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. № 121121900031-7
Рег. №

УТВЕРЖДАЮ
Директор ИЯИ РАН,
профессор РАН

_____М.В. Либанов

«28» января 2022 г.

ОТЧЕТ
О НАУЧНО-ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКОЙ РАБОТЕ

121121900031-7

ФИЗИКА И ТЕХНИКА УСКОРИТЕЛЕЙ; ФИЗИКА ПУЧКОВ ЗАРЯЖЕННЫХ ЧАСТИЦ

(заключительный за 2021 год)

ФЦП

Руководитель НИР,
Заместитель директора ИЯИ РАН,
д.ф-м.н.

_____ А.В. Фещенко
«28» января 2022 г.

Москва 2022 г.

СПИСОК ИСПОЛНИТЕЛЕЙ

Руководитель НИР, зам. директора по научной работе, д.ф.-м.н.	28.01.2022 подпись, дата	А.В. Фещенко (введение, заключение, разделы 1,2,3)
Отв. исполнители: главный инженер Отдела ускорительного комплекса	28.01.2022 подпись, дата	В.Л. Серов (введение, заключение, разделы 1,2,3)
заведующий лабораторией, к.ф.-м.н	28.01.2022 подпись, дата	А.С. Белов (разделы 1,2,3)
заведующий лабораторией, к.ф.-м.н	28.01.2022 подпись, дата	С.А. Гаврилов (разделы 1,2,3)
заведующий сектором	28.01.2022 подпись, дата	В.Е. Лоскутов (разделы 1,2,3)
заведующий сектором, к.т.н.	28.01.2022 подпись, дата	Ю.Ж. Калинин (разделы 1,2,3)
заведующий сектором, к.т.н.	28.01.2022 подпись, дата	А.И. Кваша (разделы 1,2,3)
заведующий сектором	28.01.2022 подпись, дата	В.Н. Леонтьев (разделы 1,2)
начальник установок	28.01.2022 подпись, дата	А.Н. Набока (разделы 1,2,3)
в.н.с., д.ф.-м.н.	28.01.2022 подпись, дата	В.В. Парамонов (разделы 2,3)
в.н.с., д.ф.-м.н.	28.01.2022 подпись, дата	Ю.В. Сеничев (раздел 3)

РЕФЕРАТ

Отчёт содержит: 42 с., 27 рис.

Ключевые слова: СИЛЬНОТОЧНЫЕ УСКОРИТЕЛИ, ИСТОЧНИКИ ЧАСТИЦ, ИНЖЕКТОРЫ ПРОТОНОВ, АВТОМАТИЗАЦИЯ УСКОРИТЕЛЯ, ДИАГНОСТИКА ПУЧКОВ, КАНАЛЫ ТРАНСПОРТИРОВКИ ПУЧКОВ, ВЧ ПИТАНИЕ.

В отчёте представлены результаты фундаментальных и прикладных работ, выполненных в 2021 году по государственному заданию в соответствии с планом научно-исследовательской работы ИЯИ РАН на 2019-2021 годы, раздел 4, направление «Физика и техника ускорителей; физика пучков заряженных частиц» (№0031-2019-0006).

Основные усилия были направлены на решение перечисленных ниже задач.

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

Объектом исследования является сильноточный линейный ускоритель ионов водорода ИЯИ РАН.

Цель работы — обеспечение работы ускорителя в сеансах на установки экспериментального комплекса РАДЭКС, ИН-06 и КПТ, а также на экспериментальный стенд для исследования воздействия пучка на узлы радиоэлектронной аппаратуры.

В 2020 году проведено 4 сеанса продолжительностью 948 часов, направленных на выполнение государственного задания, программ РАН, планов и научной программы Института, соглашений со сторонними организациями.

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

Объектом исследования являются основные системы сильноточного линейного ускорителя ионов водорода ИЯИ РАН: система инжекции, вакуумная система, системы высокочастотного питания, система диагностики, система контроля и управления, система питания электромагнитного оборудования, система измерения потерь пучка и другие системы.

Цель работы — улучшение параметров ускоренного пучка, повышение надежности работы ускорителя, учитывая возраст оборудования, преодоление неизбежных проблем, обусловленных его старением, выходом из строя и необходимостью замены.

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

Объектом исследования являются ускорители заряженных частиц, а также их элементы, такие как, например, источники ионов, ускоряющие структуры, устройства

диагностики и другие устройства.

Цель работы — разработка и создание ускорителей, а также их элементов не только для линейного ускорителя ИЯИ РАН, но и для других установок в России и за рубежом.

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 России и всего мира.

СОДЕРЖАНИЕ

СПИСОК ИСПОЛНИТЕЛЕЙ 2
РЕФЕРАТ 3
СОДЕРЖАНИЕ 5
ВВЕДЕНИЕ 6
1. Обеспечение работы сильноточного линейного ускорителя ИЯИ РАН 8
2. Модернизация систем сильноточного линейного ускорителя ионов водорода ИЯИ РАН 15
3. Разработка и создание ускорителей и их элементов 30
ЗАКЛЮЧЕНИЕ 37
ПУБЛИКАЦИИ 39

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 ускорителем данного класса и самым крупным линейным ускорителем ионов водорода в Евроазиатском регионе. Ускоритель является основой центра коллективного пользования Ускорительный центр нейтронных исследований структуры вещества и ядерной медицины ИЯИ РАН. Регулярная работа ускорителя на фундаментальные и прикладные задачи началось в 1993 году и с тех пор проведено 144 сеанса общей продолжительностью 51444 часа, в том числе 4 сеанса общей продолжительностью 948 часов в 2021 году, направленных на выполнение государственного задания, программ РАН, планов и научной программы Института, соглашений со сторонними организациями. Работы велись на нейтронные источники РАДЭКС и ИН-06, комплекс протонной терапии, а также на экспериментальный стенд для исследования воздействия протонного пучка на узлы радиоэлектронной аппаратуры с энергией от 75 МэВ до 267 МэВ. Обеспечение работы ускорителя стало возможным благодаря постоянно проводимому техническому обслуживанию и модернизации оборудования ускорителя и каналов экспериментального комплекса.

В 2021 году получено санитарно-эпидемиологическое заключение №77.01.16.000.М.005779.11.21 от 22 ноября 2021 года на эксплуатацию и хранение оборудования ускорителя и экспериментального комплекса.

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

Необходимость постоянного усовершенствования и модернизации систем ускорителя и экспериментального комплекса обусловлена рядом причин. Во-первых, изменением требований к параметрам пучка, во-вторых, необходимостью устранения отдельных, в ряде случаев существенных недостатков, которые обнаруживаются в процессе эксплуатации, и, в третьих, необходимостью перехода на новую элементную базу, новые приборы и комплектующие взамен снятых с производства. В ряде случаев модернизация требует проведения всесторонних исследований. В 2021 году проводились работы по модернизации большинства систем ускорителя, среди которых следует отметить систему инжекции, вакуумную систему, систему питания электромагнитного

оборудования, системы высокочастотного питания, систему диагностики пучка, систему контроля и управления, систему измерения потерь пучка и другие системы.

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 России и всего мира. В частности, в 2021 году проводились работы по разработке устройств диагностики для ВНИИЭФ и ИТЭФ (НИЦ КИ), а также лабораторий GSI (Германия) и MYRRHA (Бельгия), компактного линейного ускорителя для протонной терапии, линейного ускорителя лёгких ионов для промышленного производства изотопов медицинского назначения, по модернизации и техническому сопровождению источника поляризованных ионов ОИЯИ, разработке эскизного проекта ионного источника для ускорителя отрицательных ионов водорода, по генерации атомов антиводорода методом перезарядки высоковозбужденных атомов позитрония и антипротонов для эксперимента AEGIS в ЦЕРН. Проводились работы по разработке нормально проводящих резонаторов, работающих с большими импульсными и средними мощностями, для программы модернизации комплекса European XFEL (ДЕЗИ, Германия). Для сооружаемого комплекса NICA (ОИЯИ) проводились исследования по сохранению поляризации дейтронного пучка в коллайдере в «spin-transparent» режиме с целью подготовки эксперимента по управлению спином, а также по прохождению и поднятию критической энергии для дейтронов и протонов.

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 ускорителем данного класса и самым крупным линейным ускорителем ионов водорода в Евроазиатском регионе. Со времени начала регулярной работы ускорителя на физические и прикладные задачи в 1993 году и по декабрь 2021 года проведено 144 сеанса, общей продолжительностью 51444 часа, в том числе 4 сеанса продолжительностью 948 часов в 2021 году, направленных на выполнение государственного задания, программ РАН, планов и научной программы Института, соглашений со сторонними организациями. Работы проводились на установки экспериментального комплекса РАДЭКС, ИН-06 и КПТ, а также экспериментальный стенд для исследования воздействия пучка на узлы радиоэлектронной аппаратуры с энергиями частиц от 75 МэВ до 267 МэВ. В зависимости от задачи интенсивность пучка изменялась в пределах от 10^6 частиц в импульсе при работе на экспериментальный стенд до десятков микроампер среднего тока при работе на нейтронные источники, а длительность импульса – от 0,3 мкс до 150 мкс. Частота повторения импульсов регулировалась от единичных импульсов до 50 Гц.

В 2021 году получено санитарно-эпидемиологическое заключение №77.01.16.000.М.005779.11.21 от 22 ноября 2021 года на эксплуатацию и хранение оборудования ускорителя и экспериментального комплекса.

При работе ускорителя на потребителей особое значение имеет устойчивость и надежность работы. В ряде случаев проблемы неустойчивой работы проявляются только в сеансах, когда включено и работает оборудование всех систем, и практически не проявляются в наладочных режимах в промежутках между сеансами. В сеансе весной 2021 года наблюдалась особо неустойчивая работа многих систем. Происходили сбои синхронизации с пропаданием рабочих и появлением ложных импульсов запуска, высоковольтные и ВЧ пробои в каналах усиления систем ВЧ питания, сбои в системе управления ускорителя, ложные срабатывания в системе быстрой аварийной защиты и пр. Указанные эффекты приводили фактически к невозможности нормальной работы. Как впоследствии выяснилось, причиной указанных эффектов являлась утечка на землю в одном из фидеров, отходящих от подстанции ПС 110/10 кВ Лебедево, от которой среди прочих объектов запитан и ускоритель. Причем указанный фидер не имеет отношения к

ускорителю, а снабжает электроэнергией соседний населенный пункт. Проблема исчезла, когда дефектный фидер вышел из строя окончательно и был выведен из работы. Очевидно, что преодоление подобных проблем находится за пределами возможностей персонала ускорителя, однако в дальнейшем необходимо принять меры для диагностики и идентификации подобного рода проблем.

