Wien filter method for the "Quasi-frozen" spin lattice / Y. Senichev [et al.] // IPAC'25. – Proceedings, Taipei, Taiwan. – P. 1491. – <https://doi.org/10.18429/JACoW-IPAC2025-TUPS032>.
17. Quasi-frozen spin concept to search for the electric dipole moment of the proton and deuteron / A. Melnikov [et al.] // in Proc. IPAC'25, Taipei, Taiwan. – 2025. – P. 1494-1497. – <https://doi.org/10.18429/JACoW-IPAC2025-TUPS033>.
18. Pulsed high-intensity source of polarized protons / Belov A.S. [et al.] // Nuclear Instruments and Methods in Physics Research. – 1987. – Vol. A255. – P. 442-459. – DOI: 10.1016/0168-9002(87)91211-3.
19. Belov A.S. Production of Polarized Ions with Nearly Resonant Charge-Exchange Collisions in Plasma // AIP Conf. Proc. – 2008. – Vol. 980. – P. 209-220. – <https://doi.org/10.1063/1.2888089>.

ПРИЛОЖЕНИЕ А

Список публикаций исполнителей отчета за 2025 г.

А.1 Статьи в журналах из «Белого списка» на 2023 (протокол заседания Межведомственной рабочей группы по формированию и актуализации «Белого списка» научных журналов № ДС/17-пр от 15.05.2023 г.)

1. Spinor Description of Frozen and Quasi-Frozen Spin Structures for the EDM Measurement in a Frequency Domain / Melnikov A.A. [et al.] // Physics of Atomic Nuclei. – 2025. – Vol. 87. – P. 1351–1354. – <https://doi.org/10.1134/S1063778824100314>.

2. Investigation of the Quasi-frozen Spin Lattice for the EDM Search / Melnikov A.A. [et al.] // Physics of Atomic Nuclei. – 2025. – Vol. 88, No. 9. – pp. 1–4. <https://doi.org/10.48550/arXiv.2001.07062>.

3. Рассмотрение адаптированной структуры Нуклотрона для поиска электрического дипольного момента легких ядер / Сеничев Ю. В. [и др.] // Ядерная физика и инжиниринг. – 2025. – Т. 16, № 3. – С. 304–309. – DOI: 10.56304/S2079562924050440.

4. Realizing the Scientific Program with Polarized Ion Beams at EIC / Atoian G. [et al.] (The EPIOS Scientific Consortium), submitted to Physical Review C. – 2025. – <https://arxiv.org/abs/2510.10794>.

5. Amosova V., Gavrilov S. Features of simulation, design and development of stripline beam position monitors for ion linear accelerators // Journal of instrumentation. – 2025. – Vol. 15. – P09005. – DOI: 10.1088/1748-0221/20/06/P06028.

6. Парамонов В.В., Белов А.С., Резонаторы для блока высокочастотных переходов в поляризованных атомах водорода и дейтерия // Приборы и техника эксперимента. – №. 8. – С. 120-124.

7. Rybakov I.V., Paramonov V.V. Resonant Systems Based on SDTL Structure Sections./I.V. // Physics of Atomic Nuclei. – Vol. 88, No. 9. – pp. 1–5, 2025.

А.2 Статьи в журналах и сборниках, материалы конференций, главы в книгах, индексируемые РИНЦ.

1. Белов А.С., Зеленский А.Н., Ившин К.А [и др.] Предложение по источнику поляризованных ионов ОИЯИ с накопительной ячейкой в перезарядном плазменном ионизаторе // Тезисы доклада на XXIX Международной конференции «Российская конференция по ускорителям заряженных частиц RuPAC'2025», Санкт-Петербург, РФ. - 2025. – стр. 217-218. - <https://indico.inp.nsk.su/event/131/attachments/1754/2658/RuPAC25-Book-of-Abstracts.pdf>, - <https://indico.inp.nsk.su/event/131/attachments/1754/2635/Programme-printed-August-29.pdf>

2. Овчинникова Л.Ю., Парамонов В.В. Анализ характеристик компактных квадрупольных на основе постоянных магнитов // Труды 11-й Международной конференции «Лазерные, плазменные исследования и технологии ЛаПлаз-2025», 2025, стр. 256. – <https://laplas.mephi.ru/wp-content/uploads/2025/02/Theses2025.pdf>.

3. Рыбаков И.В., Парамонов В.В. Объединение секций структуры SDTL в резонансную систему // Труды 11-й Международной конференции «Лазерные, плазменные исследования и технологии ЛаПлаз-2025», стр. 230, 2025, <https://laplas.mephi.ru/wp-content/uploads/2025/02/Theses2025.pdf>.

А.3 Патенты на изобретения и полезные модели, свидетельства о регистрации программ, баз данных, иные РИД, имеющие официальную регистрацию.

