

ОБЪЕДИНЁННЫЙ ИНСТИТУТ ЯДЕРНЫХ ИССЛЕДОВАНИЙ  
ЛАБОРАТОРИЯ ФИЗИКИ ВЫСОКИХ ЭНЕРГИЙ  
ИМ. В. И. ВЕКслЕРА И А. М. БАЛДИНА

*На правах рукописи*

**Филиппов Александр Викторович**

**Магнитно-оптические структуры синхротронов «Комплекса NICA»**

Специальность 1.3.18

«Физика пучков заряженных частиц и ускорительная техника»

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание учёной степени

кандидата физико-математических наук

Дубна — 2025

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

**Научный руководитель** — *Доктор физико-математических наук,*

*Костромин Сергей Александрович*

**Соруководитель** — *Кандидат физико-математических наук,*

*Тузиков Алексей Васильевич*

**Официальные оппоненты** — *Сеничев Юрий Валерьевич,*

*Доктор физико-математических наук,*

*Институт ядерных исследований РАН, г. Троицк,*

*Ведущий научный сотрудник,*

*Отдела ускорительного комплекса*

*Дюбков Вячеслав Сергеевич,*

*Кандидат физико-математических наук,*

*Национальный исследовательский ядерный университет*

*«МИФИ» г. Москва,*

*Доцент кафедры электрофизических установок (№ 14)*

С электронной версией диссертации можно ознакомиться на официальном сайте Объединённого института ядерных исследований в информационно-телекоммуникационной сети «Интернет» по адресу: <https://dissertations.jinr.ru/>. С печатной версией диссертации можно ознакомиться в Научно-технической библиотеке ОИЯИ (г. Дубна, Московская область, ул. Жолио-Кюри, д. 6).

Учёный секретарь диссертационного совета,

кандидат физико-математических наук

старший научный сотрудник

В. А. Арёфьев

## Общая характеристика работы

Данная работа, выполненная автором в Лаборатории физики высоких энергий им. В. И. Векслера и А. М. Балдина (ЛФВЭ) Объединённого института ядерных исследований (ОИЯИ), посвящена магнитно-оптическим структурам сверхпроводящих синхротронов проекта «Комплекс NICA» (здесь NICA — Nuclotron-based Ion Collider fAcility) [1]: Бустера, Нуклотрона и Коллайдера.

Магнитно-оптическая структура является основой любого кольцевого ускорителя, накопителя или коллайдера заряженных частиц. Она представляет собой последовательность дипольных, квадрупольных и корректирующих магнитов, расставленных вдоль периметра установки, обеспечивая стабильность движения заряженных частиц пучка и его фокусировку.

Ключевые свойства структурных элементов: характерные размеры магнитов и величины полей в них напрямую зависят от технологии изготовления. Для «тёплых» магнитов кольцевых ускорителей характерна продольная длина  $0,5\div 5$  м, величина магнитного поля в дипольных магнитах  $0,1\div 2$  Тл, фокусирующий градиент в квадрупольных магнитах  $2\div 50$  Тл/м [2]. Для сверхпроводящих магнитов продольная длина, как правило, варьируется в диапазоне  $0,5\div 14$  м, величина магнитного поля в диполях  $0,1\div 8$  Тл, а фокусирующий градиент лежит в диапазоне  $2\div 200$  Тл/м [3].

Создание линейной магнитно-оптической структуры кольцевого ускорителя, накопителя или коллайдера заряженных частиц с учётом технологии изготовления структурных элементов является первоочередной задачей при разработке концепции любой ускорительной или накопительной установки. При этом определяются структура установки в целом, её ключевые характеристики для обеспечения проектных параметров, например, положение рабочей точки на диаграмме бетатронных частот, другие характеристики, ключевым образом, определяющая динамику пучка заряженных частиц.

С 2006 г. в ЛФВЭ ОИЯИ г. Дубна реализуется проект «Комплекс NICA». Планируется создание сверхпроводящего коллайдера (Коллайдер) для получения интенсивных пучков ядер тяжёлых элементов и поляризованных протонов. Основной научной целью проекта является поиск фазового перехода между адронной материей и кварк-глюонной плазмой и исследования поляризационных эффектов в области полной энергии в системе центра масс до  $11$  ГэВ/н — рекордно низкой [4] для адронных коллайдеров.

Реализация проекта «Комплекс NICA» в ЛФВЭ ОИЯИ происходит на базе сверхпроводящего ионного синхротрона Нуклотрон — действующей базовой установки ОИЯИ и предполагает два этапа. На первом этапе начаты экспериментальные исследования на

установке с фиксированной мишенью BM@N (Baryonic Matter at Nuclotron) на выведенных из Нуклотрона пучках тяжёлых ионов. На втором этапе предполагается запуск сверхпроводящего Коллайдера с двумя местами встречи пучков при средней светимости  $10^{27} \text{ см}^{-2} \cdot \text{с}^{-1}$  и начало работы на физической установке MPD (Multi-Purpose Detector, многоцелевой детектор и/или детектор) в области кинетических энергий сталкивающихся пучков от 1 до 4,5 ГэВ/н.



Рис. 1. Схема ускорительного комплекса проекта «Комплекс NICA»

Инжекционный комплекс состоит из криогенного источника многозарядных тяжёлых ионов на электронной струне, линейного ускорителя тяжёлых ионов, двух сверхпроводящих синхротронов Бустер и Нуклотрон, и каналов транспортировки пучков между всеми элементами инжекционного комплекса. Схема ускорительного комплекса проекта «Комплекс NICA» приведена на Рис. 1 из [1].

## Актуальность

Актуальность диссертационной работы определяется необходимостью создания магнитно-оптической структуры Коллайдера, которая задаёт общую конфигурацию прямолинейных и поворотных секций, формирует пучки заряженных частиц в точке встречи, удовлетворяющие требованиям физического эксперимента, и определяет основные параметры самой установки: положение рабочей точки на диаграмме бетатронных частот, обеспечивающее оптимальную область стабильного бетатронного движения, величины бета-функций вдоль периметра и основные характеристики структурных магнитных элементов.

Кроме того, необходимо найти порядок расстановки дипольных магнитов Коллайдера чтобы искажение замкнутых орбит пучков заряженных частиц в обоих кольцах было минимальным. В равной степени, является актуальной аналогичная задача поиска оптимального порядка расстановки дипольных магнитов для обеспечения минимального искажения замкнутой орбиты пучка заряженных частиц в Бустере.

Диссертационная работа выполнена в рамках темы № 02-1-1065-2007/2026 «Комплекс NICA: создание комплекса ускорителей, коллайдера и экспериментальных установок на встречных и выведенных пучках ионов для изучения плотной барионной материи, спиновой структуры нуклонов и лёгких ядер, проведения прикладных и инновационных работ» Проблемно-тематического плана научно-исследовательских работ и международного сотрудничества ОИЯИ.

## **Объект и предмет исследования**

Объектом исследования диссертационной работы является магнитно-оптические структуры синхротронов «Комплекса NICA»: Коллайдера, Бустера и Нуклотрона. Предметом исследования являются искажения орбиты пучков заряженных частиц и функций магнитной оптики в магнитно-оптических структурах Коллайдера и Бустера, вызванные ошибками магнитных полей в структурных магнитах.

## **Основная цель работы**

Цель диссертационной работы заключалась в реализации проекта «Комплекс NICA» в части создания магнитно-оптической структуры Коллайдера и синхротронов инжекционного комплекса. Для достижения основной цели работы необходимо было сформулировать и решить следующие задачи:

1. Используя физические параметры структурных дипольных и квадрупольных магнитов на основе технологии «Нуклотрон», сформировать магнитную оптику Коллайдера, определив структуру и основные характеристики установки в целом, обеспечив реализацию проектных параметров с точки зрения физического эксперимента.
2. Определить ключевые параметры системы коррекции связи бетатронного движения, системы коррекции хроматичности и системы коррекции динамической апертуры, которые обеспечивают проектные характеристики Коллайдера.
3. Используя данные магнитных измерений диполей Бустера, найти порядок их расстановки в кольце, обеспечивающий минимальное искажение замкнутой орбиты пучка.
4. Используя данные магнитных измерений диполей Коллайдера, найти порядок их

расстановки в кольце, обеспечивающую минимальное искажение замкнутых орбит пучков заряженных частиц в обоих кольцах.

