

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. № АААА-А16-116022510112-4

Рег. №



УТВЕРЖДАЮ
Директор ИЯИ РАН,
профессор РАН

М.В. Либанов

«31» января 2021 г.

ОТЧЕТ
О НАУЧНО-ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКОЙ РАБОТЕ
АААА-А16-116022510114-8
ФИЗИКА И ТЕХНИКА УСКОРИТЕЛЕЙ; ФИЗИКА ПУЧКОВ
ЗАРЯЖЕННЫХ ЧАСТИЦ
(промежуточный за 2020 год, 2 этап)

ФЦП

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

А.В. Фещенко
«31» января 2021 г.

Москва 2021 г.

СПИСОК ИСПОЛНИТЕЛЕЙ

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



31.01.2021

подпись, дата

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

Исполнители:

Главный инженер Отдела
ускорительного комплекса

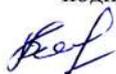


31.01.2021

подпись, дата

В.Л. Серов
(введение, заключение,
раздел 1,2,3)

Зав. лаб., к.ф.-м.н.

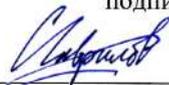


31.01.2021

подпись, дата

А.С. Белов
(раздел 1,2,3)

Зав. лаб., к.ф.-м.н.



31.01.2021

подпись, дата

С.А. Гаврилов
(раздел 1, 2, 3)

В. н.с., д.ф.-м.н.



31.01.2021

подпись, дата

Ю.В.Сеничев
(раздел 3)

РЕФЕРАТ

Отчёт содержит: 23 с., 12 рис.

Ключевые слова: СИЛЬНОТОЧНЫЙ УСКОРИТЕЛЬ, ИСТОЧНИКИ ЧАСТИЦ, ИНЖЕКТОР ПРОТОНОВ, АВТОМАТИЗАЦИЯ УСКОРИТЕЛЯ, ДИАГНОСТИКА ПУЧКОВ, КАНАЛЫ ТРАНСПОРТИРОВКИ ПУЧКОВ, ВЧ ПИТАНИЕ.

В отчёте представлены результаты фундаментальных и прикладных работ, выполненных в 2020 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).

Выполнялись работы по программе фундаментальных научных исследований государственных академий наук на 2013-2020 годы, пункт 15.

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 радиоизотопный комплекс и экспериментальный стенд для исследования воздействия пучка на узлы радиоэлектронной аппаратуры.

В 2020 году проведено 4 сеанса продолжительностью 1100 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, системы высокочастотного питания, система диагностики, система контроля и управления, система питания электромагнитного оборудования, система измерения потерь пучка, система быстрой аварийной защиты 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 элементов ускорителей».

Объектом исследования являются элементы ускорителей, такие как, например, источники ионов, ускоряющие структуры, устройства диагностики и другие устройства.

Цель работы — разработка и создание элементов ускорителей не только для линейного ускорителя ИЧЯИ 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.....	9
3. Разработка и создание элементов ускорителей	16
ЗАКЛЮЧЕНИЕ.....	21
ПУБЛИКАЦИИ.....	23

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 140 сеансов общей продолжительностью 50496 часов, в том числе 4 сеанса общей продолжительностью 1100 часов в 2020 году, направленных на выполнение государственного задания, программ РАН, планов и научной программы Института, соглашений со сторонними организациями. Проводились работы по ускорению пучка отрицательных ионов водорода, включая ускорение в одном макроимпульсе, но со сдвигом по времени, двух пучков: протонов и отрицательных ионов водорода. 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».

Необходимость постоянного совершенствования 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 2020 году проводились работы по модернизации большинства систем ускорителя, среди которых следует отметить систему инъекции, каналы транспортировки пучков, системы высокочастотного питания, систему диагностики пучка, систему контроля и управления, систему измерения потерь пучка, систему быстрой аварийной защиты и другие системы.

3. Задача «Разработка и создание элементов ускорителей».

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 2020 году проводились работы по разработке ускоряющего резонатора для ускорителя ИЯИ РАН, источников поляризованных ионов для ОИЯИ, устройств диагностики для лабораторий, GSI (Германия) и MYRRHA (Бельгия), компактного линейного ускорителя для протонной терапии, линейного ускорителя ионов гелия-4 на энергию 50 МэВ для наработки медицинских изотопов, ускоряющего резонатора и резонатора-группирователя для лаборатории DESY (Германия), корректора пучка позитронов низкой энергии для эксперимента AEGIS в ЦЕРНе, инжекторов дейтронов и альфа-частиц, Также проводились расчетно-теоретические работы по подготовке и обоснованию экспериментов по поиску электрического дипольного момента дейтрона на синхротроне COSY (FZJ, Германия) и строящемся комплексе NICA (ОИЯИ), метода управления спином для протонов и дейтронов, резонансного метода подъема критической энергии в кольце NICA для поляризованного протонного пучка.

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 2020 года проведено 140 сеансов, общей продолжительностью 50496 часов, в том числе 4 сеанса продолжительностью 1100 часов в 2020 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 радиоизотопный комплекс и экспериментальный стенд для исследования воздействия пучка на узлы радиоэлектронной аппаратуры с энергиями частиц от 75 МэВ до 267 МэВ. В отладочном режиме проводились работы с энергией пучка 305 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 170 мкс. Частота повторения импульсов регулировалась от единичных импульсов до 50 Гц.

