

Объединённый институт ядерных исследований

ТЕХНИЧЕСКИЙ ПРОЕКТ УСКОРИТЕЛЬНОГО КОМПЛЕКСА NICA

Под общей редакцией И.Н. Мешкова, Г.В. Трубникова

ТОМ I

Дубна, 2015

И.Н. Мешков — научный руководитель проекта

Г.В. Трубников — руководитель проекта

А.В. Бутенко, А.О. Сидорин, Г.Г. Ходжибагиян — заместители руководителя проекта

Проект подготовлен авторским коллективом:

ОИЯИ — А.С. Аверичев, Н.Н. Агапов, В.С. Александров, А.В. Алфеев, В.А. Андреев, А.М. Базанов, В.И. Батин, Н.А. Блинов, В.В. Борисов, О.И. Бровка, А.В. Бутенко, В.Н. Бучнев, В.П. Вадеев, Б.В. Василишин, А.В. Вишневский, В.И. Волков, А.Р. Галимов, А.И. Говоров, Д.С. Гогов, Б.В. Головенский, О.М. Голубицкий, Е.В. Горбачев, А.Ю. Гребенцов, А.П. Дергунов, Д.Е. Донец, Е.Д. Донец, Е.Е. Донец, В.М. Дробин, А.В. Дударев, А.В. Елисеев, Н.Э. Емельянов, В.М. Жабицкий, Е.В. Иванов, В.А. Исадов, В.Н. Карпинский, Г.В. Карпов, В.Д. Кекелидзе, А.Е. Кириченко, А.Г. Кобец, В.В. Кобец, А.Д. Коваленко, О.С. Козлов, С.Ю. Колесников, А.В. Константинов, С.А. Костромин, А.Р. Крылов, В.А. Крылов, А.В. Кудашкин, С.И. Кукарников, О.А. Кунченко, Л.В. Кутузова, Н.И. Лебедев, К.А. Левтеров, Р. Ледницы, Д.А. Люосев, А.А. Макаров, Х. Малиновски, В.А. Матвеев, И.Н. Мешков, Ю.А. Митрофанова, В.А. Михайлов, В.А. Мончинский, Н.В. Морозов, А.В. Нестеров, Д.Н. Никифоров, Ю.М. Ноженко, М.М. Омеляненко, А.Л. Осипенков, Р.В. Пивин, Н.В. Пиляр, Д.А. Понкин, Ю.В. Прокофьевичев, С.В. Рабцун, А.Ю. Рамздорф, С.В. Романов, П.А. Рукояткин, Т.В. Рукояткина, В.В. Сальников, С.Н. Седых, В.В. Селезнёв, Н.В. Семин, Е.В. Серочкин, А.О. Сидорин, А.И. Сидоров, В.М. Слепнёв, И.В. Слепнёв, А.В. Смирнов, З.И. Смирнова, А.С. Сорин, А.Ю. Стариков, Е.М. Сыресин, Г.Н. Тимошенко, Н.Д. Топилин, Г.В. Трубников, А.В. Тузиков, А.А. Фатеев, А.В. Филиппов, Н.А. Филиппов, В.В. Фимушкин, Г.Г. Ходжибагиян, А.В. Шабунов, В.С. Швецов, К.В. Шевченко, В.И. Шокин, В.М. Шумков, Н.А. Шурхно, А.А. Шурыгин, В.Ю. Щёголев

В подготовке проекта участвовали:

ВЭИ им. В.И. Ленина — М.П. Кокуркин, Н.Ю. Лысов

ИЯИ РАН — А.С. Белов, С.А. Гаврилов, Л.В. Кравчук, С.А. Крутихин, А.М. Пилан, П.И. Рейнгардт-Никулин, Е.А. Ротов

ИЯФ им. Г.И. Будкера СО РАН — А.М. Батраков, М.И. Брызгунов, А.В. Бублей, Г.Я. Куркин, В.М. Петров, В.А. Полухин, А.В. Рева, А.Г. Трибендис, Г.А. Фатькин

НИЦ «Курчатовский институт» ИТЭФ им. И.А. Алиханова — В.А. Андреев, А.Е. Большаков, А.А. Голубев, А.В. Козлов, А.А. Коломиец, В.А. Кошелев, Г.Н. Кропачев, В.Г. Кузьмичев, Р.П. Куйбида, Т.В. Кулевой, Д.А. Лякин, А.С. Пластун, Д.Н. Селезнёв

НИЦ «Курчатовский институт» ИФВЭ — О.К. Беляев, Ю.А. Буданов, И.А. Звонарев, Н.Е. Тюрин

НИЯУ МИФИ — С.М. Полозов

ИЯИЯЭ БАН, Болгария — Д. Динев, В. Ангелов, А. Ангелов

ИПИ САН, Словакия — Р. Гаврила, И. Герек, Л. Ондриш

ОГЛАВЛЕНИЕ

ПРЕДИСЛОВИЕ	7
ВВЕДЕНИЕ.....	9
Общие положения	9
Краткая характеристика проекта	10
ГЛАВА 1 ОБЩЕЕ ОПИСАНИЕ УСКОРИТЕЛЬНОГО КОМПЛЕКСА NICA	15
Аннотация	17
1.1 Проект Нуклотрон-NICA.....	17
1.2 Структура ускорительного комплекса NICA	19
1.3 Инжекционный комплекс.....	21
1.4 Бустерный синхротрон	24
1.5 Нуклотрон	27
1.6 Коллайдер.....	30
1.7 Сверхпроводящие магниты для Бустера и Коллайдера	33
1.8 Каналы транспортировки пучков	36
1.9 Криогенный комплекс NICA.....	37
1.10 Стартовая версия ускорительного комплекса NICA.....	38
Литература	45
ПРИЛОЖЕНИЕ 1 К ГЛАВЕ 1.....	47
A.1.1 Passport of the NICA accelerator complex	49
A.1.1.1 Introduction	49
A.1.1.2 Mission Statement	49
A.1.1.3 Project Goals	50
A.1.1.4 Key Assumptions, Interfaces and Constraints.....	51
A.1.1.5 Additional Project Goals	52
A.1.1.6 Facility Scope	52
A.1.1.7 Functional Requirements.....	53
A.1.1.8 References	65
ПРИЛОЖЕНИЕ 2 К ГЛАВЕ 1.....	67
П.1.2 Концепция достижения проектной светимости, применение методов охлаждения пучков в проекте NICA	69
П.1.2.1 Введение.....	69
П.1.2.2 Система электронного охлаждения бустера. Режимы работы	70
П.1.2.3 Особенности структуры Коллайдера	74
П.1.2.4 Параметры сгустков и светимость Коллайдера	75

П.1.2.5	Время жизни светимости и стратегия охлаждения	82
П.1.2.6	Стохастическое охлаждение	84
П.1.2.7	Электронное охлаждение	87
П.1.2.8	Заключение	90
П.1.2.9	Литература.....	91
ГЛАВА 2	ИНЖЕКЦИОННЫЙ КОМПЛЕКС	93
Аннотация	95	
2.1	Структура инжекционного комплекса	95
2.2	Инжектор лёгких ионов и протонов Нуклотрон	96
2.2.1	Источники ионов	97
2.2.2	Форинжектор.....	98
2.2.3	Система ВЧ-питания форинжектора ЛУ-20	114
2.2.4	Система управления ВЧ питанием форинжектора ЛУ-20	116
2.2.5	Линейный ускоритель ЛУ-20	118
2.2.6	Вакуумная система инжектора лёгких ионов	123
2.3	Инжектор тяжёлых ионов	129
2.3.1	Источник тяжёлых многозарядных ионов «КРИОН-N».....	130
2.3.2	Конструкция форинжектора	136
2.3.3	Линейный ускоритель тяжёлых ионов HILAC.....	141
2.3.4	Канал транспортировки HILAC — Бустер.....	148
2.3.5	Система ВЧ питания HILAC.....	152
2.3.6	Вакуумная система HILAC	155
Литература	157	
ПРИЛОЖЕНИЕ 1 К ГЛАВЕ 2.....	159	
П.2.1	Канал транспортировки ионов низкой энергии форинжектора ЛУ-20	161
П.2.1.1	Элементы ионно-оптической системы.....	161
П.2.1.2	Узел диагностики	162
П.2.1.3	Узел откачки	164
П.2.1.4	Распределения электрических и магнитных полей	165
П.2.1.5	Динамика пучков	170
ПРИЛОЖЕНИЕ 2 К ГЛАВЕ 2.....	177	
П.2.2	Канал транспортировки ионов низкой энергии в HILAC	179
П.2.2.1	Распределения электрических и магнитных полей	179
П.2.2.2	Динамика пучков	180
ПРИЛОЖЕНИЕ 3 К ГЛАВЕ 2.....	187	
П.2.3	Канал транспортировки HILAC — Бустер.....	189
П.2.3.1	Дипольные магниты	189
П.2.3.2	Квадрупольные линзы.....	190
П.2.3.3	Двойные дипольные корректоры	193
П.2.3.4	Динамика ионных пучков.....	195

ПРЕДИСЛОВИЕ

Технический проект разбит на главы. Для удобства работы отдельные главы сгруппированы по томам. Каждый том снабжён содержанием, необходимые поясняющие материалы к главам, содержащимся в томе, вынесены в приложения.

ТОМ I

Введение

Глава 1. Общее описание ускорительного комплекса NICA

Глава 2. Инжекционный комплекс

ТОМ II

Глава 3. Бустер

Глава 4. Канал транспортировки Бустер — Нуклотрон

Глава 5. Нуклотрон

ТОМ III

Глава 6. Канал транспортировки Нуклотрон — Коллайдер

Глава 7. Коллайдер

ТОМ IV

Глава 8. Системы диагностики пучка, синхронизации, управления и контроля

Глава 9. Радиационная безопасность на комплексе NICA

Глава 10. Инфраструктура, здания, геодезия

Глава 11. Криогенная система

ВВЕДЕНИЕ

ОБЩИЕ ПОЛОЖЕНИЯ

Проект NICA/MPD (Nuclotron based Ion Collider Facility and Multi Purpose Detector) имеет целью создание ускорительного комплекса для проведения в ОИЯИ исследований в области физики частиц в ранее недоступной области параметров и условий эксперимента. Этот проект является частью семилетней (2009-2016 гг.) научной программы ОИЯИ. Проект одобрен Учёным советом ОИЯИ и принят Комитетом Полномочных Представителей стран-участниц ОИЯИ в 2009 г. В настоящее время проект осуществляется в рамках темы 02-0-1065-2007/2019 «Развитие экспериментальной базы ОИЯИ для получения интенсивных пучков тяжелых ионов и поляризованных ядер с целью поиска смешанной фазы ядерной материи и исследования поляризационных эффектов в области энергий до $\sqrt{s_{NN}} = 11$ ГэВ/н» и является флагманским проектом ОИЯИ.

Экспериментальные исследования фундаментального характера в рамках проекта будут проводиться в следующих областях:

1. Релятивистская ядерная физика — поиск смешанной фазы, фазовых переходов и критических явлений в сильновзаимодействующей барионной материи;
2. Физика спина в области высоких и средних энергий взаимодействующих частиц;
3. Радиобиология.

Прикладные исследования с использованием пучков частиц, получаемых на комплексе NICA, направлены на развитие новых технологий в материаловедении, решение экологических проблем (например, переработка отходов ядерной энергетики), создание новых методов производства энергии (ядерные реакторы, управляемые пучком ускорителя), терапии раковых заболеваний и др.

Образовательная программа, выполняемая в процессе создания и эксплуатации комплекса NICA, имеет целью подготовку высококвалифицированных инженерных и научных кадров для стран участниц ОИЯИ.

Современный ускорительный комплекс, создаваемый в рамках проекта NICA/MPD, обеспечит в долгосрочной перспективе выполнение на передовом мировом уровне программы исследований в области релятивистской ядерной физики, физики спина частиц, радиобиологии, прикладных исследований и подготовки кадров. Ускорительный комплекс является уникальным, по сравнению с другими ускорительными установками в мире, благодаря гибкости при осуществлении многочисленных исследовательских программ, основанных на использовании

пучков заряженных частиц с передовыми параметрами. Основной целью проекта является изучение горячей и плотной сильновзаимодействующей материи в столкновениях тяжелых ионов (вплоть до золота) при энергии в системе центра масс до 11 ГэВ/н.

Проект NICA/MPD может привлечь большое сообщество исследователей, работающих в различных областях науки и создания новых технологий, требующих интенсивных пучков заряженных частиц высокой энергии.

КРАТКАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА ПРОЕКТА

Предусматривается два режима работы комплекса NICA: встречных пучков и пучок, выведенный на неподвижную мишень.

В режиме встречных ионных пучков средняя проектная светимость Коллайдера составляет $10^{27} \text{ см}^{-2} \cdot \text{с}^{-1}$ для $^{197}\text{Au}^{79+}$ и используется детектор MPD. При работе с выведенным пучком Коллайдер NICA не требуется, частицы ускоряются в Нуклотроне до энергии, соответствующей его максимальной жёсткости 45 Тл·м (13 ГэВ для протонов и 4,5 ГэВ/нуклон для ядер золота). В этом случае используется достаточно широкий парк детекторов, в том числе вновь сооружаемый в рамках проекта NICA детектор BM@N (Baryonic Matter at Nuclotron). В проекте NICA планируется также изучение физики спина на выведенных (Нуклотрон) и встречных (Коллайдер) пучках поляризованных протонов и дейтронов. В последнем случае полная энергия двух сталкивающихся протонов достигает 27 ГэВ. Предложенная программа исследований позволяет провести поиск фазовых переходов и изучение критических явлений в барионной материи, а также прояснить проблему структуры спина нуклонов.

Первой научной задачей проекта NICA/MPD является исследование фазовой диаграммы сильно сжатой барионной материи.

Такая материя существует в нейтронных звёздах и ядрах сверхновых звёзд, в то время как на ранних стадиях существования Вселенной наблюдалась обратная картина: очень высокая температура и исчезающе-малая барионная плотность. В лабораторных условиях материя с высокой плотностью может быть создана в некотором объёме при столкновении тяжелых ионов. В таких столкновениях большая часть энергии пучка расходуется на возникновение новых адронов и возбуждение резонансов, свойства которых могут быть заметно модифицированы окружающей горячей и плотной средой. При очень высоких температурах или плотностях эта смесь адронов разбивается на составные части — кварки и глюоны, образуя новое агрегатное состояние материи — кварк-глюонную плазму.

В ранних экспериментах с тяжёлыми ионами на SPS (эксперимент NA49) в ЦЕРН и на коллайдере RHIC в Брукхэйвенской лаборатории исследовалась область высокой температуры и малой барионной плотности, где были получены определённые указания на существование нового состояния материи при температурах $160 \div 170$ МэВ. Ещё более высокие температуры достигаются в начавшихся исследованиях на LHC (встречные пучки ионов свинца). При меньших температурах и умеренной барионной плотности в экспериментах на синхротроне SIS-18 в GSI (Дармштадт) уверенно продемонстрировано отсутствие фазовых переходов, однако зафиксированы эффекты модификации свойств материи, вызванные действием среды. При очень высокой плотности и низкой температуре теоретически предсказано освобождение кварков с образованием коррелированных пар кварк-антикварк, формирующих «цветную» сверхпроводящую фазу. Такая фаза может возникать во внутренних областях нейтронных звёзд. В то же время, позднее в экспериментах NA49 при снижении энергии ионов до, примерно, 30 ГэВ/н было получено существенное указание на то, что система переходит в новое состояние.

В 2005-2006 гг. появились теоретические указания на необходимость исследований в области промежуточных значений температуры и плотности. В 2006 г. в ОИЯИ был предложен проект NICA/MPD, ориентированный на достижение этой области параметров материи. Важность таких исследований была вскоре понята в GSI, где была начата подготовка к эксперименту CBM (Compressed Baryon Matter) в рамках международного проекта FAIR, а также в Брукхэйвенской лаборатории, где начались эксперименты на пониженной энергии ионов золота. Правда, при этом резко снизилась светимость коллайдера RHIC, что не позволило пока получить сколько-нибудь значительные физические результаты.

Изучение структуры спина нуклонов является одной из важнейших задач современной физики частиц. Эта проблема остаётся одной из самых интригующих загадок в физике высоких энергий со времени знаменитого «спинового кризиса» 1987 г. Ядром этой проблемы, в течение многих лет привлекающей внимание как теоретиков, так и экспериментаторов, является ответ на вопрос: каким образом спин протона строится из спинов и орбитальных моментов составляющих его частиц? Исследования привели к формулировке Концепции Функций Распределения Партонов (Parton Distribution Functions — PDF) в нуклоне. Сейчас нам известно, что должно быть примерно 50 различных PDF для полного описания структуры нуклона. Часть из них считается достаточно хорошо известной, тогда как остальные либо абсолютно неизвестны, либо известны очень приблизительно, в особенности спин-зависимые PDF.

Эксперименты на фиксированных мишенях, осуществляемые (вплоть до 2002 г.) на Синхрофазотроне, а в настоящее время на Нуклотроне, являются частью долгосрочной исследовательской программы ЛФВЭ им. Векслера и Балдина. Эта программа будет продолжена на

пучках модернизированного Нуклотрона для решения тех же задач, что и предложенные для проектов NICA/MPD и SPD, но в области меньших энергий. Таким образом, эти исследования станут дополнительными к проводимым на Коллайдере NICA. Пучки Нуклотрона используются также для тестирования элементов детекторов MPD и SPD.

Новый ускорительный комплекс NICA будет обеспечивать пучки различных частиц с широким спектром параметров. Это позволит осуществлять как прикладные, так и фундаментальные исследования в различных областях науки и технологии. Среди них можно выделить следующие:

- радиобиология и космическая медицина;
- терапия раковых заболеваний;
- развитие реакторов, управляемых пучком ускорителя («производство энергии» с подкритичной сборкой), и технологий трансмутации отходов ядерной энергетики;
- тестирование радиационной стойкости электронных устройств.

Программа подготовки квалифицированных кадров для стран-участниц является направлением первого приоритета в деятельности ОИЯИ, что сформулировано в дорожной карте развития института. Предложенный комплекс NICA открывает широкие возможности для обучения и квалификационных работ, включая практическую работу на экспериментальных установках и стендах, подготовку дипломов, кандидатских и докторских диссертаций.

Ускорительный комплекс NICA будет сооружён на рабочей площадке ЛФВЭ, в состав комплекса войдёт модернизированный синхротрон Нуклотрон. Его модернизация будет завершена в рамках проекта Нуклотрон-NICA.

Проект NICA/MPD является флагманским проектом ОИЯИ и выполняется в рамках широкой международной коллаборации. В её составе как институты стран-участниц ОИЯИ, так и других государств.

В разработке проекта NICA/MPD существенно используются технологии, созданные в лабораториях, связанных с развитием ускорителей и детекторов частиц, таких как ИЯФ им. Будкера СО РАН, ИЯИ РАН, НИЦ КИ, ИТЭФ, ИФВЭ, ЦЕРН, BNL, GSI, Fermilab и др.

Проект NICA/MPD представляет собой долгосрочную программу ОИЯИ в физике высоких энергий и разрабатывается с учётом максимальной надёжности, гибкости в режимах работы с существенным потенциалом дальнейшего развития.

Программа физических исследований будет выполнена в ходе трёх последовательных этапов:

- На первом этапе работы будет осуществлён режим столкновений ионов одинакового сорта в обоих кольцах Коллайдера.
- Второй этап потребует модернизации участков взаимодействия пучков для осуществления столкновения ионов разного сорта при одинаковой энергии на нуклон в обоих кольцах Коллайдера (при этом магнитная жёсткость в кольцах Коллайдера будет иметь не одинаковую величину).
- Программа по изучению физики спина будет выполняться в ходе третьего этапа работы Коллайдера, когда в кольцах будут установлены необходимые устройства для управления спином частиц и диагностики.

Сооружение проекта подразумевает соответствующее развитие криогенного комплекса ЛФВЭ, создание современной системы управления и синхронизации, развитие инфраструктуры ЛФВЭ.

Сооружение нового ускорительного комплекса осуществляется без прекращения текущей программы исследований на пучках Нуклотрона.

Предусматривается, что инжекционный комплекс NICA, Бустер и Нуклотрон будут предоставлять пучки ионов различного сорта с энергией от 3 МэВ/н до 4,5 ГэВ/н для различных исследований в радиобиологии, медицине, ядерных технологиях, материаловедении и др.

Данный Технический Проект подготовлен в рамках работы по проекту «Нуклотрон-NICA», реализуемого в соответствии с темой 02-0-1065-2007/2019 тематического плана ОИЯИ. Основой для разработки Технического Проекта является «Паспорт ускорительного комплекса NICA», утверждённый в ОИЯИ в 2015 г. «Паспорт ускорительного комплекса NICA» (см. Приложение 1.1) содержит описание задач проекта, структуры ускорительного комплекса и перечень основных технических параметров его элементов и систем.

Глава 1

Общее описание ускорительного комплекса NICA

АННОТАЦИЯ

Целью проекта NICA/MPD (Nuclotron based Ion Collider fAcility and Multi Purpose Detector) является создание ускорительного комплекса, предназначенного для выполнения в ОИЯИ программы исследований по физике частиц на передовом уровне. Эксперименты будут проводиться на фиксированных мишенях с использованием пучков Нуклотрона при кинетической энергии вплоть до максимальной проектной (4,5 ГэВ/н для $^{197}\text{Au}^{79+}$) и в режиме сталкивающихся пучков тяжёлых ионов с энергией в системе центра масс $\sqrt{s_{\text{NN}}} = 4 \div 11$ ГэВ/н при средней светимости $L = 10^{27} \text{ см}^{-2}\cdot\text{с}^{-1}$. Для Коллайдерного эксперимента предложен Многоцелевой детектор (MPD). Ещё одной целью проекта NICA является проведение экспериментальных исследований по физике спина на встречных поляризованных пучках протонов и лёгких ядер. В данной главе технического проекта дано общее описание структуры комплекса и краткая характеристика его основных элементов и систем. Кроме того, представлен статус работ по созданию комплекса по состоянию на май 2015 г. и планы по срокам реализации проекта. Концепция достижения проектной средней светимости при столкновениях тяжёлых ионов представлена в Приложении 1.2 к настоящему тому.

1.1 ПРОЕКТ НУКЛОТРОН-NICA

Создание ускорительного комплекса NICA осуществляется в рамках проекта Нуклотрон-NICA, выполняемого в соответствии с темой 02-0-1065-2007/2019 тематического плана ОИЯИ. Проект был начат в 2011 г. На первые пять лет реализации проекта были поставлены следующие основные задачи:

- создать инжекционную цепочку Коллайдера;
- существенно улучшить возможности ускорительного комплекса для проведения экспериментов на фиксированной мишени;
- провести НИОКР по системам и элементам Коллайдера;
- определить оптимальное размещение Коллайдера на площадке ЛФВЭ;
- разработать проект зданий Коллайдера и канала транспортировки пучка и представить его на Государственную экспертизу;
- завершить технический проект Коллайдера;
- осуществить необходимое развитие инфраструктуры.

В период с 2011 по 2015 гг. были получены следующие основные результаты:

- завершено сооружение нового источника тяжёлых ионов КРИОН-6Т, источник был протестирован на стенде в 50-м сеансе Нуклотрона для ускорения тяжёлых ионов;

- завершено сооружение источника поляризованных пучков, источник подготовлен к работе в составе ускорительного комплекса;
- изготовлен линейный ускоритель с пространственно-однородной фокусировкой, предназначенный для замены высоковольтного форинжектора ЛУ-20;
- проведён ремонт помещения для размещения ускорителя HILAC;
- HILAC изготовлен и доставлен в ОИЯИ;
- создана линия (1-е плечо) по производству и тестированию сверхпроводящих магнитов;
- изготовлены и протестированы пред-серийные варианты магнитов Бустера, начато серийное производство магнитов;
- высокочастотная система Бустера, изготовленная в ИЯФ им. Будкера, перевезена и протестирована в ОИЯИ;
- начато изготовление системы электронного охлаждения Бустера;
- завершено техническое проектирование основных систем Бустера;
- проведено 10 сеансов (№ 42-51) сеансов работы Нуклотрона: возможности комплекса по реализации текущей физической программы существенно расширены, достигнута максимальная проектная энергия пучка;
- завершено техническое проектирование Коллайдера;
- технический проект зданий для размещения Коллайдера и каналов транспортировки пучков разработан специализированным проектным предприятием и прошёл Государственную экспертизу;
- начаты строительные работы по сооружению здания Коллайдера;
- элементы системы стохастического охлаждения Коллайдера успешно протестированы на Нуклотроне;
- определена стартовая конфигурация оборудования Коллайдера;
- начаты НИОКР по системам и элементам Коллайдера, входящим в стартовую конфигурацию.

Целями проекта Нуклотрон-NICA на ближайшие 5 лет являются:

- завершение сооружения ускорительного комплекса;
- начало проведения эксперимента BM@N (Baryonic Matter at Nuclotron);
- ввод в действие ускорительного комплекса NICA и детектора MPD в стартовой версии.

Развитие ускорительного комплекса ЛФВЭ производится без прекращения программы физических исследований на пучках Нуклотрона.

1.2 СТРУКТУРА УСКОРИТЕЛЬНОГО КОМПЛЕКСА NICA

Новый ускорительный комплекс NICA призван обеспечить проведение экспериментов в следующих режимах:

1. Пучок ионов из Нуклотрона, выведенный на фиксированную мишень;
2. Встречные пучки ионов в Коллайдере в интервале кинетических энергий $1 \div 4,5$ ГэВ/н;
3. Встречные протон-ионные пучки в том же интервале энергий;
4. Встречные пучки поляризованных протонов ($5 \div 12,6$ ГэВ) и дейтронов ($2 \div 5,8$ ГэВ/н).

Комплекс NICA включает в себя следующие основные элементы [1.1]:

- инжекционный комплекс;
- сверхпроводящий синхротрон — Бустер;
- существующий сверхпроводящий синхротрон Нуклотрон;
- Коллайдер, состоящий из двух сверхпроводящих колец с двумя точками встречи пучков;
- каналы транспортировки пучков.

Кроме того, в число задач проекта входит создание системы управления комплексом ускорителей, развитие криогенного комплекса и инфраструктуры лаборатории.

Сооружение ускорительного комплекса и реализация его физической программы разделено на следующие этапы:

- Развитие ускорительного комплекса и проведение экспериментов на фиксированной мишени.
- Сооружение Коллайдера и его эксплуатация в режиме встречных пучков ионов одного и того же сорта.
- Модернизация участка встречи пучков с целью осуществления режима столкновения ионов разного сорта с одной и той же энергией в обоих кольцах (в этом случае магнитная жёсткость колец Коллайдера различна).
- Оборудование колец Коллайдера устройствами управления спиновым движением частиц и диагностикой поляризованных пучков, проведение экспериментов по физике спина на встречных пучках поляризованных частиц.

Основными ускорительными установками комплекса NICA (см. Рис. 1.2.1) являются — инжекционный комплекс, Бустер, модернизированный Нуклотрон и два накопительных кольца с двумя точками встречи пучка.

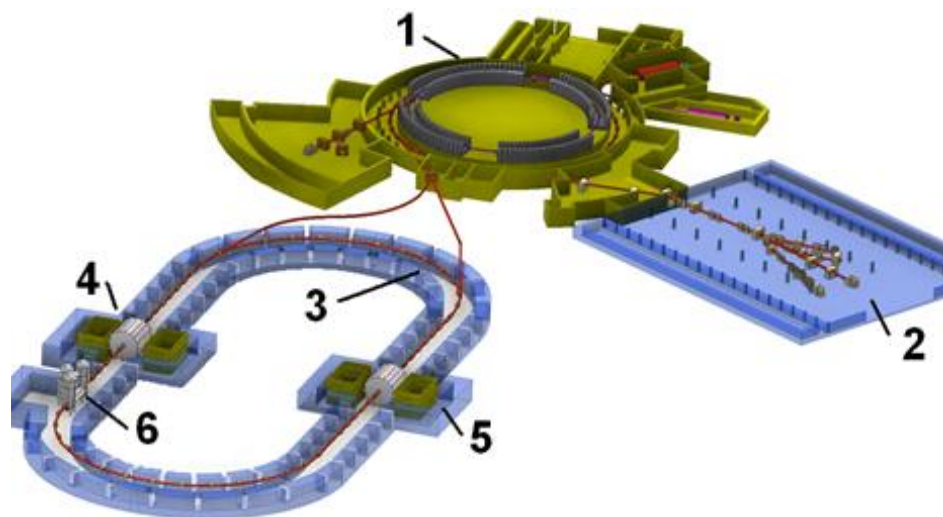


Рис. 1.2.1. Схематическое изображение расположения элементов комплекса NICA: 1 — инжекционный комплекс, Бустер и Нуклотрон, 2 — существующее здание для экспериментов на фиксированной мишени, 3 — Коллайдер, 4, 5 — MPD и SPD детекторы, 6 — система электронного охлаждения Коллайдера

Инжекционный комплекс обеспечивает широкий набор тяжёлых ионов, вплоть до Au, при энергии 3,3 МэВ/н и с интенсивностью до $2 \cdot 10^9$ частиц за импульс. Он включает также источник поляризованных ионов SPI (Source of Polarized Ions) с линейным ускорителем лёгких ионов на энергии 5 МэВ/н, который используется для инъекции в Нуклотрон пучков поляризованных дейтронов и протонов (энергия протонного пучка 20 МэВ/н), с последующим переводом в Коллайдер пучка, ускоренного в Нуклотроне.

Бустер предназначен для ускорения тяжёлых ионов до энергии 600 МэВ/н. Магнитная структура Бустера с периметром 211 м размещается в окне ярма магнита Синхрофазотрона. Модернизированный Нуклотрон ускоряет протонные и дейтронные пучки (включая поляризованные) и ионы до максимальной энергии 5,8 ГэВ/н ($Z/A = 1/2$), 3,3 ГэВ/н для $Z/A = 1/3$ (например, Xe с $A = 124$, $Z = 42$), и 4,5 ГэВ/н для ядер золота. Перед инъекцией в Нуклотрон ионы полностью обдираются на мишени, установленной в канале транспортировки пучка из Бустера в Нуклотрон.

Коллайдер представляет собой два накопительных кольца с двумя точками встречи пучков (IP — interaction point) со следующими основными параметрами: $B\rho = 45$ Тл·м; давление остаточного газа в пучковой камере 10^{-11} Торр; максимальное поле дипольных магнитов 1,8 Тл; кинетическая энергия для ядер золота в интервале от 1 до 4,5 ГэВ/н; на участке встречи пучков их оси совпадают (нулевой угол встречи); средняя светимость 10^{27} см⁻²·с⁻¹ для ионов золота при $\sqrt{s_{NN}} = 11$ ГэВ/н. Кольца Коллайдера имеют форму беговой дорожки с периметром 503,04 м (удвоенный периметр Нуклотрона), магнитная фокусирующая система создаётся из двухапертурных (одна апертура над другой) магнитов Нуклотронного типа — дипольных и квадрупольных.

1.3 ИНЖЕКЦИОННЫЙ КОМПЛЕКС

Структура инжекционного комплекса состоит из следующих элементов:

- криогенный источник тяжёлых ионов электронно-струнного типа КРИОН [1.2];
- лазерный источник;
- дуоплазматрон;
- источник поляризованных протонов и дейтронов [1.3];
- модернизированный линейный ускоритель ЛУ-20 (существующий);
- новый тяжёлоионный линейный ускоритель (НЛАС);
- каналы транспортировки пучков.

Все источники частиц (Таблица 1.3.1, Рис. 1.3.1-1.3.3) располагаются на изолированных платформах под потенциалом 150 кВ для обеспечения инжекции в линейные ускорители (Таблица 1.3.2).

Таблица 1.3.1. Параметры источников частиц инжекционного комплекса NICA

Источник	КРИОН-6Т	Лазерный источник	Дуоплазматрон	SPI
Сорт частиц	Au ³¹⁺	Легкие ионы до Mg ¹⁰⁺	H ⁺ , D ⁺ , He ²⁺	H ⁺ ↑, D ⁺ ↑
Частиц за цикл	~ 2,5·10 ⁹	~ 10 ¹¹	H ⁺ , D ⁺ ~ 5·10 ¹² He ²⁺ ~ 10 ¹¹	5·10 ¹¹
Частота повторения, Гц	10 (3 импульса за 5 с)	0,5	1	0,2

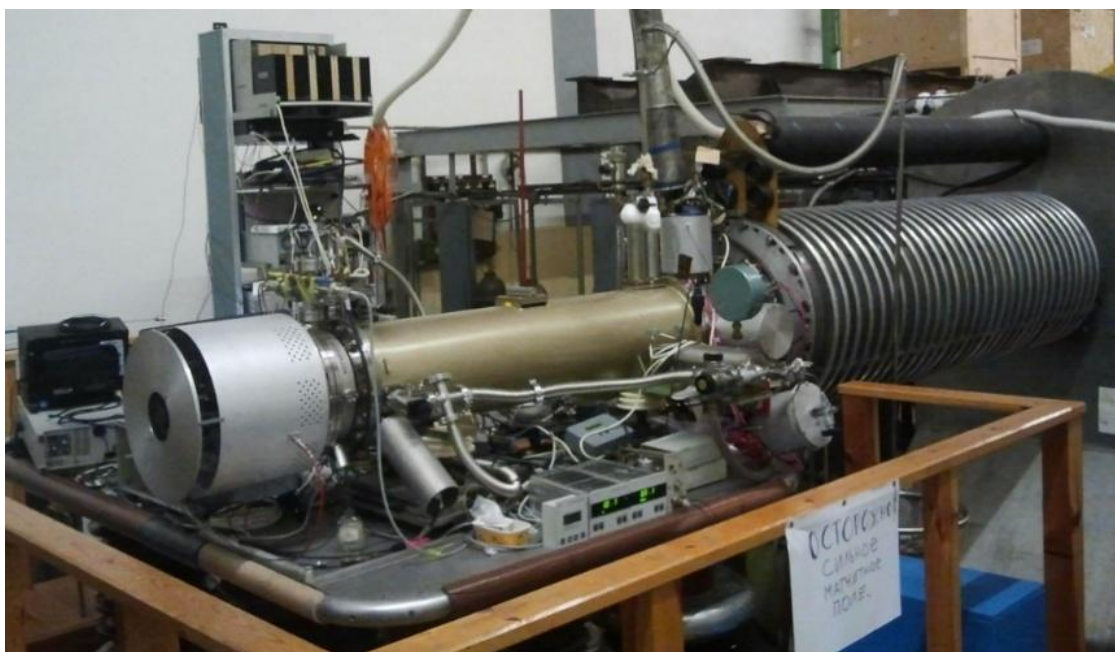


Рис. 1.3.1. КРИОН-6Т на высоковольтной платформе ЛУ-20 (Сеанс Нуклотрона № 50)



Рис. 1.3.2. Новый лазерный источник на выходе ЛУ-20: Nd:YAG лазер и его источник питания (слева), мишенная станция на высоковольтной платформе



Рис. 1.3.3. SPI на испытательном стенде в ОИЯИ

Таблица 1.3.2. Параметры линейных ускорителей инжекционного комплекса NICA

Ускоритель	ЛУ-20	HILAC
Ускоряющая структура (количество секций)	RFQ + Alvarez type	RFQ (1) + IH DTL (2)
Отношение массы к заряду A/Z	$1 \div 3$	$1 \div 6$
Энергия инжекции, кэВ/н	150 для $A/Z = 1 \div 3$	17
Конечная энергия, МэВ/н	5 ($A/Z = 1 \div 3$)	3,24 ($A/Z = 6$)
Ток инжекции, мА	до 20	до 10
Токопрохождение, %	50	90
Рабочая частота, МГц	145	100,625
Длина, м	22	11
Акцептанс, π -мм·мрад	220	88
Эмиттанс ускоренного пучка (эффективный), π -мм·мрад	40	10

Инжекционный комплекс состоит из двух независимых частей:

1. Инжектор лёгких ионов;
2. Инжектор тяжёлых ионов.

Инжектор лёгких ионов включает в себя источники (лазерный, дуоплазматрон, источник поляризованных протонов и дейтронов), модернизированный ускоритель ЛУ-20 (Рис. 1.3.4) и существующий канал транспортировки пучков в Нуклотрон. Инжектор тяжёлых ионов состоит из источника КРИОН, HILAC (Рис. 1.3.5) и двух каналов транспортировки пучков (Таблица 1.3.3). Первый из них — канал транспортировки частиц низкой энергии (LEBT — Low Energy Beam Transport) поставляет пучок из источника КРИОН на вход HILAC. Канал транспортировки пучка от HILAC до Бустера собирается с использованием дипольных и квадрупольных магнитов ускорителя Amps, перевезённых в ОИЯИ. Система диагностики пучка в канале разрабатывается совместно с ИЯИ РАН.

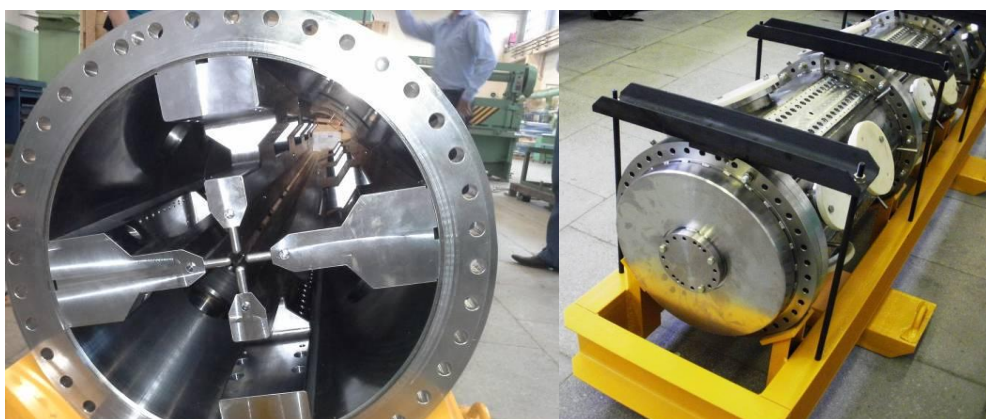


Рис. 1.3.4. Резонатор RFQ, предназначенный для модернизации ЛУ-20 (слева), транспортировка резонатора из Снежинска в Москву (справа)



Рис. 1.3.5. Зал и платформа, предназначенные для размещения ускорителя HILAC (слева), секция RFQ ускорителя HILAC в процессе сборки в ОИЯИ

Таблица 1.3.3. Параметры каналов транспортировки пучков инжекционного комплекса NICA

Канал транспортировки пучка	LEBT	HILAC — Бустер
Длина, м	1,8	15,5
Состав канала	2 соленида; 2D корректор; 2 фокусирующих электрода; 1 ускоряющая трубка (форинжектор)	2 диполя; 10 квадрупольей; 1 дебанчер; 1 дефлектор; корректоры; диагностика пучка
Сорт ионов	Au ³¹⁺ и несколько зарядовых состояний	Au ³⁰⁺ , Au ³¹⁺ , Au ³²⁺ (на входе); Au ³¹⁺ (на выходе)
Энергия ионов, кэВ/н	1,6 (на входе); 17 (на выходе)	3200
Интенсивность пучка	~ 2,3·10 ⁹ (Au ³¹⁺); до 1,5·10 ¹⁰ (полная)	~ 2,1·10 ⁹ (Au ³¹⁺); до 6·10 ⁹ (полная)
Токопрохождение, %	90	95
Выходной эмиттанс (эффективный), π·мм·мрад	до 70	15

Завершение ввода в эксплуатацию RFQ для ЛУ-20 и первый сеанс Нуклотрона с новым источником поляризованных частиц планируется в начале 2016 г. Ввод в эксплуатацию ускорителя HILAC (первоначально с ускорением лёгких ионов) намечено так же на начало 2016 г., начало эксплуатации ускорителя HILAC с тяжёлыми ионами — на 2016 г. Канал транспортировки из HILAC в Бустер будет сооружён в 2017 г. и введён в действие к моменту запуска Бустера.

1.4 БУСТЕРНЫЙ СИНХРОТРОН

Основными задачами Бустера (Таблица 1.4.1) являются:

- накопление $2 \cdot 10^9$ ионов $^{197}\text{Au}^{31+}$;
- ускорение тяжёлых ионов до энергии, требуемой для эффективной обдирки;
- формирование требуемого фазового объёма пучка с использованием системы электронного охлаждения;
- быстрый вывод ускоренного пучка для его инжекции в Нуклотрон.

Бустер с периметром 211 м и структурой из четырёх периодов (Рис. 1.4.1, 1.4.2) размещается внутри ярма магнита Синхрофазотрона. Длительность рабочего цикла Бустера составляет 4,02 с (Рис. 1.4.3). При необходимости возможна технологическая пауза между циклами длительностью 1 с.

Система электронного охлаждения Бустера, предназначенная для формирования требуемой величины фазового объёма пучка, имеет максимальную энергию электронов 60 кэВ.

