

ОБЪЕДИНЕННЫЙ ИНСТИТУТ ЯДЕРНЫХ ИССЛЕДОВАНИЙ

ЛАБОРАТОРИЯ ФИЗИКИ ВЫСОКИХ ЭНЕРГИЙ

ИМ. В. И. ВЕКслЕРА И А. М. БАЛДИНА

На правах рукописи

ЛЕВТЕРОВ

Константин Александрович

**ФОРМИРОВАНИЕ УСКОРЕННЫХ ПУЧКОВ В ИНЖЕКТОРЕ
ТЯЖЁЛЫХ ИОНОВ ИНЖЕКЦИОННОГО КОМПЛЕКСА
NICA ЛФВЭ ОИЯИ.**

Специальность: 1.3.18- Физика пучков заряженных частиц и ускорительная
техника

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание ученой степени
кандидата физико-математических наук

Дубна – 2022

Работа выполнена в Лаборатории физики высоких энергий Объединенного института ядерных исследований.

- Научный руководитель** – *Сыресин Евгений Михайлович*
доктор физико-математических наук, профессор,
ОИЯИ, ЛФВЭ, главный инженер установки
- Соруководитель** – *Бутенко Андрей Валерьевич,*
кандидат технических наук, ОИЯИ, ЛФВЭ,
заместитель директора лаборатории по научной
работе
- Официальные оппоненты** – *Шиканов Александр Евгеньевич*
доктор технических наук, профессор, «Институт
ЛаПлаз» НИЯУ МИФИ
Завадцев Александр Алексеевич,
кандидат технических наук, генеральный директор
ООО «Нано Инвест»

С электронной версией диссертации можно ознакомиться на официальном сайте Объединенного института ядерных исследований в информационно-телекоммуникационной сети «Интернет» по адресу: <https://dissertations.jinr.ru/ru/Dissertations/CalendarThesisDefenses>

С печатной версией диссертации можно ознакомиться в Научно-технической библиотеке ОИЯИ (г. Дубна, Московская область, ул. Жолио-Кюри, д. 6).

Ученый секретарь диссертационного совета,
кандидат физико-математических наук,
старший научный сотрудник

В. А. Арефьев

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность работы. Бурное развитие физики элементарных частиц во второй половине 20-го столетия произошло во многом благодаря колоссальному успеху, достигнутому инженерами при создании и совершенствовании ускорителей и накопителей заряженных частиц. Выдающиеся и наиболее важные открытия происходили по результатам экспериментальных исследований с частицами все больших и больших энергий, поэтому одним из определяющих факторов при создании ускорительных комплексов стало повышение энергии для всего спектра ускоряемых частиц: электронов протонов, ядер и ионов. Релятивистская ядерная физика как новое научное направление зародилась и получила бурное развитие во второй половине 20-го столетия. В Дубне на синхрофазотроне в 1970 г. были ускорены сначала дейтроны, а позднее и более тяжелые ядра, вплоть до серы с энергией 4.5 ГэВ/н, а в Беркли на ускорителе “Bevalak” получены ядра с энергией до 2 ГэВ/н. Опираясь тяжелыми ионами, как одним из ключевых инструментов своих исследований, эта область науки в целом и темпы ее развития в значительной мере определяются параметрами пучков тяжелых ионов, которые удается получать в специализированных ускорителях.

Ускорительный комплекс ЛФВЭ ОИЯИ берет начало с момента создания в конце 1950-х Синхрофазотрона и был ориентирован на обеспечение пучками протонов программ прикладных и фундаментальных исследований. С момента запуска Синхрофазотрона с целью повышения интенсивности ускоренных пучков сменилось несколько инжекторов, каждый из которых являлся линейным протонным ускорителем. Последний инжектор на основе ускорителя ЛУ-20, действующий до сих пор, был введен в эксплуатацию в 1974 году. Поскольку для решения задач релятивистской ядерной физики требовались ионные пучки, то с момента своего запуска ЛУ-20 начал использоваться как инжектор дейтронов и альфа-частиц в Синхрофазотрон. С момента прекращения работы Синхрофазотрона в 2002 году и по сегодняшний день ЛУ-20 является инжектором введенного в эксплуатацию в 1993 году сверхпроводящего синхротрона Нуклотрон. Вследствие относительно высокого вакуума в камере Нуклотрона, в нем появилась возможность ускорения ионов до релятивистских энергий, однако интенсивности ускоряемых в Нуклотроне пучков ионов существенно уменьшились в соответствии с длительностью однооборотной инжекции. Кроме того, спроектированный как протонный ускоритель ЛУ-20 может быть использован для ускорения ионов, имеющих отношение их атомной массы к заряду $A/Z \leq 3$, и только на второй кратности периода ускорения, что приводит к неблагоприятным факторам пролетного времени, влияющим на интенсивность и качество ускоренных в нем пучков ионов.

На современном этапе развития релятивистской ядерной физики большое внимание уделяется экспериментам, которые призваны понять природу и свойства сильных взаимодействий и измерить характеристики барионной материи. Экстремальные условия для создания барионной материи образуются при столкновении ионов тяжелых элементов высокой энергии с атомными массами $A \sim 200$. Для проведения таких исследований в 2008 году в ЛФВЭ ОИЯИ началась реализация проекта NICA. Базовой установкой ускорительного комплекса NICA является сверхпроводящий синхротрон Нуклотрон. Требуемая интенсивность пучков ионов золота Au^{31+} , инжектируемых из Нуклотрона в Коллайдер, должна быть не менее $1 \cdot 10^9$ частиц. Данные, полученные в сеансах 2018 года, показывают, что при использовании в качестве инжектора ускорителя ЛУ-20 интенсивность ускоренных в Нуклотроне пучков тяжелых ионов как минимум на три порядка меньше, чем требуемая проектная интенсивность для целевых ионов золота проекта NICA. Поэтому для повышения интенсивности ускоренных в Нуклотроне пучков ионов до требуемого значения 10^9 частиц/импульс инжекции в Коллайдер в проекте NICA предусматривается создание и введение в состав ускорительного комплекса двух новых установок: инжектора тяжелых ионов на базе нового линейного ускорителя ЛУТИ и накопительного сверхпроводящего синхротрона Бустер. В качестве источника пучков многозарядных ионов ускорителя ЛУТИ используется разработанный в ЛФВЭ электронно-струнный ионный источник ESIS.

Цель данной работы состоит в формировании пучков тяжелых ионов с требуемым зарядово-массовым отношением $A/Z \leq 6.35$ и импульсным током до 10 мА для инжекции в Бустер ускорительного комплекса NICA. Для этого:

1. Создан лазерный источник на основе Nd-YAG лазера и проведено исследование лазерной плазмы как источника ионов с различным соотношением A/Z и получены пучки ионов вплоть до Fe^{14+} с током до 7 мА на входе в ускоритель.
2. Создан канал транспортировки пучков низкой энергии для получения согласованных пучков на входе ускорителя ЛУТИ.
3. Проведено моделирование динамики пучков ионов в ускорительных секциях с использованием кодов LORASR и TraceWin.
4. Ускорены пучки ионов углерода C^{2+} , C^{3+} , C^{4+} , C^{5+} , C^{6+} в ускорителе ЛУТИ.
5. Измерены энергии ионов, ускоренных в каждой из трех ускоряющих секций: RFQ, И1, И2.
6. Ускорены и инжектированы в Бустер пучки ионов He^{1+} с током до 5.5 мА в ускорителе ЛУТИ.

