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-А16-116022510114-8 Рег. №

УТВЕРЖДАЮ Директор ИЯИ РАН, чл.-корр. РАН nen Л.В. Кравчук «31» января 2020 г.

ОТЧЕТ О НАУЧНО-ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКОЙ РАБОТЕ АААА-А16-116022510114-8 ФИЗИКА И ТЕХНИКА УСКОРИТЕЛЕЙ; ФИЗИКА ПУЧКОВ

ЗАРЯЖЕННЫХ ЧАСТИЦ

(промежуточный за 2019 год)

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

А.В. Фещенко «31» января 2020 г.

Москва 2020 г.

СПИСОК ИСПОЛНИТЕЛЕЙ

Руководитель НИР, заместитель директора ИЯИ РАН, д.ф-м.н.	31.01.2020 подпись, дата	А.В. Фещенко (введение, заключение,
Исполнители: Главный инженер Отдела	nel/	раздел 1,2,3)
ускорительного комплекса	<u>31.01.2020</u> подиясь, дата	В.Л. Серов (раздел 1,2,3)
Зав. лаб., к.фм.н.	Бер 31.01.2020	А.С. Белов (раздел 1,2,3)
Зав. лаб., к.фм.н.	31.01.2020 подпись, дата	С.А. Гаврилов (раздел 1, 2, 3)
В. н.с., д.фм.н.	31.01.2020 подпись, дата	В.В. Парамонов (раздел 2, 3)

ΡΕΦΕΡΑΤ

Отчёт содержит: 19 с., 7 рис., 1 табл.

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 2019 году по государственному заданию в соответствии с планом научноисследовательской 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 2019 году проведено 4 сеанса продолжительностью 1296 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, каналы транспортировки пучков, ускоряющая система, системы высокочастотного питания, система диагностики, 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 ИЯИ РАН, но и для других установок в России и за рубежом.

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

СОДЕРЖАНИЕ

СПІ	ІСОК ИСПОЛНИТЕЛЕЙ	1
PE₫	DEPAT	3
CO	ЦЕРЖАНИЕ	5
BBE	ЕДЕНИЕ	6
1.	Обеспечение работы сильноточного линейного ускорителя ИЯИ РАН	8
2. PAH	Модернизация систем сильноточного линейного ускорителя ионов водорода ИЯИ I	8
3.	Разработка и создание элементов ускорителей	.14
ЗАК	ЛЮЧЕНИЕ	.16
ПУН	БЛИКАЦИИ	.18

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. В 2019 году проведено 4 сеанса работы ускорителя продолжительностью 1296 часов, направленных на выполнение государственного задания, программ РАН, планов и научной программы Института, соглашений со сторонними организациями. 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 усовершенствования и модернизации систем ускорителя и экспериментального комплекса обусловлена рядом причин. Во-первых, изменением требований к параметрам пучка, во-вторых, необходимостью устранения отдельных, в ряде случаев существенных недостатков, которые обнаруживаются в процессе эксплуатации, и, в-третьих, необходимостью перехода на новую элементную базу, новые приборы и комплектующие взамен снятых с производства. В ряде случаев модернизация требует проведения всесторонних исследований. В 2019 году проводились работы по модернизации большинства систем ускорителя, среди которых следует отметить систему инжекции, каналы транспортировки пучков, системы высокочастотного питания, систему диагностики пучка, система измерения потерь пучка, система быстрой аварийной защиты и другие системы. Также были возобновлены работы по получению ускоренного пучка отрицательных ионов водорода.

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 2019 году проводились разработки ускоряющего резонатора для ускорителя ИЯИ РАН, источников поляризованных ионов для ОИЯИ, устройств диагностики для лабораторий ESS (Швеция), GSI (Германия) и ОИЯИ.

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 2019 года проведено 136 сеансов, общей продолжительностью 49396 часов, в том числе 4 сеанса продолжительностью 1296 часов в 2019 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 49 МэВ до 267 МэВ. Интенсивность пучка варьировалась в широком диапазоне от единичных импульсов с числом частиц 10⁷ в импульсе на экспериментальный стенд до десятков микроампер среднего тока на установки РАДЭКС и ИН-06.