Таблица 1.4.1. Параметры структуры Бустера

Количество супер-периодов	4
Количество DFO ячеек в арке	6
Количество длинных прямолинейных секций	4
Длина большой прямолинейной секции, м	7
Длины малых прямолинейных секций, м	0,7/0,85/0,95
Бетатронные числа	4,8/4,85
Амплитуда β -функций, м	13,3
Максимум дисперсионной функции, м	4,4
Лоренц-фактор, соответствующий критической энергии, γ_{tr}	4,487
Хроматичность	-5,1/-5,5
Горизонтальный акцептанс, π мм·мрад	150
Вертикальный акцептанс, π мм·мрад	57

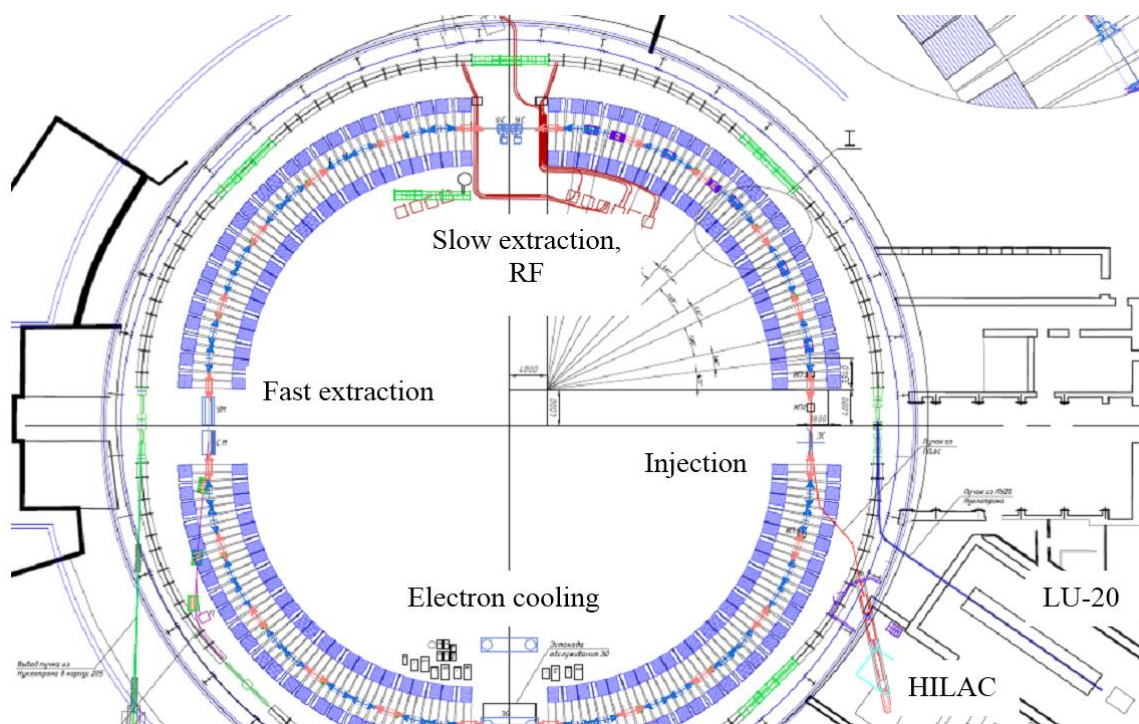


Рис. 1.4.1. Размещение Бустера

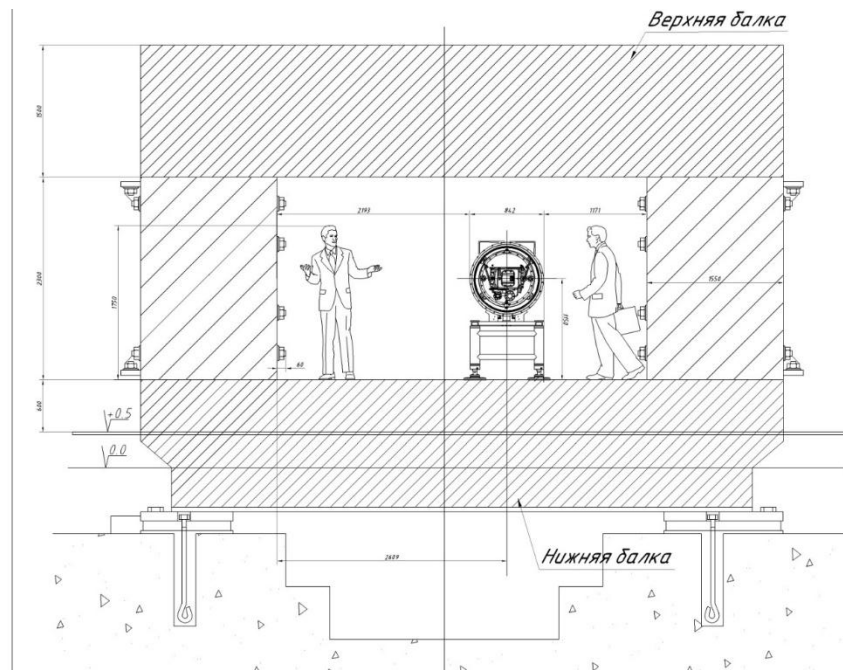


Рис. 1.4.2. Положение магнитов Бустера внутри яма магнита Синхрофазотрона

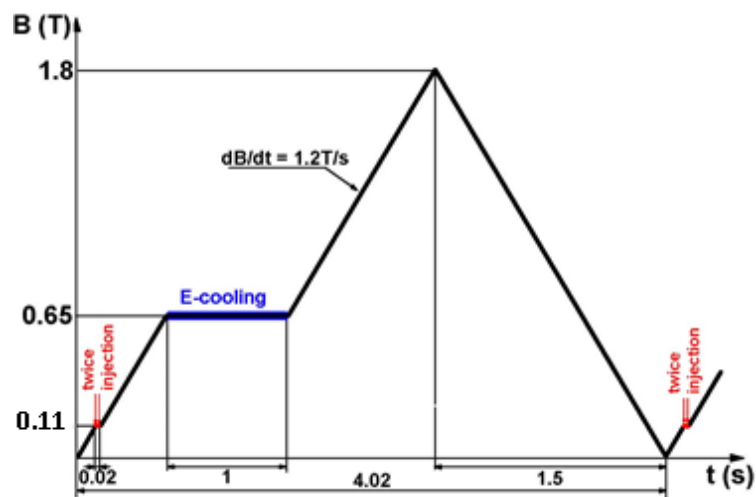


Рис. 1.4.3. Диаграмма рабочего цикла Бустера при ускорении тяжёлых ионов

Ускоряющие станции Бустера разработаны и изготовлены в ИЯФ им Г.И. Будкера (г. Новосибирск), доставлены в ОИЯИ и испытаны на стенде с имитатором цикла магнитного поля в 2014 г. Система электронного охлаждения разработана и изготавливается там же. Сборка системы и её испытание без Бустера в ОИЯИ намечена на 2016 г. Серийное производство магнитов Бустера планируется завершить в 2016 г. Монтаж Бустера будет начат по мере поступления магнитов и других элементов. Запуск Бустера намечен на конец 2017 г.

1.5 НУКЛОТРОН

Сверхпроводящий синхротрон Нуклотрон (Таблица 1.5.1 и Рис. 1.5.1, [1.4]) предназначен для работы в трёх основных режимах:

1. Ускорение тяжёлых ионов для инъекции в Коллайдер.
2. Ускорение пучков поляризованных протонов и дейтронов для инъекции в Коллайдер.
3. Ускорение протонов, дейтронов (поляризованных и неполяризованных) и тяжёлых ионов для экспериментов на внутренней мишени или медленного вывода для экспериментов на фиксированных мишенях.

В первом режиме Нуклотрон работает как элемент инжекционной цепочки Коллайдера и предназначен для ускорения одиночного сгустка полностью ободранных тяжёлых ионов (Au^{79+} , Pb^{82+} или U^{92+}) от кинетической энергии 0,6 до $1 \div 4,5$ ГэВ/н (Таблица 1.5.1). Требуемая интенсивность сгустка составляет примерно $1 \div 1,5 \cdot 10^9$ ионов. Потери частиц в процессе ускорения не превышают 10%. Темп роста поворотного поля магнитов ≥ 1 Тл/с.

Во втором режиме Нуклотрон будет использоваться для ускорения поляризованных протонов от 20 МэВ до 12 ГэВ, и поляризованных дейтронов от 5 МэВ/н до 5,6 ГэВ/н. Интенсивность сгустка в этом случае должна составлять несколько единиц на 10^{10} частиц.

В третьем режиме Нуклотрон работает аналогично первому или второму режиму (в зависимости от сорта ускоряемых частиц) с последующим медленным выводом пучка для экспериментов на фиксированной мишени, вместо перевода пучка в Коллайдер.

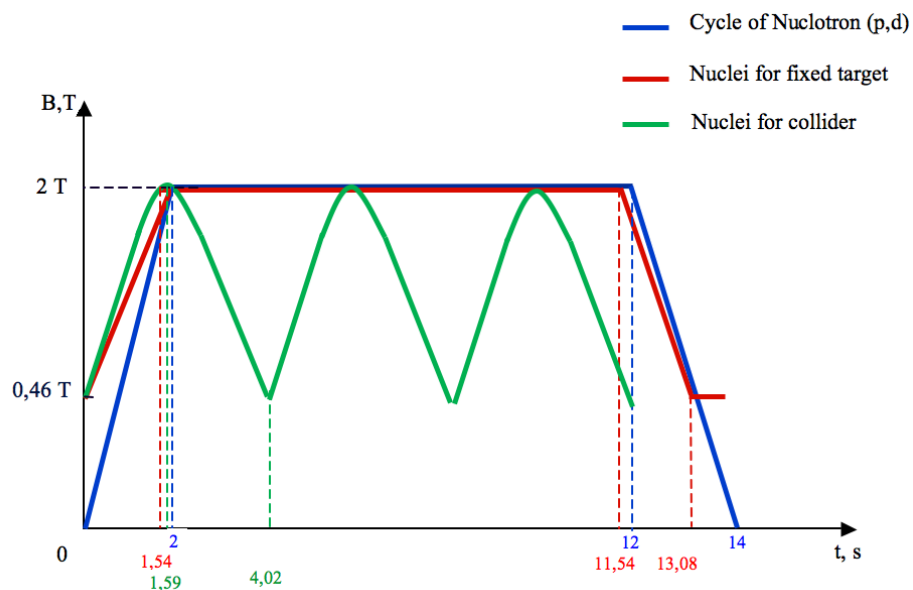


Рис. 1.5.1. Рабочий цикл Нуклотрона

Таблица 1.5.1. Параметры пучков и ВЧ системы Нуклотрона при ускорении тяжёлых ядер Au^{79+}

Параметр	Инжекция	Ускорение	Вывод
Время, с	0,0	1,55	1,59
Поле диполей, Тл	0,46	2,01	2,03
Амплитуда ВЧ, кВ	8,5	8,5	0,2
Частота ВЧ, кГц	947	1173,8	1174,3
Синхронная фаза, град.	41	41	0
Кинетическая энергия ионов, ГэВ/н	0,6	4,35	4,38
Количество сгустков	1	1	1
Среднеквадратичная длина сгустка, м	5,8	2,0	3,4
Разброс по энергии, МэВ	30	112	71
Разброс ионов по импульсу, $\Delta p/p$ ($\pm 2 \sigma$)	$\pm 3,2 \cdot 10^{-4}$	$\pm 2,2 \cdot 10^{-4}$	$\pm 1,4 \cdot 10^{-4}$
Размер сепаратрисы в единицах $\Delta p/p$	$\pm 1,1 \cdot 10^{-3}$	$\pm 2,6 \cdot 10^{-3}$	$\pm 7,8 \cdot 10^{-4}$
Синхротронное число	$3,9 \cdot 10^{-4}$	$3,6 \cdot 10^{-5}$	$6,6 \cdot 10^{-6}$

Оба синхротрона комплекса NICA (Таблица 1.5.2) при работе на накопление пучков в Коллайдере синхронизованы для обеспечения оптимального темпа накопления (Рис. 1.4.3 и 1.5.1).

Таблица 1.5.2. Основные параметры синхротронов комплекса NICA

Параметр	Бустер	Нуклотрон
Тип	СП синхротрон	СП синхротрон
Частицы	ионы $A/Z \leq 6$	p^+ , d^+ , ядра
Энергия инжекции, МэВ/н	3,2	5 (p^+ , d^+), 570 ÷ 685 (ядра золота)
Максимальная энергия, ГэВ/н	0,6	12,07 (p^+), 5,62 (d^+), 4,38 (ядра золота)
Магнитная жёсткость, Тл·м	1,6 ÷ 25,0	25 ÷ 43,25
Периметр, м	210,96	251,52
Число супер-периодов	4	8
Периодичность квадрупольей	24	32
Бетатронные числа	4,8/4,85	7,4
Длительность цикла в режиме инжекции в Коллайдер, с	4,02 (активная); 5 (полная)	1,5 ÷ 4,2 (активная); 5 (полная)
Ведущее магнитное поле, Тл	0,11 ÷ 1,8	0,03 ÷ 2,03 (p^+ , d^+) 0,46 ÷ 2,03 (ядра)
Радиус поворота, м	14	21,68 ÷ 21,31
Темп роста поля, Тл/с	1,2	1,0
Тип инжекции	однооборотная; многооборотная; многократная однооборотная	однооборотная
Тип вывода	однооборотный	однооборотный, медленный
Давление остаточного газа, Торр	10^{-11}	10^{-9}
Интенсивность пучка Au, ионов/импульс	$1,5 \cdot 10^9$	$1 \cdot 10^9$
Критическая энергия, ГэВ/н	3,25	7,0
Диапазон частоты ускоряющего поля, МГц	0,5 ÷ 2,53	0,6 ÷ 6,9 (p^+ , d^+) 0,947 ÷ 1,147 (ядра)
Кратность ускорения	5 (при инжекции) 1 (после охлаждения)	5 (p^+ , d^+) 1 (ядра)
Хроматичность гориз./верт.	-5,1/-5,5	-7,8/-10,0
Длительность растяжки при медленном выводе, с	–	до 10

Для обеспечения надёжной и безопасной работы Нуклотрона в полном интервале энергий необходимо выполнить следующие работы:

- замена мощных тоководов на новые;
- изготовление и установка нового электростатического септума системы медленного вывода;
- перемещение одной из ускоряющих станций из 6-ого прямолинейного промежутка Нуклотрона в 3-ий;
- изготовление и установка элементов системы инжекции пучка из Бустера;
- изготовление и установка элементов системы быстрого вывода пучка в Коллайдер.

Эти работы будут последовательно выполнены в период с 2016 по 2018 гг.

1.6 КОЛЛАЙДЕР

Коллайдер будет сооружён в отдельном здании с туннелем для магнитной структуры, двумя павильонами для детекторов и павильоном для системы электронного охлаждения (СЭО) (Рис. 1.2.1 и Рис. 1.6.1).

При работе на эксперимент энергия частиц в Коллайдере постоянна. Для подготовки пучков предусмотрена возможность относительно медленного доускорения или замедления. Для обеспечения требуемой линейности поля максимальная величина поворотного поля в диполях выбрана равной 1,8 Тл.

Два кольца Коллайдера расположены одно над другим, сведение и разведение пучков осуществляется в вертикальной плоскости. Расстояние между медианными плоскостями колец составляет 32 см. Дипольные и квадрупольные магниты имеют по две апертуры в общем ярме. Конструкция магнитов позволяет независимую регулировку поля в каждом из двух колец.

Каждое кольцо имеет форму беговой дорожки с двумя арками и двумя длинными прямолинейными секциями. Минимальное значение бета-функции в точках встречи составляет 35 см. Акцептанс кольца ограничен апертурой линз финального фокуса и составляет не менее 40 π -мм-мрад. Среднеквадратичная длина сгустка в режиме столкновений выбрана равной 60 см. Расстояние между соседними сгустками составляет не менее 21 м, что исключает паразитные столкновения на общем участке траекторий частиц.

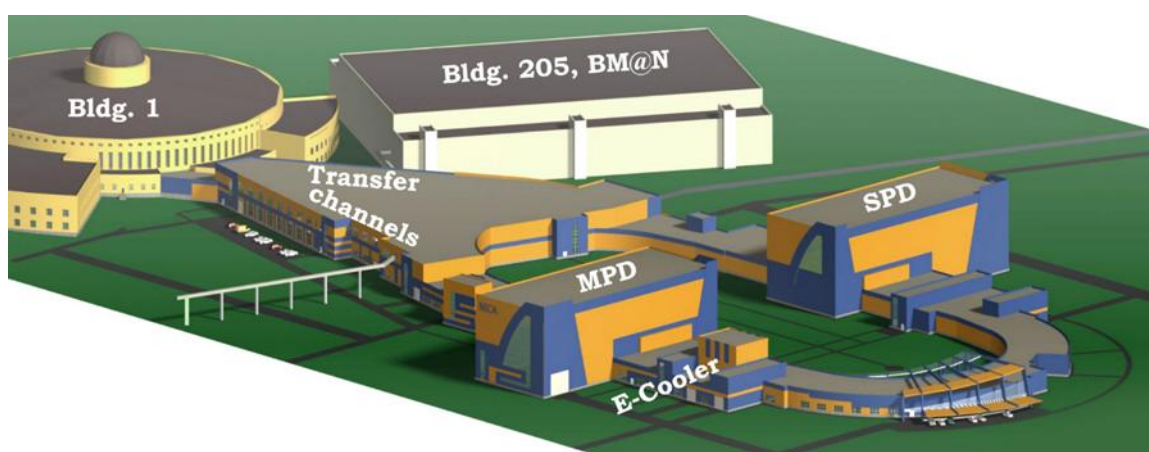


Рис. 1.6.1. Размещение комплекса NICA на территории ЛФВЭ ОИЯИ

Оптическая структура арок содержит 12 регулярных ячеек со структурой типа FODO (Рис. 1.6.2). Возможность достижения проектной светимости на примере параметров сгустков, оптимизированных для режима работы с ядрами $^{197}\text{Au}^{79+}$, показана в Таблица 1.6.1. Состав

оборудования, размещённого в кольце в режиме работы с тяжёлыми ионами, приведён на Рис. 1.6.3.

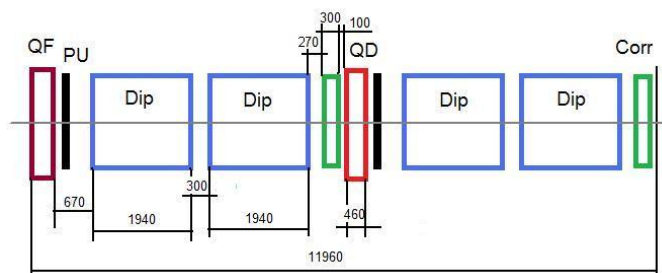


Рис. 1.6.2. Схема периодической ячейки типа ФОДО: QF, QD — фокусирующие и дефокусирующие квадрупольные магниты, Dip — дипольные магниты, PU — пикап станции, Corr — блок корректирующих обмоток

Для обеспечения накопления пучков и формирования коротких сгустков в Коллайдере используются 3 независимые ВЧ системы (Таблица 1.6.2):

1. ВЧ система барьерных напряжений (RF1) с амплитудой напряжения до 5 кВ, обеспечивающая накопление пучка требуемой интенсивности.
2. Первая узкополосная ВЧ система (RF2), работающая на гармонике, равной количеству сгустков, которая обеспечивает группировку пучка и сжатие сгустков. Максимальная амплитуда напряжения для этой системы составляет 100 кВ.
3. Вторая узкополосная ВЧ система (RF3), работающая на гармонике втрое большей, чем первая, которая обеспечивает сжатие сгустков до проектной длины, необходимой при столкновениях пучков. Максимальная амплитуда напряжения этой системы составляет 1 МВ.

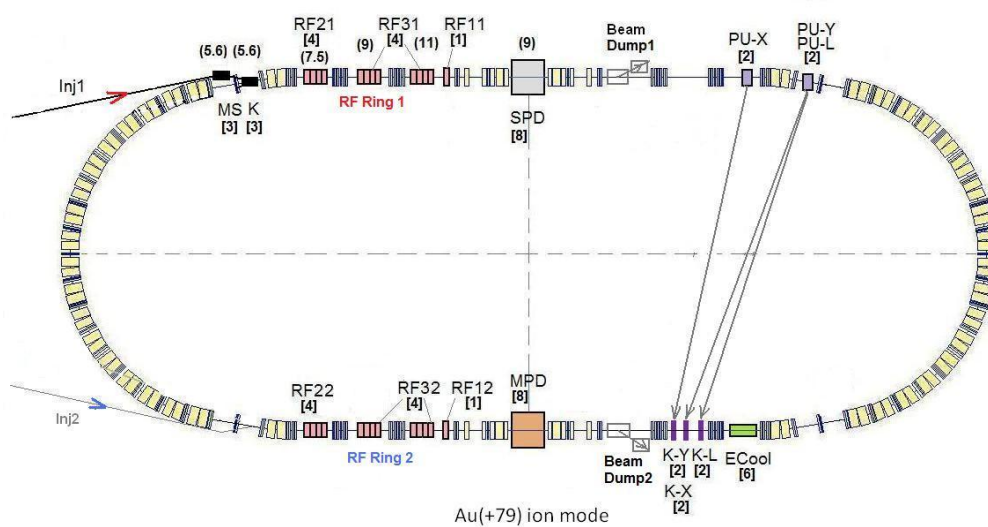


Рис. 1.6.3. Схема кольца Коллайдера с включённым оборудованием. Описание в тесте ниже

Таблица 1.6.1. Параметры оптической структуры Коллайдера и пучков

Периметр кольца, м	503,04		
Структура поворотной арки	ФОДО, 12 ячеек		
Количество сгустков	22		
Среднеквадратичная длина сгустка, м	0,6		
β -функция в IP, м	0,35		
Бетатронные числа, Q_x/Q_y	9,44/9,44		
Хроматичность, Q'_x/Q'_y	-33/-28		
Акцептанс, $\mu\text{мм}\cdot\text{мрад}$	40		
Акцептанс по импульсному разбросу, $\Delta p/p$	$\pm 0,010$		
Лоренц фактор, соответствующий критической энергии, γ_{tr}	7,088		
Энергия ионов Au^{79+} , ГэВ/н	1	3	4,5
Количество ионов в сгустке	$2 \cdot 10^8$	$2,4 \cdot 10^9$	$2,3 \cdot 10^9$
Среднеквадратичный разброс по импульсу, $\Delta p/p$	$0,55 \cdot 10^{-3}$	$1,15 \cdot 10^{-3}$	$1,5 \cdot 10^{-3}$
Среднеквадратичный эмиттанс, $\mu\text{мм}\cdot\text{мрад}$	1,1/0,95	1,1/0,85	1,1/0,75
Светимость, $\text{см}^{-2}\cdot\text{с}^{-1}$	$0,6 \cdot 10^{25}$	$1 \cdot 10^{27}$	$1 \cdot 10^{27}$
Характерное время роста эмиттанса из-за ВПР, с	160	460	1800

Таблица 1.6.2. Основные параметры ВЧ системы Коллайдера

	RF1	RF2	RF3
Частота, МГц	ВВ	10,5 ÷ 11,7	31,5 ÷ 35,1
Полная амплитуда напряжения, кВ	5	100	1000
Напряжение на резонаторе, кВ	5	25	125
Количество резонаторов в кольце	1	4	8

Система инжекции Коллайдера состоит из септумного (MS) и ударного (K) магнитов, которые расположены в ячейках с пропущенным дипольным магнитом в поворотных арках. Эмиттанс пучка при инжекции из Нуклотрона составляет $\varepsilon_{x,y} = 1,2 \mu\text{мм}\cdot\text{мрад}$.

Для поддержания высокого уровня светимости в режиме столкновения тяжёлых ионов используются электронное и стохастическое охлаждение (PU-X, PU-Y, PU-L — горизонтальные, вертикальные и продольные пикапы, K-X, K-Y, K-L — соответствующие кикеры). Система электронного охлаждения будет использоваться в интервале энергий ионов от 1 до 4,5 ГэВ/н, стохастическое охлаждение — от 3 до 4,5 ГэВ/н. Полоса пропускания системы стохастического охлаждения составляет от 2 до 4 ГГц. Охлаждение продольной степени свободы осуществляется методом Палмера.

Ввод Коллайдера в действие при стартовой конфигурации оборудования намечено планироваться на 2019 г.

1.7 СВЕРХПРОВОДЯЩИЕ МАГНИТЫ ДЛЯ БУСТЕРА И КОЛЛАЙДЕРА

Конструкция сверхпроводящих (СП) магнитов Нуклотронного типа [1.5] основана на использовании магнитного ярма типа «оконная рама» и седлообразной СП обмотке из полого кабеля. Она выбрана за основу для обоих новых колец комплекса NICA: и для Бустера (Таблица 1.7.1, Рис. 1.7.1) и для Коллайдера (Таблица 1.7.2, Рис. 1.7.2).

Квадрупольные линзы финального фокуса имеют наибольшую апертуру (диаметр 180 мм) из-за максимального значения β -функции в них. Имеется 12 одноапертурных линз образующих 4 триплета финального фокуса. Линзы одноапертурных, т.к. установлены на двух участках общей траектории встречающихся пучков. Максимальный градиент поля в этих линзах составляет 19 Тл/м. Расстояние от ближайшего квадруполя до IP равен 5,25 м.

Таблица 1.7.1. Основные характеристики магнитов Бустера

Характеристика	Диполи	Квадруполи
Количество магнитов в кольце	40	48
Максимальное магнитное поле, Тл, градиент поля Тл/м	1,8 –	– 21,5
Эффективная длина, м	2,2	0,47
Темп роста поля dB/dt , Тл/с и градиента поля dG/dt , Тл/(м·с)	1,2 –	– 14,3
Погрешности полей $\Delta B/B$ ($\Delta G/G$) на $R = 30$ мм	$6 \cdot 10^{-4}$	
Апертура пучковой камеры гориз./верт., мм/мм	128/65	
Радиус полюса, мм	–	47,5
Угол поворота, град.	9	–
Радиус кривизны магнита, м	14,01	–
Ширина ярма, м	0,31	0,226
Высота ярма, м	0,228	0,226
Полный вес, кг	1030	110
Ток при максимальном поле (градиента), кА	9,68	
Количество витков в обмотке	10	8
Индуктивность, $\mu\text{Гн}$	630	96
Внешний диаметр вакуумной оболочки, мм	540	
Мощность динамических потерь, Вт	8,4	0,8
Статический приток тепла (с учётом неструктурных элементов), Вт	4,4	3,0
Диаметр охлаждающего канала в кабеле, мм	3,0	
Перепад давления гелия на обмотке, кПа	≤ 27	
Максимальная температура гелия в обмотке, К	4,65	

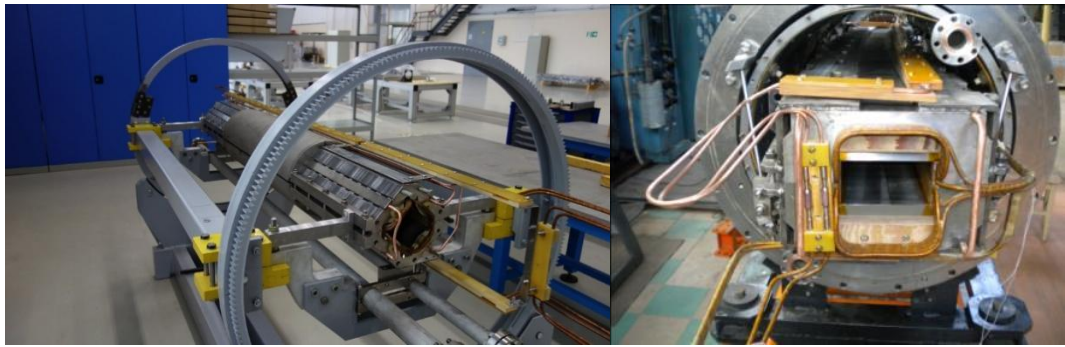


Рис. 1.7.1. Серийный магниты Бустера: дуплет квадрупольных линз (слева) и дипольный магнит (справа)

Таблица 1.7.2. Основные характеристики магнитов Коллайдера

Характеристика	Диполи	Квадруполи
Количество магнитов в кольце	80	96
Максимальное магнитное поле, Тл, градиент поля Тл/м	1,8 –	– 23,1
Эффективная длина, м	1,94	0,47
Темп роста поля dB/dt , Тл/с	$\leq 0,5$	–
Погрешности полей $\Delta B/B$ ($\Delta G/G$) на $R = 30$ мм	$\leq 2 \cdot 10^{-4}$	
Апертура пучковой камеры гориз./верт., мм/мм	120/70	
Радиус полюса, мм	–	47,5
Угол поворота, град.	4,5	–
Ширина ярма, м	0,302	0,300
Высота ярма, м	0,548	0,594
Расстояние между орбитами пучков, м	0,32	
Полный вес, кг	1670	250
Ток при максимальном поле (градиента), кА	10,4	
Количество витков в обмотке	10	8
Индуктивность, мГн	450	94
Внешний диаметр вакуумной оболочки, мм	812	
Приток тепла, Вт	13	5,7
Перепад давления гелия на обмотке, кПа	≤ 27	
Максимальная температура гелия в обмотке, К	4,65	

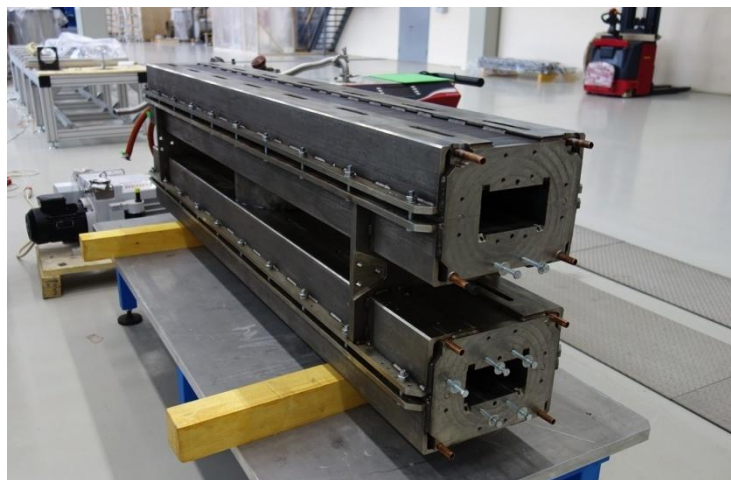


Рис. 1.7.2. Предсерийный дипольный магнит Коллайдера

Магниты Коллайдера прямые. Мультипольный корректор Коллайдера включает в себя 4 отдельные обмотки со следующими параметрами:

- диполь (макс. 0,15 Тл, x , y -коррекция замкнутой орбиты);
- квадруполь (1 Тл/м, коррекция бетатронных частот);
- «косой» квадруполь (1 Тл/м, коррекция связи);
- секступоль (150 Тл/м², коррекция хроматичности);
- октуполь (400 Тл/м³ коррекция второго порядка).

Корректирующие элементы длиной 0,3 м расположены рядом с основными квадруполями в поворотных и прямолинейных секциях. Внутренний радиус равен 66 мм.

Конструкция магнитов NICA и технология их производства была разработана в ОИЯИ на основе опыта создания Нуклотрона. Технология измерения магнитных полей была разработана в кооперации с проектом FAIR (Германия). Все сверхпроводящие магниты для комплекса NICA будут изготовлены в ОИЯИ. С этой целью создано специализированное производство магнитов (СПМ) (Рис. 1.7.3).



Рис. 1.7.3. Установка для тестирования СП магнитов для проектов NICA и FAIR

СПМ предназначено для сборки магнитов и проведения вакуумных, криогенных, электротехнических испытаний и измерений магнитного поля. Оно включает три гелиевых сателлитных рефрижератора, источник стабилизированного тока и необходимую инфраструктуру. Железные ядра магнитов изготавливаются на специализированном предприятии в Московской области, сверхпроводящий кабель и обмотки магнитов производятся в ОИЯИ (Рис. 1.7.4).



Рис. 1.7.4. Участки производства СП кабеля (слева), мастерская для изготовления СП обмоток (справа)

Серийное производство магнитов Бустера планируется завершить в 2016 г., магнитов Коллайдера — в 2018 г.

1.8 КАНАЛЫ ТРАНСПОРТИРОВКИ ПУЧКОВ

Полная длина канала транспортировки пучка из Бустера в Нуклотрон, имеющего полностью трёхмерную геометрию (Рис. 1.8.1, 1.8.2), составляет примерно 24 м. Канал включает в себя следующие элементы:

- 4 дипольных магнита, магнит Ламбертсона и 6 квадрупольных линз;
- мишень для обдирки ионов (эффективность перезарядки примерно 80%);
- поглотитель ионов нецелевой зарядности;
- корректирующие и диагностические устройства.

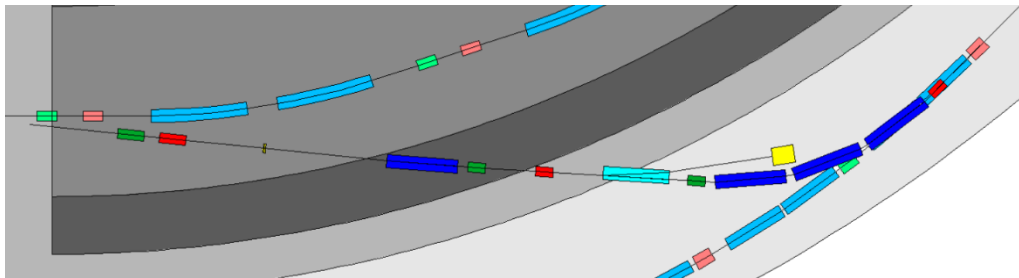


Рис. 1.8.1. Канал транспортировки пучка из Бустера в Нуклотрон. Вид сверху

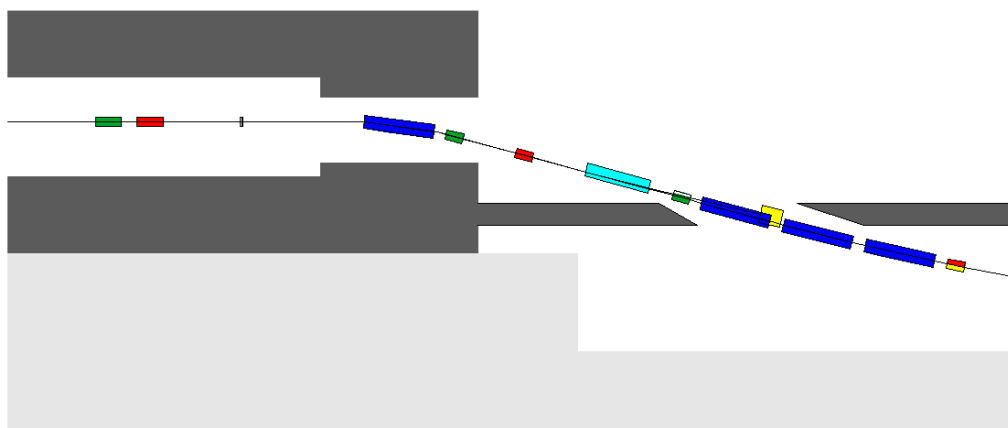


Рис. 1.8.2. Канал транспортировки пучка из Бустера в Нуклотрон. Вид сбоку

Канал транспортировки пучка из Нуклотрона в Коллайдер имеет общую часть и две ветви — для инжекции в верхнее и нижнее кольцо (Рис. 1.8.3). Канал, имеющий длину примерно 335 м, включает в себя 33 дипольных магнита, 45 квадрупольных линз, корректирующие и диагностические устройства и работает в импульсном режиме.

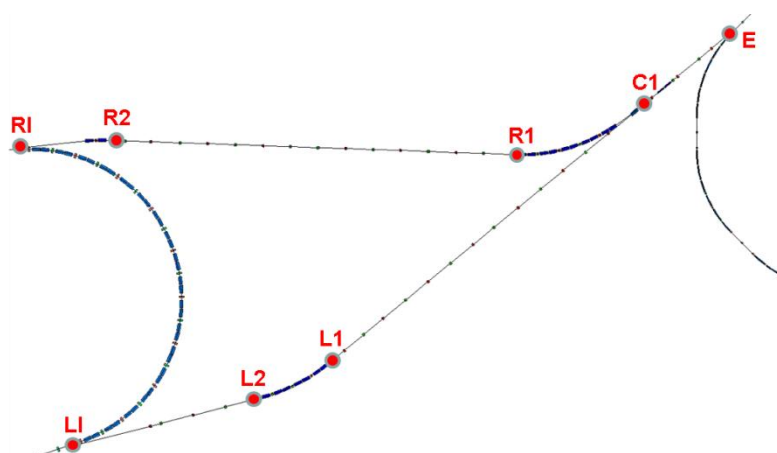


Рис. 1.8.3. Канал транспортировки пучка из Нуклотрона в Коллайдер. E — точка вывода пучка из Нуклотрона, C1 — конец общей части, L1, L2 — начало и конец поворотной арки в левой ветви, R1 — конец большой арки в правой ветви, R2 — начало малой арки в правой ветви, L1, R1 — точки инжекции в кольца Коллайдера из левой и правой ветвей соответственно

Канал транспортировки пучка из Бустера в Нуклотрон будет сооружён в 2017-2018 гг., из Нуклотрона в Коллайдер в 2018 г.

1.9 КРИОГЕННЫЙ КОМПЛЕКС NICA

Чтобы удовлетворить требованиям проекта NICA хладопроизводительность криогенного комплекса ОИЯИ должна быть увеличена до 8 кВт при температуре 4,5 К. Криогенный комплекс, создаваемый на основе существующей «криофабрики» Нуклотрона, будет содержать следующие основные элементы (Рис. 1.9.1):

- гелиевый охладитель ОГ-1000;
- комплекс по реконденсации азота;
- два спутниковых рефрижератора (для Бустера и Коллайдера);
- резервуар для жидкого гелия объёмом 40 м³.

Все необходимые работы будут завершены в 2018 г.

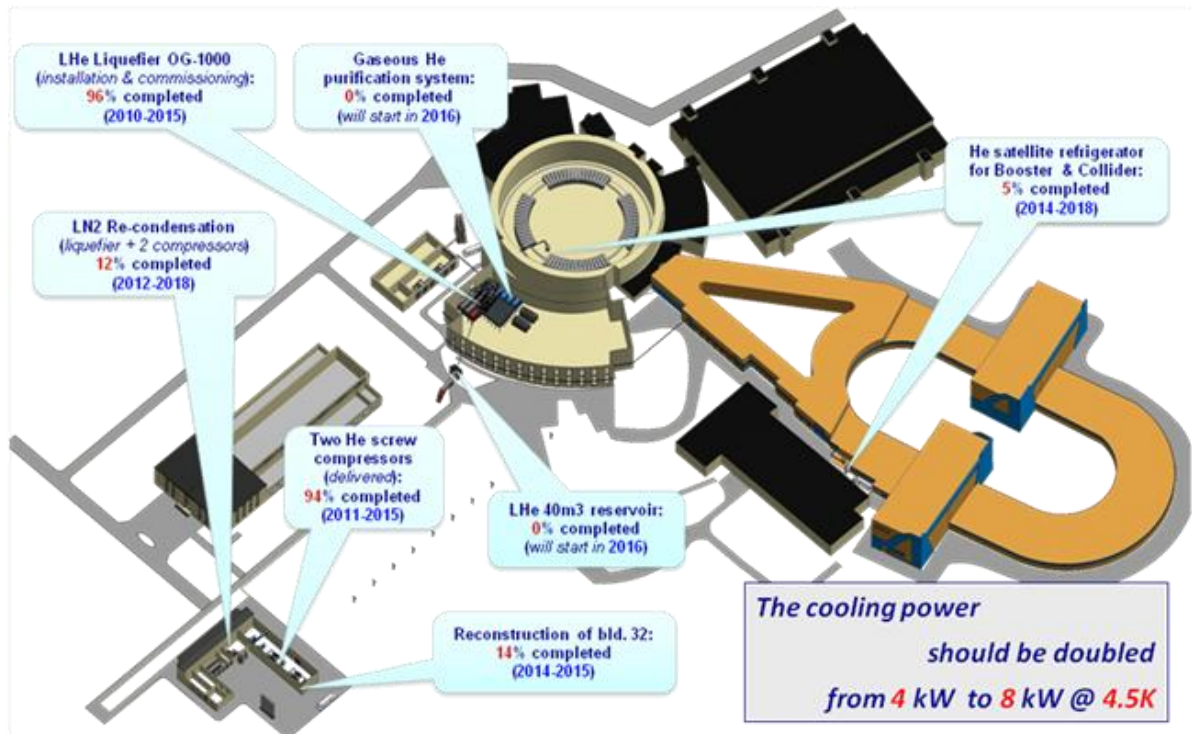


Рис. 1.9.1. Структура и состояние работ по созданию элементов криогенного комплекса NICA

1.10 СТАРТОВАЯ ВЕРСИЯ УСКОРИТЕЛЬНОГО КОМПЛЕКСА NICA

Комплект оборудования в стартовой версии (СВ режим) проекта NICA/MPD определён в соответствии со стратегией поэтапной реализации проекта NICA/MPD. На этом этапе вводятся в действие элементы ускорительного комплекса, обеспечивающие начала работы эксперимента VM@N на выведенном пучке и ввода в действие детектора MPD. Инжекционный комплекс создается в полном объёме. Из состава стартовой версии оборудования Бустера вынесена система медленного вывода пучка. В стартовую версию оборудования Нуклотрона не включаются устройства по управлению спином поляризованных пучков, обсуждается возможность начала работы с одной из двух ускоряющих станций при темпе роста поля до 0,8 Тл/с.

Два варианта Стартовой Версии оборудования Коллайдера NICA были представлены 15 января 2014 г. на сессии Международного консультативного комитета по проекту ускорительного комплекса NICA. В результате обсуждения была рекомендована Стартовая Версия-II, описание которой дано ниже.

Основные параметры Коллайдера NICA в Стартовой Версии (СВ) следующие.

Диапазон энергии ионов:

3,0 ÷ 4,5 ГэВ/н

ВЧ-система состоит из двух систем на каждое кольцо:

ВЧ-1 («барьерное» напряжение)	1 резонатор/кольцо, 1-я гармоника
ВЧ-2 (гармоническое напряжение)	2 резонатора/кольцо, 22-я гармоника
Амплитуда напряжения ВЧ-2 (макс.)	50 кВ
Среднеквадратичная длина сгустка в Коллайдере	121 см
Эмиттанс сгустка на выходе Нуклотрона	0,3 π мм·мрад
Число сгустков в кольце	22
Число ионов в сгустке	$7 \cdot 10^8$
Полное число ионов в кольце	$1,5 \cdot 10^{10}$
Светимость (при $\Delta Q = 0,01$)	$7,2 \cdot 10^{25} \text{ см}^{-2} \cdot \text{с}^{-1}$

Стохастическое охлаждение:

Продольное	1 канал/кольцо
Поперечное	отсутствует

Электронное охлаждение:

отсутствует

Инжекция:

Период циклов инжекции	4 с
Число ионов/цикл	$1 \cdot 10^9$
Полное число циклов инжекции	30
Длительность накопления	120 с

Эти параметры обеспечивают уровень светимости, необходимый для тестирования детектора MPD ($5 \cdot 10^{25} \text{ см}^{-2} \cdot \text{с}^{-1}$). СВ режим работы комплекса предполагает генерацию и ускорение ионов в инжекционной цепочке КРИОН-N — NILAC — Бустер — Нуклотрон с последующей инжекцией в

Коллайдер на энергии эксперимента, выбранной в диапазоне СВ, и накоплением в Коллайдере с использованием ВЧ-1 и продольного стохастического охлаждения. Время накопления до полной интенсивности около 2 мин. За это время эмиттанс распущенного пучка возрастает незначительно.

По окончании накопления производится формирование 22 сгустков в каждом кольце с помощью ВЧ-2 (адиабатическое включение). Эта процедура выполняется так же, как и в полномасштабном варианте работы Коллайдера (Глава 7). Отличие состоит только в несколько меньшем числе ионов в сгустке. Численное моделирование показывает, что сгустки длиной 1,2 м («сигма») могут быть сформированы при адиабатическом подъёме напряжения ВЧ-2 до 50 кВ в сопровождении продольного стохастического охлаждения. Относительный разброс ионов по импульсу (Рис. 1.10.1) не превышает при этом $\Delta p/p \leq 6 \cdot 10^{-4}$.

