

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. № 122041100018-6

Рег. №



УТВЕРЖДАЮ
Директор ИЯИ РАН,
чл.-корр. РАН

М.В. Либанов

«30» декабря 2022 г.

**ОТЧЕТ
О НАУЧНО-ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКОЙ РАБОТЕ**

122041100018-6

ФИЗИКА И ТЕХНИКА УСКОРИТЕЛЕЙ; ФИЗИКА ПУЧКОВ

ЗАРЯЖЕННЫХ ЧАСТИЦ

(промежуточный за 2022 год)

ФЦП

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

А.В. Фещенко
«30» декабря 2022 г.

Москва 2022 г.

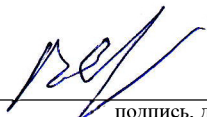
СПИСОК ИСПОЛНИТЕЛЕЙ

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


подпись, дата 30.12.2022

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

Исполнители:
Главный инженер Отдела
ускорительного комплекса


подпись, дата 30.12.2022

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

Вед. науч. сотр.,
д-р физ.-мат. наук


подпись, дата 30.12.2022

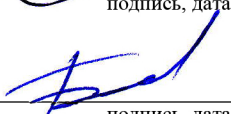
В.В. Парамонов
(введение, раздел 3)

Вед. науч. сотр.,
д-р физ.-мат. наук


подпись, дата 30.12.2022

Ю.В. Сеничев
(введение, раздел 3)

Заведующий
лабораторией,
канд. физ.-мат. наук


подпись, дата 30.12.2022

А.С. Белов
(введение, раздел 1,2,3)

Заведующий
лабораторией, канд. физ.-
мат. наук


подпись, дата 30.12.2022

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

Заведующий сектором


подпись, дата 30.12.2022

В.Е. Лоскутов
(раздел 1, 2)

Заведующий сектором,
канд. техн. наук


подпись, дата 30.12.2022

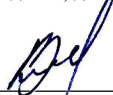
Ю.Ж. Калинин
(раздел 1, 2,3)

Заведующий сектором,
канд. техн. наук


подпись, дата 30.12.2022

А.И. Кваша
(раздел 1, 2)

Заведующий сектором


подпись, дата 30.12.2022

В.Н. Леонтьев
(раздел 1, 2)

Начальник установок


подпись, дата 30.12.2022

А.Н. Набока
(раздел 1, 2,3)

Нормоконтроль


подпись, дата 30.12.2022

О.Н. Либанова

РЕФЕРАТ

Отчет 37 с., 1 кн., 16 рис., 27 источн., 1 прил.

ПЕРЕЧЕНЬ КЛЮЧЕВЫХ СЛОВ: СИЛЬНОТОЧНЫЙ УСКОРИТЕЛЬ, ИСТОЧНИК ЧАСТИЦ, ИНЖЕКТОР ПРОТОНОВ, АВТОМАТИЗАЦИЯ УСКОРИТЕЛЯ, ДИАГНОСТИКА ПУЧКОВ, КАНАЛЫ ТРАНСПОРТИРОВКИ ПУЧКОВ, ВЧ ПИТАНИЕ

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

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

В процессе и в результате выполнения НИР обеспечена работа сильноточного линейного ускорителя ионов водорода в шести сеансах общей продолжительностью 1068 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. Выполнен ряд работ по разработке новых ускорителей, а также систем и элементов ускорителей для других ускорительных центров.

Все проводимые работы находят непосредственное практическое применение 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 единственном в России и крупнейшем в Евроазиатском регионе сильноточном линейном ускорителе ионов водорода.

СОДЕРЖАНИЕ

СПИСОК ИСПОЛНИТЕЛЕЙ.....	2
РЕФЕРАТ	3
СОДЕРЖАНИЕ.....	4
ВВЕДЕНИЕ	5
1. Обеспечение работы сильноточного линейного ускорителя ИЯИ РАН	7
2. Модернизация систем сильноточного линейного ускорителя ионов водорода ИЯИ РАН.....	11
3. Разработка и создание ускорителей и их элементов	26
ЗАКЛЮЧЕНИЕ.....	31
СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ.....	33
ПРИЛОЖЕНИЕ А Список публикаций исполнителей отчета за 2022 г.	36

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 [1]. 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 2022 года проведено 150 сеансов, общей продолжительностью 52512 часов, в том числе 6 сеансов продолжительностью 1068 часов в 2022 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, спектрометр по времени замедления нейтронов в свинце СВЗ-100, комплекс протонной терапии, а также на экспериментальный стенд для исследования воздействия протонного пучка на узлы радиоэлектронной аппаратуры с энергией от 49 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 основном работы проводились с протонным пучком, с пучком отрицательных ионов водорода был проведен один сеанс длительностью 5 суток, в котором решались задачи улучшения прохождения пучка по инжекционному тракту и повышению захвата в ускоритель.

Обеспечение работы ускорителя стало возможным благодаря постоянно проводимому техническому обслуживанию и модернизации оборудования ускорителя и каналов экспериментального комплекса.

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 некоторых систем, выполненные в 2022 году: инжектор протонов, инжектор отрицательных ионов водорода, система ВЧ питания начальной части ускорителя, система авторегулирования собственных часто ускоряющих резонаторов, система питания электромагнитного оборудования, автоматизированная

система управления, система диагностики, вакуумная система, система формирования импульсов тока пучка отрицательных ионов водорода, система авторегулирования и стабилизации амплитуд и фаз ускоряющих полей.

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. Так в сотрудничестве с ОИЯИ выполнялись работы по разработке и созданию оборудования для источников поляризованных ионов, а также формированию пучков поляризованных частиц в сооружаемом коллайдере НИКА.

Проведены исследования по разработке ускоряющих структур для ускорения ионов низких энергий. Продолжены исследования в рамках разработки предложения компактного линейного ускорителя для протонной терапии.

Были выполнены работы по разработке конфигураций ускорителей отрицательных ионов водорода, по разработке устройств диагностики для ряда проектов ускорителей, а также научно-технического обоснования создания систем диагностики пучков линейных ускорителей ионов для измерения ключевых параметров.

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 Евразийском регионе. Со времени начала регулярной работы ускорителя на физические и прикладные задачи в 1993 году и по декабрь 2022 года проведено 150 сеансов, общей продолжительностью 52512 часов, в том числе 6 сеансов продолжительностью 1068 часов в 2022 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, спектрометр по времени замедления нейтронов в свинце СВЗ-100, комплекс протонной терапии, а также на экспериментальный стенд для исследования воздействия протонного пучка на узлы радиоэлектронной аппаратуры с энергией от 49 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 основном работы проводились с протонным пучком, с пучком отрицательных ионов водорода был проведен один сеанс длительностью 5 суток, в котором решались задачи улучшения прохождения пучка по инжекционному тракту и повышению захвата в ускоритель.

Обеспечение работы ускорителя стало возможным благодаря постоянно проводимому техническому обслуживанию и модернизации оборудования ускорителя и каналов экспериментального комплекса.

В течение 2022 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.

В перерывах между сеансами 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, после сеансов проводилось измерение радиационной обстановки на ускорителе и на каналах транспортировки в экспериментальном комплексе, выполнена инвентаризация облученных на линейном ускорителе конструкционных материалов, выведенных из эксплуатации и пр.

В качестве примера приведем перечень работ, выполненных только на системе ВЧ питания основной части ускорителя. Работы выполнялись на каналах вплоть до канала №4-7, что соответствует энергии пучка 345 МэВ.

- Проверка работоспособности каналов № 3-1...3-9, 3-10, 3-11, 4-1...4-7 (18 ВЧ каналов).
- Комплексная проверка и настройка каналов №№ 3-1...3-5, 3-7...3-9, 3-10, 3-11, 4-1, 4-2, 4-4...4-7 при работе на резонаторы совместно с системами АРФА и АРЧТ (17 ВЧ каналов).
- Проверка срабатывания блокировок по дверям и воде генератора и модулятора, сжатому воздуху на каналах №№ 3-1...3-11, 4-1...4-7.
- Проверка работоспособности блокировок по вакууму и АРЧТ в резонаторах каналов №3-1...3-5, 3-7...3-11, 4-1, 4-2, 4-4...4-7.
- Тренировка резонаторов каналов №3-1...3-5, 3-7...3-9, 3-10, 3-11, 4-1, 4-2, 4-4...4-7 до номинального поля в резонаторах.
- Профилактика оборудования трансформаторных подстанций, протяжка контактов наконечников кабелей, доливка трансформаторного масла в трансформаторы и проверка состояния блоков демпфирующих цепей и трансформаторов каналов 3-его сектора и каналов №4-1...4-7 (18 подстанций, 54 трансформатора и 18 БДЦ).

- Проверка и настройка защит по сигналам генераторов 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 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 каналах № 3-1...3-11, 4-1...4-7 (18 ВЧ каналов).
- Протяжка контактов наконечников низковольтных и высоковольтных кабелей на каналах 3-1...3-11, 4-1...4-7 (18 ВЧ каналов).
- Профилактика оборудования модуляторов и генераторов каналов № 3-1...3-11, 4-1...4-7 и при необходимости замена неисправных элементов (18 ВЧ каналов).
- Проверка и настройка ячейки быстрого отключения ВЧ поля в резонаторе по сигналу отраженной мощности от резонатора на каналах № 3-1...3-11, 4-1...4-7 (18 ВЧ каналов).
- Проверка работы схемы защиты от звукового проявления пробоя в волноводном тракте на каналах №3-1...3-4, 3-6, 3-9 (6 ВЧ каналов).
- Периодическая вакуумная откачка клистронов, находящихся в ЗИПе.
- Проверка сопротивления эквивалента нагрузки модуляторов на 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 каналов № 4-1...4-7 (18 ВЧ каналов). Доливка трансформаторного масла в устройства.
- Осмотр состояния электролитических конденсаторов в блоках питания накала и соленоида на каналах № 3-1...3-11, 4-1,4-7 (18 ВЧ каналов). Замена конденсаторов на ВЧ каналах № 4-6, 4-7.
- Проверка защиты от короткого замыкания катушек соленоидов на каналах № 3-1...3-11, 4-1...4-7(18 ВЧ каналов).
- Испытания нового клистронов КИУ-40 на канале № 4-3.
- Проверка и настройка защиты по сигналу «Уровень масла» в расширительных баках катодных стаканов клистронов на каналах № 3-1...3-11, 4-1...4-7 (18 ВЧ каналов). Ремонт системы контроля по сигналу «Уровень масла» на ВЧ канале № 4-3.

