

ОБЪЕДИНЕННЫЙ ИНСТИТУТ ЯДЕРНЫХ ИССЛЕДОВАНИЙ
ЛАБОРАТОРИЯ ФИЗИКИ ВЫСОКИХ ЭНЕРГИЙ
ИМ. В. И. ВЕКслера И А. М. БАЛДИНА

T-812

На правах рукописи



ТУЗИКОВ

Алексей Васильевич

ИНЖЕКЦИЯ ПУЧКОВ ТЯЖЕЛЫХ ИОНОВ
В СВЕРХПРОВОДЯЩИЙ БУСТЕРНЫЙ СИНХРОТРОН
УСКОРИТЕЛЬНОГО КОМПЛЕКСА NICA

Специальность: 1.3.18 — физика пучков заряженных частиц
и ускорительная техника

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание ученой степени
кандидата физико-математических наук

Дубна 2022

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Работа выполнена в Лаборатории физики высоких энергий им. В. И. Векслера и А. М. Балдина
Объединенного института ядерных исследований.

- Научный руководитель** – доктор физико-математических наук, академик РАН
Мешков Игорь Николаевич
- Соруководитель** – кандидат технических наук
Бутенко Андрей Валерьевич
- Официальные оппоненты** – Беркаев Дмитрий Евгеньевич,
кандидат физико-математических наук,
Институт ядерной физики СО РАН, г. Новосибирск,
заместитель директора
- Фещенко Александр Владимирович,
доктор физико-математических наук,
ФГБУН Институт ядерных исследований РАН,
г. Москва, заместитель директора по научной работе

С электронной версией диссертации можно ознакомиться на официальном сайте
Объединенного института ядерных исследований в информационно-телекоммуникационной
сети «Интернет» по адресу: https://issc.jinr.ru/sois?c=sois/get_file&id=2891. 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



В. А. Арефьев

В Объединенном институте ядерных исследований (ОИЯИ) в рамках
проекта NICA (Nuclotron based Ion Collider fAcility) ведется сооружение нового
ускорительного комплекса. Ускорительный комплекс проекта NICA обеспечивает
ускоренными пучками заряженных частиц экспериментальные установки для
выполнения программы исследований в области релятивистской ядерной физики,
физики спина частиц, радиобиологии и прикладных исследований. Ускорительный комплекс NICA создается на базе сверхпроводящего синхротрона
Нуклотрон – действующей базовой установки Лаборатории Физики Высоких
Энергий ОИЯИ (ЛФВЭ ОИЯИ). Первый этап сооружения ускорительного
комплекса NICA включает в себя запуск в эксплуатацию сверхпроводящего
синхротрона Бустер и начало экспериментов на выведенных пучках на установке
BM@N (Baryonic Matter at Nuclotron). Бустер является основным инжектором
ионов в Нуклотрон. Инжекционная цепочка, предназначенная для инъекции в
Бустер пучков ионов вплоть до золота (проектный сорт ионов) и висмута с
энергией 3,2 МэВ/н, состоит из источника тяжелых многозарядных ионов
электронно-струнного типа КРИОН, высокочастотного линейного ускорителя
ЛУТИ (линейный ускоритель тяжелых ионов) и каналов транспортировки пучков
между элементами цепочки.

В ходе выполнения второго этапа проекта NICA будет осуществлён запуск
сверхпроводящего Коллайдера с двумя точками встречи и первой
экспериментальной установкой – детектором MPD (Multi-Purpose Detector).
Инжектором тяжелых ионов для Коллайдера является Нуклотрон, замыкающий
вышеописанную цепочку КРИОН – ЛУТИ – Бустер. Для Коллайдера наиболее
важными параметрами пучка тяжелых ионов в режиме столкновений являются
его интенсивность и эмиттанс, которые в совокупности определяют светимость
Коллайдера и её время жизни. Проектная светимость Коллайдера (10^{27} см⁻²·с⁻¹) и
приемлемое время жизни светимости (порядка нескольких часов) могут быть
достигнуты с помощью систем электронного и стохастического охлаждения

Научно-техническая
библиотека
ОИЯИ

пучков в Бустере и Коллайдере, но только при условии, что интенсивность пучка, инжектируемого в Коллайдер, достаточна для накопления требуемого числа ионов, что во многом определяется интенсивностью пучка, ускоренного в Бустере. Т.к. основные потери ионов, по оценкам, будут наблюдаться на энергии ниже 5 МэВ/н, то транспортировка ионов от ионного источника до Бустера с последующим адиабатическим захватом пучка в режим ускорения является одной из наиболее критичных задач с точки зрения получения проектной интенсивности пучков и светимости Коллайдера NICA.

Актуальность

Актуальность данной работы заключается

- в необходимости разработки методов достижения проектной интенсивности пучка, ускоренного в Бустере ускорительного комплекса NICA;
- в создании и физическом пуске систем инжекции пучка из линейного ускорителя ЛУТИ в Бустер, что обеспечило получение проектных значений параметров циркулирующего пучка в ходе трех циклов пусконаладочных работ на Бустере.

Основные цели и задачи работы

Цель диссертационной работы состояла в реализации проекта NICA в части создания и исследования системы транспортировки пучка из линейного ускорителя тяжёлых ионов к синхротрону Бустер, инжекции пучка в Бустер ускорительного комплекса NICA и накопления в нём пучков тяжёлых ионов, подлежащих в дальнейшем использованию в ускорительном комплексе NICA.

Диссертационная работа посвящена решению следующих задач:

- 1) Разработка (включая расчёт и численное моделирование) методов инжекции пучка в Бустер и его накопления в Бустере;
- 2) Физическое обоснование концепции, разработка и создание схемы и элементов системы инжекции пучка в Бустер;

- 3) Физическое обоснование, разработка и создание канала транспортировки пучка из ЛУТИ в Бустер;
- 4) Разработка и создание стартового варианта системы инжекции пучка в Бустер;
- 5) Проведение стендовых испытаний разработанного оборудования;
- 6) Проведение пуско-наладочных работ на разработанном оборудовании как неотъемлемой части осуществления физического пуска Бустера.