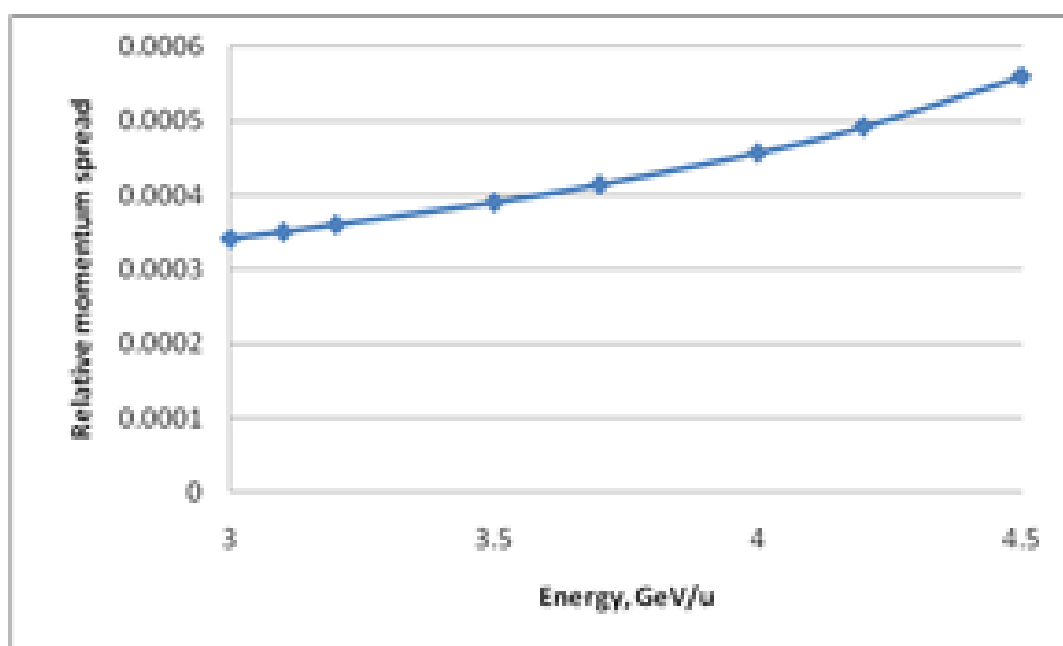


Рис. 1.10.1. Зависимость средневладратичного значения относительно разброса ионов сгустка по импульсу от энергии при параметрах сгустка, указанных выше

Благодаря столь малому значению $\Delta p/p$ метод фильтра в стохастическом охлаждении является предпочтительным. Этот метод был экспериментально проверен на пучке Нуклотрона.

Максимальное значение разброса частот бетатронных колебаний ионов на пространственном заряде сгустка имеет место при минимальной энергии СВ диапазона. Оно составляет примерно 0,009 при выбранных параметрах сгустка. Эффект встречи сгустков в Коллайдере даёт разброс на порядок меньше. Более существенным ограничением является продольная микроволновая неустойчивость, что связано с малым значением $\Delta p/p$. Тем не менее, пороговое значение числа ионов в сгустке по этой неустойчивости примерно втрое больше требуемого (Рис. 1.10.2).

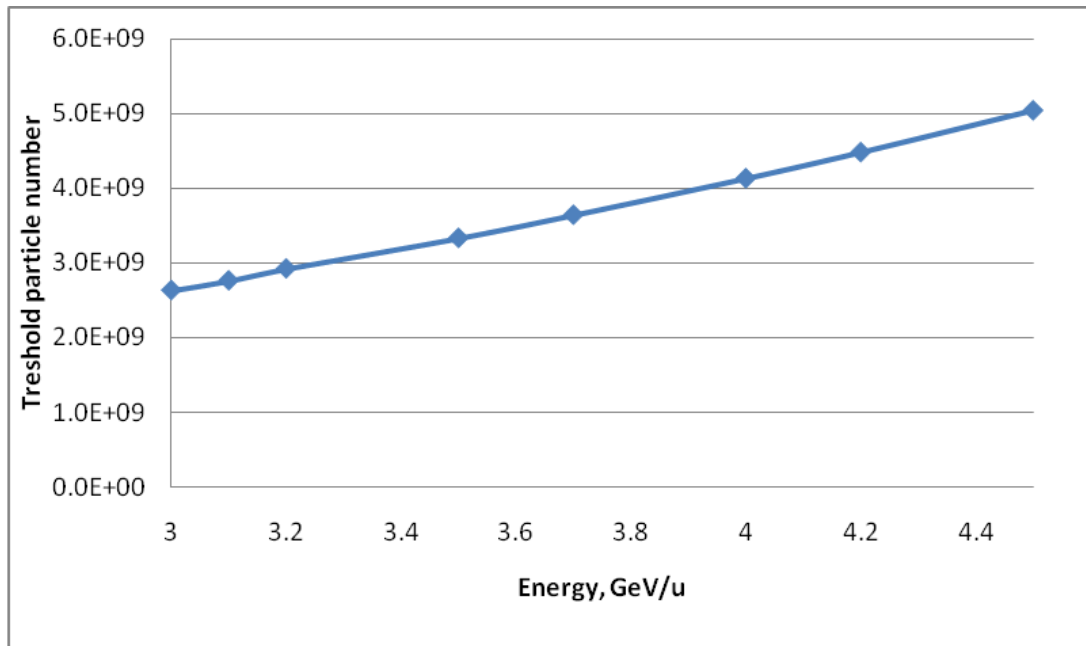


Рис. 1.10.2. Пороговое значение числа ионов в сгустке при развитии микроволновой неустойчивости (критерий Кайла-Шнеля)

Во избежание развития «неустойчивости голова-хвост» Коллайдер будет работать при малом и отрицательном значении хроматичности, а её моды высокого порядка будут подавлены с помощью введения семейства октуполей.

При малом значении $\Delta p/p$ внутрипучковое рассеяние (ВПР) ионов в сгустке не приводит к равновесию по трём степеням свободы. Так, ВПР вызывает быстрый нагрев продольной степени свободы, за время более чем на порядок меньшее времени нагрева горизонтальной степени свободы. В то же время вертикальный эмиттанс уменьшается благодаря такому, так называемому «ответному» (sympathetic), охлаждению. Например, при энергии 3 ГэВ/н и начальном эмиттансе 48π -мм·мрад время нагрева горизонтальной степени свободы составляет порядка 10^3 с, а вертикальный эмиттанс уменьшается с точно таким же характерным временем. При работе Коллайдера на резонансе связи при *разных* начальных значениях горизонтального и вертикального эмиттансов скорость нагрева поперечных степеней свободы можно оценить, как среднее значение этих скоростей в отсутствие связи. Так, если ВПР нагрев продольной степени свободы компенсирован стохастическим охлаждением, поперечные эмиттансы стабилизируются на некотором «равновесном» значении, зависящем от энергии (Рис. 1.10.3).

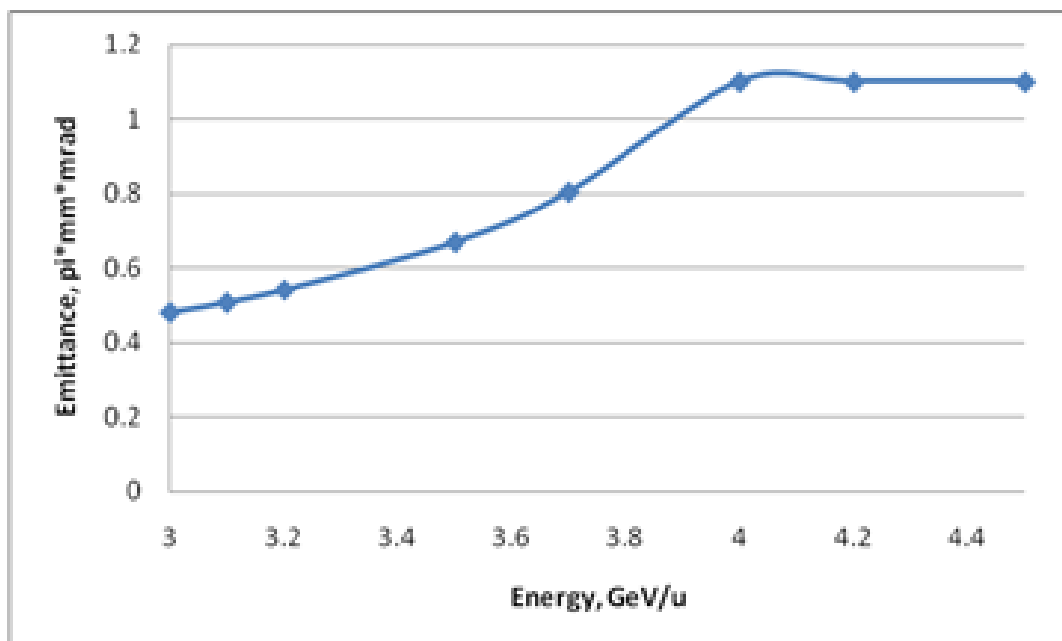


Рис. 1.10.3. Зависимость «равновесного» значения поперечных эмиттансов от энергии ионов

Светимость Коллайдера достигает значения $5 \cdot 10^{25} \text{ см}^{-2} \cdot \text{с}^{-1}$ при интенсивности сгустка $(5 \div 7) \cdot 10^8$ в зависимости от энергии ионов (Рис. 1.10.4). Время ВПР нагрева продольной степени свободы растёт с энергией от 30 с при 3 ГэВ/н до 500 с при 4,5 ГэВ/н (Рис. 1.10.5). Для поперечных степеней свободы скорость нагрева равна нулю при энергиях ниже 3,8 ГэВ/ни достигает $2 \cdot 10^{-5} \text{ с}^{-1}$ (15 час^{-1}) при энергии 4,5 ГэВ/н (Рис. 1.10.6). Приведенные здесь значения были получены в соответствии с моделью Бьёркина [1.6] (реализация алгоритма С. Нагайцев и В. Лебедев). Расчёты с использованием программы BETACOOOL [1.7] дают несколько более оптимистичные результаты.

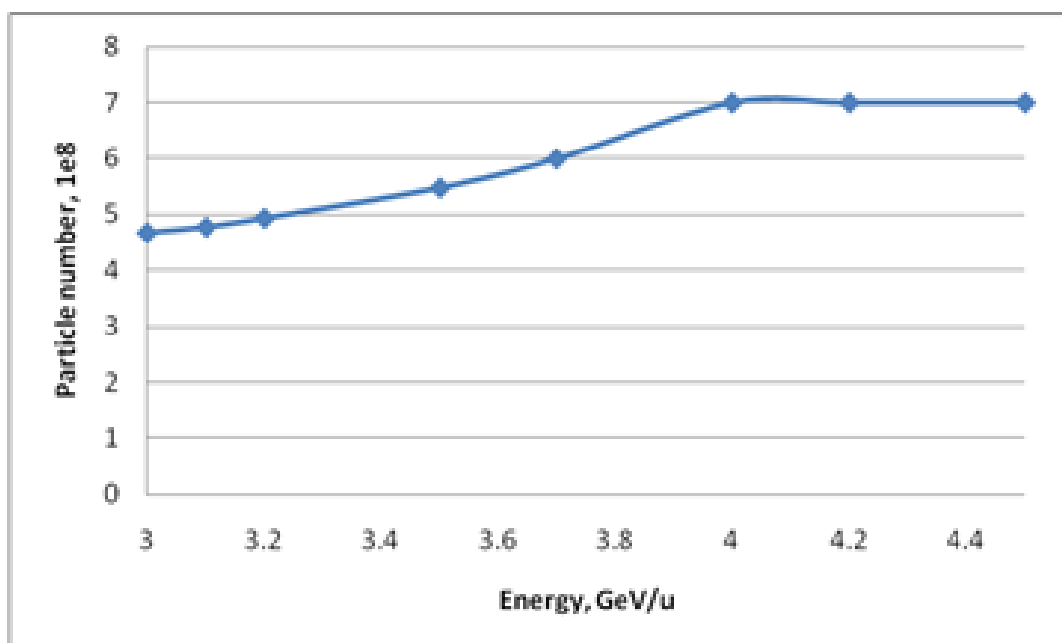


Рис. 1.10.4. Зависимость от энергии числа ионов в сгустке при светимости Коллайдера $5 \cdot 10^{25} \text{ см}^{-2} \cdot \text{с}^{-1}$

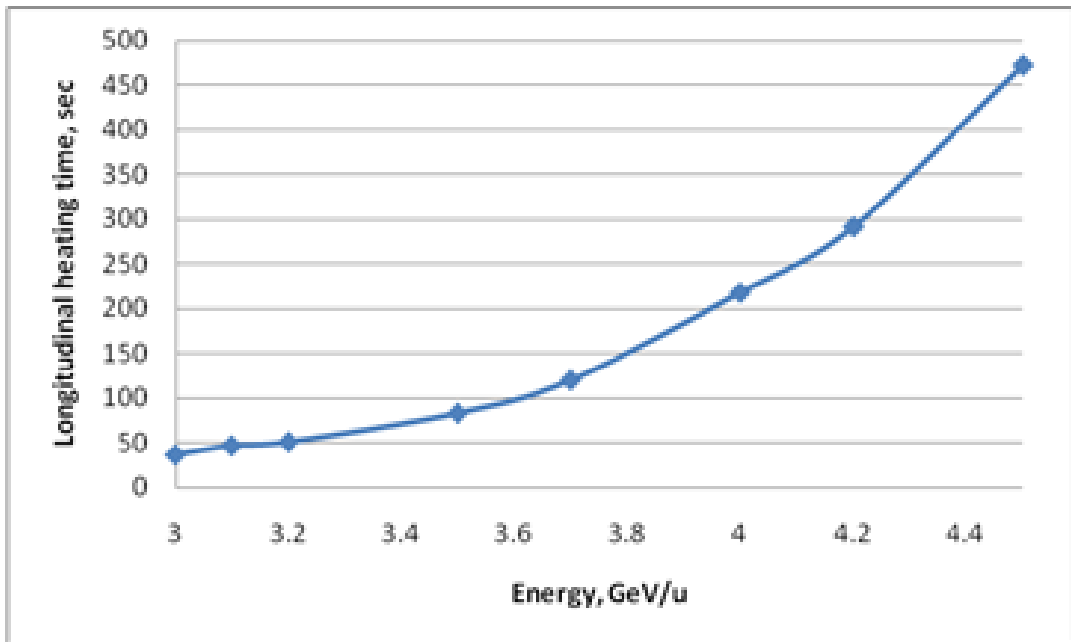


Рис. 1.10.5. Зависимость от энергии времени ВПР нагрева продольной степени свободы ($\Delta p/p$)

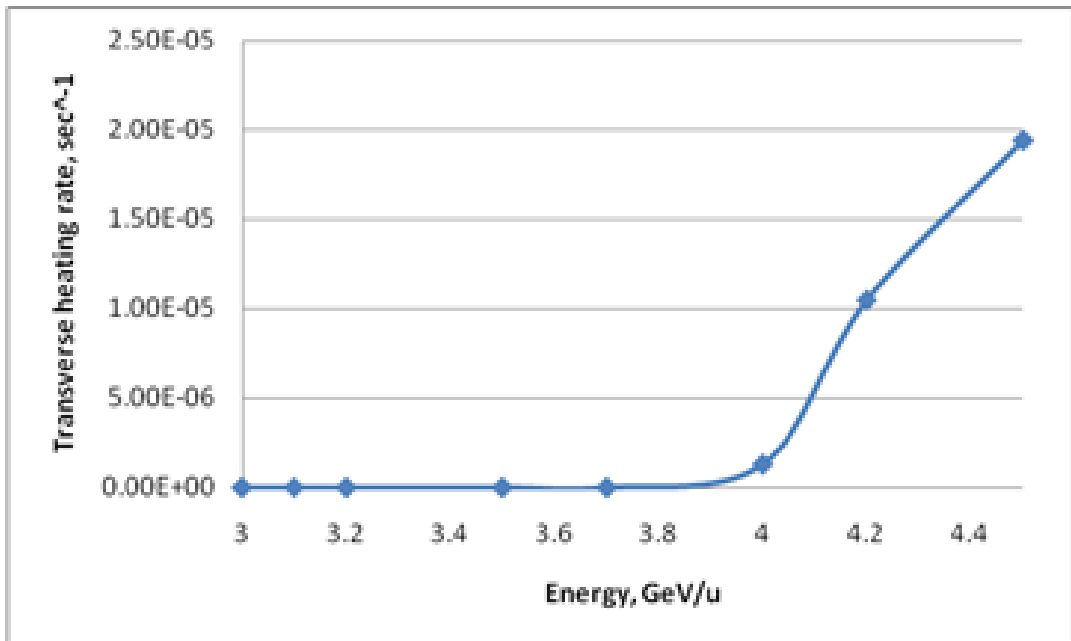


Рис. 1.10.6. Зависимость от энергии скорости ВПР нагрева поперечного эмиттанта

При энергии ионов 4 ГэВ/н время ВПР нагрева продольной степени свободы около 200 с. Этот нагрев может быть компенсирован (подавлен) системой стохастического охлаждения, проектируемой для Коллайдера NICA. При этой же энергии время нагрева горизонтальной степени свободы около 1000 с. Таким образом, в течение эксперимента разброс ионов по импульсу будет стабилизирован системой стохастического охлаждения, а вертикальный эмиттанс останется практически постоянным.

Существенным недостатком работы Коллайдера на длинных сгустках является неоднородная загрузка детектора MPD по длине пучка: «точка встречи» превращается в довольно протяжённый отрезок прямой. В СВ режиме это обстоятельство не является критичным для MPD.

Параметры СВ режимов Коллайдера могут быть улучшены при оптимальном выборе вида ионов. Например, при работе на ионах $^{84}\text{Kr}^{36+}$ можно формировать более короткие, до 84 см, стабильные сгустки, что обеспечивает ту же светимость $5 \cdot 10^{25} \text{ см}^{-2} \cdot \text{с}^{-1}$ при меньшей интенсивности сгустков, около $6,2 \cdot 10^8$. Этот режим представляет интерес для тестирования детектора на сгустках в 1,5 раза меньшей длины.

ЛИТЕРАТУРА

- [1.1] Концептуальный проект ускорительного комплекса Nuclotron-based Ion Collider fAcility (NICA), под редакцией И.Н. Мешкова и А.О. Сидорина, Р9-2008-153, Дубна, ОИЯИ, 2008 (ISBN 978-5-9530-0197-7).
- [1.2] E.D. Donets et al., Electron string source of highly charged ions: Studies and the first test on a synchrotron, in Proceedings of EPAC2002, Paris, June 3-7, 2002, pp. 1700-1702.
- [1.3] V.V. Fimushkin et al., Eur. Phys. J., Special Topics, 162, 275, 2008; V.P. Derenchuk, A.S. Belov, in Proceedings of the Particle Accelerator Conference Chicago, 2001, p. 2093.
- [1.4] А.А. Смирнов, А.Д. Коваленко. «Нуклотрон — сверхпроводящий ускоритель ядер в ЛВЭ ОИЯИ: создание, работа, развитие», Письма в ЭЧАЯ, т. 1, № 6(123), 11, 2004.
- [1.5] А.А. Смирнов. Нуклотрон — новая технология сверхпроводящей магнитной системы синхрофазотрона. Физика элементарных частиц и атомного ядра, 2001, т. 32, вып. 1. с. 96-141.
- [1.6] J.D. Bjorken, S.K. Mtingwa, Intrabeam scattering, Particle Accelerators, Vol. 13, p. 115, 1983.
- [1.7] A. Smirnov, A. Sidorin. Long Term Beam Dynamics Simulation with the BETACOOOL Code. Proceedings of the RuPAC2012, Saint-Petersburg, 22-28 September 2012.

Приложение 1

к Главе 1

A.1.1 PASSPORT OF THE NICA ACCELERATOR COMPLEX

A.1.1.1 Introduction

Project NICA/MPD (Nuclotron based Ion Collider fAcility and Multi Purpose Detector) is an accelerator facility conceived to implement a world-leading program in particle physics at JINR. A description of the physics program envisioned is available on the web.

Project NICA/MPD is a part of the JINR Roadmap for 2009-2016 is described in the JINR 7-years Program. It is approved by Scientific Council of JINR and The Committee of Plenipotentiaries of JINR in 2009. That is a flagship project of JINR presently.

The project comprises experimental studies of fundamental character in the fields of the following directions of experimental research:

1. Relativistic nuclear physics — search for mixed phase, phase transitions and critical phenomena in strongly interacting baryonic matter;
2. Spin physics in high and middle energy range of interacting particles;
3. Radiobiology.

Applied researches based on particle beams generated at NICA are dedicated to development of novel technologies in material science, environmental problems resolution (like radioactive waste transmutation), energy generation (accelerator driven nuclear reactors), particle beam therapy and others.

Education program using the facility for performance of research works having the goal of teaching of young specialists.

Project NICA/MPD can serve the wide researchers community in different fields of science and technology where intense and high energy particle beams are required.

A.1.1.2 Mission Statement

Project NICA/MPD, a modern accelerator facility, will support world-leading programs in long base line relativistic nuclear physics and particle spin physics, radiobiology, applied research and education. It will be unique among accelerator facilities worldwide in its flexibility to support multiple research programs based on particle beams of the frontier parameters. The main goal of the project is a study of hot and dense strongly interacting matter in heavy ion (up to Au) collisions at centre-of-mass energies up to 11 GeV. Two modes of operation are foreseen, collider mode and extracted beams, with two detectors: MPD and BM@N. An average luminosity in the collider mode is expected as $10^{27} \text{ cm}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$ for Au^{79+} . Extracted beams of various nuclei species with maximum momenta of 13 GeV/c (for protons) will be

available. A study of spin physics with extracted and colliding beams of polarized deuterons and protons at the energies up to 27 GeV (for protons) is foreseen with the NICA facility. The proposed program allows to search for possible signs of the phase transitions and critical phenomena as well as to shed light on the problem of nucleon spin structure.

A.1.1.3 Project Goals

The global scientific goal of the NICA/MPD Project is to explore the phase diagram of strongly interacting matter in the region of highly compressed baryonic matter. Such matter exists in neutron stars and in the core of supernova explosions, while in the early Universe we meet opposite conditions of very high temperature and vanishing baryonic density. In terrestrial experiments, high-density nuclear matter can transiently be created in some reaction volume in relativistic heavy ion collisions. In these collisions a large fraction of the beam energy is converted into newly created hadrons and excitation of resonances whose properties may noticeably be modified by the surrounding hot and dense medium. At very high temperatures or densities, this hadron's mixture melts and its constituents, quarks and gluons, form a new phase of matter, the quark-gluon plasma.

The heavy-ion experiments at CERN-SPS and BNL-RHIC as well as the coming CERN-LHC experiments probe the region of high temperatures and low net baryon densities where circumstantial evidence has been obtained for a new phase of matter existing above a temperature of about $160 \div 170$ MeV. At lower temperature and moderate baryonic density, the GSI-SIS experiments definitely show no hint at a phase transition but certainly there are in-medium modification effects. At very high densities and very low temperatures the matter is deconfined and, as predicted, correlated quark-antiquark pairs form a color superconductive phase. Such phase may be created in the interior of neutron stars.

The NICA/MPD project is dedicated to the search at intermediate values of temperature and densities, where essential evidences were obtained by the NA49 collaboration within the low-energy CERN-SPS program that the system enters a new phase at beam energy of about 30 GeV/u. The importance of this finding was well understood at GSI, where the CBM (Compressed Baryon Matter) experiment is under development within the FAIR project, and by the BNL-RHIC, where a limited statistics of Au + Au collisions has already been collected at decreased beam collider energies to study this domain of the phase diagram.

The studies of the nucleon spin structure is the first priority task for the scientific program of The Spin Physics Detector (SPD) project at the NICA facility. Since the famous "spin crisis" in 1987, this problem of the nucleon spin structure remains one of the most intriguing puzzle of high energy physics. The central component of this problem attracting for many years enormous both theoretical and experimental efforts, is a search for answering the questions, how the spin of the proton is built up from spins and orbital momenta of its constituents. The searches brought up a concept of the Parton Distribution

Functions (PDF) in nucleon. Now we know that must be about 50 different PDF for a complete description of the nucleon structure. Some of them can be considered as sufficiently well known, when others either are absolutely unknown, or poorly known, especially the spin dependent ones.

Fixed target experiments at proton and ion beams delivered (up to 2001) by Synchrophasotron and (after 2001) by Nuclotron is long-lived research program at VBLHEP. It will be continued at the beams from upgraded Nuclotron having the goal of studies in all the particle physics fields proposed for NICA/MPD and SPD, but in lower energy range. Thus, these studies will be complementary to those performed at the NICA Collider. The Nuclotron beams will be used also for tests of MPD and SPD elements.

The new NICA accelerator facility will provide numerous particle beams of wide parameter spectrum. That allows one to perform both applied and fundamental research in different fields of science and technology. Among them one can point out:

- radiobiology and cosmic medicine;
- cancer therapy;
- development of accelerator driven reactors (“energy generation” with subcritical plutonium blankets) and radioactive waste transmutation;
- test of radiation proof electronics.

Education program is one of the first priority activities at JINR, as formulated in JINR Roadmap. The proposed NICA facility offers various possibilities for teaching and qualification procedures including practice at experimental set ups and test benches, preparation of diploma works, PhD, and doctoral (corresponding to “habilitierter Doktor” in Germany) theses.

A.1.1.4 Key Assumptions, Interfaces and Constraints

NICA facility is constructed on the VBLHEP site and will utilize the upgraded Nuclotron. The Nuclotron upgrade is in progress and will be completed in the frames of Nuclotron-NICA project.

Project NICA/MPD is the JINR flagship project being fulfilled by world-wide international collaboration. That involves the Institutions from JINR member-states and other countries.

Project NICA/MPD technology choices will exploit experience and activity of the laboratories dealing with accelerator and particle detectors development like CERN, Budker INP, GSI, Fermilab, BNL, and others.

Project NICA/MPD represents a large long-term investment for JINR high energy physics and hence must be robust, flexible, and designed with significant upgrade potential.

The facility physics program is suggested to be implemented during three stages:

- At the first stage of the operation it will provide ion-ion collisions with the same ion species in both rings.
- The second stage will require an upgrade of the beam interaction region in order to accomplish the collisions of the beams with the different ion species at the same energy per nucleon of both beams (in this case the collider rings have to be operated at the different magnetic rigidities).
- The spin physics program will be realized at the third stage, when the ring will be equipped with required spin control and diagnostic devices.

The project realization presumes required development of the VBLHEP liquid helium facility, construction of a control system and development of the VBLHEP infrastructure.

A.1.1.5 Additional Project Goals

The NICA injector, Booster and Nuclotron should have provisions for delivering ion beam in range 3 MeV/u ÷ 4.5 GeV/u for various experimental studies in radiobiology, medicine, nuclear technology, material science, etc.

A.1.1.6 Facility Scope

The NICA facility (Fig. A.1.1.6.1) includes: the injection complex, the booster, the upgraded Nuclotron and two storage rings with two interaction points (IP).

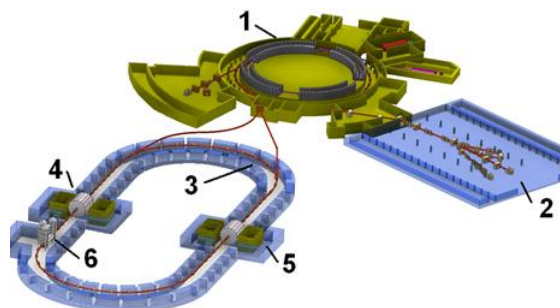


Fig. A.1.1.6.1. Schematics of the NICA layout: 1 — injector facility, Booster and Nuclotron, 2 — existing building for the fixed target experiments, 3 — the collider rings, 4, 5 — MPD and — SPD detectors, 6 — electron cooling system

The injection complex provides a wide set of ion species up to the heaviest one, Au, at energy of 3.5 MeV/u with an expected intensity of $2 \cdot 10^9$ particles per cycle. The facility contain also the source of polarized ions (SPI) with the linac accelerating light ions up to 5 MeV/u that provide direct injection of polarized deuterons and protons (proton beam energy is 20 MeV) into the Nuclotron and then to the Collider.

The Booster synchrotron should accelerate ions up to 600 MeV/u (for ions with $Z/A = 1/3$). The magnetic ring of 211 m long is placed inside the window of the Synchrophasotron yoke. The upgraded Nuclotron should provide proton, deuteron (including polarized) and multi charged ion beams with the maximum

energies: 5.8 GeV/u for ($A = 2, Z = 1$); 3.3 GeV/u for Xe ($A = 124, Z = 42$); and 4.5 GeV/u for Au ($A = 197, Z = 79$). The ions are fully stripped before the injection into the Nuclotron.

The two storage rings with two interaction points (IP). The major parameters of the NICA Collider are the following: $B\rho = 45$ T·m; vacuum in a beam chamber: 10^{-11} Torr; maximum dipole field 1.8 T; ion kinetic energy range from 1 GeV/u to 4.5 GeV/u for Au^{79+} ; zero beam crossing angle at IP; 9 m space for detector allocations at IP's; average luminosity $L = 10^{27} \text{ cm}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$ for gold ion collisions at $\sqrt{s_{\text{NN}}} = 9$ GeV. The Collider ring 503.04 m long (twice large as the Nuclotron ring) has a racetrack shape and is based on double-aperture (top-to-bottom) superferric magnets — dipoles and quadrupoles.

A.1.1.7 Functional Requirements

A.1.1.7.1 Injector facility

The injector facility consists of the following elements:

- cryogenic heavy ion source KRION of Electron String Ion Source (ESIS) type,
- laser source,
- duoplasmatron source,
- source of polarized protons and deuterons,
- modernized linac LU-20 (existing),
- new heavy ion linear accelerator (HILAC),
- transfer channels.

All the particle sources (Table A.1.1.7.1.1) are placed on own platforms suspended at positive potential of $100 \div 150$ keV to provide injection into the linacs (Table A.1.1.7.1.2).

The injector facility has two independent parts:

1. the injector for light ions;
2. the injector for heavy ions.

The injector for light ions contains ion sources (laser, duoplasmatron sources, source of polarized protons and deuterons), modernized LU-20 and existing beam injection channel into the synchrotron Nuclotron. The injector for heavy ions contains the ion source KRION, HILAC and two new beam transfer channels (Table A.1.1.7.1.3).

Table A.1.1.7.1.1. Parameters of Particle Sources of NICA Injection Facility

Source	KRION-6T	Laser source	Duoplasmatron	SPI ^{*)}
Particles	Au ³¹⁺	Light ions up to Mg ¹⁰⁺	H ⁺ , D ⁺ , He ²⁺	H ⁺ ↑, D ⁺ ↑
Particles per cycle	~ 2.5·10 ⁹	~ 10 ¹¹	H ⁺ , D ⁺ ~ 5·10 ¹² He ²⁺ ~ 10 ¹¹	5·10 ¹¹
Repetition, Hz	10 (3 pulses for 5 s)	0.5	1	0.2

^{*)} SPI = Source of Polarized Ions

Table A.1.1.7.1.2. Parameters of Linear Accelerators of NICA Injection Facility

Linac	LU-20	HILAC
Acceleration structure (section number)	RFQ + Alvarez type	RFQ (1) + IH DTL (2)
Mass to charge ratio A/Z	1 ÷ 3	1 ÷ 6
Injection energy, keV/u	150 for A/Z = 1 ÷ 3	17
Extraction energy, MeV/u	5 (A/Z = 1 ÷ 3)	3.24 (A/Z = 6)
Input current, mA	up to 20	up to 10
Particle transmission, %	50	90
Operating frequency, MHz	145	100.625
Length, m	22	11
Acceptance, π mm·mrad	220	88
Output emittance (effective), π mm·mrad	40	10

Table A.1.1.7.1.3. Parameters of Beam Transfer Channels of NICA Injection Facility

Beam transfer channel	LEBT	HILAC — Booster
Length, m	1.8	15.5
Channel composition	2 solenoids; 2D steerer; 2 focusing electrodes; 1 accelerating tube (fore-injector)	2 dipoles; 10 quadrupoles; 1 debuncher; 1 chopper; beam diagnostics; steerers
Sort of ions	Au ³¹⁺ and several neighbor charge states	Au ³⁰⁺ , Au ³¹⁺ , Au ³²⁺ (at the entry); Au ³¹⁺ (at the exit)
Ion energy, keV/u	1.6 (at the entry); 17 (at the exit)	3.2
Beam intensity	~ 2.3·10 ⁹ (Au ³¹⁺); up to 1.5·10 ¹⁰ (total)	~ 2.1·10 ⁹ (Au ³¹⁺); up to 6·10 ⁹ (total)
Particle transmission, %	90	95
Output emittance (effective), π mm·mrad	up to 70	15

A.1.1.7.2 Booster synchrotron

The main goals of the Booster (Table A.1.1.7.2.1) are the following:

- accumulation of 2·10⁹ Au³¹⁺ ions; acceleration of the heavy ions up to energy required for effective stripping;
- forming of the required beam emittance with electron cooling system;
- providing a fast extraction of the accelerated beam for its injection into the Nuclotron.

The present layout makes it possible to place the Booster having 211 m circumference and four fold symmetry lattice inside the yoke of the Synchrophasotron (Fig. A.1.1.7.2.1). The Booster has working cycle of 4.02 s duration (Fig. A.1.1.7.2.2). In case of necessity a technological pause between the Booster cycles of 1 s duration is presumed.

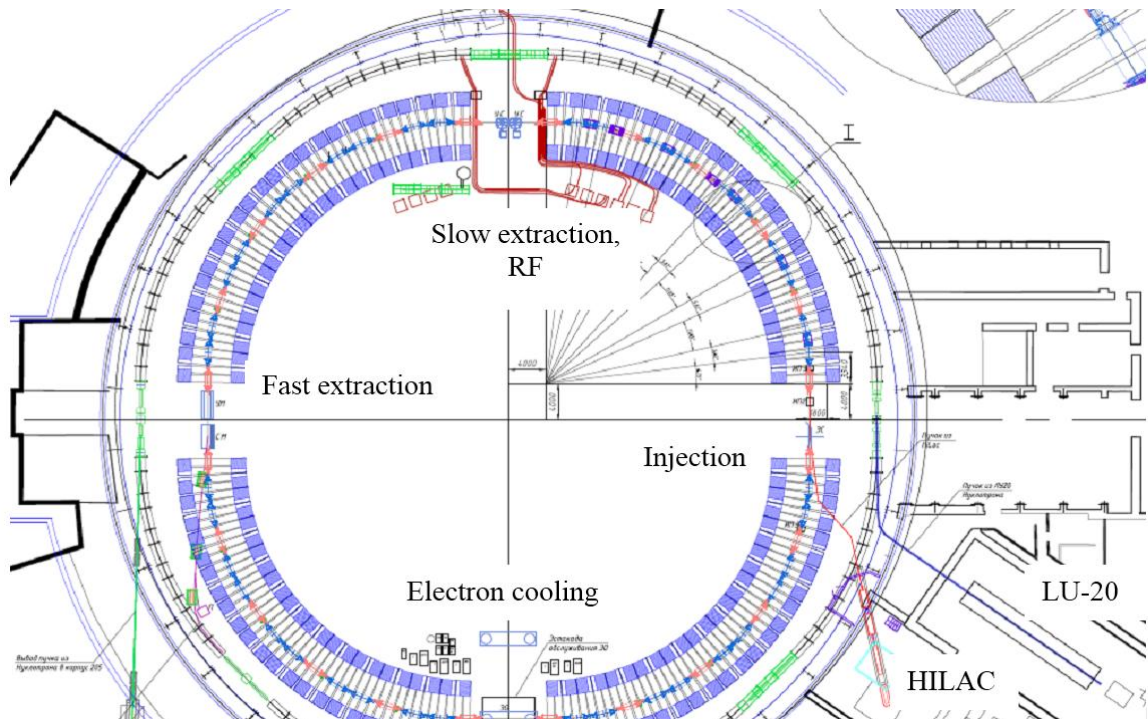


Fig. A.1.1.7.2.1. The Booster layout

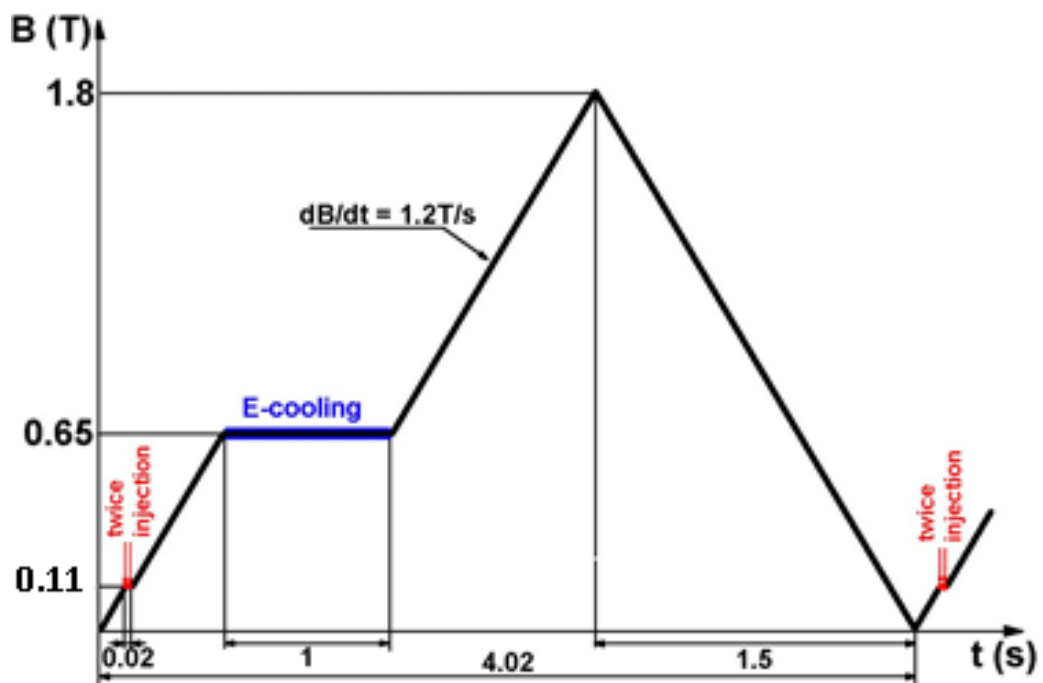


Fig. A.1.1.7.2.2. The Booster cycle diagram for heavy ion acceleration

Table A.1.1.7.2.1. Lattice parameters of the Booster

Fold symmetry	4
Number of the DFO lattice cells per arc	6
Number of large straight sections	4
Length of large straight sections, m	7
Length of small straight sections, m	0.7/0.85/0.95
Betatron tunes	4.8/4.85
Amplitude of β -functions, m	13.3
Maximum dispersion function, m	4.4
Momentum compaction factor	0.05
λ_r	4.487
Chromaticity	-5.1/-5.5
Horizontal acceptance, π mm·mrad	150
Vertical acceptance, π mm·mrad	57

The Booster electron cooling system is aimed to form required phase volume of the bunch. The maximum designed electron energy is 60 keV.

A.1.1.7.3 The Nuclotron

The Nuclotron SC proton synchrotron (Table A.1.1.7.3.1 and Fig. A.1.1.7.3.1 below) has three operation modes:

1. Acceleration of heavy ions for storage in the Collider.
2. Acceleration of polarized protons and deuterons for feeding the Collider.

Acceleration of both polarized and unpolarized protons and deuterons and heavy ions for internal target experiments or slow extraction to fixed target experiments.

In the first mode Nuclotron is operated as an element of the NICA Collider injection chain and has to accelerate single bunch of fully stripped heavy ions (U^{92+} , Pb^{82+} or Au^{79+}) from 0.6 to $1 \div 4.5$ GeV/u (Table A.1.1.7.3.1). The required bunch intensity is about $1 \div 1.5 \cdot 10^9$ ions. The particle losses during acceleration have to be minimized and do not exceed 10 %. The magnetic field ramp has to be ≥ 1 T/s.

In the second mode the Nuclotron will be used for acceleration of the polarized proton beam from 20 MeV up to 12 GeV kinetic energy and polarized deuteron beam from 5 MeV/u up to 5.6 GeV/u. The bunch intensity in this case is a few units of 10^{10} particles.

In the third mode the Nuclotron is operated similarly to the 1st or 2nd mode (depending on accelerating particles' sort) with further slow extraction of particles to fixed target area instead of a beam transfer into the Collider.

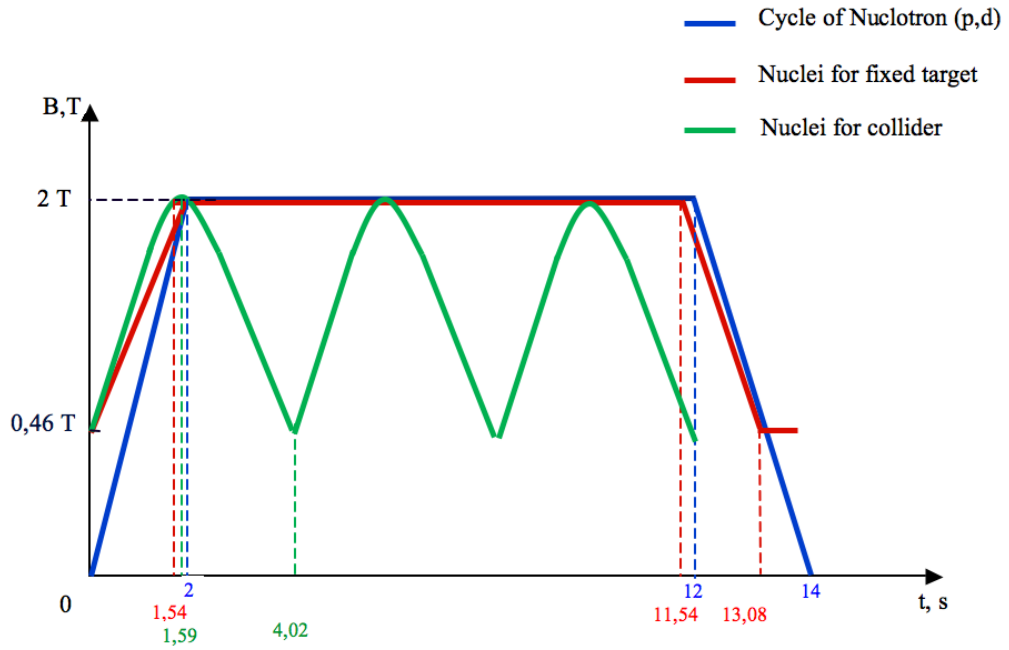


Fig. A.1.1.7.3.1. The operation cycles of the Nuclotron

Table A.1.1.7.3.1. Nuclotron beam and RF system parameters at heavy ion acceleration (Au^{79+})

	Injection	Acceleration	Extraction
Time, s	0.0	1.55	1.59
B , T	0.46	2.01	2.03
V_{rf} , kV	8.5	8.5	0.2
f_{rf} , kHz	947	1173,8	1174.3
Synchronous phase, deg	41	41	0
Kinetic energy, MeV/u	600	4350	4380
Number of bunches	1	1	1
Rms bunch length, m	5.8	2.0	3.4
Rms energy spread, MeV	30	112	71
$\Delta p/p (\pm 2 \sigma)$	$\pm 3.2 \cdot 10^{-4}$	$\pm 2.2 \cdot 10^{-4}$	$\pm 1.4 \cdot 10^{-4}$
Bucket height, MeV	210	2320	816
$\Delta p/p$ within bucket	$\pm 1.1 \cdot 10^{-3}$	$\pm 2.6 \cdot 10^{-3}$	$\pm 7.8 \cdot 10^{-4}$
Synchrotron tune	$3.9 \cdot 10^{-4}$	$3.6 \cdot 10^{-5}$	$6.6 \cdot 10^{-6}$

A.1.1.7.4 The NICA synchrotrons

Both NICA synchrotrons (Table A.1.1.7.4.1) when operated in ion storage mode are synchronized to provide an optimal storage rate (Fig. A.1.1.7.2.2 and A.1.1.7.3.1).

