

ОБЪЕДИНЕННЫЙ ИНСТИТУТ ЯДЕРНЫХ ИССЛЕДОВАНИЙ

На правах рукописи

ТРУБНИКОВ

Григорий Владимирович

**СИНХРОТРОН РЕЛЯТИВИСТСКИХ ТЯЖЕЛЫХ ИОНОВ НУКЛОТРОН В
УСКОРИТЕЛЬНОМ КОМПЛЕКСЕ NICA**

Специальность: 01.04.20 - физика пучков заряженных частиц
и ускорительная техника

Автореферат диссертации на соискание ученой степени
доктора физико-математических наук

Дубна 2012

Работа выполнена в Лаборатории Физики Высоких Энергий им. В.И.Векслера и А.М.Балдина Объединенного института ядерных исследований, г.Дубна

ОФИЦИАЛЬНЫЕ ОППОНЕНТЫ:

Н.Н.Алексеев доктор физико-математических наук,
начальник ускорительного центра,
ФГБУ «ГНЦ РФ - ИТЭФ»

В.В.Пархомчук доктор физико-математических наук,
член-корреспондент РАН,
заведующий лабораторией
ИЯФ СО РАН, Новосибирск

Ю.Н.Денисов доктор технических наук, профессор,
советник при дирекции института,
Объединенный институт
ядерных исследований, г.Дубна

ВЕДУЩАЯ ОРГАНИЗАЦИЯ: ФГБУ «ГНЦ РФ – ИФВЭ»
Институт физики высоких энергий,
НИЦ «КИ», г.Протвино

Защита диссертации состоится « _____ » _____ 2012 г. в « _____ »
часов на заседании Диссертационного совета Д-047.01.03 при Лаборатории
ядерных проблем Объединенного института ядерных исследований.
Адрес: 141980, г.Дубна Московской обл., ул.Жолио-Кюри, 6.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке ОИЯИ.

Автореферат разослан « _____ » _____ 2012 г.

Ученый секретарь Диссертационного совета Д-047.01.03

Доктор физико-математических наук, профессор

Ю.А.Батусов

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы.

NICA (Nuclotron-based Ion Collider fAcility) - новый ускорительный комплекс, создаваемый в ОИЯИ, основной задачей которого является обеспечение экспериментов на встречных пучках тяжелых ионов вплоть до золота с кинетическими энергиями до 4.5×4.5 ГэВ/н для изучения в лабораторных условиях сильно нагретой и сжатой ядерной материи, а также исследование природы спина нуклонов. Это одни из наиболее перспективных направлений современной фундаментальной физики. Планируемая программа фундаментальных и прикладных исследований охватывает несколько научных направлений в разных областях науки: физике тяжелых ионов высоких энергий и спиновой физике, физике низких температур, ядерной физике, физике частиц, физике конденсированных сред, биофизике и радиобиологии, медицине. Выполнение этой программы требует новых решений в физике и технике ускорителей, применения новых математических методов для численного моделирования.

При проектировании накопителей заряженных частиц на встречных кольцах необходимо обеспечить сверхвысокие вакуумные условия, чтобы влияние рассеяния пучка на остаточном газе было незначительным и было возможно накопление высокоинтенсивных пучков тяжелых ионов. Одним из важнейших вопросов является создание и оптимизация систем питания сверхпроводящих ускорительных комплексов. Актуальным является развитие и модернизация сверхпроводящего ускорительного комплекса Нуклотрон для ускорения в нем пучков тяжелых ионов до релятивистских энергий, поскольку этот синхротрон используется также для отработки режимов будущего коллайдерного комплекса. Одним из важнейших элементов нового ускорительного проекта ОИЯИ – NICA/MPD является сверхпроводящий синхротрон Бустер, поэтому разработка его концептуального проекта также актуальна. Бустер будет использоваться не только для фундаментальных

исследований, параллельно основной физической программе, на выведенных пучках будет проводиться широкий спектр прикладных исследований (медицина, радиобиология, материаловедение, включая исследование радиационной стойкости материалов).

Для получения максимальной светимости в экспериментах на встречных пучках необходимо обеспечить устойчивость пучков высокой плотности циркулирующих и сталкивающихся в накопителе, подавив действие внутривидового рассеяния и различного рода неустойчивостей, влияние нелинейностей магнитной системы и пространственного заряда пучков. Особенно эти проблемы крайне важны для адронных коллайдеров низких энергий. Теоретические и экспериментальные исследования всех этих процессов и эффектов требуются для создания подобных ускорительных комплексов. Для того, чтобы при столкновениях тяжелых ионов регистрировать адронные компоненты, включая мультистранные гипероны, их распределение в фазовом пространстве и коллективные потоки, а также наблюдать отдельные события, требуется средняя светимость в коллайдере в диапазоне между 10^{26} и 10^{27} см⁻² сек⁻¹. Для обеспечения и поддержания высокой светимости при низкой энергии ионов необходимо применять методы охлаждения пучков, как электронного так и стохастического. В комплексе NICA применение охлаждения необходимо и в кольцах коллайдера и в Бустере. Создание систем охлаждения частиц - стохастического и электронного - для обеспечения долговременной устойчивости высокоинтенсивных ионных пучков является крайне актуальным направлением.

Цели диссертационной работы:

Основными задачами диссертационной работы являлись:

- модернизация ускорительного комплекса ЛФВЭ с целью создания на его основе ускорителя тяжелых ионов нового поколения для релятивистской ядерной физики и инновационных ядерно-энергетических технологий,

- разработка концепции построения сверхпроводящего ускорительного комплекса на встречных пучках тяжелых ионов с энергией несколько ГэВ/н, разработка проекта такого комплекса на основе синхротрона Нуклотрон,
- развитие синхротрона Нуклотрон в качестве базовой установки для отработки различных режимов работы коллайдера NICA.

Главные направления работ:

1. Теоретические и экспериментальные исследования режимов накопления и охлаждения интенсивных ионных пучков в накопительных кольцах (ESR, GSI, Darmstadt, COSY, FZ Juelich, Германия, RHIC, BNL, США), применение полученного опыта и отработанных методик для проектирования рабочего цикла комплекса NICA. Выбор режимов работы, обеспечивающих максимальную светимость физического эксперимента в диапазоне энергий коллайдера от 1 до 4.5 ГэВ/н.

2. Модернизация и развитие сверхпроводящего синхротрона Нуклотрон для экспериментального исследования на нем различных режимов работы коллайдера NICA.

3. Модернизация вакуумной системы Нуклотрона. Улучшение вакуумных условий в пучковой камере до уровня, необходимого для ускорения в Нуклотроне ионов с массовым числом более 100 до релятивистских энергий. Модернизация системы питания и эвакуации энергии структурных магнитов Нуклотрона, обеспечение надежной и безопасной эксплуатации магнитной системы при максимальном проектном уровне магнитного поля 2 Тл.

4. Выбор и оптимизация параметров базовых элементов комплекса NICA: схема подготовки высокоинтенсивного пучка тяжелых ионов в инжекционной цепочке, выбор конфигурации сверхпроводящих накопительных колец на встречных пучках, оптимизация их размещения в существующей инфраструктуре технической площадки ЛФВЭ.

5. Разработка проекта сверхпроводящего бустера Нуклотрона, предназначенного для повышения интенсивности пучков тяжелых ионов и

ускорения их в Нуклотроне до максимальной энергии. Разработка проекта фокусирующей системы бустерного синхротрона, схемы ее питания и защиты.

Личный вклад автора

Личное участие автора в работах, составляющих основу диссертации, является определяющим. Под его руководством и при его определяющем участии проведена модернизация ускорительного комплекса ЛФВЭ, успешное завершение которой открыло возможность создания на базе синхротрона Нуклотрон нового сверхпроводящего ускорительно-коллайдерного комплекса NICA. Им лично проведены теоретические исследования, положенные в основу концепции комплекса на встречных пучках тяжелых ионов в диапазоне рекордно низких энергий. При его определяющем участии оптимизированы и выбраны параметры комплекса NICA, созданы концептуальные проекты основных подсистем и элементов. Автор предложил постановку экспериментов на Нуклотроне, имевших целью проверку ключевых решений и проведенных при его определяющем участии.