На защиту выносятся:

- 1) физический проект перестраиваемой системы инжекции пучка в Бустер, позволяющей осуществлять инжекцию пучка несколькими альтернативными методами;
- 2) физический проект канала транспортировки пучка ЛУТИ-Бустер, обеспечивающего получение требуемых для проектных режимов инжекции продольных и поперечных параметров пучка с возможностью сепарации и поглощения ионов нецелевых зарядностей;
- 3) физический проект и результаты стендовых испытаний устройств системы инжекции пучка в Бустер – электростатического септума и модулей инфлекторных пластин с системой питания, допускающей режимы одноступенчатых и двухступенчатых импульсов электрического поля (импульсов с одним и двумя уровнями плато);
- 4) результаты физического пуска канала транспортировки пучка ЛУТИ-Бустер и стартовой конфигурации системы инжекции пучка, подтвердившие правильность проектных решений и работоспособность построенной системы.

Научная новизна

Предложены и разработаны:

- 1) концепция перестраиваемой системы инжекции пучка в Бустер, позволяющей осуществлять инжекцию пучка несколькими альтернативными методами, и физический проект системы, воплощающей данную концепцию;

2) физический проект электрических импульсных устройств - инфлекторных пластин и их системы питания, работающих в режимах одноступенчатых и двухступенчатых (со скачкообразным ростом напряженности электрического поля в зазоре между пластинами) импульсов, что позволяет минимизировать эмиттанс накопленного пучка;

3) физический проект канала транспортировки пучка ЛУТИ-Бустер, обеспечивающий инжекцию пучка в Бустер несколькими разработанными методами, а также сепарацию и поглощение ионов нецелевых зарядностей.

Личный вклад автора

Вклад автора в результаты, приводимые в работе, является определяющим. Разработка концепции инжекции пучка в Бустер, включая методы инжекции с использованием режима двухступенчатых импульсов инфлекторных пластин, а также разработка физических проектов системы инжекции пучка и канала транспортировки пучка ЛУТИ-Бустер, включая численное моделирование динамики пучка, выполнены автором лично. Разработка технических проектов и стендовые испытания устройств системы инжекции пучка в Бустер, а также физический пуск канала транспортировки пучка ЛУТИ-Бустер и стартовой конфигурации системы инжекции проведены при определяющем участии автора.

Практическая ценность работы

В ходе выполнения данной работы были разработаны и введены в действие:

- канал транспортировки пучка ЛУТИ-Бустер;
- электростатический септум системы инжекции пучка в Бустер, служащий для ввода пучка в вакуумную камеру Бустера, в котором достигнут сверхвысокий вакуум на уровне 10^{-11} Торр;
- электрические импульсные устройства – инфлекторные пластины системы инжекции пучка, схема питания которых позволяет получать одноступенчатые и двухступенчатые импульсы электрического поля в зазоре между пластинами.

Был осуществлен физический пуск канала транспортировки пучка ЛУТИ-Бустер и стартовой конфигурации системы инжекции пучка в Бустер, в ходе которого получена циркуляция пучка в Бустере при значениях параметров ионно-оптической структуры канала транспортировки и устройств инжекции пучка, близких к проектным. В ходе выполнения физического пуска был получен опыт настройки инжекции пучка в Бустер с использованием методики настройки, разработанной на основе результатов численного моделирования динамики пучка на виртуальных моделях канала и кольца Бустера.

Апробация работы

Основные результаты диссертации докладывались и обсуждались на Международных конференциях по ускорителям заряженных частиц IPAC, Всероссийских конференциях по ускорителям заряженных частиц RuPAC, Международных семинарах по проблемам ускорителей заряженных частиц памяти В.П. Саранцева, международной сессии-конференции Секции ядерной физики ОФН РАН "Физика фундаментальных взаимодействий", международных семинарах «The International Workshop "NICA Accelerating Complex: Problems and Solutions"», Международных научных конференциях молодых ученых и специалистов ОИЯИ, научных семинарах в ОИЯИ и рабочих совещаниях Machine Advisory Committee проекта NICA.

Публикации

Основные результаты диссертации опубликованы в рецензируемых журналах, рекомендованных ВАК [1-6] (статьи изданы на русском и английском языках), трудах конференций и иных публикациях [7-20].

Структура и объем диссертации

Диссертация состоит из введения, 5 глав, заключения, списка литературы из 138 наименований и 8 приложений. Текст диссертации содержит 69 рисунков, 12 таблиц. Общий объем составляет 130 страниц, включая приложения.

СОДЕРЖАНИЕ ДИССЕРТАЦИОННОЙ РАБОТЫ

Во введении представлены основные цели проекта NICA, дается краткое описание ускорительного комплекса, создаваемого в рамках этого проекта, а также обосновывается важность и актуальность задач, решаемых в диссертации, приводятся цели работы, положения, выносимые на защиту, личный вклад автора, научная новизна и практическая ценность работы.

Основное содержание работы изложено в 5 главах.

В первой главе приводится краткое описание ускорителей ЛУТИ и Бустер ускорительного комплекса NICA, формулируются задача проектирования систем перевода пучка из ЛУТИ в Бустер (включающих в себя канал транспортировки пучка ЛУТИ-Бустер и систему инжекции пучка в Бустер), требования на параметры пучка при переводе, а также ограничения на размещение и параметры устройств канала и системы инжекции, обусловленные особенностями динамики пучка в ЛУТИ и Бустере. В главе дается краткий обзор подходов, применяемых при решении задач транспортировки и инжекции пучков в синхротроны, в том числе на аналогичных ускорительных комплексах BNL, CERN, FAIR.

В ускорительном комплексе NICA [8, 11] одним из важнейших звеньев, с точки зрения получения проектной интенсивности пучков тяжелых ионов на входе Коллайдера, является участок перевода пучка из тяжелоионного линейного ускорителя ЛУТИ в синхротрон Бустер [7-9], включающий в себя канал транспортировки пучка ЛУТИ-Бустер и систему инжекции пучка в Бустер. ЛУТИ является частью инжекционной цепочки для пучков тяжелых ионов, которая обеспечивает инжекцию в Бустер ионов с отношением массы к заряду $A/q \leq 6,35$ (например, золота $^{197}\text{Au}^{31+}$) с энергией 3,2 МэВ/н. Инжекционная цепочка также включает электронно-струнный источник высокозарядных ионов КРИОН-6Т и каналы транспортировки пучков низких и средних энергий.