- Проверка работоспособности наладочного канала № 4-3 перед испытаниями нового клистрона. Демонтаж клистрона, испытанного в апреле 2022 года, из канала №4-3.(планируется в конце года).
- Проверка исправности тиристорных плеч шкафов выпрямителя, разрядных и защитных тиристорных ключей, а также водоохлаждаемых резисторов на каналах № 3-1...3-11, 4-1...4-7.
- Ревизия волноводных переключателей ВЧ каналов 3-1...3-11, 4-1...4-7. Ремонт на ВЧ канале № 3-5.
- Измерение сопротивления изоляции проводов и кабелей напряжением до 1 кВ ВЧ каналов № 4-1...4-7.
- Концевая разделка 3-х коротких высоковольтных кабелей типа ИК-4 для ЗИПа.
- Проверка работы вентиляторов модуляторных камер. Смазка подшипников.
- Ремонт трех блоков усилителя шкафа ПУ на ВЧ каналах № 3-1, 3-5, 3-7.
- Ремонт 3-х эквивалентов нагрузок модулятора на ВЧ каналах № 3-1,3-5, 3-11.
- Замена дюритового шланга шкафа МГ2Г3 канала № 3-6 по цепи охлаждения пролетных труб клистрона.
- Ремонт блока поджига разрядных тиристорных ключей модулятора на канале № 3-3.
- Ремонт 2-х концевых выключателей блокировок по рычагу заземления трансформаторных подстанций № 3-1,4-3.
- Ремонт 3-х высоковольтных выключателей нагрузки модулятора.
- Ревизия и замена воздушных фильтров шкафов ПУ и волноводных гермоокон клистронов на ВЧ каналах № 3-1...3-11, 4-1...4-7.
- Ремонт схемы управления системой СОАЗ ВЧ канала № 4-6.
- Ремонт 2-х ячеек контроля падающей и отраженной мощности клистрона на ВЧ каналах № 4-1, 4-6.
- Ремонт ячейки функционального контроля генератора ВЧ канала № 4-6 для обеспечения передачи на пульт управления ускорителя сигналов «3 ступень вкл.» и «Авария канала» при работе резервного ВЧ канала 4-6 на любой резонатор 4 сектора.

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 2022 году.

Проведены испытания и выполнена доработка созданных ранее блоков оборудования инжектора протонов в том числе блока автоматического переключения синхронизации запуска генератора высоковольтных импульсов с внешней синхронизации на внутреннюю при пропадании внешней синхронизации, системы подачи водорода в ионный источник, стойки диодной стабилизации и др. Испытания показали высокую надежность разработанного и усовершенствованного оборудования, что привело к повышению надежности работы инжектора. В частности, работа инжектора не нарушается при пропадании импульсов внешней синхронизации. Надежность работы инжектора при проведении сеансов ускорителя в октябре и ноябре 2022 г. достигла 100%.

Выполнены исследования процесса компенсации пространственного заряда протонного пучка и профиля пучка на выходе инжектора. Для исследования использовался разработанный анализатор энергии медленных ионов, образующихся в ионном пучке в результате ионизации молекул остаточного газа быстрыми ионами пучка [2,3]. Профиль пучка измерялся профилометром с входной щелью, образованной молибденовыми пластинами, за которой располагался коллектор с подавлением вторичных электронов запирающим электрическим полем.

Исследовалось влияние давления остаточного газа и плотности тока ионного пучка на компенсацию пространственного заряда пучка протонов с энергией 400 кэВ. Примеры измеренных характеристик анализатора вторичных ионов для различных значений фокусирующего напряжения (разной плотности тока ионного пучка) и разных давлений остаточного газа в камере диагностики пучка показаны на рисунке 1.

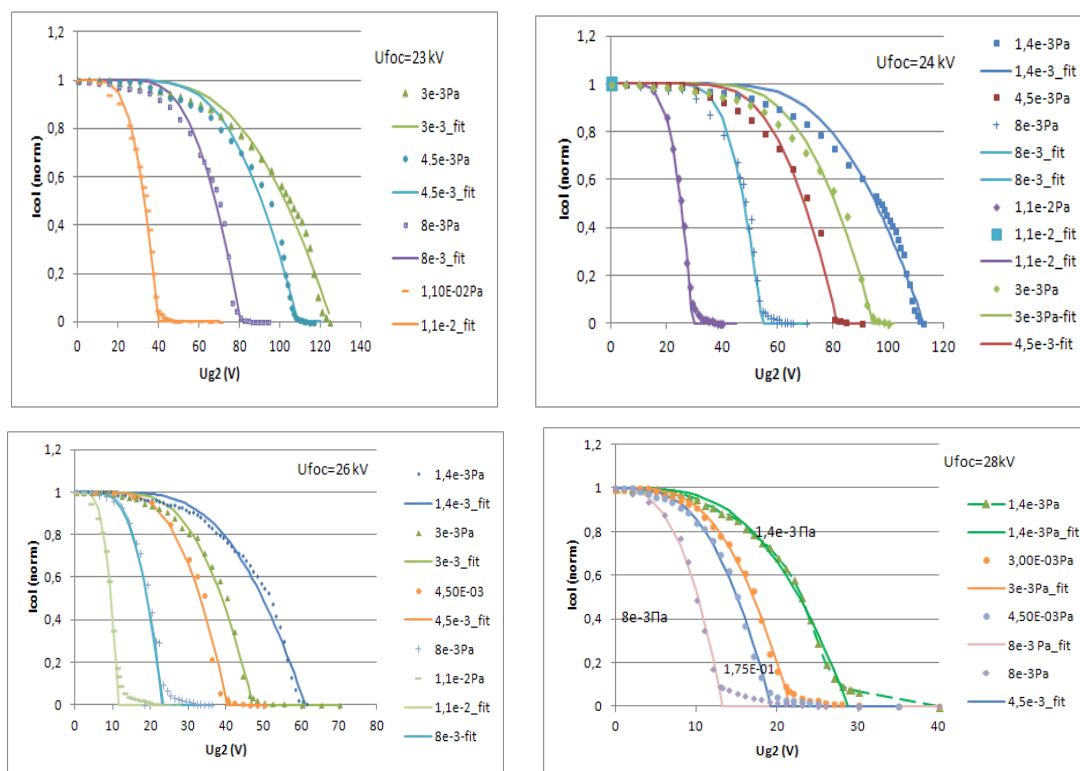


Рисунок 1 – Зависимости тока на коллектор анализатора вторичных ионов от напряжения на анализирующей сетке для различных значений напряжения фокусировки на линзе ионного источника и разных значений давления остаточного газа. Точки – экспериментальные данные. Сплошные кривые – аппроксимация измеренных данных в предположении Гауссовского распределения плотности тока ионного пучка

Измеренные характеристики аппроксимировались в предположении Гауссовского распределения плотности тока пучка. Наблюдаемые отклонения в аппроксимации связаны с отклонением распределения плотности тока от Гауссовского. Пример измерения профиля пучка ионов водорода с энергией 400 кэВ показан на рисунке 2.

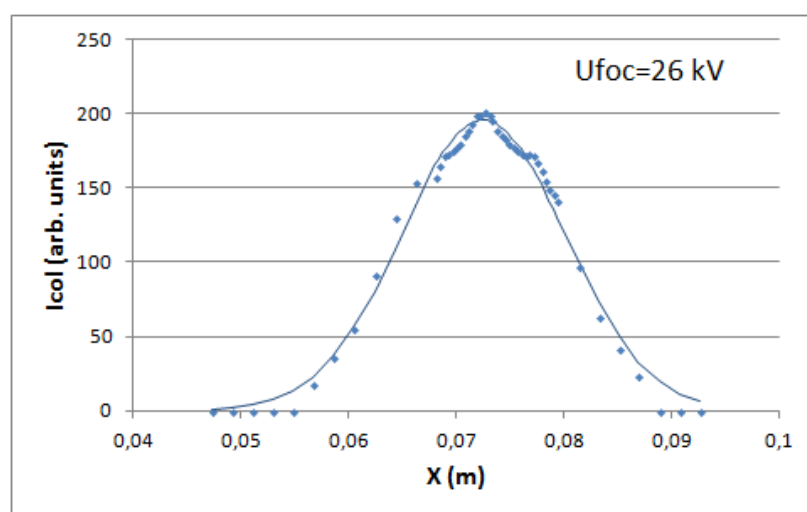


Рисунок 2 – Профиль пучка ионов водорода с энергией 400 кэВ, измеренный щелевым профилометром при значении напряжения фокусировки на линзе ионного источника $U_{foc}=26$ kV

Из данных, приведенных на рисунке 2 следует, что имеется отличие в распределении плотности тока пучка от Гауссовского как для центральной части пучка, так и для периферической. Предположительно, искажение формы распределения в центральной части пучка связано с неоднородностью плазмы на эмиссионной поверхности системы формирования пучка ионного источника. Повышение однородности плазмы позволило бы уменьшить первоначальный разброс расходимости траекторий в ионном пучке и тем самым уменьшить поперечный эмиттанс ионного пучка, формируемого в ионном источнике. Это делает актуальным исследование распределения плотности плазмы в экспандере системы формирования пучка в используемом ионном источнике (дуоплазматроне).