5. Разработать концепцию магнитно-оптической структуры ионного синхротрона Нуклотрон проекта «Новый Нуклотрон».

### **На защиту выносятся:**

1. Линейная магнитно-оптическая структура Коллайдера: общая компоновка и структура оптических элементов в прямолинейных и поворотных секциях; продольное положение всех магнитных элементов в структуре вдоль орбиты пучка; величины токов электропитания всех структурных элементов установки; продольные длины квадрупольных линз прямолинейных промежутков; длины квадрупольных линз подавителя дисперсии; длины квадрупольных линз финального фокуса.
2. Параметры систем коррекции связи бетатронного движения, хроматичности и динамической апертуры, вычисленные величины интегралов магнитных полей в системе вертикального сведения/разведения пучков Коллайдера.
3. Порядок расстановки дипольных магнитов в Бустере, позволивший получить циркуляцию пучка ионов однозарядного гелия в первом сеансе пуско-наладочных работ в конце 2020 г.; порядок расстановки дипольных магнитов Коллайдера, обеспечивающий минимальное искажение замкнутых орбит обоих пучков.
4. Концепция новой магнитно-оптической структуры ионного синхротрона Нуклотрон проекта «Новый Нуклотрон» на основе регулярной ДФО ячейки, расширяющая возможности ускорителя в части реализации программы поляризационных исследований проекта «Комплекса NICA».

### **Научная новизна**

Научная новизна диссертационной работы заключается в следующем:

1. Создана магнитно-оптическая структура сверхпроводящего тяжёлоионного Коллайдера на основе технологии «Нуклотрон» при рекордно низких кинетических энергиях пучков от 1 до 4,5 ГэВ/н.
2. Предложен и реализован порядок расстановки дипольных магнитов в Бустере и дипольных магнитов в поворотных секциях Коллайдера «Комплекса NICA» на основе данных магнитных измерений и с учётом их конструктивных особенностей, минимизирующий искажение замкнутой орбиты.
3. Впервые предложена концепция магнитно-оптической структуры ионного синхротрона Нуклотрон проекта «Новый Нуклотрон» на основе регулярной ДФО ячейки,

расширяющая возможности ускорителя в части реализации программы поляризационных исследований проекта «Комплекса NICA».

## Практическая ценность

Найденный и реализованный при сборке порядок расстановки дипольных магнитов в Бустере позволил получить устойчивую циркуляцию пучка ионов однозарядного гелия в первом сеансе пуско-наладочных работ (ПНР-1) ускорителя в конце 2020 г. без включённой (работающей) системы коррекции магнитного поля Рис. 2, что явилось важным результатом, имеющим большое значение для проекта «Комплекс NICA». Режим был получен при токе в цепи питания магнитов Бустера соответствующем величине магнитного поля на столе инъекции 0,073 Тл (энергия ионов 3,2 МэВ/н) [5].

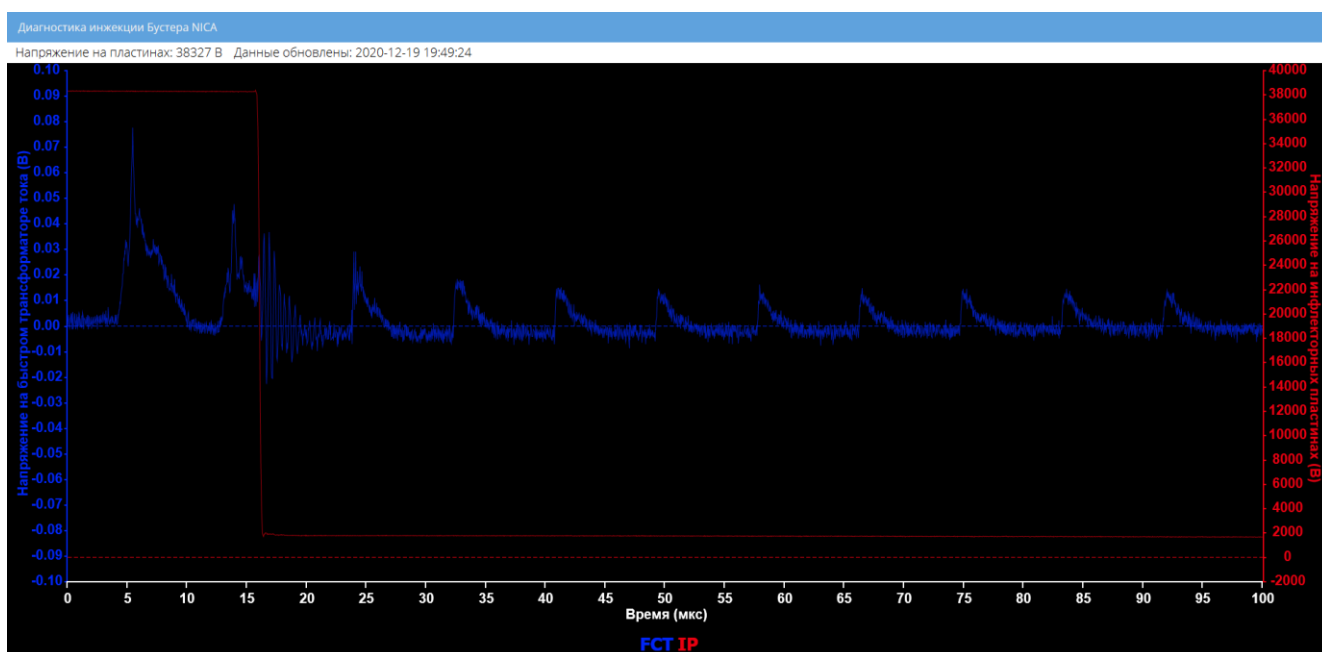


Рис. 2. Сигнал с быстрого трансформатора тока пучка — синяя кривая, характеризующая циркуляцию пучка ионов однозарядного гелия на столе инъекции в ПНР-1, красная кривая — сигнал с инфлекторных пластин системы инъекции пучка

В первом сеансе пуско-наладочных работ ускорителя с пучком в период времени с 26 по 29 декабря 2020 г. была получена максимальная интенсивность циркулирующего пучка однозарядных ионов гелия до  $7 \cdot 10^{10}$  Рис. 3, что соответствует среднему току 1,3 мА.