Научная новизна и практическая ценность работы

1. Впервые разработана концепция сверхпроводящего комплекса на встречных пучках тяжелых ионов в диапазоне рекордно низких энергий (1-4.5 ГэВ/н), обеспечивающая максимальную светимость на уровне $1 \cdot 10^{27} \text{ см}^{-2} \text{ сек}^{-1}$. В этом диапазоне энергий светимость ограничена в первую очередь эффектами пространственного заряда сгустка, а не эффектами встречи, как в коллайдерах высоких энергий, и это требует минимизации периметра накопителя. Схема формирования интенсивных сгустков основана на первоначальном накоплении в кольцах коллайдера распущенного пучка с его последующей группировкой. Длительное поддержание высокого уровня светимости обеспечивается за счет подавления роста фазового объема сгустка, требующего эффективного применения двух методов охлаждения.

2. Предложен и обоснован сценарий использования охлаждения пучка в коллайдере NICA: в диапазоне энергий от 1 до 3 ГэВ/н система электронного охлаждения пучка обеспечивает сравнительно короткие времена охлаждения и режим работы коллайдера с доминированием пространственного зарядом сгустка. В диапазоне энергии ионного пучка от 3 до 4.5 ГэВ/н наиболее эффективно использование системы стохастического охлаждения, при этом уровень светимости в этом диапазоне не ниже $1 \cdot 10^{27} \text{ см}^{-2} \text{ сек}^{-1}$ достигается в режиме доминирования процесса внутривпучкового рассеяния.

3. В результате модернизации ускорительного комплекса ЛФВЭ ОИЯИ создана установка нового поколения для релятивистской ядерной физики и инновационных ядерно-энергетических технологий. В Нуклотроне впервые ускорены до релятивистских энергий 1.5 ГэВ/н и использованы для проведения ряда экспериментов ионы ксенона $^{124}\text{Xe}^{42+}$. Обеспечена надежная эксплуатация магнитно-криостатной системы Нуклотрона при проектной величине магнитного поля 2Тл.

4. Выбрана и оптимизирована фокусирующая структура Бустера Нуклотрона с учетом размещения систем ввода, однооборотного и медленного вывода, ВЧ станций и других устройств, вписанная в инфраструктуру комплекса и позволяющая осуществить накопление и ускорение интенсивных пучков тяжелых ионов до энергии, достаточной для эффективной обдирки и инжекции в Нуклотрон.

5. Создан современный комплекс оборудования, обеспечивший развитие сверхпроводящего синхротрона Нуклотрон для экспериментального исследования на нем различных режимов работы коллайдера NICA: измерение параметров ускоренного пучка, исследование работы сверхпроводящей магнитной системы при длинных (тысячи секунд) плато магнитного поля, исследование различных методов стохастического охлаждения.

Основные положения, выносимые на защиту

1. Концепция получения высокой светимости в адронном коллайдере с

низкой энергией сталкивающихся пучков, основанная на накоплении распущенного пучка в кольцах коллайдера с использованием методов охлаждения пучка, его последующей группировке и поддержании требуемого уровня светимости с применением двух методов охлаждения пучков – электронного и стохастического.

2. Основные параметры базовых элементов ускорительного комплекса NICA: оптимальная схема подготовки пучка тяжелых ионов в инжекционной цепочке, оптимальная схема сверхпроводящих накопительных колец на встречных пучках и их размещение в существующей инфраструктуре технической площадки ЛФВЭ ОИЯИ. Концепции системы электронного охлаждения и системы стохастического охлаждения в коллайдере NICA, рабочие параметры и схема их оптимального расположения.

3. Результаты модернизации вакуумной системы сверхпроводящего быстроциклирующего синхротрона Нуклотрон. Ускорение ионов ксенона ($^{124}\text{Xe}^{42+}$) до энергии 1.5 ГэВ/н.

4. Технический проект системы последовательного питания магнитов и линз и системы эвакуации энергии сверхпроводящего быстроциклирующего синхротрона Нуклотрон, методика поэтапного ввода этих систем в эксплуатацию. Результаты эксплуатации системы питания Нуклотрона с достигнутой величиной магнитного поля, равной 2 Тл.

5. Создание современного комплекса оборудования обеспечившего развитие сверхпроводящего синхротрона Нуклотрон для экспериментального исследования на нем различных режимов работы коллайдера NICA: измерения параметров ускоренного пучка, исследования работы сверхпроводящей магнитной системы при длинных (тысячи секунд) плато магнитного поля, исследования различных методов стохастического охлаждения.

6. Концептуальный проект сверхпроводящей магнитной фокусирующей структуры синхротрона Бустер комплекса NICA, системы ее питания и защиты.

Апробация диссертационной работы

Результаты, изложенные в диссертации, докладывались на международных конференциях "Workshop on Beam Cooling and Related Topics" - COOL (Galena, IL, США, 2005 г.; Bad Kreuznach, Германия, 2007г.; Алушта, Украина, 2011г.), "European Particle Accelerator Conference" – EPAC (Paris, Франция, 2003; Lucerne, Швейцария, 2004 г.; Genoa, Италия, 2008 г.), "International Particle Accelerator Conference" – IPAC (Kyoto, Япония, 2010 г.; San Sebastian, Испания, 2011 г.), "ICFA Advanced Beam Dynamics Workshop on High- Intensity and High-Brightness Hadron Beams" – HB (Bensheim, Германия, 2004; Tsukuba, Япония, 2006 г.), "International Computational Accelerator Physics Conference" – ICAP (Санкт-Петербург, 2004 г.), "Beam dynamics and Optimisation Conference" – BDO (Санкт-Петербург, 2010 г.) на Всероссийских конференциях по ускорителям заряженных частиц – RuPAC (Обнинск, 2002г.; Дубна, 2004г.; Новосибирск, 2006г.; Звенигород, 2008г.; Протвино, 2010г) и др. А также обсуждались на научных семинарах Объединенного Института ядерных исследований (г.Дубна), Института теоретической и экспериментальной физики (г.Москва), Института физики высоких энергий (г.Протвино), Институт Ядерной Физики СО РАН (г.Новосибирск), Европейского центра ядерных исследований ЦЕРН (CERN, Швейцария).

По теме диссертации опубликовано 57 работ, из них в реферируемых журналах 23 работы.

Текст диссертации изложен на 212 страницах, включает 92 рисунка, 18 таблиц и список литературы из 111 наименований.

Структура и объем диссертации

Диссертация состоит из введения, 5 глав и заключения.

Во введении обоснована актуальность темы диссертации, дан краткий анализ проблем, решаемых в диссертации, и сформулированы цели исследований, вошедших в работу.

В первой главе дано описание ускорительного комплекса Нуклотрон, который включает в себя несколько типов источников ионов, линейный ускоритель ЛУ-20, ускоряющий протоны до энергии 20 МэВ и ионы с отношением заряда к массе $Z/A \geq 1/3$ до энергии 5 МэВ/нукл, сверхпроводящий синхротрон с периметром 251,52 м, оборудованный системой медленного вывода пучка и станцией внутренних мишеней. Научная программа ускорительного комплекса Нуклотрон ОИЯИ включает в себя решение ряда актуальных проблем релятивистской ядерной физики и процессов множественного рождения частиц.

В 2007 году в ОИЯИ начаты работы по созданию нового ускорительно - накопительного комплекса NICA на базе синхротрона Нуклотрон. Физические эксперименты будут реализованы в режиме столкновения встречных пучков. Ускорительный комплекс NICA должен будет обеспечить ион-ионные столкновения (с возможностью выбора кинетической энергии сталкивающихся пучков в диапазоне от 1 до 4.5 ГэВ/н), а также протон-протонные столкновения (в диапазоне энергии от 5 до 12,6 ГэВ/н) и столкновение пучков дейтронов (в диапазоне энергии от 2 до 5.8 ГэВ/н). На втором этапе реализации проекта планируется осуществление столкновений встречных пучков легких ионов, пучков поляризованных протонов и дейтронов. Кроме того, планируется продолжение экспериментов на выведенном пучке Нуклотрона и на внутренней мишени.