Были продолжены работы по обеспечению ускорения пучка отрицательных ионов водорода. Один из указанных четырех сеансов был специально посвящен решению этой задачи. Впервые получено одновременное ускорение протонов и ионов H-минус. Ускорение осуществлялось в одном ВЧ импульсе, но со сдвигом по времени до энергии 143 МэВ. При этом пучок транспортировался на выход ускорителя. На рис. 1 показаны сигналы с индукционных датчиков тока на выходе начальной части ускорителя с энергий 100 МэВ (а) и на выходе ускорителя с энергией 143 МэВ (б). Отметим, что регистрация представленных кривых проводилась в разное время для разных режимов транспортировки пучка протонов.

Можно также отметить работу, которая потребовала реализации необычного для сильноточного ускорителя режима. В октябрьском сеансе, в числе прочих объектов, на стенде протонного облучения было проведено тестирование оптического спектрометра космических лучей (рис. 2), представленного исследователями из МФТИ и ИКИ РАН и требовавшего как точной настройки положения и профиля пучка для прохождения

протонов через весь объем спектрометра, так и тонкой регулировки потока протонов в диапазоне экстремально низких интенсивностей пучка.

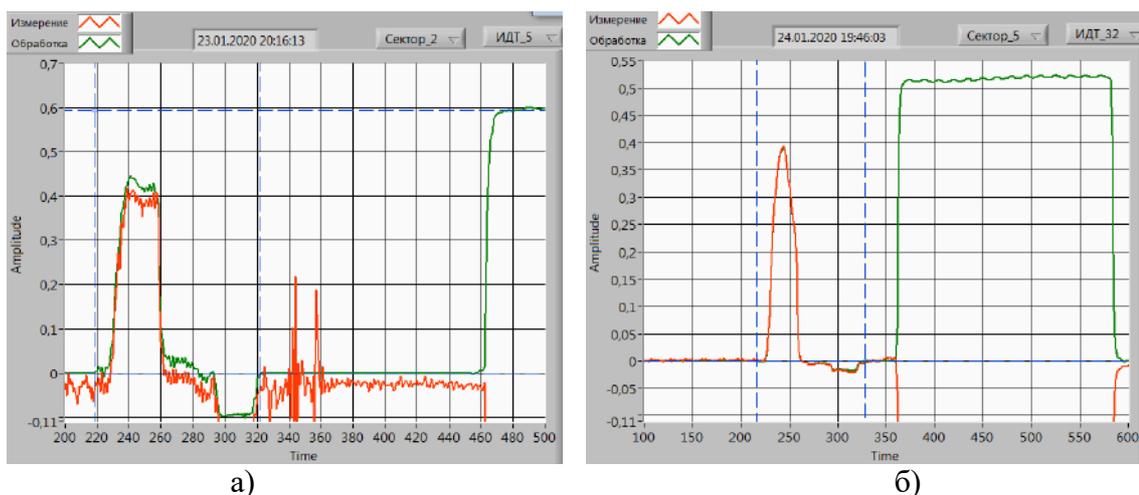


Рис. 1. а) Сигнал ИДТ-5 на выходе начальной части от пучков H^+ (7.5 мА) и H^- (1.7 мА)
б) Сигнал ИДТ-32 на выходе ЛУ от пучков H^+ (7.7 мА) и H^- (0.3 мА)



Рис. 2. Испытания спектрометра космических лучей МФТИ – ИКИ РАН на экспериментальном стенде.

2. Модернизация систем сильноточного линейного ускорителя ионов водорода ИЯИ РАН

В проведенных сеансах выполнены испытания модернизированного модулятора генератора импульсов 400 кВ в инжекторе протонов с новой сборкой тиристорных ключей в качестве коммутирующего устройства. В течение всего 2020 года не произошло ни

одного отказа тиристорных ключей. В сборках не было выхода из строя ни одного тиристора или защитных варисторов. Высокая надежность тиристорных ключей по сравнению с ключами на основе тиратронов привела к повышению надежности работы инжектора протонов. Фотография тиристорных сборок показана на рис.3.