Источник КРИОН по проекту должен обеспечить получение до $2,5 \cdot 10^9$ ионов Au^{31+} за импульс с частотой следования импульсов 10 Гц при времени вывода ионов из источника от 8,5 мкс. Пучок многокомпонентный, ширина

зарядового спектра для ионов золота (при максимуме тока для Au^{31+}) – около 10 зарядовых состояний, при этом целевая зарядность (зарядность максимальной интенсивности) составляет около 15% пучка. Малая доля ионов целевой зарядности на выходе ионного источника является одним из факторов, ограничивающим интенсивность пучка в Бустере.

Канал транспортировки ионов низкой энергии, начинающийся от выходного электрода источника КРИОН, состоит из вытягивающего и фокусирующего электродов, ускоряющей трубки, двух осесимметричных магнитных линз и двухкоординатного дипольного корректора. Линейный ускоритель ЛУТИ состоит из трех ускоряющих структур: секции RFQ и двух секций DTL с двумя согласующими каналами транспортировки пучков средней энергии. На выходе ЛУТИ пучок золота с целевой зарядностью Au^{31+} будет иметь две паразитных зарядности - Au^{30+} и Au^{32+} – при этом интенсивность целевой зарядности будет составлять порядка 40% от полного тока пучка. Основные потери ионов нецелевых зарядностей происходят в первой секции ЛУТИ. Наиболее критичным участком является канал транспортировки ионов низкой энергии, моделирование динамики ионов в котором показало сильную зависимость поперечного эмиттansa многокомпонентного пучка на выходе канала от тока, что ведет к падению эффективности согласования пучка с акцептансом первой секции ЛУТИ и снижению прохождения пучка в ЛУТИ в целом [8].

Бустер NICA – сверхпроводящий синхротрон с периметром 210,96 м, размещающийся внутри ярма бывшего магнита Синхрофазотрона. Основными задачами Бустера являются накопление ионов при энергии инжекции (до $2 \cdot 10^9$ ионов Au^{31+}), формирование требуемого фазового объема пучка с использованием системы электронного охлаждения, ускорение ионов до энергии, требуемой для их эффективной обдирки, с последующим быстрым выводом пучка для его инжекции в Нуклотрон. В кольце Бустера основными факторами, ведущими к снижению интенсивности пучка на выходе ускорителя, являются ограничения на характеристики накопленного пучка:

1. Интенсивность пучка не менее $2 \cdot 10^9$ ионов.

2. Продольный импульсный разброс менее $1,5 \cdot 10^{-3}$.

3. Горизонтальные и вертикальные инварианты бетатронных колебаний ионов не превышают значений $150 \text{ п.мм} \cdot \text{мрад}$ и $58 \text{ п.мм} \cdot \text{мрад}$ соответственно.

Задача проектирования систем перевода пучка из ЛУТИ в Бустер заключается в выборе методов инжекции пучка в синхротрон, а также элементов канала транспортировки и системы инжекции, позволяющих выполнить вышеизложенные требования на параметры пучка независимо от наличия факторов, ограничивающих интенсивность пучка, и с учетом расчетных характеристик пучка на выходе ЛУТИ. Для размещения устройств системы инжекции предназначен 1-й прямолинейный промежуток и соседние регулярные ячейки арок Бустера. Устройства системы инжекции, устанавливаемые в регулярные ячейки, размещаются внутри криостатов между модулями сверхпроводящих магнитов.

Существует широкое множество методов инжекции ионных пучков в синхротроны, которые могут быть классифицированы по двум признакам: 1) число импульсов инжекции частиц; 2) длительность импульсов инжекции. По первому признаку методы делятся на однократные и многократные, по второму – на однооборотные и многооборотные методы инжекции. Анализ подходов, применяемых при решении задач транспортировки и инжекции ионных пучков в синхротроны, показывает, что имеющееся многообразие методов инжекции в совокупности позволяет решить весь набор задач по получению проектной интенсивности ионных пучков в Бустере.

Во второй главе формулируется концепция перестраиваемой инжекции пучка в Бустер и дается описание различных схем, реализующих методы однократной однооборотной, однократной многооборотной и многократной однооборотной инжекции пучка в Бустер, включая схемы с двухступенчатыми импульсами инфлекторных пластин. Приводятся результаты численного моделирования динамики пучков при инжекции в Бустер, анализируется эффективность заполнения фазового пространства Бустера ионами при использовании различных схем инжекции, рассматриваются зависимости

эффективных эмиттансов накопленного пучка от частоты бетатронных колебаний и от коэффициента рассогласования инжектируемого пучка с Бустером. Представлена концепция и результаты численного моделирования динамики пучка в электростатическом септуме системы инжекции.

Предлагается концепция перестраиваемой инжекции пучка в Бустер – концепция системы, имеющей возможность реализовать несколько альтернативных методов инжекции [1]. Данная концепция предполагает бетатронное накопление ионов в горизонтальной фазовой плоскости синхротрона. Метод однократной однооборотной инжекции рассматривается как метод инжекции пучка в Бустер по умолчанию. Для уменьшения потерь ионов низких энергий вследствие эффектов пространственного заряда и оптимизации времени вывода ионов из источника КРИОН с целью получения высокоинтенсивных пучков предлагается применять метод однократной многооборотной инжекции пучка. В случае недостаточности тока пучка, выведенного из источника КРИОН, предлагается использовать многократную однооборотную инжекцию. На основе приведенных концептуальных решений разработан физический проект системы инжекции пучка [1, 3, 9, 10], состоящей из электростатического септума ИЭС и трех модулей электрических кикеров – инфлекторных пластин ИП1–ИП3 (см. Рис. 1). За выход электростатического септума принята центральная точка прямолинейного промежутка. Эффективные длины инфлекторных пластин приняты следующими: ИП1 и ИП3 – 0,45 м; ИП2 – 0,8 м.

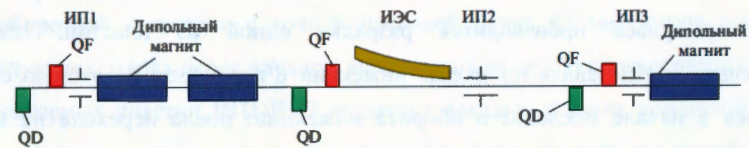


Рис. 1. Схема размещения элементов системы инжекции пучка в Бустер. Обозначения: QF, QD – фокусирующие и дефокусирующие квадрупольные линзы [3].