Ключевой частью первой стадии проекта NICA, завершенной в 2011 году, явилась модернизация синхротрона Нуклотрон (проект «Нуклотрон-М»), имевшая целью продемонстрировать возможность его длительной и надежной работы при параметрах, близких к требованиям проекта NICA. В результате успешного завершения модернизации было продемонстрировано ускорение пучка ионов ксенона $^{42+}\text{Xe}^{124}$ (до начала проекта самыми тяжелыми ионами, ускоренными на Нуклотроне, были ионы железа) и стабильная работа магнитной системы при уровне поля в дипольных магнитах 2Тл (максимальная ранее достигнутая величина поля была 1.2Тл). Ход реализации проекта

подробно представлен в публикациях, в данной главе приводятся лишь наиболее значимые результаты реализации проекта.

Второй этап проекта NICA - это проектирование и создание комплекса сверхпроводящего кольца Бустера, - предускорителя для Нуклотрона и сверхпроводящих накопительных колец на встречных пучках (коллайдер NICA). Размещение основных элементов и систем комплекса NICA осуществляется при максимальном использовании существующих зданий и инфраструктуры площадки Лаборатории. Схема комплекса показана на Рисунке 1, детальное описание элементов приводится в диссертации.

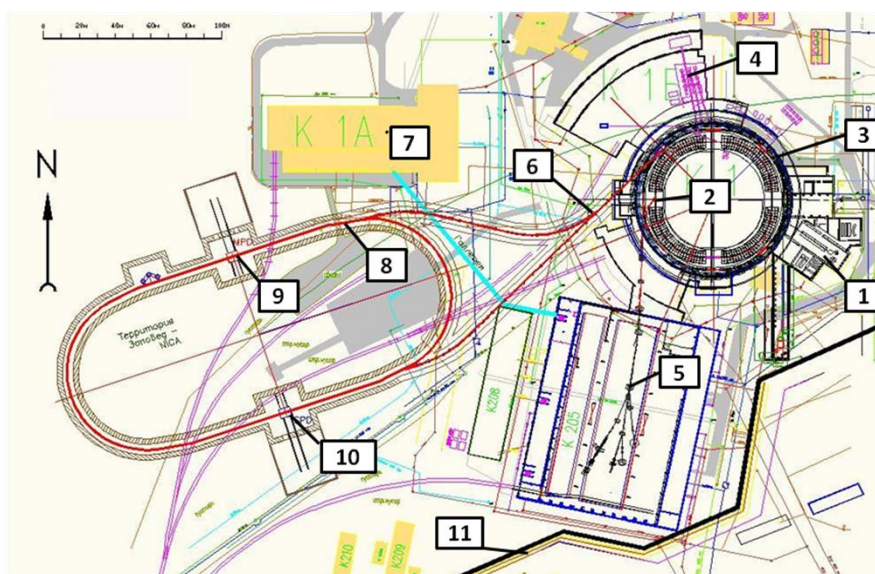


Рис. 1. Схема комплекса NICA. 1 - инжектор, 2 – Бустер, 3 - Нуклотрон, 4 – гелиевый ожижительный комплекс, 5 – экспериментальный корпус для установок на выведенных пучках, 6 - каналы транспортировки пучка в коллайдер, 7 – системы питания всего комплекса, 8 – Коллайдер; 9 и 10 – детекторные установки MPD и SPD, 11 – периметр площадки ЛФВЭ ОИЯИ.

В данной главе проводится выбор оптимальных параметров основных элементов и режимов работы комплекса NICA с пучками ионов золота $^{79+}\text{Au}^{197}$. Предполагается, что коллайдер будет работать в режиме накопителя на фиксированной энергии. Максимальная магнитная жесткость колец коллайдера равна максимальной магнитной жесткости Нуклотрона, поэтому в коллайдере можно проводить эксперименты на встречных пучках ионов во всем диапазоне

энергий, доступном для Нуклотрона. Основные параметры базовых элементов комплекса, которые были выбраны в результате оптимизации режима работы всей инжекционной цепочки, и которые обеспечивают проектный уровень светимости в эксперименте на коллайдере, показаны в Таблице 1.

Таблица 1. Основные параметры ускорительных установок комплекса NICA

	ЛУ-20	Линак	Бустер	Нуклотрон	Коллайдер
Сорт частиц	p↑, d↑, легкие ионы (A/Z≤3)	d ÷ Au A/Z ≤ 6	Тяж. ионы (Au ³²⁺)	Au ⁷⁹⁺	Au ⁷⁹⁺
Периметр (длина), м	14.4	15	212.2	251.52	503.04
E_инж, ГэВ/н	6·10 ⁻⁴ (p) 1.5·10 ⁻⁴ (i)	3.3·10 ⁻⁵	0.003	0.6	1÷4.5
E _{max} , ГэВ/н	0.002 (p) 0.0005 (ионы)	0.003	0.6	4.5	возможность медленного ускорения
ω _{вч} , МГц	145	100.05	0.593 ÷ 2.4	0.947 ÷ 1.147	0.522 ÷ 0.587 (h=1), 5кВ 12.528 ÷ 14.088 (для h=24), 25 кВ 37.584 ÷ 42.264 (для h=72), 125 кВ
h _{вч}	-	-	4 / 1 *	1	72
B _{max} , Тл	-	-	1.8	2	1.8
dB/dt, Тл/с	-	-	1	1	< 0.5
N _i /цикл	> 10 ¹⁰	1.5·10 ⁹	1.5·10 ⁹	10 ⁹	5·10 ¹⁰

* на энергии 100 МэВ/н производится переход с 4-й на 1-ю гармонику

Во второй главе представлены результаты по исследованию процессов внутривидового рассеяния и охлаждения пучка тяжелых ионов - электронного и стохастического.

Бустер предложено оснастить системой электронного охлаждения. Такая система на энергии инжекции (3 МэВ/н) необходима для накопления требуемой интенсивности частиц за счет многократно повторяемых импульсов инжекции. Максимальная энергия электронного пучка в системе охлаждения выбрана равной 55 кэВ, что соответствует энергии охлаждаемого ионного пучка примерно 100 МэВ/н. На этой энергии охлаждение необходимо для обеспечения параметров пучков, выводимых из Бустера, требуемых для экспериментов на неподвижной мишени.

Результаты моделирования показывают, что для охлаждения ионного пучка наиболее подходящим режимом выглядит инжекция ионов золота с любым из анализируемых зарядовых состояний ($32+$, $52+$, $65+$) на энергии 3 МэВ/н, охлаждение, до-ускорение и перевод сгустка в Нуклотрон. Пример результатов моделирования эволюции параметров ионного пучка с учетом эффектов электронного охлаждения и внутривидового рассеяния, представлен на Рисунке 2.

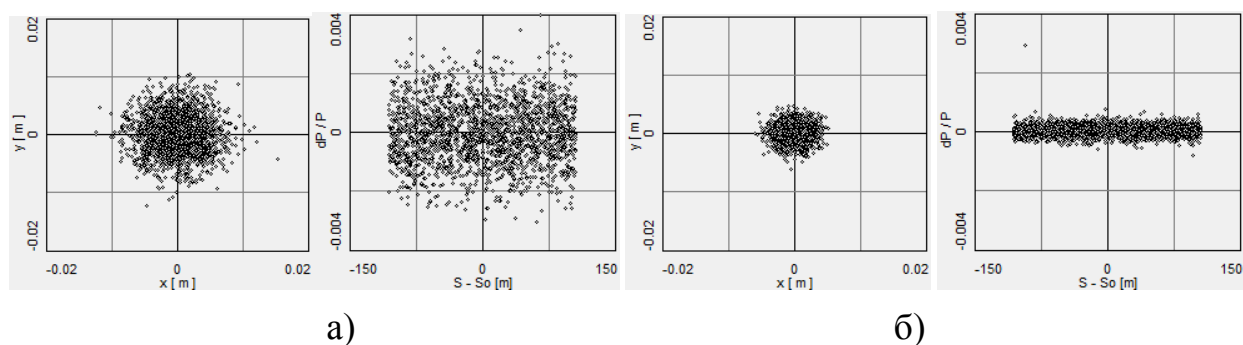


Рис.2. Результаты моделирования эволюции параметров пучка ионов $^{197}\text{Au}^{32+}$ на энергии 3 МэВ/н: распределение частиц на фазовых плоскостях (x, x') и $(x, dp/p)$ до (а) и после охлаждения (б).