Table A.1.1.7.4.1. General parameters of the NICA facility synchrotrons

Parameter	Booster	Nuclotron
Type	SC synchrotron	SC synchrotron
Particles	ions $A/Z \leq 3$	p^\uparrow, d^\uparrow , nuclei
Injection energy, MeV/u	3.2	5 (p^\uparrow, d^\uparrow), 570 ÷ 685 (gold nuclei)
Maximum energy, GeV/u	0.6	12.07 (p^\uparrow), 5.62 (d^\uparrow), 4.38 (gold nuclei)
Magnetic rigidity, T·m	1.6 ÷ 25.0	25 ÷ 43.25
Circumference, m	210.96	251.52
Fold symmetry	4	8
Quadrupole periodicity	24	32
Betatron tune	4.8/4.85	7.4
Cycle duration for Collider mode, s	4.02 (active); 5 (total)	1.5 ÷ 4.2 (active); 5 (total)
Dipole field, T	0.11 ÷ 1.8	0.03 ÷ 2.03 (p^\uparrow, d^\uparrow) 0.46 ÷ 2.03 (nuclei)
Radius of curvature, m	14	21.68 ÷ 21.31
Magnetic field ramp, T/s	1.2	1.0
Beam injection	single turn; multi-turn; multiple single turn	single turn
Beam extraction	single turn	single turn, slow extraction
Vacuum, Torr	10^{-11}	10^{-9}
Au beam intensity, ions/pulse	$1.5 \cdot 10^9$	$1 \cdot 10^9$
Transition energy, GeV/u	3.25	7.0
RF range, MHz	0.5 ÷ 2.53	0.6 ÷ 6.9 (p^\uparrow, d^\uparrow) 0.947 ÷ 1.147 (nuclei)
Harmonics number of accelerating frequency	5 (at injection) 1 (after cooling)	5 (p^\uparrow, d^\uparrow) 1 (nuclei)
Chromaticity hor./vert.	-5.1/-5.5	-7.8/-10.0
Spill duration of slow extraction, s	-	up to 10

A.1.1.7.5 The Collider

The Collider will be constructed in a tunnel with additional buildings for two detectors and electron cooler (Fig. A.1.1.7.5.1).

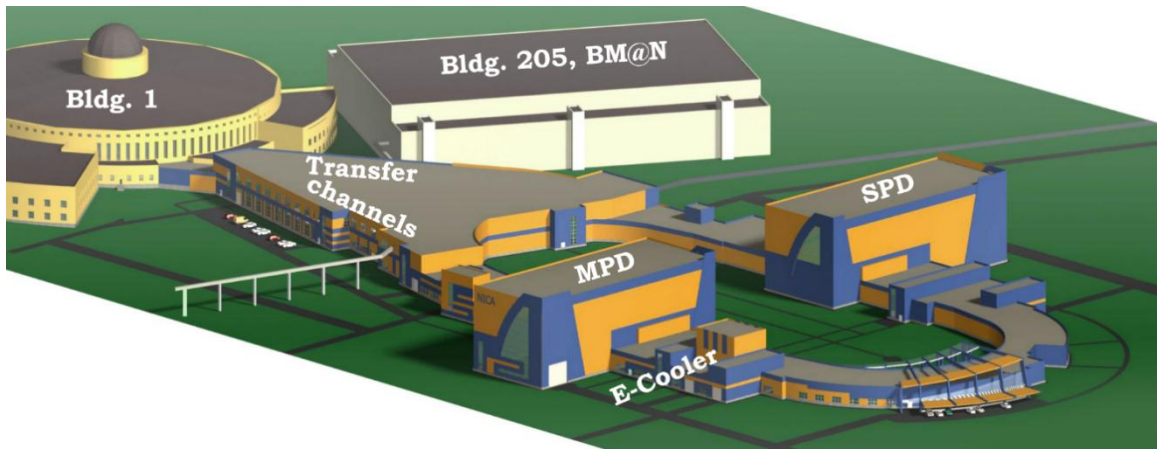


Fig. A.1.1.7.5.1. The NICA facility at VBLHEP JINR

Collider will be operated at a fixed energy, also possibility to have slow-rate acceleration of an injected beam is foreseen. To provide required linearity of the field the maximum bending field is chosen to be of 1.8 T.

Two collider rings are placed one above the other and the beam superposition/separation is provided in the vertical plane. The distance between the ring median planes is chosen to be 32 cm. That is achieved with dipole and quadrupole magnets having two apertures in one yoke.

The ring has a racetrack shape with two arcs and two long straight sections. The minimum beta function in the interaction point is 35 cm. The ring acceptance is limited by aperture of the final focus lenses is not less than $40 \pi \text{ mm} \cdot \text{mrad}$. RMS bunch length in the collision mode is 60 cm. The inter-bunch distance is larger than 21 m.

The arc optic structure consisting of 12 regular cells of FODO type (Fig. A.1.1.7.5.2). The possibility to achieve required luminosity level is illustrated by the bunch parameters optimized for operation with Au^{79+} ions (Table A.1.1.7.5.1). The ring composition for the ion mode of operation is shown in Fig. A.1.1.7.5.3.

Table A.1.1.7.5.1. Parameters of the Collider optic structure and beams

Circumference of the ring, m	503.04		
Structure of the bending arc	FODO, 12 cells		
Number of bunches	22		
RMS bunch length, m	0.6		
β -function in IP, m	0.35		
Betatron frequencies, Q_x/Q_y	9.44/9.44		
Chromaticities, Q'_x/Q'_y	-33/-28		
Acceptance, π mm·mrad	40		
Momentum acceptance, $\Delta p/p$	± 0.010		
Critical energy factor, γ_{tr}	7.088		
Energy of Au ⁷⁹⁺ , GeV/u	1	3	4.5
Number of ions per bunch	$2 \cdot 10^8$	$2.4 \cdot 10^9$	$2.3 \cdot 10^9$
RMS momentum spread, $\Delta p/p$	$0.55 \cdot 10^{-3}$	$1.15 \cdot 10^{-3}$	$1.5 \cdot 10^{-3}$
RMS emittance, π mm·mrad	1.1/0.95	1.1/0.85	1.1/0.75
Luminosity, $\text{cm}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$	$0.6 \cdot 10^{25}$	$1 \cdot 10^{27}$	$1 \cdot 10^{27}$
IBS growth time, s	160	460	1800

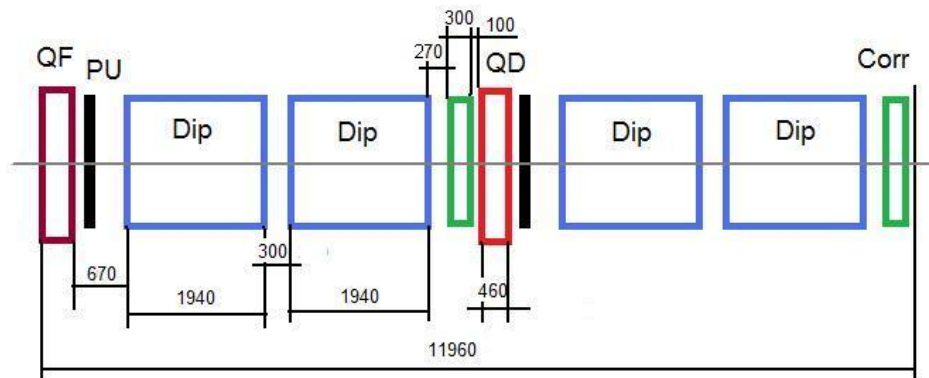


Fig. A.1.1.7.5.2. Scheme of the FODO periodic cell: QF, QD — focusing and defocusing quadrupoles, Dip — dipole magnets, PU — pick-up station, Corr — corrector pack

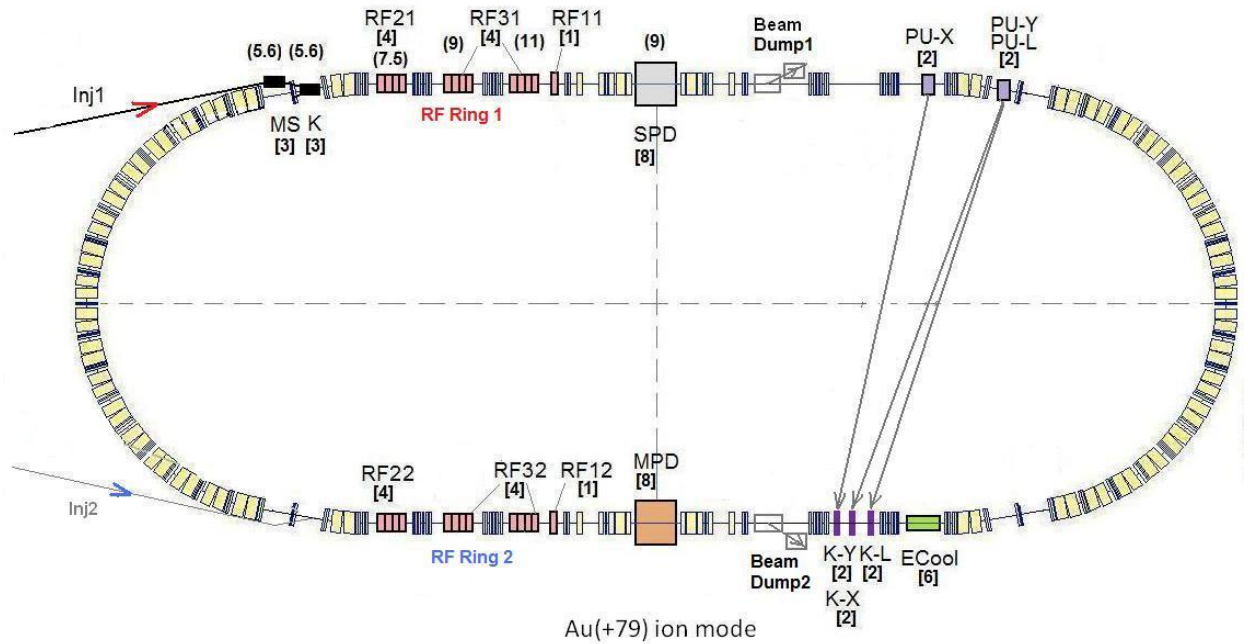


Fig. A.1.1.7.5.3. Scheme of the Collider ring with equipment and insertions.
Description is given in the text below

To provide the beam storage and bunch formation in the Collider 3 independent RF systems are used (Table A.1.1.7.5.2):

1. RF barrier bucket system (RF1) at 5 kV of the voltage amplitude, allowing storage of the required beam intensity.
2. 1st narrow-band RF system (RF2) operating at harmonics of revolution frequency corresponding to the bunch number; it provides the beam bunching and the bunch compression. Maximum voltage amplitude for this system is 100 kV.
3. 2nd narrow-band RF system (RF3) operating at harmonics number three times larger than the 1st one, that provides the bunch length necessary for collision experiments. Maximum voltage amplitude for this system is 1 MV.

Collider injection system consists of septum (MS) and kicker (K) which are placed in the “missing” dipole cell of the bending arc. The emittance of the injecting beam from Nuclotron is $\varepsilon_{x,y} = 1.2 \pi \text{ mm} \cdot \text{mrad}$.

For luminosity preservation in the heavy ion collision mode, electron (ECool) and stochastic cooling systems (PU-X, PU-Y, PU-L are the horizontal, vertical and longitudinal pick-ups, K-X, K-Y, K-L — corresponding kickers) are used. The electron cooling system will be used in the ion energy range from 1 to 4.5 GeV/u, the stochastic cooling — from 3 to 4.5 GeV/u. The band of the stochastic cooling system is from 2 to 4 GHz. The longitudinal degree of freedom will be cooled using Palmer method.

Table A.1.1.7.5.2. Main parameters of the Collider RF system

	RF1	RF2	RF3
Frequency, MHz	BB	10.5 ÷ 11.7	31.5 ÷ 35.1
Total voltage amplitude, kV	5	100	1000
Voltage per resonator, kV	5	25	125
Number of resonators per ring	1	4	8

A.1.1.7.6 SC magnets for the Booster and Collider

The Nuclotron-type design of SC magnets based on a window frame iron yoke and a saddle-shaped superconducting winding is chosen for both new rings of the NICA facility: for the Booster (Table A.1.1.7.6.1) and for the Collider (Table A.1.1.7.6.2).

Table A.1.1.7.6.1. Main characteristics of the Booster magnets

Characteristics	Dipoles	Quadrupoles
Number of magnets in the ring	40	48
Maximum magnetic induction, T (T/m, field gradient)	1.8	21.5
Effective magnetic length, m	2.2	0.47
Ramping rate dB/dt , T/s Gradient dG/dt , T/(m·s)	1.2 –	– 14.3
Field error $\Delta B/B$ ($\Delta G/G$) at $R = 30$ mm	$6 \cdot 10^{-4}$	
Beam pipe aperture hor./vert., mm/mm	128/65	
Pole radius, mm	–	47.5
Bending angle, deg	9	–
Radius of curvature, m	14.01	–
Yoke width, m	0.31	0.226
Yoke height, m	0.228	0.226
Overall weight, kg	1030	110
Current at maximum field (field gradient), kA	9.68	
Number of turns in the winding	10	8
Inductance, μH	630	96
Vacuum shell outer diameter, mm	540	
Dynamic heat release, W	8.4	0.8
Static heat leak (with non-structural element), W	4.4	3.0
Cable cooling channel diameter, mm	3.0	
Helium pressure drop in the winding, kPa	≤ 27	
Maximal temperature of helium in the winding, K	4.65	

Table A.1.1.7.6.2. Main characteristics of the Collider lattice magnets

Characteristics	Dipole	Quadrupole
Number of magnets in the ring	80	86 + 12
Maximum magnetic induction, T (field gradient, T/m)	1.8 –	– 23.1
Effective magnetic length, m	1.94	0.47
Ramp rate dB/dt , T/s	≤ 0.5	–
Field error $\Delta B/B$ ($\Delta G/G$) at $R = 30$ mm	$\leq 2 \cdot 10^{-4}$	
Beam pipe aperture hor./vert., mm/mm	120/70	
Pole radius, mm	–	47.5
Bending angle, deg	4.5	–
Yoke width, m	0.302	0.300
Yoke height, m	0.548	0.594
Distance between the beam orbits, m	0.32	
Overall weight, kg	1670	250
Current at maximum field (field gradient), kA	10.4	
Number of turns in the winding	10	8
Inductance, μH	450	94
Vacuum shell outer diameter, mm	812	
Heat release, W	13	5.7
Helium pressure drop in the winding, kPa	≤ 27	
Maximal temperature of helium in the winding, K	4.65	

Final focus quadrupoles have the largest aperture (diameter 180 mm) due to the maximal β -function. There are 12 (4 triplets) final focus single-aperture quadrupoles in the rings. Maximal gradient is 19 T/m. Distance from the first quadrupole to the IP is 5.25 m.

Multipole corrector of the Collider contains up to 4 separate coils with the following characteristics:

- dipole (max. 0.15 T, correction of x, y-closed orbit), quadrupole (1 T/m, betatron tune shift), skew
- quadrupole (1 T/m, coupling correction), sextupole (150 T/m², chromaticity correction), octupole (400 T/m³ second order control). Correcting elements of 0.3 m long are placed next to the main quadrupoles in arc and straight sections (Fig. A.1.1.7.5.2). Inner pole tip radius is 66 mm.

A.1.1.7.7 Beam transfer channels

The transfer channel from the Booster to the Nuclotron has fully 3D geometry (Fig. A.1.1.7.7.1 and A.1.1.7.7.2). The channel has total length of about 24 m and includes:

- 4 dipole magnets, Lambertson magnet and 6 quadrupole lenses;
- target for the ion stripping (the stripping efficiency is about 80 %);
- beam dumper for ions at charge state less than bare nuclei;

steerers and beam diagnostic devices.

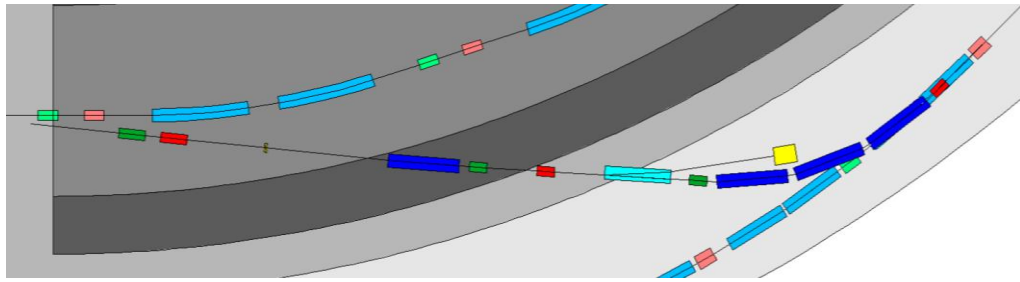


Fig. A.1.1.7.7.1. The transfer channel from the Booster to the Nuclotron. View from above

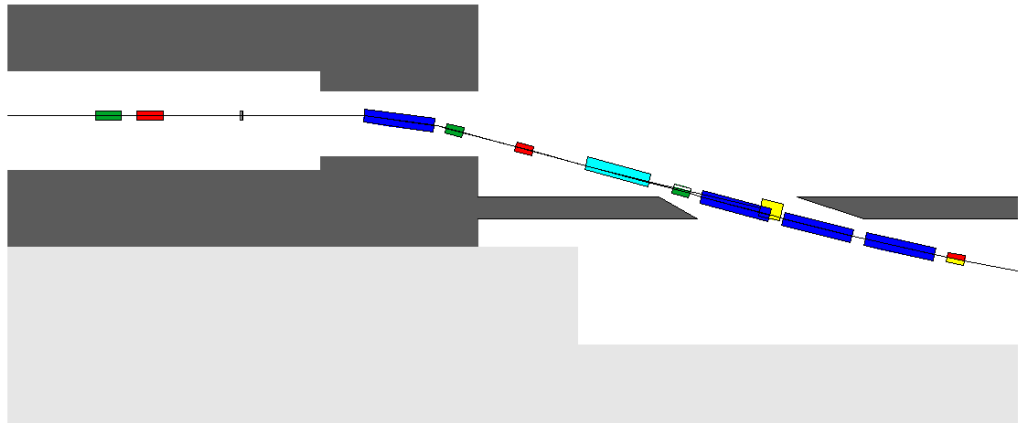


Fig. A.1.1.7.7.2. The transfer channel from the Booster to the Nuclotron. Vertical profile

The transfer channel from the Nuclotron to the Collider rings has the common part for both beams and two branches (Fig. A.1.1.7.7.3). The channel has total length of about 335 m and consists of 33 dipole magnets, 45 quadrupole lenses, steerers and beam diagnostic devices. It will be operated in the pulsed mode.

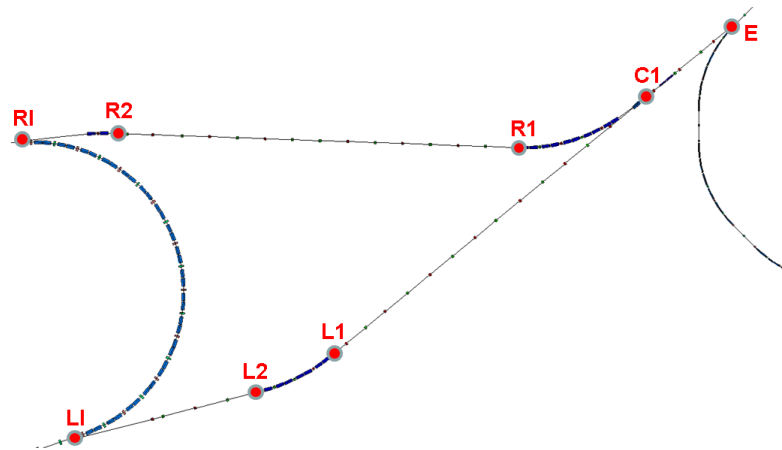


Fig. A.1.1.7.7.3. The transfer channel from the Nuclotron to the Collider. E — extraction point from the Nuclotron; C1 — the end of the common part; L1, L2 — the beginning and the end of the big arc in the left branch; R1 — the end of the big arc in the right branch; R2 — the beginning of the small arc in the right branch; L1, R1 — injection points into the collider rings from the left and right branches correspondingly

A.1.1.8 References

- [A.1.1] Conceptual Design Report of Nuclotron-based Ion Collider Facility (NICA), JINR, 2008.
- [A.1.2] Conceptual Design Report of MultiPurpose Detector, JINR, 2009.
- [A.1.3] V.V. Fimushkin et al., Eur. Phys. J., Special Topics, 162, 275, 2008; V.P. Derenchuk, A.S. Belov, in Proceedings of the Particle Accelerator Conference Chicago, 2001, p. 2093.
- [A.1.4] E.D. Donets et al., Electron string source of highly charged ions: Studies and the first test on a synchrotron, in Proceedings of EPAC2002, Paris, June 3-7, 2002, pp. 1700-1702.
- [A.1.5] V.V. Kobets, A.I. Govorov, G.V. Trubnikov, et al., Heavy ion injector for NICA/MPD project, Proceedings of the LINAC08, Victoria, BC, Canada, 2008, pp. 121-123.
- [A.1.6] H.G. Khodzhbagiyani and A.A. Smirnov, The concept of a superconducting magnet system for the Nuclotron, Proc. of the 12th Int. Cryogen. Eng. Conf., 1988, pp. 841-844; A.M. Baldin et al., Superconducting fast cycling magnets of the Nuclotron, IEEE Trans. on Applied Superconductivity, Vol. 5, 2, 1995, pp. 875-877.
- [A.1.7] A. Sidorin, V. Aleksandrov, O. Brovko, et al., Status of the Nuclotron. "Nuclotron-M" project, Proceedings of IPAC10, Kyoto, Japan, 2010, pp. 684-686.
- [A.1.8] Concept of NICA Collider, JINR, 2010.
- [A.1.9] S. Kostromin, O. Kozlov, I. Meshkov, V. Mikhailov, A. Sidorin, V. Lebedev, S. Nagaitsev, Yu. Senichev, Lattice of the NICA Collider Rings, Proceedings of IPAC10, Kyoto, Japan, pp. 690-692.

Приложение 2

к Главе 1

П.1.2 КОНЦЕПЦИЯ ДОСТИЖЕНИЯ ПРОЕКТНОЙ СВЕТИМОСТИ, ПРИМЕНЕНИЕ МЕТОДОВ ОХЛАЖДЕНИЯ ПУЧКОВ В ПРОЕКТЕ NICA

П.1.2.1 Введение

Задачи, структура и параметры ускорительного комплекса NICA описаны в гл. 1. Данное приложение имеет целью изложение концепции достижения в Коллайдере NICA проектной светимости с использованием методов охлаждения пучков заряженных частиц.

Охлаждение пучков предполагается в двух элементах комплекса NICA — Бустере и кольцах Коллайдере. Основными задачами Бустера являются накопление ионов $^{197}\text{Au}^{31+}$ до интенсивности примерно $4 \cdot 10^9$ частиц; ускорение их до энергии 600 МэВ/н, которой достаточно для полной обдирки ядер (повышение энергии инжекции и зарядового состояния ионов снижает требования к вакуумным условиям в Нуклотроне); формирование необходимого эмиттанса пучка с помощью системы электронного охлаждения. Две независимых системы охлаждения пучка — стохастическая и электронная — используются в Коллайдере. Ниже обсуждаются параметры систем охлаждения, оптимальный режим работы Коллайдера, особенности расположения элементов систем и их конструкции.

Ускорительный комплекс должен 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). В результате выполнения проекта, будет значительно увеличен потенциал существующего комплекса Нуклотрон во всех областях его исследовательской программы: в экспериментах с выведенным пучком на неподвижную мишень и в экспериментах с ионными пучками на внутренней мишени. Планируется также, что Бустер будет оснащён системой медленного вывода пучка для проведения широкого спектра прикладных исследований в медицине, биологии, радиационном материаловедении.

Коллайдер NICA (см. гл. 1 и 7) состоит из двух вертикально разнесённых колец, имеющих две общие прямолинейные секции и 2 точки встречи пучков (Interaction Point — IP). В первой IP устанавливается многоцелевой детектор MPD (MultiPurpose Detector) для исследования плотной барионной материи, во второй точке — детектор SPD (Spin Physics Detector) для исследований в области физики спина частиц. Кроме того, планируется режим с одновременной работой обоих детекторов: один из детекторов используется в качестве основного, второй — в качестве дополнительного.

В данном Приложении обсуждаются режимы работы комплекса NICA только с пучками тяжелых ионов. В качестве реперных частиц выбраны ионы золота. Предполагается, что Коллайдер будет работать в режиме накопителя на фиксированной энергии, выбираемой для эксперимента.

Возможность медленного ускорения или замедления ионного пучка (с темпом изменения магнитного поля не выше 0,2 Тл/с) предусмотрен для оптимизации режимов накопления и охлаждения пучка и здесь не рассматривается.

Для достижения требуемых параметров пучков необходимо использовать методы охлаждения пучков, как в Бустере, так и в кольцах Коллайдера. Прототип системы стохастического охлаждения высокоинтенсивных сгруппированных пучков испытан на Нуклотроне [П.1.2.1] при энергиях и интенсивностях, соответствующих параметрам коллайдера.

П.1.2.2 Система электронного охлаждения бустера. Режимы работы

В настоящее время инжекция ионов в Нуклотрон осуществляется из существующего линейного ускорителя. Минимальное отношение заряда к массе составляет 1/3 при энергии инжекции 5 МэВ/н. Это существенно ограничивает спектр ускоряемых ионов, интенсивность пучка, и максимальную энергию тяжелых ионов (до максимальной проектной энергии 4,5 ГэВ/н в Нуклотроне могут быть ускорены только полностью ободранные ядра). Для эффективного использования Нуклотрона сооружается новая инжекционная цепочка, для ускорения, прежде всего, ионов золота $^{197}\text{Au}^{31+}$ (гл. 1, п. 1.3):

- источник ионов на основе электронной струны,
- тяжёлоионный линейный ускоритель HILAC (Heavy Ion Linear Accelerator),
- Бустер.

Энергия ионов золота $^{197}\text{Au}^{31+}$, ускоренных в Бустере до 600 МэВ/н, достаточна для их обдирки в «голые» ядра с эффективностью примерно 80 %.

Бустер оснащён системой электронного охлаждения, которая может обеспечить режим накопления ионов на энергии инжекции и охлаждение пучка, для его дальнейшего эффективного использования, на некоторой промежуточной энергии.

Чтобы перекрыть весь диапазон энергий Бустера (до 600 МэВ/н), максимальная энергия электронного пучка должна составлять примерно 330 кэВ. Стоимость изготовления системы электронного охлаждения резко возрастает при увеличении энергии электронов выше 50 кэВ. В результате компромисса между стоимостью системы и её функциональными возможностями максимальная энергия электронного пучка в системе охлаждения была выбрана равной 54,5 кэВ, что соответствует энергии охлаждаемого ионного пучка 100 МэВ/н.

Электронное охлаждение ионов на энергии инжекции (3,3 МэВ/н, энергия электронов 1,8 кэВ) необходимо для накопления требуемой интенсивности частиц за счёт многократно повторяемых импульсов инжекции. Такой режим работы требуется, например, при инжекции ионов в высоком

зарядовом состоянии (ионы $^{197}\text{Au}^{51+}$), интенсивность которых на выходе из источника мала, или при накоплении поляризованных частиц с малой интенсивностью (например, $^3\text{He}^\uparrow$).

Охлаждение частиц на более высоких энергиях (до 100 МэВ/н) необходимо для обеспечения требуемых параметров пучков, выводимых из Бустера для экспериментов на неподвижной мишени. Кроме того, при работе в составе инжекционной цепочки Коллайдера, на энергии 100 МэВ/н меняется кратность ускорения в Бустере (для уменьшения диапазона перестройки частоты ускоряющего напряжения) и формируется одиночный сгусток с параметрами, необходимыми для его дальнейшего эффективного перевода в Нуклотрон (Рис. П.1.2.1). В этом случае электронное охлаждение позволяет получить требуемые значения эмиттанса и разброса частиц по импульсу.

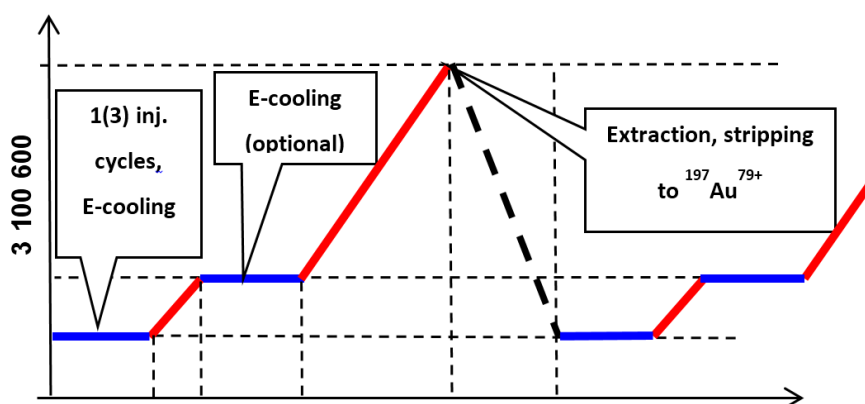


Рис. П.1.2.1. Рабочая диаграмма работы Бустера (ось ординат — энергия ионов в МэВ/н)

Бустер размещается внутри ярма магнита Синхрофазотрона, поэтому его оптическая структура, как и Синхрофазотрон, имеет 4 прямолинейные секции. В центре каждой прямолинейной секции располагается структурная квадрупольная линза. Магниты Системы электронного охлаждения (СЭО) предлагается выполнить в виде т.н. «тёплого» варианта, т.е. работающего при комнатной температуре. По этой причине в конструкции прямолинейного промежутка кольца Бустера предусматриваются специальные секции перехода «тепло-холод» в магнитно-криостатной системе. С учётом этих геометрических ограничений полная длина секции электронного охлаждения СЭО (с учётом тороидальных соленоидов) может составлять примерно 4 м. Остальные параметры СЭО Бустера достаточно типичны для подобных устройств низкой энергии (Таблица П.1.2.1). Ток электронного пучка при максимальной энергии электронов достигает 1 А, на энергии инжекции величина тока ограничена эффектами пространственного заряда и не превышает 100 мА. СЭО сконструирована и изготовлена в ИЯФ им. Г.И. Будкера СО РАН (Рис. П.1.2.2).

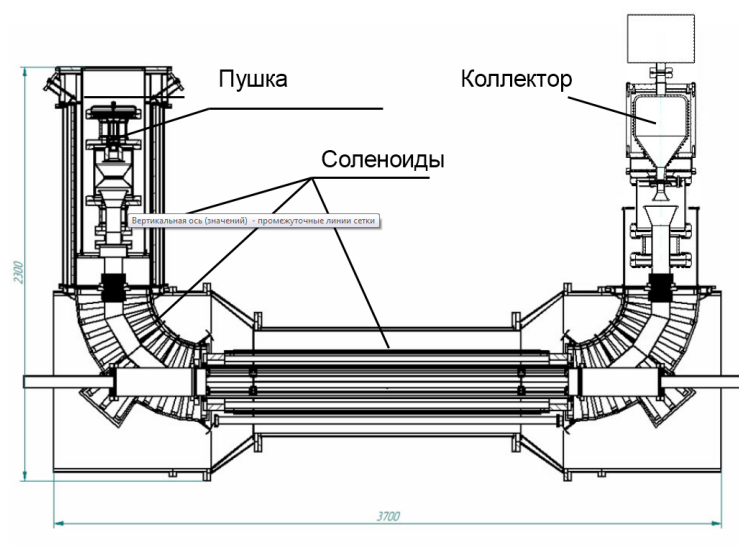


Рис. П.1.2.2. Схема системы электронного охлаждения Бустера

Таблица П.1.2.1. Основные параметры Бустера и его системы электронного охлаждения

Сорт ионов	$^{197}\text{Au}^{31+(65+)}$
Периметр Бустера, м	210,96
Энергия инжекции/вывода, МэВ/н	3/600
Максимальное поле в магнитах, Тл	1,8
Число ионов	$2 \cdot 10^9$
Эмиттансы и разброс по импульсу пучка ионов при инжекции в Бустер, π мм мрад	$10/10/10^{-3}$
Значение бета-функции в секции электронного охлаждения, м	8/8
Значение дисперсии в секции электронного охлаждения, м	0,6
Макс. энергия электронов, кэВ	50
Ток электронного пучка, А	$0 \div 1$
Полная длина секции охлаждения, м	4
Эффективная длина секции охлаждения, м	2,5
Магнитное поле в секции охлаждения, кГс	1,5
Неоднородность магнитного поля в секции охлаждения, $\Delta B/B$	$1 \cdot 10^{-4}$
Радиус электронного пучка, см	2,5
Поперечная температура электронного пучка, мэВ	200
Продольная температура электронного пучка, мэВ	0,5
Время охлаждения на энергии 100 МэВ/н, с	1,0
Давление остаточного газа, Торр	10^{-11}

Выбор режимов работы СЭО проводился методом численного моделирования эволюции фазового объема пучка с помощью программного кода BETACOOOL [П.1.2.2], разработанного в ОИЯИ. Код позволяет моделировать эволюцию параметров пучка ионов в ускорителях-накопителях при использовании электронного, стохастического, лазерного методов охлаждения с учётом эффектов внутрпучкового рассеяния, взаимодействия ионного пучка с ионами остаточного газа, влияния внутренней мишени и эффектов встречи пучков (для коллайдеров). Например, на энергии инжекции рассмотрен процесс охлаждения различных сортов ионов, которые можно получать в источнике КРИОН и ускорять в линейном ускорителе NILAC для инжекции в Бустер. Результаты моделирования показали, что для охлаждения ионного пучка наиболее подходит режим инжекции ионов золота с любым из зарядовых состояний 31+, 52+, 65+ на энергии 3 МэВ/н, охлаждение в

течение $3 \div 4$ с, доускорение и перевод сгустка в Нуклотрон (Таблица П.1.2.2). Пример результатов моделирования эволюции параметров ионного пучка с учётом эффектов: электронного охлаждения и внутривпучкового рассеяния представлен на Рис. П.1.2.3.

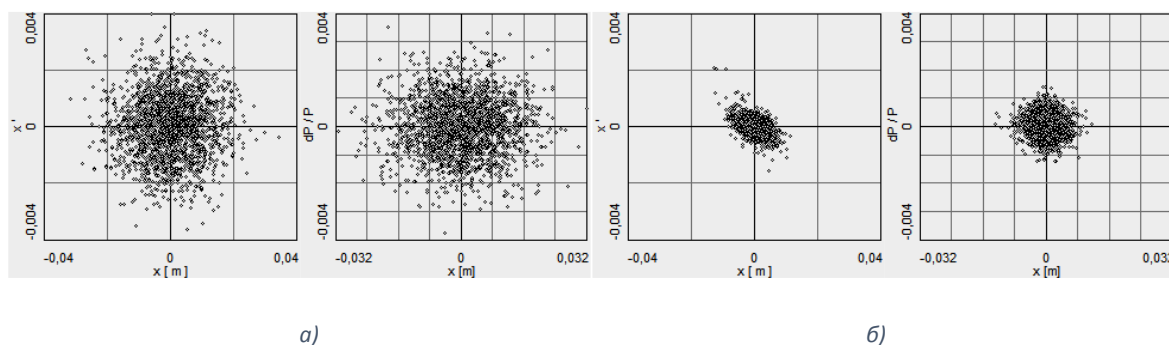


Рис. П.1.2.3. Результаты моделирования охлаждения для пучка ионов $^{197}\text{Au}^{31+}$ на энергии 3 МэВ/н: распределение частиц на фазовых плоскостях (x, x') и $(x, dp/p)$ до (а) и после охлаждения (б)

Таблица П.1.2.2. Величина тока электронного пучка и характерные времена охлаждения ионов золота различной зарядности на энергии инжекции 3 и 6.2 МэВ/н

Сорта ионов	Энергия ионов, МэВ/н	Ток электронного пучка, А	Время охлаждения	$\varepsilon_x/\varepsilon_z/dP/P$ охлаждённого пучка
$^{197}\text{Au}^{31+}$	3	0,05	3,2	0,42/0,36/2,6e-4
$^{197}\text{Au}^{52+}$		0,01	3,5	1,11/0,97/3,8e-4
$^{197}\text{Au}^{65+}$		0,005	4	1,66/1,63/4,9e-4
$^{197}\text{Au}^{31+}$	6,2	0,05	7	0,26/0,28/2,2e-4
$^{197}\text{Au}^{52+}$		0,01	9	0,74/0,77/3,4e-4
$^{197}\text{Au}^{65+}$		0,005	10	1,45/1,45/4,4e-4

При электронном охлаждении пучков тяжелых ионов одна из наиболее серьезных проблем — их рекомбинация с электронами охлаждающего пучка. Захват ионом электрона в секции охлаждения приводит к изменению зарядового состояния и, в результате, потере иона из-за изменения положения его орбиты. Темп рекомбинации слабо зависит от энергии (процесс происходит в системе, движущейся со средней скоростью ионов и охлаждающих электронов). Оценки темпа рекомбинации ионов Au^{31+} при охлаждении на энергии 100 МэВ/н, сделанные на основе экспериментальных данных в работе [П.1.2.3], показывают, что в течение 1 секунды охлаждения потери ионов не превысят 10 %. Тем не менее, рассматривается возможность подавления рекомбинации за счёт увеличения температуры поперечной степени свободы электронов. Это может быть достигнуто различными способами: адиабатическим сжатием электронного пучка в магнитном поле СЭО, возрастающем от пушки к участку охлаждения, возбуждением ларморовского вращения электронов поперечным электрическим полем на выходе пушки, и использованием так называемого «полого» электронного пучка. Последнее снижает плотность электронов в центре пучка, где циркулируют уже накопленные ионы, оставляя её достаточно высокой на краю, куда производится новая инжекция. Достаточно эффективен также сдвиг энергии электронного пучка относительно ионного (см. детали в [П.1.2.3]).

П.1.2.3 Особенности структуры Коллайдера

Для изучения плотной барионной материи в столкновениях тяжёлых ионов, что является целью проекта NICA (см. Введение), требуется средняя светимость в диапазоне $10^{26} \div 10^{27} \text{ см}^{-2} \cdot \text{с}^{-1}$. Средняя светимость коллайдера вычисляется как:

$$\langle L \rangle = \frac{\int_0^{T_{\text{expr}}} L(t) dt}{T_{\text{expr}} + T_{\text{prep}}} \quad (\text{П.1.2.1})$$

Здесь T_{expr} — время проведения эксперимента, T_{prep} — время, требуемое для подготовки пучка. Отсюда следуют очевидные требования к структуре Коллайдера:

- обеспечение максимально большого пикового значения светимости,
- обеспечение времени жизни светимости много большего времени подготовки пучка.

Пиковая светимость тем больше, чем больше 6-мерный аксептанс кольца (подробнее см. следующий раздел). Применение систем коррекции нелинейностей магнитного поля Коллайдера и его хроматичности позволяет обеспечить поперечную динамическую апертуру не менее $120 \text{ п} \cdot \text{мм} \cdot \text{мрад}$ (Рис. П.1.2.4 а) и динамическую апертуру для относительного разброса по импульсу на уровне $\pm 1\%$ (Рис. П.1.2.4 б). Значение горизонтальной апертуры дипольного магнита Коллайдера было выбрано (с учётом стрелы прогиба траектории (сагитты), величины дисперсионной функции и бетатронного радиуса пучка в магнитах) так, чтобы обеспечить продольный аксептанс для разброса по импульсу не меньше $\pm 1\%$.

В процессе эксперимента уменьшение светимости может быть вызвано двумя процессами — гибелью частиц и увеличением фазового объёма сгустка.

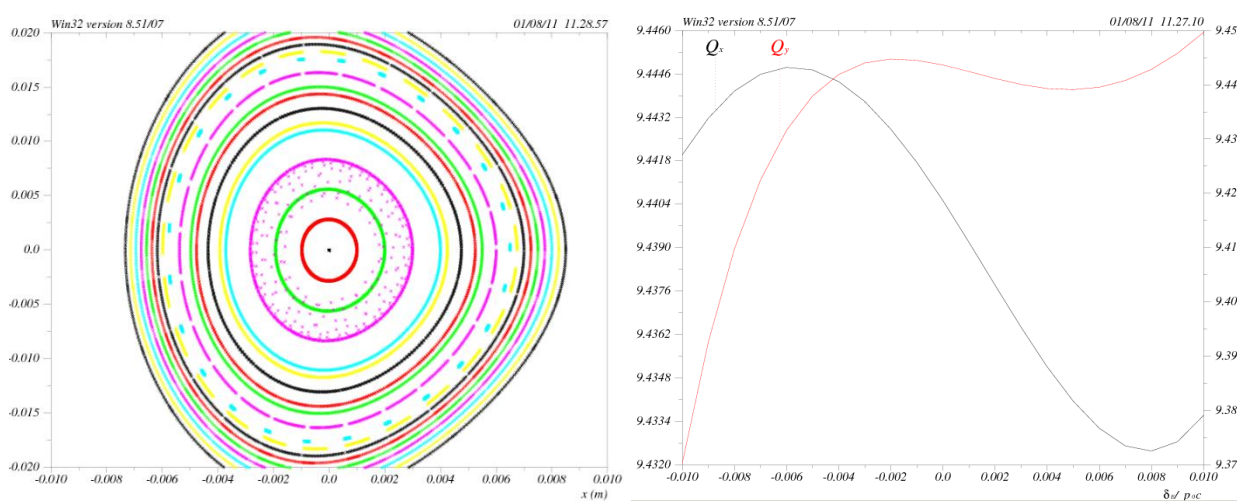


Рис. П.1.2.4. а) динамическая апертура Коллайдера NICA (горизонтальная фазовая плоскость), б) зависимость бетатронных частот от величины разброса по импульсу (в полном продольном динамическом аксептансе)

Рост фазового объёма пучка вызывается совместным действием многих эффектов: многократным рассеянием на атомах остаточного газа, шумами систем питания структурных магнитов колец и ВЧ

резонаторов, внутривпучковым рассеянием (ВПР), пересечением частицами нелинейных резонансов высокого порядка, и др. Для стабилизации фазового объёма сгустка применяют методы охлаждения пучков — стохастическое и/или электронное. В дальнейшем мы предполагаем, что охлаждение пучков должно уравнивать все эффекты нагрева. При равновесии между процессами нагрева и охлаждения, время жизни светимости определяется только временем жизни частиц.

Из всех процессов, приводящих к прямой гибели частиц, наиболее существенными являются однократное рассеяние на атомах остаточного газа на большие углы, и, при использовании электронного охлаждения, рекомбинация с охлаждающими электронами. Вакуумные условия в пучковых камерах коллайдера обеспечиваются так, чтобы время жизни пучка из-за рассеяния на атомах остаточного газа составляло несколько часов. Проектное время накопления пучка в каждом кольце составляет примерно $2 \div 3$ мин. Поэтому за счёт выбора оптимального времени эксперимента можно добиться, чтобы среднее значение светимости было близко к пиковому.

Таким образом, использование методов охлаждения пучка в кольцах коллайдера имеет две основных цели:

- накопление пучка с использованием процедуры охлаждения и стекинга пучка;
- поддержание требуемого уровня светимости в течение проведения эксперимента.

Накопление пучка требуемой интенсивности в Коллайдере планируется осуществлять в продольном фазовом пространстве с использованием «техники барьерных ВЧ напряжений» (гл. 7). Это позволит независимо обеспечить оптимизацию числа ионов в сгустке, числа сгустков, а также контроль за эмиттансом и разбросом частиц по импульсу в пучке в процессе формирования сгустка.