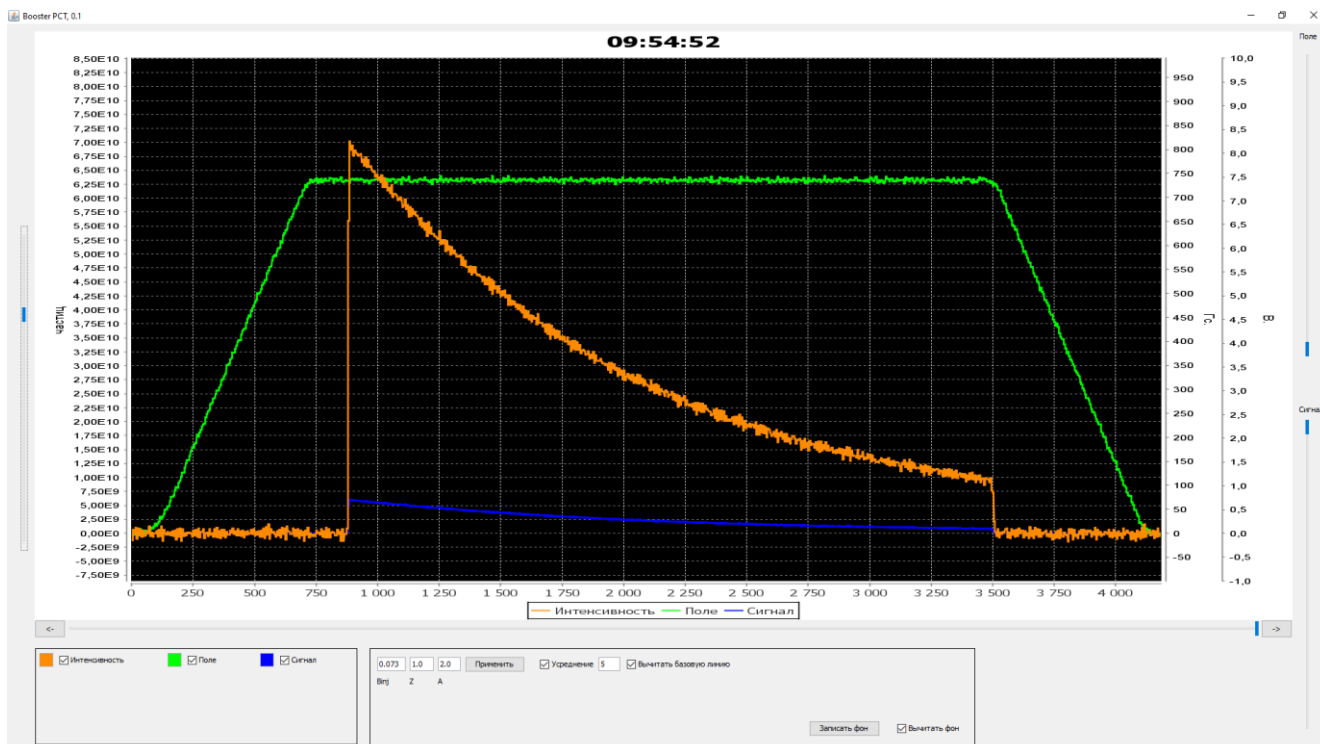


Рис. 3. Интенсивность пучка ионов однозарядного гелия на столе инъекции в ПНР-1 — оранжевая кривая, стол магнитного поля — зелёная кривая

Оценка времени жизни пучка ионов однозарядного гелия на столе инъекции по данным зависимости интенсивности пучка от времени Рис. 3 составляет величину не менее 2 с.

## Достоверность и обоснованность

Приводимые в диссертационной работе результаты подтверждаются экспериментальным наблюдением в Бустере циркуляции ионов однозарядного гелия в первом ускорительном сеансе в конце 2020 г., то есть подтверждено существование замкнутой орбиты (периодического решения) для найденного порядка расстановки дипольных магнитов в Бустере на основе разработанной автором диссертации математической модели.

## Апробация работы

Результаты работы докладывались и обсуждались на семинарах и научных конференциях: Международном семинаре по проблемам ускорителей заряженных частиц памяти В. П. Саранцева в 2013, 2019 и 2022 гг. (Алушта, Крым, Россия). С 2016 по 2023 гг. результаты работы неоднократно докладывались на совещаниях рабочих групп по проекту «Комплекс NICA», на совещаниях по сотрудничеству между Институтом ядерной физики им. Г. И. Будкера Сибирского отделения Российской академии наук, Институтом теоретической и экспериментальной физики им. А. И. Алиханова и ОИЯИ в 2018 г. и Консультативном комитете по проекту «Комплекс NICA» (Machine Advisory Committee NICA) в ОИЯИ в 2019 г.



Результаты опубликованы в пяти работах из перечня реферируемых научных журналов, рекомендованных Высшей аттестационной комиссией.

## **Личный вклад автора**

Содержание диссертации и выносимые на защиту положения, отражают персональный вклад автора. Создание линейной магнитно-оптической структуры Коллайдера, выбор длин квадрупольных магнитов прямолинейных промежутков, расчёты токов системы питания всех магнитных элементов, токов магнитов систем коррекции связи бетатронного движения, хроматичности, динамической апертуры, поиск порядка расстановки дипольных магнитов в магнитно-оптических структурах Бустера и Коллайдера, выполнены автором лично.

## **Содержание диссертационной работы**

Диссертация состоит из введения, четырёх глав, заключения, списка цитируемой литературы из 43 пунктов, списка публикаций автора по теме диссертации из 5 пунктов и 6 приложений. В конце каждой из глав сформулированы основные результаты и выводы. Общий объём диссертации составляет 113 страниц текста, включая 68 рисунков и 27 таблиц.

Во введении даётся обоснование актуальности темы диссертационной работы, формулируются объект и предмет исследования, её научная новизна, основные цели и задачи, указываются методы исследований, даётся краткая характеристика работы по главам, изложены положения, выносимые на защиту.

В первой главе сформулированы требования, которым должна удовлетворять магнитно-оптическая структура колец Коллайдера, и описана его геометрия.

В рамках диссертационной работы под линейной магнитно-оптической структурой подразумевается идеализированная структура магнитной оптики ускорительной установки, для которой все её дипольные, квадрупольные и корректирующие магниты (структурные элементы) представляются «идеальными», не содержащими мультипольных гармоник магнитного поля (нелинейностей).

Проведён сравнительный анализ пяти различных вариантов магнитно-оптических структур Коллайдера, в которых поворотные секции собраны на основе либо ФОДО периодической ячейки, либо наДФДО (триплетной) периодической ячейки. Основными критериями сравнения были:

1. скорости роста размеров пучка из-за процесса внутривидового рассеяния;
2. возможность реализации стохастического охлаждения пучка в диапазоне кинетических

энергий от 3 до 4,5 ГэВ/н;

3. простота реализации инжекции пучка в Коллайдер из Нуклотрона.

На основе рассмотренных вариантов магнитной оптики [6] выбрана магнитно-оптическая структура Коллайдера с поворотными секциями на основе регулярной ФОДО ячейки с набегом фазы бетатронных колебаний в горизонтальном и вертикальном направлениях  $\pi/2$ , а именно — ФОДО-12. Для чётного количества регулярных ФОДО ячеек (12 шт.) удаётся добиться значительной компенсации нелинейного действия секступолей коррекции натуральной хроматичности кольца, так как набег фазы бетатронных колебаний между секступолями соответствующих семейств равен  $\pi$ , и таким образом минимизировать их ограничивающее действие на динамическую апертуру Коллайдера [6]-[15]. Кроме того, структура поворотных секций Коллайдера на основе ФОДО-12 показала своё преимущество по сравнению с другими структурами с точки зрения максимального времени процесса внутривпучкового рассеяния. В выбранной структуре время роста фазового объёма пучка из-за внутривпучкового рассеяния в несколько раз превышает время стохастического и электронного охлаждения. Эта структура позволяет реализовать наиболее оптимальную схему инжекции в каждое из колец Коллайдера, так как в ФОДО ячейке с пропущенным дипольным магнитом первым элементом после промежутка перевода пучка из канала транспортировки Нуклотрон-Коллайдер в кольцо Коллайдера является фокусирующая по горизонтали Ф-линза, что делает удобной инжекцию пучка.

Основные преимущества структуры Коллайдера с поворотными секциями из 12-ти ФОДО заключаются в следующем:

1. скорость процесса внутривпучкового рассеяния наименьшая;
2. выполнены условия (с точки зрения магнитной оптики) для эффективной реализации стохастического охлаждения пучков в диапазоне кинетических энергии от 3 до 4,5 ГэВ/н;
3. в ФОДО ячейке с пропущенным дипольным магнитом первым элементом после промежутка перевода пучка из канала транспортировки Нуклотрон-Коллайдер в кольцо Коллайдера является дефокусирующая по горизонтали линза, что делает удобным инжекцию пучка.

Во второй главе изложен способ получения проектной светимости в Коллайдере и подход к проведению физического эксперимента. Кроме того, исходя из физических и технических требований для формирования магнитно-оптической структуры Коллайдера на основе технологии «Нуклотрон», представлены результаты многопараметрической оптимизации структуры прямолинейных участков, их согласование с поворотными секциями (арок) на основе

разработанной итерационной процедуры подбора продольных длин квадрупольных магнитов:

1. Фиксируется длина линз в ячейке подавителя дисперсии (ПД), линз прямолинейных промежутков (ПП) и линз финального фокуса (ФФ).
2. Находятся значения градиентов линз регулярной ФОДО ячейки (РЯ), при которых набег фазы бетатронных колебаний в РЯ был бы равным  $Q_{x/y, РЯ} = \pi/2$ . Для найденных градиентов запоминаются значения оптических функций на конце РЯ  $\beta_{x/y, РЯ \text{ вых.}}, \alpha_{x/y, РЯ \text{ вых.}}, D_{x/y, РЯ \text{ вых.}}, D'_{x/y, РЯ \text{ вых.}}$ .
3. Осуществляется поиск градиентов линз ПД, при которых на выходе ПД значение горизонтальной дисперсии и её производной равно нулю, то есть  $D_{x, ПД \text{ вых.}} = 0, D'_{x, ПД \text{ вых.}} = 0$ . При этом на входе ПД оптические функции выбираются равными оптическим функциям на выходе РЯ, то есть  $\beta_{x/y, ПД \text{ вх.}} = \beta_{x/y, РЯ \text{ вых.}}, \alpha_{x/y, ПД \text{ вх.}} = \alpha_{x/y, РЯ \text{ вых.}}, D_{x/y, ПД \text{ вх.}} = D_{x/y, РЯ \text{ вых.}}, D'_{x/y, ПД \text{ вх.}} = D'_{x/y, РЯ \text{ вых.}}$ . Найденные градиенты линз ПД соответствуют выбранным значениям длин линз ПД, которые могут изменяться. Для найденных градиентов запоминаются значения оптических функций на конце РЯ  $\beta_{x/y, ПД \text{ вых.}}, \alpha_{x/y, ПД \text{ вых.}}, D_{x/y, ПД \text{ вых.}}, D'_{x/y, РЯ \text{ вых.}}$  — это значение оптических функций на конце поворотной секции Коллайдера.
4. Рассчитываются оптические функции поворотной секции и бетатронные частоты —  $Q_{x/y, \text{ арки}}$ .
5. Осуществляется поиск градиентов линз ПП и ФФ, при которых набег фаз бетатронных колебаний на ПП равен таким значениям, при которых бетатронные частоты всего кольца равны проектному значению  $9,44/9,44$ , то есть  $Q_{x/y, ПП} = 4,72 - Q_{x/y, \text{ арки}}$ . При этом на входе в ПП оптические функции выбираются равными оптическим функциям на выходе из поворотной секции, то есть  $\beta_{x/y, ПП \text{ вх.}} = \beta_{x/y, ПД \text{ вых.}}, \alpha_{x/y, ПП \text{ вх.}} = \alpha_{x/y, ПД \text{ вых.}}, D_{x/y, ПП \text{ вх.}} = D_{x/y, ПД \text{ вых.}}, D'_{x/y, ПП \text{ вх.}} = D'_{x/y, ПД \text{ вых.}}$ , а на выходе из ПП  $\beta_{x/y, ПП \text{ вых.}} = \beta_{x/y, ПД \text{ вх.}}, \alpha_{x/y, ПП \text{ вых.}} = -\alpha_{x/y, ПД \text{ вх.}}$ . Кроме того, накладываются условия на значения оптических функций в точке встречи пучков  $\beta_{x/y}^* = 0,6 \text{ м}$ , и на остальной части ПП  $\beta_{x/y, ПП} < 50 \text{ м}$ . Найденные градиенты линз в ПП и ФФ соответствуют выбранным значениям длин линз, которые могут изменяться.
6. Все найденные градиенты пересчитываются в токи электропитания магнитов.

Итерационная процедура повторяется до нахождения оптимальных значений длин всех квадрупольных магнитов прямолинейных участков, при которых токи в них удовлетворяли заданным допускам Таблица 1 и условиям следующим из схемы электропитания магнитов Коллайдера см. Рис. 4, такие что каждое из колец Коллайдера имеет отдельную систему

электропитания, состоящую из трёх мощных источников питания (ИП):

1. Основной источник питания (ИП1) питает все структурные элементы магнитно-оптической системы Коллайдера, исключая магниты вертикального сведения/разведения пучков (они запитываются отдельно);
2. Источник токоотбора из всех квадрупольных магнитов, исключая квадрупольные магниты финального фокуса (ИП2);
3. Источник токодобавки во все фокусирующие квадрупольные магниты поворотных секций и все квадрупольные магниты прямолинейных промежутков (ИП3).

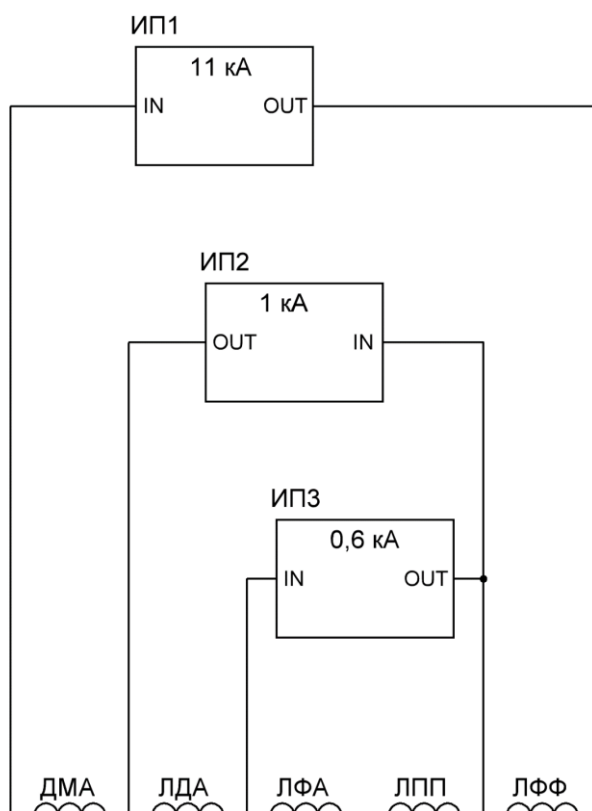


Рис. 5. Принципиальная схема электропитания структурных магнитов кольца Коллайдера, ДМА — дипольные магниты арок, ЛДА — дефокусирующие линзы арок, ЛФА — фокусирующие линзы арок, ЛПП — квадрупольные линзы прямолинейных промежутков, ЛФФ — квадрупольные линзы финального фокуса

Для инжекции и сброса пучка, точной настройки и согласования магнитно-оптической системы каждого из колец Коллайдера предусмотрены дополнительные источники питания (ДИП) квадрупольных магнитов в прямолинейных промежутках, квадрупольных магнитов подавителя дисперсии в поворотных секциях, двухапертурных дипольных магнитов системы вертикального сведения/разведения пучков. Общее количество таких ДИП равно 52 шт.

Таблица 1. Состав и основные параметры системы электропитания одного кольца Коллайдера

	Количество, шт.	Ток, А
Кольцо		
ИП1	1	11000
ИП2	1	1000
ИП3	1	600
ДИП1, ДИП2, ..., ДИП52	52	300

В результате проведённых исследований, создана линейная магнитно-оптическая структура Коллайдера см. Рис. 6:

1. Определены продольные длины квадрупольных линз прямолинейных промежутков, линз подавителя дисперсии, линз финального фокуса пучка заряженных частиц на общем участке встречи.
2. Определены положения всех магнитных элементов магнитно-оптической структуры Коллайдера вдоль орбиты пучка.
3. Определены величины токов электропитания всех структурных элементов линейной магнитно-оптической системы колец Коллайдера.
4. Определены ключевые параметры систем коррекции связи бетатронного движения, хроматичности и динамической апертуры, которые учитывают расстановку дипольных и квадрупольных магнитов Коллайдера и нелинейности магнитного поля в этих элементах.