При однократной однооборотной инжекции пучок по горизонтали вводится в вакуумную камеру Бустера и сажается на заданную траекторию циркуляции

пучка модулем инфлекторных пластин ИПЗ. Основной проектной схемой однократной однооборотной инжекции является схема с точной посадкой пучка на замкнутую орбиту и полным согласованием со структурными функциями Бустера. Для подавления эффектов сдвига частот бетатронных колебаний рассматриваются две дополнительные схемы инжекции. В первой схеме инжектируемый пучок не сажается точно на замкнутую орбиту. Вторая схема заключается в инжекции несогласованного с Бустером пучка при сохранении траектории движения. Обе дополнительные схемы однократной однооборотной инжекции могут обеспечить увеличение горизонтального эмиттанса пучка вплоть до максимально допустимого значения в 150 п.мм.мрад .

Для осуществления однократной многооборотной инжекции перед началом ввода пучка в окрестности септума с помощью инфлекторных пластин ИП1-ИПЗ создается бамп замкнутой орбиты. Ввод ионов продолжается в течение двух-трех оборотов пучка. При условии постоянства полей в инфлекторных пластинах в течение ввода пучка, накопление ионов происходит так, как это показано на Рис. 2а, при этом двух- и трехоборотная инжекция проводятся одинаково. В целях более компактного заполнения ионами горизонтальной фазовой плоскости и уменьшения эмиттанса накопленного пучка, предложен режим работы инфлекторных пластин с двухступенчатым импульсом, когда во время инжекции происходит скачкообразное изменение полей в них, получаемое с помощью независимой зарядки и разрядки электродов модулей инфлекторных пластин: на первом этапе инжекции заряжены обе пластины, в момент перехода на вторую ступень импульса производится разрядка одной из пластин. Наиболее интересными представляются схемы инжекции с переходом на вторую ступень импульса в начале последнего оборота инжекции: после перехода на вторую ступень в модулях ИП2 и ИП3, на выходе последнего модуля инфлекторных пластин осуществляется посадка на замкнутую орбиту геометрического центра накапливаемого пучка. Описанный подход предполагает различные схемы для различных длительностей инжекции. Схема двухоборотной инжекции с двухступенчатыми импульсами приведена на Рис. 2б. Для проектной рабочей

точки Бустера ($Q_x = 4,8$; $Q_y = 4,85$) отношение горизонтального эмиттанса накопленного пучка к эмиттансу инжектируемого для схемы с постоянной замкнутой орбитой составит около 7,3, в то время как для схемы с двухступенчатыми импульсами отношение эмиттансов равно 4. Следует отметить, что для трехоборотной инжекции использование двухступенчатых импульсов существенного выигрыша по горизонтальному эмиттансу пучка в сравнении со схемой с постоянной орбитой не дает.

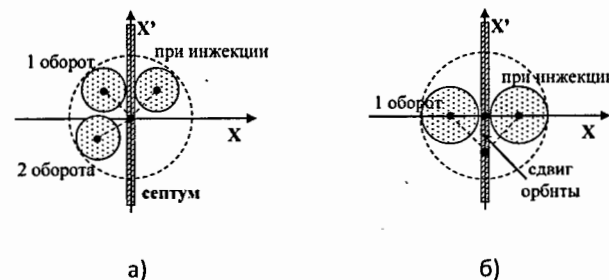


Рис. 2. Фазовые портреты пучка на выходе электростатического септума: а) при многооборотной инжекции с постоянной замкнутой орбитой; б) при двухоборотной инжекции с двухступенчатыми импульсами [1].

Основные схемы многократной однооборотной инжекции пучка заключаются в двух- или трехкратном повторении однооборотной инжекции с частотой 10 Гц. Первый этап инжекции осуществляется по схеме однократной однооборотной инжекции с точной посадкой пучка на замкнутую орбиту. На последующих этапах перед началом ввода ионов на участке инжекции с помощью инфлекторных пластин ИП1-ИП3 создается локальный бамп замкнутой орбиты. Реализуется большое число различных схем многократной инжекции, которые можно классифицировать по двум критериям: 1) наличие зависимости параметров Твисса инжектируемого пучка от порядкового номера этапа инжекции (схемы со статическим и динамическим режимами ввода пучка, реализуемые перестройкой канала транспортировки в интервалах между этапами инжекции); 2)

использование режима одноступенчатых или двухступенчатых импульсов в инфлекторных пластинах. Схемы многократной однооборотной инжекции представлены на Рис. 3.

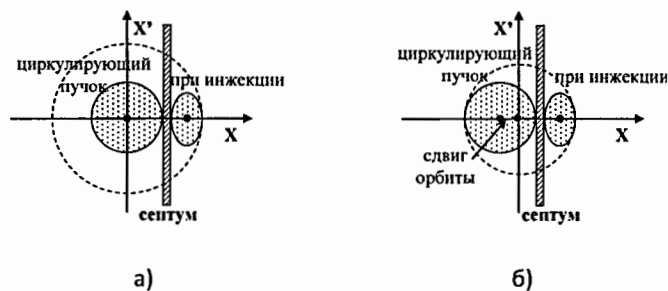


Рис. 3. Фазовые портреты пучка на выходе электростатического септума при многократной однооборотной инжекции: а) с одноступенчатыми, б) с двухступенчатыми импульсами [1].

Согласно результатам моделирования инжекции пучка, для всего множества рассмотренных схем инжекции значения горизонтального эмиттанса накопленного пучка находятся в диапазоне от 15 до 135 $\mu\text{м}\cdot\text{мрад}$ и не превышают аксептанс Бустера, за исключением 2 схем трехкратной инжекции с одноступенчатыми импульсами, которые далее не рассматриваются в числе основных схем инжекции.