Исходные требования к коллайдеру: обеспечение максимально большого пикового значения светимости и обеспечение времени жизни светимости много

большого, чем время подготовки пучка. Предложена схема накопления пучка требуемой интенсивности в коллайдере, которую планируется осуществлять в продольном фазовом пространстве с использованием техники «барьерных напряжений». Такая методика успешно освоена на накопительном кольце ESR в Германии, где автор принимал непосредственное участие в экспериментальных исследованиях режимов накопления с помощью техники барьерных напряжений и стохастического охлаждения.

В процессе эксперимента уменьшение светимости может быть вызвано двумя процессами – гибелью частиц и увеличением фазового объема сгустка. Рост фазового объема сгустка вызывается совместным действием многих эффектов: внутривпучковым рассеянием (ВПР), пересечением частицами нелинейных резонансов высокого порядка, многократным рассеянием на атомах остаточного газа, шумами системы питания структурных магнитов колец, и др. Для стабилизации фазового объема сгустка предложено использовать методы охлаждения пучков – стохастическое и/или электронное.

На основе проведенного теоретического анализа и численного моделирования влияния различных эффектов на устойчивость пучка, сформулированы параметры пучка и систем коллайдера, при которых достигается максимальная пиковая светимость:

- минимальное значение бета-функции в точке встречи (ТВ) выбрано равным 35 см, исходя из требований обеспечить минимальный эмиттанс пучка в ТВ, а также ограничений геометрической апертуры линз финального фокуса (40 мм - для обеспечения в них требуемого градиента магнитного поля до 30 Тл/м²);
- максимально возможное число сгустков в кольце – выбрано равным 24, исходя из требования избежать паразитных столкновений на участке сведения пучков в окрестности точки встречи с одной стороны, и периметра коллайдера (503.04 м), с другой;
- среднеквадратичный относительный разброс (максимальная фазовая плотность частиц N_b/ϵ в сгустке) по импульсу на уровне $\pm(1\div 1.5)\cdot 10^{-3}$, что соответствует 1/6 выбранного продольного аксептанса. Увеличение разброса по

импульсу повышает порог развития когерентных неустойчивостей сгустка и, с другой стороны, не приводит к снижению светимости. Поэтому для достижения максимальной светимости разброс по импульсу следует выбирать максимально возможным, исходя из ограничений по продольному аксептансу и технически достижимой амплитуды ВЧ напряжения, необходимой для согласования сгустка (ниже 1МВ).

- длина сгустка должна быть минимально возможной, чтобы избежать эффекта «песочных часов» и обеспечить концентрацию светимости в центральной части детектора. С другой стороны, уменьшение длины сгустка увеличивает пиковый ток в нем, что приводит к увеличению сдвига частот бетатронных колебаний, а также может вызвать когерентную (микроволновую) продольную или поперечную неустойчивость пучка. В качестве компромисса между этими двумя противоположными требованиями, среднеквадратичная длина сгустка была выбрана равной 60 см.

Возможности выбора эмиттанса пучка существенно зависят от механизма нагрева сгустка, который должна компенсировать система охлаждения. Основными источниками нагрева являются ВПР и, при большой величине сдвига бетатронных частот, нагрев за счет пересечения частицами нелинейных резонансов высокого порядка. В зависимости от того, какой из этих эффектов преобладает, предложено два режима работы: «доминирования ВПР», и «доминирования пространственного заряда».

В режиме доминирования ВПР величины продольного и поперечных фазовых объемов пучка связаны друг с другом, и, при заданной величине разброса по импульсу, минимум темпа нагрева соответствует строго определенной величине эмиттанса. В режиме доминирования пространственного заряда (ДПЗ) темпы роста фазового объема существенно выше, чем при доминировании ВПР, однако, природа нагрева продольной и поперечных степеней свободы различна, и эмиттанс сгустка можно выбирать практически независимо от разброса по импульсу. Для режима ДПЗ значение равновесного эмиттанса можно, как показывает опыт работы накопителей с

электронным охлаждением, выбрать из условия равенства сдвига бетатронной частоты ΔQ_{SC} величине 0,05. Компенсация нагрева пучка в режиме доминирования ВПР (ДВПР) требует существенно меньших темпов охлаждения, поэтому он более предпочтителен при высоких энергиях ионов, когда заметно проще достичь проектного значения светимости, используя стохастическое охлаждение. На малых энергиях возможность увеличения светимости связана с переходом в режим ДПЗ, а необходимый высокий темп охлаждения можно обеспечить, применяя электронное охлаждение.

В ходе теоретического исследования и численного анализа, были рассчитаны характерные времена нагрева за счет ВПР (Таблица 2).

Таблица 2. Параметры пучка и оценки светимости коллайдера при проведении эксперимента по столкновению ионных пучков.

Периметр кольца, м	503,04		
Число сгустков	24		
Среднеквадратичная длина сгустка, м	0.6		
Бета-функция в точке встречи, м	0.35		
Акцептанс кольца (линзы финального фокуса)	40 π мм мрад		
Продольный акцептанс, Δp/p	±0.01		
Гамма критическая, γ _{tr}	7.091		
Энергия ионов, ГэВ/н	1.0	3.0	4.5
Число ионов в сгустке	2.75·10 ⁸	2.4·10 ⁹	2.2·10 ⁹
Среднекв. разброс по импульсу, 10 ⁻³	0.62	1.25	1.65
Среднекв. эмиттанс пучка (гориз/верт), ненормализованный, π·мм·мрад	1.1/1.01	1.1/0.89	1.1/0.76
Светимость, 10 ²⁷ см ⁻² сек ⁻¹	0.011	1	1
Характерные времена роста ВПР, сек	186	702	2540

Стохастическое охлаждение предложено использовать в коллайдере главным образом для того, чтобы поддерживать высокую светимость при

больших энергиях. Для выбранной оптической структуры коллайдера найдена оптимальная расстановка оборудования системы стохастического охлаждения. Исходя из выбранного расположения пикапа и кикера показано, что для обеспечения характерных времен охлаждения в 2-3 раза меньше (чтобы иметь технический резерв), чем характерные времена нагрева за счет ВПР, достаточно полосы частот системы 3-6 ГГц.

Для технически достижимых параметров системы электронного охлаждения (приведены в работе) во всем диапазоне энергий ионов были рассчитаны характерные времена охлаждения. Показано, что в диапазоне низких энергий ионов, характерные времена электронного охлаждения примерно в 20 раз меньше характерных времен нагрева за счет ВПР, и применение электронного охлаждения оказывается наиболее адекватным средством для обеспечения оптимального режима работы коллайдера.

В результате, предложен сценарий использования различных схем охлаждения (Рисунок 3).