Выполнена частичная замена и изменена компоновка оборудования системы питания ионного источника на высоковольтной платформе инжектора отрицательных ионов водорода:

- Генератор задержанных импульсов ГЗИ-1, обеспечивающий подачу задержанных синхроимпульсов на запуск блоков питания импульсного клапана, генератора тока разряда и генератора вытягивающего напряжения и установленный на высоковольтной платформе инжектора, заменен четырехканальным генератором задержанных импульсов PG-874, который установлен в пом. 311 на пульте управления инжекторами линейного ускорителя. Синхроимпульсы от генератора PG-874 передаются на высоковольтную платформу 400 кВ инжектора отрицательных ионов водорода по оптоволоконным линиям связи. Целью замены является повышение стабильности временных задержек и обеспечение дистанционной настройки временных задержек во время работы инжектора.

- Выполнен ремонт генератора вытягивающего напряжения источника отрицательных ионов водорода. Генератор состоит из 4ех блоков весом около 30 кг каждый. Генератор смонтирован в стойке на высоковольтной платформе, доступ к которой затруднен из-за ограниченного размера высоковольтной платформы. С целью облегчения доступа к генератору и улучшения условий безопасности при ремонтных и наладочных работах с оборудованием генератора, произведена переконфигурация оборудования ГВН: три из четырех блоков перенесены в стойку, ближнюю к выходу с высоковольтной платформы. Это стало возможным благодаря демонтажу из этой стойки генератора задержанных импульсов ГЗИ-1 и части блоков питания.

- Разработана схема системы дистанционного контроля и управления ионным источником (СКиУ ИИ) в инжекторе отрицательных ионов водорода. Существующая система контроля и управления на базе блоков National Instruments была создана около 10

лет назад и надежность ее работы снизилась. Для новой СКУ ИИ приобретаются комплектующие устройства.

В 2022 году основные усилия были направлены на модернизацию анодного модулятора на генераторной лампе ГИ-71А и созданию накального высоковольтного трансформатора для этой лампы.

Анодный импульсный модулятор был разработан на лампе ГМИ-44А, выпуск которых был прекращён практически 20 лет назад. Поиск альтернативы указанной лампы продолжался все эти годы, включая две попытки реставрации ламп ГМИ-44А из числа вышедших из строя во время эксплуатации в составе модуляторов. Последняя неудачная попытка завершилась в 2021 году, и в качестве модуляторной лампы реально остался единственный вариант – генераторный триод ГИ-71А, разработанный в СЕД-СПб (С.-Петербург) для оконечных ВЧ каскадов каналов усиления на ускорителе ИЯИ РАН.

Преимущества и недостатки генераторной лампы ГИ-71А, используемой в качестве модуляторной лампы, подробно описаны в работе [4] и в отчёте за 2021 год. Но до сих пор далеко не все проблемы решены и связаны они со следующим.

- Большой сеточный ток. По сравнению со штатной модуляторной лампой ГМИ-44А он больше, чем на порядок.
- Более низкое усиление лампы ГИ-71А при ее использовании в качестве модуляторной.
- Низкая электропрочность зазора сетка-катод лампы ГИ-71А.

Первые две проблемы были решены за счёт увеличения усиления в транзисторном и ламповом подмодуляторах, а также повышения анодного напряжения на модуляторной лампе ГИ-71А.

Что касается третьей проблемы, то она определяется, в основном, двумя факторами: конструктивным, в частности, размерами зазоров сетка-катод и сетка-анод лампы, и схемными, поскольку схема модулятора была разработана под лампу ГМИ-44А с малыми сеточными токами. Кроме того, в лампе ГМИ-44А *в отличие* от ГИ-71А предусмотрена установка вакиона. Поэтому при первых же не очень удачных испытаниях модуляторной лампы ГИ-71А были сделаны две попытки установки вакиона в эту лампу с целью повышения электропрочности зазора сетка-катод.

В первой неудачной попытке вакион был установлен на сетке ГИ-71А, но из-за несовместимости работы двух, изолированных от «земли» источников питания – смещения и питания вакиона, пришлось, фактически, отключить питание вакиона и работать без него.

Во второй попытке были изготовлены 5 ламп с вакионом в катоде лампы ГИ-71А (рисунок 3), две из которых установлены в модуляторах каналов усиления №1 и №2 с подключенным питанием вакиона. Эффективность работы вакионов в модуляторных лампах ГИ-71АМ не поддаётся оценке, но было замечено, что перед пучковым сеансом в октябре 2022 г. после установки в модулятор второго канала этой лампы и работы в течение нескольких часов под накалом ток вакиона снизился с 20 до 2 мкА, и при последующих включениях работа модулятора явно улучшилась. Таким образом, вопрос целесообразности установки вакиона в модуляторную лампу ГИ-71А остаётся открытым.



Рисунок 3 – Генераторная лампа ГИ-71А с вакионом в катоде

Низкая электропрочность зазора сетка-катод лампы ГИ-71А объясняется спецификой работы ВЧ генераторного прибора, эффективность (кпд и выходная ВЧ мощность) которого, в частности, определяется величинами углов пролёта электронами на рабочей частоте 200 МГц промежутков сетка-катод и сетка-анод. Именно с этих позиций определяются величины межэлектродных промежутков генераторной лампы, балансируя между эффективностью лампы и электропрочностью зазоров. В результате такого баланса величина зазора сетка-катод лампы ГИ-71А, работающей на частотах до 200 МГц, с выходной импульсной ВЧ мощностью до 3 МВт составляет всего $2 \div 3$ мм.

Немаловажную роль в электропрочности зазора сетка-катод играет и термоэмиссия металлической сетки, поскольку переход на сетку из пиролитического графита [5], который используется практически во всех зарубежных мощных генераторных приборах и который предполагалось использовать в лампах ГИ-71А, так и не состоялся. Всё это

приводит к тому, что электропрочность зазора сетка-катод оказывается явно недостаточной в случае использования лампы ГИ-71А в качестве модуляторной, поскольку предельное напряжение между электродами не превышает 1,5 кВ.

В свою очередь, энергия, накопленная в индуктивности вторичной обмотки импульсного трансформатора, который включён между подмодулятором и модуляторной лампой ГИ-71АМ (рисунок 4), приводит к появлению недопустимых перенапряжений на сетке при изменении нагрузки модуляторной лампы, например, при пробоях или искрениях в лампе ГИ-71А выходного ВЧ каскада, что демонстрируется на рисунке 5. Для понимания происходящих процессов проводилось моделирование этого эффекта с использованием программы Micro Cap для схемы подмодулятора, нагруженного на входное сопротивление модуляторной лампы, имитирующего изменение сетевого тока с 28А до 3А.

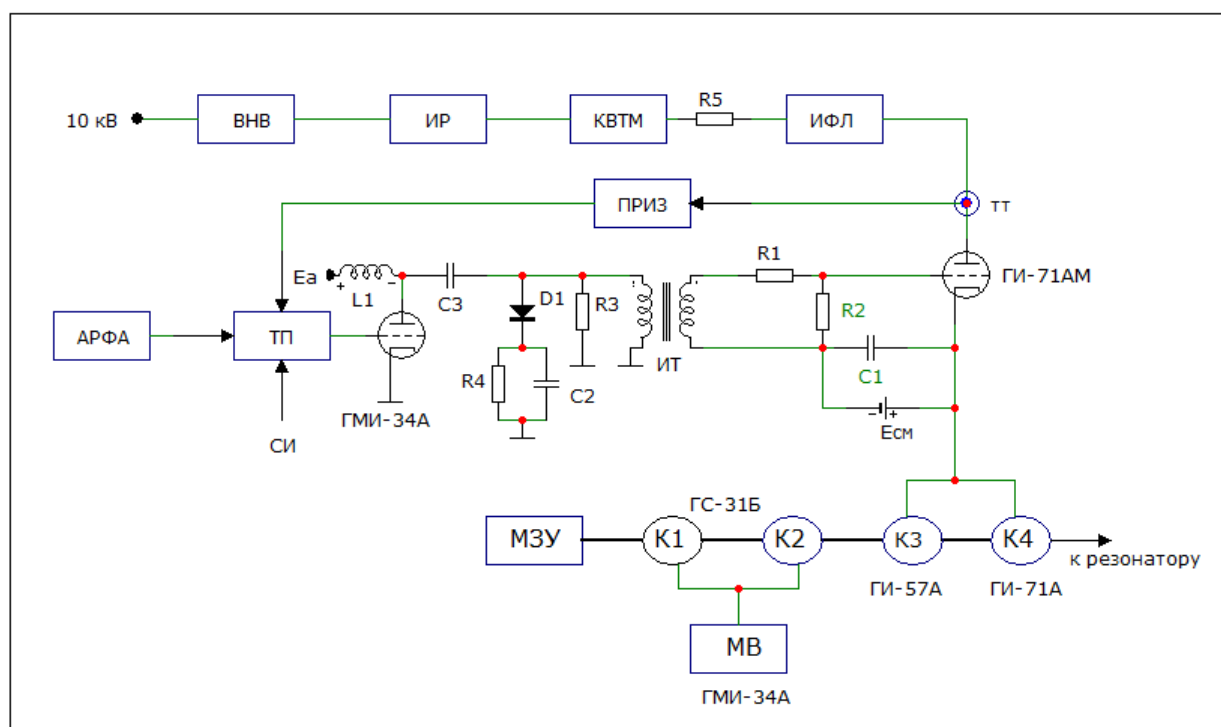


Рисунок 4 – Упрощённая схема канала усиления начальной части ускорителя. На схеме введены дополнительные обозначения: ИР- индукционный регулятор, КВТМ – ВВ выпрямитель, ВНВ - вакуумный выключатель, ТТ – трансформатор тока, ТП - транзисторный подмодулятор, МЗУ – мощное задающее устройство, АРФА – система стабилизации амплитуды и фазы ВЧ поля в резонаторе, СИ – синхроимпульс, K1÷K4 – ВЧ каскады канала усиления, МВ – модулятор, R5 – резистивная сборка, ограничивающая ток заряда ИФЛ при пробоях в нагрузке – лампе ГИ-71А (K4)