Из результатов расчетов определены основные параметры устройств системы инжекции пучка в Бустер. Зазоры между инфлекторными пластинами: ИП1 и ИП3 – 102 мм; ИП2 – 93 мм. Центр зазора пластин ИП2 смещен на 10,5 мм относительно оси Бустера. Максимальное напряжение на инфлекторных пластинах составляет 65 кВ, максимальный скачок напряжения в режиме двухступенчатых импульсов – 20 кВ. Электростатический септум типа секторного дефлектора с кривизной поверхностей электродов 11,5 м и 11,535 м, соответствующей вводной траектории пучка, работающий при комнатной температуре. Длина электростатического септума – 1,9 м, угол между финальным участком канала и осью Бустера – $9,5^\circ$. Эффективная толщина ножа септума

выбрана равной 1,5 мм. Максимальное напряжение в зазоре септума для обеспечения всех основных схем инжекции пучка составляет 125 кВ.

В третьей главе представлен проект канала транспортировки пучка ЛУТИ-Бустер, с обоснованием отдельных решений, принятых по планировке участка перевода пучка из ЛУТИ в Бустер. Представлены результаты численного моделирования и исследованы различные аспекты динамики пучка в канале транспортировки: зависимость продольных параметров пучка на выходе канала от амплитуды ВЧ-поля дебанчера; влияние дебанчировки на поперечную динамику, а также сопутствующий рост поперечных эмиттансов пучка; влияние ошибок оптической системы канала на инжекцию пучка в Бустер. Описывается методика настройки ионно-оптической системы канала транспортировки, приводятся результаты апробации методики на виртуальной модели канала. Показано, что канал транспортировки обладает гибкой оптической системой, позволяющей проводить настройку канала под различные рабочие точки Бустера и различные режимы работы ЛУТИ.

Для обеспечения концепции перестраиваемой инжекции, разработан физический проект канала транспортировки пучка ЛУТИ-Бустер [10, 12]. Траектория пучка в канале транспортировки, лежащая в медианной плоскости Бустера, представляет собой ломанную из двух длинных прямолинейных секций и шиканы – секции из двух дипольных магнитов в средней части канала. Начальная прямолинейная секция канала длиной 7,3 м включает в себя дебанчер и служит для разгруппировки пучка. Первый дипольный магнит и прямолинейный участок между дипольными магнитами, образующими шикану, длиной 2,1 м используются для сепарации и поглощения нецелевых зарядностей ионов. Финальная прямолинейная секция длиной 6,65 м не пересекает вакуумные кожухи криостата Бустера и вводит пучок напрямую в электростатический септум. Компонировка канала транспортировки пучка ЛУТИ-Бустер приведена на Рис. 4. Ионно-оптическая система канала транспортировки состоит из двух дипольных магнитов, 7 квадрупольных линз, 6 двухкоординатных дипольных корректоров и дебанчера. Предпоследний корректор канала используется для

настройки траектории пучка на входе в электростатический септум, требуемой для обеспечения различных схем инжекции пучка. Система диагностики пучка включает в себя 4 цилиндра Фарадея, 3 трансформатора тока, 5 коробчатых и 4 кнопочных пикапных станции, 1 измеритель фазы пучка и 6 многопроволочных профилометров [13], что позволяет измерять широкий набор параметров пучка. Узел коллиматора устанавливается перед вторым дипольным магнитом и осуществляет поглощение нецелевых зарядностей ионов.

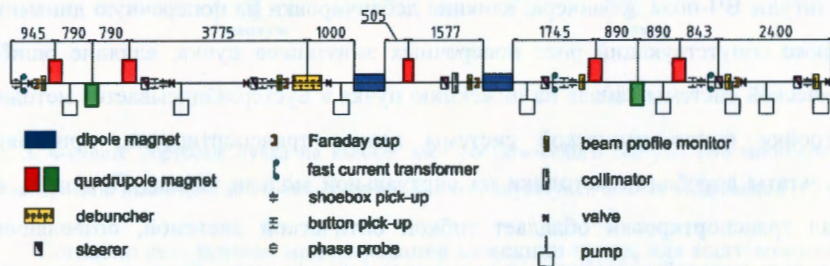


Рис. 4. Компоновка канала транспортировки пучка ЛУТИ-Бустер [17].

Ионно-оптическая система канала транспортировки обеспечивает инжекцию пучка в Бустер всеми рассмотренными схемами инжекции. При найденных настройках поперечные аксептансы канала не менее 30 п.мм-мрад, градиенты полей в линзах не превышают 9 Тл/м. Сепарация и коллимация нецелевых зарядностей осуществляется в интервале отношения зарядов соседних зарядностей $\frac{\Delta Z}{Z}$ выше 1/50, ниже этого значения полное разделение зарядностей не достигается. Также канал обладает достаточно гибкой ионно-оптической системой, позволяющей настроить его под широкий диапазон различных параметров пучка на выходе ЛУТИ и рабочих точек Бустера ($4,65 \leq Q_x \leq 4,9$; $4,5 \leq Q_y \leq 5,2$).

Дебанчер устанавливается на расстоянии 6 м от выхода ЛУТИ в бездисперсионной области. Для выбранного расположения дебанчера амплитуда ВЧ-поля 65 кВ позволяет уменьшить продольный импульсный разброс пучка до значений менее $1,5 \cdot 10^{-3}$. Оценка влияния дебанчировки на поперечную динамику

и выходные параметры пучка показала, что рост эффективных эмиттансов транспортируемого пучка составляет около 30%.

Определены допуски на временную стабильность полей дипольных магнитов – $\pm 5 \cdot 10^{-4}$. При данных уровнях временной стабильности усредненный по импульсам инжекции рост поперечных эмиттансов пучка достигает 50%. Показано, что система 6 дипольных корректоров канала обладает достаточной гибкостью и обеспечивает транспортировку пучка в канале без потерь при ослабленных допусках на юстировку магнитов: продольное смещение дипольных магнитов – ± 20 мм; поворот дипольных магнитов вокруг продольной оси – $\pm 0,5$ градуса; поперечное смещение квадрупольных линз – ± 1 мм.

Разработана методика настройки канала транспортировки для перевода однокомпонентного ионного пучка, предполагающая локальную коррекцию траектории пучка на прямолинейных участках перед дебанчером и электростатическим септумом, обеспечивающую полное зануление искажения траектории. Численное моделирование динамики пучка с имитацией настройки канала по разработанной методике показало ее эффективность в плане получения требуемых параметров пучка на входе в Бустер.