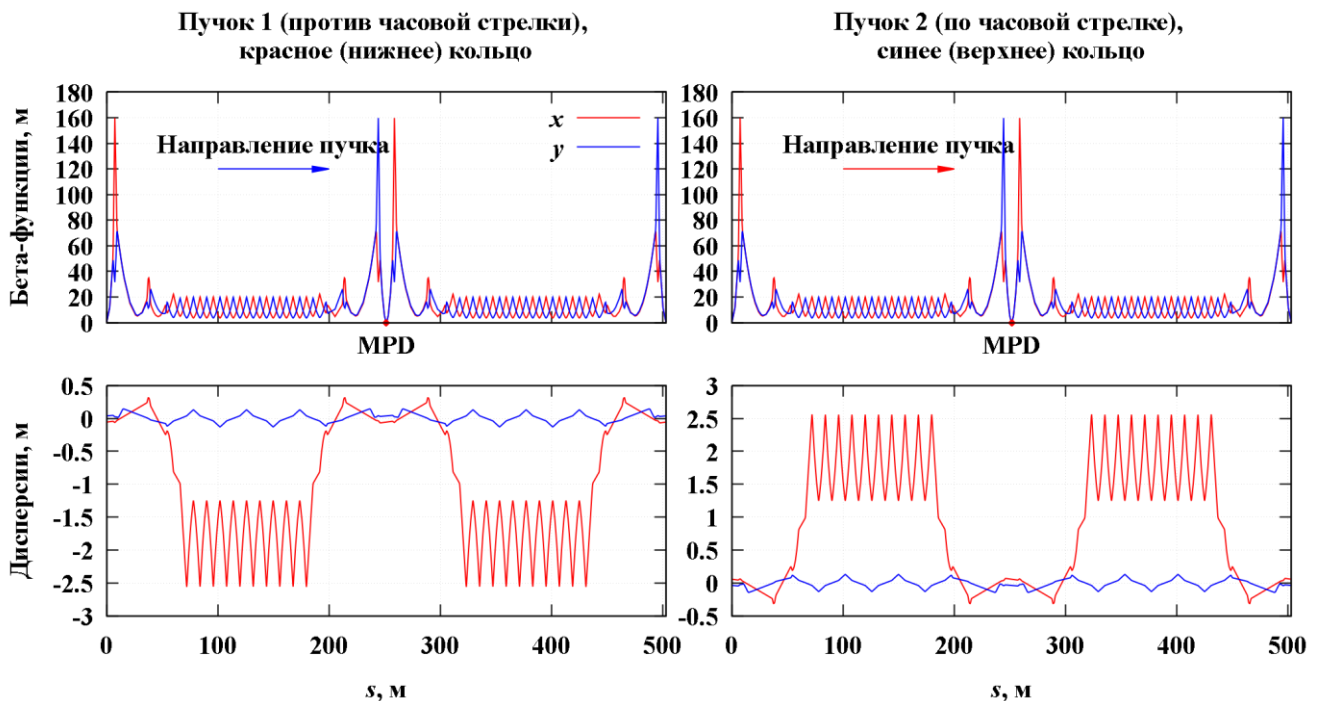


Рис. 6. Линейные оптические функции структуры двух колец Коллайдера

В Таблица 2 приведены основные параметры Коллайдера проекта «Комплекс NICA», данная конфигурация магнитно-оптической структуры принята к реализации.

Таблица 2. Основные параметры Коллайдера проекта «Комплекс NICA» после 2020 г.

Периметр, м	503,04		
Число сгустков в кольце	22		
Сред. кв. продольный размер сгустка, м	0,6		
Бета-функция в точке встречи, м	0,6		
Бетатронные частоты гор./верт.	9,44/9,44		
Натуральная хроматичность	-21/-20		
Акцептанс гор./верт., $\mu$ мм·мрад	43/41		
Импульсный акцептанс	$\pm 0,01$		
Сред. кв. ошибка скорректированной замкнутой орбиты, мм	2		
Критический Лоренц-фактор	7,084		
Кинетическая энергия, ГэВ/н	1	3	4,5
Сред. кв. эмиттанс гор./верт. при накоплении, $\mu$ мм·мрад	2/2		
Сред. кв. эмиттанс гор./верт., $\mu$ мм·мрад	1,10/1,07	1,10/0,95	1,10/0,81
Сред. кв. разброс по импульсу, $10^{-3}$	0,63	1,29	1,69
Число частиц в сгустке, $10^9$	0,28	3,00	2,98
Полный сдвиг бетатронной частоты	0,05	0,05	0,02
Светимость, $10^{27}$ см $^{-2}$ ·с $^{-1}$	0,01	1,00	1,00
Время процесса внутривидового рассеяния, с	291	1014	3096

Полученные во второй главе результаты опубликованы в работах [A1], [A2], списка публикаций автора по теме диссертации.

В третьей главе проведён анализ экспериментальных данных магнитных измерений дипольных магнитов Бустера в сверхпроводящем состоянии при двух значениях токов. С помощью разработанной процедуры определён порядок расстановки дипольных магнитов в кольце Бустера см. Таблица 3, который обеспечивает минимальное среднеквадратическое искажение замкнутой орбиты по горизонтали 1,36 мм см. Рис. 7.

Найденная и реализованная расстановка дипольных магнитов позволила получить циркуляцию пучка ионов однозарядного гелия в первом сеансе пуско-наладочных работ ускорителя с пучком в конце 2020 г. [5].

Таблица 3. Соответствие маркировки (колонка «Название») дипольных магнитов схемы размещения элементов Бустера и номеров дипольных магнитов согласно протоколу МИ (колонка «№»)

Квадрант I		Квадрант II		Квадрант III		Квадрант IV	
Название	№	Название	№	Название	№	Название	№
1M2A	M19	2M2A	M14	3M2A	M07	4M2A	M01
1M2B	M04	2M2B	M38	3M2B	M40	4M2B	M16
1M3A	M13	2M3A	M08	3M3A	M12	4M3A	M44
1M3B	M21	2M3B	M29	3M3B	M37	4M3B	M22
1M4A	M43	2M4A	M42	3M4A	M11	4M4A	M03
1M4B	M30	2M4B	M18	3M4B	M31	4M4B	M09
1M5A	M34	2M5A	M45	3M5A	M02	4M5A	M20
1M5B	M27	2M5B	M26	3M5B	M32	4M5B	M39
1M6A	M36	2M6A	M25	3M6A	M24	4M6A	M28
1M6B	M06	2M6B	M10	3M6B	M15	4M6B	M33

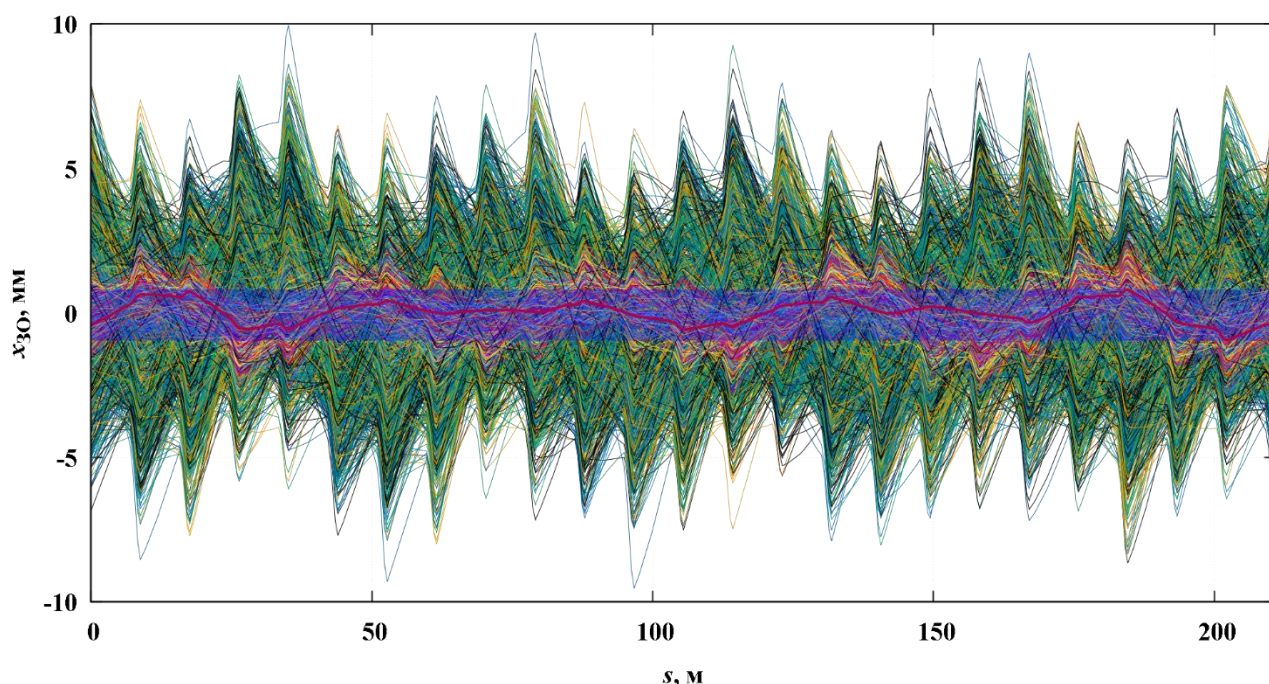


Рис. 7. Горизонтальные замкнутые орбиты пучка по серии статистических розыгрышей расстановок дипольных магнитов в Бустере при токе 625 А (замкнутая орбита, соответствующая наилучшей расстановке выделена красным цветом, синим цветом показан диапазон максимального и минимального её отклонения)

На основе разработанной процедуры с использованием экспериментальных данных магнитных измерений в сверхпроводящем состоянии найден порядок расстановки дипольных магнитов Коллайдера, обеспечивающий при трёх значениях токов основного источника питания среднеквадратичное отклонение орбиты по горизонтали и по вертикали не более 2,50 мм см. Таблица 4 и Рис. 6.