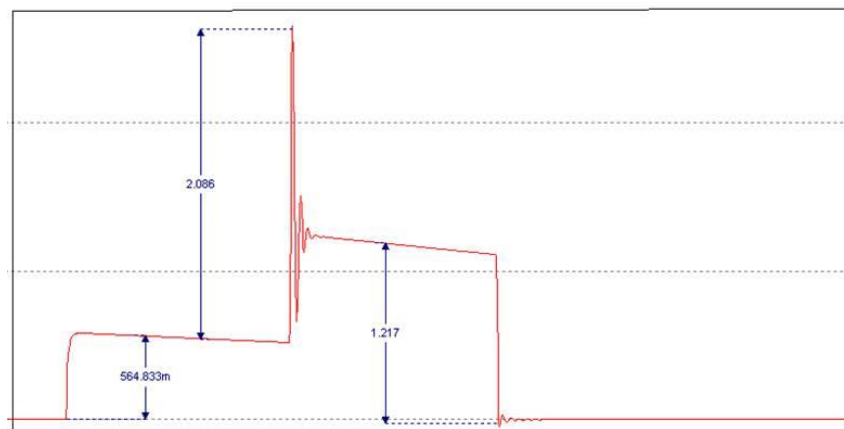


Рисунок 5 – Импульс на сетке модуляторной лампы при пробое в нагрузке – лампе выходного ВЧ каскада

Из приведенной на рисунке 5 осциллограммы следует, что бросок напряжения на сетке лампы после пробоя почти в 5 раз превышает рабочее напряжение, что приводит к пробое промежутка сетка-катод модуляторной лампы и её переходу в открытое неуправляемое состояние. Амплитуда и частота колебаний на вершине импульса определяются входной ёмкостью модуляторной лампы и индуктивностью вторичной обмотки импульсного трансформатора. При этом возникает обратный сеточный ток сопровождаемый интенсивными разрядами конденсатора смещения С1 (рисунок 4) и ИФЛ вплоть до её практически полного разряда.

Рассмотрим процессы, имеющие место в *анодной* цепи модуляторной лампы до и после перехода лампы в неуправляемое состояние в результате пробоя промежутка сетка-катод.

На рисунке 6 представлена схема ВВ питания модуляторной лампы, в которой полностью, в деталях показана только искусственная формирующая линия, состоящая из 19 ячеек, время разряда которой составляет около 400 мкс. Остальные элементы схемы, такие как ВВ выпрямитель и нагрузки линии представлены в упрощённом виде.

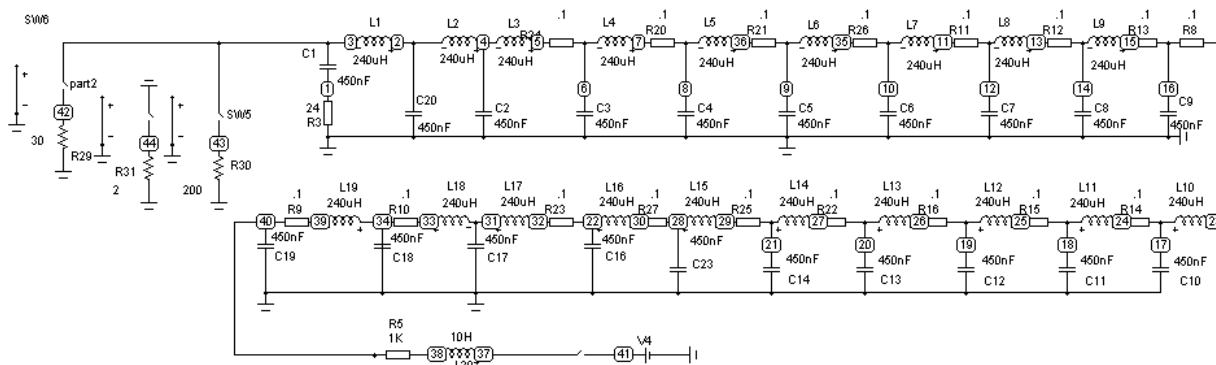


Рисунок 6 – Схема анодного питания модуляторной лампы с искусственной формирующей линией ИФЛ

Представленная схема, позволяет моделировать процессы (в масштабе 1:1000) в предварительно заряженной ИФЛ при подключении к ней через быстродействующие реле резисторов, имитирующих сопротивления, эквивалентные внутреннему сопротивлению лампы оконечного ВЧ каскада до пробоя ($R_{43} \sim 140 \text{ Ом}$) в течение 300 мкс и после пробоя в лампе ($R_{42} \sim 30 \text{ Ом}$) течение 400 мкс. Величины этих сопротивлений близки к измеренным реальным значениям при работе системы ПРИЗ.

На рисунке 7 приведены результаты моделирования, неплохо согласующимися с реальными процессами (при работе системы ПРИЗ), из которых следует, что, несмотря на прерывание запуска в момент t_2 , процесс разряда ИФЛ продолжается до практически полного разряда линии.

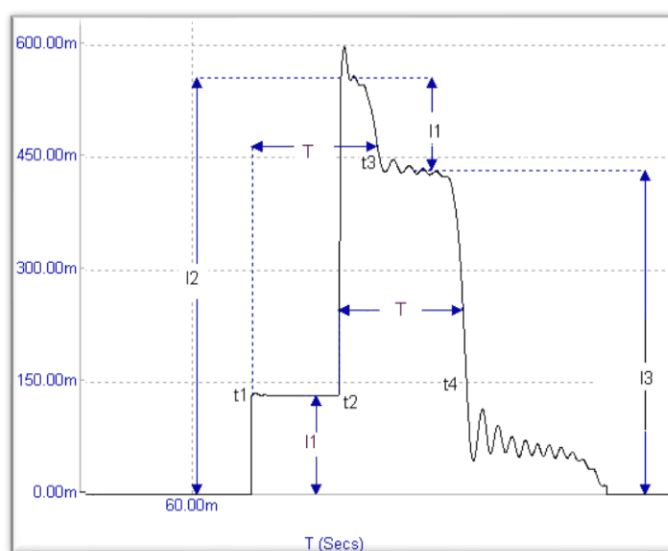


Рисунок 7 – Осциллограмма переходных процессов в модуляторе с системой ПРИЗ

Можно утверждать, что здесь имеет место суперпозиция двух переходных процессов в ИФЛ. Первый начинается с разряда линии в момент запуска модулятора t_1 и заканчивается в момент t_3 , второй - с момента пробоя t_2 лампы ГИ-71А в выходном ВЧ каскаде до момента t_4 , причём длительность обоих процессов одинаковая.

Таким образом, система ПРИЗ, которая в течение многих лет обеспечивала успешную работу модуляторов с лампой ГМИ-44А, оказалась абсолютно неэффективной после перехода на лампу ГИ-71АМ, поскольку прерывание импульса запуска модулятора системой ПРИЗ при пробое в оконечном каскаде в большинстве случаев приводит к пробое промежутка сетка-катод модуляторной лампы ГИ-71АМ, возникновению обратного сеточного тока, срабатыванию защиты «смещение» и иногда к дальнейшему развитию пробоя с полным разрядом ИФЛ и возможному срезанию шпилек в индукционном регуляторе ИР 118/60.

Рассмотрим причины низкой эффективности работы системы ПРИЗ с новой модуляторной лампой. ПРИЗ - это система с обратной связью и с задержкой в цепи обратной связи. Контролируемой величиной является анодный ток последовательно включённых модуляторной и генераторной ламп. При отклонении тока от уставки вырабатывается команда на прекращение тока за счёт запирающего транзисторного подмодулятора с последующим «обрывом» импульса модулятора. Скорость выполнения команды определяется следующими факторами.

- Быстродействием трансформатора тока в анодной цепи модуляторной лампы и входных каскадов ячейки ПРИЗ.

- Быстродействием транзисторного подмодулятора и подмодулятора на лампе ГМИ-34А с учётом параметров импульсного трансформатора, включённого между ламповым подмодулятором и сеткой модуляторной лампы ГИ-71АМ и, в частности, задержки, определяемой конструктивными особенностями ВВ трансформатора.

Как следствие, между пробоем (искрением) в генераторной лампе ГИ-71А и запирающим модуляторной лампы ГИ-71АМ появляется задержка в несколько мкс, во время которой в модуляторной лампе (вследствие пробоя в нагрузке - генераторной лампе) происходит перераспределение анодного и сеточного токов: анодный ток возрастает, а сеточный снижается. Последнее приводит к появлению перенапряжений на сетке и пробоем промежутка сетка-катод модуляторной лампы, после которого лампа перестаёт управляться по сетке и происходит интенсивный разряд конденсатора смещения обратным сеточным током. В результате модуляторная лампа остаётся открытой вплоть до полного разряда ИФЛ.

Проведенный выше анализ показал, что система ПРИЗ, которая долгие годы успешно поддерживала работу НЧУ с лампой ГМИ-44А в анодном модуляторе, оказалась полностью неработоспособной после перехода модулятора на лампу ГИ-71А. В отчёте за 2021 год рассмотрен вариант защиты модуляторной лампы от пробоев с отключенной системой ПРИЗ, который был реализован в 2022 году успешно работает.

В схеме анодного модулятора (рисунок 4) имеется три трансформатора, находящиеся под высоким напряжением: накальный, смещения и импульсный между подмодулятором и сеткой ГИ-71АМ. Наибольшие проблемы связаны с самым нагруженным накальным трансформатором, обеспечивающим мощность накала модуляторной лампы на уровне 12 кВт. Чтобы получить требуемый ток накала с минимальными тепловыделениями в обмотке, залитой эпоксидной смолой, вторичная обмотка трансформатора выполнена из медной шины 50x17 мм. Трансформатор был спроектирован под лампу ГМИ-44А с током до 2 кА и напряжением 6,3 В, в котором

вторичная обмотка выполнена в виде двух витков включённых в параллель. Очевидно, что в случае неприятностей со вторичной обмоткой (пробой или короткое замыкание витков) такой трансформатор ремонту не подлежит, а за прошедшие 40 лет после изготовления именно эти трансформаторы стали выходить из строя.