При анализе причин сбоев в работе ускорителя было также обнаружено влияние помех, возникающих на фронтах импульсов мощных ламп в модуляторах каналов усиления начальной части ускорителя. Ранее в модуляторах использовались модуляторные лампы ГМИ-44А. В связи с прекращением выпуска этих ламп был осуществлен переход на генераторные лампы ГИ-71А. Проведенная модернизация позволила обеспечить относительно устойчивую работу каналов усиления. Однако было обнаружено, что при открытии ламп возникают помехи, которые приводят к нарушениям работы системы синхронизации и ложным срабатываниям импульсных устройств (инжектор, ВЧ каналы, чоппер и др.). По-видимому, причиной является значительно более высокое быстродействие генераторной лампы ГИ-71А по сравнению с модуляторной лампой ГМИ-44А. В качестве примера на рис. 1 демонстрируются помехи, возникающие на фронтах импульсов модуляторов пяти каналов усиления системы ВЧ питания начальной части ускорителя, наводимые в измерительной цепи одного из индукционных датчиков тока пучка. В канале усиления КУ2-6 используется лампа ГМИ-44А, во всех других каналах - ГИ-71А. Видно, что помехи при срабатывании лампы ГМИ-44А значительно меньше, чем при срабатывании ГИ-71А. Для наглядности моменты срабатывания модуляторов разнесены по времени.

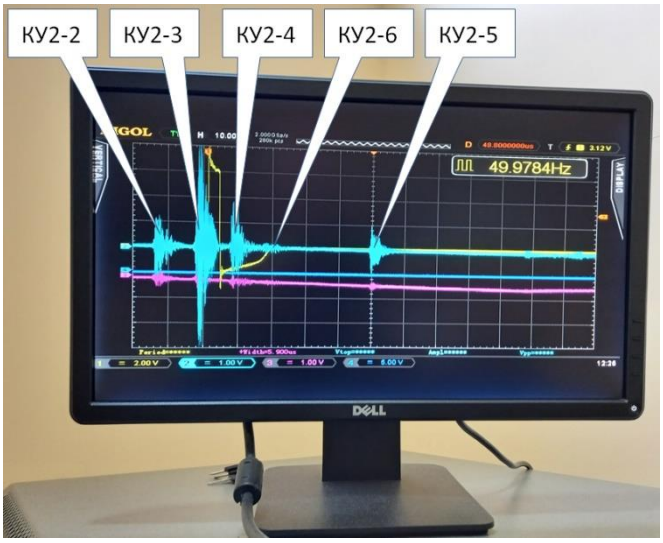

Рис. 1. Помехи (голубая линия) на фронтах импульсов модуляторов пяти каналов усиления системы ВЧ питания начальной части ускорителя.

Были предприняты меры как по повышению помехозащищенности аппаратуры, так и по уменьшению величины помех, однако для обеспечения более устойчивой работы оборудования ускорителя работы в этом направлении должны быть продолжены.

Обеспечение работы ускорителя стало возможным благодаря постоянно проводимому техническому обслуживанию и доработке оборудования всех систем ускорителя и каналов экспериментального комплекса. Наиболее сложной с точки зрения обеспечения надежной работы ускорителя является система ВЧ питания начальной части. В 2021 году выполнен ряд работ, обеспечивших работоспособность системы, среди которых можно отметить следующие:

- На рис.2 приведена фотография импульсного трансформатора (ИТ), в котором изменён способ подключения к обмоткам ИТ, находящимся под высоким импульсным напряжением. Заложенное в штатной аппаратуре решение предполагает установку изолирующего стакана между маслом и атмосферой, вследствие чего затрудняется визуальный контроль контакта с обмоткой ИТ. Кроме того, конструкция узла подключения не обеспечивает надёжные электрический контакт и электропрочность соединения. На приведенном фото показан способ подключения с помощью разработанных и изготовленных капролоновых изоляторов, лишенный вышеуказанных недостатков.
- Восстановлен эквивалент нагрузки (ЭН) модулятора на базе аналогичного ЭН, используемого на каналах усиления основной части ускорителя (рис.3). ЭН восстановлен пока только в резервном канале КУ-6, где, в случае необходимости, будут проводиться испытания новых типов модуляторных ламп.
- Выполнена настройка ВЧ каскада К4 в резервном канале КУ-6. В модуляторе этого же канала, где в настоящее время установлена последняя модуляторная лампа ГМИ-44А, восстановлена схема дополнительной ООС, охватывающей модулятор, и улучшающей динамические характеристики системы стабилизации амплитуды ВЧ поля в резонаторе. Такая доработка не требуется в случае использования лампы ГИ-71А в качестве модуляторной. Настройка канала выполнялась при работе на самый «тяжёлый» резонатор № 2.
- В порядке текущей эксплуатации проведены ремонтные работы ячеек УБС, в частности блоков МЭБ, контролирующих работу шкафов 7ТШ. В этих шкафах размещена аппаратура шкафов управления каналом (ШУК) и шкафов местного управления (ШМК). Дело в том, что ячейки УБС после 25 лет эксплуатации начали выходить из строя и пополнять их за счёт ЗИП-а уже не удаётся. До сих пор помогала избыточность аппаратуры, т.е. наличие ячеек УБС и источников питания

ВС-8, которая по тем или иным причинам не нашла своего применения на ускорителе. В частности, это относится к проекту создания полномасштабного ВЧ канала в помещении наладочной, вместо которого был установлен только модулятор RFQ. Но сейчас пришло время, когда запасы ячеек иссякают и необходимо по возможности их как-то восстанавливать.

- Изготовлены, собраны и испытаны две запасные ячейки транзисторных подмодуляторов для модуляторов МВ и М1 и один запасной блок резисторов с водяным охлаждением, устанавливаемый в сеточной цепи модуляторной лампы ГИ-71АМ и обеспечивающий смещение и управление модуляторной лампой. Наличие дополнительных запасных блоков позволяет сократить время восстановления аппаратуры, что особенно актуально в ночное время, когда одному дежурному трудно сориентироваться в причинах выхода из строя канала и самое простое – иметь возможность произвести замену подозрительных блоков.

Рис.2. Импульсный масляный трансформатор с капролоновыми ВВ изоляторами.

Рис.3. Восстановленный эквивалент нагрузки мощного анодного модулятора.

В качестве примера также приведем перечень профилактических, ремонтных и наладочных работ, выполненных в 2021 году еще на одной системе– системе ВЧ питания основной части ускорителя (18 каналов усиления).

- Комплексная проверка и настройка ВЧ каналов № 3-1…3-5, 3-7…3-11, 4-1, 4-2, 4-4…4-7 при работе на резонаторы совместно с системами АРФА и АРЧТ (17 ВЧ каналов).
- Проверка работоспособности блокировок по вакууму и АРЧТ в резонаторах ВЧ каналов №3-1…3-5, 3-7…3-11, 4-1, 4-2, 4-4…4-7.
- Проверка и при необходимости настройка ячейки быстрого отключения ВЧ поля в резонаторе по сигналу отраженной мощности от резонатора на ВЧ каналах № 3-1…3-11, 4-1…4-7 (18ВЧ каналов).
- Проверка работы схемы защиты от звукового проявления пробоя в волноводном тракте на ВЧ каналах № 3-1…3-4, 3-6,3-9 (6ВЧ каналов).
- Исследование возникновения периодического искажения сигнала ошибки по амплитуде системы АРА шкафа АРФА на ВЧ каналах № 3-10, 3-11.
- Проверка срабатывания блокировок по дверям, воде и сжатому воздуху на ВЧ каналах № 3-1…3-11, 4-1…4-7.
- Профилактика оборудования трансформаторных подстанций, протяжка контактов наконечников кабелей, доливка трансформаторного масла в трансформаторы и проверка состояния блоков демпфирующих цепей и трансформаторов ВЧ каналов

3-го сектора и ВЧ каналов № 4-1…4-7 (18 подстанций, 54 трансформатора и 18 БДЦ).

- Проверка и настройка защит по сигналам генераторов ВЧ каналов № 3-1…3-11, 4-1…4-7: «Ротр», «Запрет ВЧ», «Выпрямитель соленоида», «Накал < 50%», «Накал +/- 5%», «Выпрямитель вакиона», «Ток вакиона >100мка».
- Проверка и настройка защит модуляторов на ВЧ каналах № 3-1…3-11, 4-1…4-7 по сигналам «Перенапряжение Ф.Л.», «АПВ», «Пробой нагрузки», «Перегрузка выпрямителя».
- Профилактика, протяжка контактов в/в кабелей и смазка осей штурвалов РМБ на ВЧ каналах № 3-1…3-11, 4-1…4-7 (18 ВЧ каналов).
- Протяжка контактов наконечников низковольтных и высоковольтных кабелей на ВЧ каналах № 3-1…3-11, 4-1…4-7 (18 ВЧ каналов).
- Профилактика оборудования модуляторов и генераторов ВЧ каналов № 3-1…3-11, 4-1…4-7 с заменой неисправных элементов (18 ВЧ каналов).
- Периодическая вакуумная откачка клистронов, находящихся в ЗИП (11 шт.) (1 раз в квартал).
- Проверка сопротивления эквивалента нагрузки модуляторов на ВЧ каналах № 3-1…3-11, 4-1…4-7 (18 ВЧ каналов).
- Проверка уровня масла в блоках масляных резисторов, накальных трансформаторах, блоках масляных переключателей и расширительных баках катодных стаканов клистронов ВЧ каналов 3-его сектора и ВЧ каналов № 4-1…4-7 (18 ВЧ каналов) Доливка трансформаторного масла до необходимого уровня.
- Осмотр состояния электролитических конденсаторов в блоках питания накала и соленоида на ВЧ каналах № 3-1…3-11, 4-1…4-7 (18 ВЧ каналов).
- Проверка защиты от короткого замыкания катушек соленоидов на ВЧ каналах № 3-1…3-11, 4-1…4-7 (18 ВЧ каналов).
- Испытания нового клистрона КИУ-40М на наладочном ВЧ канале № 4-3, изготовленного предприятием АО «НПП «Торий».
- Проверка и настройка защиты по сигналу «Уровень масла» в расширительных баках катодных стаканов клистронов на ВЧ каналах № 3-1…3-11, 4-1…4-7 (18 ВЧ каналов).
- Ремонт ячейки защиты модулятора ВЧ канала № 3-10 и 2-х ячеек опорного напряжения модулятора для ЗИП.