2. Модернизация систем сильноточного линейного ускорителя ионов водорода ИЯИ РАН

В 2019 году выполнены профилактические работы с оборудованием генератора высоковольтных импульсов инжектора протонов. Также выполнены работы по повышению надежности тиристорных ключей в модуляторе генератора высоковольтных импульсов инжектора протонов. Для этого выполнена замена изоляторов в тиристорных сборках и варисторов защиты в количестве 120 шт. В ключах установлены тиристоры с повышенным классом по номинальному напряжению. Усовершенствованные тиристорные ключи успешно использовались в двух сеансах работы ускорителя в ноябре И декабре 2019 Γ. Разработана и установлена аппаратура для повышения помехозащищенности канала измерения тока пучка: дополнительный усилитель и блок оптронной развязки. Сборки тиристорных ключей показаны на рис. 1.



Рисунок 1 - Сборки усовершенствованных тиристорных ключей, установленных в помещении модулятора генератора высоковольтных импульсов инжектора протонов.

Продолжены работы по исследованию процесса компенсации пространственного заряда при транспортировке протонного пучка. В частности, разработан усовершенствованный вариант спектрометра энергии вторичных ионов.

Восстановлена работа источника и инжектора отрицательных ионов водорода. Выполнены изменения в схемах УБС, синхронизации ГВВИ и ИИ. В системе питания ионного источника установлены разработанные для этого дополнительные блоки оптронной развязки сигналов и оптоволоконные линии передачи синхроимпульсов. На стенде источника ионов проводились испытания источника отрицательных ионов водорода с осесимметричной геометрией газоразрядной камеры, эмиссионного отверстия и вытягивающего электрода в режиме с подачей цезия в разрядную камеру источника ионов. Из источника с эмиссионным отверстием Ø2 мм при вытягивающем напряжении 13,5 кВ получен пучок ионов H-минус с током 20 мА. Улучшена фокусировка пучка отрицательных ионов водорода в ускорительной трубке инжектора. Фотографии инжектора ионов H- и системы питания ионного источника показаны на рис. 2.

Был поведен специальный сеанс по проводке пучка отрицательных ионов водорода в канале транспортировки инжекторного комплекса от инжектора ионов Н⁻ до ускорителя с пространственно-однородной квадрупольной фокусировкой. Предварительно была разработана трехмерная модель канала с целью поиска оптимальных режимов фокусировки для различных начальных условий, показанная на рис. 3.

Проведенные работы позволили обеспечить токопрохождение 75% по каналу от инжектора до входа в секцию RFQ.



Рис. 2. Фотографии высоковольтного оборудования инжектора ионов H- (слева) и системы питания источника отрицательных ионов водорода (справа).



Рисунок 3 - Трехмерная модель инжекционного тракта пучка отрицательных ионов водорода в ПО COMSOL Multiphysics.

В 2019 году были продолжены работы по модернизации системы питания начальной части ускорителя. Необходимость проведения данных работ обусловлена прекращением выпуска мощных генераторных и модуляторных ламп, использование которых было предусмотрено проектом. Наиболее сложной задачей оказалось обеспечение работы генераторных ламп ГИ-71А, выпускаемых в настоящее время, вместо снятых с производства модуляторных ламп ГМИ-44А. К настоящему времени накоплен существенный опыт работы с лампами. В таблице 1 указаны типы ламп, работающих в генераторах и модуляторах каналов усиления на конец 2019 года.

Канал	Оконечный каскад	Предоконечный	Monumeron	
усиления	генератора	каскад генератора	модулятор	
1	ГИ-71А	ГИ-51А	ГИ-71А	
2	ГИ-71А	ГИ-57А	ГИ-71А	
3	ГИ-71А	ГИ-57А	ГИ-71А	
4	ГИ-71А	ГИ-57А	ГИ-71А	
5	ГИ-71А	ГИ-51А	ГИ-71А	
6	ГИ-71А	ГИ-57А	ГИ-71А	
RFQ	ГИ-54А	ГИ-51А	ГМИ-44А	

Таблица 1. Типы ламп, используемых в каналах усиления.

Переход на ГИ-71А в модуляторах привел к следующему:

• Увеличению анодного напряжения на модуляторной лампе.

• Неэффективности работы системы ПРИЗ, защищающей мощные генераторные лампы при пробоях в выходном и предвыходном ВЧ каскадах, из-за низкой электропрочности зазора сетка-катод лампы ГИ-71А и значительных перенапряжений, связанных с большими сеточными токами лампы.