Таблица 4. Характеристики наилучшей замкнутой орбиты для токов 2300, 6890 и 10440 А

Замкнутая орбита	Ток, А	$\sigma_x/\sigma_y$ , мм	$x_{\text{мин.}}/x_{\text{макс.}}$ , мм	$y_{\text{мин.}}/y_{\text{макс.}}$ , мм
Первое (красное) кольцо	2300	2,39/2,35	-5,90/4,66	-7,66/3,94
Второе (синее) кольцо		2,17/1,08	-6,78/5,92	-2,74/2,95
Первое (красное) кольцо	6890	2,47/2,35	-5,63/5,21	-7,65/3,94
Второе (синее) кольцо		2,16/1,09	-5,35/6,44	-2,75/2,97
Первое (красное) кольцо	10440	2,47/2,35	-5,63/5,21	-7,65/3,94
Второе (синее) кольцо		2,16/1,09	-5,35/6,44	-2,75/2,97

Однозначное соответствие номеров модулей дипольных магнитов согласно протоколу криогенных МИ обозначениям на схеме размещения элементов в кольцах Коллайдера приведено в Таблица 5.

Таблица 5. Соответствие маркировки (колонка «Название») дипольных магнитов схемы размещения элементов в западной (З) и восточной (В) арках Коллайдера и номеров обмотки (колонки «№/−» и «№/+») дипольных магнитов согласно протоколу МИ

Арка З				Арка В			
Название	№/−	Название	№/+	Название	№/−	Название	№/+
M1W2/M40W1	22	M21W2/M20W1	44	M21E2/M20E1	27	M1E2/M40E1	64
M2W2/M39W1	39	M22W2/M19W1	50	M22E2/M19E1	29	M2E2/M39E1	67
M3W2/M38W1	20	M23W2/M18W1	84	M23E2/M18E1	38	M3E2/M38E1	71
M4W2/M37W1	23	M24W2/M17W1	82	M24E2/M17E1	10	M4E2/M37E1	43
M5W2/M36W1	31	M25W2/M16W1	74	M25E2/M16E1	26	M5E2/M36E1	46
M6W2/M35W1	19	M26W2/M15W1	70	M26E2/M15E1	30	M6E2/M35E1	79
M7W2/M34W1	6	M27W2/M14W1	59	M27E2/M14E1	17	M7E2/M34E1	42
M8W2/M33W1	5	M28W2/M13W1	73	M28E2/M13E1	13	M8E2/M33E1	76
M9W2/M32W1	87	M29W2/M12W1	47	M29E2/M12E1	7	M9E2/M32E1	63
M10W2/M31W1	34	M30W2/M11W1	62	M30E2/M11E1	86	M10E2/M31E1	61
M11W2/M30W1	16	M31W2/M10W1	52	M31E2/M10E1	36	M11E2/M30E1	55
M12W2/M29W1	21	M32W2/M9W1	78	M32E2/M9E1	8	M12E2/M29E1	54
M13W2/M28W1	25	M33W2/M8W1	68	M33E2/M8E1	4	M13E2/M28E1	49
M14W2/M27W1	14	M34W2/M7W1	83	M34E2/M7E1	12	M14E2/M27E1	45
M15W2/M26W1	15	M35W2/M6W1	41	M35E2/M6E1	1	M15E2/M26E1	57
M16W2/M25W1	3	M36W2/M5W1	80	M36E2/M5E1	9	M16E2/M25E1	60
M17W2/M24W1	35	M37W2/M4W1	66	M37E2/M4E1	33	M17E2/M24E1	65
M18W2/M23W1	11	M38W2/M3W1	81	M38E2/M3E1	40	M18E2/M23E1	85
M19W2/M22W1	37	M39W2/M2W1	51	M39E2/M2E1	24	M19E2/M22E1	72
M20W2/M21W1	32	M40W2/M1W1	75	M40E2/M1E1	18	M20E2/M21E1	48

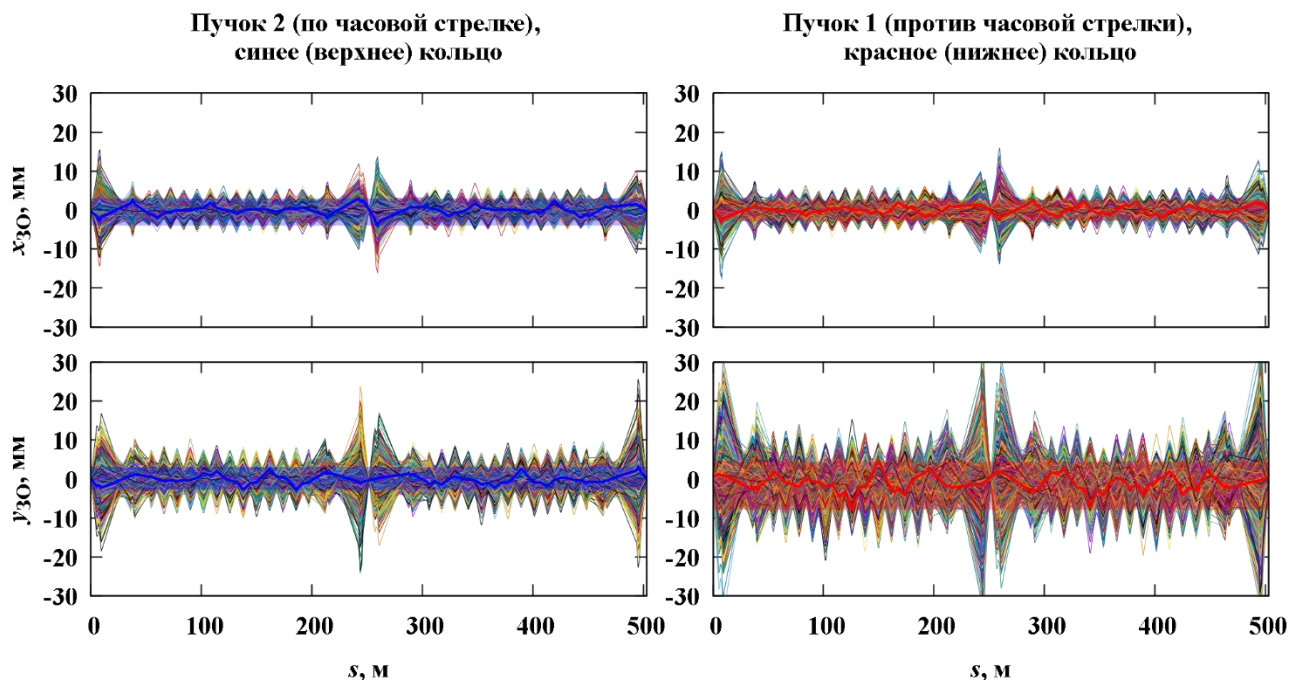


Рис. 8. Замкнутые орбиты пучка по горизонтали и вертикали (синим цветом — в верхнем кольце, красным цветом — в нижнем) по серии статистических розыгрышей расстановок дипольных магнитов в арках Коллайдера при токе 10440 А



Полученные в третьей главе результаты опубликованы в работах [А3], [А4], списка публикаций автора по теме диссертации.

В четвертой главе обсуждается выбор магнитно-оптической структуры Нуклотрона в рамках концепции проекта «Новый Нуклотрон». Представлена концепция магнитно-оптической структуры на основе регулярной ДФО ячейки см. Рис. 9 и Рис. 10.

Предложены:

- вариант компоновки оборудования в прямолинейных промежутках ускорителя см. Таблица 6;
- совмещённый вариант размещения элементов системы диагностики и системы коррекции;
- апертуры структурных элементов см. Таблица 7.