7. Ускорены и инжектированы в Бустер пучки ионов железа Fe^{14+} с током до 2.5 мА в ускорителе ЛУТИ.
8. Ускорены и инжектированы в Бустер пучки ионов железа C^{4+} с током до 4.5 мА в ускорителе ЛУТИ.

Диссертационное исследование основано на методах изучения свойств лазерной плазмы, образованной воздействием сфокусированного лазерного излучения на поверхность твердого тела, исследования динамики частиц в линейных ускорителях с использованием кода LORASR и TraceWin, и экспериментальной проверки результатов моделирования.

Научная новизна.

1. Впервые в мире в линейном ускорителе экспериментально сформированы пучки ионов, имеющие в совокупности рекордные параметры: а именно, отношение атомного номера к заряду $A/Z < 6.35$, входной ток пучка 10 мА, энергия ионов 3.2 МэВ/н.
2. Впервые в России введен в эксплуатацию ускоритель тяжелых ионов с ускоряющей структурой с нулевой комбинированной синхронной фазой KONUS с параметрами, требуемыми для инжекционного комплекса NICA.
3. Впервые в линейном ускорителе ЛУТИ были успешно ускорены пучки легких ионов в низком зарядовом состоянии C^{2+} для экспериментального подтверждения возможности ускорения тяжелых ионов со значением $A/Z=6$ близким к проектному значению $A/Z=6.35$.
4. Впервые на ускорительном комплексе NICA найдены и реализованы режимы работы нового лазерного источника для формирования стабильных пучков ионов железа Fe^{14+} .
5. Впервые в линейном ускорителе ионов с нулевой комбинированной синхронной фазой KONUS предложена и реализована оригинальная методика настройки фазы ВЧ поля по фазовой протяженности микросгустков для получения ускоренных пучков с проектной энергией.

Основные положения, выносимые на защиту.

1. Проект линейного ускорителя тяжелых ионов (ЛУТИ) ускорительного комплекса NICA, разработанный на основе концептуальных решений.
2. Создание лазерного источника ионов на основе Nd-YAG лазера, результаты экспериментального исследования ионизационных состояний железной и углеродной лазерной плазмы.
3. Создание канала транспортировки пучков низкой энергии LEBT, экспериментальные результаты по согласованию пучков ионов с отношением $A/Z=2÷6$ и током до 10 мА с входными параметрами ЛУТИ.

4. Ввод в эксплуатацию ЛУТИ, ускорение пучков ионов углерода с отношением $A/Z=2\div 6$ и входным током в ЛУТИ до 8 мА и измерение их энергии на выходе каждой ускоряющей секции.
5. Экспериментальные результаты ускорения пучков ионов железа Fe^{14+} с током до 7 мА и углерода C^{4+} с током до 6 мА от лазерного источника в ускорителе ЛУТИ и их инжекция в Бустер.
6. Экспериментальные результаты ускорения пучков однозарядного гелия с током до 10 мА в ускорителе ЛУТИ и их инжекция в Бустер.
7. Оригинальная методика настройки фазы ВЧ поля по фазовой протяженности микробанчей в ускоряющей структуре с трубками дрейфа типа KONUS для получения ускоренного до проектной энергии пучка.

Практическая значимость работы.

Введен в эксплуатацию лазерный источник ионов в составе ЛУТИ и получены пучки ионов для их ускорения в ЛУТИ и инжекции в Бустер.

Создан канал транспортировки пучков низких энергий (LEBT) и сформированы согласованные пучки ионов на входе ЛУТИ.

Введен в эксплуатацию ускоритель тяжелых ионов с $A/Z \leq 6.35$ и входным током пучка до 10 мА на ускорительном комплексе NICA.

Сформированы и ускорены пучки ионов C^{4+} , He^+ , Fe^{14+} в ЛУТИ и успешно инжектированы и ускорены в Бустере.

Достоверность научных результатов. Экспериментальные результаты, используемые в диссертационной работе, получены с помощью коммерческих фазовых датчиков фирмы “NTG GmbH”, трансформаторов тока фирмы “BERGOZ Instrumentation”, ВЧ детекторов НПФ “Микран”, осциллографов “Lecroy” и “Tektronix”, усилителей фирмы “FEMTO”, результаты компьютерного моделирования получены с использованием программных продуктов “CST studio”, “TraceWin” и “LORASR”.

Апробация работы. Основные результаты, представленные в диссертации, докладывались и обсуждались на следующих совещаниях и конференциях:

на 9-м Международном семинаре по проблемам ускорителей заряженных частиц памяти В.П. Саранцева (г. Алушта, сентябрь 2011 г.); на Международном семинаре «The International Workshop “NICA Accelerating Complex: Problems and Solutions-2012” (г. Созополь, Болгария, сентябрь 2012 г.); на международном семинаре «The International Workshop “NICA Accelerating Complex: Problems and Solutions-2014” (г. Созополь, Болгария, сентябрь 2014 г.); на 11-м

Международном семинаре по проблемам ускорителей заряженных частиц памяти В.П. Саранцева (г. Алушта, сентябрь 2015 г.); на международном семинаре «The International Workshop “NICA Accelerating Complex: Problems and Solutions-2016” (г. Созополь, Болгария, сентябрь 2016 г.); на 12-м Международном семинаре по проблемам ускорителей заряженных частиц памяти В.П. Саранцева (г. Алушта, сентябрь 2017 г.); на 8-й й Международной конференции по ускорителям заряженных частиц IPAC’17 (г. Копенгаген, Дания, 2017 г.); на 26-й Российской конференции по ускорителям заряженных частиц RuPAC 2018 (г. Протвино, 2018 г.); на международном семинаре «The International Workshop “NICA Accelerating Complex: Problems and Solutions-2018” (г. Созополь, Болгария, сентябрь 2018 г.); на 12-й Международной конференции по ускорителям заряженных частиц IPAC’21 (г. Кампинас, Бразилия, май 2021 г.); на 27-й Российской конференции по ускорителям заряженных частиц RuPAC 2021 (г. Алушта, сентябрь-октябрь 2021 г.).

Публикации.

Основные теоретические и практические результаты опубликованы в шести статьях в рецензируемых научных изданиях, рекомендованных ВАК (1-5,13).

Личный вклад соискателя.

Основные представленные в работе результаты получены либо лично автором, либо при его определяющем участии.

Структура и объем диссертации.

Диссертация состоит из введения, четырех глав, заключения, библиографического списка, приложения 1, приложения 2. Объем диссертации составляет 115 страниц, в том числе 57 рисунков и 15 таблиц. Библиографический список включает 90 наименований.

Содержание диссертации.

Во введении обоснована актуальность темы диссертации, сформулированы цели и задачи работы, описывается ее научная новизна и практическая ценность.