В четвертой представлены проекты устройств системы инжекции пучка в Бустер, включая результаты численного моделирования электрических полей устройств, а также техническое описание и результаты испытаний оборудования канала транспортировки и системы инжекции пучка, включая магнитную систему, систему электропитания магнитов, дебанчер, систему диагностики пучка, вакуумную систему, модули инфлекторных пластин с системами питания и управления, электростатический септум с источником питания.

Магнитная система канала транспортировки включает в себя нормально-проводящие дипольные, квадрупольные и корректирующие магниты (дипольные корректора). Питание квадрупольных линз канала транспортировки импульсное [13]. Для питания дипольных магнитов используются как импульсные источники, так и источники постоянного тока. Дипольные корректоры запитываются от источников постоянного тока. Дебанчер представляет собой четырех-ззорный

резонатор, питание которого осуществляется от системы ВЧ-питания ЛУТИ. Вакуумная система канала, предназначенная для обеспечения требуемых вакуумных условий транспортировки пучка, включает в себя вакуумные пучковые камеры и сильфонные компенсаторы, вакуумные шиберы, форвакуумные, турбомолекулярные, магниторазрядные и геттерные насосы, вакуумметры, блоки управляющей электроники и релейная автоматика.

Модули инфлекторных пластин ИП1 и ИП3 устанавливаются внутри криостата в периодических ячейках Бустера, инфлекторные пластины ИП2 и электростатический септум – непосредственно в 1-ом прямолинейном промежутке Бустера, большая часть которого находится при комнатной температуре, а для криогенных и сверхпроводящих коммуникаций создается байпас «теплого» промежутка.

Электростатический септум (см. Рис. 5) представляет собой два электрода с радиусами изгиба 11,5 м / 11,535 м и шириной 110 мм / 200 мм, устанавливаемые вертикально внутри вакуумного кожуха [4, 5]. Зазор между электродами – 35 мм, длина центральной траектории поворота пучка в зазоре септума – 1,9 м. Толщина ножа септума, в качестве которого служит анод, составляет 1 мм. Питание септума осуществляется источником постоянного напряжения. Высокое напряжение до 130 кВ подается на катод, анод замыкается. Согласно расчетам, максимальная напряженность на краях катода не превышает 90 кВ/см. Неоднородность электрического поля в септуме в области прохождения пучка – не более $\pm 1\%$ по всей ширине зазора.

Модуль инфлекторных пластин представляет собой пару профилированных электродов (далее пластина №1 и пластина №2 модуля), которые устанавливаются вертикально внутри отдельной вакуумной камеры. Используются модули двух типов, различающихся конструктивно, в том числе профилем пластин, который обеспечивает получение неоднородности поля не более $\pm 1\%$ в области прохождения пучка. Инфлекторные пластины ИП2 (см. Рис. 6а) имеют длину пластин 0,75 м, зазор составляет 93 мм. Максимальное напряжение между пластинами ИП2 не превышает 50 кВ. Пластины модулей ИП1/ИП3 длиной 0,45

м, расстояние между пластинами составляет 102 мм. Вакуумные камеры модулей ИП1/ИП3 устанавливаются в разъемные вакуумные кожухи, являющиеся частью криостата Бустера. Также криостатный модуль инфлекторных пластин включает в себя тепловые медные экраны, высоковольтные вводы, а также транзитные коммуникации криогенных жидкостей и сверхпроводящих линий электрической связи магнитной системы Бустера (см. Рис. 6б).



Рис. 5. Конструкция электростатического септума [4].



Рис. 6. Конструкция модулей инфлекторных пластин: а) модуль ИП2 [4]; б) криостатный модуль ИП1/ИП3.

Система питания инфлекторных пластин включает 5 источников высоковольтного импульсного питания [2], осуществляющих независимую однополярную зарядку и разрядку пластин, составляющих модуль (в модуле ИП1 пластина №2 всегда заземлена). Система обеспечивает два режима работы

инфлекторных пластин: с одноступенчатыми и двухступенчатыми импульсами напряжения. Различаются два типа источников питания. Первый тип имеет амплитуду импульса до 65 кВ и используется для высоковольтного питания пластин №1 модулей инфлекторных пластин. Второй тип с максимальной амплитудой 20 кВ предназначен для питания пластин №2 модулей ИП2 и ИП3.

В 2014-2021 гг. выполнялись работы по изготовлению и комплектованию оборудования канала транспортировки и системы инжекции. В ходе проведенных испытаний были достигнуты проектные характеристики оборудования, что подтвердило правильность принятых технических решений.

В пятой главе представлены результаты физического пуска канала и стартовой конфигурации системы инжекции с пучками ионов гелия, углерода и железа, включающие измерения параметров пучка. Описывается методика настройки инжекции пучка в Бустер, обсуждается достаточность компоновки системы диагностики пучка в Бустере с точки зрения настройки различных схем инжекции. Приводятся результаты частичной апробации методики настройки оптической системы канала и системы инжекции с пучком. Показано, что однократная однооборотная инжекция и последующая циркуляция пучка в Бустере достигаются при параметрах оптической структуры канала и устройств инжекции пучка, близких к проектным.

Анализ возможных подходов к настройке основных схем инжекции пучка в Бустер показывает, что система диагностики пучка в Бустере, состоящая из 24 пикапных станций, а также двух трансформаторов тока и ионизационного профилометра, размещаемых в 1-м прямолинейном промежутке, позволяет осуществлять настройку инжекции и циркуляции пучка в Бустере. Для более гибкой и прозрачной настройки импульсного бампа замкнутой орбиты, создаваемого при многооборотной и многократной инжекции, предложена установка двух дополнительных пикапов по краям 1-го прямолинейного промежутка.

Предложена методика настройки однократной однооборотной инжекции пучка, основная идея которой заключается в получении пересечения в центре

модуля ИПЗ замкнутой орбиты и траектории инжектируемого пучка на первом обороте, чем достигается точная посадка пучка на орбиту [17]. Методика основана на восстановлении фазовых траекторий пучка по пооборотным измерениям его положения на участке инжекции. С помощью разработанной виртуальной модели Бустера была проведена апробация методики настройки, которая показала высокую гибкость данной методики и возможность ее использования для измерения частот бетатронных колебаний и структурных функций ускорителя.