- Проверка работоспособности наладочного ВЧ канала № 4-3 перед испытаниями нового клистрона. Демонтаж из ВЧ канала клистрона, испытанного в январе 2020 года.
- Ремонт выключателя нагрузки в РПВ-5 ВЧ каналов № 3-1 (2 раза), 3-3 и 3-6.
- Проверка исправности тиристоров плеч шкафов выпрямителя, разрядных и защитных тиристорных ключей, а также водоохлаждаемых резисторов на ВЧ каналах № 3-1…3-11, 4-1…4-7.
- Ревизия состояния волноводных фланцев барабана волноводных переключателей на ВЧ каналах № 3-1…3-5, 3-7…3-11. Ремонт и замена неисправных узлов на канале № 3-11.
- Ремонт блока масляных резисторов модулятора, вышедшего из строя на ВЧ канале № 3-3.
- Исследование причин частого отключения ячеек управления шкафов АРК на ВЧ каналах № 4-2,4-4. Устранение неисправностей.
- Проверка автоматов низкого напряжения ВЧ каналов № 4-1…4-7 (7 ВЧ каналов).
- Ремонт эквивалента нагрузки модулятора на ВЧ канале № 3-11.
- Ревизия волноводных переключателей ВЧ каналов № 4-1…4-7. Ремонт волноводных переключателей на ВЧ каналах № 4-1,4-2,4-7.
- Оперативно-техническое обслуживание электро- и ВЧ-установок системы ВЧ питания основной части ускорителя в течение всего года.
- Комплексная проверка работоспособности оборудования ВЧ каналов № 3-1…3-11 и 4-1…4—7 (18 ВЧ каналов) между сеансами, тренировка соответствующих резонаторов до номинального поля перед каждым сеансом.

2. Модернизация систем сильноточного линейного ускорителя ионов водорода ИЯИ РАН

В течение 2021 года проводились работы по модернизации оборудования инжекторов протонов и отрицательных ионов водорода. Была выполнена разработка, изготовление, наладка и внедрение в эксплуатацию блока автоматического переключения синхронизации запуска генератора высоковольтных импульсов (ГВВИ) инжектора протонов с внешней синхронизации на внутреннюю при пропадании внешней синхронизации. Этот блок позволил избежать подскока напряжения ГВВИ при пропадании внешней синхронизации, который возникал в некоторых режимах работы ГВВИ. С новым блоком при пропадании внешней синхронизации происходит переключение работы ГВВИ на внутреннюю синхронизацию и плавное снижение амплтитуды напряжения ГВВИ от 400 кВ до минимального значения. Фотография разработанного блока приведена на рис. 4.

Рис. 4. Фотография блока автоматического переключения синхронизации запуска ГВВИ инжектора протонов с внешней синхронизации на внутреннюю при пропадании внешней синхронизации.

Модифицирована схема блока ПИВИ (прибор измерения вершины импульса ГВВИ). Блок изготовлен в более компактном виде для того, чтобы в крейт управления импульсом ГВВИ установить блок автоматического переключения синхронизации. Фотография блока представлена на рис. 5.

Рис. 5. Фотография модернизированного блока прецизионного измерителя вершины высоковольтного импульса.

Выполнен перевод цепей управления силовым автотрансформатором инжектора H^- в щитовой пом. 012 на напряжение 24 В для повышения надежности и безопасности работы цепей управления. Выполнена работа по демонтажу неиспользуемых кабелей и блоков в шкафу модулятора ГВВИ инжектора H^+ в пом. 09. Выполнен ремонт и модернизация двух бочек стойки диодной стабилизации инжектора H+ с целью устранения вытекания масла через негерметичности в нижней платформе бочек. Вытекание масла уменьшено с ~200 мл/ сутки до ~10 мл/сутки. Фото модернизированной стойки диодно-емкостного ограничителя высоковольтного импульса 400 кВ показано на рис. 6.

Рис. 6. Модернизированная стойка диодно-емкостного ограничителя высоковольтного импульса 400 кВ.

Выполнено изготовление, монтаж, наладка и запуск в эксплуатацию системы подачи водорода в газовую линию инжектора протонов. Для улучшения стабильности давления водорода в газовой линии в новой системе использовано два редуктора водорода. Для повышения точности установки давления установлен новый манометр. Фотография модернизированной линии подачи водорода показано на рис. 7.

Рис. 7. Модернизированная линия подачи водорода.

Также выполнено изготовление, монтаж, наладка и запуск в эксплуатацию системы подачи водорода, измерения вакуума и состава остаточного газа в диагностическом боксе в канале транспортировки инжектора протонов. Работа выполнена для исследования зависимости степени компенсации пространственного заряда пучка ионов водорода от давления остаточного газа в канале транспортировки.

Изменена конфигурация формирующей линии модулятора генератора высоковольтных импульсов 400 кВ в инжекторе протонов для повышения надежности его работы. Фотография измененной формирующей линии показана на рис. 8.

Рис. 8. Измененная формирующая линии модулятора генератора высоковольтных импульсов 400 кВ инжектора протонов.

Разработан, изготовлен, собран и смонтирован новый фланец токовводов источника ионов H- с целью установки дополнительного токоввода термопары для измерения температуры анода в рабочем режиме источника ионов H-. Выполнен демонтаж оборудования стенда источника ионов H- в пом. 02 и осуществлена подготовка пом. 316 для установки в нем стенда источника ионов H-. Для повышения надежности работы инжектора отрицательных ионов водорода приобретен источник бесперебойного питания «Штиль» ST1106SL высокой мощности (максимальная выходная мощность, кВА/кВт : 6/5,4). ИБП введен в цепь питания источника ионов в пом. 02. Доработана схема управления, блокировок и сигнализации системы питания источника ионов с учетом ИБП. Фотография ИБП с доработанной стойкой управления подачи мощности показано на рис. 9.

Рис. 9. ИБП и доработанная стойка управления подачи мощности на высоковольтную платформу инжектора отрицательных ионов водорода.

Выполнены исследования процесса компенсации пространственного заряда протонного пучка на выходе инжектора. Для исследований был разработан и создан анализатор энергии медленных ионов, образующихся в ионном пучке в результате ионизации молекул остаточного газа быстрыми ионами пучка. Схема спектрометра показана на рис. 10.

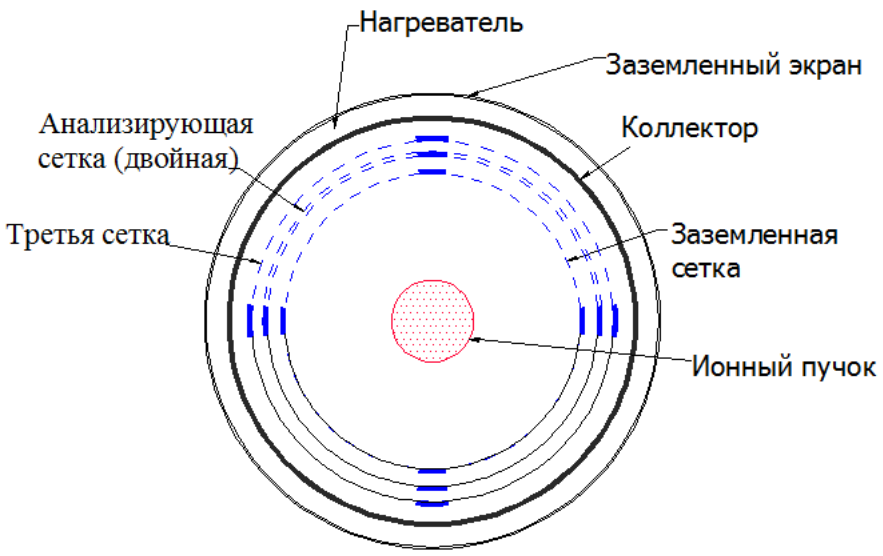

Рис. 10. Схема анализатора энергий медленных ионов.

Энергия медленных ионов измеряется методом запирающего потенциала. Положительный потенциал, прикладываемый к анализирующей (двойной) сетке, замедляет ионы, причем часть потока медленных ионов ионов не проходит через потенциальный барьер, созданный потенциалом, приложенным к анализирующей сетке. Зависимость тока на коллектор от величины потенциала на анализирующей сетке содержит информацию о спектре энергии медленных ионов. К третьей сетке анализатора прикладывается отрицательный потенциал для запирания вторичных электронов с коллектора и электронов из вторичной ион-электронной плазмы в ионном пучке. Анализатор калибровался измерением спектра медленных электронов, эмитируемых накаленным катодом. Измеренное таким методом энергетическое разрешение анализатора равно ~2эВ.

В результате исследований предложено объяснение аномального вида характеристик анализатора спектра энергий медленных ионов из пучка ионов водорода на выходе протонного инжектора. Вид характеристик объясняется нетривиальным распределением плотности тока в пучке ионов водорода. На рис. 11 представлены данные по измерению профиля ионного пучка и соответствующая характеристика анализатора энергии вторичных медленных ионов. «Хвост» на характеристике анализатора при относительно высоких анализирующих напряжениях объясняется аномальным распределением плотности тока в пучке ионов водорода с « подскоком» в центральной части ионного пучка.

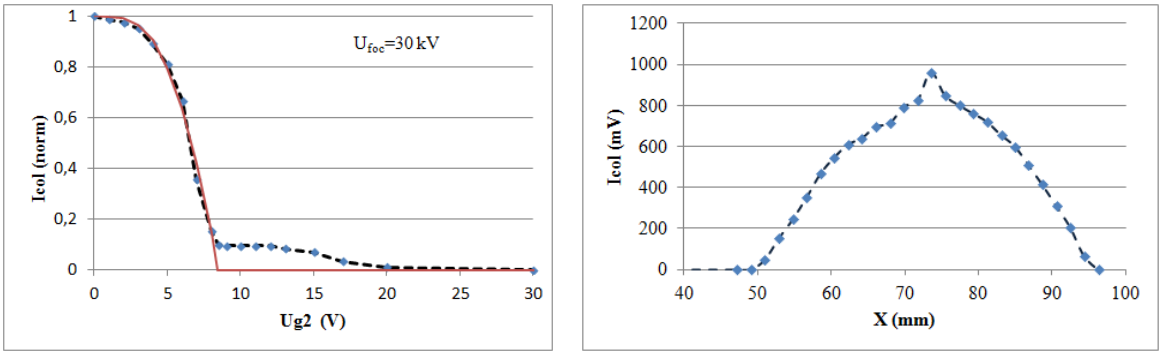

Рис. 11. Зависимость тока на коллектор анализатора энергий вторичных ионов от потенциала анализирующей сетки (слева) и распределение плотности тока в первичном ионном пучке (тока на коллектор профилометра ионного пучка) (справа).

Выполнено сравнение измеренных данных для степени компенсации протонного пучка в зависимости от плотности тока с теоретической моделью. Экспериментальные данные качественно согласуются с теоретическими, но обнаружено значительное расхождение экспериментально измеренной степени компенсации пространственного заряда ионного пучка с теоретическими предсказаниями. Сравнение экспериментальных данных с теоретическими расчетами представлено на рис. 12.