Представлен краткий обзор ускорительного комплекса ЛФВЭ ОИЯИ, в котором особое внимание уделяется задачам инжекции пучков ионов из линейных ускорителей в Синхрофазотрон и Нуклотрон. Описывается, каким образом инжекторы, спроектированные как протонные линейные ускорители, использовались для ускорения ионов. Кратко описана модернизация ускорителя ЛУ-20 для ускорения ионов и ее результаты. [1-5] Показано, как

различия в особенностях многооборотной инжекции в Синхрофазотрон и однооборотной инжекции в Нуклотрон определили повышенные требования к выходной интенсивности источников ионов при использовании Нуклотрона в качестве базовой установки. Описана модернизация форинжектора линейного ускорителя ЛУ-20. Представлены требования к интенсивности пучков ионов от источника «Крион», инжектируемых в Нуклотрон для достижения требуемой светимости в Коллайдере проекта NICA и показана необходимость создания для инжекции в Нуклотрон нового линейного ускорителя тяжелых ионов ЛУТИ и накопительного синхротрона Бустер [6-8]. Обоснована актуальность темы исследования, сформулированы задачи и цели исследований, представлены положения, выносимые на защиту, а также научная новизна и практическая ценность.

В первой главе приведен обзор инжекторов ведущих ускорительных комплексов, определены основные параметры источника и линейного ускорителя тяжелых ионов инжекционного комплекса NICA, а именно: массово-зарядовое отношение A/Z ускоряемых ионов, значение входного ионного тока ускорителя, значения энергии пучка ионов на входе и выходе ускорителя. Описывается состав инжектора, особенности ускоряющей структуры “KONUS” и результаты моделирования динамики пучка ионов в канале низкой энергии и ускорительных секциях ЛУТИ.

Выбор отношения атомной массы к заряду иона A/Z определяется как требованием к интенсивности пучка на выходе источника ионов, так и ограничениями, связанными с размером Бустера и его максимальным магнитным полем. Перед инжекцией в Нуклотрон ионы золота или ионы висмута должны быть ободраны до ядер. Обдирка осуществляется при энергии 578 МэВ/нуклон на медной мишени толщиной 140 мкм, при этом эффективность обдирки до голых ядер составляет около 90%. Для такой энергии ионов при радиусе поворота ионов 14.09 м и максимальном достижимом значении индукции магнитного поля в дипольных магнитах 1.8 Тл, максимальное значение отношения атомной массы иона к его заряду не должно превышать $A/Z \leq 6.35$.

Требуемая интенсивность пучка переводимого из Нуклотрона в Коллайдер достигается выбранным максимальным числом инжекций равным 80 и составляет 10^9 ионов/импульс для достижения интенсивности пучка в Коллайдере $6.6 \cdot 10^{10}$ частиц. Учитывая, что эффективность захвата, ускорения и вывода пучка для Нуклотрона составляет около 80%, интенсивность на входе в Нуклотрон должна составлять около $1.25 \cdot 10^9$ ионов/импульс. Для Бустера эффективность захвата, ускорения и вывода пучка составляет ~70%, поэтому можно оценить требуемое значение тока пучка на его входе $\sim 1.8 \cdot 10^9$ ионов/импульс [9]. Коэффициент прохождения пучка от источника ионов по каналу транспортировки пучков низкой энергии ЛЕВТ, ускорителю ЛУТИ и каналу транспортировки пучков высокой энергии НЕВТ до входа в

Бустер составляет $\sim 70\%$, следовательно, в выведенном из источника ионов пучке должно быть порядка $2.6 \cdot 10^9$ ионов золота целевой зарядности за импульс (ток пучка 1.6 мА при его длительности 8 мкс). Пучок на выходе электронно-лучевых источников представляет собой смесь ионов, находящихся в различных зарядовых состояниях. Исследование зарядового спектра источника EBIS, настроенного на целевую зарядность ионов Au^{31+} , показывает наличие в пучке ионов золота в диапазоне зарядовых состояний от Au^{27+} до Au^{37+} при 14%-ом содержании ионов целевой зарядности. Поэтому требуемое значение полного тока на выходе источника выбрано 10 мА.

Входная энергия ускорителя ЛУТИ выбрана 17 кэВ/н, при этом длина ускорителя составляет 9.4 м [10,11], а необходимое напряжение инжекции подаваемое на высоковольтный терминал при ускорении ионов Au^{31+} равно 108 кВ. Электрическое питание источника «Крион» при этом осуществляется посредством компактного разделительного трансформатора 160кВ/35 кВА.

Критериями выбора выходной энергии ускорителя ЛУТИ являлись минимизация кулоновского сдвига частот бетатронных колебаний в Бустере и потерь ионов пучка при взаимодействии с атомами и молекулами остаточного газа за время инжекции и ускорения. Ограничивающими фактором также являлась максимальная длина ускорителя (не более 14 м). Размеры зала инжектора позволяют разместить в нем для основного ускорения не более трех ускоряющих секций: ИН1, ИН2 и ИН3 с выходными энергиями 1.84 МэВ/н, 3.2 МэВ/н и 4.1 МэВ/н, соответственно.

Кулоновский сдвиг частот бетатронных колебаний во многом определяет предельную интенсивность достижимую в кольцевых ускорителях. Для интенсивности инжектированных ионов золота Au^{31+} в Бустер $N=1.8 \cdot 10^9$ при группировке на пятой гармонике частоты обращения ВЧ системы число частиц в сгустке составляет $N_b=3.6 \cdot 10^8$. При возможном использовании линейного ускорителя с выходной энергией 1,84 МэВ/н и сохранении продольных параметров сгустка полный поперечный эмиттанс пучка ионов возрастает до $\varepsilon_{\text{tot}}=69 \pi \cdot \text{мм} \cdot \text{мрад}$ и превышает вертикальный аксептанс Бустера $60 \pi \text{ мм мрад}$. Для такого линейного ускорителя при адиабатическом захвате и начальной стадии его группировки на 5-ой гармонике частоты обращения возникают вертикальные потери частиц в Бустере. При энергии инжекции 3.2 МэВ/н среднеквадратичный поперечный эмиттанс сгруппированного пучка после адиабатического захвата равен $\varepsilon=9,9 \pi \text{ мм мрад}$. Полный поперечный эмиттанс ($\varepsilon_{\text{tot}}=4\varepsilon$) по расчетам составляет $\varepsilon_{\text{tot}}=40 \pi \text{ мм мрад}$, и он примерно в 1.4 раза меньше, чем вертикальный аксептанс Бустера равный $60 \pi \text{ мм мрад}$ [8,12]. Полный поперечный эмиттанс при энергии ускорителя 4.2 МэВ/н составляет $30 \pi \text{ мм мрад}$.

Для инъекции пучков в Бустер рассматривается три варианта однооборотной инъекции: однократная, трехкратная и десятикратная с последующим электронным охлаждением. Многократная инъекция используется для повышения интенсивности пучка ионов на выходе синхротрона вследствие накопления частиц в камере ускорителя в результате нескольких последовательных инъекций через определенные интервалы времени. В этом случае инжектированные частицы циркулируют в камере ускорителя с постоянной скоростью до тех пор, пока не произойдет инъекция последнего сгустка. После этого в течение небольшого времени (~100 мс) происходит группировка пучка во время адиабатического захвата, а затем ускорение ионов до энергии 5 МэВ/н при параболическом росте магнитного поля, после чего пучок ускоряется при линейном во времени росте магнитного поля в дипольных магнитах. Расчет потерь ионов в результате их перезарядки при взаимодействии с атомами и молекулами остаточного газа за время циркуляции в зависимости от кратности инъекции показывает, что при энергии инъекции 3÷4 МэВ/н они примерно равны и существенно ниже, чем при энергиях 1-2 МэВ/н (Рисунок 1).