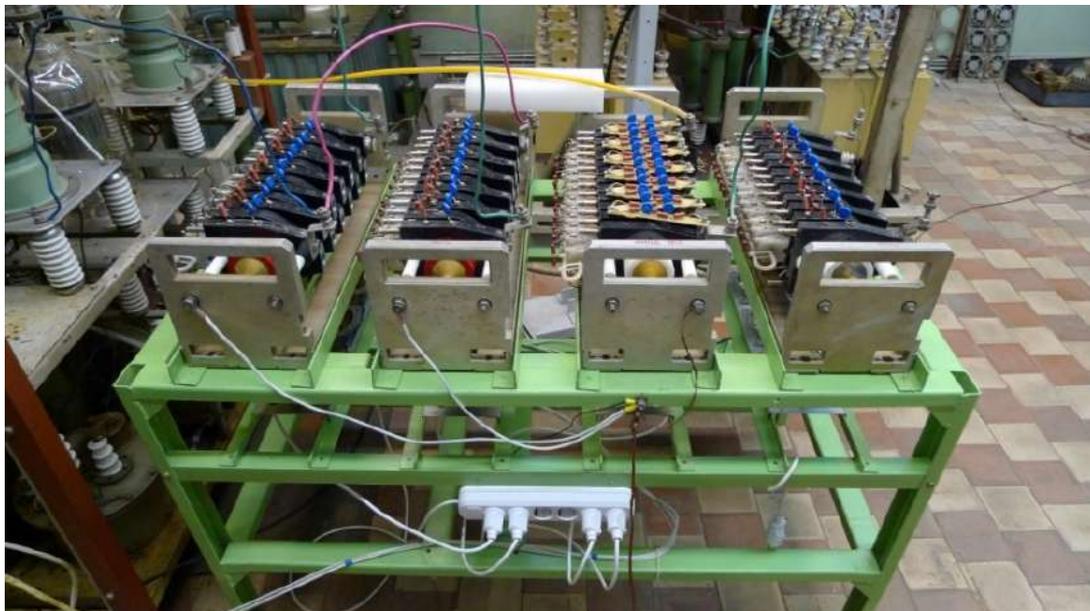


Рис. 3. Тиристорные ключи модулятора генератора высоковольтных импульсов инжектора протонов.

Среди других работ по инжектору протонов можно отметить разработку и изготовление деталей и узлов для модернизации оборудования подачи водорода в газовую линию инжектора, проведение исследований процесса компенсации пространственного заряда протонного пучка на выходе инжектора, проведение сравнения измеренных данных для степени компенсации протонного пучка в зависимости от плотности тока с теоретической моделью, разработку и изготовление эмиттера электронов низкой энергии для калибровки спектрометра энергии медленных ионов и выполнение калибровки, разработку и изготовление профилометра протонного пучка 400 кэВ на основе коллектора с запирающим вторичных электронов и проведение измерений профиля протонного пучка 400 кэВ.

На инжекторе отрицательных ионов водорода выполнен ремонт и модернизация блока вытягивающего напряжения для источника ионов H⁻. Вытягивающее напряжение повышено до 25 кВ (по сравнению с 15 кВ до модернизации). Модернизированный высоковольтный блок показан на рис. 4.



а)



б)

Рис. 4. а) Высоковольтный блок генератора вытягивающего напряжения для источника ионов Н⁻. б) – осциллограммы отрицательного импульсного вытягивающего напряжения (зеленый) с амплитудой 25 кВ и зарядного напряжения (желтый).

Разработан и изготовлен блок усилителя для измерения тока пучка ионов Н⁻ и блок повторителей с оптронной развязкой для токового сигнала и сигналов синхроимпульса ионного источника и сигнала и емкостного делителя генератора высоковольтных импульсов инжектора ионов Н⁻. Эти блоки позволили радикально уменьшить наводки на измерительные сигналы и синхроимпульс запуска источника ионов Н⁻ и повысить надежность работы инжектора ионов Н⁻. Разработан и изготовлен блок управления высоковольтным напряжением генератора высоковольтных импульсов инжектора ионов Н⁻. Разработан и изготовлен блок релейной стабилизации для генератора высоковольтных импульсов инжектора Н⁻. Данный блок выполняет автоматическую коррекцию входного напряжения в ГВВИ, что уменьшает вероятность отклонения энергии ионов на выходе инжектора от заданного значения при колебаниях напряжения сети.

В результате проведенных работ на выходе инжектора ионов Н⁻ получен пучок с током 15 мА и обеспечена длительная и устойчивая работ инжектора в сеансе.

Среди работ по модернизации оборудования системы диагностики пучка ускорителя и экспериментального комплекса следует отметить калибровку зеркально-линзового тракта ионизационного монитора поперечного сечения пучка, ремонт и модернизацию блоков питания предусилительной электроники профилометров, разработку, изготовление и установку новых помехозащищенных предварительных усилителей ионизационных камер в системе измерения потерь пучка, введение в систему быстрой аварийной защиты сигналов с ионизационных камер. На канале транспортировки пучка на комплекс протонной терапии установлен люминофорный экран и видеочкамаера для контроля положения и профиля пучка, а также новый многоанодный газовый счётчик для измерений положения, профилей и тока пучка на входе в комплекс (Рис. 5).



Рис. 5. Мультианодный газовый счётчик и люминофор на входе в комплекс протонной терапии.

На протяжении года проводились работы по профилактике, ремонту и модернизации системы управления ускорительным комплексом направленные на поддержание работоспособности и расширение функциональных возможностей системы, включая сетевое оборудование. В частности:

- усовершенствована система управления коллимирующей лепестковой диафрагмой на входе в первый резонатор ускорителя;
- разработана и введена в эксплуатацию система подсчета частоты импульсов тока пучка на основе данных с индукционного датчика тока, установленного после первого резонатора начальной части;
- отремонтирована, модернизирована и введена в работу система сбора и обработки данных совместно с системой блокировки пучка от аварийных сигналов ВЧ-каналов четвертого сектора ускорителя;
- усовершенствованы система сбора данных и система регистрации событий линейного ускорителя;
- установлено новое сетевое оборудование, в том числе для создания единой сети Wi-Fi,
- пропускная способность пользовательской сети с выходом в Интернет увеличена со 100 Мбит/с до 1 Гбит/с с улучшением защиты от внешних и внутренних сетевых угроз,
- установлены новые серверы сбора и обработки данных линейного ускорителя,

– установлены новые источники бесперебойного питания для уменьшения влияния нестабильностей работы электросети на работу сетевого и серверного оборудования.