Достижение второй цели — более сложная задача. Ниже обсуждаются принципы выбора параметров сгустков в кольцах Коллайдера, обеспечивающих максимально достижимую пиковую светимость при проектном значении шестимерного аксептанса колец. А так же сценарий оптимального использования стохастического и электронного охлаждения, позволяющий обеспечить максимальное время жизни светимости при сканировании по энергии пучка во всем требуемом диапазоне.

П.1.2.4 Параметры сгустков и светимость Коллайдера

Проектное положение рабочей точки коллайдера выбрано вблизи резонанса связи, когда значения горизонтальной и вертикальной бетатронных частот близки. При наличии остаточной связи между степенями свободы (за счёт неидеальной расстановки и юстировки квадрупольных линз, влияния на пучок продольного поля в соленоиде детектора, и др.) это приводит к формированию пучка с близкими значениями горизонтального и вертикального эмиттансов. Подобный режим работы, в

частности, использовался в коллайдерах RHIC (Брукхейвен, США) и Теватрон (Лаборатория им. Ферми, США).

В случае идентичных сталкивающихся сгустков круглого сечения пиковая светимость описывается следующей формулой:

$$L = \frac{N_b^2}{4\pi\varepsilon\beta^*} F_{coll} f_{HG} \left(\frac{\sigma_s}{\beta^*} \right). \quad (\text{П.1.2.2})$$

Здесь N_b — число ионов в сгустке, ε — поперечный ненормализованный (геометрический) среднеквадратичный эмиттанс, β^* — значение бета-функции в IP, σ_s — среднеквадратичная длина сгустка. Частота столкновения F_{coll} определяется простой формулой:

$$F_{col} = \frac{\beta c}{l_{bb}}, \quad l_{bb} = \frac{C_{Ring}}{n_{bunch}}. \quad (\text{П.1.2.3})$$

Здесь β — скорость ионов в единицах скорости света, l_{bb} — расстояние между сгустками в кольце, C_{Ring} периметр кольца коллайдера, n_{bunch} количество сгустков в кольце. Фактор

$$f \left(\frac{\sigma_s}{\beta^*} \right) = \frac{1}{\sqrt{\pi}} \int_{-\infty}^{\infty} \frac{e^{-u^2} du}{1 + \left(\frac{u\sigma_s}{\beta^*} \right)^2}, \quad (\text{П.1.2.4})$$

описывает снижение светимости с ростом длины сгустка (так называемый эффект «песочных часов»), и его значение близко к единице, когда σ_s много меньше β^* .

Максимальная пиковая светимость достигается при выполнении следующих условий:

1. значение бета-функции в точке встречи минимально;
2. частота столкновений максимальна (что достигается, когда кольцо заполнено максимально возможным числом сгустков);
3. длина сгустка минимальна;
4. фазовая плотность частиц (N_b/ε) в сгустке максимальна;
5. интенсивность в сгустке предельно возможная.

Условия 5 и 3, 4 жёстко связаны между собой.

Минимальное расстояние между сгустками (и соответственно, максимальное число сгустков) ограничено требованием отсутствия паразитных столкновений на участке сведения пучков в окрестности IP. Расстояние от IP до дипольного магнита, сводящего пучки, равно 10,45 м. Соответственно, максимальное допустимое число сгустков в кольце Коллайдера при выбранном периметре 503,04 м равно:

$$n_{bunch,max} = \frac{C_{Ring}}{2I_{IP_FB}} = \frac{503,4}{20,9} = 24.$$

Чётное количество сгустков в кольце предпочтительно также и для того, чтобы можно было одновременно фиксировать события столкновения в обеих IP. Это нужно для перекрёстной верификации данных в детекторах.

Другое ограничение числа сгустков — возникновение т.н. «эффект электронных облаков», который может привести к потерям ионов из-за их перезарядки на электронах «облаков». В работе [П.1.2.4] показано, что параметры пучков в Коллайдере NICA несколько ниже порога образования «облаков».

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 и/или поперечную неустойчивость пучка.

Пороговый ток для развития продольной неустойчивости оценивается по формуле:

$$I \leq \frac{4F_1 A m c^2 \beta^2 \gamma |\eta| \sigma_p^2}{Z_l e Z}, \quad (\text{П.1.2.5})$$

Здесь: Z_l — продольный импеданс связи, включающий импеданс пространственного заряда:

$$Z_{L,sc} = \frac{Z_0 G_L}{2\beta\gamma^2} \text{ и импеданс вакуумной камеры. Величина } Z_0 = 377 \text{ Ом, } G_L = 1 + 2 \ln \frac{a}{r} \text{ — продольный}$$

форм-фактор, a — радиус вакуумной камеры, r — радиус пучка, e — заряд электрона, β и γ — релятивистские факторы, mc^2 — энергия покоя ядра, A — атомный номер, $\eta = \frac{1}{\gamma^2} - \frac{1}{\gamma_r^2}$ — т.н. слип-

фактор кольца, F_1 — коэффициент, зависящий от вида функции распределения. Гауссовому распределению соответствует $F_1 = 1$ («критерий Кайла-Шнелля»). Для функции распределения с большими «хвостами» F_1 может достигать значения 10. Среднеквадратичный относительный разброс по импульсу σ_p ограничен сверху аксептансом кольца.

В случае сгруппированного пучка критерий (П.1.2.5) ограничивает пиковый ток в сгустке, который связан с интенсивностью сгустка и его длиной как:

$$I_{peak} = \frac{ZeN_b}{T_{rev}} \frac{C_{Ring}}{\sqrt{2\pi}\sigma_s}, \quad (\text{П.1.2.6})$$

где T_{rev} — период обращения частиц в Коллайдере.

Пороговый пиковый ток развития поперечной когерентной неустойчивости определяется критерием Шнелла-Зоттера:

$$I \leq 4F_t \frac{A}{Z^2} \frac{mc^2 \gamma}{e|Z_t|} \frac{Q}{R} \delta Q, \quad (\text{П.1.2.7})$$

где R — средний радиус кольца, Q — бетатронная частота. Параметр Z_t — поперечный импеданс связи, включающий импеданс пространственного заряда и импеданс вакуумной камеры:

$$Z_t = -i \frac{Z_0 R}{\beta^2 \gamma^2} \left(\frac{1}{a^2} - \frac{1}{r^2} \right). \quad (\text{П.1.2.8})$$

Коэффициент F_t определяется аналогично коэффициенту F_l в формуле (П.1.2.5).

Разброс бетатронных частот δQ подавляет когерентную неустойчивость сгустка (вследствие эффекта затухания Ландау), и его увеличение приводит к росту порогового тока. Эффективный разброс бетатронных частот для n -ой моды когерентных дипольных колебаний

$$\delta Q \approx \sqrt{((Q-n)\eta + \xi)^2 \sigma_p^2 + \Delta Q_{sc}^2}, \quad (\text{П.1.2.9})$$

связан с хроматичностью кольца ξ , равной. Величина ΔQ_{sc} — некогерентный (т.н. «Ласлетовский») сдвиг частоты бетатронных колебаний из-за действия пространственного заряда (space charge) пучка (см. формулу (П.1.2.14) ниже). В качестве компромисса между двумя противоположными требованиями — устойчивости пучка и достижением проектного значения светимости — среднеквадратичная длина сгустка была выбрана равной 60 см.

Увеличение разброса по импульсу повышает порог развития когерентных неустойчивостей сгустка (формулы П.1.2.5, 7, 9) 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 формирования (удержания) сгустка. Среднеквадратичный относительный разброс по импульсу на уровне $\pm(1 \div 1.5) \cdot 10^{-3}$, соответствующий 1/6 аксептанса, представляется вполне приемлемым. При этом, за счёт оптимального выбора номера гармоники, требуемая амплитуда ВЧ напряжения может быть сохранена в пределах не более 1 МВ (Рис. П.1.2.5), что является технически реализуемым. Номер гармоники, равный 72, обеспечивает площадь сепаратриссы, достаточную для надёжного удержания частиц в её границах.

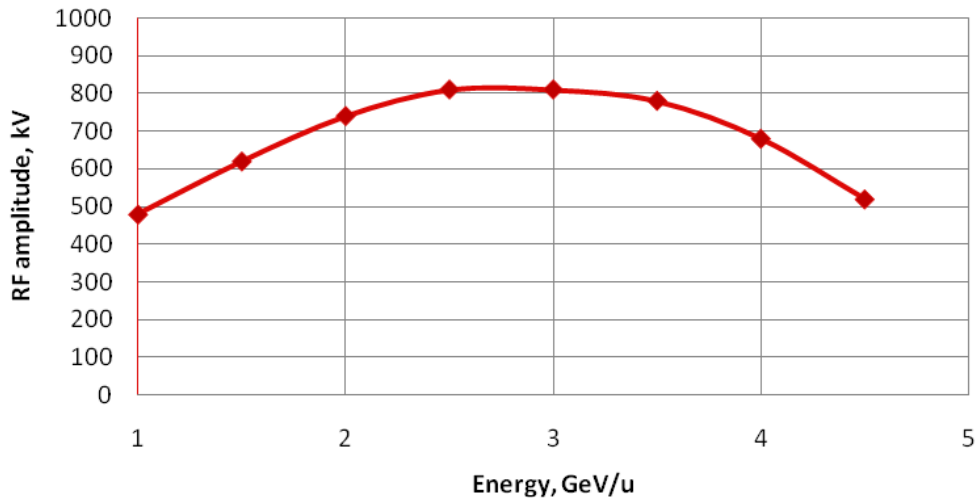


Рис. П.1.2.5. Зависимость требуемой амплитуды напряжения ВЧ системы от энергии пучка для согласования сгустка длиной 60 см. Разброс по импульсу изменяется с энергией в соответствии с Таблицей П.1.2.3 (см. ниже)

При выбранных параметрах продольного фазового объёма сгустка увеличение поперечного эмиттанса (с одновременным увеличением числа частиц) приводит к увеличению светимости (при одной и той же величине некогерентного сдвига частот бетатронных колебаний). Однако, возможности выбора эмиттанса существенно зависят от механизма нагрева сгустка, который должна компенсировать система охлаждения.

Как сказано выше, основными источниками нагрева являются ВПР и, при большой величине сдвига бетатронных частот ΔQ_{sc} , нелинейные резонансы высокого порядка. В зависимости от того, какой из этих эффектов преобладает, различают два крайних режима работы — с «доминированием ВПР» и «доминирование эффекта пространственного заряда» (ЭПЗ).

ВПР приводит к быстрой релаксации фазового объёма сгустка к состоянию, близкому к термодинамическому равновесию и, в дальнейшем, к относительно медленному одновременному росту эмиттансов и разброса частиц по импульсу с одинаковым темпом, определяемым параметрами оптической структуры. Таким образом, в режиме доминирования ВПР величины продольного и поперечного фазовых объёмов связаны друг с другом, и, при заданной величине разброса по импульсу, минимум темпа нагрева соответствует строго определённой величине эмиттанса.

В режиме доминирования ЭПЗ темпы роста фазового объёма существенно выше, чем в предыдущем случае. Однако, природа нагрева продольной и поперечных степеней свободы здесь различна, и эмиттанс сгустка можно выбирать независимо от разброса по импульсу.

Компенсация нагрева пучка в режиме доминирования ВПР требует существенно меньших темпов охлаждения, поэтому он представляется более предпочтительным при больших значениях энергии ионов, когда заметно проще достичь проектного значения светимости, используя стохастическое

охлаждение. При малых значениях энергии возможность увеличения светимости связана с переходом в режим доминирования ЭПЗ, а необходимый высокий темп охлаждения можно обеспечить за счёт применения электронного охлаждения.

Для оценки минимально необходимых времён охлаждения достаточно рассмотреть режим с доминированием ВПР. Характерные темпы нагрева для поперечных степеней свободы, определяемые как

$$\frac{1}{\tau_{x,y}} = \frac{1}{\varepsilon_{x,y}} \frac{d\varepsilon_{x,y}}{dt}, \quad (\text{П.1.2.10})$$

и для продольной степени свободы

$$\frac{1}{\tau_{\parallel}} = \frac{1}{\sigma_p^2} \frac{d\sigma_p^2}{dt}, \quad (\text{П.1.2.11})$$

могут быть представлены в следующем виде

$$\frac{1}{\tau_i} = \frac{NZ^4}{A^2 \beta^3 \gamma^4 \varepsilon_x \varepsilon_y \sigma_s \sigma_p} F_i(\varepsilon_x, \varepsilon_y, \sigma_p, \text{структурные функции}),$$

Здесь форм-факторы F_i рассчитываются путём усреднения по периметру кольца. Одинаковым темпам нагрева по всем трём степеням свободы соответствует строго определённое соотношение между эмиттансами и разбросом по импульсу, которое, в первом приближении, соответствует термодинамическому равновесию.

В данной статье характерные времена (темпы нагрева) ВПР вычислялись в соответствии с алгоритмом, предложенным в [П.1.2.5]. Выбранному значению разброса по импульсу соответствуют равновесные эмиттансы, близкие по величине к $1 \text{ п}\cdot\text{мм}\cdot\text{мрад}$ (Таблица П.1.2.3 ниже). Такое, относительно небольшое, значение эмиттанса позволяет вести работу коллайдера при малом значении бета-функции в точке встречи. Так, при величине бета-функции в точке встречи, равной 35 см, максимальная бета-функция в финальном фокусирующем триплете линз составляет примерно 200 м. При этом при технически реализуемых величине градиента (до 30 Тл/м) и геометрической апертуре линз финального фокуса геометрический аксептанс составляет около $40 \text{ п}\cdot\text{мм}\cdot\text{мрад}$. При среднеквадратичном размере пучка, равном $1/6$ радиуса апертуры, его эмиттанс составляет $1.1 \text{ п}\cdot\text{мм}\cdot\text{мрад}$. В дальнейших расчётах светимости предполагается, что при всех энергиях горизонтальный эмиттанс пучка равен этой максимально возможной величине. Соответствующие вертикальный эмиттанс и разброс по импульсу определяются условием равенства темпов нагрева ВПР.

При фиксированном фазовом объёме сгустка частиц светимость растёт пропорционально квадрату числа частиц в сгустке, которое ограничено сверху полным разрешённым некогерентным сдвигом бетатронной частоты

$$\Delta Q_{\text{total}} = \Delta Q_{sc} + 2 \cdot \xi. \quad (\text{П.1.2.12})$$

Здесь ξ — параметр эффекта встречи (ПЭВ) пучков, множитель 2 — поскольку в Коллайдере две IP. Линейная часть ПЭВ для круглых пучков равна

$$\xi = \frac{Z^2 r_p}{A} \frac{N_b}{4\pi\beta^2 \gamma \varepsilon} \frac{1 + \beta^2}{2}, \quad (\text{П.1.2.13})$$

где Z , A и r_p — зарядовое число, атомный номер иона и классический радиус протона соответственно.

Для выбранной рабочей точки Коллайдера предельное значение ΔQ_{total} составляет примерно 0,05.

Ласслетовский сдвиг бетатронной частоты ΔQ_{sc} может быть оценён по следующей формуле:

$$\Delta Q_{sc} = -\frac{Z^2 r_p}{A} \frac{N_b}{4\pi\beta^2 \gamma^3 \varepsilon} F_{sc} F_b, \quad (\text{П.1.2.14})$$

здесь, F_{sc} — фактор, корректирующий силы со стороны изображения сгустка (обычно $F_{sc} \sim 1$), F_b — фактор группировки:

$$F_b = \frac{C_{Ring}}{\sqrt{2\pi\sigma_s}}. \quad (\text{П.1.2.15})$$

В диапазоне энергий ионов Коллайдера NICA ΔQ_{sc} примерно на порядок больше ξ . Выразив светимость (П.1.2.2) через ΔQ_{sc} , получаем следующее выражение:

$$L = 8\pi^2 \beta^5 \gamma^6 \Delta Q_{sc}^2 \frac{A^2}{Z^4} \frac{\varepsilon C}{r_p^2 \beta^* l_{bb}} \left(\frac{\sigma_s}{C_{Ring}} \right)^2 f_{HG}. \quad (\text{П.1.2.16})$$

Отсюда видно, что в режиме доминирования ВПР (т.е. при постоянном эмиттансе) светимость зависит от энергии пучка приблизительно как $\beta^5 \gamma^6$. Это приводит к снижению светимости на энергии 1 ГэВ/н почти на два порядка (Таблица П.1.2.3).

Таблица П.1.2.3. Параметры пучка и оценки светимости коллайдера при столкновении ионов

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, $\Delta p/p$	$\pm 0,01$		
Гамма критическая, γ_{tr}	7,091		
Энергия ионов, ГэВ/н	1,0	3,0	4,5
Число ионов в сгустке	$2,75 \cdot 10^8$	$2,4 \cdot 10^9$	$2,2 \cdot 10^9$
Среднеквадратичная разброс по импульсу, 10^{-3}	0,62	1,25	1,65
Среднеквадратичная эмиттанс пучка (гориз./верт.), ненормализованный, π мм·мрад	1,1/1,01	1,1/0,89	1,1/0,76
Светимость, $10^{27} \text{ см}^{-2} \cdot \text{с}^{-1}$	0,011	1	1
Характерные времена роста ВПР, с	186	702	2540

П.1.2.5 Время жизни светимости и стратегия охлаждения

Для обеспечения большого времени жизни светимости необходимо, чтобы характерные времена охлаждения пучка были равны (или меньше) ожидаемым характерным временам нагрева за счёт ВПР. Из возможных вариантов структуры Коллайдера близкими к оптимальным оказались две структуры — с ячейками типа ФОДО и типа Триплет. Для этих структур зависимость характерных значений времени нагрева от энергии ионов оказалась близкой (Рис. П.1.2.8).

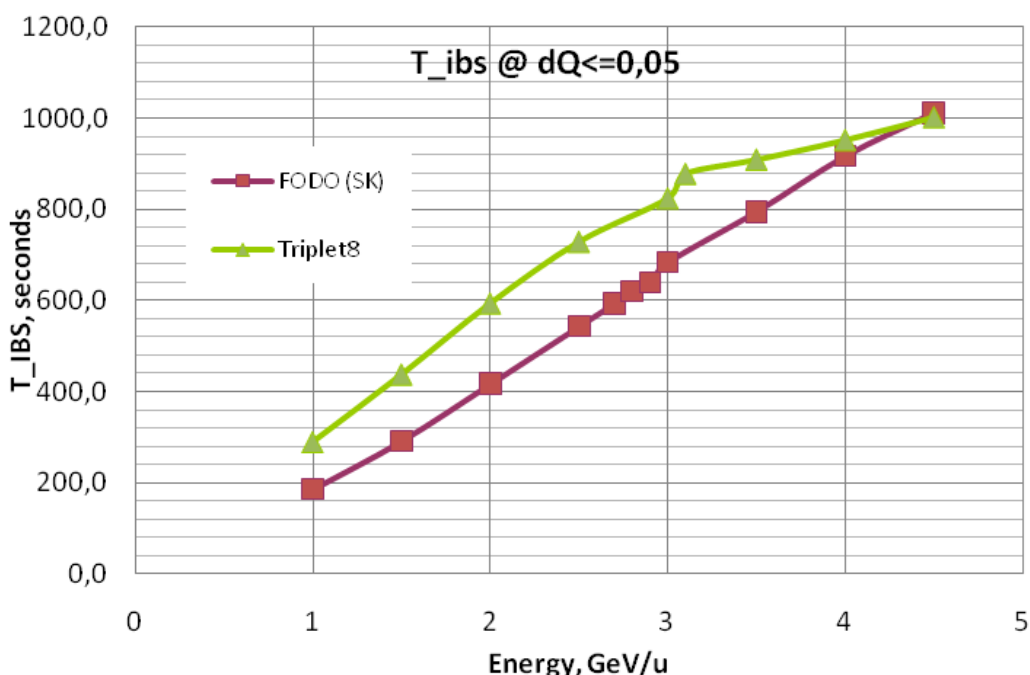


Рис. П.1.2.6. Ожидаемые характерные времена нагрева за счет ВПР при максимальной достижимой светимости для двух различных оптических структур (ФОДО и Триплет)

В диапазоне энергий от 3 до 4,5 ГэВ/н, где светимость соответствует проектной величине $L \geq 1 \cdot 10^{27} \text{ см}^{-2} \cdot \text{с}^{-1}$, система охлаждения должна обеспечить время охлаждения $\tau_{cool} \leq 500 \text{ с}$, что, согласно оценкам, может быть достигнуто за счёт стохастического охлаждения с полосой частот $3 \div 6 \text{ ГГц}$. При этом равновесные параметры сгустка достигаются в режиме доминирования ВПР.

Единственный путь повышения светимости на низких энергиях (см. формулу П.1.2.16) и переходом в режим доминирования ЭПЗ — оптимизация параметров сгустка (увеличение эмиттанса пучка и др.) и значения бета-функции в IP в зависимости от энергии эксперимента. Для полного подавления ВПР характерные времена охлаждения должны здесь быть на порядок меньше, чем темпы нагрева — около 10 с на энергии 1 ГэВ/н. Столь быстрое охлаждение может быть обеспечено только за счёт использования электронного охлаждения. Например, эмиттанс пучка можно увеличить до значения $3 \pi \cdot \text{мм} \cdot \text{мрад}$, определяемого максимальной динамической апертурой. При этом увеличивается допустимое число частиц в сгустке, в соответствии с выбранным значением ΔQ (П.1.2.13-16) При прочих равных параметрах, светимость будет линейно расти с ростом эмиттанса. Однако, чтобы избежать ограничений по апертуре, необходимо одновременно увеличивать значение бета-функции в IP, перестраивая градиент квадрупольных линз финального фокуса. Их геометрический аксептанс можно оценить, как

$$A \approx \frac{a^2}{\beta_{\max}}. \quad (\text{П.1.2.17})$$

Здесь a — апертура линзы, β_{\max} — значение бета-функции в линзах финального триплета, который связан с бета-функцией в IP как

$$\beta_{\max} \approx \beta^* + \frac{l_{tr}^2}{\beta^*}, \quad (\text{П.1.2.18})$$

где l_{tr} — расстояние от триплета до точки встречи. Чтобы увеличить геометрический аксептанс до размера динамического аксептанса, бета-функцию в IP нужно увеличить до от 0,35 м до 1 м. Светимость в этом случае падает как

$$L \propto \frac{\varepsilon}{\beta^*} f_{HG} \left(\frac{\sigma_s}{\beta^*} \right) \propto \frac{a^2}{\left(\beta^* + \frac{l_{tr}^2}{\beta^*} \right) \beta^*} f_{HG}. \quad (\text{П.1.2.19})$$

Эта зависимость (Рис. П.1.2.7) показывает, что увеличение эмиттанса и бета-функции в IP даёт

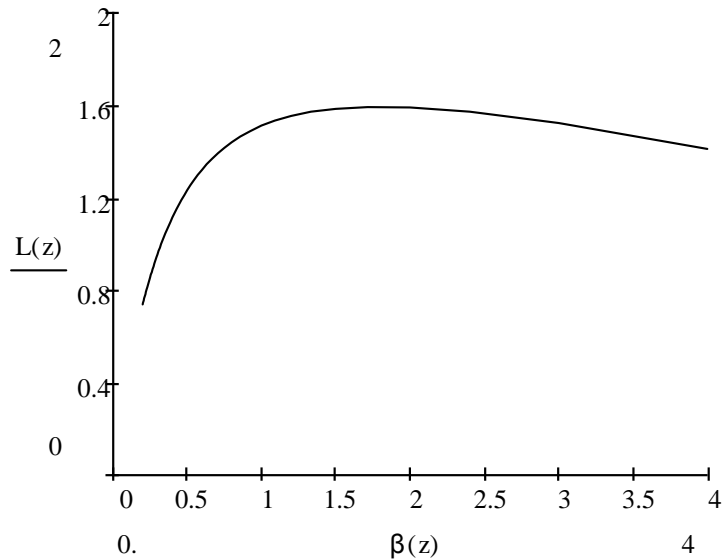


Рис. П.1.1.2.7. Зависимость светимости (нормализованной на значение при бета-функции в точке встречи $\beta^* = 35$ см) от величины бета-функции (метр)

увеличение светимости дополнительно до 60 %. Дальнейшее увеличение светимости может быть получено только при увеличении апертуры линз финального фокуса. При этом в режиме доминирования ЭПЗ светимость может быть примерно в три раза выше (пропорционально увеличению эмиттанса пучка), чем в режиме доминирования ВПР.

П.1.1.2.6 Стохастическое охлаждение

Стохастическое охлаждение предлагается использовать в коллайдере главным образом, чтобы поддерживать высокую светимость при больших значениях энергии. Для этого система стохастического охлаждения (ССО) должна обеспечивать равенство времени охлаждения, меньшее времени нагрева за счёт ВПР.

Для охлаждения продольной степени свободы предпочтительнее использование метода Палмера, поскольку он позволяет работать в более широком динамическом диапазоне разброса частиц по импульсу, по сравнению с другими методами. При оптимальном коэффициенте усиления ССО (и в пренебрежении шумом усилителя) темп стохастического охлаждения для всех трех степеней свободы можно оценить, как [П.1.1.2.6]

$$\frac{1}{\tau} = \frac{W}{N_{eq}} \frac{(1 - 1/M_{pk}^2)^2}{M_{kp}}. \quad (\text{П.1.1.2.20})$$

Здесь $W = f_{\max} - f_{\min}$ — ширина полосы ССО. Для сгруппированного пучка эквивалентное число частиц N_{eq} вычисляется через фактор группировки (П.1.1.2.15):

$$N_{eq} = N \frac{C_{Ring}}{\sqrt{2\pi}\sigma_s}. \quad (\text{П.1.1.2.21})$$

Фактор «нежелательного» перемешивания частиц от пикапа к кикеру

$$M_{pk} = \frac{1}{2(f_{\max} - f_{\min})\eta_{pk}T_{pk}\frac{\Delta p}{p}}, \quad (\text{П.1.2.22})$$

задаёт предел на верхнюю частоту f_{\max} полосы системы:

$$f_{\max} \leq \frac{1}{2\eta_{pk}T_{pk}\frac{\Delta p}{p}}. \quad (\text{П.1.2.23})$$

Фактор «полезного» перемешивания частиц от кикера к пикапу

$$M_{kp} = \frac{1}{2(f_{\max} - f_{\min})\eta_{kp}T_{kp}\frac{\Delta p}{p}}, \quad (\text{П.1.2.24})$$

должен быть в идеальном случае максимальным, т.е. равным единице. Здесь, в формуле η_{pk} , η_{kp} , T_{pk} , T_{kp} — «парциальные» значения слип-фактора и времени пролёта участков от пикапа к кикеру и от кикера к пикапу, соответственно. Обычно при вычислении характерного темпа охлаждения в формулах П.1.2.22-24 полагают $\Delta p/p = 2\sigma_p$.

Для выбранной оптической структуры коллайдера выполнена оптимизация расстановки оборудования ССО: расстояние между пикапом и кикером, а также точки их расположения в кольце должны обеспечить практически нулевой парциальный слип-фактор между пикапом и кикером для подавления нежелательного перемешивания частиц во всём требуемом диапазоне значений энергии. Это может быть проиллюстрировано на примере охлаждения продольной степени свободы. В методе Палмера пикап размещается на входе в арку в точке с максимальной дисперсией, а кикер — в длинной прямолинейной секции на расстоянии 132 м. от пикапа по ходу пучка (Рис. П.1.2.8).

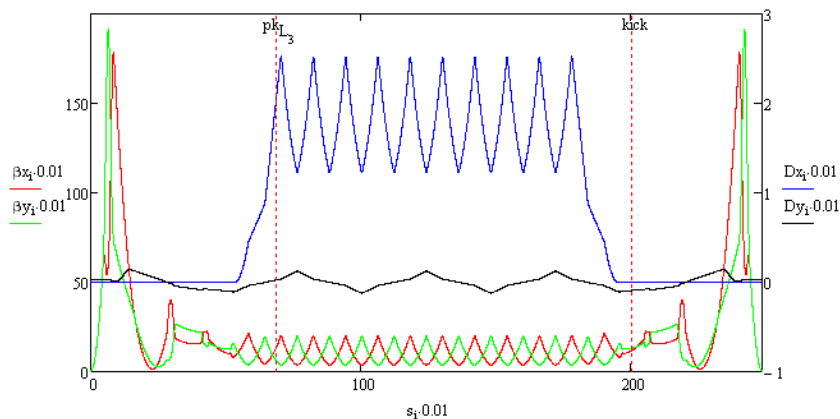


Рис. П.1.2.8. Параметры Твисса для половины периметра Коллайдера NICA; указаны точки размещения пикапа и кикера ССО продольной степени свободы

Точка расположения кикера выбрана так, чтобы при максимальной энергии (4,5 ГэВ/н) парциальный слип-фактор между пикапом и кикером имел небольшое отрицательное значение $\eta_{pk} = -2 \cdot 10^{-3}$, а при минимальной энергии использования ССО (3 ГэВ/н) небольшое положительное значение $\eta_{pk} = 5 \cdot 10^{-3}$. В таком случае практически полностью удаётся подавить нежелательное перемешивание частиц во всем диапазоне энергий, и, напротив, усилить полезное перемешивание частиц между кикером и пикапом (Рис. П.1.2.9).

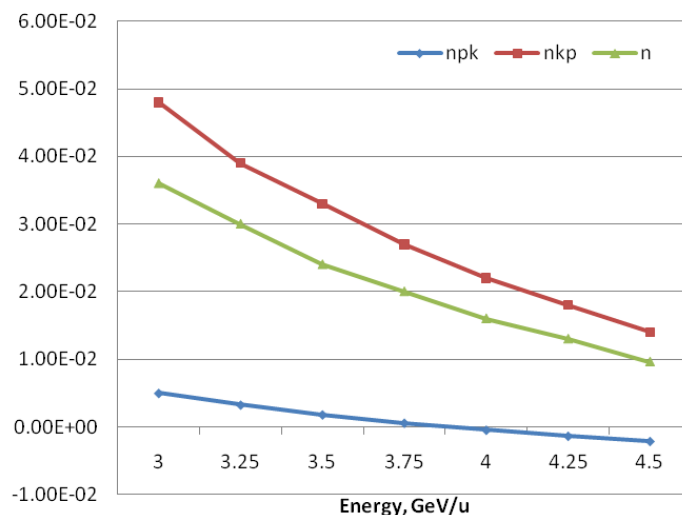


Рис. П.1.2.9. Расчётные зависимости от энергии полного слип-фактора (n_{pk}) и парциальных слип-факторов между пикапом и кикером (n_{pk}) и между кикером и пикапом (n_{kp})

При таком расположении кикера условие (П.1.2.23) для значения верхней полосы частот ССО даёт оценку равную 20 ГГц (при разбросе частиц по импульсу, равном динамической продольной апертуре кольца $\pm 0,01$). Это, фактически, означает, что для рассматриваемой оптической структуры полоса частот ССО может быть ограничена только лишь техническими возможностями. В нашем случае для достижения светимости на уровне $1 \cdot 10^{27} \text{ см}^{-2} \cdot \text{с}^{-1}$ необходимо иметь $2,3 \cdot 10^9$ ионов в сгустке, т.е. эффективное число ионов составляет $8 \cdot 10^{11}$ частиц. Таким образом, легко оценить, что для обеспечения характерных значений времени охлаждения в 2-3 раза меньше значений времени нагрева от ВПР достаточно полосы частот системы стохастического охлаждения $3 \div 6$ ГГц (Рис. П.1.2.10).

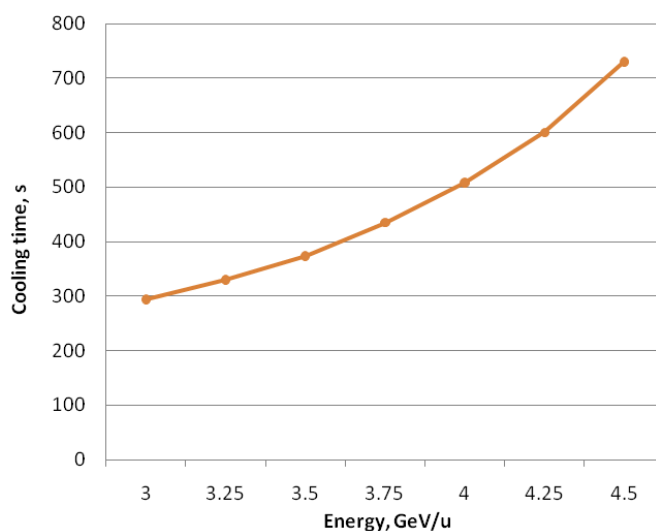


Рис. П.1.2.10. Зависимость характерного значения времени стохастического охлаждения от энергии ионов для полосы частот $3 \div 6$ ГГц

В Коллайдере NICA одна и та же пикап-станция может быть одновременно использована для ССО охлаждения как продольной, так и вертикальной степеней свободы. Кикер для ССО охлаждения вертикальной степени свободы располагается в длинной прямолинейной секции в точке с необходимым набегом фазы от пикапа. Расположение кикера ССО продольной степени свободы нечувствительно к выбору места относительно структуры кольца. В Коллайдере он расположен вблизи системы электронного охлаждения. Пикап-станция для ССО горизонтальной степени свободы располагается на входе в арку из прямолинейной секции, в точке с нулевым значением дисперсионной функцией. К для этой ССО — в прямолинейной секции на выходе из арки по ходу пучка, на расстоянии от пикапа, соответствующем необходимому набегу фазы.

П.1.2.7 Электронное охлаждение

Охлаждение электронным пучком необходимо для полного подавления нагрева от ВПР при низких значениях энергии и обеспечения работы Коллайдера в режиме доминирования ЭПЗ. В этом случае при небольшой величине разброса частиц по импульсу поперечный эмиттанс может сильно превышать значение, определяемое условием термодинамического равновесия между степенями свободы. Поэтому, в таком режиме работы светимость при малой энергии может быть значительно увеличена по сравнению с режимом доминирования ВПР.

Для технически реализуемых параметров системы охлаждения (Таблица П.1.2.4) во всем диапазоне энергии ионов были рассчитаны характерные времена электронного охлаждения с использованием «формулы В.В. Пархомчука» [П.1.2.7] (Рис. П.1.2.11, 12). В диапазоне энергии от 3 до 4,5 ГэВ/н время электронного охлаждения немного меньше времени ВПР-нагрева, и сравнимо с временем стохастического охлаждения. Однако в диапазоне низкой энергии ионов время электронного охлаждения примерно в 20 раз меньше времени ВПР. Поэтому применение

электронного охлаждения наиболее адекватно для обеспечения оптимального режима работы Коллайдера в этом диапазоне энергии.

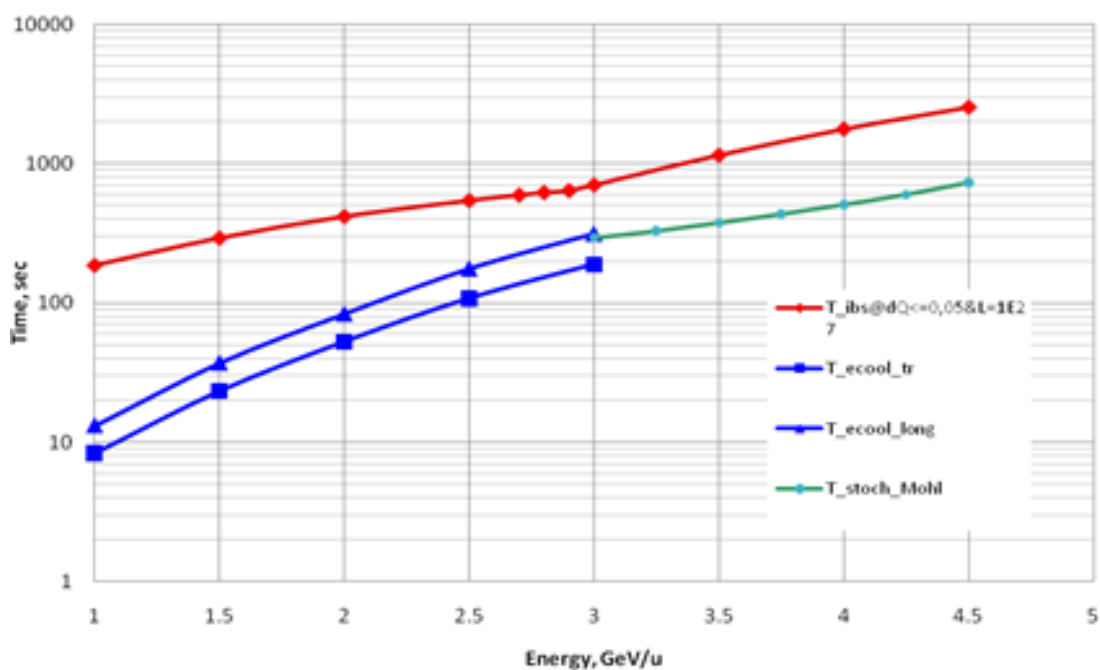


Рис. П.1.2.11. Характерные значения времени ВПР-нагрева в режиме доминирования этого эффекта и значения времени электронного и стохастического охлаждения в диапазонах энергии ионов 1 ÷ 3 ГэВ/н и 3 ÷ 4,5 ГэВ/н, соответственно; полоса частот ССО 3 ÷ 6 ГГц

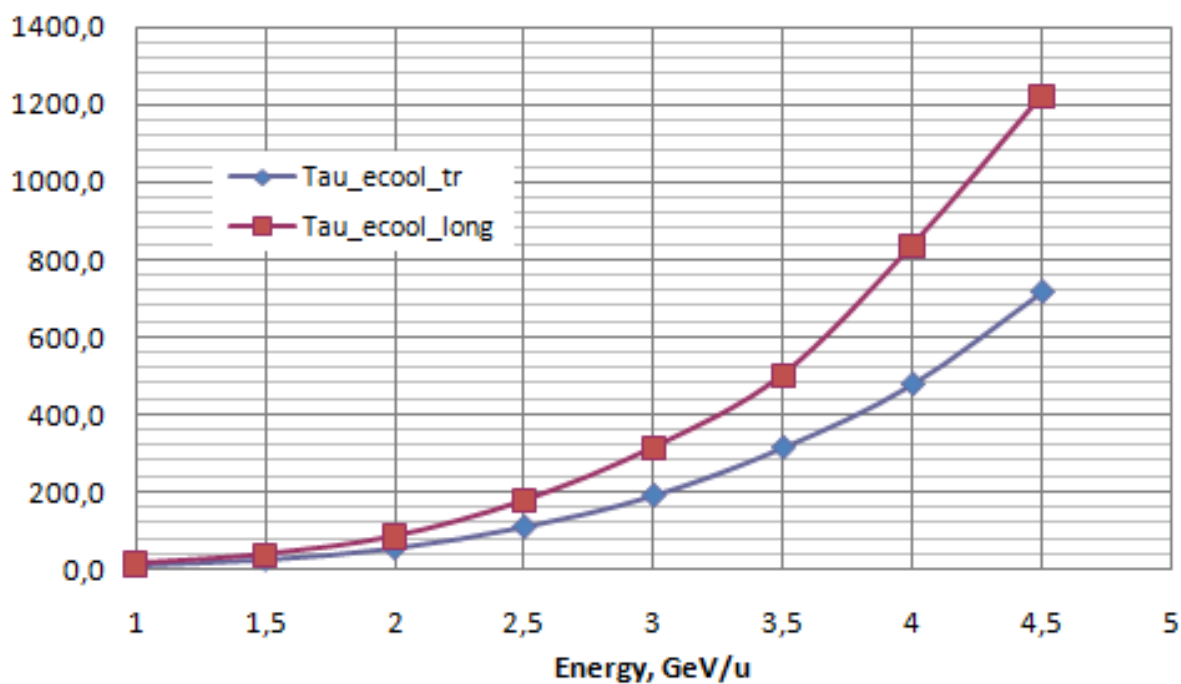


Рис. П.1.2.12. Зависимость времени электронного охлаждения для поперечной и продольной степеней свободы ионов от их энергии в диапазоне 1 ÷ 4,5 ГэВ/н

Таблица П.1.2.4. Основные параметры СЭО Коллайдера NICA

Максимальная энергия электронов, МэВ	1 ÷ 2,5
Стабильность энергии, $\Delta E/E$	10^{-5}
Эффективная длина участка охлаждения, м	6,0
Ток электронного пучка, А	0,5
Радиус электронного пучка, см	1
Магнитное поле в секции охлаждения, Тл	0,2
Неоднородность магнитного поля в секции охлаждения	$2 \cdot 10^{-5}$
Значение бета-функции в кулере (гориз./верт.), м	$(11 \div 13)/(13 \div 14)$
Поперечная температура электронов, эВ	50
Продольная температура электронов, мэВ	5,0
Время жизни ионов вследствие рекомбинации, ч	1

Основная проблема, которая должна быть решена для эффективного применения электронного охлаждения — подавление рекомбинации ионов с охлаждающими электронами в секции электронного охлаждения. Как сказано выше (п. П.1.2.1), потери ионов на рекомбинации могут быть значительны, а время рекомбинации слабо растёт с энергией — как Лоренц-фактор частиц. Там же описаны три метода подавления рекомбинации за счёт увеличения температуры электронов (Рис. П.1.2.13). Наиболее эффективные из них два последние — возбуждение ларморовского вращения и применение полого электронного пучка. Оба метода планируется использовать в СЭО Коллайдера.

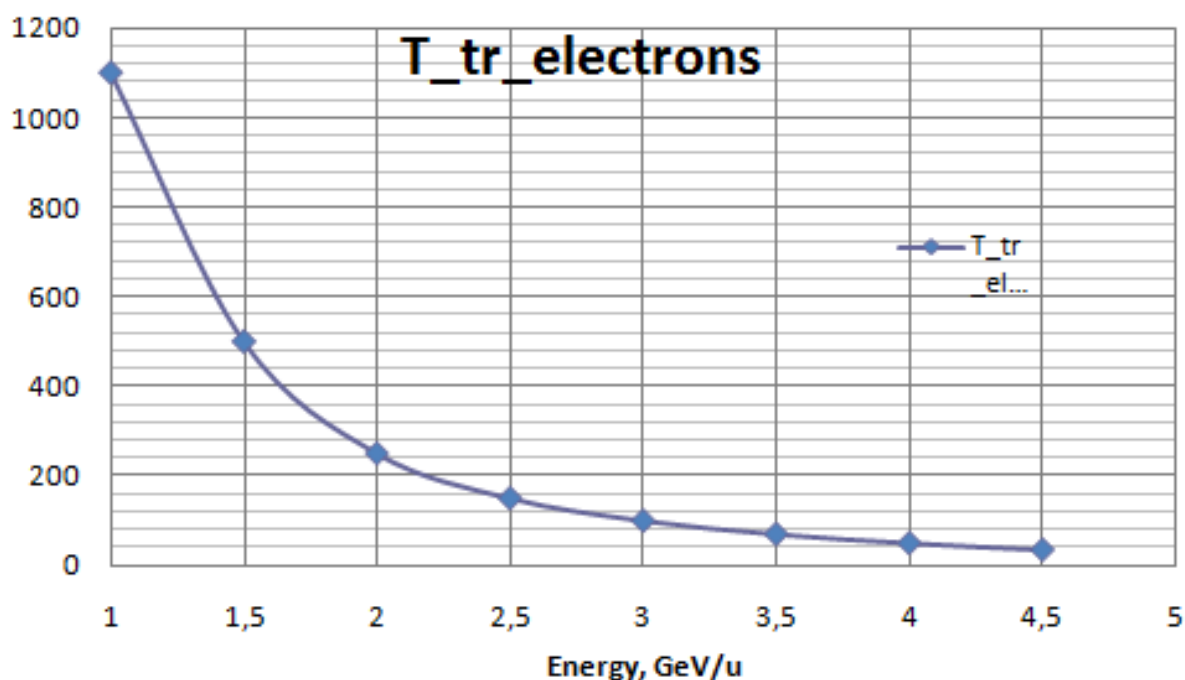


Рис. П.1.2.13. Зависимость от энергии поперечной температуры электронов в эВ, увеличивающей время жизни ионного пучка по рекомбинации до 10 ч

Величина магнитного поля в секции охлаждения, равная 0,2 Тл, требуется в основном для того, чтобы обеспечить адиабатическую транспортировку электронного пучка от высоковольтного источника в соленоид секции охлаждения. Кроме того, такая величина магнитного поля обеспечивает достаточно сильную замагниченность электронного пучка, что позволяет

осуществлять эффективное охлаждение при больших поперечных температурах электронов, необходимых для подавления рекомбинации. Темп охлаждения при использовании замагниченного электронного пучка определяется в основном температурой продольной степени свободы электронов (которая зависит в первую очередь от стабильности высоковольтного источника питания) и логарифмически зависит от поперечной.