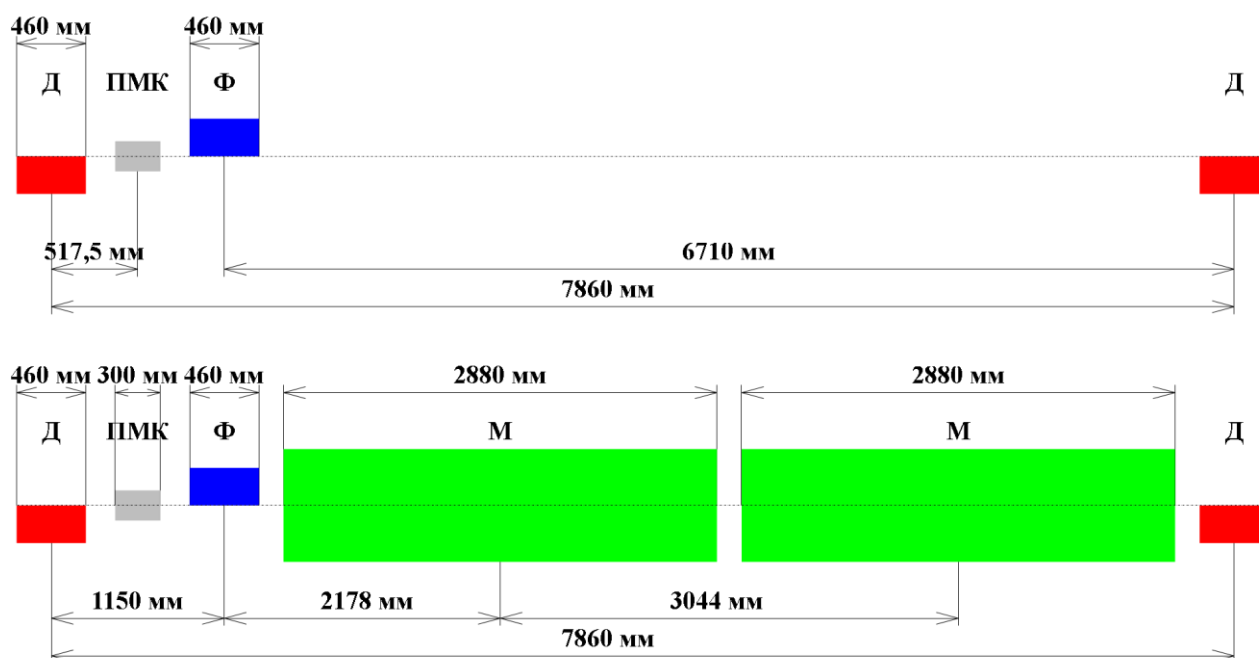


Рис. 9. Схема регулярной ДФО ячейки «Нового Нуклотрона» с дипольными магнитами (снизу) и ячейки, не содержащей дипольных магнитов (сверху)

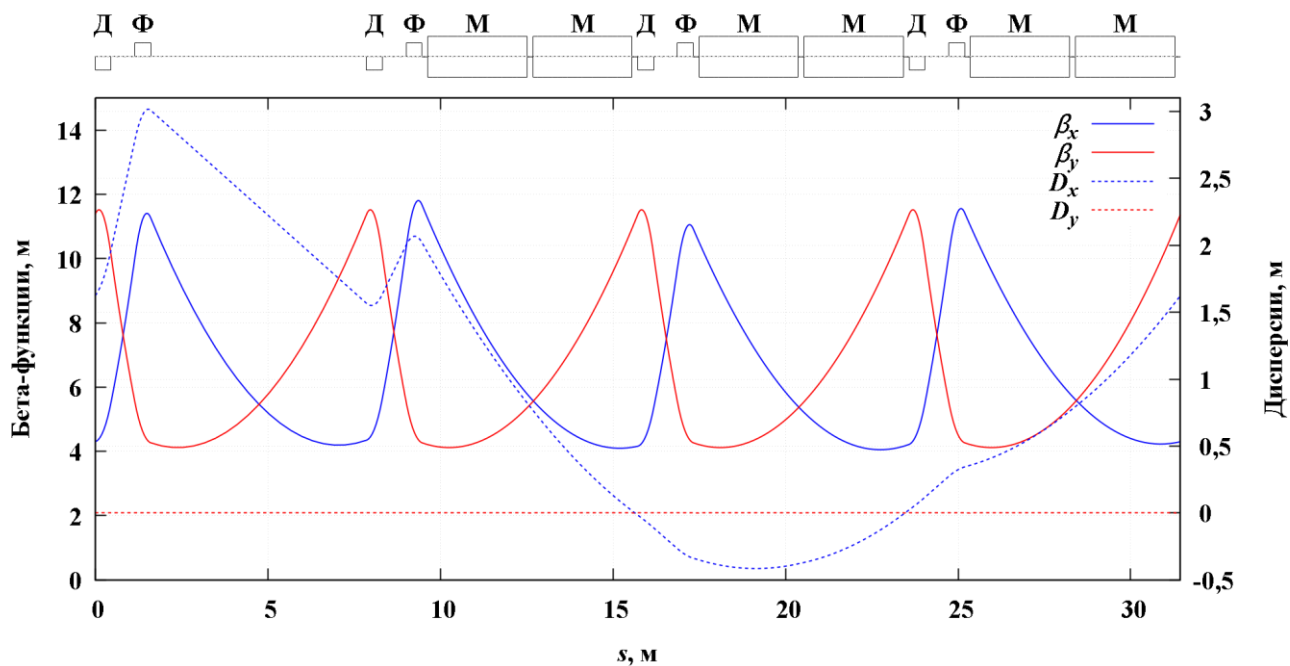


Рис. 10. Оптические функции в структуре «Нового Нуклотрона» на основе ДФО ячейки

Таблица 6. Состав оборудования прямолинейных участков «Нового Нуклотрона»

ПП	Состав оборудования
1	Система инжекции из линейного ускорителя лёгких ионов
2, 8	Свободно, предназначено для оборудования поляризационной программы
3	Ускоряющая станция, измерительный период, токовводы
4	Быстрый вывод в корпус № 17 ЛФВЭ
5	Медленный вывод в корпус № 205 ЛФВЭ
6	Система инжекции из Бустера
7	Профилометры, датчики тока, система измерения бетатронных частот, внутренняя мишень

Таблица 7. Апертуры вакуумной камеры в «Новом Нуклотроне»

Элемент структуры	Полуоси сечения вакуумной камеры гор./верт., мм
Ф-линза	55/26
Д-линза	38/38
Дипольный магнит	55/35
Пикап электрод и мультипольный корректор	55/35

На Рис. 11 показано, что при одних и тех же ошибках юстировки квадрупольных линз максимальный размер огибающих замкнутых орбит пучка для Нуклотрона на основе регулярной ДФО ячейки в два и более раз меньше максимального размера огибающих замкнутых орбит пучка для структуры Нуклотрона на основе регулярной ФОДО ячейки.

Дана оценка аксептанса для предлагаемой магнитно-оптической структуры «Нового Нуклотрона», которая по гор./верт. составляет величину равную 107/79 п мм·мрад.

Полученные в четвёртой главе результаты опубликованы в работе [А5] списка публикаций автора по теме диссертации.