Модуляторная лампа ГИ-71АМ рассчитана на напряжение 16В и ток 1кА и при включении обоих витков выходной обмотки трансформатора последовательно напряжение накала может оказаться недостаточным. Ситуацию спасают два обстоятельства.

- Ток эмиссии генераторной лампы ГИ-71А почти в два раза превышает ток модуляторной лампы ГМИ-44А, что позволяет лампе ГИ-71А работать в качестве модуляторной при пониженной мощности накала примерно на 10 %.

- С момента изготовления трансформаторов прошло почти 40 лет и за это время появились новые материалы и комплектующие, позволяющие, в частности, обеспечить требуемую изоляцию между первичной и ВВ вторичной обмотками более простыми способами чем эпоксидная смола.

На рисунке 8 представлена фотография нового трансформатора накала, в котором изоляция между обмотками достигается за счёт использования специального провода с ВВ изоляцией, помещённого в термоусадочную трубку. Кроме того, в новом трансформаторе в 2,5 раза увеличен коэффициент трансформации, что позволило, во-первых, увеличить напряжение накала новой модуляторной лампы и, во-вторых, уменьшить токи холостого хода за счёт снижения напряжения в первичной обмотке трансформатора с 380В до 220В.



Рисунок 8 – Фотография нового разработанного и изготовленного накального трансформатора

Очевидно, что конструкция нового трансформатора с воздушным зазором не позволяет сохранить плотность тока во вторичной обмотке на прежнем уровне, поскольку вторичная обмотка выполнена проводом РКГМ-70 (4 в параллель) общим сечением 280мм^2 , в то время как в штатном трансформаторе сечение прямоугольных шин во вторичной обмотке составляло около 850 мм^2 . Вследствие этого тепловые потери во вторичной обмотке нового трансформатора с учётом выводных проводов возрастают в $3\div 4$ раза, и для охлаждения вторичной обмотки приходится дополнительно устанавливать вентиляторы. Это, с одной стороны, требует увеличения мощности трансформатора, но, с другой, использование в качестве модуляторной лампы мощного генераторного триода позволяет снизить требуемую мощность накала за счёт уменьшения нагрузки трансформатора.

Было изготовлено 4 таких трансформаторов, три из которых были установлены в первых трёх модуляторах, включая самые мощные каналы усиления КУ-2 и КУ-3.

Следует отметить, что начаты работы по изменению компоновки накального трансформатора, трансформатора смещения и пускателя включения напряжения накала. Такие изменения позволяют более оперативно решать вопросы ремонта с заменой вышедших из строя наиболее нагруженных узлов модулятора, особенно во время пучковых сеансов.

Проведенные работы позволили заметно повысить надёжность и эффективность работы системы ВЧ питания начальной части, что было подтверждено как при прогонах аппаратуры, так и в сеансах в октябре и ноябре 2022 года. В частности не было ни одного случая срезания шпилек в индукционных регуляторах, а единичные отключения носили случайный характер.

На основании многолетнего опыта работы с целью улучшения эксплуатационных характеристик были предложены и реализованы технические решения по модернизации терморегулирующих установок № 3-6 и 3-8 для двух ускоряющих резонаторов основной части ускорителя. На рисунке 9 представлены фотографии терморегулирующей установки до и после модернизации.



Рисунок 9 – Терморегулирующая установка до (слева) и после (справа) модернизации

Среди работ по модернизации системы питания электромагнитного оборудования ускорителя следует отметить модернизацию системы питания оборудования канала транспортировки пучка Н-минус и систему питания фокусирующих дублетов 4-го и 5-го секторов ускорителя. На канале транспортировки установлены современные дистанционно управляемые источники питания «Корад» (КНР) в количестве 25 штук (рисунок 10).



Рисунок 10 – Новые источники питания 1 в стойках старых источников

На 4-ом и 5-ом секторах произведена замена устаревшего оборудования системы питания фокусирующих дублетов (ИСТ 500/230), на современные программируемые источники питания производства ФРГ. На рисунке 11 показаны источник питания (ИСТ 500/230) 1, который использовался для питания восьми дублетов и новый источник 2, от каждого из которых запитывается по 4 дублета.



Рисунок 11 – Старые (1) и современные (2) источники питания

Выполнены работы по наладке модернизированной системы питания и ее интеграции в систему управления ускорителем.

Среди других работ по модернизации автоматизированной системы управления необходимо отметить завершение обновления серверов АСУ на всех секторах ускорителя, восстановление на современном уровне удаленного управления оборудованием АСУ 5-го сектора, обновление и расширение системы сбора данных на основе блоков АЦП/ЦАП/ЦВВ фирмы National Instruments, разработку нового программного

обеспечения диагностического оборудования стенда протонного облучения, разработку проекта новой системы синхронизации для поэтапной замены существующей. Первая партия нового оборудования системы синхронизации изготовлена и получена в рамках программы обновления приборной базы.

В рамках работ по обеспечению удаленного доступа к оперативным данным различных систем ускорительного комплекса продолжалась модернизация портала <http://wl.inr.ru> и электронного журнала событий в сменных сеансах работы ускорителя <https://elogouk.inr.ru>. Электронный журнал постепенно подтверждает свою эффективность и удобство использования как для оперативных записей во время сеансов, так и для последующего анализа работы ускорителя. Так за 2022 год в журнале сделано больше 3000 записей.

Среди работ по диагностике пучка следует отметить восстановление и модернизацию системы диагностики на входе в установку СВЗ-100, расширение системы диагностики исследовательского стенда протонного облучения [6], разработку и установку нового детектора профиля и положения пучка на основе свечения остаточного газа в низкоэнергетическом канале транспортировки протонов.

В 2022 году продолжалась модернизация и вакуумной системы. Можно отметить установку современных источников питания магниторазрядными насосами на втором, третьем и пятом резонаторах начальной части в количестве 30 штук и на резонаторах основной части в количестве 34 штук, а также разработку, изготовление, монтаж и наладку вакуумного оборудования нового экспериментального стенда для исследования воздействия ускоренного пучка на узлы радиоэлектронной аппаратуры.

Следует также отметить проведенную работу по модернизации систему формирования импульсов тока пучка отрицательных ионов водорода. В частности был модернизирован модулятор чоппера пучка отрицательных ионов водорода. Эта работа особенно актуальна в связи с востребованностью таких пучков. Разработана и внедрена новая мощная высоковольтная нагрузка с воздушным охлаждением (рисунок 12), что позволяет работать с пучком отрицательных ионов водорода в любых возможных режимах. Рисунок 13 демонстрирует высоковольтные импульсы на отклоняющей структуре с бегущей волной чоппера.



Рисунок 12 – Внутренний вид модулятора до (слева) и после (справа) модернизации

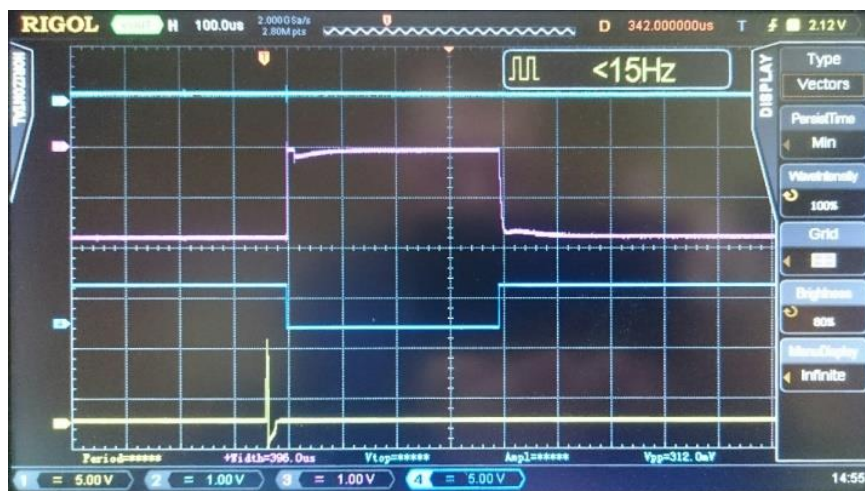


Рисунок 13 – Высоковольтные импульсы на отклоняющей структуре с бегущей волной чоппера Н-минус

Среди работ по модернизации системы авторегулирования и стабилизации амплитуд и фаз ускоряющих полей следует отметить разработку и изготовление новых блоков размножения сигналов. Всего изготовлено 5 блоков (рисунок 14), включающих около 100 модулей (рисунок 15).

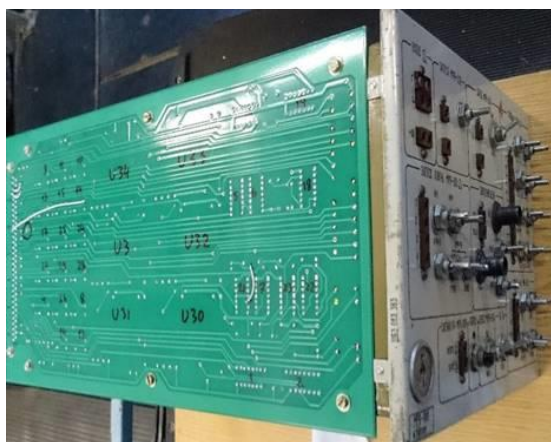


Рисунок 14 – Внешний и внутренний вид блоков размножения сигналов

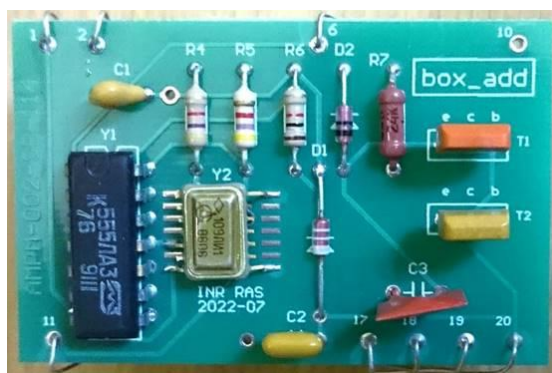


Рисунок 15 – Модуль блока размножения сигналов

3. Разработка и создание ускорителей и их элементов

В 2022 году выполнялись работы по разработке и созданию новых ускорителей и их элементов, в том числе и в сотрудничестве другими российскими и зарубежными центрами.