• Одному случаю выхода из строя индукционного регулятора ИР118/60 в цепи ВВ питания модуляторной лампы в результате мощного пробоя в выходном ВЧ каскаде.

Совместно с СЕД-СПб были предприняты попытки решения возникших проблем. В СЕД-СПб были изготовлены три лампы ГИ-71А с вакионами, расположенными на сеточном электроде ламп, поскольку предполагалось, что дополнительная откачка лампы повысит электропрочность зазора сетка-катод. Надежды не оправдались в основном из-за особенностей схемы модулятора с нагрузкой в катоде модуляторной лампы. Тем не менее, были изготовлены ещё пять ламп ГИ-71А уже с вакионом на катодном электроде лампы, аналогично тому, как было сделано на лампе ГМИ-44А, в течение 20 лет работавшей в качестве модуляторной лампы. Две лампы с вакионом в катоде смонтированы на тележке и будут испытаны в ближайшее время.

Также в СЕД-СПб начаты работы по восстановлению производства ламп ГМИ-44А с новой технологией изготовления «ножки» лампы – накального и сеточного цилиндров, и с использованием компонентов старых ламп ГМИ-44А. За последние несколько лет в СЕД-СПб переданы около 60 вышедших из строя ламп ГМИ-44А с целью возможной реставрации этих ламп. Первая попытка реставрации (2011-2013г.) оказалась неудачной. Сейчас в СЕД-СПб предпринята вторая попытка реставрации этих ламп. Проведенные в

октябре и декабре испытания первой и второй из реставрированных ламп оказались неудачными. В настоящее время заканчивается изготовление третьего экземпляра лампы.

Доработана система ПРИЗ, основной целью которой является сохранение мощных индукционных регуляторов. Поэтому отключение будет осуществляться по первому броску тока в анодной цепи модулятора, превышающему в 2-3 раза величину импульсного рабочего тока (125-150А). Такая система была опробована в апрельском сеансе, после чего впервые за последние несколько лет каналы усиления работали почти 120 часов без отключений.

Подготовлен ВЧ каскад КЗ с лампой ГИ-57А для установки в канал усиления КУ-1. В настоящее время лампы ГИ-57А установлены в четырёх каналах усиления (см. табл.1). Происходит также сборка катодно-сеточного контура выходного ВЧ каскада К4 с лампой ГИ-71А для установки в канал RFQ. В этом канале работает одна из последних ламп ГИ-54А, выход из строя которой может привести к длительной остановке ускорителя.

В 2019 году были продолжены работы и по модернизации системы ВЧ питания основной части ускорителя. Основные усилия были направлены на увеличение длительности ВЧ импульсов ВЧ каналов № 3-10, 3-11 для обеспечения ускорения пучка с длительностью импульсов тока до 200 мкс для энергий от 209 МэВ до 247 МэВ. В частности, увеличена электрическая длина формирующих линий на пять LC звеньев, в результате чего длительность плоской части высоковольтного импульса была увеличена со 170 до 230 мкс с неравномерностью вершины равной +/- 1,5%. Также доработаны предварительные усилители, блоки поджига тиристорных ключей модулятора, схемы защиты формирующих линий модулятора от перенапряжения. Разработка и изготовление ячеек быстрого аварийного выключения ВЧ поля в ускоряющих резонаторах обеспечило исключение развития ВЧ пробоев в ускоряющих резонаторах и элементах волноводного тракта, автоматическое восстановление рабочего режима ВЧ системы в случае разовых и редких пробоев, запрет на подачу возбуждения на вход клистрона при наличии других аварийных сигналов в цепях УБС, связанных с готовностью волноводного тракта и резонатора к приему ВЧ мощности.

Среди работ по модернизации систем автоматического регулирования фаз и амплитуд ускоряющих полей, а также собственных частот ускоряющих резонаторов следует отметить внедрение новых разработок для реализации электронного регулирования фазы в ускоряющих резонаторах в диапазоне 360 градусов и оптимизацию электронных схем для повышения надежности работы предварительного усиления ВЧ мощности, модернизацию системы стабилизации амплитуды ВЧ поля с транзисторным СВЧ усилителем в качестве исполнительного органа.