В рамках работ по обеспечению удаленного доступа к оперативным данным различных систем ускорительного комплекса проведена модернизация веб-портала <http://wl.inr.ru> и запущен новый интернет-ресурс <https://elougouk.inr.ru> – электронный журнал событий в сменных сеансах работы ускорителя (Рис. 6). Электронный журнал содержит оперативную информацию, регистрируемую начальником смены (Рис. 7) и оператором пучка, а также различными подразделениями ускорителя и пользователями. Журнал русифицирован, зарегистрирован с отдельным доменным именем и имеет персонализированный доступ по протоколу https из внутренних и внешних сетей. Система резервного копирования сохраняет данные журнала как на несколько локальных физических носителей, так и в облачное хранилище.

Журнал		IDS	Дата последней записи
Ускоритель			
Начальник смены	Электронный журнал Начальника смены	1995	24.12.2020 20:16:57
Лаборатории пучка			
Лаборатория пучка	Электронный журнал Лаборатории пучка	1316	24.12.2020 20:23:59
СПРУТ	Система поддержки принятия решений по настройке ускорителя	18	24.12.2020 15:51:46
ВЧ-1	Электронный журнал Сектора ВЧ-питания начальной части ЛУ	14	21.10.2020 14:46:12
ВЧ-2	Электронный журнал Сектора ВЧ питания основной части ЛУ	78	23.12.2020 3:26:04
Пользователи			
КПТ	Электронный журнал Комплекса протонной терапии	49	24.12.2020 18:19:38
РАДЭКС	Электронный журнал установки РАДЭКС	122	17.12.2020 12:00:02
ИН-06	Электронный журнал установки ИН-06	50	22.12.2020 8:56:29
ИК	Электронный журнал Изотопного комплекса	4	28.10.2020 9:41:46
СПО	Электронный журнал Стенда протонного облучения на выходе ЛУ (83я ось)	98	27.10.2020 20:06:34

Рис.6. Стартовая страница электронного журнала ОУК <https://elougouk.inr.ru>.

ID	Дата	Группа	Автор	Статус	Система	Событие	Текст
1895	24.12.2020 20:16:57	НС	Набока	Смену сдал			Отключение систем. Всех с наступающим Новым Годом!
1894	24.12.2020 19:26:36	Пучок	Гаврилов	Пучок ВЫКЛ			Программа на КПТ завершена. Начинаем отключение.
1893	24.12.2020 19:12:32	НС	Набока	Пучок ВКЛ		1 Гц	1 Гц, 80 мкс, 7 мА, 1 импульс
1892	24.12.2020 19:01:56	НС	Набока	Пучок ВКЛ		1 Гц	1 Гц, 107 мкс, 7 мА, 1 импульс
1891	24.12.2020 18:30:01	НС	Набока	Пучок ВКЛ		1 Гц	1 Гц, настройка пучка
1890	24.12.2020 18:19:38	НС	Набока	Пучок ВКЛ		50 Гц	50 Гц, 80 мкс, 1 мА, 5 импульсов
1889	24.12.2020 18:12:25	НС	Набока	Пучок ВКЛ		50 Гц	50 Гц, 80 мкс, 1 мА, 10 импульсов
1888	24.12.2020 17:49:14	НС	Набока	Пучок ВКЛ		50 Гц	50 Гц, 80 мкс, 1 мА, 20 импульсов
1887	24.12.2020 17:45:39	НС	Набока	Пучок ВКЛ		1 Гц	
1886	24.12.2020 17:32:04	НС	Набока	Отключение	ВЧ-1	КУ 2-4	

Рис. 7. Пример страницы электронного журнала начальника смены.

Наиболее проблемной системой ускорителя является система высокочастотного (ВЧ) питания начальной части. На протяжении всего времени существования аппаратуры систем ВЧ питания резонаторов начальной части ускорителя велась непрерывная модернизация ВЧ каскадов и системы высоковольтного импульсного питания ламп ВЧ каскадов. В частности проводились работы по замене снятых с производства ламп. На начало 2020 года оставалось два (из семи) ВЧ каскада с лампой ГИ-51А (КУ-1 и КУ-5) и один выходной ВЧ каскад с лампой ГИ-54А (RFQ), в которых не закончен переход на лампы ГИ-57А и ГИ-71А, соответственно. В прошедшем году выполнены очередные работы по модернизации аппаратуры:

- доработан и настроен ВЧ каскад с лампой ГИ-57А, который предполагается установить в ВЧ канал КУ-1 вместо каскада с лампой ГИ-51А;
- в выходном ВЧ каскаде канала RFQ установлена лампа ГИ-71А вместо ГИ-54А. Одновременно с этим перемонтированы накальный шкаф и система охлаждения лампы.
- проведены испытания трёх ламп ГМИ-44А, восстановленных в СЕД-СПб с использованием деталей от отработавших свой ресурс ламп. К сожалению, результаты испытаний этих ламп оказались отрицательными и вопрос их возможного использования требует дальнейшего изучения.