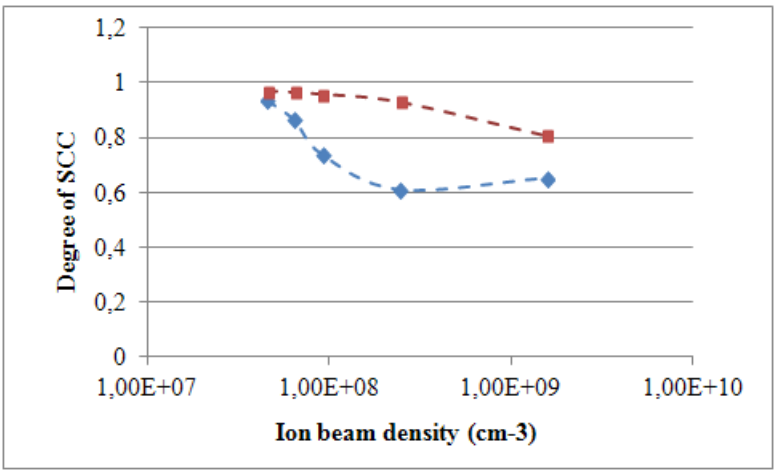

Рис. 12. Экспериментальные данные для степени компенсации пространственного заряда пучка ионов водорода (синие ромбы) и данные расчета по теоретическим формулам (оранжевее квадраты) в зависмости от плотности тока в первичном пучке ионов водорода с энергией 400 кэВ из инжектора протонов.

В течение 2021 года проводилась модернизация вакуумной системы ускорителя и экспериментального комплекса. Были демонтированы устаревшие и установлены 48 новых источников питания магниторазрядных насосов типа ВИП-32М на начальной части ускорителя, а также 9 новых вакуумметров типа АВ3532 на 5 секторе ускорителя. Указанное оборудование приобретено за счет средств гранта на реализацию мероприятий, направленных на обновление приборной базы ведущих организаций, выполняющих научные исследования и разработки. Фотографии вакуумных щитовых с установленными

новыми источниками питания ВИП-32М и вакуумметрами АВ3532 представлены на рис. 13.

Рис. 13. Виды вакуумных щитовых с новыми источниками питания магниторазрядных насосов и вакуумметрами.

Также за счет средств гранта на реализацию мероприятий, направленных на обновление приборной базы ведущих организаций, выполняющих научные исследования и разработки в 2021 году приобретено 12 программируемых источников питания, что позволило выполнить работы по модернизации системы питания электромагнитного оборудования.

В 2021 году усовершенствована система формирования пучков на экспериментальном стенде для исследования воздействия пучка протонов ускорителя на узлы радиоэлектронной аппаратуры и на комплексе протонной терапии. Регулировка интенсивности пучка на этих установках осуществляется путем регулировки интенсивности на инжекционном тракте ускорителя при энергии 400 кэв. Основное ослабление интенсивности осуществлялось с помощью коллиматора, вводимого в пучок в стационарное положение. Плавная регулировка и тонкая подстройка проводится регулировкой токов фокусирующих элементов и с помощью подвижных дистанционно перемещаемых шторок.

Коллиматор представлял собой охлаждаемую медную пластину с круглым отверстием, вводимую в апертуру ионопровода. Коллимация пучка приводила к изменению его эмиттанса и, следовательно, к изменению поперечных характеристик пучка на экспериментальном стенде, что требовало дополнительной подстройки фокусирующих элементов на входе стенда. Кроме того коэффициент пропускания коллиматора сильно зависел от положения пучка в инжекционном тракте, что также приводило к необходимости дополнительных регулировок.

В 2021 году для замены коллиматора был изготовлен и установлен аттенюатор пучка, представляющий собой охлаждаемую водой медную пластину толщиной 0,9 мм с набором отверстий диаметром 0,9 мм, расположенных с шагом 2 мм (рис. 14).

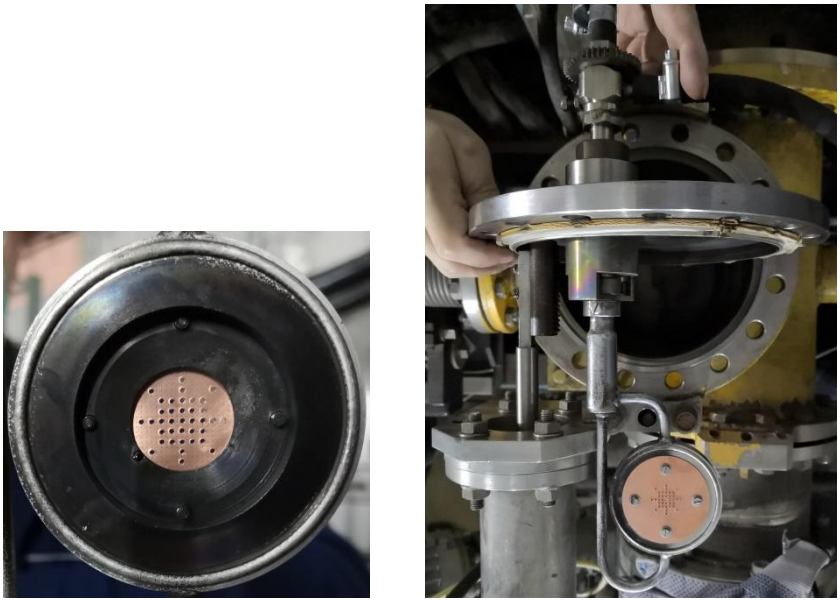

Рис. 14. Аттенюатор пучка и процесс его установки.

После установки аттенюатора пучка существенно упростился и ускорился процесс регулировки интенсивности и настройки пучка на экспериментальном стенде и комплексе протонной терапии. Коэффициент ослабления пучка составляет примерно 10.

Также на протяжении года проводились работы, направленные на поддержание работоспособности и расширение функциональных возможностей системы управления (АСУ) ускорительного комплекса, среди которых следует отметить:

- Введение в эксплуатацию и испытание в сеансах новой оптоволоконной системы сбора и передачи аварийных сигналов экспериментального комплекса на центральный пульт ускорителя.
- Разработку и внедрение новой программы сбора, обработки и представления данных системы измерения потерь пучка со всех секторов ускорителя (рис. 15).
- Разработку и внедрение системы контроля состояния трехфазной сети питания ускорителя, необходимую для мониторинга сбоев в работе оборудования системы синхронизации (рис. 16).
- Частичное обновление модулей контроля и управления National Instruments в системе АСУ ускорителя.
- Установку и настройку новых серверов для связи со шкафами УСО на всех секторах ускорителя, а также сервера аварийных сигналов.

- Полное обновление компьютерного оборудования пультовой ускорителя (рис. 17), перевод рабочего ПО на операционную систему Windows 10.

Рис. 15. Рабочее окно новой программы сбора и обработки информации о потерях пучка вдоль ускорителя.

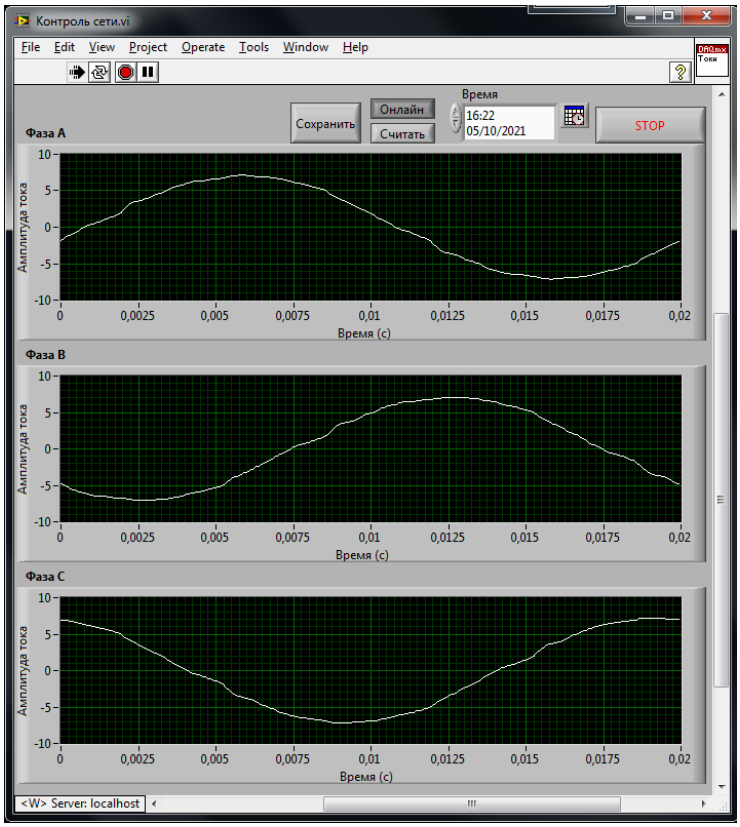

Рис. 16. Рабочее окно программы контроля состояния сети питания ускорителя.

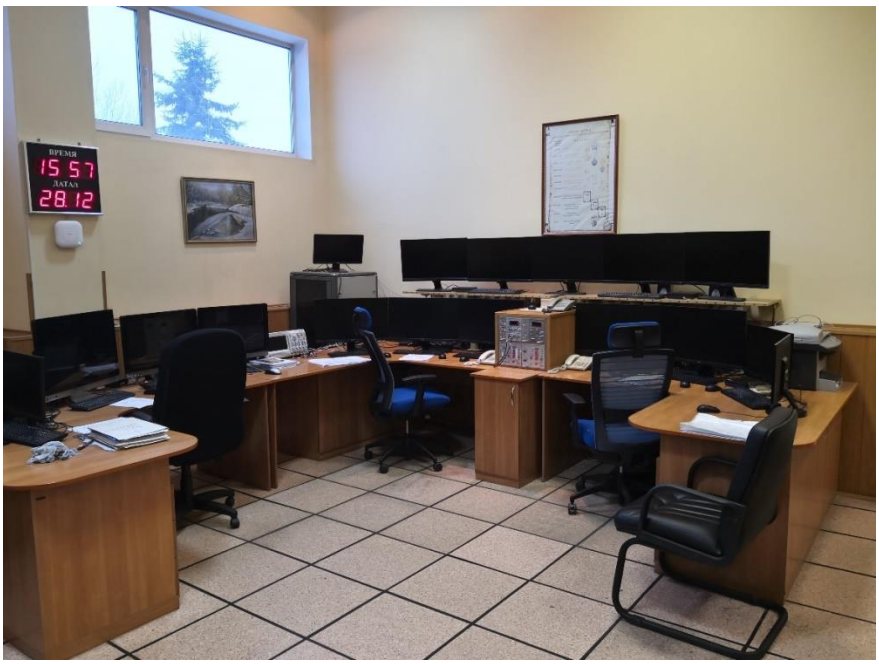

Рис. 17. Внешний вид пультовой ускорителя.