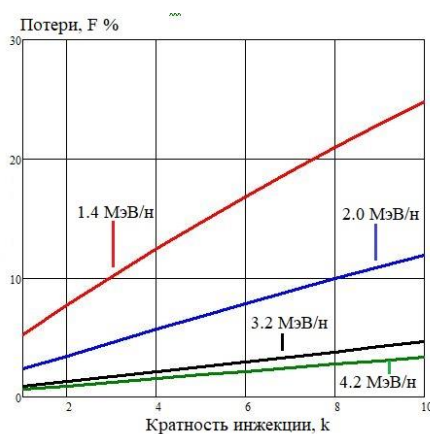


Рисунок 1 Расчетная зависимость потерь пучка ионов Au³¹⁺ за время циркуляции от кратности инъекции k для энергий инъекции 1.4, 2.1, 3.2 и 4.2 (МэВ/н) при давлении в камере Бустера 10^{11} торр.

Значение выходной энергии линейного ускорителя 3.2 МэВ/н удовлетворяет задачам инъекции как с точки зрения минимизации кулоновского сдвига частот бетатронных колебаний и соответствия поперечного эмиттанса пучка ионов аксептансу Бустера, так и с точки зрения минимизации потерь ионов пучка на остаточном газе. Выбор выходной энергии 4.2 МэВ/н повлек бы за собой необходимость использования еще одного резонатора и существенное удорожание ускорителя.

В качестве ускоряющей структуры была выбрана структура с трубками дрейфа KONUS (Kombinierte Null Grad Struktur). Характерной особенностью структуры KONUS высокий темп набора энергии при малом росте эмиттанса. Предварительное ускорение до 300 кэВ/н

осуществляется в RFQ, а основное ускорение до 3.2 МэВ/н происходит в Н-резонаторах с трубками дрейфа.

Во второй главе обоснована необходимость замены лазерного источника на основе CO₂ лазера на новый лазерный источник ионов на основе Nd-YAG лазера. Представлены основные характеристики нового лазерного источника ионов. Приводятся предпосылки использования лазерной плазмы в качестве экстрактора многозарядных ионов, [1,13].

Ввиду отсутствия задающего осциллятора и модуляции добротности излучение CO₂ лазера инжекционного комплекса ЛФВЭ является многомодовым, длительность гигантского импульса превышает 100 нс при энергии в импульсе до 5 Дж. Оценка плотности потока излучения на мишени по известным значениям максимальной кратности ионизации ионов углерода, извлекаемых из лазерной плазмы, произведенной CO₂ лазером, для ускорения в ЛУ-20 составляет $\sim 10^{11}$ Вт/см². Обзор работ, посвященных использованию лазерной плазмы в качестве источника многозарядных ионов, позволил сделать вывод, что повышение плотности потока излучения на мишени до 10^{12} - 10^{13} Вт/см² позволит получить лазерную плазму, содержащую легкие ионы со значением $A/Z \leq 3$ в достаточном количестве для формирования пучков для ускорения в ЛУ-20 и снижения нагрузки на систему ВЧ питания ускорителя. Для нового инжектора тяжелых ионов на базе ускорителя ЛУТИ с максимальным параметром ускоряемых ионов $A/Z \leq 6.35$ использование нового лазерного источника ионов открывает перспективу формирования и ускорения пучков ионов элементов с атомными массами $A \leq 100$. Новый лазерный источник ионов на основе Nd-YAG лазера был создан, испытан и введен в действие [13] (Рисунок 2). Представлены характеристики излучения нового лазерного источника ионов на основе Nd-YAG лазеров LPY7864G и LPY7864) (Таблица.1). При стендовых испытаниях и в ускорительных сеансах ПНР Бустера использовался лазер LPY7864. При вводе в эксплуатацию ЛУТИ использовался лазер LPY7864G.

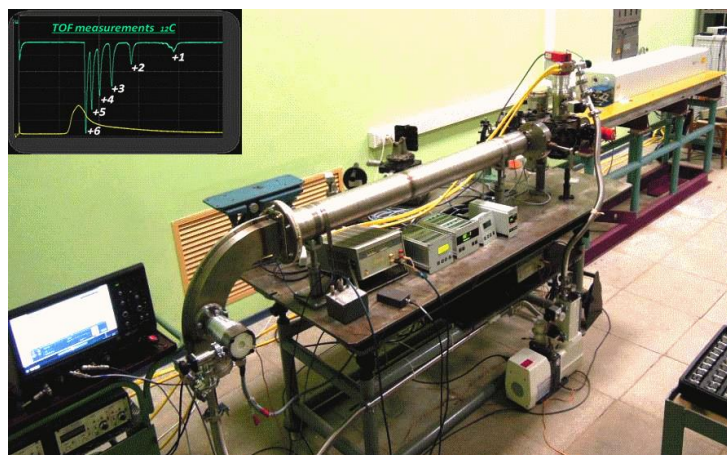


Рисунок 2. Лазерный источник ионов на основе Nd-YAG лазера на испытательном стенде.

Таблица.1 Основные характеристики излучения Nd-YAG лазеров лазерного источника ионов инжекционного комплекса ЛФВЭ

	LPY7864	LPY7864G
Длина волны, нм	1064	1064
Энергия излучения в импульсе, мДж	2800	1000
Длительность импульса излучения, нс	10	10
Расходимость, мрад	0.5	0.5
Частота следования импульсов, Гц	2	2
Диаметр выходного пучка, мм	9.5	12.5
Параметр M^2	1.3	2
Тип задающего генератора	Стабильный диафрагмированный	Неустойчивый с градуированной отражательной способностью зеркала

Результаты исследования ионизационных состояний плазмы, проведенные на стенде времяпролетным методом с использованием электростатического энергоанализатора, показали присутствие в углеродной лазерной плазме ядер углерода, а в железной плазме - высокозарядных ионов Fe^{17+} (Рисунок 3).

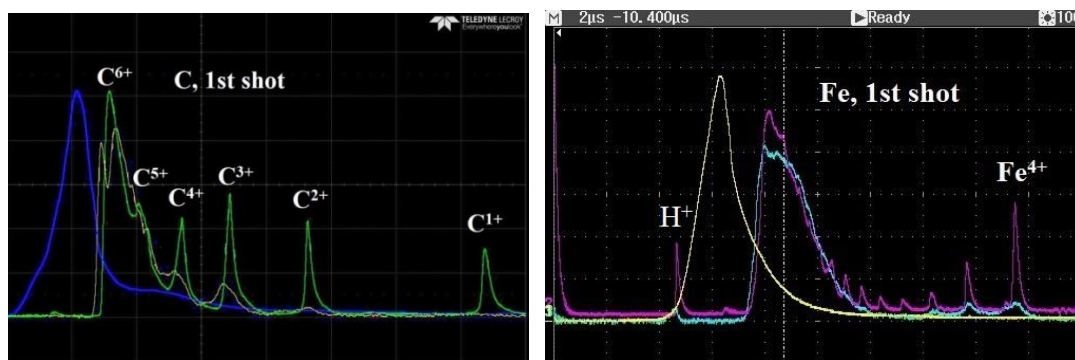


Рисунок 3. Спектр TOF ионов углеродной (слева) и железной (справа) лазерной плазмы, вертикальный маркер установлен на отметке, соответствующей времени прихода ионов Fe^{16+} , коллекторный сигнал на входе в анализатор (желтый); коллекторный сигнал на входе в ВЭУ-6 (голубой).