В последние несколько лет ведутся работы по замене мощных модуляторов ламп ГМИ-44А на лампы ГИ-71А. Несмотря на то, что лампа ГИ-71А разрабатывалась как генераторный триод, её использование в качестве модуляторной имеет ряд преимуществ по сравнению с модуляторной лампой ГМИ-44А, имеются и существенные недостатки, связанные, прежде всего, с недостаточной электрической прочностью промежутка сетка-катод, а также с большими сеточными токами, превышающими токи лампы ГМИ-44А в 10-20 раз.

Проведенный анализ показал, что пробой в лампе ГИ-71А, работающей в качестве модуляторной, инициируются, прежде всего, пробоями в нагрузке, которой в данном случае являются оконечный и предоконечный каскады канала усиления (пробой и искрения в ВЧ контурах, внутриламповые искрения, самовозбуждение быстрых систем стабилизации ускоряющих полей, самовозбуждение ламп и пр.).

Для качественной оценки процессов, происходящих в модуляторной лампе при пробое в нагрузке, разработана и проанализирована модель, представленная на рис.8. В данной модели не учитывается наличие магнитопровода (нелинейности) в импульсном трансформаторе на входе лампы, а также не в полной мере учтены процессы в зазоре сетка – катод лампы из-за отсутствия достаточной о них информации. Тем не менее,

данная модель позволяет оценить причины и величины перенапряжений на сетке модуляторной лампы, а также рассмотреть некоторые варианты способов снижения этих перенапряжений.

Ключ S3 имитирует ситуацию, когда в пробитом зазоре возникает дуга и положительные ионы, двигаясь к отрицательно заряженной сетке, создают обратный ток сетки. Ключ S1 формирует импульс запуска модулятора.

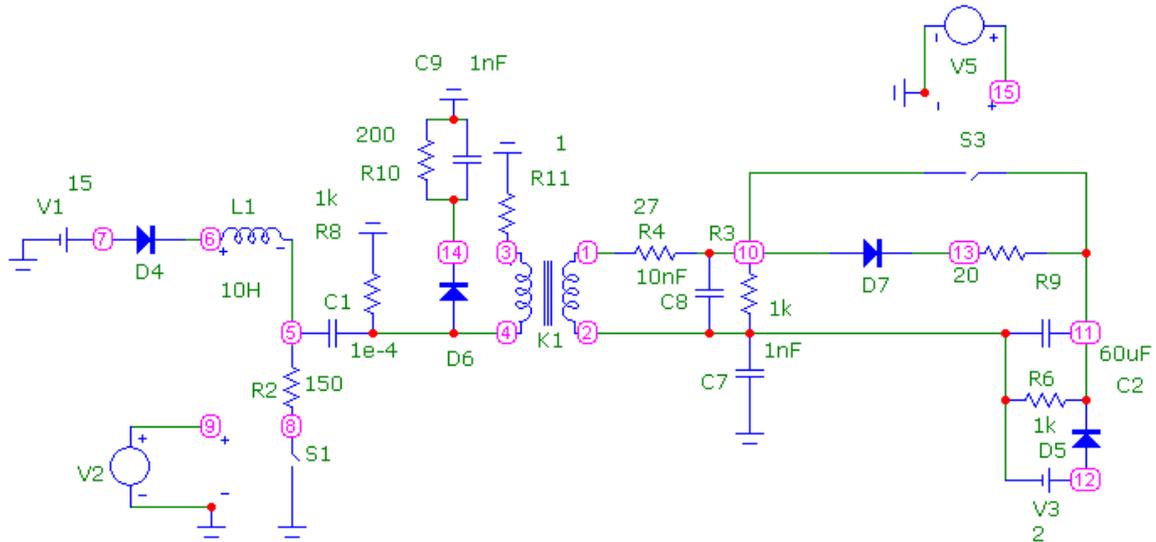


Рис.8. Модель сеточной цепи лампы ГИ-71А после пробоя зазора сетка-катод.

При пробое в анодно-сеточном контуре выходного или предвыходного ВЧ каскадов усиления, работающих по схеме с общей сеткой, катод модуляторной лампы оказывается на «земле». При этом идёт разряд паразитной ёмкости на сеточном выводе импульсного трансформатора, заряженной до выходного импульсного напряжения, с одной стороны, а с другой - перераспределение токов модуляторной лампы, которое приводит к выделению энергии, накопленной в индуктивности вторичной обмотки импульсного трансформатора, в виде броска напряжения на сетке лампы.

В качестве примера (см. рис.9) приведен результат моделирования (в масштабе 1:1000) напряжения на сетке при пробое в выходном ВЧ каскаде. Бросок напряжения после пробоя почти в 5 раз превышает рабочее напряжение до пробоя, что может явиться причиной пробоя промежутка сетка-катод и переходом лампы в открытое состояние. При этом поддерживается ВЧ разряд в анодно-сеточном контуре выходного ВЧ каскада вплоть до полного разряда искусственной формирующей линии.