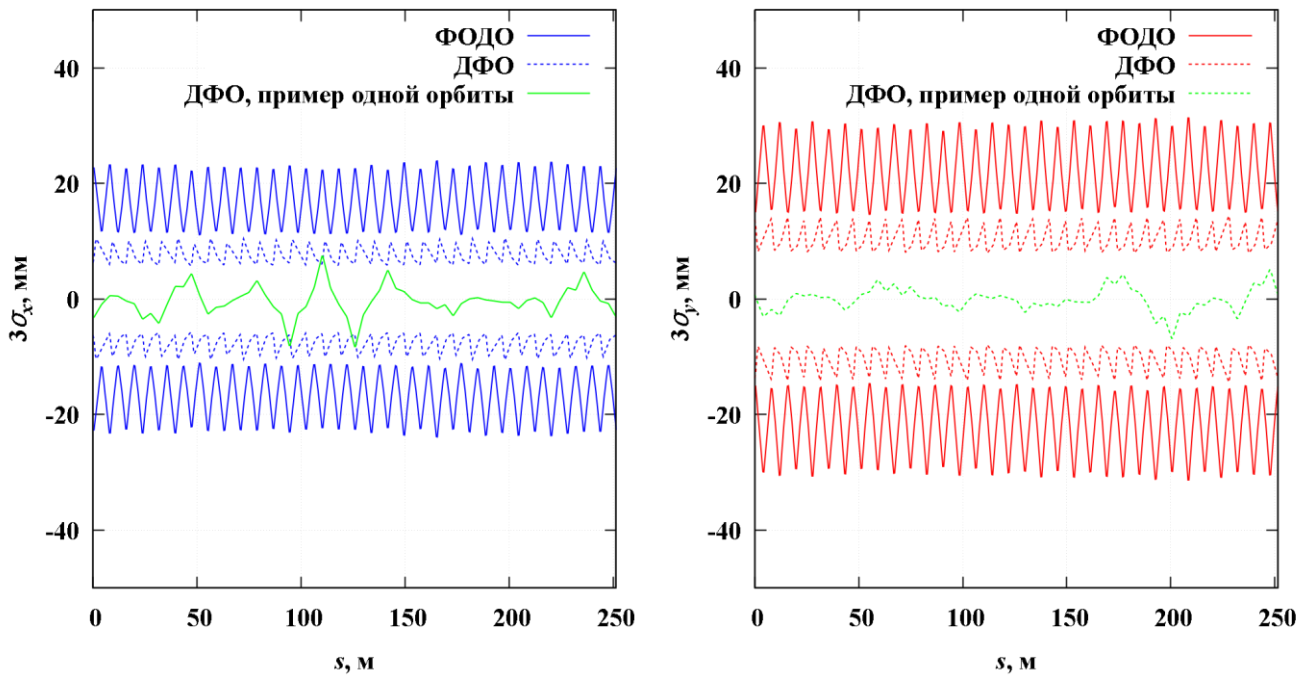


Рис. 11. Сравнение огибающих замкнутых орбит пучка

В заключении перечислены главные результаты диссертационной работы:

1. В результате реализации предложенных автором методик сформирована магнитная оптика Коллайдера, определяющая структуру и основные характеристики установки и обеспечивающая реализацию её проектных параметров:
  - рассчитаны длины квадрупольных линз прямолинейных промежутков, линз подавителя дисперсии, линз финального фокуса пучков;
  - определены положения всех магнитных элементов в структуре вдоль орбиты пучка, рассчитаны токи электропитания всех структурных магнитов Коллайдера, обеспечивающие проектные параметры установки;
  - определены ключевые параметры системы коррекции связи бетатронного движения, системы коррекции хроматичности и системы коррекции динамической апертуры, которые обеспечивают проектные характеристики Коллайдера.
2. Определён порядок и выполнена расстановка дипольных магнитов в сверхпроводящем ионном синхротроне Бустер, обеспечившая его успешный физический пуск — выход на режим устойчивой циркуляции пучка ионов однозарядного гелия в первом сеансе пуско-наладочных работ в декабре 2020 г.
3. На основе данных магнитных измерений определён порядок и выполнена расстановка дипольных магнитов в арках Коллайдера, обеспечивающая минимальное искажение замкнутых орбит обоих пучков.
4. Предложена концепция новой магнитно-оптической структуры ионного синхротрона

Нуклотрон проекта «Новый Нуклотрон» на основе регулярной ДФО ячейки в части реализации программы поляризационных исследований проекта «Комплекса NICA».

В приложениях приведены таблицы содержащие значения выбранных длин структурных элементов, токов системы питания магнитных элементов в двух кольцах Коллайдера, токи магнитов систем коррекции связи бетатронного движения, хроматичности и динамической апертуры Коллайдера.

## Список цитируемой литературы

- [1] Технический проект объекта «Комплекс NICA» / В. Д. Кекелидзе и др.; под ред. В. Д. Кекелидзе и Ю. К. Потребеникова. — Дубна.: Изд. отд. ОИЯИ, 2018 г. — 90 с.
- [2] Johnsen K., Experiences during the Early Running-In Phase of the ISR, in IEEE Transactions on Nuclear Science, vol. 18, no. 3, pp. 199-203.
- [3] Harrison M., The RHIC Project-status and plans, Proceedings Particle Accelerator Conference, Dallas, TX, USA, 1995, pp. 401-405.
- [4] Развитие физики и технологии ускорителей заряженных частиц / Ред.-сост. Б. Ю. Шарков, И. Н. Мешков. — М.: РАН, 2021. — 140 с.
- [5] Бутенко А. В., Бровко О. И., Галимов А. Р., Горбачёв Е. В., Костромин С. А., Карпинский В. Н., Мешков И. Н., Мончинский В. А., Сидорин А. О., Сыресин Е. М., Трубников Г. В., Тузиков А. В., Филиппов А. В., Ходжибагиян Г. Г. Бустер комплекса NICA: сверхпроводящий синхротрон нового поколения. // УФН. 2023. Т. 193, № 6. С. 206-225.
- [6] Kostromin S. NICA collider lattice, Luminosity, IBS, Stochastic Colling. Machine Advisory Committee, 7 June, 2011, JINR, Dubna, Russia.
- [7] Kozlov O. Interim version of the collider lattice. Machine Advisory Committee, 12-13 January, 2010, JINR, Dubna, Russia.
- [8] Kozlov O. Collider: lattice and rings composition. Machine Advisory Committee, 21-22 June, 2012, JINR, Dubna, Russia.
- [9] Kozlov O. NICA Collider: status and further steps. Machine Advisory Committee, 17-18 October, 2013, JINR, Dubna, Russia.
- [10] Kozlov O. NICA Collider: status and further steps. Machine Advisory Committee, 19-20 October, 2015, JINR, Dubna, Russia.
- [11] Козлов О. С., Мешков И. Н., Сидорин А. О., Трубников Г. В. Динамика интенсивного ионного пучка в Коллайдере NICA // Письма в ЭЧАЯ. 2016. Т. 13, № 7(205). С. 1321-1332.
- [12] Козлов О. С., Мешков И. Н., Сидорин А. О., Трубников Г. В. Состав оборудования и параметры коллайдера NICA на период пусконаладочных работ // Письма в ЭЧАЯ. 2016. Т. 13, № 7(205). С. 1456-1460.
- [13] Сидорин А. О., Трубников Г. В., Шурхно Н. А. Экспериментальные и теоретические исследования в ОИЯИ по развитию метода стохастического охлаждения пучков заряженных частиц // УФН. 2016. Т. 186, № 3. С. 275-291.
- [14] Kozlov O. S., Kostromin S. A. Optimization of the Collider rings' optics. Machine Advisory Committee, 22-23 May, 2017, JINR, Dubna, Russia.

- [15] Козлов О. С., Бутенко А. В., Ходжибагиан Г. Г., Костромин С. А., Мешков И. Н., Сидорин А. О., Сыресин Е. М., Трубников Г. В. Оптическая структура и динамическая апертура коллайдера NICA // Письма в ЭЧАЯ. 2018. Т. 15, № 7(219). С. 712-718.

### **Список публикаций автора по теме диссертации**

- [A1] Kuznetsov, A. V., Meshkov, I. N., Tuzikov, A. V., Philippov, A. V. Luminosity of the NICA Collider in working mode with using electron cooling system. Phys. Part. Nuclei Lett. 11, 699-704 (2014). DOI: <https://doi.org/10.1134/S1547477114050215>.
- [A2] Kostromin, S. A., Kozlov, O. S., Tuzikov, A. V., Philippov, A. V. Optimization the Optical Structure of the NICA Collider. Phys. Part. Nuclei Lett. 17, 447-452 (2020). DOI: <https://doi.org/10.1134/S1547477120040263>.
- [A3] Emelianenko, V. N., Kazinova, O., Mikhaylov, V. A., Philippov, A. V. Analysis of the Results of Magnetic Measurements of the Structural Elements of the Nuclotron Booster. Phys. Part. Nuclei Lett. 17, 453-455 (2020). DOI: <https://doi.org/10.1134/S1547477120040184>.
- [A4] Philippov, A. The Dipole Magnets Arrangement in the Collider of NICA Complex. Phys. Part. Nuclei Lett. 20, 854-859 (2023). DOI: <https://doi.org/10.1134/S1547477123040283>.
- [A5] Butenko, A. V., Khodzhbagiyan, H. G., Mikhaylov, V. A., Tuzikov, A. V., Philippov, A. V. Regarding to the New Nuclotron Magnetic Lattice Choice. Phys. Part. Nuclei Lett. 20, 860-865 (2023). DOI: <https://doi.org/10.1134/S1547477123040180>.