Продолжались работы по модернизации системы диагностики пучка и систем обеспечения радиационной безопасности, аварийной защиты и контроля потерь пучка. Так на инжекционном тракте пучка отрицательных ионов водорода модернизированы блоки предварительных усилителей индукционных датчиков тока, усовершенствована система ввода-вывода профилометров, установлена новая видеокамера для обработки данных с измерителя эмиттанса, усовершенствована система сбора и обработки данных. Также выполнены профилактика и ремонт механических частей и электроники профилометров ускорителя и каналов транспортировки, модернизирован комплект ионизационных камер экспериментального комплекса для расширения возможностей системы контроля потерь пучка и быстрой аварийной защиты каналов транспортировки пучка до исследовательских установок. Модернизирована система аварийной защиты на основе измерения разницы токов пучка при его прохождении до экспериментальных установок. Модернизированы шкафы питания датчиков системы измерения потерь ионов и системы быстрой аварийной защиты.

В 2019 году продолжались работы по разработке нового ускоряющего резонатора взамен первого резонатора основной части ускорителя, надежность работы которого в последние годы снизилась. Разработано физическое обоснование – эскизный проект нового резонатора на основе разработанной в ИЯИ РАН структуры с разрезными диафрагмами CDS. Первый резонатор основной части ускоряет протоны от 100 МэВ до 114 МэВ, что соответствует относительной скорости частиц ~0.44, при которой ускоряющие структуры на основе связанных ячеек имеют низкую ВЧ эффективность. На рисунке 4 показано сравнение поперечных размеров известных ускоряющих структур для рабочей частоты 991МГц.



Рисунок 4 - Структуры, апробированные в ускорителях протонов и перспективная ускоряющая структура. Слева направо – структуры с боковыми (SCS), кольцевыми (ACS) ячейками связи, с шайбами и диафрагмами (DAW) и структура CDS на частоте 991 МГц.

Структура CDS имеет в два раза меньшие поперечные размеры, что обеспечивает существенное уменьшение затрат как на приобретение исходного материала –

бескислородной меди марки МоБ, так и на механическую обработку. Проведенная оптимизация структуры позволила найти конфигурацию, не уступающую аналогам по ВЧ эффективности. Проведен анализ термомеханических эффектов в структуре и разработана схема охлаждения, обеспечивающая работоспособность CDS при параметрах ВЧ импульса ускорителя и использовании существующих систем регулировки частоты, фазы и амплитуды поля. Разработана методика ВЧ настройки ячеек CDS до пайки секций, предусматривающая предотвращение развития мультипакторного разряда в ячейках связи. Разработан узел сопряжения секций CDS с мостовыми устройствами, сохраняющий существующую схему резонатора в целом и обеспечивающий необходимые диапазоны регулировки. Разработана методика настойки секций после пайки и резонатора в целом.

Эскиз разработанного предложения резонатора показан на рисунке 5. По проектным характеристикам резонатор не уступает существующему, на основе структуры DAW, полностью повторяет существующую структуру по условиям динами частиц, совместим с оборудованием существующих подсистем ускорителя. Учитывая изготовление единичного экземпляра в промышленности, разработанное предложение является менее затратным по сравнению с повторением изготовления резонатора с DAW.



Рисунок 5 - Эскиз разработанного резонатора на основе структуры CDS.

3. Разработка и создание элементов ускорителей

Завершена разработка физико-технического обоснования – эскизного проекта начальной части компактного линейного ускорителя протонов прикладного назначения. Ускоритель в целом разрабатывается для ускорения протонов до максимальной энергии ~230 МэВ со средним током пучка до 50 наноампер и возможностью быстрого, за время 20 миллисекунд, изменения энергии выходного "карандашного" пучка в диапазоне от 70 МэВ до 230 МэВ. Задачей начальной части является формирование сгустков протонов с малым фазовым объемом и их ускорение до энергии перевода в основную часть ускорителя, использующую компактную ускоряющую структуру СВЧ диапазона с высоким темпом ускорения. Особое внимание уделено сбалансированности предлагаемых решений, надежности в эксплуатации, доступности и мотивированной реализуемости оборудования ускорителя в промышленности.

В 2019 году продолжались работы по разработке и исследованию узлов источника поляризованных ионов для ОИЯИ. Также начаты работы по исследование деполяризации протонного и дейтронного пучков в коллайдере NICA в окрестности нулевой спиновой частоты.