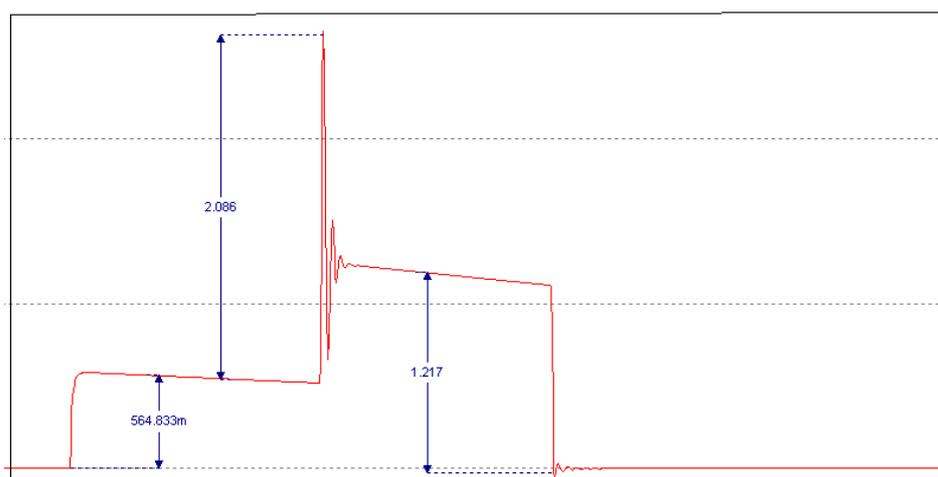


Рис.9. Импульс на сетке лампы модулятора при пробое в нагрузке.

В качестве возможных путей решения указанной проблемы рассматриваются введение дополнительных корректирующих цепей, изменение напряжения смещения, а также изменение сопротивлений в сеточной цепи, ёмкостей на входе лампы и тока подмагничивания импульсного трансформатора, величина которого оптимизировалась для работы с лампой ГМИ-44А.

По системе ВЧ питания основной части ускорителя основные усилия были направлены на восстановление, наладку и обеспечение работоспособности каналов усиления четвертого сектора ускорителя с целью увеличения энергии пучка. В результате выполненных работ в декабрьском сеансе была получена энергия 305 МэВ, однако вследствие неустойчивой работы систем авторегулирования резонансной частоты ускоряющих резонаторов работа на потребителей проводилась с энергией не более 267 МэВ.

В 2020 году продолжались работы по модернизации вакуумной системы. В частности установлены 28 новых источников питания магниторазрядных насосов и 19 вакуумметров.

По системе питания электромагнитного оборудования ускорителя основные усилия в 2020 году были направлены на наладку системы управления новыми источниками, установленными в 2019 году.

3. Разработка и создание элементов ускорителей

В 2020 году были в целом завершены работы по разработке физического обоснования резонатора, предложенного ранее для замены первого резонатора основной части ускорителя. Резонатор разработан на основе предложенной и разработанной в ИЯИ

РАН ускоряющей структуры CDS, не уступающей по электродинамическим характеристикам используемой структуре с шайбами и диафрагмами. По материалам разработки защищена диссертация “Физическое обоснование нормально проводящего резонатора для интенсивного линейного ускорителя ионов водорода” на соискание ученой степени к.ф.-м.н. по специальности 01.04.01 - “Приборы и методы экспериментальной физики”.

Разработаны варианты ускоряюще-фокусирующего канала компактного линейного ускорителя протонов для протонной терапии. Ускоритель длиной не более 27 м и максимальной энергией протонов 230 МэВ обеспечивает “карандашный пучок”, возможность быстрого, за 20 миллисекунд, изменения выходной энергии в диапазоне от 60 МэВ до 230 МэВ. Это полностью обеспечивает решение задач протонной терапии, хирургии и ряда задач протонной флэш-терапии. Предложен ряд решений, не применявшихся ранее в физике и технике линейных ускорителей протонов. Начата подготовка материалов для правового закрепления приоритета ИЯИ РАН в данных решениях.

В рамках международного сотрудничества с лабораторией ДЕЗИ (Германия) по теме «Разработка и запуск резонаторов с высокой импульсной и средней мощностью для стенда фотоинжектора при формировании сгустков электронов сверхвысокой яркости», в 2020 году проводился авторский надзор за изготовлением разработанного усовершенствованного резонатора фотоинжекторов для лазеров на свободных электронах. Этот резонатор Gun 5, изготавливаемый в ДЕЗИ (Рис. 10), является первым образцом нового поколения резонаторов фотоинжекторов L частотного диапазона.