1. Гайдаш В. А., Гаврилов С. А. Секрет производства (РИД): «Блок управления предварительным усилителем индукционного датчика тока пучка заряженных частиц» для регулирования параметров предварительного усилителя. Авторы РИД – сотрудники ОУК ИЯИ РАН: Правообладатели по условиям договора: ГК «Росатом» и ФГУП РФЯЦ-ВНИИЭФ.

А.4 Иные публикации по теме.

1. Highly superperiodic structure of the Nuclotron with quasi-frozen spin for studying the electric dipole moment of light nuclei / Senichev Yu.V. [et al.] // is taken to be published Physics of Particles and Nuclei Letters.

2. Amosova V.E., Gavrilov S.A. Development of stripline beam position monitor for linear ion accelerators // Physics of Atomic Nuclei. – 2025. – V. 88. (Выход – 12.2025).

3. Polonik I.I., Gavrilov S.A. Development of an integrating current transformer for picosecond electron bunches // Physics of Atomic Nuclei. – 2025. – V. 88.

ПРИЛОЖЕНИЕ Б

Результаты измерений и расчетов выбросов радиоактивных газов и аэрозолей



УТВЕРЖДАЮ

Заместитель директора по научной работе

Фещенко А.В.

«15» _____ 2025 г.

ИЯИ РАН

Сектор радиационного мониторинга окружающей среды

108840, Москва, г. Троицк, ул. Физическая, д.27.

РЕЗУЛЬТАТЫ

измерений и расчетов выбросов радиоактивных газов и аэрозолей из выбросной трубы
линейного ускорителя ИЯИ РАН

№ 01/36 от 15 мая 2025 г.

Цель измерений: получение показателей, характеризующих выбросы радиоактивных веществ в атмосферный воздух

Вид измерений: дозиметрия (измерение мощности дозы гамма-излучения)

Дата и время проведения измерений: 07.04.25-23.04.25

Условия проведения измерений: во время работы линейного ускорителя (ЛУ)

Дополнительные сведения: работа на РАДЭКС, параметры 267 МэВ, 137 мкс, 5,5 мА

Средства измерения

Тип прибора	Заводской номер	№ свидетельства о госповерке	Срок действия свидетельства	Кем выдано свидетельство
Комплекс УИМ-Д:				
- пульт УИМ-№Д	462	С-ТТ/29-11-2024/391538457	28.11.2026	ФБУ «Ростест-Москва»
- ДБГ-С11Д (исп.01)	3015	С-ТТ/29-11-2024/391541279	28.05.2027	

Методика измерения и расчетов: Методика выполнения измерений выбросов радиоактивных газов и аэрозолей из системы сплентивации ускорителя ИЯИ РАН, согласованная Центром метрологии ионизирующих излучений ГМНЦ ВНИИФТРИ Ростехрегулирования, 2005.

Суммарные выбросы радиоактивных нуклидов (Q , Бк) оцениваются из мощности дозы, зарегистрированной дозиметром гамма-излучения ДБГ-С11Д ($P_{\text{бдмг}}$) внутри трубы, скорости прокачки воздуха в трубе V_i и времени работы комплекса согласно формуле

$$Q = K_{\text{трубы}} \cdot K_s \cdot \sum_{i=1}^{N_c} V_i \cdot T_i \cdot (P_{\text{бдмг}} - P_{\text{фона}}),$$

где V_i – скорость воздуха в выбросной трубе (м/с);

$K_s = \pi \cdot r^2 = 3.14 \cdot 2.25 = 7.065 \text{ м}^2$;

$T_i = 60 \text{ сек}$ – цикл опроса компьютером;

$K_{\text{трубы}} = 1.77 \cdot 10^5 \text{ Бк} \cdot \text{час} / \text{м}^3 \cdot \text{мкЗв}$ – расчетный коэффициент перевода мощности дозы $P_{\text{бдмг}}$ в удельные выбросы;

$P_{\text{фона}}$ – фоновая мощность дозы, регистрируемая ДБГ-С11Д при неработающем ускорителе;

N_c – число запусков системы АСРКВ.

Значения коэффициентов рассчитаны с учетом проектной скорости прокачки $60 \text{ м}^3/\text{сек}$.

Дата	Суммарный выброс Q , Бк	Примечания
07.04.25-23.04.25	$3,15 \times 10^{10}$	Измерения проводились круглосуточно, непрерывно

$P_{\text{бдмг}}$ – мощность дозы регистрируемая ДБГ-С11Д;

$P_{\text{фона}}$ – мощность фоновой дозы в выбросной трубе $0,15 \text{ мкЗв/час}$.

Зав. Сектором РМ, ответственный исполнитель

Старший инженер, исполнитель

Т.П. Пивоварова

Г.С. Лебедева



УТВЕРЖДАЮ

Заместитель директора по научной работе

Фещенко А.В.

«28» ноября 2025 г.