Продолжались работы по разработке и созданию измерителей продольного распределения плотности заряда в сгустках ускоренного пучка для ведущих российских и зарубежных ускорительных центров. Измеритель играет важную роль на этапах настройки ускорителей и оптимизации продольной динамики пучка, позволяя проводить диагностику продольной структуры сгустков с временным разрешением около 4 пикосекунд.

Выполнены лабораторные испытания одного из двух измерителей (рис.6), созданных для линейного ускорителя протонов европейского нейтронного источника ESS ERIC, Швеция. Особенностью этого измерителя является использование симметричного ВЧ дефлектора, что позволяет улучшить фазовое разрешение за счет уменьшения неоднородности отклоняющего и фокусирующего полей. После лабораторных испытаний измеритель был установлен в канал транспортировки промежуточной энергии MEBT и подготовлен для испытаний с пучком.



Рисунок 6 – Измеритель формы сгустков в процессе лабораторных испытаний в ESS (слева) и после установки в канал MEBT.

Закончена разработка технического проекта измерителя для прототипа начальной секции сильноточного линейного ускорителя тяжёлых ионов проекта DERICA ОИЯИ. Измеритель предназначен для измерений на пучках тяжелых ионов. Трехмерная модель разработанного измерителя приведена на рисунке 7.



Рисунок 7 – Трехмерная модель измерителя для ускорителя проекта ДЕРИКА ОИЯИ.

Также продолжались работы по созданию измерителя для ускорителя тяжелых ионов непрерывного действия CW-linac и измерителя для ускорителя протонов лаборатории GSI, Дармштадт, Германия.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

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

План работ на 2019 год выполнен полностью.

Проведено 4 сеанса работы ускорителя продолжительностью 1296 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 49 МэВ до 267 МэВ. Интенсивность пучка варьировалась в широком диапазоне от единичных импульсов с числом частиц 10⁷ в импульсе на экспериментальный стенд до десятков микроампер среднего тока на установки РАДЭКС и ИН-06. Текст заключения по задаче № 1.

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

План работ на 2019 год выполнен полностью.

Проводились работы по модернизации большинства систем ускорителя, среди которых следует отметить систему инжекции, каналы транспортировки пучков, системы высокочастотного питания, систему диагностики пучка, система измерения потерь пучка, система быстрой аварийной защиты и другие системы. Также были возобновлены работы по получению ускоренного пучка отрицательных ионов водорода. Получено токопрохождение от выхода инжектора до входа в секцию RFQ 75%. Выполнена разработку эскизного проекта ускоряющего резонатора на основе структуры CDS.

3. Задача «Разработка и создание элементов ускорителей».

План работ на 2019 год выполнен полностью.

Среди выполненных работ следует отметить разработку физико-технического обоснования – эскизного проекта - начальной части компактного линейного ускорителя протонов прикладного назначения, разработку и исследование источника поляризованных ионов для ОИЯИ, исследования деполяризации протонного и дейтронного пучков в коллайдере NICA в окрестности нулевой спиновой частоты, разработку и создание измерителей формы сгустков для ведущих российских и зарубежных ускорительных центров.

ПУБЛИКАЦИИ

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

- А.С. Белов, С. А. Гаврилов, В. Н. Зубец, Л. П. Нечаева, Е. С. Никулин, О. Т. Фролов, Д. А. Чермошенцев, "Анализатор энергии вторичных ионов для измерения степени компенсации пространственного заряда ионного пучка", ПТЭ, 2019, No. 5, pp. 19–25.
- A.S. Belov, D.A. Chermoshentsev, S.A. Gavrilov, O.T. Frolov, L.P. Nechaeva, E.S. Nikulin, and V.N. Zubets, "A Secondary Ion Energy Analyzer for Measuring the Degree of Compensation of the Ion Beam Space Charge", Instruments and Experimental Techniques, 2019, Vol. 62, No. 5, pp. 609–614.
- **3.** А.И. Кваша, В.Л. Серов "Особенности работы генераторных ВЧ триодов в качестве модуляторных ламп в каналах системы ВЧ питания начальной части ускорителя ИЯИ РАН (постерный доклад)", (XIII Международный научный семинар памятипрофессора В.П.Саранцева «Проблемы коллайдеров и ускорителей заряженных частиц» 3-8 сентября 2019г., г. Алушта, Крым)
- Paramonov, A. Skasyrskaya, B. Militsyn. Procedure of simulations for Evaluations of Transient Parameters Stability for RF Cavities Due to Effects of Pulsed RF Heating, <u>https://arxiv.org/abs/1812.10317</u>, 2019
- V. Paramonov, A. Skasyrskaya, B. Militsyn. Parameters Stability of S-Band RF Gun Cavity Due to Effects of Pulsed RF Heating, Nuclear Instruments and Methods A, v. 940, p. 337, 2019