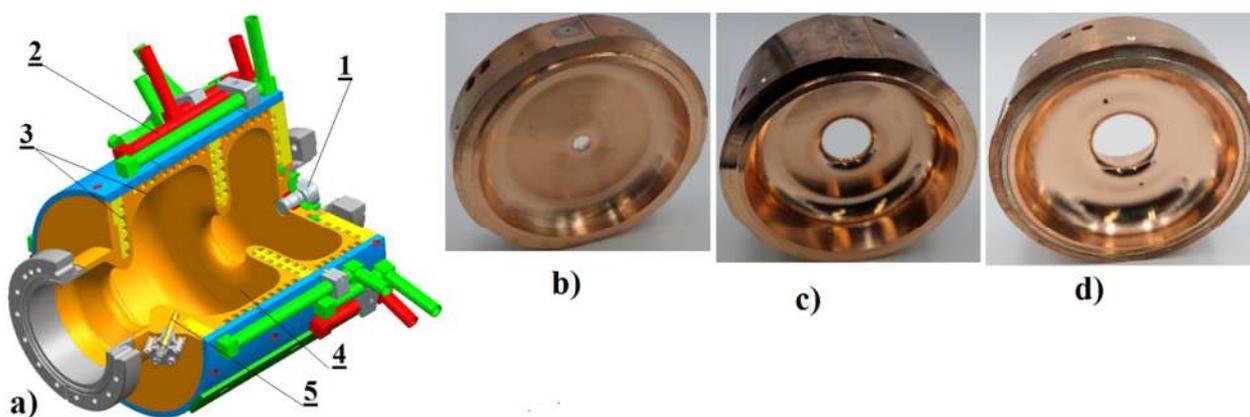


Рисунок 10. а) - общая схема резонатора GUN 5, 1 – фотокатод, 2- вводы-выводы каналов охлаждения, 3 – каналы охлаждения, 4 – ВЧ объем резонатора, 5 – датчик параметров ВЧ поля; б), с), d) – изготовленные части резонатора с размещенными внутри каналами охлаждения.

Также в рамках сотрудничества с лабораторией ДЕЗИ выполнялись работы по программе модернизации комплекса European XFEL. Для разрабатываемого дополнительного инжектора, работающего в непрерывном режиме, предложена конфигурация резонатора для группировки непрерывного пучка (рис. 11), которая может быть реализована освоенными технологическими приемами и по комплексу параметров превосходящая известные аналоги. Резонатор имеет оптимизированную форму ячеек и развитую систему каналов охлаждения. Это обеспечивает на порядки меньший сдвиг частоты из-за тепловых деформаций при рассеиваемой в компактном резонаторе непрерывной ВЧ мощности 15 кВт. Проведен мультифизический анализ ожидаемых параметров резонатора.

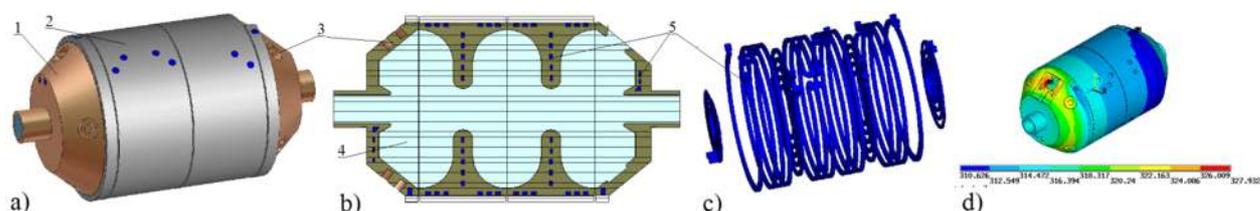


Рисунок 11. Общий вид резонатора-группирователя. а), 1 – тело резонатора, 2 – силовая оболочка, 3 – элементы для настройки частоты резонатора после пайки, 4 – ВЧ объем, 5 – каналы охлаждения; б) – схема резонатора в сечении, с) – схема каналов охлаждения, д) – расчетное распределение температуры в теле резонатора.

В рамках сотрудничества с ОИЯИ продолжались работы усовершенствованию (модернизации) и техническому сопровождению источника поляризованных ионов ОИЯИ. В частности выполнена настройка блоков ВЧ переходов между спиновыми состояниями в атомах водорода и дейтерия в сильном поле, совместно с ОИЯИ проведены экспериментальные измерения эффективности работы блоков ВЧ переходов. Также проводилось работы по исследованию эмиттанса пучка поляризованных частиц, включая 3D расчеты транспортировки пучка поляризованных ионов с энергией 26 кэВ в канале вывода из источника, по разработке компактного измерителя поперечного эмиттанса, а также измерения поперечного эмиттанса на выходе из электростатического дефлектора источника.

Проводились работы по расчёту и проектированию инжектора дейтронов для сильноточного линейного ускорителя. Выполнены расчеты и моделирование динамики пучка в инжекторе дейтронов с требуемым эмиттансом на выходе при значениях тока на выходе канала транспортировки до 128 мА в импульсе с учетом сил пространственного заряда. Разработаны исходные данные для конструирования инжектора и техническое

предложение по схемному решению системы электропитания инжектора. Также разработано техническое предложение по созданию инжектора альфа-частиц.

Проводились работы по разработке линейного ускорителя ионов гелия-4 на энергию 50 МэВ для наработки медицинских изотопов. Предполагаемая конструкция линейного ускорителя состоит из двух частей, основанных на разных ускоряющих структурах. Подобный ускоритель не имеет аналогов в России и представляет собой новую технологическую установку.

В рамках участия в эксперименте AEGIS в ЦЕРН были продолжены работы по разработке метода диагностики позитрония в возбужденном состоянии в сильном магнитном поле, разработана конструкторская документация на корректор пучка позитронов низкой энергии.

В 2020 году продолжались работы по разработке и созданию измерителей формы сгустков для ряда ускорительных лабораторий. Была осуществлена отправка двух модификаций измерителя в лабораторию GSI (Германия) для ускорителя ионов непрерывного действия и ускорителя протонов. Завершена разработка технического проекта и начато изготовление измерителя для ускорительного комплекса MYRRHA (Бельгия) (рис.12).