Системы стохастического и электронного охлаждения Коллайдера детально описаны в гл. 7. Там же представлено описание экспериментов по стохастическому охлаждению лёгких ионов на Нуклотроне (2013 г.) и состояния разработок обеих систем охлаждения.

П.1.2.8 Заключение

Применение методов охлаждения пучков — ключевая особенность ускорительного комплекса NICA. Осуществление проекта требует новых схем и новых режимов работы устройств охлаждения пучков. И это — задача, которая решается с применением численного моделирования и экспериментальных исследований, с использованием прототипов систем охлаждения ионных пучков.

Системы электронного и стохастического охлаждения используются в Коллайдере для поддержания максимально возможной светимости во всем диапазоне энергии ионного пучка. Предлагаемый сценарий применения двух разных схем охлаждения создаёт возможность их оптимального использования. В диапазоне энергии ионов от 1 до 3 ГэВ/н система электронного охлаждения сможет обеспечить сравнительно короткое время охлаждения в режиме работы Коллайдера при доминировании эффекта пространственного заряда пучка. Высоковольтная система электронного охлаждения на энергию электронного пучка до 2,5 МэВ выглядит вполне реалистичной.

Разработка системы стохастического охлаждения Коллайдера осуществляется в коллаборации ОИЯИ с ЦЕРН и Исследовательским Центром г. Юлих (ФРГ). Система электронного охлаждения Коллайдера конструируется и разрабатывается в коллаборации ОИЯИ с ИЯФ им. Г.И. Будкера СО РАН, ВЭИ им. В.И. Ленина и Исследовательским Центром г. Юлих.

П.1.2.9 Литература

[П.1.2.1] А.С. Аверичев и др. Итоги 46-го и 47-го сеанса Нуклотрона, Препринт Р9-2013-140, с. 46.

[П.1.2.2] I. Meshkov, I. Seleznev, A. Sidorin, A. Smirnov, E. Syresin, G. Trubnikov, BETACOOOL program for simulation of beam dynamics in storage rings, A 558 (2006) 325-328.

[П.1.2.3] А.Б. Кузнецов, И.Н. Мешков, А.В. Филиппов, Радиационная рекомбинация ионов и ядер в системах электронного охлаждения, Письма в ЭЧАЯ, 2012, Т. 9, № 4-5(174-175). С. 576-585.

[П.1.2.4] А.В. Филиппов, В.А. Мончинский, А.Б. Кузнецов, Оценка эффекта электронных облаков для Коллайдера NICA, Письма в ЭЧАЯ, 2010, Т. 7, № 7(163), С. 788-792.

[П.1.2.5] S. Nagaitsev, Intrabeam scattering formulas for fast numerical evaluation, Physical Review Special Topics — Accelerators and Beams, 8, 064403 (2005).

[П.1.2.6] D. Möhl, Stochastic cooling of Particle Beams, Springer, ISSN 0075-8450, Lecture Notes in Physics.

[П.1.2.7] V. Parkhomchuk, New insights in the theory of electron cooling, NIM A 441 (2000).

Глава 2

Инъекционный

комплекс

АННОТАЦИЯ

Данный глава Технического проекта содержит план размещения оборудования, техническое описание структуры инжекционного комплекса установки NICA, его основных элементов и систем, характеристику необходимого стандартного оборудования. Структурно инжекционный комплекс состоит из двух независимых частей: существующего инжектора Нуклотрона на основе ускорителя ЛУ-20; вновь создаваемого инжектора тяжёлых ионов HILAC для Бустера.

2.1 СТРУКТУРА ИНЖЕКЦИОННОГО КОМПЛЕКСА

Инжекционный комплекс NICA [2.1] предназначен для:

1. инъекции в Бустер пучков тяжёлых ионов с отношением заряда к массе $q/A \geq 1/6$ и с энергией 3,2 МэВ/н;
2. инъекции в Нуклотрон пучков лёгких ионов с отношением заряда к массе $q/A \geq 1/3$ и поляризованных дейтронов и протонов с энергией 5 МэВ/н.

Структурно инжекционный комплекс состоит из двух независимых частей:

- существующего инжектора Нуклотрона на основе ускорителя ЛУ-20 с новым форинжектором RFQ;
- вновь создаваемого инжектора тяжёлых ионов Бустера — линейного ускорителя HILAC.

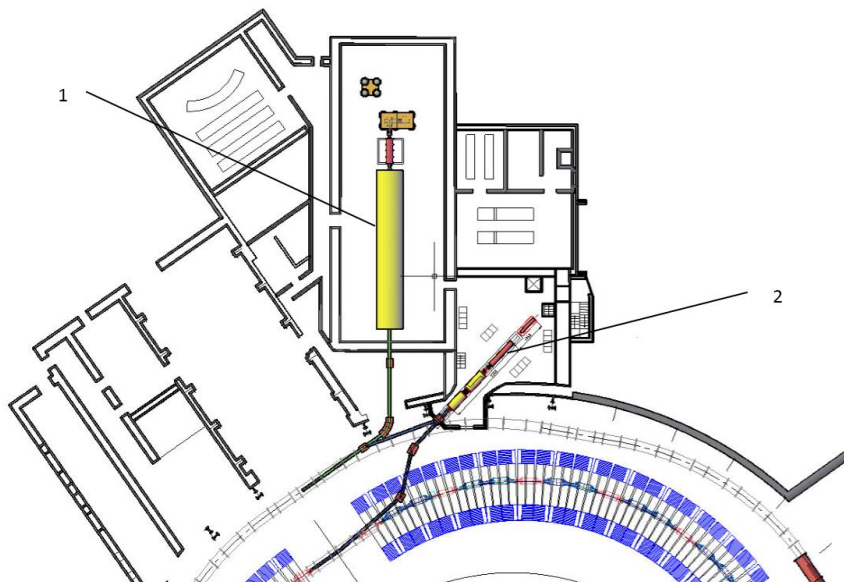


Рис. 2.1.1. Структура инжекционного комплекса: 1 — существующий линейный ускоритель ЛУ-20, 2 — вновь создаваемый ускоритель тяжёлых ионов HILAC

Для проведения необходимых НИР, настройки и тестирования элементов инжекционного комплекса создаются:

- испытательный стенд источника поляризованных протонов и дейтронов SPI;
- стенд измерения параметров и радиотехнической настройки нового форинжектора для ЛУ-20 на основе ПОКФ секции (далее по тексту RFQ);
- стендовый образец электронно-струнного источника высокозарядных ионов «КРИОН-6Тс»;
- стенд измерения параметров и радиотехнической настройки ускоряющей системы линейного ускорителя тяжёлых ионов.

2.2 ИНЖЕКТОР ЛЁГКИХ ИОНОВ И ПРОТОНОВ НУКЛОТРОН

Инжектор лёгких ионов и протонов создается на основе существующего инжекционного комплекса Нуклотрона и включает в себя (Рис. 2.2.1):

- источники ионов;
- новый форинжектор на основе RFQ секции с согласующими каналами;
- линейный ускоритель ЛУ-20 (структура Альвареца);
- канал транспортировки ионов в Нуклотрон.

В рамках выполнения проекта Нуклотрон-М проведены: первый этап модернизации вакуумной системы инжектора, частичная модернизация канала транспортировки и системы управления, начаты работы по модернизации ВЧ генератора «Родонит» и по созданию интенсивного источника поляризованных пучков протонов и дейтронов SPI [2.2, 2.3, 2.4, 2.5].

Для того, чтобы полностью удовлетворить требованиям ускорительно-коллайдерного комплекса NICA по надёжности работы и интенсивности пучков, необходимо провести следующие работы:

- завершение создания источника поляризованных пучков;
- полная замена существующего форинжектора для обеспечения возможности установки на нем источника поляризованных пучков;
- модернизация поляриметра и измерительного оборудования в канале транспортировки ионов на выходе ЛУ-20;
- модернизация ускоряюще-фокусирующей системы ЛУ-20;
- замена или глубокая модернизация физически и морально устаревшего оборудования системы ВЧ питания ЛУ-20.

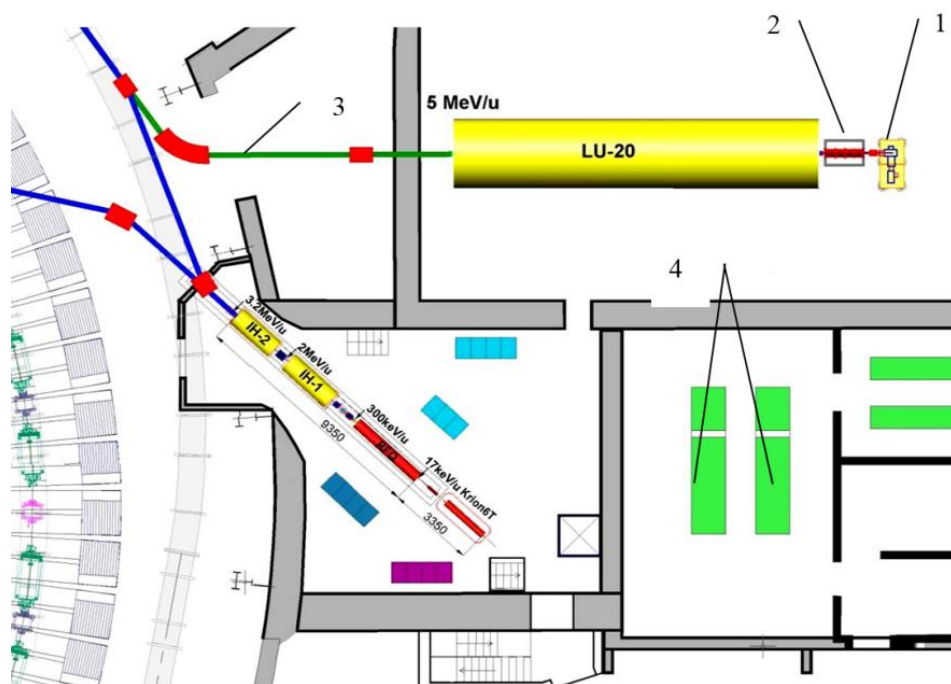


Рис. 2.2.1. Инжектор лёгких ионов и протонов: 1 — высоковольтная платформа ионного источника; 2 — секция RFQ, 3 — канал транспортировки пучка в Нуклотрон, 4 — ВЧ генератор «Родонит»

В данном проекте приводится краткое описание элементов инжектора. Основное внимание уделяется тем системам, модернизация которых планируется в процессе создания комплекса NICA.

2.2.1 Источники ионов

Для обеспечения инжекции неполяризованных пучков предполагается использование существующих источников ионов: дуоплазматрона и лазерного источника. Дуоплазматрон используется для получения пучков протонов, дейтронов и гелия с интенсивностью до 10^{11} частиц в импульсе, лазерный источник может производить пучки таких ионов, как ${}^6\text{Li}^{3+}$, ${}^7\text{Li}^{3+}$, ${}^{11}\text{B}^{5+}$, ${}^{12}\text{C}^{4+}$, ${}^{14}\text{N}^{5+}$, ${}^{16}\text{O}^{6+}$, ${}^{19}\text{F}^{7+}$, ${}^{24}\text{Mg}^{10+}$, ${}^{28}\text{Si}^{11+}$.

По программе развития поляризационных исследований спиновой физики высоких энергий в ЛФВЭ предполагается ускорение поляризованных пучков дейтронов и протонов на Ускорительном комплексе лаборатории с интенсивностью $\sim 10^{10}$ част/имп.

Однооборотный режим инжекции в Нуклотроне с короткими временами до 8 мкс потребовал повышение интенсивности поляризованного пучка в сравнении с параметрами криогенного источника поляризованных дейтронов «Полярис», который длительное время использовался для ускорения поляризованных дейтронов на Синхрофазотроне ОИЯИ.

Это вызвало необходимость разработки нового источника. Проект установки подготовлен в рамках программы по модернизации Нуклотрона и осуществляется при сотрудничестве с ИЯИ РАН (Москва) и использовании оборудования, переданного IUCF (Блумингтон, США) [2.6].



Рис. 2.2.2. Источник поляризованных протонов и дейтронов в стендовом экспериментальном зале во время испытаний

Источник положительно заряженных поляризованных ионов SPI (Source of Polarized Ions) работает по методу атомарного пучка с использованием зарядообменного плазменного ионизатора.

SPI будет генерировать пучок протонов и дейтронов с током на выходе до 10 мА. Степень поляризации частиц составит 90 % от максимального значения для векторной моды поляризации ± 1 тензорной $+1, -2$, соответственно. Источник позволит увеличить интенсивность пучка поляризованных дейтронов, ускоренных в Нуклотроне до 10^{10} частиц за цикл.

Программа работ включает в себя разработку универсальной установки по получению поляризованных пучков $D^+ \uparrow (H^+ \uparrow)$, модернизацию высоковольтной платформы в соответствии с выбранной схемой силового и высоковольтного электропитания, а также системы водяного охлаждения, обеспечение согласования SPI с RFQ-системой, создание системы дистанционного контроля и управления SPI на высоком потенциале с пульта управления ЛУ-20, поляриметрию в кольце Нуклотрона и на выведенном пучке.

2.2.2 Форинжектор

Существующий высоковольтный форинжектор питается от импульсного трансформатора с максимальным напряжением до 800 кВ. Ускоряющая трубка состоит из 56 алюминиевых диафрагм, разделённых порцелановыми кольцами. Диафрагмы соединены с водяным высоковольтным делителем напряжения. Ионные источники располагаются на высоковольтной платформе. Ускоряющая трубка соединяется с резонатором ускорителя ионопроводом, в котором установлены аксиально-симметричная магнитная линза, группирователь, двух-координатный магнитный корректор, датчик тока пучка и цилиндр Фарадея.

Для повышения эффективности и обеспечения работы источника поляризованных ионов с линейным ускорителем ЛУ-20 предполагается коренная модернизация существующего электростатического форинжектора, которая предполагает его замену на предварительный ускоритель с пространственно-однородной квадрупольной фокусировкой ПОКФ (RFQ). При этом сохраняются режимы ускорения в ЛУ-20 протонов и ионов с отношением заряда к массе $0,3 \leq Z/A \leq 0,5$ на второй кратности с конечной энергией 5 МэВ/н.

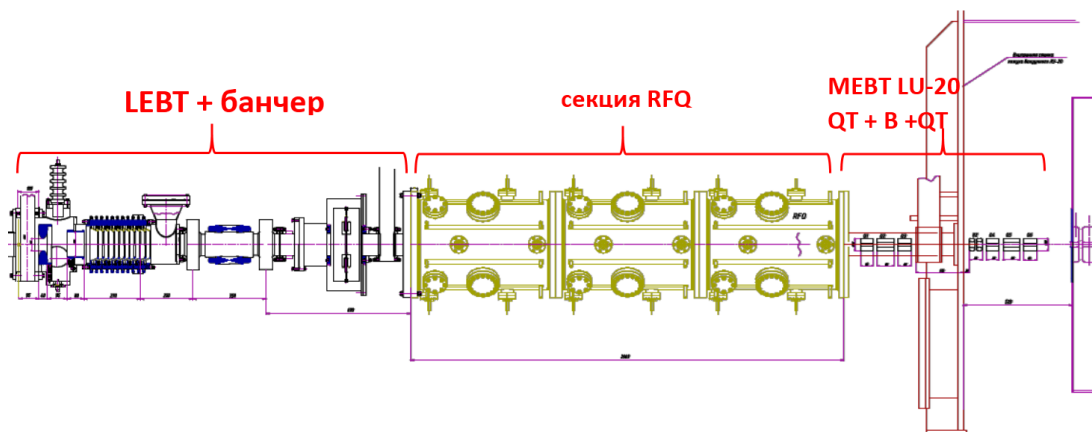


Рис. 2.2.3. Общий вид нового форинжектора ЛУ-20

Таблица 2.2.1. Параметры секции RFQ

Параметры на входе RFQ		
Z/A	0,5	0,3
Напряжение инжекции, кВ	≤ 150	≤ 150
Максимальный ток инжекции, мА	20	10
Нормализованный эмиттанс пучка, п·см·мрад	0,2	0,15
Параметры на выходе RFQ		
Энергия на выходе RFQ, МэВ/н]	0,156559	0,156559
Приведённая скорость на выходе RFQ	0,018332	0,018332
Коэффициент захвата RFQ, %	≥ 80	≥ 80
Разброс ионов по импульсу на выходе RFQ, %	±4	±4
Фазовая протяжённость сгустка на выходе RFQ, град, ($f = 145,2$ МГц)	≤ 90	≤ 90
Нормализованный акцептанс канала, п·см·мрад	0,5	0,5
Максимальная длина RFQ, м	≤ 3	≤ 3
Максимальное напряжённость поля на поверхности электродов, (в единицах Килпатрика)	1,3	2

2.2.2.1 Канал транспортировки ионов низкой энергии — LEBT

Канал транспортировки ионов низкой энергии (Low Energy Beam Transfer) служит для перевода пучка с минимальными потерями от ионного источника до секции RFQ. В процессе перевода производится предварительное ускорение ионов и согласование фазового портрета целевых ионов с акцептансом RFQ.

Канал транспортировки предназначен для работы с тремя типами ионных источников: 1) лазерным источником, 2) дуоплазмотроном, 3) источником поляризованных ионов. В Таблица 2.2.2

приведены основные параметры пучка в канале транспортировки в зависимости от используемого источника ионов.

Таблица 2.2.2. Основные параметры пучка в канале транспортировки ионов низкой энергии

Источник ионов	Лазерный источник	Дуоплазматрон	Источник поляризованных ионов
Ионы	лёгкие ионы, до Mg ¹⁰⁺	H ⁺ , D ⁺ , He ²⁺	H ⁺ ↑, D ⁺ ↑
Интенсивность	~ 10 ¹¹	H ⁺ , D ⁺ : ~ 5·10 ¹² ; He ²⁺ : ~ 10 ¹¹	5·10 ¹¹
Ток, мА	20	40	10
Энергия ионов на выходе, кэВ/заряд	150	150	150
Частота повторения, Гц	0,5	1	0,2
Эффективность перевода, %	90	90	90
Поперечный среднеквадратичный эмиттанс, π мм·мрад (на входе/на выходе)	~ 600/62	до 700/62	(100 ÷ 160)/62

Структура канала транспортировки представлена на Рис. 2.2.4. За начало канала транспортировки принят выходной электрод источника ионов.

Ионно-оптическая система канала транспортировки состоит из двух осесимметричных магнитных линз, двойного дипольного корректора, ускоряющей трубки, группирователя, вытягивающего и фокусирующего электродов. В начальной части канала с помощью электродов и ускоряющей трубки производится предварительное ускорение ионов. Продольное и поперечное согласование пучка с RFQ осуществляется магнитными линзами и группирователем. Коррекция траектории пучка производится двойным дипольным корректором.

Диагностика пучка в канале заключается в измерении его интенсивности и профиля. Для указанных целей используется узел диагностики.

Вакуумная система канала содержит узел откачки, два вакуумных шибера и ионопровод. Узел откачки предназначен для создания рабочего вакуума порядка 10⁻⁷ Торр и контроля давления в пучковом объёме форинжектора ЛУ-20. Вакуумные шиберы служат для отсекаания пучкового объёма канала от смежных источника ионов и секции RFQ.

Описание элементов ионно-оптической системы, узла диагностики и вакуумного оборудования канала приведено в Приложении 2.1.

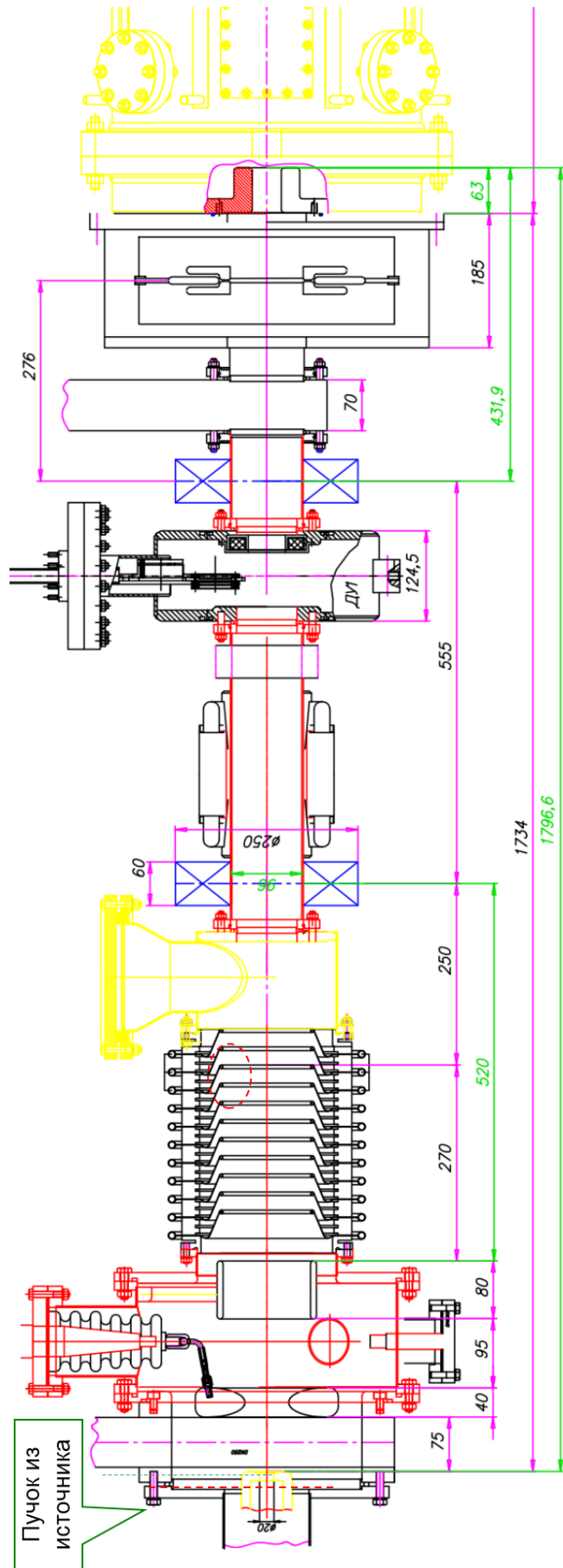


Рис. 2.2.4. Структура канала транспортировки ионов низкой энергии

Канал транспортировки предназначен для перевода пучков различных сортов ионов, параметры которых могут значительно отличаться друг от друга. Для определения характеристик элементов ионно-оптической системы канала было проведено моделирование динамики ионных пучков в канале транспортировки. Моделирование динамики ионов производилось программой MCIB04 [2.7]. Данная программа позволяет оптимизировать параметры ионно-оптических систем каналов транспортировки многокомпонентных пучков с учётом эффектов пространственного заряда, для чего используются метод моментов второго порядка фазового распределения ионов и метод «частица-в-ячейке». При расчётах динамики ионов использовались результаты моделирования электрических и магнитных полей в канале, приведенные в Приложении 2.1.

Было рассмотрено несколько вариантов ионных пучков. В Таблица 2.2.3 и Таблица 2.2.4 приведены параметры пучков на входе и выходе канала транспортировки.

Таблица 2.2.3. Параметры пучка на входе канала транспортировки ионов низкой энергии

Источник, сорт ионов	Z/A	Ток, мА	4 RMS ε_n , π мм мрад	Диаметр пучка, см	Энергия, кэВ/Z	v/c	RMS ε_{un} , π мм мрад	β , см/рад
Лазерный источник, $^{27}\text{Al}^{8+}$	0,3	20	2	1,9	1	0,00079	629,5	3,58
Дуоплазмотрон, $^2\text{D}^+$	0,5	50	4	0,5	1	0,00146	685	0,91
					25	0,00730	137	4,56
Источник поляризованных ионов, $^2\text{D}^+$	0,5	10	2	1,5	10	0,00326	153,2	9,18
Источник поляризованных ионов, p	1	10	2	1,5	5 (10)	0,00462	108	13,0

Таблица 2.2.4. Требуемые параметры пучка на входе RFQ

Z/A	I_{inj} , мА	4 RMS $\varepsilon_{n x, y}$, π мм мрад	$\alpha_{x, y}$, рад	$\beta_{x, y}$, см/рад	U_{inj} , кВ	v/c	RMS ε_{un} , π мм мрад	RMS x, y см
0,3	0	2	0,8818	6,8	103	0,00806	62	0,205
	20		0,9472	7,21				0,211
0,5	0	2	0,8818	6,8	61,8	0,00811	62	0,205
	10		0,9906	7,545				0,216
	50	4						
1	0	2	0,8818	6,8	31	0,00813	62	0,205
	10		0,9906	7,545				0,216

Ниже приведены некоторые результаты моделирования динамики поляризованных дейтронов и протонов. Более подробные результаты моделирования приведены в Приложении 2.1.

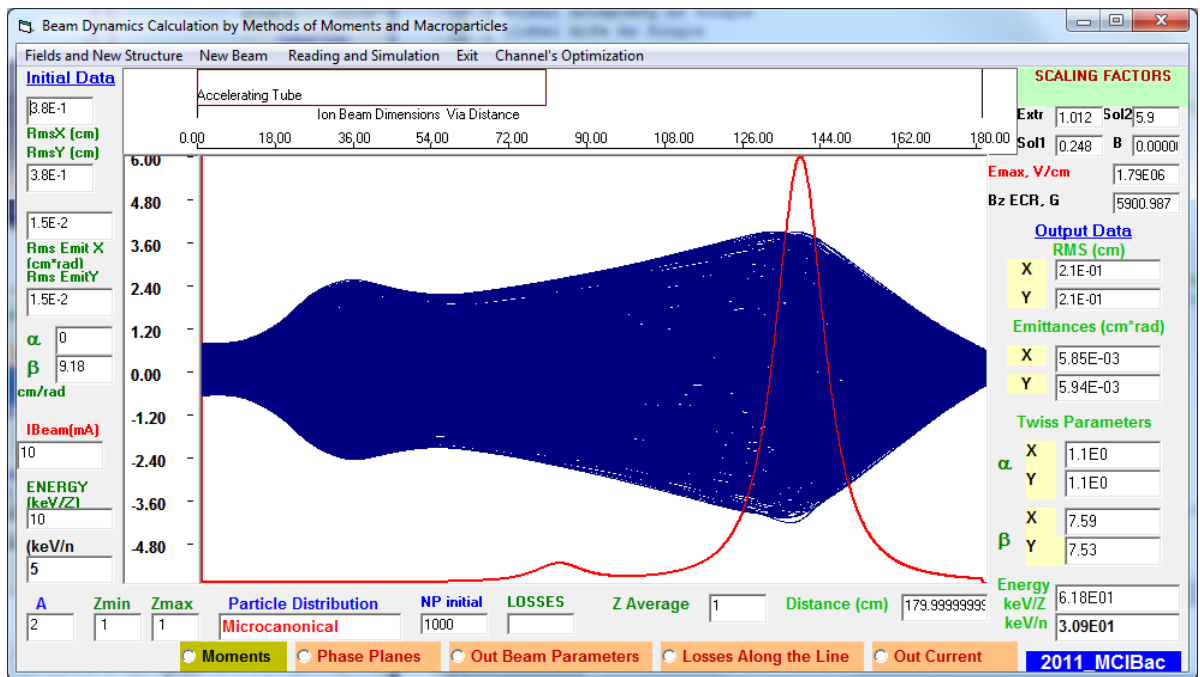


Рис. 2.2.5. Траектории поляризованных дейтронов 10 мА (интерфейс программы MCIB04)

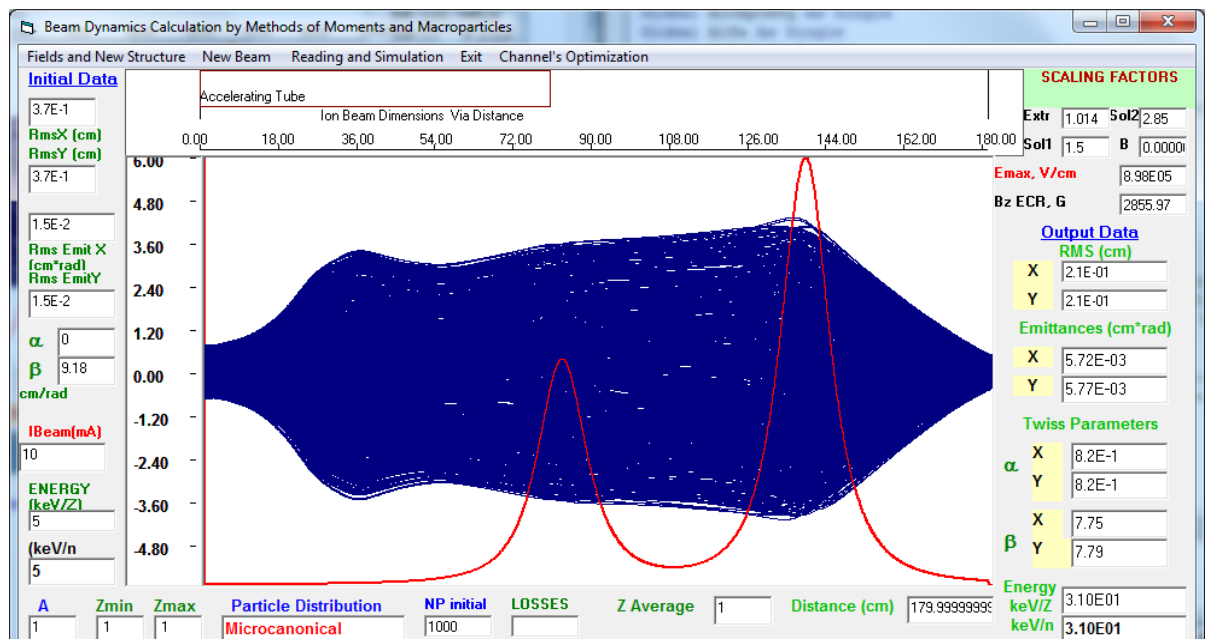
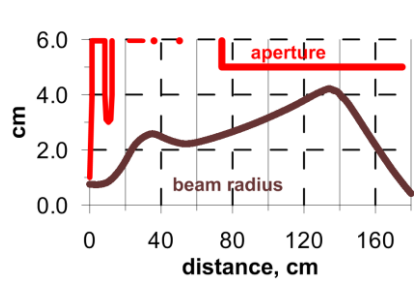
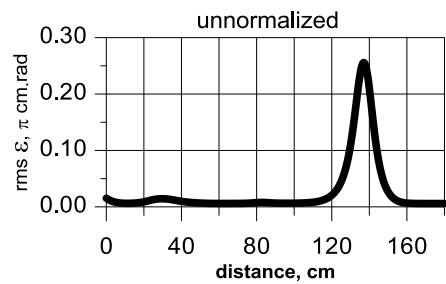


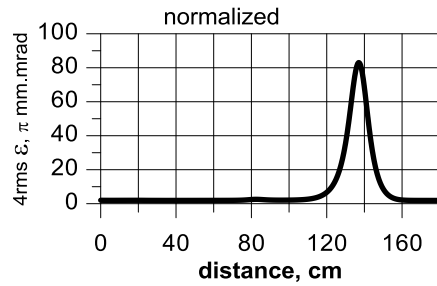
Рис. 2.2.6. Траектории поляризованных протонов 10 мА (интерфейс программы MCIB04)



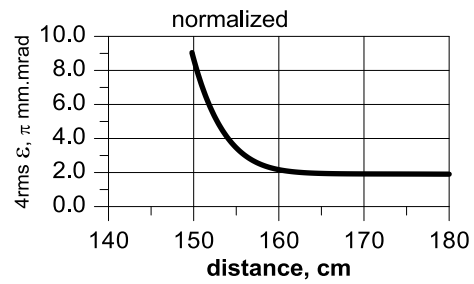
Огибающая пучка



Эмиттанс



Нормализованный эмиттанс



Нормализованный эмиттанс перед RFQ

Рис. 2.2.7. Огибающая и поперечные эмиттансы пучка

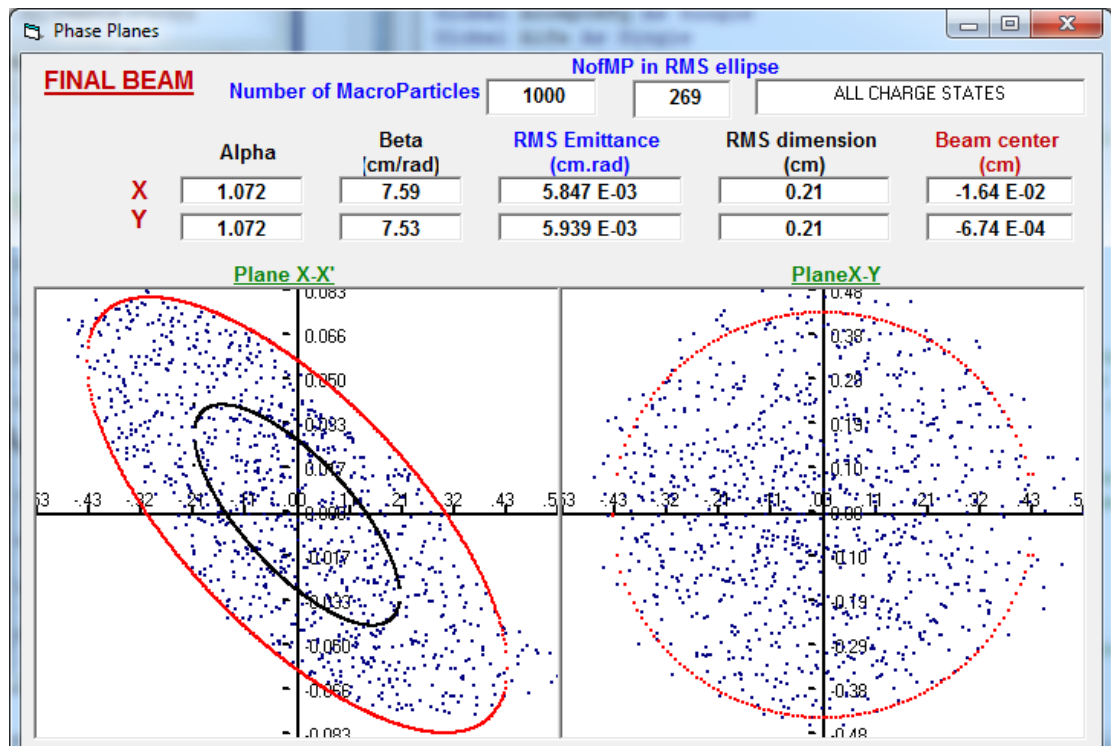


Рис. 2.2.8. Проекция фазового распределения поляризованных дейтронов на выходе канала транспортировки (интерфейс программы MCIB04)

Результат согласования пучка с секцией RFQ: 93 % поляризованных протонов в акцептансе RFQ, ~ 90 % поляризованных дейтронов в акцептансе RFQ.

2.2.2.2 RFQ секция форинжектора ЛУ-20

Ускоряюще-фокусирующий канал RFQ предускорителя ионов для ЛУ20 состоит из трех участков: участка регулярного ускорения (УРУ), группирующего участка (ГУ) и согласующего участка (СУ).

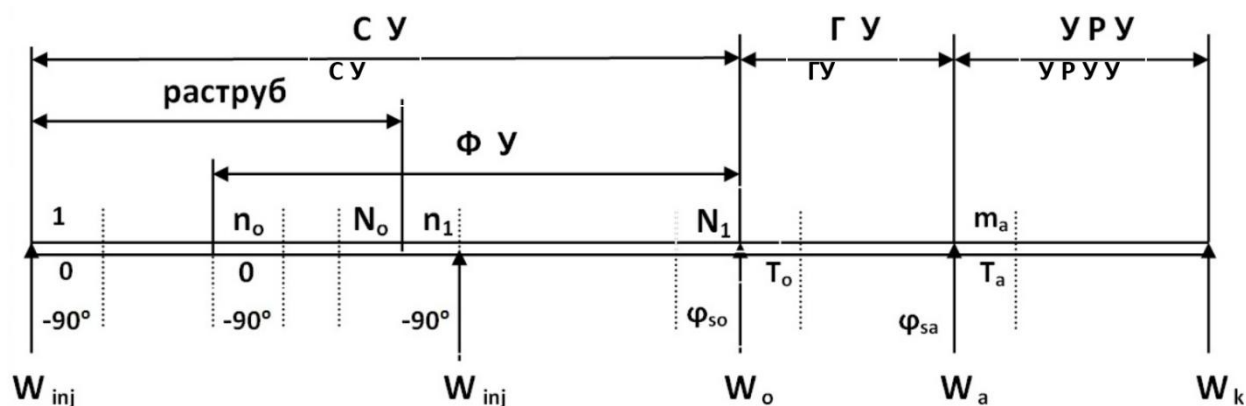


Рис. 2.2.9. Функциональная схема RFQ предускорителя. W_{inj} — энергия частиц на выходе ускорителя, W_k — энергия частиц на выходе ускорителя, W_0 — энергия на выходе участка группировки, φ_{so} — постоянное значение равновесной фазы на участке регулярного ускорения, m_a — постоянное значение коэффициента модуляции на участке регулярного ускорения, N_0 — число полупериодов на длине реального раструба, n_0 — число полупериодов на немодулированной части раструба, N_1 — число полупериодов на согласующем участке, n_1 — число полупериодов с постоянной равновесной фазой $\varphi_s = -90^\circ$

2.2.2.2.1 Результаты численного моделирования динамики пучка в секции с ПОКФ (RFQ)

Синтез геометрии канала ПОКФ выполнен с помощью, разработанной в ИТЭФ программы ACCEL. Рассчитанные параметры секции RFQ с разделением по полупериодам содержатся в отчётах по проекту.

Численное моделирование динамики пучка в полученном канале предускорителя проводилось методом крупных частиц с помощью разработанных в ИТЭФ программ RFQDYN и DYNAMION [2.8], а также LIDOS [2.9] и TOUTATIS [2.10]. Эти программы позволяют учесть эффекты пространственного заряда пучка и распределение 3-х мерных полей от электродов реальной формы. Причём первые две программы используют гармоническое разложение поля, а последние две — распределение поля на сетке. Оба подхода дали результаты, хорошо согласующиеся между собой.

На Рис. 2.2.10 представлены фазовые портреты согласованного пучка на входе RFQ для нулевого тока. Как видно, для полного шестимерного согласования на вход секции должен подаваться аксиально-симметричный сходящийся пучок, промодулированный по продольным скоростям. Последнее достигается за счёт использования входного согласующего резонатора, расположенного непосредственно перед RFQ (без пространства дрейфа). Данные условия инжекции позволяют обеспечить практически 100 % захват в режим ускорения.

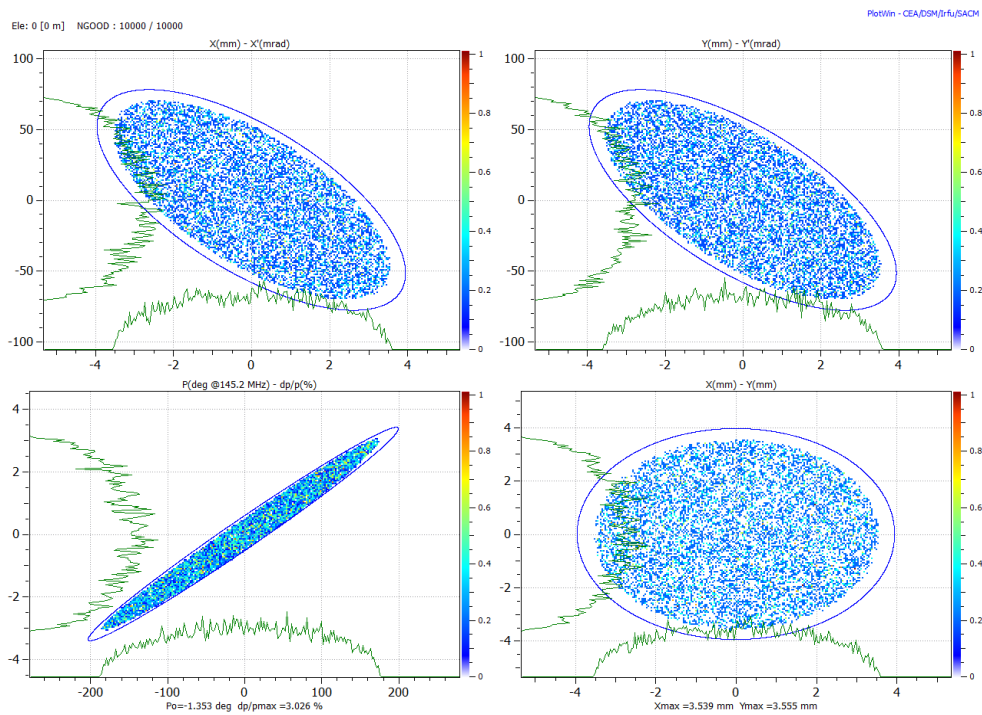


Рис. 2.2.10. Входные фазовые портреты согласованного пучка

Исследование динамики пучка в RFQ проводилось методом крупных частиц. Расчёты потенциала кулоновского поля выполнены на сетке $32 \times 32 \times 32$ для одного периода модуляции в декартовой системе координат. Число шагов интегрирования уравнений движений на периоде модуляции принято равным 100. Число частиц в полном пучке равно 10000.

На Рис. 2.2.11 и в Таблице 2.2.5 представлены результаты моделирования динамики пучков ионов с $Z/A = 0,3$ и $0,5$ при различных токах инжекции для номинальных значений напряжения между электродами RFQ (125,2 кВ и 75,1 кВ соответственно).