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

- 6. В.В. Парамонов, "Начальная часть компактного линейного ускорителя протонов прикладного назначения" (XIII Международный научный семинар памяти профессора В.П.Саранцева «Проблемы коллайдеров и ускорителей заряженных частиц» 3-8 сентября 2019г., г. Алушта, Крым). <u>http://indico.jinr.ru/event/687/other-view?view=standard</u>.
- 7. В. Парамонов, А. Дуркин. Сравнение характеристик ускоряющих структур на высокой рабочей частоте для ускорения протонов низкой энергии, <u>http://conf.laplas/mephi.ru</u>, стр. 122-123, 2019

- A.Aksentyev, Y. Senichev, "Simulation of the Guide Field Flipping Procedure for the Frequency Domain Method", International Particle Accelerator Conference, 2019, Australia, Proceedings Melbourne, Australia <u>https://doi.org/10.18429/JACoW-IPAC2019-MOPTS010</u>
- 9. A.Aksentyev, Y. Senichev, "Spin Motion Perturbation Effect on the EDM Statistic in the Frequency Domain Method, International Particle Accelerator Conference", 2019, Australia, Proceedings Melbourne, Australia <u>https://doi.org/10.18429/JACoW-IPAC2019-MOPTS011</u>
- 10. A.Aksentyev, Y. Senichev, "Spin Decoherence in the Frozen Spin Storage Ring Method of Search for a Particle EDM", International Particle Accelerator Conference,2019, Australia, Proceedings Melbourne, Australia <u>https://doi.org/10.18429/JACoW-IPAC2019-MOPTS012</u>
- 11. Y.Senichev and A.Aksentyev, Frequency domain method of the search for the electric dipole moment in a storage ring, XVIII Workshop on High Energy Spin Physics DSPIN-19 Dubna, Russia, September 2-6, 2019, <u>http://theor.jinr.ru/~spin/2019/#agenda</u>
- 12. E. Syresin, N. Agapov, V. Fimushkin, et al. (JINR, Dubna), A. Belov (INR RAS), "NUCLOTRON DEVELOPMENT FOR NICA ACCELERATION COMPLEX", 10th Int. Particle Accelerator Conf. IPAC2019, Melbourne, Australia JACoW. Publishing ISBN: 978-3-95450-208-0 doi: 10.18429/JACoW-IPAC2019-THXXPLM1.
- 13. A.A.Zavadtsev, N.I.Brusova, V.V.Paramonov1 et. al., Development of the debuncher for the injector part of the accelerator complex NICA. Journal of Physics, V. 1238, n1, p. 012062, <u>https://iopscience.iop.org/article/10.1088/1742-6596/1238/1/012062</u>, 2019
- 14. V. V. Fimushkin, R. A. Kuzyakin, M.V. Kulikov, A. S. Belov, A. V. Turbabin, V.N. Zubets et. al., "The source of polarized ions (SPI) and low energy polarimeter for the NUCLOTRON facility", Proc. of 23rd International Spin Physics Symposium SPIN2018, 10-14 Sep 2018, Ferrara, Italy, PoS SPIN2018 (2018) 114, August 2019. DOI: 10.22323/1.346.0114
- 15. V. P. Ladygin, A. V. Averyanov, S.N. Bazylev, A. S. Belov et. al., "Deuteron and proton beams polarimetry at internal target at JINR Nuclotron", Proc. of 23rd International Spin Physics Symposium SPIN2018, 10-14 Sep 2018, Ferrara, Italy, PoS(SPIN2018)150, August 2019. DOI: 10.22323/1.346.0150
- 16. Ya. T. Skhomenko, V. P. Ladygin, A. S. Belov et. al., Deuteron beam polarimeter at Nuclotron internal target, European Physical Journal Conferences 204:10002, January 2019. DOI: 10.1051/epjconf/201920410002