Стабильное присутствие ядер углерода C^{6+} и ионов Fe^{17+} по данным экспериментальных исследований зарядового состояния углеродной и железной лазерной плазмы, подтвердило, что излучение используемого Nd-YAG лазера может быть достаточно остро сфокусировано и иметь высокую плотность потока на мишени для образования высокотемпературной плазмы, содержащей ионы в высоких зарядовых состояниях. При настройке лазерного источника на

слабую фокусировку излучения в углеродной плазме стабильно присутствуют ионы C^{2+} , которые могут быть использованы для экспериментального подтверждения возможности ускорения тяжелых ионов со значением $A/Z=6$ близким к проектному $A/Z = 6.35$.

В третьей главе представлены результаты по расчету, созданию канала транспортировки пучков низкой энергии (LEBT), а также данные компьютерного моделирования и экспериментальные данные по ускорению в канале LEBT и фокусировке на вход RFQ пучков ионов углерода при вводе в эксплуатацию ЛУТИ [10]. Представлены экспериментальные результаты по ускорению в ЛУТИ пучков ионов углерода и измерению их энергии на выходе каждой ускоряющей секции [13,14].

Назначением канала LEBT является захват пучка ионов с параметром $A/Z \leq 6.35$ и импульсным током до 10 мА при длительности до 30 мкс от источника “Крион-6Т”, его ускорение и фокусировка на вход RFQ ЛУТИ с требуемыми параметрами и минимальными потерями. В состав канала входят два электростатических электрода, ускоряющая электростатическая трубка и два магнитных соленоида (Рисунок 4). Для ускорения ионов до энергии 17 кэВ/н (энергии инъекции в RFQ ЛУТИ) используется импульсное электрическое поле, создаваемое в ускоряющей трубке генератором высоковольтных импульсов. Приведены данные компьютерного моделирования с использованием программы MСIВ04 по прохождению пучка ионов золота по каналу и его фокусировки на входе в RFQ.

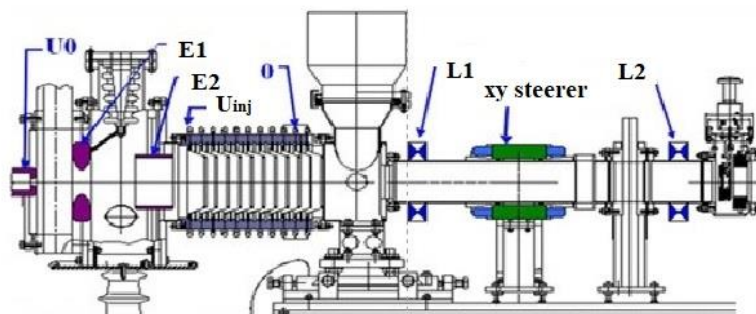


Рисунок 4 Схема канала транспортировки пучков низкой энергии инжекционного комплекса NICA.

Представлены экспериментальные результаты по ускорению и фокусировке на вход RFQ в канале LEBT пучков ионов C^{2+} , C^{3+} и C^{4+} с последующим ускорением в ЛУТИ до проектной энергии [13]. Данные численного моделирования и экспериментальные данные показали, что канал LEBT успешно проводит требуемое согласование пучков ионов между источником и ускорителем.

Представлены результаты по вводу в эксплуатацию линейного ускорителя тяжелых ионов ЛУТИ, при котором использовались пучки ионов углерода C^{2+} , C^{3+} , C^{4+} , C^{5+} и C^{6+} с входным импульсным током до 8 мА длительностью до 10 мкс, произведенных лазерным источником ионов. Измерялась энергия ионов после ускорения в каждой ускоряющей секции ЛУТИ. Для измерения выходной энергии ускоренных ионов использовался анализирующий магнит, установленный на выходе ЛУТИ (Рис.5). Чтобы получить достаточное энергетическое разрешение, апертура ионопровода перед входом в магнит и перед цилиндром Фарадея была перекрыта двумя медными пластинками с проделанными в них по центру вертикальными щелями шириной ~ 1 мм. Ось начальной части ионопровода совпадала с осью ускорителя, а ось конечной части составляла с осью ускорителя угол 25° , равный углу поворота ионов, прошедших через обе щели (Рис.5).

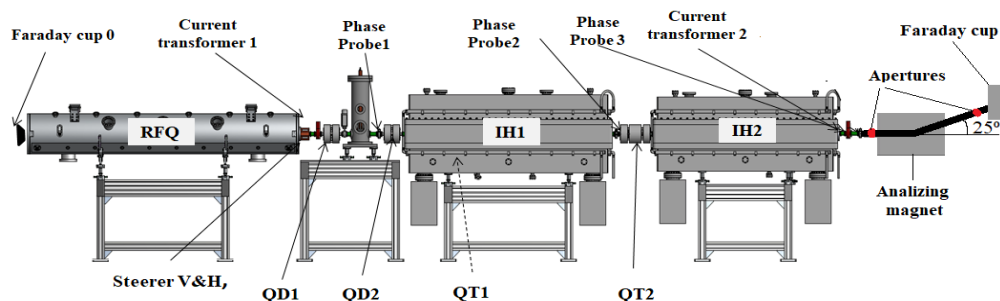


Рисунок 5 Схема линейного ускорителя ЛУТИ с анализирующим магнитом для измерения выходной энергии ионов (вверху) и вид ЛУТИ (внизу)

Поскольку частицы на выходе ускорителя имеют одинаковые скорости, то отношения величин индукции анализирующего магнитного поля B_1 и B_2 обратно пропорциональны отношению соответствующих зарядовых состояний Z_1 и Z_2 ускоренных ионов углерода. Это правило выполняется для всех экспериментально полученных результатов по измерению энергии на выходе каждой ускоряющей секции и ускорителя в целом (Рисунок 6) [13].

Измеренные значения энергии находятся в согласии со значениями, полученными численным моделированием, в пределах энергетического разрешения равного $\sim 1\%$. Максимальный коэффициент прохождения в ускоряющих секциях с структурой KONUS составил 80% для пучков ионов C^{2+} .