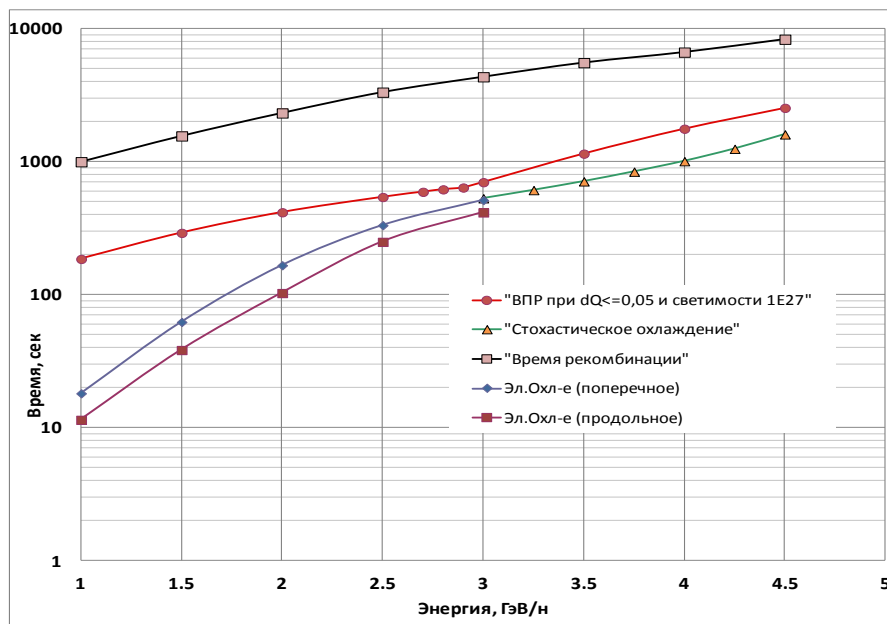


Рис. 3. Характерные времена нагрева за счет внутрипучкового рассеяния для устойчивой динамики ионного пучка, характерные времена электронного охлаждения для энергии ионов до 3 ГэВ/н в режиме ДПЗ, и стохастического охлаждения для энергии выше 3 ГэВ/н для полосы частот 3-6 ГГц.

В заключении главы представлены разработанные концептуальные проекты систем электронного и стохастического охлаждения, даны основные параметры этих систем.

При расчетах и моделировании использовалась программа ВЕТАСОOL, разработанная с непосредственным участием автора. ВЕТАСОOL является известной программой для моделирования долговременных процессов в ускорителях. Она была использована для описания большого количества экспериментальных фактов на накопителях заряженных частиц по всему миру и для проектирования вновь создаваемых ускорительных комплексов.

В первой части **третьей главы** обсуждаются технический проект модернизации вакуумной системы быстроциклирующего сверхпроводящего синхротрона и результаты его реализации.

Описан ряд экспериментов, проведенных на Нуклотроне с целью измерения среднего значения вакуума в его пучковой камере. Измерения проводились по темпу потерь циркулирующих ионов H_2^{+1} на "столе" магнитного поля, и при длительной циркуляции пучка дейтронов, а также сравнивались с ранее полученными данными по потерям интенсивности частиц при ускорении ядерных пучков Li^{3+} , C^{4+} , C^{6+} , с известной начальной энергией и известным темпом ускорения. На первом этапе модернизации удалось существенно - примерно в десять раз, уменьшить среднее значение давления в камере за счет улучшения вакуума на «проблемных» участках кольца. На втором этапе модернизации вакуумной системы удалось более, чем на два порядка (до $p \leq 1,0 \cdot 10^{-7}$ Па) уменьшить среднее интегральное значение давления в пучковой камере по сравнению с давлением до модернизации.

Демонстрация возможности ускорения тяжелых ионов в Нуклотроне рассматривалась как комплексная проверка всех основных систем ускорительного комплекса. В результате, на поле 7,9 кГс был реализован медленный вывод ионов ксенона, что соответствует энергии ионов 1 ГэВ/н. Интенсивность выведенного пучка на выходном фланце ускорителя достигала

нескольких тысяч ионов за цикл. На этой энергии были проведены методические исследования по регистрации ионов и проведено облучение. В завершение сеанса было осуществлено ускорение ионов ксенона до поля 10 кГс, что соответствует энергии 1,5 ГэВ/н.

Во второй части **третьей главы** обсуждаются технический проект модернизации основной системы питания быстроциклирующего сверхпроводящего синхротрона и результаты его осуществления. Основной задачей развития систем питания и защиты структурных магнитов и линз Нуклотрона явилось обеспечение надежной и длительной работы с магнитным полем до 2 Тл (что соответствует току в обмотках равному 6300 А) и реализация возможности оптимизации рабочей точки ускорителя. Решение этой задачи было невозможно при существовавшей до этого схеме электропитания магнитной системы. Мощность источника питания дипольных магнитов и надежность системы эвакуации энергии из сверхпроводящих магнитов и линз в случае возникновения нормальной проводящей зоны были не достаточны для гарантированной надежной длительной работы при величине поля выше 1 Тл и темпе роста поля выше 0.6 Тл/с. Работа с длинными столами тока на уровне 6300 А была возможна только при низкой частоте повторения циклов. До проведения модернизации ускоритель эксплуатировался при равных токах в фокусирующих и дефокусирующих линзах, что позволяло перемещать рабочую точку на диаграмме частот только вдоль прямой линии.

Автором разработана концепция модернизации системы электропитания структурных дипольных и квадрупольных магнитов, основанная на принципе общей связи этих структурных элементов кольца Нуклотрона, последовательно соединенных источников питания 19ТВ и 20ТВ, ключей эвакуации энергии КТ1...КТ6(КТ7) и системы датчиков перехода. Практическая реализация этой схемы предполагала модернизацию существующих источников 19ТВ и 20ТВ, разработку и создание двух новых источников разбаланса тока - для фокусирующих и дефокусирующих линз. Для повышения надежности системы

защиты необходимо было разработать и создать новые ключи эвакуации энергии.

В работе подробно проанализированы различные силовые схемы новой конфигурации системы питания, система формирования полевых функций в структурных магнитных элементах Нуклотрона, процессы коммутации тока во время эвакуации энергии. Разработан проект конструкции ключа эвакуации энергии: выбор и компоновка всех компонентов схемы. В основу конструкции КЭЭ положен силовой быстродействующий тиристор российского производства типа ТБ373-2000-20. Масштабный комплекс работ по созданию новой системы электропитания был осуществлен в предельно сжатые сроки и без длительных перерывов в работе ускорительного комплекса. Для решения этой задачи была разработана методика ввода в эксплуатацию новой системы, основанная на поэтапном создании ее элементов и их тестировании и доработки в рамках существовавшей схемы между сеансами.

В декабре 2010 года, после того, как основной источник питания и система защиты были последовательно протестированы в циклах с полем на столе 1.4, 1.6 и 1.8 Тл, поле на столе было увеличено до 2 Тл (Рис.4).

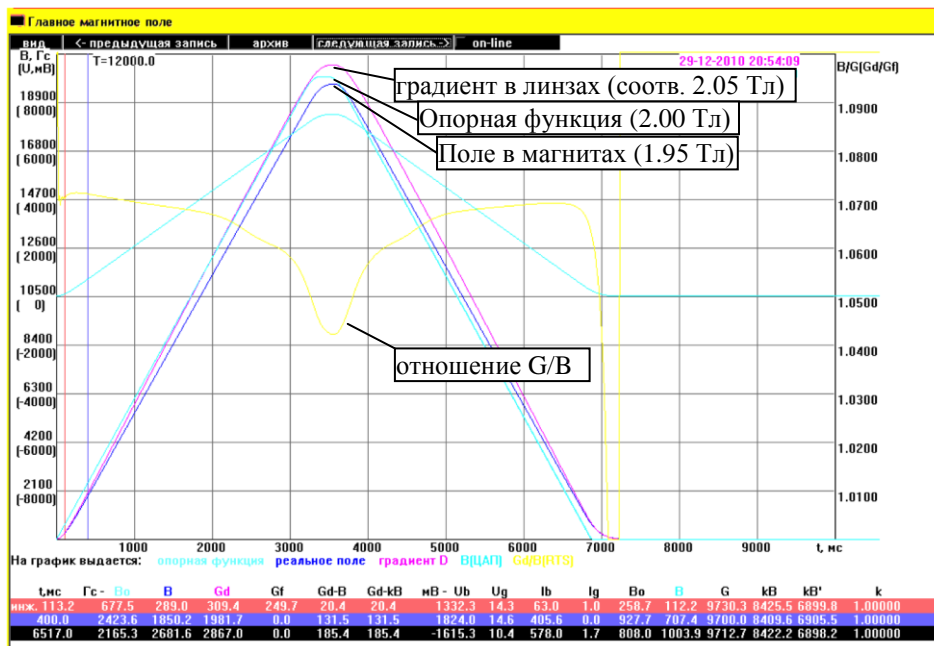


Рис. 4. Диаграмма цикла с полем дипольных магнитов на столе 2 Тл.

Отношение G/B – отношение градиента линз к полю дипольных магнитов.