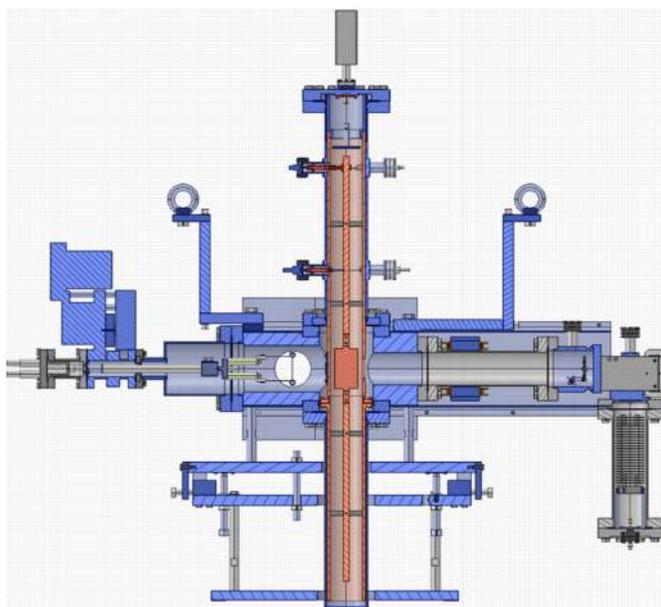


Рис. 12. 3D-модель измерителя формы сгустков для ускорителя проекта MYRRHA.

Выполнены расчетно-теоретические работы по подготовке и обоснованию экспериментов по поиску электрического дипольного момента дейтрона. Разработан метод уменьшения влияния систематических ошибок на конечный результат измерения электрического дипольного момента, позволяющий получить точность порядка 10^{-29} е·см. Предложен способ измерения электрического дипольного момента на ускорителях,

изначально не предназначенных для таких экспериментов, что позволило обосновать возможность использования для этих целей синхротрона COSY (FZJ, Германия) и комплекса NICA (ОИЯИ). Проведено численное моделирование метода управления спином для протонов и дейтронов, основанного на концепции «spin transparency», с учетом неидеальности канала ускорителя и разброса параметров частиц в сгустке, подтвердившее физическую реализуемость предлагаемого метода.

Также выполнены расчетно-теоретические работы по разработке резонансного метода подъема критической энергии в кольце NICA для поляризованного протонного пучка. Метод позволит исключить прохождение пучка через критическую энергию и тем самым упростить конструкцию коллайдера с сохранением интенсивности и качества поляризованного пучка.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

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

План работ на 2020 год выполнен полностью.

Проведено 4 сеанса работы ускорителя продолжительностью 1100 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 радиоизотопный комплекс и экспериментальный стенд для исследования воздействия пучка на узлы радиоэлектронной аппаратуры с энергиями частиц от 75 МэВ до 267 МэВ. В отладочном режиме проводились работы с энергией пучка 305 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 170 мкс. Частота повторения импульсов регулировалась от единичных импульсов до 50 Гц. Продолжались работы по ускорению пучка отрицательных ионов водорода. Было проведено ускорение в одном макроимпульсе, но со сдвигом по времени, двух пучков: протонов и отрицательных ионов водорода.

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

План работ на 2020 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 элементов ускорителей».

План работ на 2020 год выполнен полностью.

Среди выполненных работ следует отметить завершение работ по физическому обоснованию ускоряющего резонатора для замены первого резонатора основной части ускорителя, разработку источников поляризованных ионов для ОИЯИ, устройств диагностики для лабораторий, GSI (Германия) и MYRRHA (Бельгия), компактного линейного ускорителя для протонной терапии, линейного ускорителя ионов гелия-4 на энергию 50 МэВ для наработки медицинских изотопов, ускоряющего резонатора и

резонатора-группирователя для лаборатории DESY (Германия), корректора пучка позитронов низкой энергии для эксперимента AEGIS в ЦЕРНе, инжекторов дейтронов и альфа-частиц, Выполнены расчетно-теоретические работы по подготовке и обоснованию экспериментов по поиску электрического дипольного момента дейтрона на синхротроне COSY (FZJ, Германия) и строящемся комплексе NICA (ОИЯИ), метода управления спином для протонов и дейтронов, резонансного метода подъема критической энергии в кольце NICA для поляризованного протонного пучка.

ПУБЛИКАЦИИ

- 1 Melnikov, S. Gavrilov “Operation experience of ionization-proportional chamber for low-current beam measurements at INR RAS proton linac” Journal of Instrumentation, published in September 2020. <https://iopscience.iop.org/article/10.1088/1748-0221/15/09/P09005>
- 2 V. Paramonov, K. Floettmann, Lower limit of the transverse emittance growth in deflecting rf fields, Physical Review Accelerators and Beams, 23, 014401 (2020), <https://link.aps.org/doi/10.1103/PhysRevAccelBeams.23.014401>
- 3 W. Decking, S/ Abeghyan...V. Paramonov..et.al, (460 соавторов) A MHz-repetition-rate hard X-ray free-electron laser driven by a superconducting linear accelerator. Nature Photonics, v. 14, p. 650 (2020), <https://www.nature.com/articles/s41566-020-0607-z>.