В ходе трех первых сеансов пусконаладочных работ (ПНР) Бустера, проведенных в декабре 2020 г., в сентябре 2021 г. и в период с января по апрель 2022 г., был осуществлен физический пуск Бустера и канала транспортировки ЛУТИ-Бустер [6, 14-20]. В первом сеансе ПНР были получены инжекция и циркуляция пучка ионов гелия ${}^4\text{He}^{1+}$, а также осуществлено их ускорение в Бустере до энергии 100 МэВ/н. Была зафиксирована максимальная в стартовых сеансах пусконаладочных работ (ПНР) Бустера интенсивность циркулирующего пучка: $7 \cdot 10^{10}$ ионов гелия, что по заряду соответствует проектной интенсивности ионов Au^{31+} . В начале второго сеанса ПНР также проводились работы с пучком ионов гелия ${}^4\text{He}^{1+}$, с ускорением ионов до энергии 240 МэВ/н. Затем была произведена замена ионного источника на входе ЛУТИ и успешно инжектированы и ускорены на 5-й гармонике ускоряющего ВЧ-поля пучки ионов ${}^{56}\text{Fe}^{14+}$, с эффективностью адиабатического захвата в режим ускорения более 95%. Практически без потерь пучок был ускорен до энергии 65 МэВ/н, разгруппирован и снова сгруппирован на 1-й гармонике ВЧ-поля, после чего ускорен до проектной энергии 578 МэВ/н при темпе роста магнитного поля 1,2 Тл/с. Также был осуществлен вывод ионов из Бустера и их транспортировка по каналу транспортировки Бустер-Нуклотрон. В ходе третьего сеанса ПНР были инжектированы ионы углерода ${}^{12}\text{C}^{4+}$, ускорены до энергии 263 МэВ/н, затем ободраны на обдирочной мишени при выводе из Бустера до ядер и по каналу Бустер-Нуклотрон введены в кольцо Нуклотрона. В итоге, в третьем сеансе

оборудование канала ЛУТИ-Бустер и системы инжекции без сбоев отработало в течение более двух месяцев.

Первое тестовое включение канала транспортировки ЛУТИ-Бустер с плазменным источником ионов гелия ${}^4\text{He}^{1+}$ было проведено в декабре 2019 г., на промежуточной стадии монтажа стартовой конфигурации канала, без конечной части ионпровода канала перед электростатическим септумом. После установки расчетных токов в магниты канала пучок был детектирован на его выходе. В ходе физического пуска во время сеансов ПНР в канале была проведена коррекция траектории пучка на участках перед дебанчером и в конце канала, в результате чего была достигнута транспортировка пучка с коэффициентом прохождения в канале не менее 90% (см. Рис. 7). При настройках квадрупольных линз, близких к теоретическим, измерения поперечных профилей пучка показали соответствие экспериментальных данных теоретическим размерам пучка не хуже 30%.

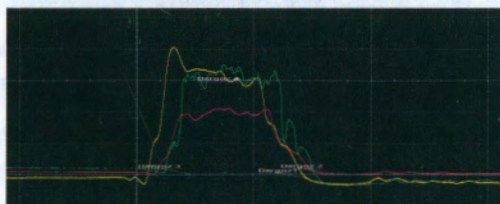
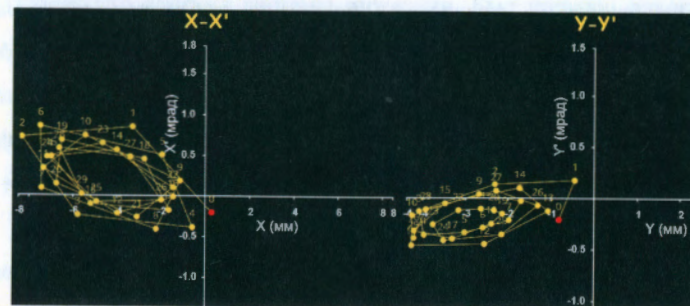


Рис. 7. Сигналы пучка на трансформаторах тока в начале (желтая кривая) и в конце канала (зеленая кривая). Деление временной шкалы – 5 мкс; деление вертикальной шкалы – 1 мА.

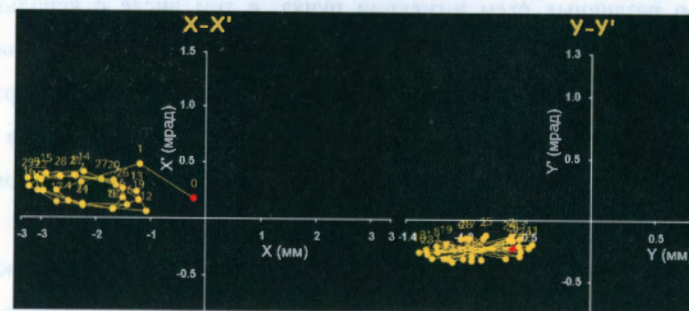
В процессе настройки траектории пучка на финальном участке канала и в связке электростатического септума и инфлекторных пластин ИП2 была достигнута эффективность прохождения не менее 90%. Максимальный пиковый ток инжектированного пучка, наблюдавшийся в кольце Бустера, достигал 3 мА при токе пучка 3,5-4 мА на выходе ЛУТИ.

В ходе сеансов ПНР Бустера была опробована итерационная процедура подстройки инфлекторных пластин и коррекции замкнутой орбиты с измерениями фазовых траекторий пучка на выходе септума, с помощью которой была получена инжекция с амплитудой когерентных колебаний пучка не более 1

мм (см. Рис. 8), при этом потери инжектированного пучка в кольце на первых оборотах не превышали 10%.



а)



б)

Рис. 8. Фазовые траектории когерентных колебаний пучка, измеренные за первые 30 оборотов циркуляции: а) до выполнения подстройки инфлекторных пластин и коррекции замкнутой орбиты; б) после подстройки. Красные точки изображают восстановленные начальные положения пучка.

Предложенная методика мониторинга фазовых траекторий пучка показала свою эффективность как инструмент измерения динамических характеристик ускорителя. В третьем сеансе ПНР Бустера была проведена подстройка синхротрона в проектную рабочую точку, и по результатам измерений расхождение между теоретическими и измеренными значениями структурных функций Бустера составило не более 5%.

В заключении представлены основные результаты работы.