Уже в течение многих лет в аппаратуре системы ВЧ питания начальной части ускорителя происходят непрерывные изменения, связанные в основном с мощными электровакуумными приборами (ЭВП). В 2021 году закончилась многолетняя эпопея с попытками реставрацией мощных модуляторных ламп ГМИ-44А. Предприятие АО «С.Е.Д.-СПб» объявило о невозможности и прекращении попыток реставрации ламп ГМИ-44А. Было предложено рассмотреть возможность разработки нового варианта модуляторной лампы, состоящей из 4-х существующих ламп, соединенных параллельно и собранных в одном баллоне. В 2021 году была поставлена последняя имевшаяся в «С.Е.Д.-СПб» не реставрированная, а изготовленная много лет назад лампа ГМИ-44А. Она установлена и работает в резервном канал КУ-6 и обеспечивает требуемые параметры.

Продолжается переход на новые лампы в ВЧ каскадах К3. Так в 2021 году в ВЧ каскаде канала КУ-1 перешли на лампу ГИ-57А, практически сохранив прежний режим работы. Теперь на всех штатных каналах усиления, кроме КУ-5 и RFQ, установлены лампы ГИ-57А; настроен также запасной ВЧ каскад К3 для установки в один из двух перечисленных выше каскадов, которые в настоящее время работают на последних оставшихся лампах ГИ-51А.

В конце прошлого года осуществлён переход с лампы ГИ-54А на лампу ГИ-71А в ВЧ каскаде К4 канала усиления RFQ, который существенно упростил настройку, техническое обслуживание и эксплуатацию оконечного ВЧ каскада в удалённом помещении, где расположены ВЧ каскады этого канала. Кроме того, у нас практически не

осталось работоспособных ламп ГИ-54А, выпуск которых прекратился более 30 лет назад, и такой переход оказался вполне своевременным (рис.18).

Рис.18. ВЧ каскад К4 с лампой ГИ-71А в канале усиления RFQ.

Началась работа по переходу с дюритовых шлангов систем охлаждения на силиконовые. При этом решаются две проблемы: снижение опасности пробоев в модуляторах, где происходит охлаждение элементов, находящихся под высоким напряжением, и снижение опасности засорения шлангов охлаждения продуктами разрушения дюритовых шлангов в высокоомной воде. В 2021 году на силиконовые шланги был переведен модулятор первого канала (рис. 19). Первый сеанс, проведенный с силиконовыми шлангами охлаждения, не выявил каких-либо нарушений работы канала, связанных с заменой шлангов, и, следовательно, работы по переводу систем охлаждения модуляторов на силиконовые шланги будут продолжены в следующем году.

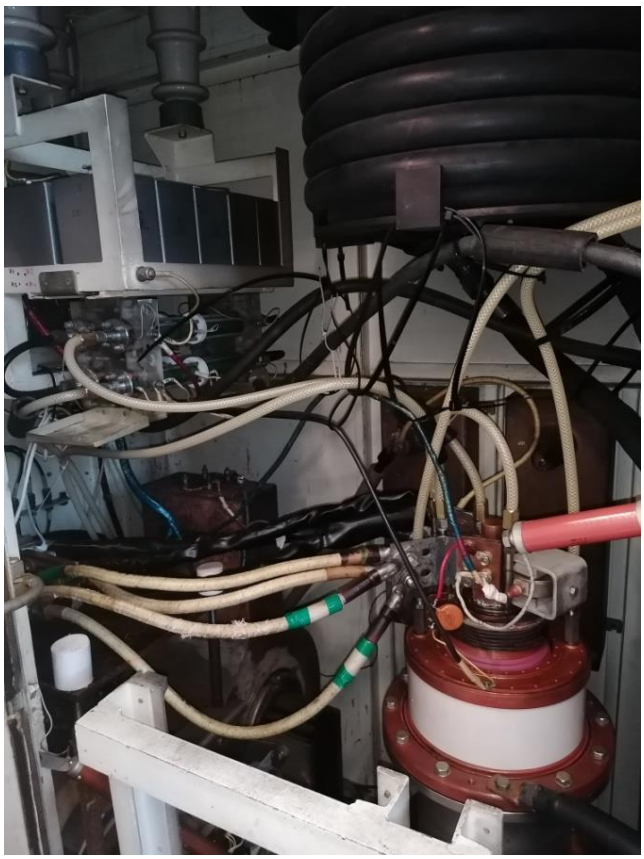

Рис. 19. Общий вид модуляторной лампы ГИ-71АМ с силиконовыми шлангами охлаждения электродов ламп и резисторов в сеточной цепи.

Проблемы, возникающие при использовании генераторного триода ГИ-71А в качестве модуляторной лампы, в основном, сводятся к следующему:

- Снижению допустимой величины напряжения сетка-катод до 1,5-2 кВ.
- Увеличению усиления в цепи обратной связи системы стабилизации амплитуды и, в частности, транзисторного подмодулятора, из-за снижения усиления модуляторной лампы ГИ-71АМ по сравнению с ГМИ-44А.
- Увеличению сеточного тока модуляторной лампы с 1-2 А (ГМИ-44А) до 20-30А, а напряжения на аноде открытой лампы с 1-2 кВ до 5-10 кВ - в зависимости от выходной мощности КУ.
- Увеличению почти на 2 порядка мощности, рассеиваемой в резисторе (при сохранении его номинала), включённом последовательно в цепь сетки модуляторной лампы, и, соответственно, мощности, запасаемой к концу каждого импульса в индуктивности вторичной обмотки ИТ.

Указанные выше проблемы приводят к тому, что при пробоях (искрениях) в генераторной лампе (ВЧ каскад К4) система ПРИЗ оказывается абсолютно не эффективной, в то время как с модуляторной лампой ГМИ-44А эта система заметно улучшала качество работы системы ВЧ питания НЧУ. Основная причина такой ситуации

– пробой промежутка сетка-катод лампы ГИ-71АМ (как следствие пробоя в генераторной лампы ГИ-71А), после чего модуляторная лампа переходит в открытое состояние вплоть до частичного или полного разряда формирующей линии (рис. 20)

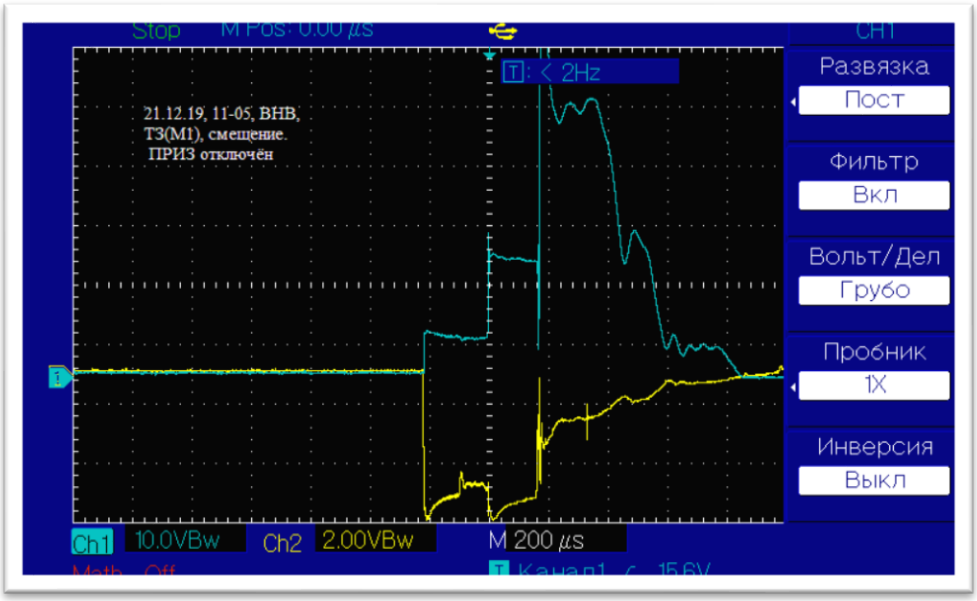

Рис. 20. Пробой в генераторной лампе ГИ-71АМ при отключенной быстрой системе ПРИЗ. Верхний луч – анодный ток модуляторной (и генераторной) лампы, нижний луч – напряжение Uап на первичной обмотке импульсного трансформатора.

Принципиально, лучшим способом является создание условий, при которых не допускаются перенапряжения на сетке лампы, приводящие к пробою. Для этого в между сеткой и катодом ГИ-71АМ устанавливается конденсатор (несколько десятков нФ), который частично забирает часть энергии, накопленной в индуктивности вторичной обмотки ИТ, и при этом не снижает быстродействие системы стабилизации амплитуды ВЧ поля в резонаторе, поскольку в качестве модуляторной используется широкополосный генераторный ВЧ триод. С другой стороны целесообразно также использовать и энергию, накопленную в первичной обмотке ИТ, т.е. отключить диодную сборку, включенную параллельно первичной обмотке ИТ. При этом - при отключенной системе ПРИЗ, именно *в конце* импульса модулятора имеет место максимальная величина отрицательного выброса во вторичной обмотке ИТ, т.е. наиболее эффективно компенсируется положительный выброс на управляющей сетке ГИ-71АМ. На рис. 21 приведены результаты работы канала, в котором выполнены перечисленные выше изменения в схеме модулятора. При этом пробой модуляторной лампы не происходит и работа ускорителя не прерывается.

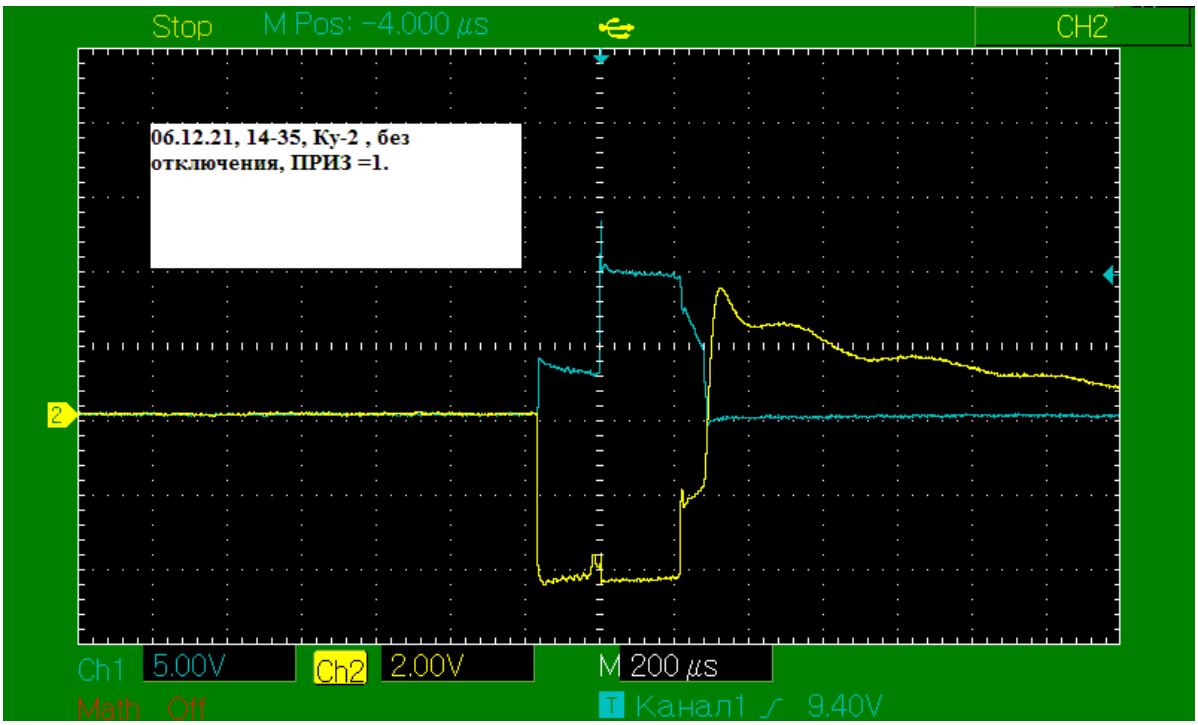

Рис. 21. Отсутствия пробоя в модуляторной лампе при пробое в выходном каскаде генератора (верхний луч – анодный ток модуляторной (и генераторной) лампы, нижний луч – напряжение Uап на первичной обмотке импульсного трансформатора).