ИЯИ РАН

Сектор радиационного мониторинга окружающей среды

108840, Москва, г. Троицк, ул. Физическая, д. 27.

РЕЗУЛЬТАТЫ

измерений и расчетов выбросов радиоактивных газов и аэрозолей из выбросной трубы
линейного ускорителя ИЯИ РАН

№ 03/36 от 28 ноября 2025 г.

Цель измерений: получение показателей, характеризующих выбросы радиоактивных веществ в атмосферный воздух

Вид измерений: дозиметрия (измерение мощности дозы гамма-излучения)

Дата и время проведения измерений: 06.10.25-16.10.25

Условия проведения измерений: во время работы линейного ускорителя (ЛУ)

Дополнительные сведения: работа на изотопном комплексе:

облучение Al мишени параметры 159 МэВ, 65-71 мкА, 50 Гц (интеграл - 9303,9 мкА*час);

облучение экспериментальной Th мишени 159 МэВ, 2,4 мкА, 5 Гц (интеграл - 10,5 мкА*час)

Средства измерения

Тип прибора	Заводской номер	№ свидетельства о госповерке	Срок действия свидетельства	Кем выдано свидетельство
Комплекс УИМ-Д:	462	С-ТТ/29-11-2024/391538457	28.11.2026	ФБУ «Ростест-Москва»
- пульт УИМ-№Д	462			
- ДБГ-С11Д (исп.01)	3015	С-ТТ/29-11-2024/391541279	28.05.2027	

Методика измерения и расчетов: Методика выполнения измерений выбросов радиоактивных газов и аэрозолей из системы спецвентиляции ускорителя ИЯИ РАН, согласованная Центром метрологии ионизирующих излучений ГМНЦ ВНИИФТРИ Ростехрегулирования, 2005.

Суммарные выбросы радиоактивных нуклидов (Q, Бк) оцениваются из мощности дозы, зарегистрированной дозиметром гамма-излучения ДБГ-С11Д ($P_{бдмг}$) внутри трубы, скорости прокачки воздуха в трубе V_i и времени работы комплекса согласно формуле

$$Q = K_{\text{трубы}} * K_s \sum_{i=1}^{N_c} V_i * T_i * (P_{бдмг} - P_{\text{фона}}),$$

где V_i – скорость воздуха в выбросной трубе (м/с);

$K_s = \pi * r^2 = 3.14 * 2.25^2 = 7.065 \text{ м}^2$;

$T_i = 60 \text{ сек}$ – цикл опроса компьютером;

$K_{\text{трубы}} = 1,77 * 10^5 \text{ Бк} * \text{час} / \text{м}^3 * \text{мкЗв}$ – расчетный коэффициент перевода мощности дозы $P_{бдмг}$ в удельные выбросы;

$P_{\text{фона}}$ – фоновая мощность дозы, регистрируемая ДБГ-С11Д при неработающем ускорителе;

N_c – число запусков системы АСРКВ.

Значения коэффициентов рассчитаны с учетом проектной скорости прокачки $60 \text{ м}^3/\text{сек}$.

Дата	$(P_{бдмг} - P_{\text{фона}}) * 60 \text{ с, мкЗв/часхс}$	$V_i, \text{ м/с}$	Суммарный выброс Q, Бк	Примечания
06.10.25	8,4	60	$6,3 \times 10^8$	Измерения проводились круглосуточно, непрерывно
07.10.25	1 481,4	60	$1 111,5 \times 10^8$	Наладка
08.10.25	209 640,3	60	$157 293,7 \times 10^8$	Облучение Al мишени

Дата	$(P_{\text{доб}} - P_{\text{фона}}) \times 60$ с, мкЗв/час	V_i , м/с	Суммарный выброс Q, Бк	Примечания
09.10.25	759 933,0	60	$570\,180,0 \times 10^8$	- " -
10.10.25	1 097 596	60	$823\,529,6 \times 10^8$	- " -
11.10.25	1 000 451	60	$750\,641,4 \times 10^8$	- " -
12.10.25	1 304 204	60	$978\,548,2 \times 10^8$	- " -
13.10.25	1 112 102,9	60	$834\,414,1 \times 10^8$	- " -
14.10.25	1 086 741,6	60	$815\,385,5 \times 10^8$	- " -
15.10.25	837 965,2	60	$628\,727,80 \times 10^8$	- " -
16.10.25	5154, 8	60	$386\,766,20 \times 10^8$	Облучение <u>Th мишени</u>
Итого			$5\,563\,706 \times 10^8 =$ $= 5,56 \times 10^{14}$	

$P_{\text{доб}}$ - мощность дозы регистрируемая ДБГ-С11Д;

$P_{\text{фона}}$ - мощность фоновой дозы в выбросной трубе 0,15 мкЗв/час

Зав. Сектором РМ, ответственный исполнитель



Т.П. Пивоварова

Старший инженер, исполнитель



Г.С. Лебедева