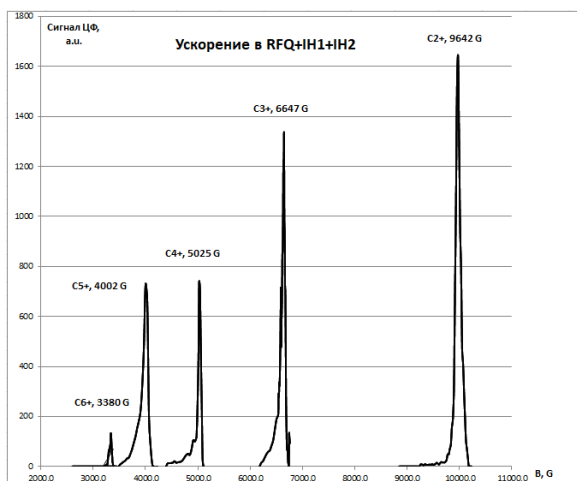


Рисунок 6. Зависимость амплитуды сигналов на цилиндре Фарадея, расположенном за анализирующим магнитом ЛУТИ, от величины индукции магнитного поля при ускорении ионов углерода до энергии 3.2 МэВ/н

В четвертой главе представлены экспериментальные результаты ускорения в ЛУТИ пучков однозарядного гелия He^{1+} от плазменного источника, пучков ионов железа Fe^{14+} с и ионов углерода C^{4+} от лазерного источника и их инжекции в Бустер [15-19].

Для инжекции ускоренного в ЛУТИ пучка ионов создан канал транспортировки пучков высокой энергии (НЕВТ) ЛУТИ-Бустер (Рисунок 7). Радиальная фокусировка пучка в канале НЕВТ осуществляется двумя триплетами квадрупольных линз QT3 и QT4, одна квадрупольная линза QL расположена между поворотными магнитами. Для корректировки траектории пучка используются шесть двойных корректоров, каждый из которых представляет собой вертикальный и горизонтальный корректоры, конструкционно соединенные в один корректирующий узел. Диагностика для измерения интенсивности пучка включает в себя трансформаторы тока и цилиндры Фарадея, для мониторинга положения и профиля пучка на канале транспортировки НЕВТ установлены пять пикапов и шесть проволочных профилометров. Для уменьшения разброса ионов пучка по энергиям на канале ЛУТИ-Бустер используется четырехзазорный дебанчер, установленный на расстоянии 5 метров от выхода ускорителя. Расчетные значения напряжения для разгруппирования пучка ионов Au^{31+} со значением тока 10 мА составляют 65 кВ в каждом зазоре. Расчетная добротность дебанчера

$Q=11100$, рабочая частота ВЧ поля 100.625 МГц. Результаты моделирования динамики пучка ионов Au^{31+} в канале ЛУТИ-Бустер с помощью кода TraceWin показывают, что разброс частиц по энергиям на выходе дебанчера составляет $\sim 3 \cdot 10^{-4}$.

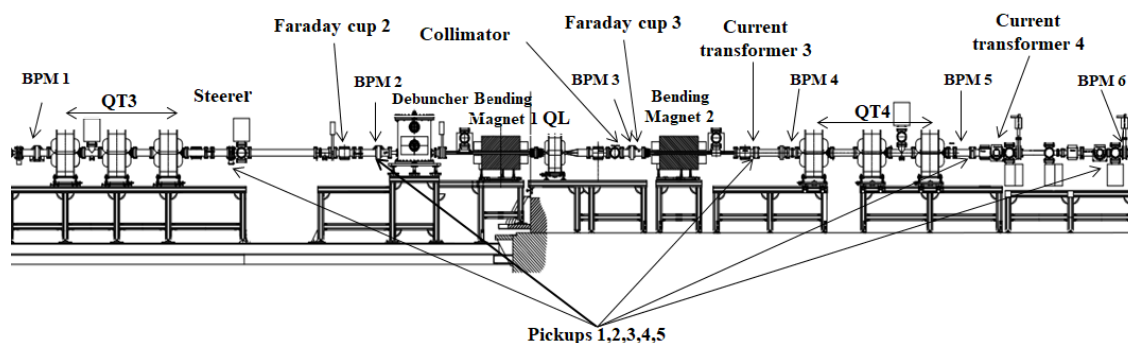


Рисунок 7. Схема расположения элементов магнитной оптики и диагностического оборудования на канале транспортировки ЛУТИ-Бустер.

Во время первого сеанса по инъекции в Бустере использовался пучок ионов He^{1+} от плазменного источника. При ионном токе до 10 мА при длительности ~ 10 мкс на входе в ЛУТИ была достигнута интенсивность на уровне $7 \cdot 10^{10}$ циркулирующих в Бустере ионов He^{1+} , что по току эквивалентно 2×10^9 ионов $^{197}Au^{31+}$ [15-18].

Во втором сеансе пучки ионов $^{56}Fe^{14+}$ от лазерного источника были инжектированы в Бустер и ускорены до максимальной энергии 578 МэВ/н. Входной ток в ЛУТИ составлял 12 мА при длительности до 2 мкс, интенсивность инжектируемого в Бустер пучка составляла $2.5 \cdot 10^8$ ионов [18].

В третьем сеансе сформированные в лазерном источнике ионы углерода C^{4+} были ускорены в ЛУТИ и инжектированы в Бустер. Длительность ионного тока на полувысоте составила 3 мкс при амплитуде 10 мА. Интенсивность циркулирующего пучка в Бустере составила $3.5 \cdot 10^9$ ионов. Ионы C^{4+} были ускорены в Бустере, ободраны до ядер углерода C^{6+} , ускорены в Нуклотроне и выведены для экспериментов SRC на установке VM&N. Разработана методика настройки фазы ВЧ поля по фазовой протяженности микробанчей в ускоряющей структуре с трубками дрейфа типа KONUS ЛУТИ для получения ускоренного до проектной энергии пучка.

Сигналы трансформаторов тока при прохождении по инжекционной цепочке ионов $^{56}Fe^{14+}$ и C^{4+} приведены на рисунке 8.

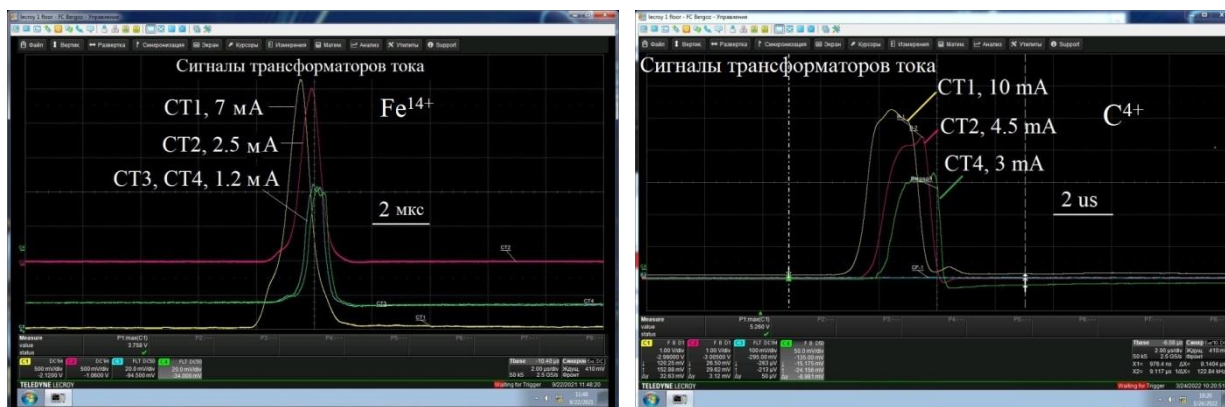


Рисунок 8. Сигналы трансформаторов тока для ионов Fe^{14+} (слева) и C^{4+} (справа), СТ1-на выходе из первой ускоряющей секции, СТ2 - на выходе линейного ускорителя ЛУТИ, СТ3 – перед триплетом QT4, СТ4-после триплета QT4