Коэффициент захвата (K_3) для нулевого тока составляет 98 %, с учётом эффектов пространственного заряда для пучка ионов ($Z/A = 0,3$; $I_{inj} = 10$ мА) $K_3 = 96$ % (за счёт более равномерного заполнения сепаратрисы), а для пучка ($Z/A = 0,5$; $I_{inj} = 20$ мА) $K_3 = 89$ %. Как видно из Рис. 2.2.11 пульсации максимумов огибающих малы, что говорит о хорошем согласовании пучка с каналом. При этом рост эмиттанса не превышает 10 %.

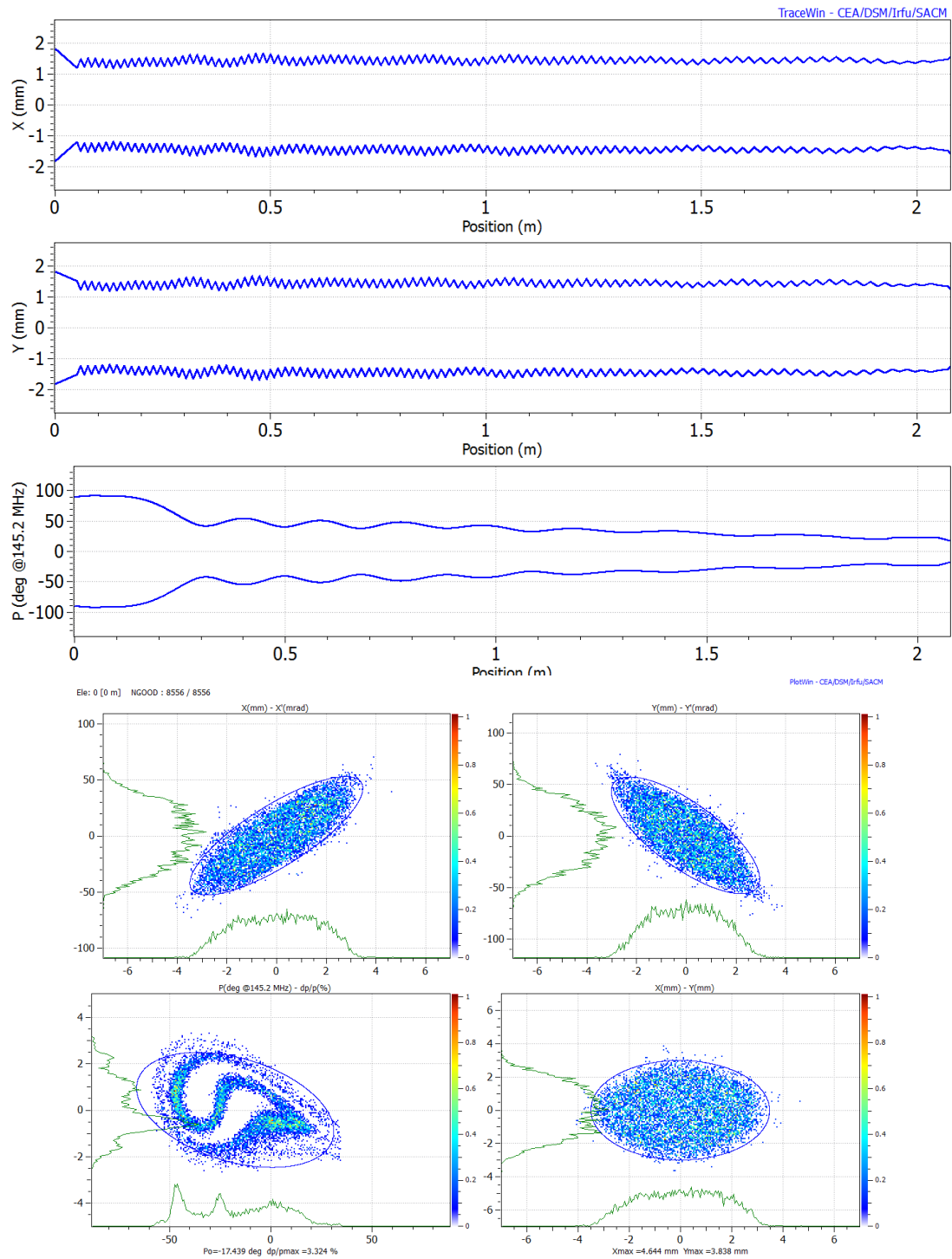


Рис. 2.2.11. RMS-огивающие и выходные фазовые портреты пучка ускоренных ионов с $Z/A = 0,3$ при токе инжекции 10 мА

Таблица 2.2.5. Параметры пучка ионов на выходе RFQ

Z/A	I_{accel} , мА	4 RMS $\epsilon_{n\ x,y}$, π мм мрад	4 RMS $\epsilon_{n\ z}$, π град %	$\alpha_{x,y}$	α_z	$\beta_{x,y}$, мм/мрад	β_z , град/ %
0,3	0	1,62(1,58)	1,6	-1,2824(1,1133)	0,3385	0,1017(0,0768)	15,9228
	10	1,59(1,62)	1,61	-1,3425(1,1345)	0,4074	0,1107(0,0799)	21,2541
0,5	0	2,14(2,12)	1,64	-1,252(1,1426)	0,3325	0,01028(0,0759)	16,6249
	20	2,20(2,21)	1,56	-1,5225(1.3130)	0,3156	0,1215(0,0872)	19,2532

Рассмотрены предельные возможности разрабатываемого канала RFQ по току ускоренных частиц при номинальных значениях напряжения между электродами RFQ для различных ионов. На Рис. 2.2.12 представлены зависимости тока ускоренных частиц от тока инжекции для ионов с $Z/A = 0,3$ и $0,5$. Как видно из Рис. 2.2.12 для ионов $Z/A = 0,3$ максимально достижимый ток составляет 60 мА, а для $Z/A = 0,5$ – 40 мА.

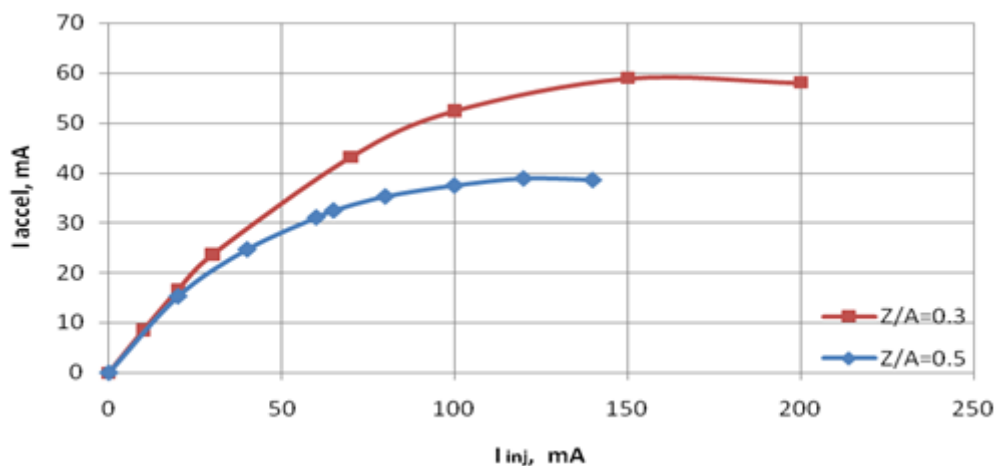


Рис. 2.2.12. Зависимость тока ускоренных частиц от тока инжекции для ионов с $Z/A = 0,3$ и $0,5$

2.2.2.2.2 Конструкция резонатора

Общий вид ускорителя показан на Рис. 2.2.13. Общая длина ускорителя 2245 мм. Длина секции 695 мм, внутренний диаметр 400 мм. В каждую секцию установлены по четыре электрода, общая длина одной линии электродов в секциях 2070 мм. Ускоритель состоит из трех одинаковых по длине секций и двух крышек входной и выходной. Для обеспечения электрического контакта электроды каждой секции соединены двумя пластинами. Между собой секции уплотняются через круглую медную прокладку диаметром 2 мм.

В секции установлены электроды одинаковой длины. Вертикальная и горизонтальная линейки электродов одинаковы, но установлены навстречу друг другу. В результате структура получается со смещёнными магнитными окнами связи. На электроды нанесена модуляция с различным периодом. Исходя из этого, секции делятся на начальную, регулярную и выходную.

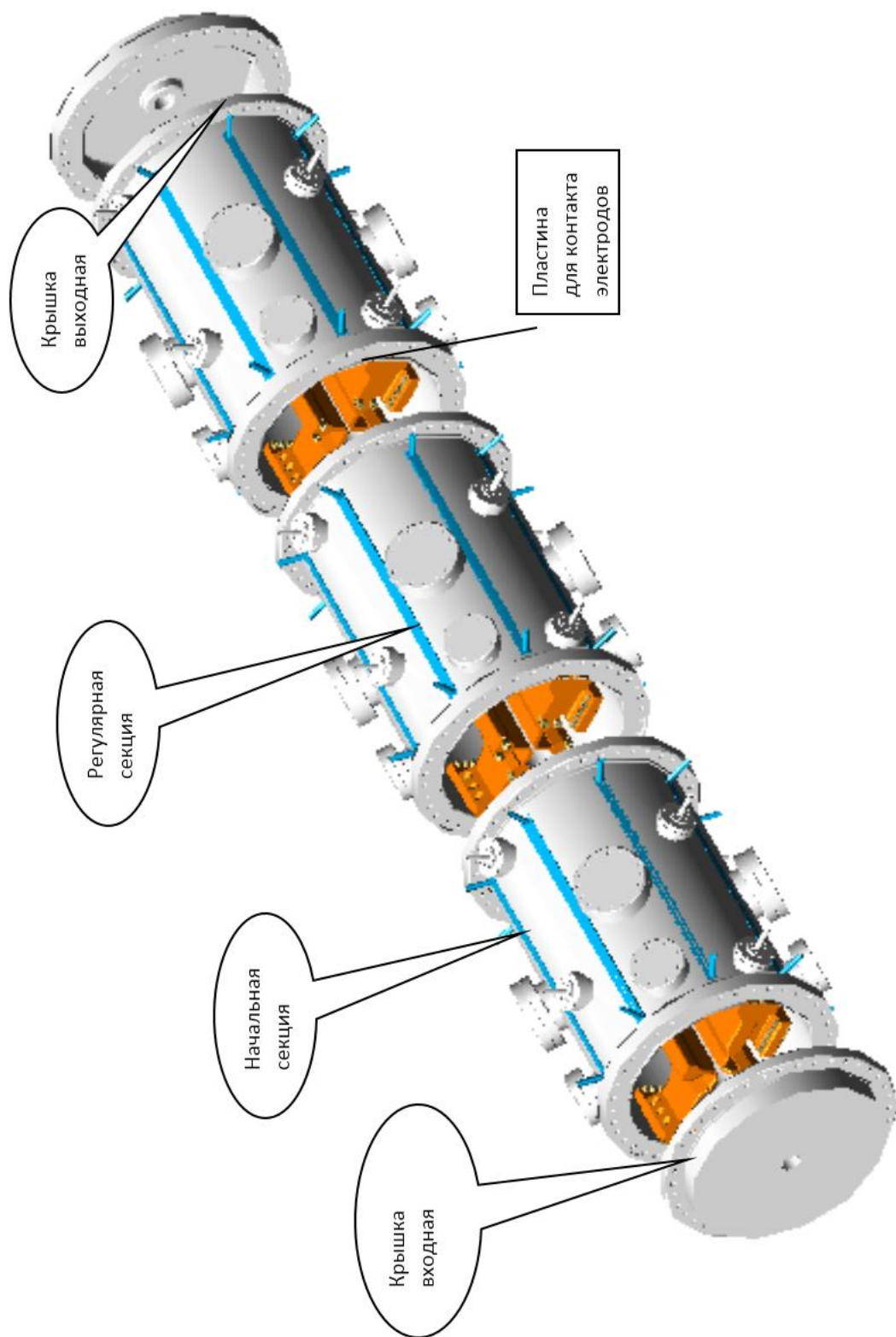


Рис. 2.2.13. 3D вид ускорителя RFQ

Каждая секция RFQ (см. Рис. 2.2.14) состоит из вакуумного кожуха с контуром охлаждения и приваренными патрубками, а также четырёх электродов, установленных в кожух на алюминиевую прокладку.

Четыре патрубка с условным проходным диаметром Du 100 мм предназначены для подсоединения вакуумных насосов, измерителей вакуума, петель ввода мощности, двух элементов подстройки частоты и др.

Четыре патрубка Du 63 предназначены для установки измерительных петель, обеспечивающих постоянный контроль распределения поля.

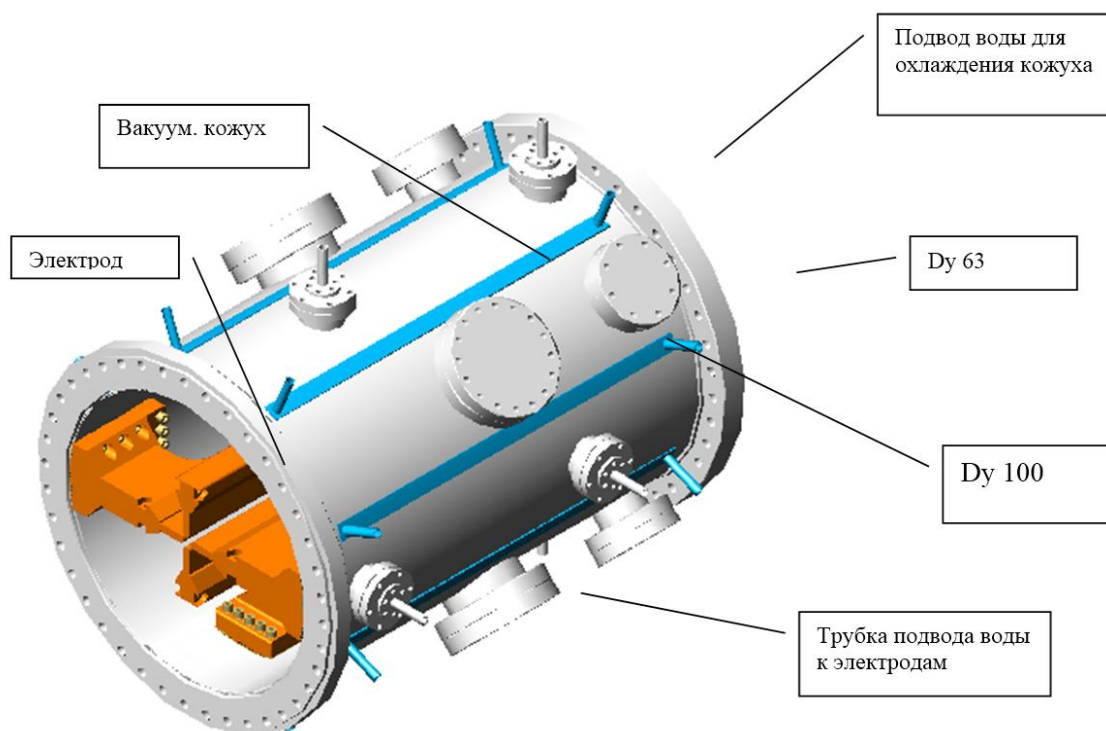


Рис. 2.2.14 Секция в сборе

Вакуумный кожух состоит из обечайки с торцевыми фланцами, патрубками и каналами охлаждения. На внутренней поверхности обечайки просверлены глухие резьбовые отверстия М8 для крепления электродов. Материалом служит нержавеющая сталь 12Х18Н10Т.

После сварки, внутренняя поверхность обечайки протачивается до диаметра 400 мм с допуском ± 25 мкм. Затем на внутреннюю поверхность кожуха наносится медное покрытие толщиной не менее 50 мкм Рис. 2.2.15.

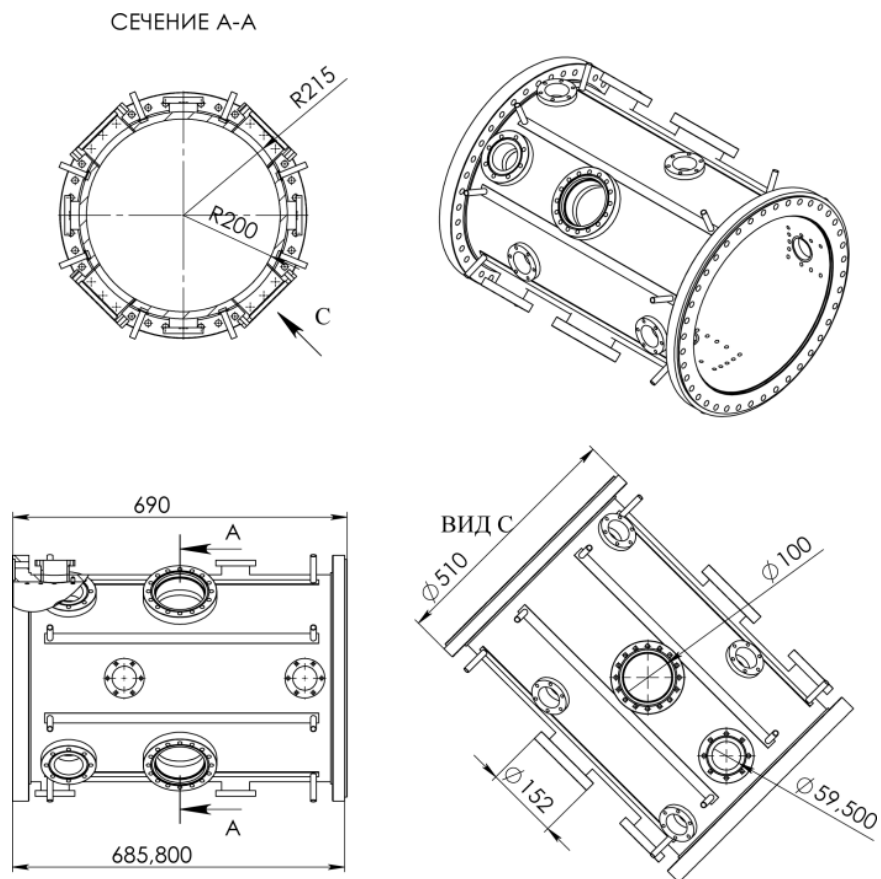


Рис. 2.2.15. Эскизы вакуумного кожуха

В каждую секцию устанавливается по четыре электрода Рис. 2.2.16. Материалом для электрода служит дюраль АМГ. После нанесения модуляции и пробной установке в кожух, на поверхность электрода наносится медное покрытие толщиной не менее 50 мкм.

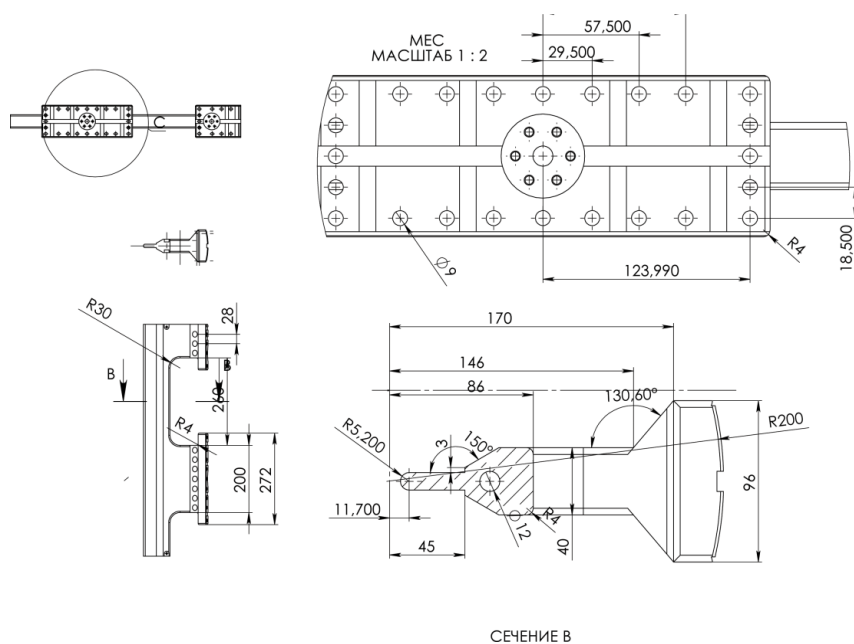


Рис. 2.2.16. Геометрические размеры электрода центральной секции ускорителя

Для охлаждения электрода предусмотрен канал для подачи воды, хотя при работе с проектной скважностью водяное охлаждение не понадобится. Точность установки электродов в секции см. Рис. 2.2.17.

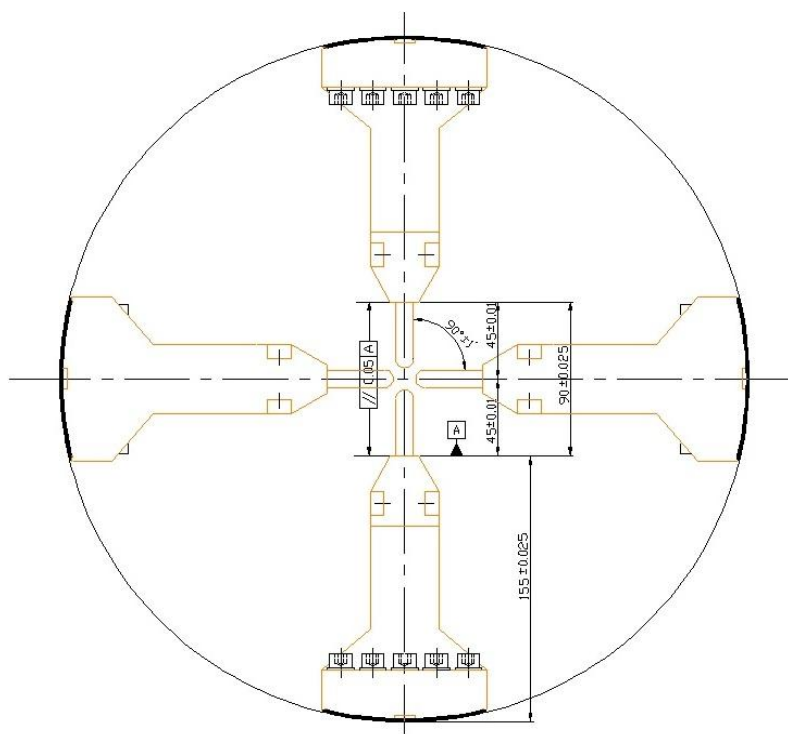


Рис. 2.2.17. Точность установки электродов в секции

Входная и выходная крышки представляют собой фланцы из нержавеющей стали 12Х18Н10Т с бобышкой, расположенной в его центре. На внутреннюю поверхность крышек наносится медное покрытие толщиной не менее 50 мкм.

2.2.2.3 Канал транспортировки пучков из RFQ в ЛУ-20 — МЕВТ

Канал транспортировки МЕВТ (Medium Energy Beam Transport) должен согласовывать параметры пучка из RFQ (Таблица 2.2.4) с аксептансом ЛУ-20 (Рис. 2.2.18 и Рис. 2.2.19) (Таблица 2.2.6) и обеспечивать коэффициент прохождения $\sim 80\%$ от входа RFQ до входа в ЛУ-20. Канал разрабатывается совместно с ИТЭФ (г. Москва). Основными трудностями являются низкая энергия пучка ~ 300 кэВ и конструктивные ограничения, связанные с особенностями вакуумной системы ЛУ-20.

В результате выбрана такая структура канала, в которой поперечное согласование обеспечивается двумя триплетами квадрупольных линз, а поперечное — двухззорным банчером (Рис. 2.2.20).

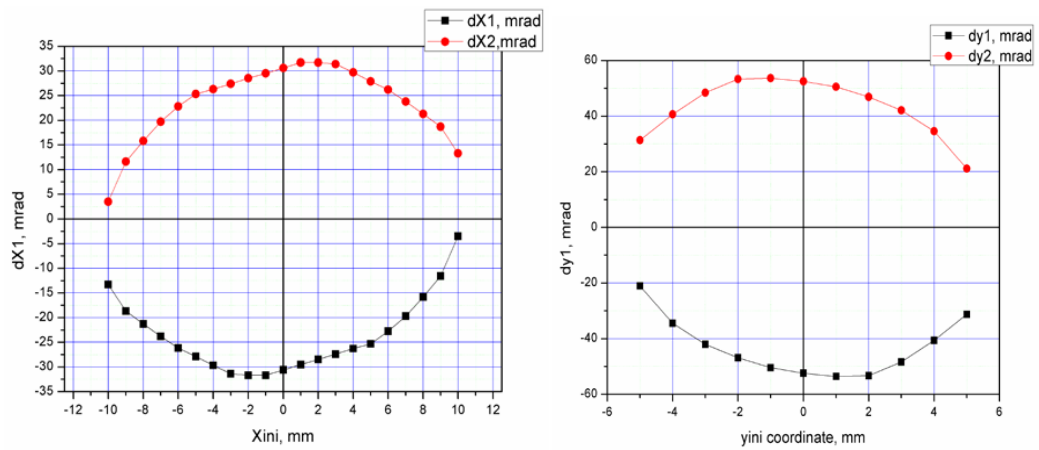


Рис. 2.2.18. Поперечные аксептансы ЛУ-20

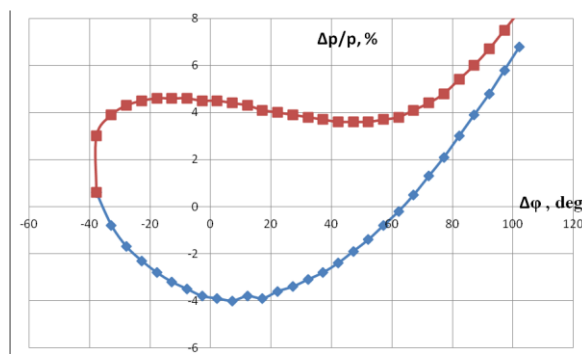


Рис. 2.2.19. Сепаратриса ЛУ-20

Таблица 2.2.6. Параметры согласованного пучка для ЛУ-20

Z/A		0,5	0,3
Энергия на входе DTL	МэВ/н	0,156559	0,156559
	МэВ	0,313118 Z	0,521863 Z
Приведённая скорость на входе DTL		0,018332	0,018332
Разброс ионов по импульсу на входе DTL, %		±4	±4
Фазовая протяжённость сгустка на выходе DTL, град		≤ 90	≤ 90
Нормализованный поперечный аксептанс DTL, π см·мрад		0,5	0,5
Коэффициент захвата в продольный и поперечный аксептансы DTL (по отношению к току инъекции), %		≥ 80	≥ 80

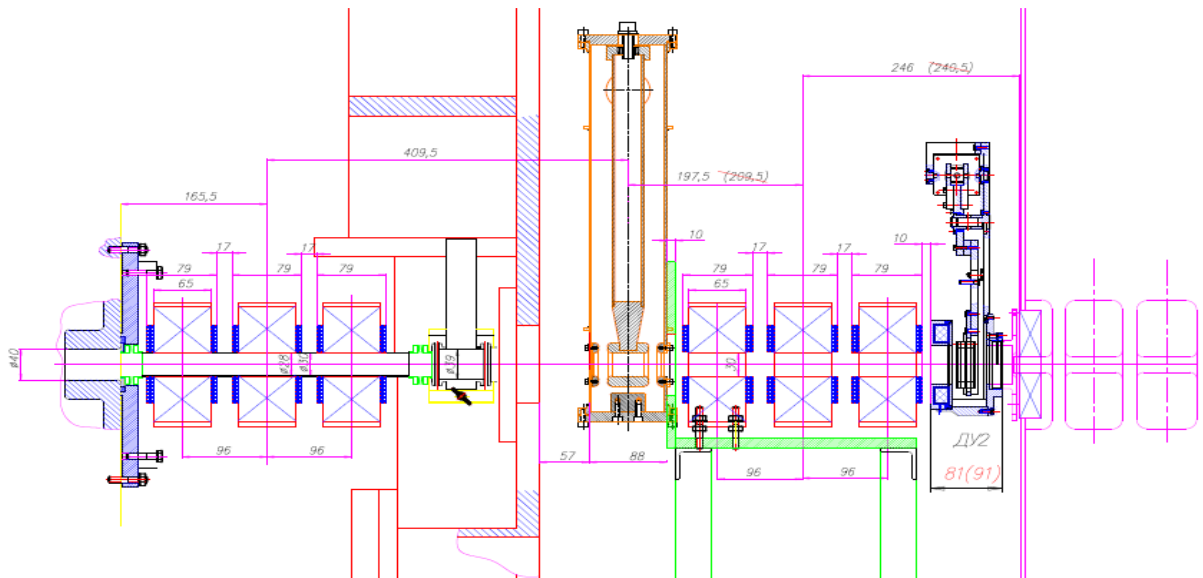


Рис. 2.2.20. Схема канала транспортировки пучка промежуточной энергии из RFQ в ЛУ-20

2.2.3 Система ВЧ-питания форинжектора ЛУ-20

Система ВЧ питания осуществляет генерацию и усиление высокочастотных колебаний на заданной частоте до необходимого уровня и поддерживает параметры ускоряющего поля с требуемой точностью. Канал ВЧ питания, должен обеспечивать до 400 кВт импульсной мощности при длительности импульса 100 мкс.

Система состоит из высокочастотного усилительного канала с внешним возбуждением и высоковольтного модулятора анодного напряжения (см. Рис. 2.2.21).

Задающий генератор (ЗГ) осуществляет генерацию синусоидального сигнала опорной частоты с заданной фазой. В штатном режиме работы опорная частота определяется внешним для ЗГ сигналом, поступающим из резонатора ускорителя Альвареца.

Усилительным каналом с максимальной выходной мощностью является канал, возбуждающий RFQ структуру на частоте 145,2 МГц. Сигнал с выхода задающего генератора (ЗГ) поступает на вход схемы импульсной модуляции, где происходит преобразование непрерывного сигнала в импульсный с нужной амплитудой и длительностью.

Далее сигнал усиливается транзисторным усилителем (ТУ) до уровня 150 Вт и поступает на вход лампового каскада стойки предварительного усиления (СПУ). Для развязки между транзисторным усилителем и входной цепью лампового каскада используется ферритовый циркулятор ФЦ.

СПУ состоит из двух каскадов на лампах ГИ-39Б, которые позволяют получить на выходе сигнал, соответствующий расчётному значению амплитуды напряжения на управляющей сетке мощного каскада на лампе ГИ-27АМ. Анодное напряжение на ламповые каскады СПУ и выходной каскад

подаётся от одного модулятора с разных выводов импульсного трансформатора. При анодном напряжении 15 кВ мощность на выходе оконечного каскада составляет 400 кВт в импульсе. Уровень мощности контролируется с помощью рефлектометров, измеряющих значения падающих и отражённых волн.

Для установки и подстройки фазы колебаний в высокочастотный тракт между выходным каскадом и ускоряющей структурой включена раздвижная фазосдвигающая линия (ФСЛ).

Мощность возбуждения поступает в структуру через фидерный ввод (В2), электрическая прочность которого превышает максимальное напряжение стоячей волны в фидерном тракте при возможных пробоях в структуре.

Регулировка уровня выходной ВЧ мощности усилительного канала осуществляется путём установки зарядного напряжения на формирующей линии модулятора.

Подробное описание системы ВЧ питания секции RFQ содержится в отчётах по проекту.

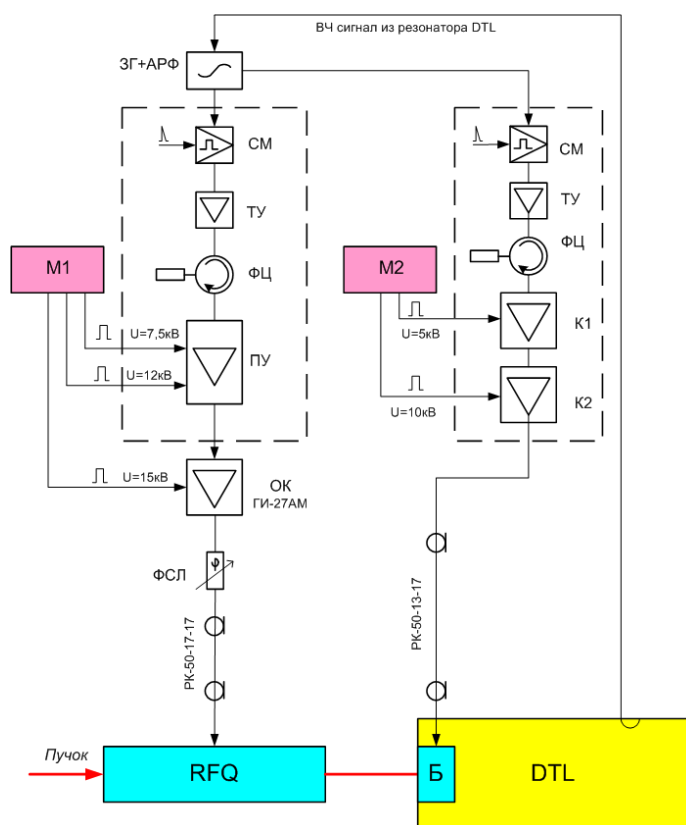


Рис. 2.2.21. Структурная схема системы ВЧ питания. ЗГ и АРФ — задающий генератор с плавающей частотой и система автоматической регулировки фазы, СИМ — схема импульсной модуляции ВЧ сигнала, ТУ — транзисторные усилители, ФЦ — ферритовый циркулятор (вентиль), СПУ — стойка предварительного усиления, ВК — выходной каскад на лампе ГИ-27АМ, ФСЛ — фазосдвигающая линия, ФВ — фидерный ввод, RFQ — ускоряющая структура, DTL — линейный ускоритель Альвареца

2.2.4 Система управления ВЧ питанием форинжектора ЛУ-20

Система управления ускорителя-форинжектора ЛУ-20 обеспечивает установку и удержание параметров ускоряющего поля в резонаторах ускорителя в пределах, определяемых условиями проводки ускоряемого пучка частиц. Структура системы управления показана на Рис. 2.2.22. Ускоритель-форинжектор ЛУ-20 составляют резонаторы первого группирователя Б1и структуры с пространственно-однородной квадрупольной фокусировкой ПОКФ (RFQ). Возможно включение в контур управления второго группирователя Б2. Резонатор с трубками дрейфа DTL относится к действующей на настоящий момент системе инжектора и работает в режиме автогенерации ВЧ колебаний. Условия синхронизации требуют возбуждения резонаторов ускорителя-формирователя ЛУ-20 на частоте генерации DTL и удержания разности фаз между электромагнитными колебаниями в различных резонаторах с точностью не хуже одного градуса.

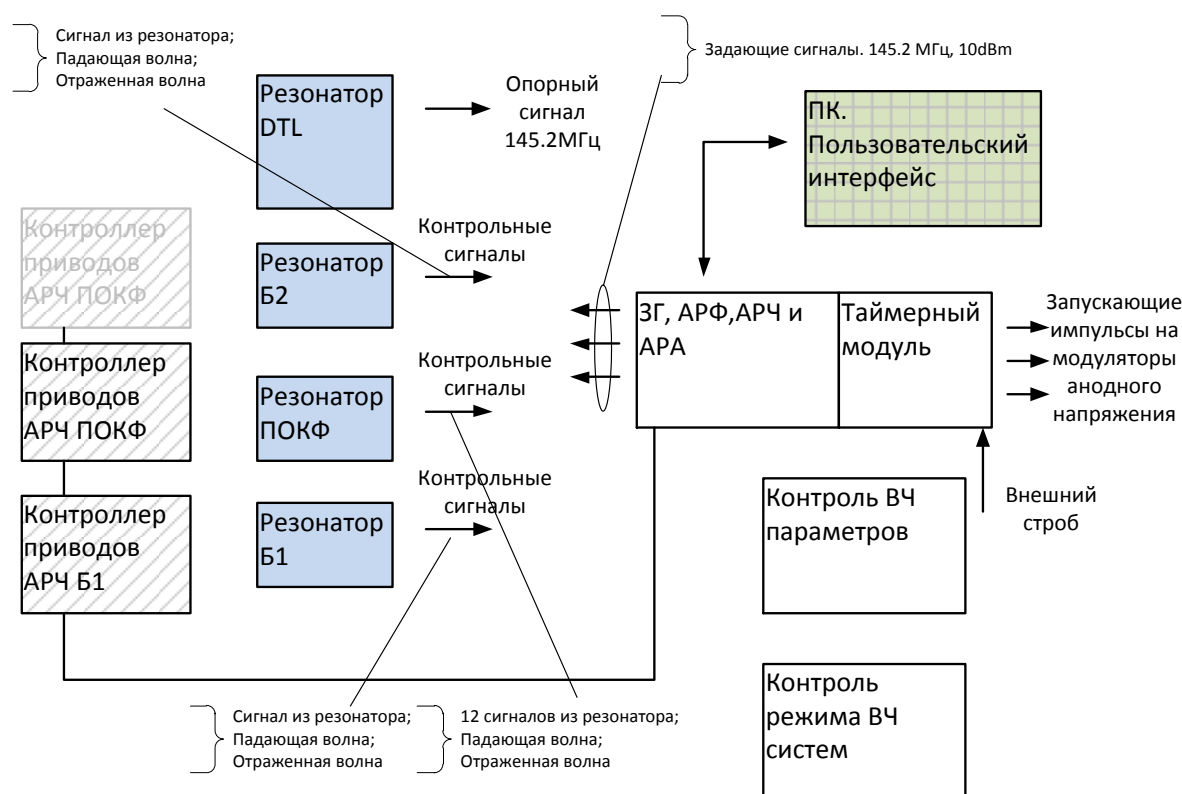


Рис. 2.2.22. Структурная схема системы контроля ВЧ параметров

За синхронизацию ВЧ полей отвечают модули задающего генератора ЗГ, показанные на Рис. 2.2.22. Основная функция модуля ЗГ — генерация синусоидального сигнала опорной частоты с заданной фазой для соответствующего данному модулю канала ускорения. Опорная частота определяется внешним для модуля сигналом, поступающим из резонатора с трубками дрейфа DTL. Для обеспечения заданной точности поддержания разности фаз между каналами на модули в качестве одного из контрольных сигналов поступают сигналы обратной связи из резонаторов ускорителя для сравнения с фазой опорного сигнала. Контролируются также амплитуды и фазы падающей и

отражённой от резонаторов волн, позволяющих определить степень несовпадения частот собственных колебаний резонаторов с опорной частотой.

Регулировка фазы осуществляется непосредственно в модуле ЗГ цифровым процессором. Для контроля частоты собственных колебаний резонаторов предусмотрен последовательный интерфейс передачи данных, по которому передаются команды на контроллеры механических приводов, перемещающих плунжеры подстройки частоты. Подстройка амплитуды высокочастотных колебаний в резонаторах осуществляется изменением опорного напряжения модуляторов анодного напряжения. Опорное напряжение для модуляторов также формируется модулем задающего генератора.

Временная диаграмма работы ускорителя показана на Рис. 2.2.23. В первую очередь анодное напряжение подаётся на лампы канала ускорителя Альвареца поскольку его колебания являются опорными для всех остальных каналов. В момент времени t_1 , по достижении 90-процентного уровня, включается режим захвата колебаний модулями ЗГ. К моменту подачи анодного напряжения на ВЧ каскады RFQ модули задающего генератора формируют стабильный опорный сигнал с частотой, соответствующей частоте ВЧ колебаний в резонаторе ускорителя Альвареца. Первоначально фаза колебаний устанавливается с учётом действительной настройки резонаторов на действующую частоту. По мере нарастания ВЧ поля в резонаторах группирователей и RFQ, фаза колебаний в них корректируется по результатам измерения параметров сигнала обратной связи. К моменту времени t_3 в резонаторах завершаются переходные процессы и система поддерживает установившиеся значения параметров на протяжении времени ускорения пучка частиц до момента времени t_4 . В момент времени между t_3 и t_4 система оценивает настройку резонаторов на рабочую частоту либо измеряя вектор отражённой волны, либо меряя разность фаз между сигналом на входе в резонатор и сигналом с контрольной петли.

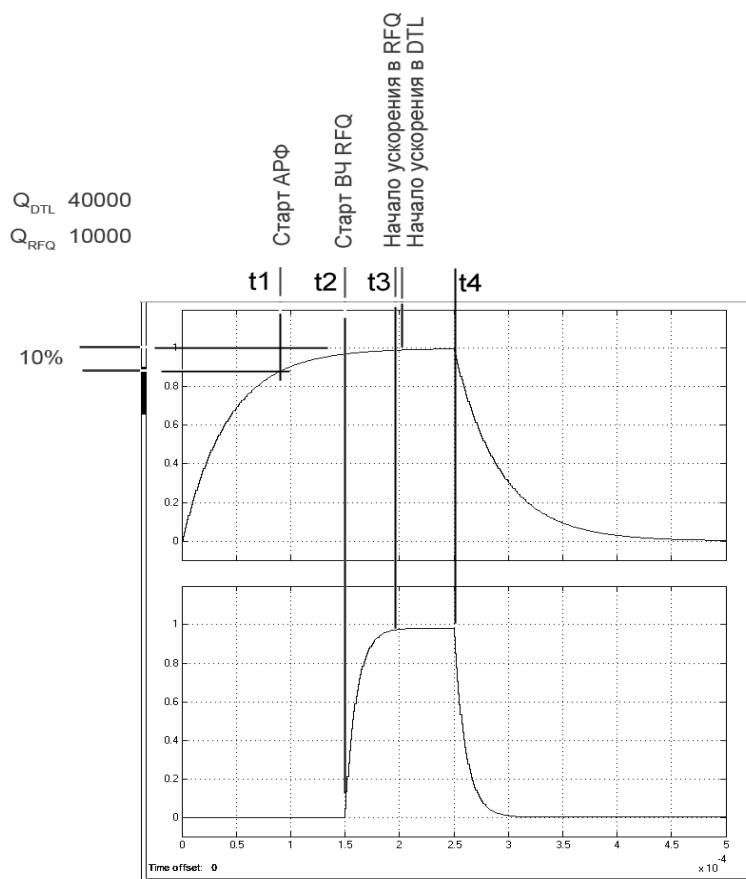


Рис. 2.2.23. Временная диаграмма совместной работы ЛУ-20 в составе инжектора. Вверху показан импульс огибающей ВЧ колебаний в резонаторе DTL, внизу — огибающая колебаний резонатора RFQ

2.2.5 Линейный ускоритель ЛУ-20

В настоящее время основой инжекционного комплекса Нуклотрона является линейный ускоритель ЛУ-20 с ускоряющей структурой типа Альвареца [2.11], сооружённый в 1974 г. для инъекции в Синхрофазотрон протонов с энергией 20 МэВ. Фактически с самого начала эксплуатации этот ускоритель использовался также и для ускорения ядер лёгких элементов и ионов на второй кратности частоты ускоряющего поля.

Ускоряюще-фокусирующая система ЛУ-20 представляет собой цилиндрический резонатор, нагруженный трубками дрейфа с размещёнными в них квадрупольными линзами и помещённый в вакуумный контейнер (Рис. 2.2.24 и Рис. 2.2.25, Таблица 2.2.7).