Обеспечение надежной работы магнитной системы при проектном уровне поля явилось прямым подтверждением правильности основных технических решений, положенных в основу новой системы электропитания и защиты.

В четвертой главе обсуждаются результаты развития Нуклотрона в качестве экспериментального полигона для исследования и моделирования на нем различных режимов работы коллайдера NICA. Поскольку в коллайдере будет использоваться методы стохастического охлаждения, принято решение разработать прототип системы стохастического охлаждения для коллайдера и испытать ее на Нуклотроне. В России отсутствует опыт разработки и эксплуатации систем стохастического охлаждения, а ряд особенностей коллайдера NICA не позволяет напрямую применить технические решения, используемые в зарубежных научных центрах. Поэтому разработка системы стохастического охлаждения пучка для коллайдера требует проведения предварительных экспериментальных исследований по изучению предельных возможностей метода.

Разработанный для Нуклотрона канал стохастического охлаждения планируется последовательно использовать для проверки различных методов охлаждения продольной степени свободы распущенного и сгруппированного пучка: метода режекторных фильтров, метода Пальмера и время-пролетного метода. Благодаря универсальной конструкции пикап-станции и особого размещения в ней сигнальных электродов, обеспечена также возможность охлаждения поперечной степени свободы. Структура созданной системы ориентирована на реализацию в первую очередь продольного охлаждения по методу режекторного фильтра (Таблица 3). Канал состоит из пяти основных элементов: пикап-станция, линия задержки, режекторный фильтр, диагностическое оборудование, кикер. Кикер установлен в «теплой» секции (7-й прямолинейный промежуток) ускорителя, ввиду того, что в нем выделяется достаточно большая тепловая мощность. Пикап установлен в 3-м промежутке, - диаметрально противоположном кикеру. Участок магнитно-

криостатной системы в этом промежутке находится при криогенной температуре (от 4 до 15 К), что позволяет уменьшить мощность теплового шума с пикапа. Туннель между пикапом и кикером длиной около 85 метров использован для коаксиального кабеля линии основной задержки. Выбран кабель, обладающий наилучшими характеристиками для работы системы (задержка 3.7 нсек/метр, потери сигнала 0.03 дБ/м) и основное оборудование для обработки сигнала и формирования сигнала воздействия на пучок в кикере, а также измерительная диагностика расположена непосредственно у кикера.

Таблица 3. Параметры канала стохастического охлаждения на Нуклотроне.

Периметр ускорителя, м	251.52
Охлаждаемые ионы	d^{1+} , C^{6+}
Энергия, ГэВ/н	3.5
Максимальное относительное отклонение по импульсу	10 ⁻³
Слип-фактор кольца, η	0.0322
Полоса пропускания системы f_{min}/f_{max} , ГГц	2/4
Интенсивность охлаждаемого пучка	10 ⁹
Ожидаемое время охлаждения, с	< 10

Чтобы уверенно зарегистрировать эффект охлаждения, интенсивность пучка должна быть на уровне нескольких единиц на 10⁹ частиц. Также крайне важно иметь достаточно времени для охлаждения. Благодаря проведенной модернизации системы питания и системы эвакуации энергии, а также циклозадающей аппаратуры, стало возможным проведение экспериментов по измерению параметров ускоренного ионного пучка, циркулирующего на сверхдлинных плато магнитного поля длительностью 1000 секунд, что очень близко к режиму проведения физического эксперимента в коллайдере. В этом случае процесс настройки системы, частотного анализа пучка и попытки наблюдения эффекта охлаждения сильно упрощаются.

Для оценки основных параметров системы (в первую очередь, необходимой мощности усилителя) был разработан алгоритм и проведено численное моделирование эволюции функции распределения частиц путем решения уравнения Фоккера-Планка. Результаты моделирования позволили сформулировать требования для канала продольного стохастического охлаждения. Например, для пучка ионов углерода (C^{6+}) требования к необходимой мощности и коэффициенту усилению составляют до 10 Ватт и 130 дБ соответственно.

Предложена и реализована схема оптического режекторного фильтра, в котором луч лазера модулируется входным ВЧ-сигналом с пикапа. Использование оптоэлектроники дало возможность реализовать линию задержки системы, основанную на оптоволоконных сборках. Это имеет ряд преимуществ по сравнению с коаксиальной задержкой: размеры получаются гораздо компактнее, а настройка становится очень точной и простой.

В результате испытаний элементов канала стохастического охлаждения и оборудования по управлению ВЧ ускоряющего поля, впервые проведены экспериментальные измерения фазо-частотных характеристик системы и параметров циркулирующего ионного пучка в диапазоне энергий от 0.5 до 4 ГэВ/н (Рис.5).

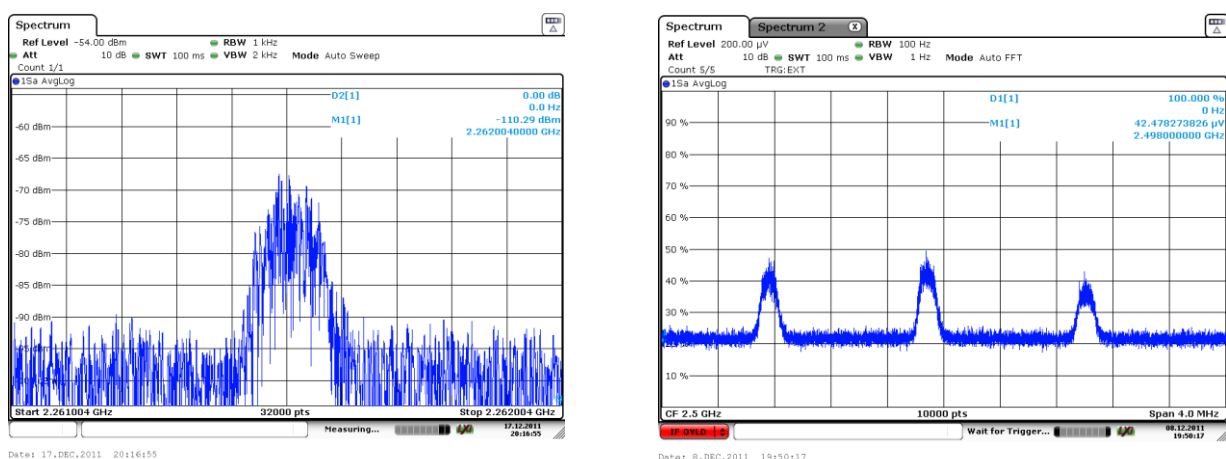


Рис. 5. Примеры экспериментально измеренных спектров шума пучка на энергии 2 ГэВ/н. Слева - пучок дейтронов, справа - пучок ионов C^{6+} .

В пятой главе дается обоснование выбранного варианта размещения, фокусирующей структуры, типа структурных магнитных элементов, проекта вакуумной системы, проекта системы питания и защиты от срыва сверхпроводимости, а также размещения других подсистем Бустера в существующих зданиях ЛФВЭ ОИЯИ. Магнитная система Бустера состоит из четырех квадрантов, поворотные участки которых размещаются внутри ярма магнита Синхрофазотрона, а прямолинейные промежутки совпадают с соответствующими промежутками магнита Синхрофазотрона.

План размещения Бустера и фрагмент поперечного сечения корпуса приведен в главе. Фокусирующая структура Бустера имеет FODO периодичность и состоит из 4-х суперпериодов, в каждый из которых входят 5 регулярных периодов и один период, не содержащий дипольных магнитов. Элементы магнитной системы Бустера NICA планируется построить по аналогии с магнитами действующего быстроциклирующего сверхпроводящего ускорителя Нуклотрон. Для размещения 44 корректирующих элементов и диагностического оборудования в Бустере отведено 48 малых свободных промежутков вблизи линз. В каждой структурной квадрупольной линзе расположены электростатические пикап-электроды (всего 48 станций).

Система инъекции пучка ионов в Бустер обеспечивает три режима работы:

1. Однократная однооборотная инъекция длительностью 8.3 микросекунды;
2. Двух-трех оборотная однократная инъекция длительностью до 27 микросекунд и накоплением пучка в поперечном фазовом пространстве;
3. Режим многооборотной инъекции длительностью с накоплением пучка в фазовой плоскости горизонтальных колебаний, предназначенный для работы с источниками ионов другого типа.