Представлена методика настройки фазы ВЧ поля в последней ускоряющей секции по фазовой протяженности микробанчей для формирования пучка ионов с проектной энергией 3.2 МэВ/н на выходе ЛУТИ. Основным критерием настройки ускорителя ЛУТИ является появление на его выходе ускоренного до энергии 3.2 МэВ/н пучка ионов заданного сорта с заданным отношением A/Z при наилучшем коэффициенте прохождения. Последним параметром, который определяется при настройке ЛУТИ, является фаза ВЧ поля в ускоряющей секции ИН2. Интенсивность ускоренного пучка ионов определяется по показаниям трансформатора тока, расположенного на выходе ускорителя, а его энергия - по значению индукции магнитного поля анализирующего магнита, соответствующего максимуму сигнала цилиндра Фарадея, расположенного за магнитом. Оказалось, что существуют два значения фазы ВЧ поля в резонаторе ИН2, которые соответствуют появлению на выходе ускорителя пучков с двумя значениями энергии: 3.2 МэВ/н или 1.84 МэВ/н. При этом интенсивности обоих пучков по показаниям трансформатора тока на выходе ускорителя примерно одинаковы. Для правильной настройки фазы ВЧ поля в последней ускоряющей секции ЛУТИ без использования анализирующего магнитного поля необходимо иметь другой критерий. Было выяснено, что таким критерием может служить фазовая протяженность микросгустков ионов. Результаты численного моделирования показывают, что при перестройке значения оптимальной фазы φ_0 ВЧ поля в резонаторе ИН2 на значение $\varphi = \varphi_0 + 180^\circ$ фазовая длина микросгустков увеличивается (Рисунок 4.19), а набор энергии в резонаторе ИН2, в целом, не происходит (4.20).

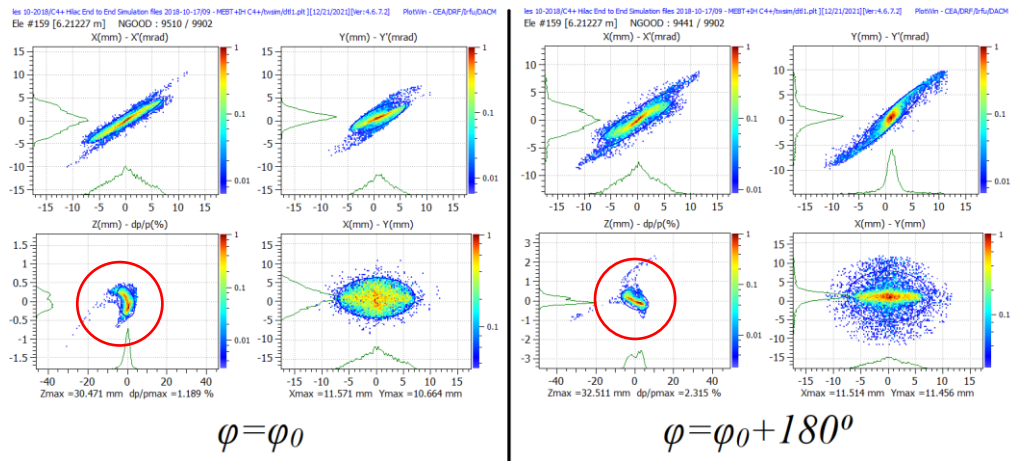


Рисунок 4.19. Фазовые проекции пучка ионов Au^{31+} на выходе ЛУТИ при значении фазы ВЧ поля в ускоряющей секции ИН2 равном $\varphi = \varphi_0$, соответствующим выходной энергии 3.2 МэВ/н (слева), и при значении $\varphi = \varphi_0 + 180^\circ$, соответствующим выходной энергии 1.84 МэВ/н (справа), построенные по результатам моделирования с использованием TraceWin

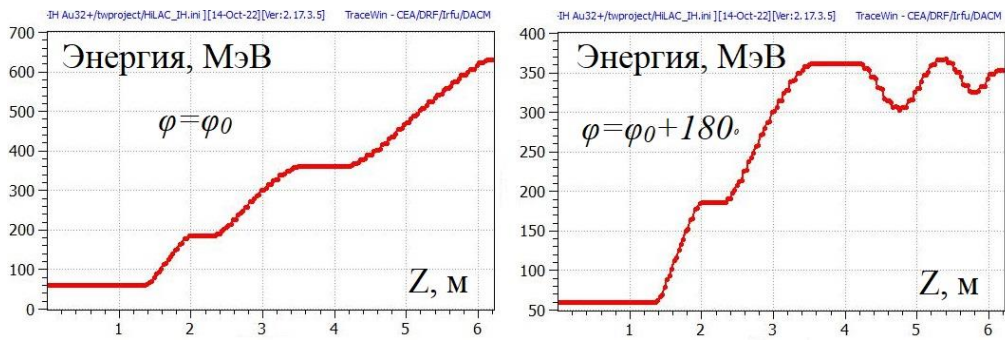


Рисунок 4.20. Изменение энергии ионов Au^{31+} в ЛУТИ при значении фазы ВЧ поля в ускоряющей секции ИН2 равной $\varphi = \varphi_0$, соответствующей выходной энергии 3.2 МэВ/н (слева), и при значении $\varphi = \varphi_0 + 180^\circ$, соответствующей выходной энергии 1.84 МэВ/н (справа), построенные по результатам моделирования с использованием кода TraceWin

Экспериментальная проверка возможности использования измеренной фазовой протяженности сгустков в качестве критерия для настройки фазы ВЧ поля в последнем резонаторе ЛУТИ проводилась во время ускорения пучков ионов C^{2+} при вводе в эксплуатацию ЛУТИ, а также во время сеансов ускорения пучков ионов C^{4+} , Ne^+ и Fe^{14+} для их инжекции в Бустер. В качестве анализирующего магнита использовался первый поворотный магнит канала ЛУТИ-Бустер. Фазовая протяженность сгустков определялась с помощью осциллографа, на один из каналов которого выводился сигнал фазового датчика, расположенного в непосредственной близости к выходу ускорителя (Рисунок 4.21).