Так в рамках сотрудничества с ОИЯИ выполнена работа по разработке сильноточного блока питания разряда источника плазмы, системы диагностики атомарного пучка с последующим проведением исследовательских работ с источником поляризованных ионов SPI. Разработано и изготовлено устройство для диагностики нейтральных атомов водорода на основе ионизационного датчика, который устанавливается непосредственно в области ионизации поляризованных атомов источника поляризованных дейтронов и протонов ОИЯИ. Выполняются совместные с ОИЯИ исследования плотности атомарного пучка в зависимости от параметров диссоциатора и системы фокусировки атомарного пучка. Разработан и изготовлен модулятор тока разряда источника плазмы с максимальным током разряда 500 А в импульсе, длительностью 100 мкс при частоте повторения до 1 Гц и стабилизацией тока разряда на уровне $\pm 3\%$ от максимального тока разряда от импульса к импульсу. В разработанном модуляторе предусмотрена схема поджига разряда высоковольтным импульсом длительностью 10 мкс и амплитудой до 5 кВ, между катодом и анодом источника плазмы. При такой схеме не возникает разряда между корпусом газового клапана и катодом источника плазмы, не происходит загрязнения газового клапана продуктами эрозии катода. Предусмотренная частота повторения импульсов поджига разряда – до 1 Гц. Модулятор изготовлен и проводятся его испытания в ИЯИ РАН.

Продолжено участие в эксперименте CAST, проводимом в ЦЕРНе по поиску легких аксионов в потоке частиц от Солнца [7].

Заключен Меморандум о сотрудничестве между ИЯИ РАН и Институтом современной физики китайской Академии наук в области развития ускорителей, ионных источников и источников поляризованных ионов. Начаты консультации о совместной разработке источника поляризованных ионов.

В 2022 году были продолжены работы по исследованию и разработке ускоряющих структур для линейных ускорителей. В частности проведено исследование ВЧ характеристик структур для ускорения ионов низких энергий. Исследовались характеристики структуры Interdigital H (IH), [8] и Split Ring (SPR), [9]. Рассмотрены этапы разработки и сооружения ускоряющих резонаторов, от расчетного исследования характеристик периодических структур до прогнозируемых характеристик изготовленных

и настроенных резонаторов. Показано, что при явном, в разы, превосходстве ИН как периодической структуры по величине эффективного шунтового сопротивления Z_e , при формировании ускоряющих резонаторов с малым, $5 \div 7$, числом ускоряющих зазоров относительное снижение Z_e для ИН существенно больше. Прогнозируемые ВЧ характеристики изготовленных коротких резонаторов ИН и SPR различаются не более чем на 10% при явном преимуществе SPR в технологии изготовления и настройки [9]. Рассмотренные структуры имеют общую проблему – наличие на оси пучка поперечной составляющей электрического поля. Показано, что данный эффект при движении частиц в ускоряюще-фокусирующем канале ЛУ с необходимостью ведет к периодическим отклонениям сгустка от оси и росту эффективного эмиттанса [10].

Были продолжены исследования в рамках разработки предложения компактного линейного ускорителя для протонной терапии. Сформулированы условия для режимов ЛУ и разработаны алгоритмы для формирования равномерного или произвольного распределения дозы в объекте облучения. [11,12]. Для быстрого сканирования по глубина предложен метод изменения выходной энергии ускорителя в течении одного ВЧ импульса, основанный на особенностях предлагаемых научно-технических решений систем ЛУ и обеспечивающий недостижимую для ускорителей аналогичного назначения скорость изменения выходной энергии в пределах 30 МэВ за 15 мкс [13].

В рамках сотрудничества с другими российскими институтами выполнена работа по физическому обоснованию элементов линейного ускорителя отрицательных ионов водорода. Показано, что требуемые характеристики пучка на участке от 50 МэВ до 200 МэВ с запасом обеспечиваются применением схемы фокусировки ФДО и коротких резонаторов с трубками дрейфа и рабочим колебанием E01. При конечной энергии ЛУ в 200 МэВ применение структур на основе связанных ячеек в области энергий около 200 МэВ экономически не оправдано. Разработанная схема ускоряющее – фокусирующего канала с необходимым запасом применима и для более низких, вплоть до 7 МэВ, энергий частиц, превосходя по ВЧ эффективности известные аналоги.

Для разрабатываемых в ИЯИ источников поляризованных частиц (протонов и дейтронов) разработаны двухмодовые резонаторы для фиксации направления поляризации частиц. Это позволяет использовать один и тот же резонатор как для протонов, так и дейтронов. Предложено несколько технических решений, аналогов которым в литературе не известно. Составлена и направлена заявка на патент.

В 2022 году выполнен большой объем работ по разработке и созданию устройств диагностики для российских и зарубежных центров. Так были продолжены работы по созданию измерителей формы сгустков для линейных ускорителей ионов [14]. Такой

измеритель играет важную роль на этапах настройки линейных ускорителей и оптимизации продольной динамики пучка, позволяя проводить диагностику микроструктуры пучка с временным разрешением до 4 пс. Благодаря такому уникальному разрешению он нашел применение во многих крупнейших ускорительных центрах мира. В сентябре 2022 года, в рамках договора с Бельгийским центром ядерных исследований SCK-CEN, созданный в ИЯИ РАН измеритель для ускорительного комплекса MYRRHA был отправлен в Бельгию.

Среди других работ по диагностике можно отметить следующие:

- в рамках реализации мероприятий Национального центра физики и математики разработано научно-техническое обоснование создания системы диагностики пучков линейных ускорителей ионов для измерения ключевых параметров,
- разработано техническое предложение на систему диагностики пучка линейного ускорителя отрицательных ионов водорода, а также рабочая конструкторская документация на систему диагностики линейного ускорителя протонов и легких ионов,
- в рамках реализации мероприятий Федеральной научно-технической программы развития синхротронных и нейтронных исследований и исследовательской инфраструктуры разработан и изготовлен широкоапертурный охлаждаемый цилиндр Фарадея для сильноточного линейного ускорителя протонов в составе проекта исследовательского компактного источника нейтронов DARIA [15], показанный на рисунке 16.

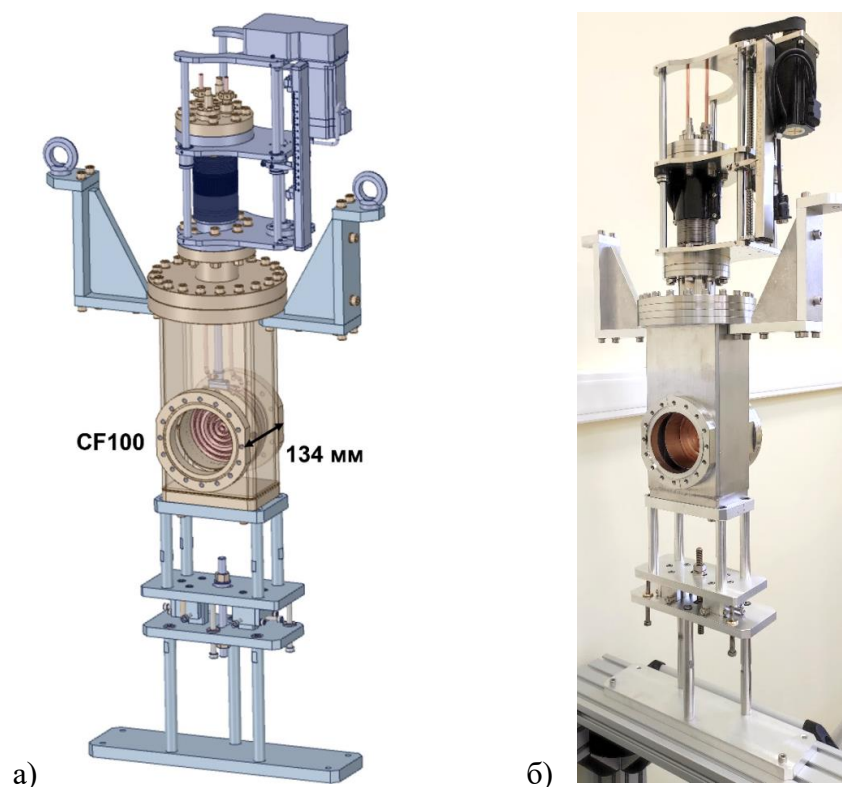


Рисунок 16 – 3Д модель (а) и фотография (б) Цилиндра Фарадея

В 2022 году совместно с ОИЯИ проводились исследования по сохранению поляризации дейтронного пучка в коллайдере НИКА в «Quasi-Frozen Spin» режиме с целью подготовки эксперимента по управлению спином.

- Исследована возможность включения фильтров Вина в оптическую структуру коллайдера НИКА для осуществления «квази-замороженного» режима работы [16].

- Исследована возможность подавления спиновой хроматичности оптики кольца за счёт включения в неё трёх семейств секступолей; обнаружена несовместность оптимальных с точки зрения спиновой и бетатронной хроматичностей рабочих точек [17, 18].

- Исследовано поведение продольно ориентированного спина в режиме «квази-замороженного спина» в разработанной оптике с учетом всех эффектов, вызывающих декогеренцию спина при движении в оптике коллайдера НИКА.

- Исследована скорость деполяризации пучка в «квази-замороженном» режиме; рассчитано максимальное время сохранения поляризации.

- Определены условия, усредняющие направления оси прецессии спина по фазовому пространству пучка с целью сохранения поляризации [16].

- Определены возможности использования метода спин-навигатора для управления ориентацией оси поляризации пучка [19].

- Произведены расчёты магнитных элементов для использования оптики арок NICA в эксперименте с поляризованными дейтронами.

- Разработана принципиальная схема магнитооптической структуры коллайдера NICA с включением отводных каналов ByPass. Проведены расчёты динамической апертуры как с выключенными Wien Filter'ами, так и включенными.