Система медленного вывода включает в себя электростатический септум и септум-магнит, расположенные во второй прямолинейной секции Бустера. Медленный вывод осуществляется за счет смещения рабочей точки Бустера в область нелинейного резонанса $3Q_x=17$, возбуждаемого 17-ой гармоникой секступольной нелинейности. Быстрый вывод предназначен для перевода пучка

в Нуклотрон. Для вывода пучка используется импульсный ударный магнит (кикер) и септумный магнит, расположенные в третьей прямолинейной секции Бустера. В главе сформулированы основные параметры Бустера (Таблица 4).

Таблица 4. Параметры Бустера NICA.

Энергия инжекции, МэВ/н	3
Максимальная энергия ионов Au^{32+} , МэВ/нуклон	600
Магнитная жесткость, Тл·м при инжекции / максимальная	2,2 / 25,0
Периметр, м	211,2
Кулоновский предел по интенсивности, част/цикл	$5,10^9$ А/с ²
Критическая энергия, ГэВ/н	3,8
Структура и магнитные элементы:	
Количество суперпериодов / периодов типа ДФО	4 / 24
дипольных магнитов	40
квадрупольных линз	48
Магнитное поле в дипольных магнитах, Тл	1,8
Градиент в линзах, Тл/м	19,7 / -20,3
Динамические характеристики структуры и пучка:	
Частоты бетатронных колебаний	5,75
Хроматичность $\Delta Q_x/(\Delta p/p) / \Delta Q_z/(\Delta p/p)$	-6,8 / -6,5
Коэффициент уплотнения орбит, α	0,04
Эмиттанс пучка, п·мм·мрад	10
при инжекции $\epsilon_{x,z}$	
в конце ускорения ϵ_x / ϵ_z	1,7 / 2,0

Приведены требования подготовки пучкового и изоляционного объема, а также определена расстановка оборудования и типы откачного и диагностического оборудования.

При построении системы электропитания Бустера принято за основу требование последовательного соединения структурных дипольных магнитов (суммарная индуктивность 16,4 мГн), квадрупольных фокусирующих

(суммарная индуктивность 0,6 мГн) и дефокусирующих (суммарная индуктивность 0,6 мГн) линз Бустера. Основной мощный источник системы питания формирует требуемый ток (до 12,1 кА) с заданной скоростью роста поля 1 Тл/с в общей цепи. Для гибкой регулировки рабочей точки ускорителя предназначены два дополнительных источника питания существенно меньшей мощности. Один из них позволяет одновременно изменять градиент поля в фокусирующих и дефокусирующих линзах, другой – только в дефокусирующих. Система питания включает также устройства регулирования, управления и диагностики.

В заключении диссертации сформулированы научные результаты работы, состоящие в следующем:

1. Впервые сформулирована концепция тяжелоионного коллайдера низких энергий с максимально высокой светимостью сталкивающихся пучков. Разработка сверхпроводящего коллайдера, обеспечивающего максимально возможную светимость физического эксперимента (на уровне 10^{27} см⁻²сек⁻¹) в диапазоне энергий $\sqrt{s_{NN}}=4\div 11$ ГэВ/н – это новое научное направление ускорительной физики и техники. Проведены теоретические и экспериментальные исследования по оптимизации и выбору основных параметров комплекса NICA. Рассчитаны и выбраны: оптимальная схема подготовки пучка тяжелых ионов в инжекционной цепочке, оптимальная с точки зрения размещения, конфигурация сверхпроводящих накопительных колец на встречных пучках.

2. Впервые на основе теоретических и экспериментальных исследований разработана оптимальная схема формирования высокоинтенсивных ионных сгустков в сверхпроводящем коллайдере NICA: накопление пучка с использованием техники барьерных напряжений и охлаждения, а также поддержание максимального уровня светимости эксперимента во всем диапазоне кинетической энергии пучков от 1 до 4.5 ГэВ/н. Разработан и предложен сценарий использования охлаждения пучка в коллайдере: в

диапазоне энергий от 1 до 3 ГэВ/н система электронного охлаждения пучка сможет обеспечить достаточно короткие времена охлаждения и работу коллайдера в режиме доминирования пространственного заряда сгустка. В диапазоне энергии ионного пучка от 3 до 4.5 ГэВ/н предложено использование системы стохастического охлаждения. Уровень светимости в этом диапазоне не ниже $1 \cdot 10^{27} \text{ см}^{-2} \text{ сек}^{-1}$ достигается в режиме доминирования эффекта внутривпучкового рассеяния. Выбрано оптимальное расположение пикапов и кикеров системы стохастического охлаждения, сформулированы основные параметры обеих систем, обеспечивающие эффективное охлаждение.

3. Впервые проведен ряд экспериментов по измерению среднего значения вакуума в пучковой камере сверхпроводящего быстроциклирующего синхротрона Нуклотрон путем измерения темпа потерь циркулирующих ионов. В результате этих работ был впервые разработан комплекс мер по улучшению вакуумных условий в пучковой камере ускорителя. Уровень вакуума в пучковой камере Нуклотрона удалось улучшить более чем на два порядка, что позволило ускорять тяжелые ионы с массовым числом 100 и выше. Впервые в быстроциклирующем сверхпроводящем синхротроне ионы ксенона $^{124}\text{Xe}^{42+}$ ускорены до энергии 1.5 ГэВ/н.

4. Впервые разработан и реализован технический проект схемы последовательного питания магнитов и линз сверхпроводящего синхротрона Нуклотрон. Внедрены конструкции элементов и уникальные схмотехнические решения модернизации основных источников питания, регуляторов тока в магнитах и линзах, а также ключей эвакуации энергии. Введена в эксплуатацию модернизированная система питания Нуклотрона, которая позволила достичь величины магнитного поля 2Тл в главных структурных элементах сверхпроводящего синхротрона Нуклотрон.

5. Впервые предложено и осуществлено создание комплекса современного оборудования, обеспечивавшего развитие сверхпроводящего синхротрона Нуклотрон для экспериментального исследования на нем различных режимов работы коллайдера NICA. Исследованы элементы канала

стохастического охлаждения в сверхпроводящем синхротроне Нуклотрон. Впервые проведены экспериментальные измерения фазово-частотных характеристик системы и параметров циркулирующего ионного пучка в диапазоне энергий от 0.5 до 4 ГэВ/н. Исследована работа сверхпроводящей системы при длинных (тысячи секунд) плато магнитного поля.

б. Впервые выбрана оптимальная фокусирующая структура, параметры системы ввода и вывода пучка, системы коррекции ошибок магнитного поля, системы питания и защиты от срыва сверхпроводимости нового сверхпроводящего быстроциклирующего бустерного синхротрона (Бустера NICA), вписанного в существующую инфраструктуру ускорительного комплекса ЛФВЭ. Разработанная и предложенная фокусирующая структура Бустера позволит осуществить ускорение ионов золота до энергии, достаточной для эффективной обдирки и инжекции в Нуклотрон. На основе опыта проектирования системы питания Нуклотрона, и результатов экспериментальных испытаний введения ее в эксплуатацию, разработан концептуальный проект системы питания Бустера NICA.

Основные результаты диссертационной работы опубликованы в работах:

1. The Project NICA/MPD at JINR: Search for the mixed phase of strongly interacting matter at Nuclotron-based ion collider facility, A.Sissakian, G.Trubnikov и др., XXIII Int. Symposium on lepton and photon interaction at high energy, Daegu, Korea, 2007.
2. Progress of the NICA project, A.Sissakian, G.Trubnikov, и др., Proceedings of the 5th Int. Workshop CPOD 2009, BNL, NY, USA. PoS (CPOD 2009) 051.
3. Project of the Nuclotron-based Ion Collider fAcility (NICA) at JINR, G. Trubnikov, N. Agapov, V. Alexandrov, и др., p.14-16, Proceedings of the RUPAC-2010, Protvino, Russia.
4. Прогресс в развитии ускорительного комплекса Нуклотрон, Г.В.Трубников, А.О.Сидорин, и др. «Письма в ЭЧАЯ», ISSN 1547_4771, 2010, т.7, №7, стр.442.