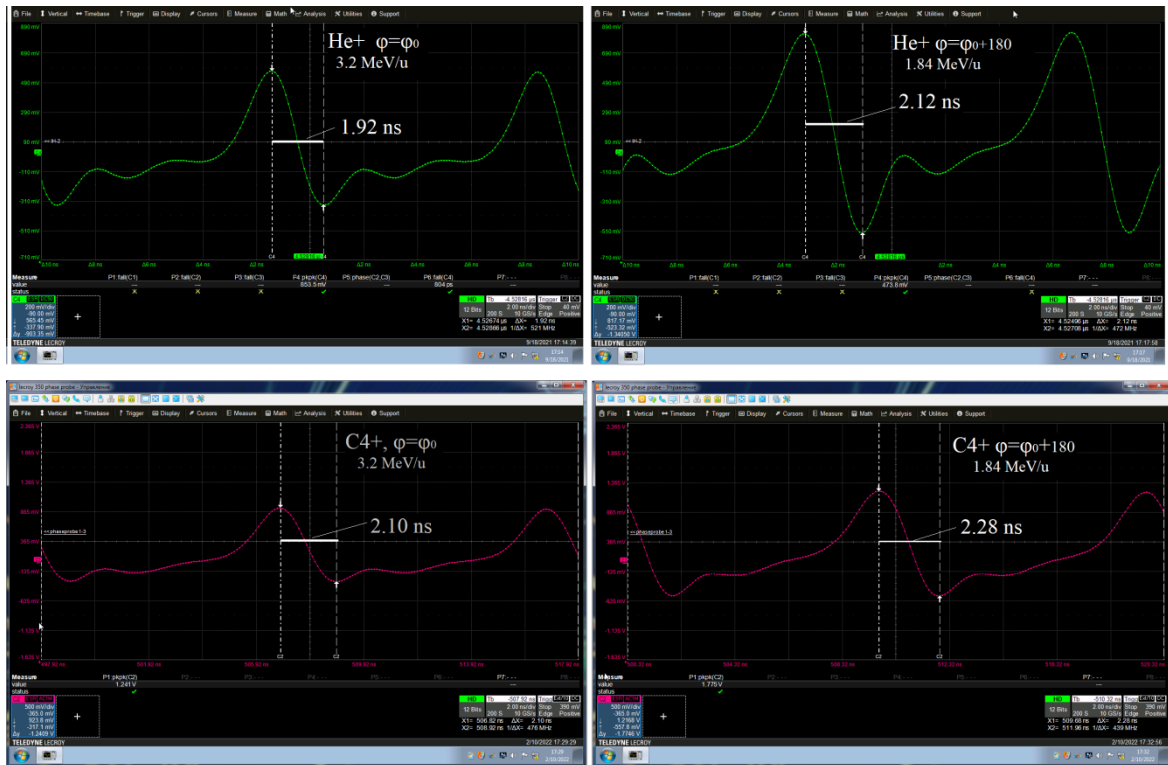


Рисунок 4.21. Осциллограммы сигналов фазового датчика, расположенного на выходе ЛУТИ, для пучков ионов He^+ (верх) и C^{4+} (низ), полученные для значения фазы ВЧ поля в ИН2 равному $\varphi = \varphi_0$, соответствующему выходной энергии 3.2 МэВ/н (слева), и при значении фазы $\varphi = \varphi_0 + 180^\circ$, соответствующему выходной энергии 1.84 МэВ/н (справа)

Таким образом, для правильной настройки фазы ВЧ поля в ускоряющей секции ИН2 ЛУТИ, достаточно выбрать то значение, которое соответствует минимальной протяженности микросгустков.

В Заключение сформулированы основные результаты работы:

Разработан проект линейного ускорителя тяжелых ионов (ЛУТИ) ускорительного комплекса NICA на основе концептуальных решений

Создан и введен в эксплуатацию лазерный источник ионов и получены пучки ионов для ускорения в ЛУТИ и инъекции в Бустер.

Создан канал транспортировки пучков низких энергий (LEBT) и сформированы согласованные пучки ионов на входе ЛУТИ.

Введен в эксплуатацию ускоритель тяжелых ионов с $A/Z \leq 6.35$ и входным током пучка до 10 мА на ускорительном комплексе NICA.

Сформированы и ускорены пучки ионов C^{4+} , He^{1+} , Fe^{14+} в ЛУТИ и успешно инжектированы и ускорены в Бустере.

Основные результаты диссертации опубликованы в рецензируемых журналах (пп. 1,2,3,4,5,13) и трудах научных конференций (пп. 10,11,12,14,15,16,17,18,19):

1. Бутенко А.В., Левтеров К.А. и др. Модернизация инжекционного комплекса нуклотрон. Письма в журнал «Физика Элементарных частиц и атомного ядра», Т. 9, № 4-5(174-175), с. 654-665, 2012.
2. M.A. Gusarova, K.A. Levterov et al. Research and design of New RFQ Injector for Modernisation of the LU-20 Drift-Tube Linac. Physics of Particles and Nuclei Letters V.13, No.7, pp.915-918, 2016.
3. A.M. Bazanov, K.A. Levterov et al. Light-Ion Linear Accelerator for the NICA Project. Physics and Technique of Accelerators, Vol. 17, No. 4, pp. 481–487, 2020.
4. V.A. Andreev, K.A. Levterov et al. Reconstruction of Light and Polarized Ion Beam Injection System of JINR Nuclotron-NICA Accelerator Complex. Problems of Atomic Science and Technology., Vol. 2013, No. 6, pp. 8-12, 2013
5. S.V. Barabin, K.A. Levterov et al. Injection of Polarized Protons and Light Ions in the Nuclotron Superconducting Synchrotron. Physics of Particles and Nuclei Letters, Vol. 15, No. 7, pp. 827–830, 2018.
6. A. Sorin et al. Heavy-Ion Program at NICA/MPD at JINR. Nuclear Physics A 855, pp. 510-513, 2011
<https://doi.org/10.1016/j.nuclphysa.2011.02.118>
7. V. Kekelidze, R. Lednicky, V. Matveev, I. Meshkov, A. Sorin, G. Trubnikov, NICA Project at JINR. Physics of Particles and Nuclei Letters, v. 9, pp. 313-316, 2012
DOI: 10.1134/S1547477112040164
8. Технический проект ускорительного комплекса NICA, Т.2, Дубна, ОИЯИ, 2015
9. I. Meshkov et al. Electron Cooling in the NICA Project: Status and Problems. COOL2019, pp. 59-63, 2019
10. A.V. Butenko, K.A. Levterov et al. The Heavy Ion Linac at the NICA Project. Proc. of LINAC2014, pp. 1068-1070, 2014.
11. A.V. Butenko, K.A. Levterov et al. Injection complex development for the NICA project. Proc. of LINAC'18, pp. 663-665, 2018
12. A. Sidorin, K. Levterov et al.. Status of the Nuclotron. Proc. of RuPAC'2016, pp.150-152, 2016.
13. A M Bazanov, K.A. Levterov et al. Laser Ion Source in Injection Facility of NICA project. Physica Scripta, Vol. 95, No. 5, 2020. <https://doi.org/10.1088/1402-4896/ab7aab>

14. A.M. Bazanov, K.A. Levterov et al. Commissioning of the New Heavy Ion Linac at the NICA Project. Proc. of IPAC'2017, pp. 2362-2365, 2017
15. A. Butenko, K. Levterov et al. First Experiments with Accelerated Beams in the Booster of the NICA Accelerator Complex. Proc. of IPAC'2021, pp. 123-125, 2021.
16. V. Akimov, K. Levterov et al. Acceleration of He^+ Beams for Injection into NICA Booster during its First Run. Proc. of IPAC'2021, pp. 3016-3019, 2021
17. . A.M. Bazanov, K.A. Levterov et al. He^+ Ion Source for the NICA Injection Complex. Proc. of RuPAC'2021, pp. 316-318, 2021.
18. V. Akimov, K. Levterov et al. Acceleration the Beams of He^+ and Fe^{14+} Ions by HILAC and its Injection into Booster in its Second Run. Proc. of RuPAC'2021, pp. 65-67, 2021.
19. E. Syresin, K. Levterov et. al. NICA Ion Collider at JINR. Proc. of RuPAC'2021, pp. 12-16, 2021.