- Произведен спин-трекинг, получено подтверждение, что отводные каналы не вносят значительного искажения по сравнению с регулярной структурой.

Проведены исследования неадиабатического изменения ориентации оси поляризации пучка в «спин-прозрачной» моде коллайдера НИКА с целью подготовки эксперимента по измерению ЭДМ. Исследовано влияние скорости изменения ориентации оси поляризации дейтронного пучка в 2ST-модификации коллайдера НИКА (использующей четыре соленоиды в MPD и SPD секциях кольца) на его поляризованность и спин-когерентность [19÷21].

Выполнено исследование прохождения и поднятия критической энергии для дейтронов и протонов в коллайдере НИКА. Проведено сравнение основных аспектов разных методов прохождения критической энергии, исследовано прохождения критической энергии с использованием ВЧ структуры типа Barrier Bucket [22].

Проведены исследования возможности проведения эксперимента по поиску ЭДМ на накопительных кольцах. В частности:

- На примере ускорителя COSY в Германии исследована возможность получения пучка с большим временем когерентности (SCT) осцилляции спинов [23], что есть необходимое условие для проведения эксперимента по поиску ЭДМ.

- Было показано, что для оптимизации SCT необходимо минимизировать отклонения равновесного уровня энергии частиц [24, 25]. Была проведена успешная численная проверка решений для равновесного уровня энергии. И, как следствие, был сделан вывод о необходимости использования трёх независимых семейств секступолей для достижения большого SCT. При этом осуществляется вариация горизонтальной и вертикальной хроматичности, а также – нелинейного коэффициента сжатия орбит.

- Исследовано влияние целых и внутренних спиновых резонансов [26] на SCT протонов, обоснован выбор параметров структуры и энергии пучка из резонансной диаграммы для достижения большого SCT. Было показано, что положение рабочей точки можно изменить с помощью вариации вертикальной хроматичности.

- На основании проведённого исследования была представлена “рейстрек” структура ускорителя-прототипа по поиску ЭДМ протона (PTR), в которой была показана возможность получения SCT на уровне 1000 секунд.

Также проводилось исследование возможности управления спином на ускорителе COSY [27]. В частности исследовалась возможность управления поляризацией в «спин-прозрачной» моде в окрестности целого резонанса. Получены теоретические формулы для направления инвариантной оси и спин-тьюна для случая двух дополнительных соленоидов в кольце, а также – оценки на параметры оборудования и этапы проведения эксперимента. Исследована возможность управления поляризацией протонов с помощью ВЧ-соленоида, что является необходимым этапом для проведения экспериментальной программы на COSY.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

План работ на 2022 год выполнен полностью. Получены значимые научные результаты. Результаты НИР по задачам 1 и 3 вошли в число важнейших достижений Института в 2022 году.

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

Проведено 6 сеансов продолжительностью 1068 часов в 2022 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, спектрометр по времени замедления нейтронов в свинце СВЗ-100, комплекс протонной терапии, а также на экспериментальный стенд для исследования воздействия протонного пучка на узлы радиоэлектронной аппаратуры с энергией от 49 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 основном работы проводились с протонным пучком, с пучком отрицательных ионов водорода был проведен один сеанс длительностью 5 суток, в котором решались задачи улучшения прохождения пучка по инжекционному тракту и повышению захвата в ускоритель. Обеспечение работы ускорителя стало возможным благодаря постоянно проводимому техническому обслуживанию и модернизации оборудования ускорителя и каналов экспериментального комплекса, а также оперативному решению возникающих проблем.

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

Проводились работы по модернизации большинства систем ускорителя, среди которых следует отметить инжектор протонов, инжектор отрицательных ионов водорода, систему ВЧ питания начальной части ускорителя, систему авторегулирования собственных часто ускоряющих резонаторов, систему питания электромагнитного оборудования, автоматизированную систему управления, систему диагностики, вакуумную систему, систему формирования импульсов тока пучка отрицательных ионов водорода, систему авторегулирования и стабилизации амплитуд и фаз ускоряющих полей.

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

Среди выполненных работ следует отметить выполненные в сотрудничестве с ОИЯИ работы по разработке и созданию оборудования для источников поляризованных

ионов, а также по формированию пучков поляризованных частиц в сооружаемом коллайдере НИКА. Также следует отметить исследования по разработке ускоряющих структур для ускорения ионов низких энергий, а также исследования в рамках разработки предложения компактного линейного ускорителя для протонной терапии. Были выполнены работы по разработке конфигураций ускорителей отрицательных ионов водорода, по разработке устройств диагностики для ряда проектов ускорителей, а также научно-технического обоснования создания систем диагностики пучков линейных ускорителей ионов для измерения ключевых параметров.

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

- 1 Развитие физики и технологии ускорителей заряженных частиц / С.Л. Богомолов, Б.Н. Гикал, Л.В. Григоренко [и др.] ; ред.: Б. Ю. Шарков, И. Н. Мешков. — М.: РАН, 2021. — 140 с. — ISBN 978-5-907366-27-5.
- 2 High responsivity secondary ion energy analyzer / A.S. Belov [et al.] // Journal of Instrumentation. — 2018. — Vol. 13, T05001.
- 3 Анализатор энергии вторичных ионов для измерения степени компенсации пространственного заряда ионного пучка / А.С. Белов [и др.] // Приборы и техника эксперимента. — 2019. — No. 5. — С. 19–25.
- 4 Kvasha A.I., Serov V.L. Powerful RF triode as anode modulator vacuum tube // RF power structures and systems: Материалы 25-й Российской конференции по ускорителям заряженных частиц, RuPAC2016 / г. Санкт-Петербург (ноябрь 2016). — 2016. — С. 294-296. — ISBN 978-3-95450-181-6.
- 5 A new 200 MHz powerful pulse triode for the output power amplifier DTL RF system / A.I. Kvasha [et al.] // Conf. Proc. C. — 2001. — Vol. 0106181. — P. 1222-1224.
- 6 Development of proton irradiation facility at the INR linac S. Bragin [et al.] // Journal of Physics: Conference Series. — 2019. — Vol. 1238. — P. 012066. — DOI: 10.1088/1742-6596/1238/1/012066.
- 7 Search for Dark Matter Axions with CAST-CAPP C.M. Adair [et al.] // Nature Communications. — 2022. — Vol.13. — P. 1-9. — DOI: 10.1038/s42467-022-33913-6.
- 8 Weis T., Klein H., Schempp A. Linear accelerators excited in TE(111)-mode // Proc. of the 1984 Linear Accelerators Conference / г. Seeheim, Germany. — 1984. — P. 417-419. — URL: <https://accelconf.web.cern.ch/l84/papers/thp0033.pdf>.
- 9 Парамонов В.В. Анализ прогнозируемых характеристик ускоряющих резонаторов для ускорителей ионов низких энергий // Труды 8-й Международной конференции «Лазерные, плазменные исследования и технологии ЛаПлаз-2022» / г. Москва, НИЯУ МИФИ. — 2022. — С. 310. — URL: <https://laplas.mephi.ru/wp-content/uploads/2022/04/Тезисы2022.pdf>.
- 10 Особенности Динамики Частиц и Прогнозируемые Конечные Электродинамические Характеристики для Коротких Ускоряющих Резонаторов в Ускорителе Ионов Низких Энергий / А.П. Дуркин [и др.] XIV Международный семинар памяти профессора В.П. Саранцева «Проблемы ускорителей заряженных частиц: Ускорители для прикладных целей» / г. Алушта, Крым (сентябрь 2022). — 2022. Электронный ресурс <https://indico.jinr.ru/event/2945/timetable/#20220920>.

- 11 Овчинникова Л.Ю., Курилик А.С. Машинное обучение для формирования распределения дозы по глубине в протонной терапии // Труды 8-й Международной конференции «Лазерные, плазменные исследования и технологии ЛаПлаз-2022» / г. Москва, НИЯУ МИФИ. — 2022. — С. 297. — URL: <https://laplas.mephi.ru/wp-content/uploads/2022/04/Тезисы2022.pdf>.
- 12 Ovchinnikova L. Yu., Kurilik A. S. Machine Learning for Depth Dose Distribution Forming in Proton Therapy // Physics of Atomic Nuclei. — 2022. — Vol. 85. — No. 10. — P. 814. — DOI: 10.1134/S1063778822100404.
- 13 Основная Часть Линейного Ускорителя для Протонной Терапии / В.В. Парамонов [и др.] XIV Международный семинар памяти профессора В.П. Саранцева «Проблемы ускорителей заряженных частиц: Ускорители для прикладных целей» / г. Алушта, Крым (23 сентября 2022). Электронный ресурс <https://indico.jinr.ru/event/2945/timetable/#20220920>.
- 14 Gavrilov S., Feschenko A., Gaidash V. Development and implementation of bunch shape instrumentation for ion linacs // Control and diagnostic systems: Материалы 27-й Российской конференции по ускорителям заряженных частиц, RuPAC'21 / г. Алушта, Крым (сентябрь 2021). — 2021. — С. 1-6. — DOI:10.18429/JACoW-RuPAC2021-MOX02.
- 15 Kropachev G., Kulevoy T., Sitnikov A. The proton linac for compact neutron source DARIA // Journal of Surface Investigation: X-ray, Synchrotron and Neutron Techniques. — 2019. — Vol. 13. — No. 6. — P. 1126-1131. — DOI: 10.1134/S1027451019060399.
- 16 Quasi-Frozen Spin Concept of Magneto-Optical Structure of NICA Adapted to Study the Electric Dipole Moment of the Deuteron and to Search for the Axion / Y.V. Senichev [et al.] // MC5: Beam Dynamics and EM fields: Материалы 13th. Int. Particle Acc. Conf. (IPAC'22) / г. Бангкок, Тайланд (июнь 2022). — С. 492-495. — URL: <https://jacow.org/ipac2022/papers/mopotk024.pdf>.
- 17 Аксентьев А.Е., Мельников А.А., Сеничев Ю.В. Исследование спин-декогеренции пучка при неадиабатическом изменении ориентации оси стабильного спина // Труды 8-й Международной конференции «Лазерные, плазменные исследования и технологии ЛаПлаз-2022» / г. Москва, НИЯУ МИФИ. — 2022. — С. 292. — URL: <https://laplas.mephi.ru/wp-content/uploads/2022/04/Тезисы2022.pdf>.
- 18 Investigation of Spin-Decoherence in the NICA Storage Ring for the Future EDM-Measurement Experiment / A.E. Aksentyev [et al.] // MC4: Hadron Accelerators: Материалы 13th. Int. Particle Acc. Conf. (IPAC'22) / г. Бангкок, Тайланд (июнь 2022). — С. 1835-1837. — URL: <https://jacow.org/ipac2022/papers/wepopt006.pdf>.