Серьезной проблемой, возникающей при пробоях в модуляторных лампах, являются броски тока в цепях высоковольтного питания анодов 10 кВ, приводящие к большой импульсной нагрузке индукционных регуляторов и, как следствие, частому их выходу из строя. В 2021 году выполнен комплекс работ, позволивший ослабить указанную проблему:

- Разработан и смонтирован стенд для измерения времени отключения вакуумных выключателей в цепях высоковольтного питания анодов и проведены измерения.
- Выполнена калибровка измерительных цепей и проведены измерения нагрузочных токов в цепи высоковольтного питания при пробоях в модуляторных лампах.
- В модуляторных камерах трёх самых мощных каналах усиления № 2,3 и 6 установлены резисторные сборки (500 Ом) в цепь зарядки искусственной формирующей линии ИФЛ (рис. 22), ограничивающие ток заряда линии и снижающие опасность выхода из строя индукционных регуляторов при пробоях в ВЧ каскадах каналов усиления.

Рис. 22. Общий вид резисторной сборки, установленной в модуляторной камере КУ-3

3. Разработка и создание ускорителей и их элементов

В 2021 году завершена разработка физико-технического обоснования компактного линейного ускорителя протонов для практической и исследовательской протонной терапии. При максимальной энергии протонов 230 МэВ и импульсном режиме работы ускоритель имеет длину 26 м. В диапазоне от 60 МэВ до 230 МэВ обеспечивается быстрая регулировка выходной энергии протонов с обеспечением характеристик ‘карандашного’ пучка. Как физические, так и предлагаемые технические решения позволят создать установку, реализуемую на основе освоенного отечественной промышленностью оборудования и по совокупности целевых и технико-экономических показателей превосходящую известные аналоги. Структура ускорителя приведена на рисунке 23.

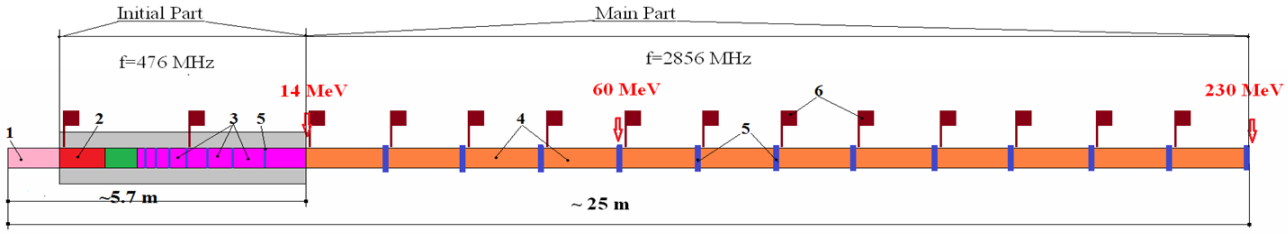

Рис. 23. Схема компактного линейного ускорителя протонов для протонной терапии. (1 – источник протонов, 2 –ускоритель с пространственно-однородной фокусировкой, 3 – резонаторы начальной части, 4 – секции на бегущей волне, 5 – элементы фокусировки, 6 – источники ВЧ питания).

В рамках сотрудничества с лабораторией ДЕЗИ (Германия) продолжались работы по разработке и запуску резонаторов с высокой импульсной и средней мощностью для стенда фото инжектора при формировании сгустков электронов сверхвысокой яркости. В 2021 г. в ДЕЗИ изготовлен головной образец резонатора фото-пушки нового поколения, ранее разработанного в ИЯИ РАН. В измерениях ВЧ параметров выявлены отклонения от проектных величин, вызванные неравномерными деформациями в процессе изготовления – многоступенчатой пайке высокотемпературными серебряными припоями. Разработана методика и проведена настройка ВЧ параметров резонатора до проектных величин. Внесены изменения в размеры ячеек и конструкцию для последующего серийного производства. В настоящее время резонатор установлен на линии пучка установки PITZ (Рис. 24). Достигнуты и превзойдены проектные параметры по напряженности ВЧ поля, до 75 МВ/м, на поверхности фото катода и проводится ВЧ тренировка для достижения проектной длительности ВЧ импульса 1 миллисекунда.

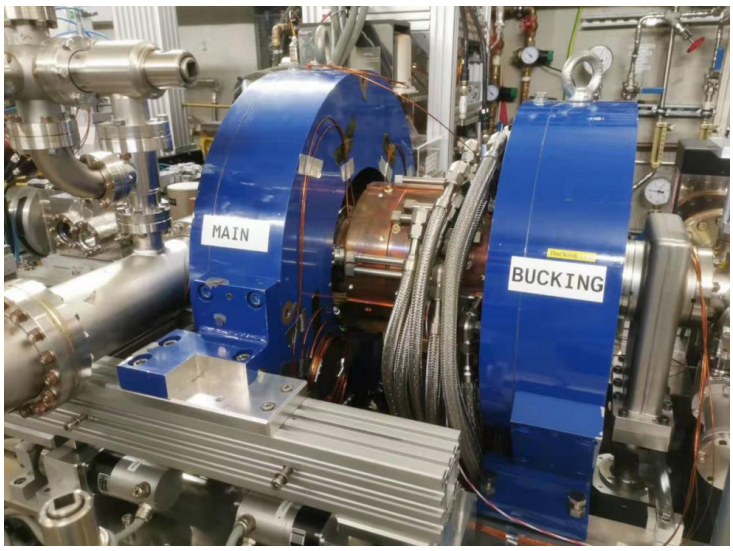

Рис. 24. Резонатор ВЧ пушки на линии пучка установки PITZ.

Также в рамках сотрудничества с лабораторией ДЕЗИ (Германия) по программе модернизации комплекса European XFEL продолжались работы по разработке нормально проводящей ускоряющей структуры дополнительного инжектора, работающего в непрерывном режиме. Оптимизирована предложенная ранее конфигурация резонатора для группировки непрерывного пучка (рис. 25), реализуемая освоенными технологическими приемами. Резонатор длиной 35 см и диаметром 24 см обладает уникальной особенностью – постоянством рабочей частоты при вводе средней непрерывной ВЧ мощности до 15 кВт. Это достигнуто за счет компенсации положительных и отрицательных составляющих сдвига при тепловых деформациях. Разработанное предложение внесено с эскизный проект нормально проводящего инжектора для модернизации комплекса European XFEL.

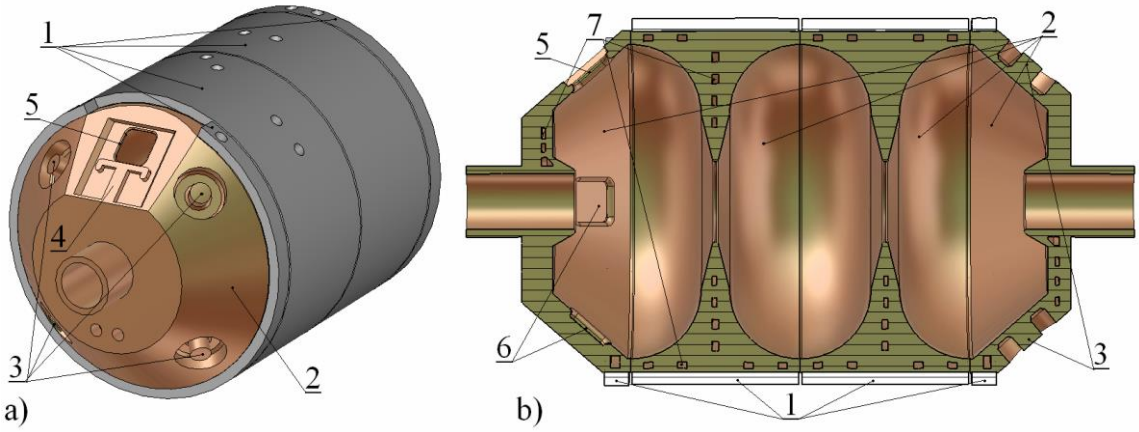

Рис. 25. Общий вид резонатора (a) и схема резонатора в сечении (b). 1 – силовая оболочка, 2 – медные элементы резонатора, 3 – элементы для настройки частоты резонатора после пайки, 4 – согласование с волноводом, 5 – окно согласования, 6 – элементы для компенсации мультиполных добавок, 7- каналы охлаждения.

В 2021 году продолжались работы по разработке и созданию устройств и систем диагностики ускоренных пучков заряженных частиц. В рамках сотрудничества с ВНИИЭФ и ИТЭФ (НИЦ КИ) выполнен комплекс работ по разработке систем диагностики для создаваемых в России линейных ускорителей протонов, отрицательных ионов водорода и легких ионов. Разрабатываемые системы включают измерители тока пучка, профилометры, ионизационные мониторы поперечного сечения, измерители эмиттанса и измерители формы сгустков. Предложены варианты практической реализации указанных устройств на основе опыта и технологических возможностей ИЯИ РАН, а также коммерчески доступных комплектующих. Для обоснования принятых решений проведены расчетно-модельные оценки рабочих характеристик, разработаны габаритные чертежи устройств и электронные схемы.

Завершено создание измерителей формы сгустков для ускорителя ионов CW-linac и ускорителя протонов Proton linac лаборатории GSI (Дармштадт, Германия), обладающих временным разрешением до 6 пикосекунд (рис. 26). Оба измерителя прошли успешные испытания в GSI на тестовом пучке ионов He^+ с энергией 1.4 МэВ/нуклон.