5. Heavy ion collider project NICA/MPD at JINR (Dubna), G.Trubnikov, A.Kovalenko, V.Kekelidze, et al.,. Proceedings of the 35th International Conference of High Energy Physics (ICHEP2010), Paris, France. PoS(ICHEP 2010)523.
6. The MPD detector at the NICA heavy-ion collider at JINR, NIM A, 2011, A628, p 99-102, Kh.U.Abraamyana, S.V.Afanasiev, G.Trubnikov et al.
7. Demonstration of longitudinal stacking in the ESR with Barrier Buckets and stochastic cooling, M. Steck, G. Trubnikov, C. Dimopoulou, и др. Proceedings of the COOL'11, Alushta, Ukraine, September 2011, TUPS20.
8. NICA project at JINR, G.Trubnikov, A.Sorin, V. Matveev, I. Meshkov, и др. Журнал «Письма в ЭЧАЯ», Изд: ОИЯИ, вып. 4, т.7, стр. 521, 2012г.
9. Модернизация инжекционного комплекса «Нуклотрон», А.В.Бутенко, А.И.Говоров, Г.В.Трубников, и др., Журнал «Письма в ЭЧАЯ», Изд: ОИЯИ, вып. 4, т.7, стр. 654, 2012г..
10. Design of the Nuclotron booster in the NICA project, A.Butenko, N.Agarov, G.Trubnikov, Proceedings of the International Particle Accelerator Conference (IPAC'10), p. 681-683, 2010.
11. Развитие системы питания Нуклотрона, В.Н.Карпинский, Г.В.Трубников, А.В.Бутенко и др. «Письма в ЭЧАЯ», ISSN 1547_4771, 2010, т.7, №7, стр.9.
12. Cryogenic test of full-size superconducting magnet for the Booster synchrotron of the NICA project, H.Khodzhibagiyan, G.Trubnikov, и др. Proceedings of the EUCAS-2011, журнал “Physics Procedia” (2011).
13. Г.В.Трубников, и др. «Участие ОИЯИ, российских научных организаций и предприятий в создании сверхпроводящей магнитной системы СИС100», Журнал «Атомная энергия», выпуск 2, стр.68, 2012 г.,
14. Итоги реализации проекта Нуклотрон-М, Журнал «ЭЧАЯ», 2012, т.43, вып №4, Г.В.Трубников, А.О.Сидорин и др.
15. Status of the Development of Superconducting Magnets for the NICA Project , H.Khodzhibagiyan, P.Akishin, G.Trubnikov, и др., Proceedings of the Conference on Magnetic Technologies MT-22, #3AP3 – 6.

16. Numerical simulation of crystalline ion beams in storage ring. I.Meshkov, D.Moehl, G.Trubnikov, и др. NIM A, 532, 376-381, 2004
17. BETACOOL program for simulation of beam dynamics in storage rings. I.N.Meshkov, A.O.Sidorin, G.V.Trubnikov, и др. NIM A, 558, 325-328, 2006
18. Численное моделирование динамики частиц в накопителях с использованием программы BETACOOL. И.Н.Мешков, Р.В.Пивин, А.О.Сидорин, А.В.Смирнов, Г.В.Трубников, Письма в ЭЧАЯ , ISSN:1814-5957 , eISSN:1814-5973 , Изд: ОИЯИ, 3, 7, 82-86, 2006
19. Electron cooling application for luminosity preservation in an experiment with internal targets at COSY. I.Meshkov, G.Trubnikov, et al., Juel-4031, 2003 , ISSN:0944-2952 , Изд:Institute fuer Kernfhsyk, 2003
20. Numerical simulation of particle dynamics in storage rings using BETACOOL code, I. Meshkov, A. Smirnov, E. Syresin, G. Trubnikov, P. Zenkevich, A.Sidorin, 18-22, Proceedings of RuPAC XIX, 2004
21. A.V. Fedotov, I. Ben-Zvi, G. Trubnikov, и др. Electron Cooling Dynamics for RHIC, p.415-419, Proceedings of 33d ICFA Advanced Beam Dynamics Workshop on High Intensity and High Brightness Hadron Beams, Bensheim, Germany, 2004
22. Electron cooling of RHIC, I. Ben-Zvi, G.Trubnikov, et al., Particle Accelerator Conference (PAC2005), Knoxville, USA,
23. IBS for ion distribution under electron cooling, A.V. Fedotov, I. Ben-Zvi, Yu. Eidelman, G.Trubnikov, и др., p.4263-4265, Proceedings of Particle Accelerator Conference (PAC-2005), Oak Ridge National Laboratory, Knoxville, USA.
24. Cooling dynamics studies and scenarios for the RHIC cooler, A.V. Fedotov, I. Ben-Zvi, G. Trubnikov и др., Proceedings of Particle Accelerator Conference (PAC-2005), Oak Ridge National Laboratory, Knoxville, USA, p.4236-4238.
25. BETACOOL code for simulation of long term beam dynamics in ion storage rings, I.Meshkov, R.Pivin, A.Sidorin, A.Smirnov, G.Trubnikov, Proc. of RuPAC'2006, Novosibursk, Russia.
26. Implementation of Synchrotron Motion in Barrier Buckets in the BETACOOL Program, O. Boine-Frankenheim, A.O.Sidorin, G.V.Trubnikov, A. V. Smirnov,

Proceedings of the COOL 07 (Workshop on beam cooling and related topics), GSI, Bad Kreuznach, Germany. 2007.

27. Code benchmarking studies with the ESR internal target. V. Gostishchev, C. Dimopoulou, G. Trubnikov, и др. GSI scientific report 2006, GSI report 2007-1, GSI-ACCELERATORS-06, p.83, 2009

28. Compensation of Nonlinearities in NICA Collider Optics, S.Kostromin , O.Kozlov, G.Trubnikov и др., Proceedings of the RUPAC'10, Protvino, Russia, Oct. 2010, p. 35

29. Simulation of Au³²⁺ Beam Losses Due to Charge Exchange and Dynamic Vacuum in Nuclotron Booster, A.Philippov, I.Meshkov, G.Trubnikov и др., Proceedings of the RUPAC'10, Protvino, Russia, Oct. 2010, p. 89

30. Design of NICA collider rings, S.Kostromin , O.Kozlov, G.Trubnikov и др., Proceedings of the IPAC'11, San Sebastien, Spain, September 2011, p.1807

31. О вопросах создания системы стохастического охлаждения пучков ионов на сверхпроводящем ускорительном комплексе Нуклотрон ОИЯИ, А. Кобец, А. Сидорин, Г. Трубников, Н. Шурхно, Журнал «Письма в ЭЧАЯ», Изд: ОИЯИ, вып. 4, т.7, стр. 604, 2012г..

32. Применение методов охлаждения пучков в проекте NICA, Г.В.Трубников, С.А.Костромин, И.Н. Мешков, и др., Журнал «Письма в ЭЧАЯ», Изд: ОИЯИ, вып. 4, т.7, стр. 537, 2012г.

33. NICA at JINR: New Prospects for Exploration of Quark–Gluon Matter, V. Kekelidze, A.Kovalenko, I. Meshkov, G.Trubnikov, A.Sorin, Журнал “Письма в ЭЧАЯ”, 2012 г., т.75, №5, стр. 542

34. Сверхпроводящий экран для соленоида системы электронного охлаждения, Н.Н. Агапов, Д.Е. Донец, Г.В. Трубников, Г.Л. Дорофеев и др., Журнал «Письма в ЭЧАЯ», Изд: ОИЯИ, вып. 4, т.7, стр. 689, 2012г.

35. Г.В.Трубников, Н.А.Шурхно, А.О.Сидорин, «Моделирование процесса стохастического охлаждения с помощью уравнения Фоккера-Планка. Расчет конструкции системы стохастического охлаждения для Нуклотрона», Журнал «Вестник Санкт Петербургского университета», том 1, серия 10, 2012 г., стр.70