- 19 Ion polarization control in the MPD and SPD detectors of the NICA collider / Kovalenko A.D. [et al.] // Circular and linear colliders: Материалы 6th Int. Particle Acc. Conf. (IPAC'15) / г. Ричмонд, Вирджиния, США (Май 2015). — С. 2031-2033. — URL: <https://accelconf.web.cern.ch/ipac2015/papers/tupty017.pdf>.
- 20 Aksentyev A. E., Senichev Y. V. Spin decoherence in the Frozen Spin storage ring method of search for a particle EDM // MC4: Hadron Accelerators: Материалы 10th Int. Particle Acc. Conf. (IPAC'19) / г. Мельбурн, Австралия (май 2019), — С. 864-866. — URL: <http://jacow.org/ipac2019/papers/mopts012.pdf>.
- 21 Transparent spin method for spin control of hadron beams in colliders / Y.N. Filatov [et al.] // Phys. Rev. Lett. — 2022. — Vol. 124. — № 19. — P. 194801. — URL: <https://link.aps.org/doi/10.1103/PhysRevLett.124.194801>.
- 22 Acceleration and Crossing of Transition Energy Investigation Using an RF Structure of the Barrier Bucket Type in the NICA Accelerator Complex / S. D. Kolokolchikov [et al.] // MC1: Circular and Linear Colliders: Материалы 13th. Int. Particle Acc. Conf. (IPAC'22) / г. Бангкок, Тайланд (июнь 2022). — С. 1829-1831. — DOI:10.18429/JACoW-IPAC2022-WEPOPT004.
- 23 How to Reach a Thousand-Second in-Plane Polarization Lifetime with 0.97-GeV/c Deuterons in a Storage Ring / G. Guidoboni [et al.] (JEDI Collaboration). — Phys. Rev. Lett. — 2016. — Vol. 117. — № 5. — P. 054801. — DOI: 10.1103/PhysRevLett.117.054801.
- 24 Investigation of Polarized Proton Spin Coherence Time at Storage Rings / A. A. Melnikov [et al.] // MC1: Circular and Linear Colliders: Материалы 13th. Int. Particle Acc. Conf. (IPAC'22) / г. Бангкок, Тайланд (июнь 2022). — С. 1832-1834. — DOI:10.18429/JACoW-IPAC2022-WEPOPT005.
- 25 Spin Tune Decoherence Effects in Electro- and Magnetostatic Structures / Y. Senichev [et al.] // Beam Dynamics and Electromagnetic fields: Материалы 4th Int. Particle Acc. Conf. (IPAC'13) / г. Шанхай, Китай (май 2013). — С. 2579-2581. — ISBN: 978-3-95450-122-9.
- 26 Mane S.R., Shatunov Yu. M., Yokoya K. Spin-polarized charged particle beams in high-energy accelerators // Reports on Progress in Physics. — 2005. — Vol. 68. — № 9. — P. 1997. — DOI: 10.1088/0034-4885/68/9/R01.
- 27 Spin Navigator Based on Correcting Dipoles of the JINR Nuclotron Y.N. Filatov [et al.]. — JETP Lett. — 2022. — Vol. 116. — P. 413-419. — URL: <https://doi.org/10.1134/S0021364022601762>.

ПРИЛОЖЕНИЕ А

Список публикаций исполнителей отчета за 2022 г.

А.1 Статьи в журналах, главы в книгах, материалы конференций, индексируемые в Web of Science, Scopus.

1 Search for Dark Matter Axions with CAST-CAPP C.M. / Adair [et al.] // Nature Communications. — 2022. — Vol.13. — P. 1-9. — URL: <https://doi.org/10.1038/s41467-022-33913-6>.

2 Spin Navigator Based on Correcting Dipoles of the JINR Nuclotron / Y.N. Filatov [et al.]. — JETP Lett. — 2022. — Vol. 116. — № 7. — P. 413-419. — DOI: <https://doi.org/10.1134/S0021364022601762>.

А.3 Статьи в журналах и сборниках, материалы конференций, главы в книгах, индексируемые РИНЦ

1 Парамонов В.В. Анализ прогнозируемых характеристик ускоряющих резонаторов для ускорителей ионов низких энергий // Труды 8-й Международной конференции «Лазерные, плазменные исследования и технологии ЛаПлаз-2022» / г. Москва, НИЯУ МИФИ. — 2022. — С. 310. — URL: <https://laplas.mephi.ru/wp-content/uploads/2022/04/Тезисы2022.pdf>.

2 Овчинникова Л.Ю., Курилик А.С. Машинное обучение для формирования распределения дозы по глубине в протонной терапии // Труды 8-й Международной конференции «Лазерные, плазменные исследования и технологии ЛаПлаз-2022» / г. Москва, НИЯУ МИФИ. — 2022. — С. 297. — URL: <https://laplas.mephi.ru/wp-content/uploads/2022/04/Тезисы2022.pdf>.

3 Аксентьев А.Е., Мельников А.А., Сеничев Ю.В. Исследование спин-декогеренции пучка при неадиабатическом изменении ориентации оси стабильного спина // Труды 8-й Международной конференции «Лазерные, плазменные исследования и технологии ЛаПлаз-2022» / г. Москва, НИЯУ МИФИ. — 2022. — С. 292. — URL: <https://laplas.mephi.ru/wp-content/uploads/2022/04/Тезисы2022.pdf>.

4 Особенности Ускорителя Дейтронов на Основе Структуры с Пространственно-Однородной Фокусировкой / Ю.В. Сеничев [et al.] // Труды 8-й Международной конференции «Лазерные, плазменные исследования и технологии ЛаПлаз-2022» / г. Москва, НИЯУ МИФИ. — 2022. — С. 298. — URL: <https://laplas.mephi.ru/wp-content/uploads/2022/04/Тезисы2022.pdf>.

5 Melnikov A.A., Aksentyev A.E., Senichev Y.V. Investigation of Proton Spin Decoherence Mechanisms at COSY. — Physics of Atomic Nuclei. — 2022. — Vol. 85. — №. 10. — P. 1–5.

А.4 Статьи в журналах из списка ВАК, не входящих в перечень RSCI.

1 Ovchinnikova L.Yu., Kurilik A.S. Machine Learning for Depth Dose Distribution Forming in Proton Therapy // Physics of Atomic Nuclei. — 2022. — Vol. 85. — № 10. — P. 814. — DOI: 10.1134/S1063778822100404.

А.6 Иные публикации по теме

1 Investigation of Spin-Decoherence in the NICA Storage Ring for the Future EDM-Measurement Experiment / A.E. Aksentyev [et al.] // MC4: Hadron Accelerators: Материалы 13th. Int. Particle Acc. Conf. (IPAC'22) / г. Бангкок, Тайланд (июнь 2022). — С. 1835-1837. — URL: <https://jacow.org/ipac2022/papers/wepopt006.pdf>.

2 Investigation of Polarized Proton Spin Coherence Time at Storage Rings / A. A. Melnikov [et al.] // MC1: Circular and Linear Colliders: Материалы 13th. Int. Particle Acc. Conf. (IPAC'22) / г. Бангкок, Тайланд (июнь 2022). — С. 1832-1834. — DOI:10.18429/JACoW-IPAC2022-WEPOPT005.

3 Quasi-Frozen Spin Concept of Magneto-Optical Structure of NICA Adapted to Study the Electric Dipole Moment of the Deuteron and to Search for the Axion / Y.V. Senichev [et al.] // MC5: Beam Dynamics and EM fields: Материалы 13th. Int. Particle Acc. Conf. (IPAC'22) / г. Бангкок, Тайланд (июнь 2022). — С. 492-495. — URL: <https://jacow.org/ipac2022/papers/mopotk024.pdf>.

4 First Search for Axion-Like Particles in a Storage Ring Using a Polarized Deuteron Beam / S. Karanth [et al.] (JEDI Collaboration). — 2022. — URL: [arXiv:2208.07293](https://arxiv.org/abs/2208.07293) (дата обращения 15.08.2022).

5 Acceleration and Crossing of Transition Energy Investigation Using an RF Structure of the Barrier Bucket Type in the NICA Accelerator Complex / S. D. Kolokolchikov [et al.] // MC1: Circular and Linear Colliders: Материалы 13th. Int. Particle Acc. Conf. (IPAC'22) / г. Бангкок, Тайланд (июнь 2022). — С. 1829-1831. — DOI:10.18429/JACoW-IPAC2022-WEPOPT004.

6 Conception of High Intensive Polarized Proton Beam Formation in NICA Collider / E. Syresin [et al.] // MC1: Circular and Linear Colliders: Материалы 13th Int. Particle Acc. Conf. (IPAC'22) / г. Бангкок, Тайланд (июнь 2022). — С. 1822-1824. — URL: <https://doi.org/10.18429/JACoW-IPAC2022-WEPOPT002>.

7 Колокольчиков С.Д., Сеничев Ю.В. Основные Аргументы в Пользу Прохождения и Повышения Критической Энергии Синхротрона // Труды 8-й Международной конференции «Лазерные, плазменные исследования и технологии ЛаПлаз-2022» / г. Москва, НИЯУ МИФИ. — 2022. — С. 305. — URL: <https://laplas.mephi.ru/wp-content/uploads/2022/04/Тезисы2022.pdf>.