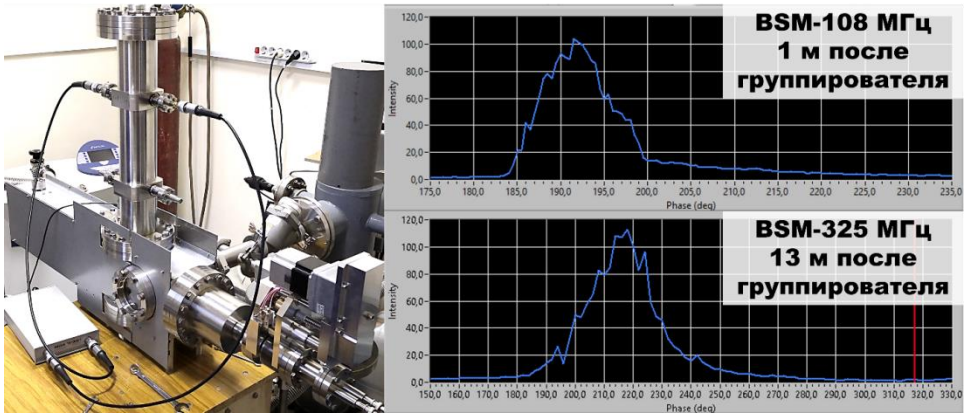

Рис. 26. Измеритель формы сгустков на испытательном стенде в ИЯИ РАН и результаты измерений формы сгустков тестового пучка ионов He^+ в GSI.

Продолжены работы по созданию измерителя формы сгустков для проекта MYRRHA Бельгийского центра ядерных исследований SCK-CEN. В 2021году завершено изготовление, проведены лабораторные испытания (рис. 27), прибор подготовлен к отправке.

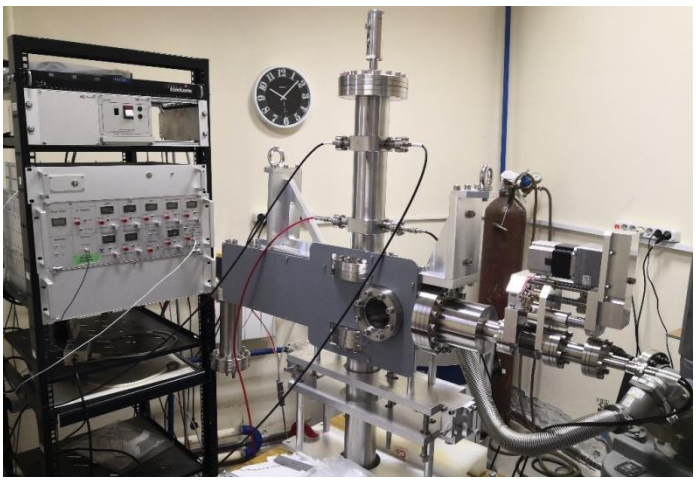

Рис. 27. Измеритель формы сгустков для проекта MYRRHA на испытательном стенде в ИЯИ РАН.

В 2021 году были продолжены работы по разработке, созданию и модернизации источников поляризованных частиц и источников отрицательных ионов водорода.

В частности, проводилась работа по модернизации и техническому сопровождению источника поляризованных ионов ОИЯИ. Проведено испытание ВЧ перехода с сильным полем для атомов водорода и выполнена доработка блока ВЧ переходов с сильным полем для атомов дейтерия. Выполнена радиочастотная настройка резонаторов этих блоков ВЧ перехода и проведено измерение эффективности ВЧ переходов с использованием поляриметра Брейт_Раби. Выполнены измерения модуляции протонного тока при подаче атомарного дейтериевого пучка в накопительную ячейку и измерена толщины мишени, образуемой в ячейке поляризованными атомами. Также выполнены измерения толщины мишени из поляризованных атомов дейтерия в накопительной ячейке непосредственно малогабаритным ионизационным датчиком, установленным в накопительной ячейке. Измерения двумя методами дали согласованные результаты. Выполнены измерения плотности атомарного пучка времяпролетным масс-спектрометром, установленным в камере постоянных шестиполей источника поляризованных ионов и проведено исследование влияния формы скиммера на интенсивность атомарного пучка. Выполнены 3D численные расчеты транспортировки пучка ионов дейтерия в канале вывода из источника поляризованных ионов. Выполнены измерения эмиттанса пучка ионов на выходе из эл. ст. дефлектора источника поляризованных ионов. Введена дополнительная быстродействующая токовая защита в генераторе высоковольтных импульсов ускоряющего напряжения 25 кВ. Выполнена доработка модулятора диссоциатора источника поляризованных ионов по схеме с внешним дополнительным высоковольтным источником 5 кВ.

В рамках сотрудничества с ИТЭФ (НИЦ КИ) разработан эскизный проект ионного источника для ускорителя отрицательных ионов водорода.

В 2021 году были продолжены работы по генерации атомов антиводорода методом перезарядки высоковозбужденных атомов позитрония и антипротонов в рамках участия в эксперименте AEGIS в ЦЕРН. Метод реализован впервые. Также продолжалась работа по повышению эффективности метода. В частности, повышена эффективность генерации атомов позитрония при эмиссии позитрония из пористого кремния, облучаемого пучком позитронов.

Для сооружаемого комплекса NICA (ОИЯИ) проводились исследования по сохранению поляризации дейтронного пучка в коллайдере в «spin-transparent» режиме с целью подготовки эксперимента по управлению спином. В частности:

- Исследована спин-орбитальная динамика дейтронов в «spin-transparent» моде с использованием соленоида MPD и 6T-соленоидов, а также четырех 6T-соленоидов, расположенных в полукольцах MPD и SPD.
- Исследована скорость деполяризации спина в коллайдере NICA в режиме «spin-transparent» моде; рассчитаны возможные максимальные времена сохранения поляризации.
- Исследовано влияние конечного значения фазового объема пучка, которое препятствует одновременному выполнению условия «нулевой частоты прецессии» всеми частицами в пучке.
- Из-за различий в их спин-орбитальном движении векторы спина частиц осциллируют с разной частотой, что вызывает деполяризацию пучка. Это явление называется «спиновой декогеренцией».
- Определены условия, усредняющие направления оси прецессии спина по фазовому пространству пучка с целью сохранения поляризации.
- Определены возможности использования метода спин-навигатора для управления ориентацией оси поляризации пучка.

На синхротроне COSY (FZJ, Германия) проводилась экспериментальная проверка спинового навигатора для управления поляризацией протонов в коллайдере NICA.

Проводились исследования по прохождению критической энергии и по повышению критической энергии для дейтронов и протонов в коллайдере NICA. В частности:

- Разработана специальная магнитооптическая структура коллайдера адаптированная для протонов и дейтронов с регулируемой критической энергией, превышающей энергию эксперимента на основе тяжело-ионной структуры.
- Исследовано прохождение протонов через критическую энергию в магнитооптической структуре для тяжелых ионов коллайдера НИКА.
- Исследована динамика протонов в стеке, занимающего половину орбиты кольца, при удержании частиц ВЧ барьерами при индукционном ускорении ВЧ барьерами.
- Разработана оптика, обеспечивающая быстрый скачок бетатронной частоты при переходе критической энергии с учетом спецификации квадрупольных линз и источников питания к ним, обеспечивающих такой скачок.
- Исследована динамика протонов в стеке при отключении ВЧ барьеров, быстром скачке бетатронной частоты, а затем переполюсовке напряжения ВЧ барьеров и дальнейшем ускорении частиц ВЧ барьерами.
- Исследованы проблемы устойчивости частиц в стеке при прохождении через критическую энергию.

В 2021 году проводились работы по разработке линейного ускорителя лёгких ионов для промышленного производства изотопов медицинского назначения:

- Разработана начальная часть линейного ускорителя лёгких ионов на основе структуры RFQ, работающего в импульсном режиме, предназначенного для установки в радиационном комплексе для промышленного производства изотопов медицинского назначения. В качестве ускоряемых ионов предусмотрены два варианта с отношением Z/A=0,5: дейтроны D+ в основном варианте и альфа-частицы He2+ в дополнительном варианте.
- В качестве основного варианта линейного ускорителя рассчитан ускоритель дейтронов.
- В качестве второго варианта рассмотрена техническая возможность реализации линака двухзарядных альфа-частиц He2+.

Главной особенностью проектируемого ускорителя является то, что в случае ускорения частиц с соотношением заряда к массе 1:2, длина резонатора практически удваивается, если ее сравнивать с длиной ускорителя на ту же энергию для протонов. В нашем случае длина резонатора становится $\boldsymbol{L_{cav} \approx 3\,\lambda}$, где $\boldsymbol{\lambda}$ – длина волны рабочей моды TE211, что приводит к малому частотному разделению между рабочей квадрупольной модой TE211 и дипольными модами TE11n. Для разделения мод используются окна связи между соседними сегментами резонатора, которые в свою очередь изменяют

распределение поля вдоль резонатора. Равномерность восстанавливается с помощью плунжеров, размещенных вдоль резонатора в каждом из 4 сегментов (согласователь, группирователь, ускоряющий группирователь, ускоряющая часть).

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

План работ на 2021 год выполнен полностью. Получены значимые научные результаты. Результаты НИР по задаче 3 вошли в число важнейших достижений Института в 2021 году.

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

План работ на 2021 год выполнен полностью.

Проведено 4 сеанса работы ускорителя продолжительностью 948 часов, направленных на выполнение государственного задания, программ РАН, планов и научной программы Института, соглашений со сторонними организациями. Работы проводились на установки экспериментального комплекса РАДЭКС, ИН-06 и КПТ, а также на экспериментальный стенд для исследования воздействия пучка на узлы радиоэлектронной аппаратуры с энергиями частиц от 75 МэВ до 267 МэВ. В зависимости от задачи интенсивность пучка изменялась в пределах от 10^6 частиц в импульсе при работе на экспериментальный стенд до десятков микроампер среднего тока при работе на нейтронные источники, а длительность импульса – от 0,3 мкс до 150 мкс. Частота повторения импульсов регулировалась от единичных импульсов до 50 Гц. Обеспечение работы ускорителя стало возможным благодаря постоянно проводимому техническому обслуживанию и модернизации оборудования ускорителя и каналов экспериментального комплекса, а также решению возникающих проблем.

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

План работ на 2021 год выполнен полностью.

Проводились работы по модернизации большинства систем ускорителя, среди которых следует отметить систему инжекции, системы высокочастотного питания, систему диагностики, систему контроля и управления, систему питания электромагнитного оборудования, систему измерения потерь пучка, систему быстрой аварийной защиты, вакуумную систему и другие системы.

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

План работ на 2021 год выполнен полностью.