Под руководством автора, лично или при его определяющем участии решены следующие задачи:

1) Предложена и физически обоснована концепция перестраиваемой инжекции пучка тяжелых ионов в Бустер, включающая методы однооборотной, многооборотной и многократной инжекции. Концепция позволяет решать задачи накопления пучков требуемой интенсивности при различных режимах работы тяжелоионной инжекционной цепочки ускорительного комплекса и при наличии различных факторов, приводящих к потерям ионов.

2) Предложены и физически обоснованы проекты системы инжекции пучка в Бустер и канала транспортировки пучка ЛУТИ-Бустер, обеспечивающие реализацию различных схем инжекции пучка, в том числе с использованием двухступенчатых импульсов в инфлекторных пластинах системы инжекции. Использование независимого питания инфлекторных пластин и перестройки канала ЛУТИ-Бустер приводит к более компактному заполнению ионами фазового пространства и, следовательно, к минимизации эмиттанса накопленного пучка.

3) Разработаны технические проекты и проведены стендовые испытания оборудования канала транспортировки пучка ЛУТИ-Бустер и устройств системы инжекции пучка в Бустер в стартовой конфигурации. В ходе испытаний на всем оборудовании получены проектные параметры, необходимые для работы с пучком в стартовых сеансах.

4) С использованием предложенных и разработанных систем инжекции и канала транспортировки осуществлён физический пуск Бустера. Главным итогом пусконаладочных работ на канале транспортировки стал перевод пучка в канале с высоким коэффициентом прохождения - не менее 90% при значениях уставок систем, близких к проектным. Одним из основных результатов сеансов пусконаладочных работ Бустера являются инжекция пучков ионов ${}^4\text{He}^{1+}$, ${}^{12}\text{C}^{4+}$ и ${}^{56}\text{Fe}^{14+}$, а также получение их устойчивой циркуляции в кольце с минимальными амплитудами когерентных колебаний.

5) Предложена и апробирована методика настройки инжекции пучка в Бустер, основанная на измерениях фазовых траекторий пучка на выходе электростатического септума системы инжекции. Был получен опыт настройки инжекции пучка в Бустер с использованием данной методики настройки, что позволит в дальнейшем развить методы автоматизированной настройки канала и кольца Бустера на основе виртуальных моделей.

Список литературы

Публикации в изданиях, входящих в базу данных RSCI и рекомендованных ВАК России:

1. Волков В.И. и др. Концептуальный проект системы инжекции пучков тяжелых ионов в бустер ускорительного комплекса NICA // Письма в ЭЧАЯ, ISSN:1814-5957, eISSN:1814-5973, Изд:ОИЯИ, 11, 5(189), 1045-1067, 2014.
2. Буланов В.А. и др. Концептуальный проект системы питания отклоняющих пластин многовариантной инжекции в бустер ускорительного комплекса NICA // Письма в ЭЧАЯ, ISSN:1814-5957, eISSN:1814-5973, Изд:ОИЯИ, 11, 5(189), 1074-1078, 2014.
3. Бутенко А.В. и др. Каналы транспортировки, системы инжекции и вывода пучка в ускорительном комплексе NICA // Письма в ЭЧАЯ, ISSN:1814-5957, eISSN:1814-5973, Изд:ОИЯИ, 13, 7 (205), 1507-1526, 2016.
4. В.В. Косухин, А.И. Сидоров, А.В. Тузиков, В.С. Швецов. Модуль устройств для инжекции пучка в Бустер ускорительного комплекса NICA // Письма в ЭЧАЯ, ISSN:1814-5957, Изд:ОИЯИ, Россия, Дубна, 15, 7, 887-891, 2018.
5. В.В. Косухин и др. Вакуумная система модуля устройств для инжекции пучка в бустер ускорительного комплекса NICA // Письма в ЭЧАЯ, ISSN:1814-5957, Изд:ОИЯИ, Россия, Дубна, 15, 7, 807-810, 2018.
6. Бутенко А.В. и др. Вакуумные условия и время жизни пучка однозарядных ионов гелия в Бустере NICA (Первый сеанс) // Письма в ЖЭТФ, том 113, вып. 12, с. 784 – 788, 2021.

Материалы конференций и другие публикации:

7. A. Valkovich et al. Progress in NICA booster design // Proceedings of RuPAC 2012, 2012.
8. Аверичев А.С. и др. Технический проект ускорительного комплекса NICA // Издательский отдел Объединённого института ядерных исследований, Дубна, 2015.

9. A. Tuzikov et al. Booster synchrotron at NICA accelerator complex // Proceedings of RuPAC 2016, 2016.
10. A. Tuzikov et al. Beam transfer from heavy-ion linear accelerator HILAC into Booster of NICA accelerator complex // Proceedings of RuPAC 2016, 2016.
11. E. Syresin et al. Status of accelerator complex NICA // Proceedings of RuPAC 2018, 2018.
12. A. Tuzikov et al. Heavy ion injection chain of NICA Collider // Proceedings of RuPAC 2018, 2018.
13. A. Bogatov et al. HILAC-Booster Transport Channel: the Magnetic Elements Power Supply and Beam Profile Measurements // AIP Conference Proceedings, Изд:AIP Publishing, 2163, 080002, 1-5, 2019.
14. A. Butenko et al. First experiments with accelerated ion beams in the Booster of the NICA accelerator complex // Proceedings of IPAC 2021, 2021.
15. V. Akimov et al. Acceleration of He⁺ beams for injection into NICA Booster during its first run // Proceedings of IPAC 2021, 2021.
16. A. Butenko et al. The NICA complex injection facility // Proceedings of RuPAC 2021, 2021.
17. A. Tuzikov et al. Beam transfer systems of NICA facility: from HILAC to Booster // Proceedings of RuPAC 2021, 2021.
18. V. Akimov et al. Acceleration the beams of He⁺ and Fe¹⁴⁺ ions by HILAC and its injection into NICA Booster in its second run // Proceedings of RuPAC 2021, 2021.
19. E. Syresin et al. NICA ion collider at JINR // Proceedings of RuPAC 2021, 2021.
20. E. Syresin et al. NICA ion collider and plans of its first operations // Proceedings of IPAC 2022, 2022.

Получено 16 декабря 2022 г.