Среди выполненных работ следует отметить работы по разработке устройств диагностики для ВНИИЭФ и ИТЭФ (НИЦ КИ), а также лабораторий GSI (Германия) и MYRRHA (Бельгия), компактного линейного ускорителя для протонной терапии, линейного ускорителя лёгких ионов для промышленного производства изотопов

медицинского назначения, по модернизации и техническому сопровождению источника поляризованных ионов ОИЯИ, разработке эскизного проекта ионного источника для ускорителя отрицательных ионов водорода, по генерации атомов антиводорода методом перезарядки высоковозбужденных атомов позитрония и антипротонов для эксперимента AEGIS в ЦЕРН. Проводились работы по разработке нормально проводящих резонаторов, работающих с большими импульсными и средними мощностями, для программы модернизации комплекса European XFEL (ДЕЗИ, Германия). Для сооружаемого комплекса NICA (ОИЯИ) проводились исследования по сохранению поляризации дейтронного пучка в коллайдере в «spin-transparent» режиме с целью подготовки эксперимента по управлению спином, а также по прохождению и поднятию критической энергии для дейтронов и протонов.

ПУБЛИКАЦИИ

1. Публикации по задаче «Модернизация систем сильноточного линейного ускорителя ионов водорода ИЯИ РАН».

1. Belov S., Gavrilov S.A., Frolov O.T., Netchaeva L.P., Turbabin A.V., Zubets V.N. Study of Space Charge Compensation Process of a 400 keV Pulsed Hydrogen Beam, 27th Russian Particle Acc. Conf., RuPAC2021, Alushta, Russia, JACoW Publishing, TUPSB39, p. 313-315. doi:10.18429/JACoW-RuPAC2021-TUPSB39.
2. Rybakov I.V., Kravchuk L.V., Paramonov V.V., Feschenko A.V. Proposal of a Normal Conducting Cavity for the Main Part in a Linear Accelerator of Intensive Beams of Hydrogen Ions. Труды 7-й Международной конференции «Лазерные, плазменные исследования и технологии ЛаПлаз-2021 », http://conf.laplas.mephi.ru/, с. 374, 2021.
3. Rybakov I.V., Paramonov V.V. Determination of required tolerances and stop band width for cells manufacturing and tuning in compensated high energy accelerating structures. Proc. IPAC 2021, THPAB187, p. 4139, 2021, doi:10.18429/JACoW-IPAC2021-THPAB187.
4. Rybakov I.V., Feschenko A.V., Kravchuk L.V., Paramonov V.V., Serov V.L. Parameters of the Normal Conducting Accelerating Structure Accelerating Structure for the up to 1 GeV Hadron Linacs. Proc. RuPAC2021, MOPSA06, p. 142, 2021, doi:10.18429/JACoW-RuPAC2021-MOPSA06.
5. Titov A.I., Bragin S., Gavrilov S.A. and Volodkevich O. Enhancement of Transverse Beam Phase Space Analysis by Tomography Method at INR Linac. Proc. RuPAC'21, Alushta, Russia, Sep.-Oct. 2021, pp. 433-435. doi:10.18429/JACoW-RuPAC2021-WEPSC50.
6. Titov A.I., Gavrilov S.A. Concept of Decision Support System for INR RAS Linac Beam Tuning. Proc. RuPAC'21, Alushta, Russia, Sep.-Oct. 2021, pp. 436-438. doi:10.18429/JACoW-RuPAC2021-WEPSC51.

2. Публикации по задаче «Разработка и создание ускорителей и их элементов».

1. Amsler C., Antonello M., Belov A. et. al., (AEGIS Collaboration) Pulsed production of antihydrogen, Communications Physics, v. 4, 19 (2021). https://doi.org/10.1038/s42005-020-00494-z.
2. Mariazzi S., Caravita R., Zimmer C., Rienacker B., Camper A., Belov A. et. al. High-yield thermalized positronium at room temperature emitted by morphologically tuned

nanochanneled silicon targets, J. Phys. B: At. Mol. Opt. Phys. 54 (2021) 085004 (11pp). https://doi.org/10.1088/1361-6455/abf6b6.

3. Shu G., Qian H., Paramonov V., et/ al Experimental benchmark study of multiphysics simulations of an L-band high average power RF gun, Nuclear Inst. and Methods in Physics Research, A 1004 (2021) 165344, 2021.
4. Durkin A.P., Kolomiets A.A., Paramonov V.V. Analysis of Focusing Schemes in the Main Part of a Linear Proton Accelerator for Medicine. Труды 7-й Международной конференции «Лазерные, плазменные исследования и технологии ЛаПлаз-2021 », http://conf.laplas.mephi.ru/, с. 311, 2021.
5. Paramonov V.V., Durkin A.P., Kolomiets A. A Linear Accelerator for Proton Therapy/ Proc. RuPAC2021, FRB04, p. 117, 2021, doi:10.18429/JACoW-RuPAC2021-FRB04
6. Ovchinnikova L., Akulinichev S., Durkin A., Kolomiets A., Paramonov V., Kurilik A., Effect of a Proton Beam from a Linear Accelerator for Radiation Therapy. Proc. RuPAC2021, MOPSA41, p. 182, 2021, doi:10.18429/JACoW-RuPAC2021-MOPSA41.
7. Paramonov V.V. Unit for Matching a Driving Waveguide with a Cavity. Proc. RuPAC2021, WEPSC01, p. 340, 2021, doi:10.18429/JACoW-RuPAC2021-WEPSC01
8. Lal S., Paramonov V., Qian H., (7 соавторов) Design studies of a continuous-wave normal conducting buncher for European X-FEL. https://arxiv.org/ftp/arxiv/papers/2112/2112.12973.pdf.
9. Aksentev A.E., Melnikov A.A., Senichev Y.V. Modeling of the Spin-Navigator Method for Manipulating the Beam Polarization in a Spin-Transparent Storage Ring (paper ID: TUPSB10). XXVII Russian Particle Accelerator Conference (RuPAC-2021) https://oraweb.cern.ch/pls/rupac2021/search.html.
10. Melnikov A., Senichev Y., Ladygin V., Aksentev A. Numerical Investigation of the Robustness of Spin-Navigator Polarization Control Method in a Spin-Transparent Storage Ring (paper ID: TUPSB11). XXVII Russian Particle Accelerator Conference (RuPAC-2021) https://oraweb.cern.ch/pls/rupac2021/search.html.
11. Senichev Y., Aksentev A., Melnikov A. Methods and Systematic Errors for Searching for the Electric Dipole Moment of Charged Particle Using a Storage Ring (paper ID: TUB03) XXVII Russian Particle Accelerator Conference (RuPAC-2021) https://oraweb.cern.ch/pls/rupac2021/search.html.
12. Сеничев Ю., Аксентьев А., Мельников А. Спиновая хроматичность пучка: удлинение орбиты и бетатронная хроматичность. VII Международная конференция ЛаПлаз-2021. https://conf.laplas.mephi.ru/wp-content/uploads/2021/03/Laplas2021.pdf, с. 71.

13. Сеничев Ю., Аксентьев А., Мельников А. Спиновая хроматичность пучка: удлинение орбиты и бетатронная хроматичность. VII Международная конференция ЛаПлаз-2021. https://conf.laplas.mephi.ru/wp-content/uploads/2021/03/ЛаПлаз-Тезисы-том-2.pdf, с. 301-302.
14. Аксентьев А., Мельников А., Сеничев Ю. Управление ориентацией поляризации в накопительном кольце, работающем в спин-прозрачном режиме. https://conf.laplas.mephi.ru/wp-content/uploads/2021/03/Laplas2021.pdf, с. 73, устный доклад, докладчик.
15. Аксентьев А., Мельников А., Сеничев Ю. Управление ориентацией поляризации в накопительном кольце, работающем в спин-прозрачном режиме. https://conf.laplas.mephi.ru/wp-content/uploads/2021/03/ЛаПлаз-Тезисы-том-2.pdf, с. 319-320.
16. Мельников А., Аксентьев А., Сеничев Ю. Устойчивость метода управления ориентацией оси поляризации пучка посредством спин-навигаторных соленоидов в спин-прозрачном кольце. VII Международная конференция ЛаПлаз-2021. https://conf.laplas.mephi.ru/wp-content/uploads/2021/03/Laplas2021.pdf, с. 76.
17. Мельников А., Аксентьев А., Сеничев Ю. Устойчивость метода управления ориентацией оси поляризации пучка посредством спин-навигаторных соленоидов в спин-прозрачном кольце. VII Международная конференция ЛаПлаз-2021. https://conf.laplas.mephi.ru/wp-content/uploads/2021/03/ЛаПлаз-Тезисы-том-2.pdf, с. 342-343.
18. Мельников А., Сеничев Ю., Аксентьев А. Увеличение времени спиновой когерентности в кольце-прототипе для измерения электрического дипольного момента протонов. 64-я всероссийская научная конференция МФТИ, Долгопрудный, Россия, 02.12.2021. https://conf.mipt.ru/view/conference/view_division/2703671.
19. Slim J. *et all* (JEDI Collaboration) 2021 PRAB 24, 124601 URL https://journals.aps.org/prab/abstract/10.1103/PhysRevAccelBeams.24.124601.
20. Gavrilov S. Bunch shape monitors for hadron LINAC commissioning. ARIES “Experiences during hadron LINAC commissioning” (on-line), Sep. 25–29, 2021.https://agenda.ciemat.es/event/1229/contributions/2278/.
21. Feschenko, Gaidash V., Gavrilov S. Development and Implementation of Bunch Shape Instrumentation for Ion Linacs, Proc. RuPAC'21, Alushta, Russia, Sep.-Oct. 2021, pp. 1-6. doi:10.18429/JACoW-RuPAC2021-MOX02.

22. Klenov V.S. Numerical modeling of electron confinement in a multicusp magnetic trap, AIP Conference Proceedings, 2373, p. 080007, (2021); https://doi.org/10.1063/5.0057422.
23. Колокольчиков С.Д., Сеничев Ю.В. Магнитооптическая структура коллайдера NICA с высокой критической энергией. VII Международная конференция ЛаПлаз-2021. https://conf.laplas.mephi.ru/wp-content/uploads/2021/03/ЛаПлаз-Тезисы-том-2.pdf, с. 237-238.
24. Kolokolchikov S., Senichev Y., Syresin E. Magneto-Optical Structure of the NICA Collider with High Critical Energy (paper ID: TUPSB08). XXVII Russian Particle Accelerator Conference (RuPAC-2021) https://accelconf.web.cern.ch/rupac2021/papers/tupsb08.pdf.
25. Syresin E.M., Butenko A.V., Zenkevich P.R., Kozlov O.S., Kolokolchikov S.D., Kostromin S.A., Meshkov I.N., Mityanina N.V., Senichev Y.V., Sidorin A.O., Trubnikov G.V. Formation of Polarized Proton Beams in the NICA Collider-Accelerator Complex, Physics of Particles and Nuclei volume 52, p. 997–1017, 2021, URL. https://doi.org/10.1134/S1063779621050051.