Рис. 2.2.24. Резонатор ЛУ-20 со снятым вакуумным кожухом



Рис. 2.2.25. Внутренняя часть резонатора ЛУ-20

Таблица 2.2.7. Основные параметры ЛУ-20

Энергия инжекции: протоны		600 кэВ
Энергия инжекции: ионы	$2\beta\lambda$	150 кэВ/н
Конечная энергия: протоны		20 МэВ
Конечная энергия: ионы	$2\beta\lambda$	5 МэВ/н
Рабочая частота		145 МГц
Диаметр резонатора		1,4 м
Длина резонатора		14,4 м
Число трубок дрейфа		57 + 2 полутрубки
Добротность резонатора		40000
Синхронная фаза		31,5°
Фокусирующая структура	FODO	
Градиент поля квадрупольных линз		(58,4 ÷ 7,4) Тл/м
Акцептанс		220 п·мм·мрад

Одним из недостатков конструкции ускоряющей системы ЛУ-20 является наличие дисков, расположенных на трубках дрейфа и служащих для точной настройки распределения

напряжённости электрического поля вдоль оси резонатора. Нарушение ВЧ контакта между дисками и трубками может приводить к существенному снижению добротности резонатора. Второй и гораздо более серьёзный недостаток связан с конструкцией квадрупольных линз, размещённых в трубках дрейфа. В соответствии с проектом линзы работают в непрерывном режиме, что, с одной стороны, ограничивает максимальную величину градиента поля, а с другой стороны, требует интенсивного охлаждения обмоток, которое осуществляется за счёт протока масла. К настоящему времени уплотнения между вакуумной частью резонатора и каналами охлаждения линз многократно выработавшие свой ресурс заменены.

В начале 90-х гг. начата модернизация ускоряющей системы ЛУ-20, в рамках которой была разработана новая конструкция трубок дрейфа. Благодаря низкой скважности работы ЛУ-20 было решено использовать линзы в импульсном режиме работы. Новая конструкция линз основана на трапецеидальной форме полюсных наконечников, что позволило увеличить число витков в обмотках и поднять градиент поля примерно до 100 Тл/м. Кроме того, в новой конструкции на трубках отсутствуют диски, приводящие к снижению добротности резонатора. Одиннадцать новых трубок дрейфа изготовлены, протестированы на измерительном стенде и установлены в резонаторе.

Дальнейшую модернизацию и замену трубок дрейфа было решено отнести на финальную стадию реализации проекта.

Система ВЧ питания ЛУ-20 предназначена для возбуждения электромагнитного поля в основном резонаторе и в резонаторах группирователя и дебанчера. Генератор проектировался и изготавливался одновременно с ускорителем, поэтому используемая в нем аппаратура физически и морально устарела. В ходе реализации проекта NICA проводится модернизация основных систем генератора «Родонит».

Необходимое ускоряющее поле в резонаторе ЛУ-20 обеспечивается двумя каналами ВЧ-генератора «Родонит» ($P_{\max} \sim 3$ МВт на выходе каждого канала). Основные параметры генератора приведены в Таблице 2.2.8.

Таблица 2.2.8. Основные параметры ВЧ-генератора «Родонит»

Количество каналов	2
Входная мощность	1 Вт
Выходная мощность одного канала	3 МВт
Рабочая частота	$145 \pm 1,5$ МГц
Частота посылок	$0,1 \div 1$ Гц
Волновое сопротивление фидера	50 Ом
Длительность импульса тока пучка	≤ 50 мкс
Стабильность уровня ВЧ поля	$\leq 2\%$

Существенной особенностью резонатора ЛУ-20 является работа генератора в режиме автогенерации. Существующая схема ВЧ питания ЛУ-20 изображена на Рис. 2.2.26.

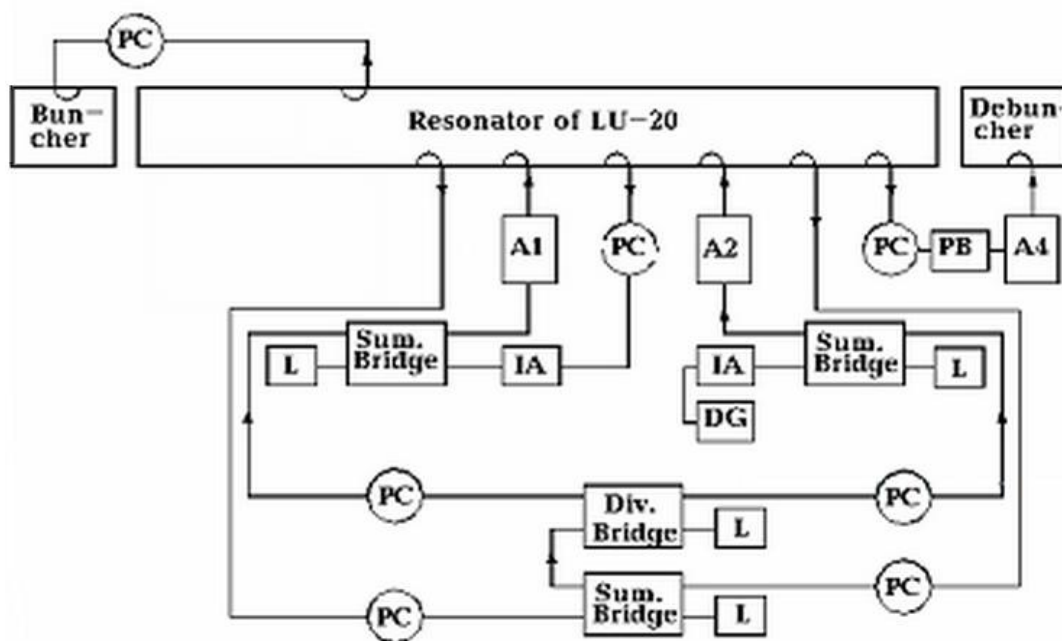


Рис. 2.2.26. Существующая схема ВЧ питания ЛУ-20. PC — фазовращатели, A1, A2 — первый и второй каналы «Родонита», IA — предусилители, L — нагрузка 75 Ом, DG — задающий генератор, PB и A4 элементы системы питания дебанчера

Каждый канал ВЧ-генератора состоит из 3-х усилительных каскадов:

- 1-й каскад усиления на лампе ГУ-36Б-1, мощностью 5 ÷ 7 кВт;
- 2-й каскад на лампе ГИ-43Б (или ГИ-43А), мощностью ~ 500 кВт;
- 3-й каскад на лампе ГИ-42Б, мах мощностью ~ 3 МВт.

Модернизация системы ВЧ-питания «Родонит» предполагает замену снятых с производства ламп ГИ-43Б и ГИ-42Б с воздушным охлаждением на ГИ-43А и ГИ-27АМ с водяным охлаждением соответственно, для чего разработана и смонтирована система водяного охлаждения, а также замена модуляторных ламп на полупроводниковые ключи [2.12].

Модуляторы каналов были построены по схеме с частичным разрядом накопителя. Максимальное напряжение накопителя ≤ 33 кВ. Для увеличения долговечности, с учётом заданной при проектировании длительности импульса тока $\tau \geq 500$ мкс, в качестве ключа использовались четыре модуляторные лампы ГМИ-34Б, включённые параллельно. Эти лампы были сняты с производства более 15 лет назад.



Рис. 2.2.27. Модулятор генератора «Родонит» созданный в начале 70-х: для обеспечения требуемого анодного тока генератора 220 А четыре модуляторные лампы ГМИ-34Б включены параллельно

Модернизация заключается в замене модуляторных ламп на твердотельные полупроводниковые ключи HTS 501-80-LC2, специально изготовленные германской фирмой "VENLKE" и имеющие требуемые характеристики. Было предложено и промоделировано несколько схем защиты ключа. Прототип разработанной защиты был испытан в ходе 48-го ускорительного сеанса, при этом пробой в цепях генераторных ламп вызывался контролируемым образом. Рис. 2.2.28 иллюстрирует принцип работы блока защиты при пробое. На правом рисунке приведены осциллограммы сигналов при штатном прохождении импульса ВЧ: зелёная (верхняя кривая) — огибающая ВЧ мощности в нагрузке, серая кривая — сигнал блока защиты, нижняя (вишнёвая) — напряжение на накопителе энергии. При пробое (левый рисунок) огибающая ВЧ из-за пробоя скачком обращается в ноль, при этом блок защиты вырабатывает сигнал, при достижении которым заданного порогового уровня напряжение на накопителе сбрасывается до нуля.

По результатам испытаний в схему были внесены необходимые коррективы и к весне 2014 г. на обоих каналах «Родонита» были установлены твердотельные ключи (Рис. 2.2.29).

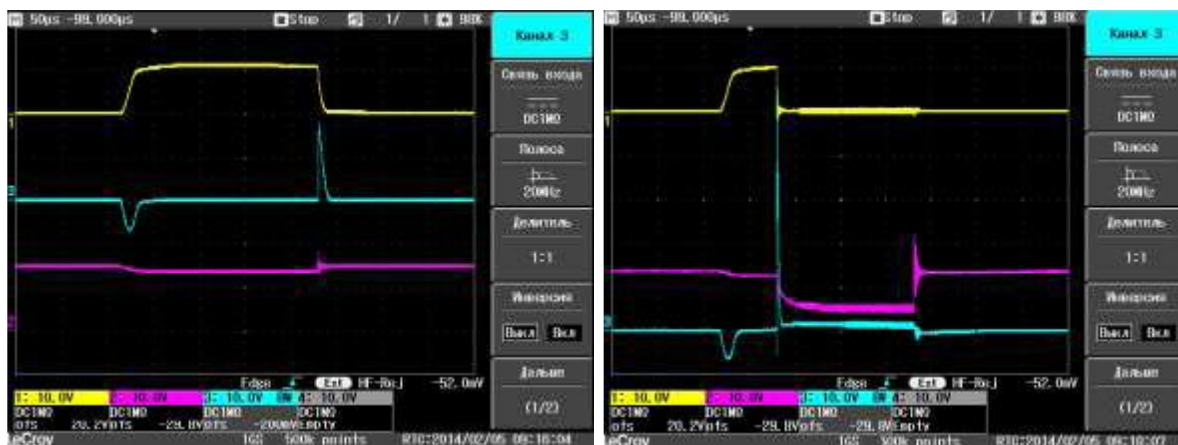


Рис. 2.2.28. Осциллограммы сигналов при работе ВЧ системы в номинальном режиме (левый рисунок) и при пробое в цепях генераторных ламп (правый рисунок)

В ходе очередного сеанса была оптимизирована и продемонстрирована возможность обеспечения уровня мощности, необходимого для ускорения ионов с отношением заряда к массе равном 0,3, при этом никаких проблем в работе модуляторов выявлено не было.



Рис. 2.2.29. Твердотельный ключ со схемой защиты, установленный в ячейке модулятора генератора «Родонит»

2.2.6 Вакуумная система инжектора лёгких ионов

Основным высоковакуумным объёмом ускорителя ЛУ-20 является его вакуумный кожух объёмом $V = 44 \text{ м}^3$ (без учёта объёма каналов высоковакуумной откачки), который состоит из стального колпака и массивной опорной плиты, на которой он смонтирован. Сама плита установлена на бетонных колоннах. На Рис. 2.2.30 показана часть вакуумного кожуха линейного ускорителя ЛУ-20.

В процессе работы трубки дрейфа и корпус резонатора нагреваются. Для охлаждения трубок дрейфа используется трансформаторное масло, подводимое к ним по каналам масляного охлаждения. Материалом для всех элементов резонатора, обращённых в вакуумный объём, служит бескислородная медь.

Вакуумный объём ЛУ-20 сообщается с вакуумным объёмом форинжектора и канала транспортировки ускоренного пучка. Форинжектор — ускоряющая трубка, которая питается от импульсного трансформатора. Объём форинжектора $V_{\phi} = 0,8 \text{ м}^3$. Ионный тракт — канал, связывающий выход линейного ускорителя со входом Нуклотрона. Диаметр канала $d = 0,1 \text{ м}$.

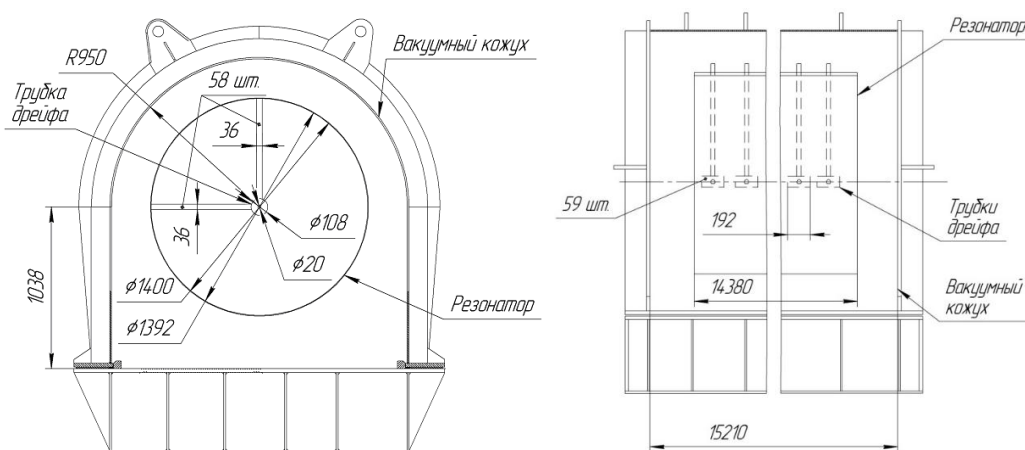


Рис. 2.2.30. Вакуумный кожух ускорителя ЛУ-20

В колпаке имеются отверстия с вмонтированными в них фланцами для подсоединения измерительной аппаратуры. К опорной плите приварены фланцы, через которые производится откачка вакуумного объёма линейного ускорителя, а к резонатору подводятся трубки системы охлаждения и вакуумные электрические вводы системы электропитания. Для работы линейного ускорителя необходимая степень разрежения составляет $2,66 \cdot 10^{-4} \text{ Па}$.

Для предварительной откачки вакуумного кожуха использовались два золотниковых насоса ВН-6 подключённых к вакуумному объёму через развитую систему труб диаметром 0,1 м. Для этого в опорной плите имеется два отверстия низковакуумной откачки диаметром 0,1 м. Насосы типа ВН-6 предназначены для откачки воздуха, неагрессивных газов, паров и парогазовых смесей, предварительно очищенных от капельной влаги и механических загрязнений, из герметичных вакуумных систем в стационарных установках, находящихся в помещении при температуре окружающего воздуха от +5 до +40 °С.

Высоковакуумная откачка линейного ускорителя производилась при помощи двенадцати агрегатов ВА-5-4 подключённых через трубопровод внутренним диаметром 0,5 м. В варианте этой версии агрегатов отсутствовал отражатель над первой ступенью. Ловушки охлаждения агрегатов

подключались к системе распределения криоагента. В качестве криоагента выступал рассол, охлаждённый до температуры минус 20 °С. Для снижения обратного потока масла, в первой ловушке агрегатов был смонтирован змеевик. В качестве форвакуумных насосов для агрегатов ВА-5-4 были использованы два бустерных насоса БН-3, на выходе которых установлен золотниковый насос ВН-7Г-1.

В начале 90-х годов, в связи с запуском Нуклотрона, была проведена модернизация вакуумной системы для создания системы безмасляной откачки. В качестве безмасляного насоса был использован гелиевый криогенный насос КН-20000 с теоретической быстротой действия в молекулярном режиме 20000 л/с (Рис. 2.2.31).

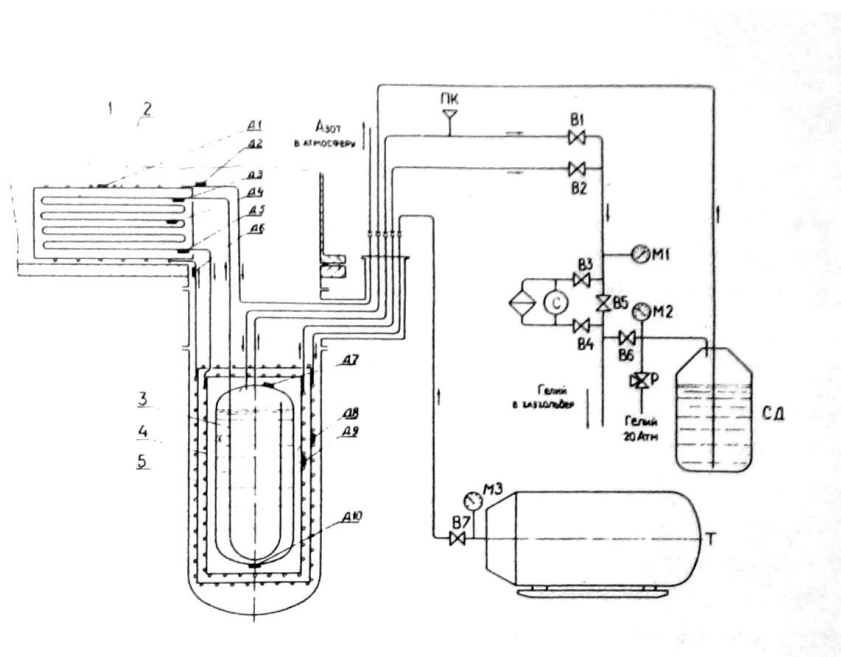


Рис. 2.2.31. Схема криогенного вакуумного насоса КН-20000: 1 — криопанель; 2 — азотный тепловой экран; 3 — ёмкость для жидкого гелия; 4 — внутренний тепловой экран, охлаждаемый газообразным гелием; 5 — внешний тепловой экран, охлаждаемый жидким азотом; Д1-Д10 — температурные датчики, СД — сосуд Дьюара; Т — танк для жидкого азота; В1-В7 — вентили; М1-М3 — манометры; ПК — предохранительный клапан; Р — редуктор; С — счётчик

Холодный газообразный гелий поступает в криопанель из ёмкости (3) объёмом 250 л. Эта ёмкость находится в том же вакуумном объёме, что и криопанель. Криопанель установлена на месте одного из вакуумных агрегатов и периодически, по мере опорожнения, заполняется жидким гелием из транспортного сосуда Дьюара.

С выхода криопанели гелий поступает в трубку охлаждения внутреннего теплового экрана (4) с температурой 50 °К. Внешний тепловой экран (5) ёмкости охлаждается жидким азотом, который поступает из танка, поэтому имеет температуру 80 °К. Расход жидкого азота регулируется величиной давления в танке.

2.2.6.1 Модернизация вакуумной системы

В ходе выполнения проекта NICA в последние годы была проведена масштабная модернизация вакуумной системы инжекционного комплекса Нуклотрона (ИКН) на базе ускорителя ЛУ-20. Вместо существующего форинжектора предполагается установить новый предварительный ускоритель RFQ. На Рис. 2.2.32 представлена новая схема инжекционного комплекса Нуклотрона. Ion source — ионный источник, RFQ — предварительный ускоритель, LU-20 — линейный ускоритель, Target — пучковый канал с мишенью, Channel — инжекционный канал в Нуклотрон.

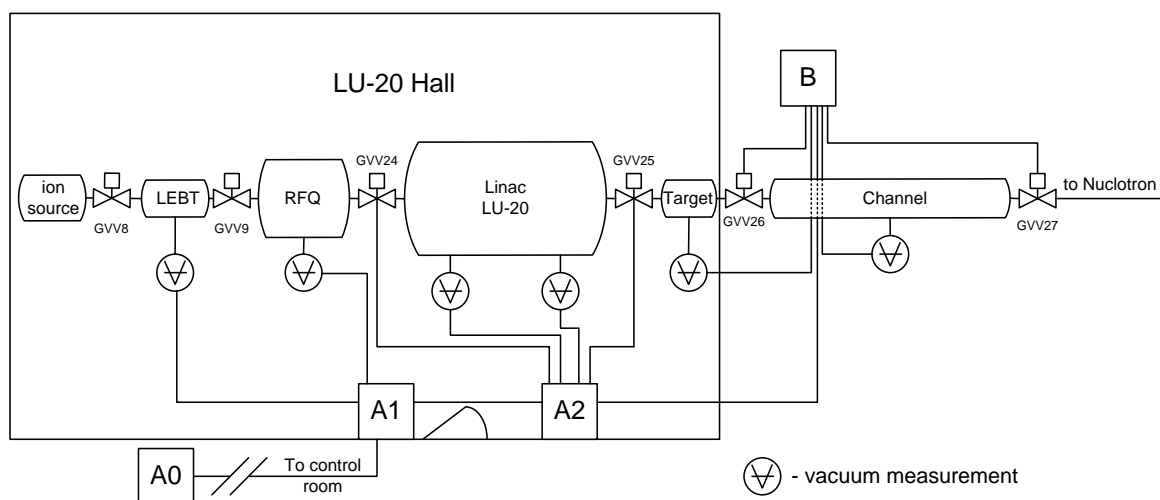


Рис. 2.2.32. Новая схема вакуумной системы ЛУ-20

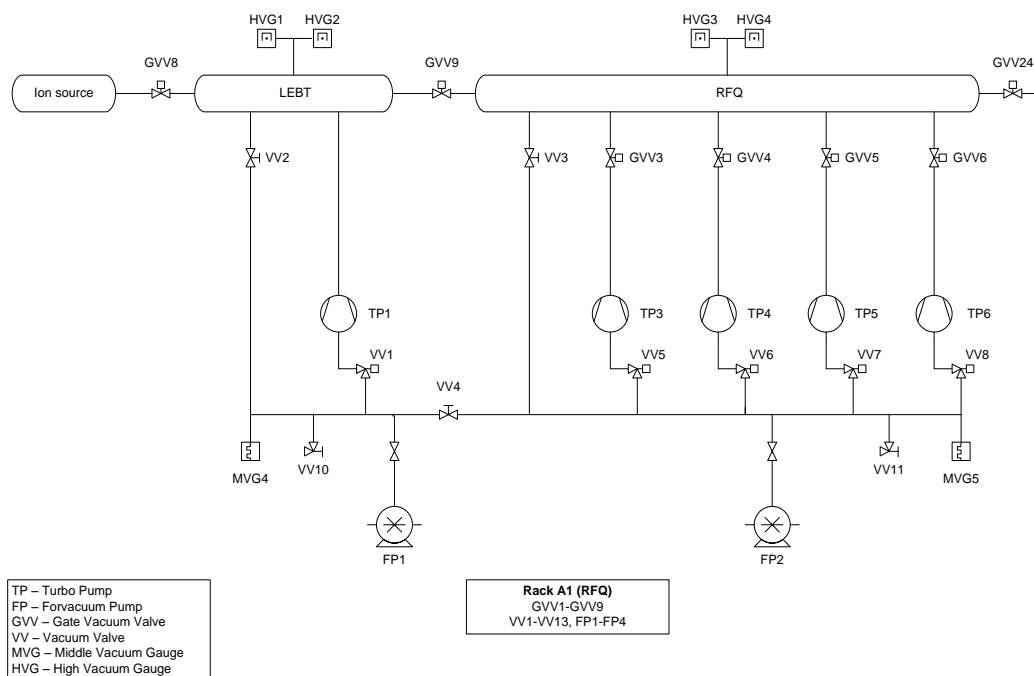


Рис. 2.2.33. Вакуумная схема LEBT и RFQ

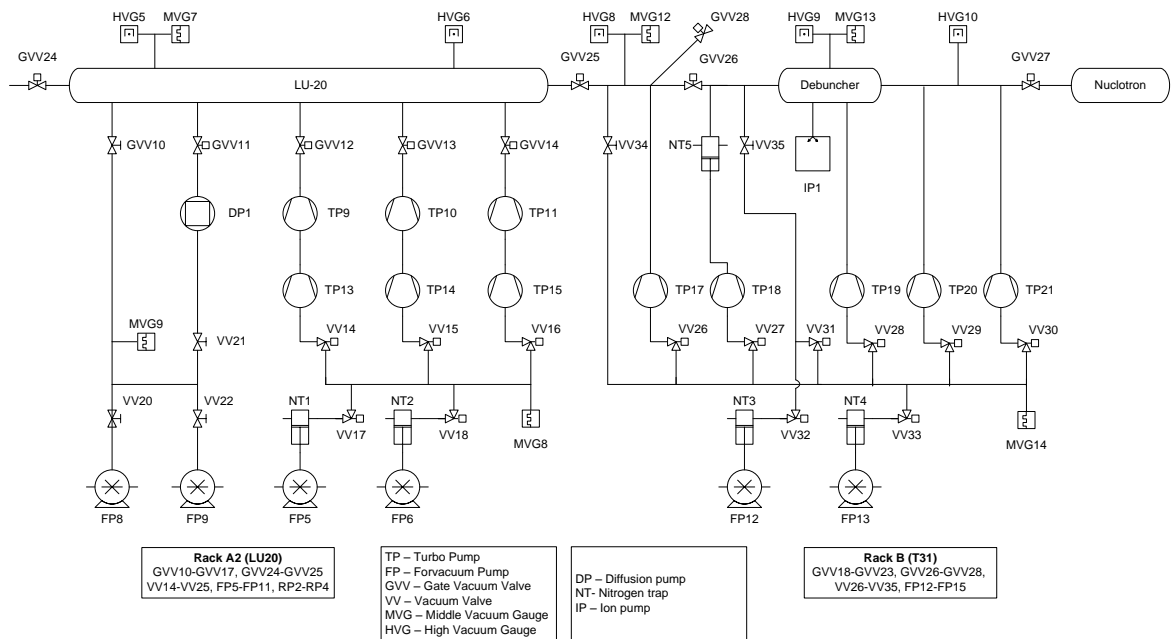


Рис. 2.2.34. Вакуумная схема ЛУ-20 и инжекционного канала в Нуклотрон

2.2.6.2 Автоматизированная система управления

Автоматизированная система управления (АСУ-2) вакуумным оборудованием ИКН предназначена для:

- локального и дистанционного управления вакуумным оборудованием;
- измерения, передачи на пульт управления ЛУ-20 и отображения параметров системы;
- защиты оборудования при возникновении аварийных ситуаций.

Защита оборудования в аварийных ситуациях осуществляется на двух уровнях:

- система блокировок внешнего физического оборудования, реализованная на аппаратном уровне и работающая независимо от центрального пульта управления А0;
- система блокировок вакуумного оборудования, реализованная с помощью центрального контроллера в шкафу управления А0.

Логика АСУ для ЛУ-20 построена на принципе, что накладывается запрет на включение (открытие) на элемент вакуумной системы, если не включён (открыт) предыдущий элемент в вакуумной схеме. Необходимо также контролировать и выводить информацию о следующих параметрах вакуумной системы: температура каждого турбомолекулярных насосов, наличие воздуха высокого давления (две точки измерения), наличие напряжения на трех фазах во всех шкафах управления.

Блокировка внешнего физического оборудования при повышении вакуума до установленного на вакуумметрах значений должна осуществляться без использования центрального контроллера в шкафу А0, а только за счёт исполняющих устройств в шкафах А1, А2, В. На пульт линейного

ускорителя выводится информация о срабатывании вакуумных блокировок. Система блокировок должна независимо реагировать на изменение вакуумных условий в различных вакуумных объёмах инжекционного комплекса (Рис. 2.2.30):

- если вакуум ухудшается выше установленного значения на вакуумметрах, расположенных на RFQ, то в шкафу А1 формируется сигнал «плохой вакуум» для внешнего оборудования, и закрывается шибер GVV24;
- если вакуум ухудшается выше установленного значения на вакуумметрах, расположенных на ЛУ-20, то в шкафу А2 формируется сигнал «плохой вакуум» для внешнего оборудования, и закрываются шиберы GVV24 и GVV25;
- если вакуум ухудшается выше установленного значения на вакуумметрах, расположенных на Target или Channel, то в шкафу В формируется сигнал «плохой вакуум» для внешнего оборудования, и закрываются шиберы GVV25 и GVV27.

Для мониторинга и управления вакуумной системой ЛУ-20 используется АСУ, выполненная на основе лицензионной версии SCADA система Zenon (OPC сервер). В состав АСУ входят шкафы управления (А1, А2, В, Рис. 2.2.32), расположенные непосредственно в зале ускорителя, и центральный шкаф (А0), в котором расположен управляющий компьютер и центральный контроллер (Рис. 2.2.35). На Рис. 2.2.36 изображена общая мнемосхема вакуумной системы на экране компьютера управления.

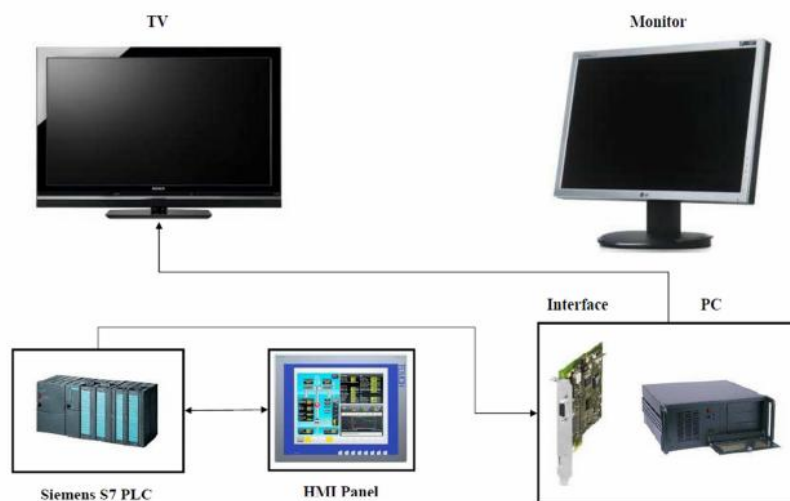


Рис. 2.2.35. Общая схема центрального пульта управления

ПЛК (программируемый логический контроллер): программа, работающая на главном ПЛК (Siemens simatic s7-300), написана на языке Step7 в версии STL. Для программирования данного контроллера используется специальное оборудование — программатор.

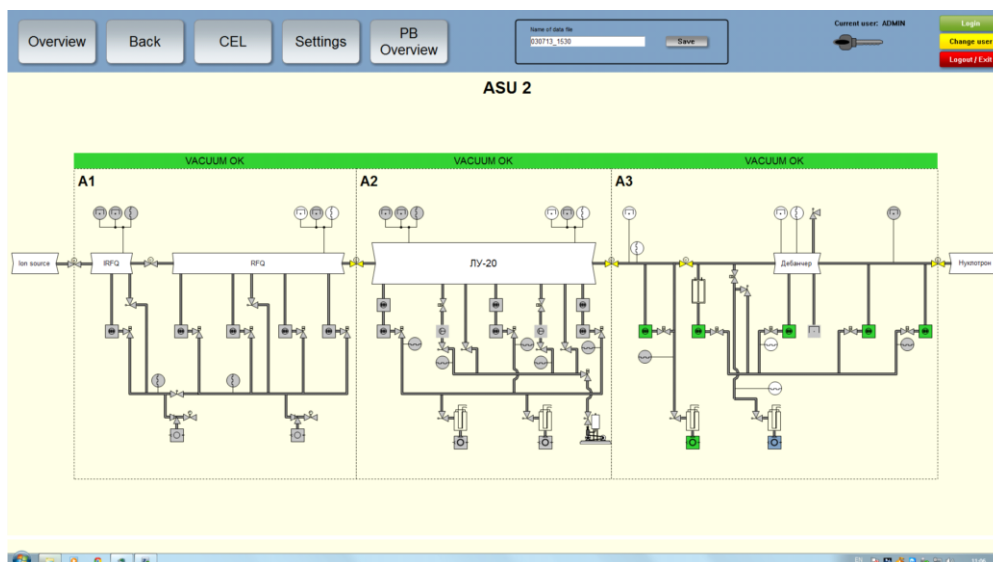


Рис. 2.2.36. Общая мнемосхема вакуумной системы ИКН

2.3 ИНЖЕКТОР ТЯЖЁЛЫХ ИОНОВ

Линейный ускоритель тяжёлых ионов (далее: HILAC — Heavy Ion Linear accelerator) предназначен для обеспечения инжекции в Бустер тяжёлых ионов (например, золота $^{197}\text{Au}^{31+}$) с энергией 3,2 МэВ/н [2.13]. HILAC может ускорять пучки тяжёлых ионов с отношением заряда к массе $q/A \geq 1/6$ и пиковым током до 10 мА в импульсе длительностью $8 \div 27$ мкс при частоте повторения импульсов до 10 Гц.

Разработка и изготовление ускорителя тяжёлых ионов осуществляется совместно с компанией Bevattech OHG и Институтом прикладной физики IAP (Германия, Франкфурт).

Структурно инжектор состоит из следующих основных частей:

- электронно-струнный источник высокозарядных ионов «КРИОН-NICA»¹, расположенный на высоковольтной платформе форинжектора под потенциалом до 110 кВ относительно земли;
- канал транспортировки ионов низкой энергии (Low Energy Beam Transfer, LEBT);
- ускоритель с резонатором на базе высокочастотной квадрупольной фокусировки типа 4-rod RFQ (четырёхстержневой);
- канал транспортировки ионов промежуточной энергии с группирователем (Medium Energy Beam Transfer, MEBT);

¹ Далее в тексте «КРИОН-N»

- две секции резонаторов с трубками дрейфа и квадрупольными линзами (т.н. DTL — Drift Tube Linac): IH1 и IH2;
- канал транспортировки HILAC — Бустер.

Основные элементы HILAC будут размещены в здании «ЭГ-5», которое является пристройкой к корпусу № 1 ЛФВЭ ОИЯИ и где ранее размещался электростатический генератор на 5 МВ. Для этого был проведён капитальный ремонт помещений данного здания, с учётом требований предъявляемых к размещению оборудования линейного ускорителя и соответствующих испытательных стендов.

Все секции ускорителя располагаются на специальных юстировочных подставках устанавливаемых на общую жёсткую стальную раму длиной 14,5 м, что обеспечивает требуемые точность юстировки и долговременную стабильность положения элементов друг относительно друга.

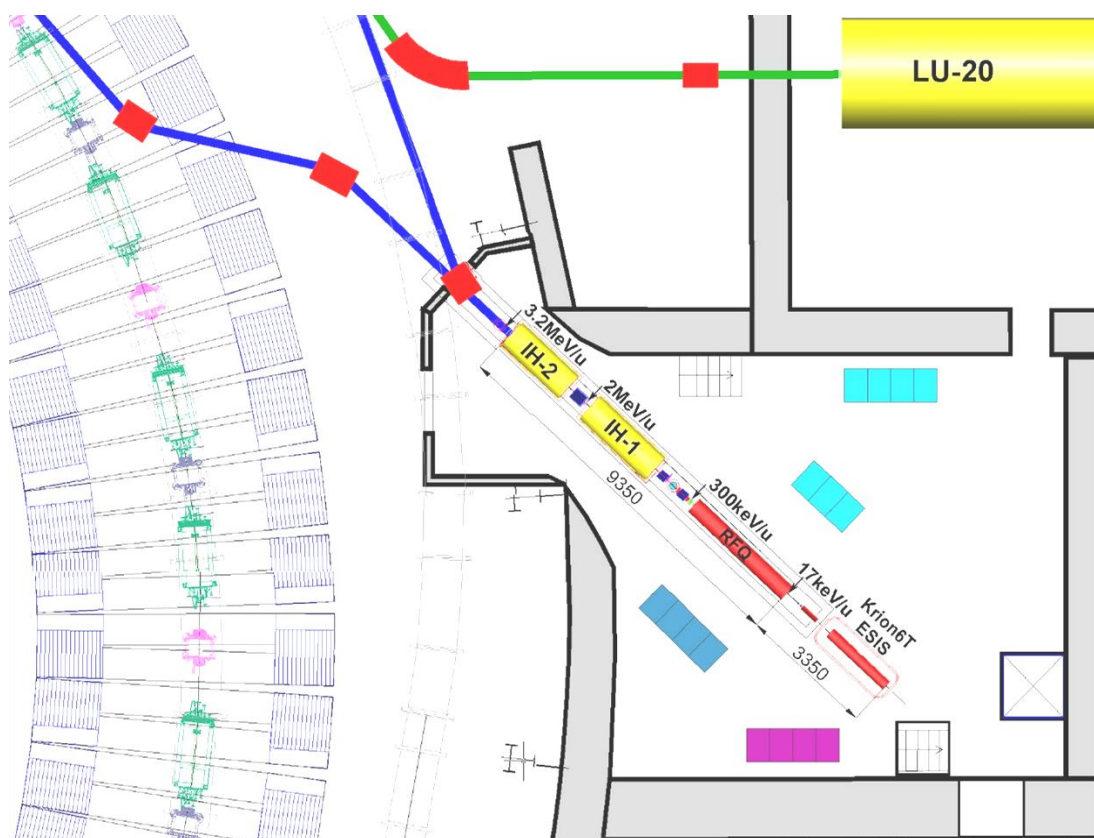


Рис. 2.3.1. Расположение и структура инжектора тяжёлых ионов (пояснения в тексте)

2.3.1 Источник тяжёлых многозарядных ионов «КРИОН-N»

Проектом предусматривается создание электронно-струнного источника высокозарядных ионов «КРИОН-N», обеспечивающего получение до $2 \cdot 10^9$ ионов Au^{31+} за импульс с частотой следования импульсов 10 Гц при времени вывода пучка ионов из источника $\tau_{\text{extraction}} \geq 9$ мкс и

нормализованным среднеквадратичным эмиттансом $\varepsilon \leq 0,1$ пм·мм·мрад пучка, выведенного из источника.

Физическим основанием для создания полномасштабного источника высокозарядных ионов «КРИОН-N» являются результаты экспериментальных исследований и опыт эксплуатации существующего электронно-струнного источника высокозарядных ионов «КРИОН-2» (ЛФВЭ ОИЯИ) на инжекционном комплексе Нуклотрона [2.14], а также ведущиеся в настоящее время работы по созданию и исследованиям режимов работы стендового электронно-струнного источника высокозарядных ионов «КРИОН-6Тс».

Источник высокозарядных ионов «КРИОН-N» (Рис. 2.3.2) — криогенный сверхвысоковакуумный ионизатор со сверхпроводящим соленоидом, создающим поле до 6 Тл, который имеет три температурных терминала (4,2 °К, 40 °К и 300 °К) и состоит из:

- электронно-ионно-оптической системы;
- криогенно-магнитной системы;
- криогенно-вакуумной системы;
- системы ввода рабочих веществ в электронную струну;
- системы электрического питания и управления.

Длина источника 1460 мм. Дополнительно к указанным системам предусматривается создание и установка устройства измерения эмиттанса выведенного из источника пучка ионов, а также создание и установка системы анализа зарядностей выведенного из источника пучка ионов.

Все элементы источника «КРИОН-N» выполняются из немагнитных материалов (немагнитная нержавеющая сталь, медь М1, молибден, алюминий).

Электронно-ионно-оптическая система (ЭОС) общей длиной около 1200 мм погружена в магнитное поле сверхпроводящего соленоида с максимальной напряжённостью в центре $B_{\max} = 6$ Тл. Катод электронной пушки и отражатель электронов расположены в рассеянном магнитном поле, равном $B_{\max}/20$, симметрично относительно центра соленоида и вне него, на расстоянии 50 мм от торцов соленоида. ЭОС включает нижеследующие элементы.

Электронная пушка (ЭП) с металлосплавным иридиево-циркониевым катодом диаметром 1,2 мм, внутренним и внешним фальшь-катодами диаметром 6 мм, фокусирующими «пирсовскими» электродами (усечённый конус с углом раствора 67,5°) и анодами. Максимальное расстояние промежутка катод-анод оставляет 15 мм. На катод подаётся отрицательное напряжение до — 25 кВ, тогда как на анодах и далее на всей структуре дрейфа поддерживается потенциал платформы

инжектора. Постоянное напряжение на катоде обеспечивается источником постоянного напряжения (производство фирмы Spellmann). ЭП находится при температуре 300 °К.

Секционированная структура дрейфа электронов расположена соосно с магнитным полем соленоида и состоит из 24 секций, что позволяет подавать на различные секции распределение потенциала (от 0 до +2 кВ). Секции структуры дрейфа представляют собой медные цилиндрические трубки с внутренним диаметром $3 \div 5$ мм в области однородного магнитного поля; диаметр секций ступенчато растёт с выходом в спадающее магнитное поле в областях ЭП и отражателя электронов (ОЭ). Аксиальный зазор между секциями составляет 1 мм. Основная часть структуры дрейфа, расположенная в однородном магнитном поле, находится на температурном терминале 4,2 °К, что обеспечивает вакуум в основной части ионной ловушки до 10^{-12} Торр. Несколько секций структуры дрейфа, граничащих с ЭП и ОЭ, находятся на температурном терминале 40 °К. Именно эти секции соединены с ячейками ввода рабочих веществ (золото и охлаждающие газы) в электронную струну.

Отражатель электронов (ОЭ) с собственно отражателем, фокусирующими электродами, и анодами выполнен зеркально симметрично (по отношению к ЭП) относительно центра соленоида. Вместо катода в ОЭ имеется отверстие диаметром 4 мм для вывода ионов в аксиальном направлении. На ОЭ подаётся отрицательное напряжение до -40 кВ, что обеспечивает эффективное отражение всех электронов и, одновременно, вывод ионов в аксиальном направлении. Постоянное напряжение на отражателе ОЭ обеспечивается источником выпрямительного типа SL40N150 (производство фирмы Spellmann). ОЭ находится на температурном терминале 300 °К.

Основная часть электронов, эмитированных ЭП, после многократных пролётов вдоль структуры дрейфа и отражений дрейфует поперёк магнитного поля в радиальном направлении и, в конце концов, высаживается на аноде ЭП и аноде ОЭ. На каждый из этих анодов электроны приносят среднюю мощность около 75 Вт, которая снимается водяным охлаждением. Аноды находятся при температуре 300 °К.

Ионно-оптическая система (ИОС). В пространстве между ЭП и ОЭ для удержания и вывода накопленных ионов используются элементы ЭОС. За отражателем электронов ИОС состоит из нескольких цилиндрических трубок дрейфа, образующих электростатическую линзу, или, по необходимости, систему электростатических линз и дефлекторов.

В рабочем режиме выведенный из источника ионный пучок фокусируется с помощью вышеупомянутой системы электростатических линз и дефлекторов на выходной шиббер и выводится вдоль оси источника на вход в RFQ.

Система анализа спектра зарядности выведенных ионов может быть двух типов. Это может быть анализ по времени пролёта ионов (TOF), где базой будет служить RFQ (в пассивном режиме), расположенный между выходом источника и линейным ускорителем HILAC. Этот вариант системы времяпролетного анализа спектра зарядностей наименее затратный, но априорно трудно сказать о разрешающей способности такой системы. Вполне возможно, на уровне 30-й зарядности золота разрешающая способность по зарядности будет недостаточной.

Поэтому необходимо предусмотреть альтернативные возможности реализации системы анализа спектра зарядностей выведенных ионов. Это может быть отдельная специальная система времяпролетного анализа на основе вакуумной камеры (длиной около 2 м), расположенная под некоторым углом (от 30° до 90°) к оси системы вывода ионов; отклонение пучка ионов в такую времяпролетную систему TOF предполагается осуществлять с помощью квадрупольного электростатического дефлектора ионов (производство Dreebit G.m.b.h. Германия) с потенциалом на отклоняющих пластинах до ± 25 кВ и с возможностью смены полярности до 30 Гц. Вторым способом анализа спектра зарядностей может быть использование криволинейного аналога фильтра Вина — система на основе анализа движения заряженных частиц в скрещённых электрических и магнитных полях, в этой системе при определённой настройке пролетают только частицы с определённым отношением заряда к массе, все остальные отклоняются. Криволинейный фильтр Вина может быть расположен за квадрупольным дефлектором вместо вышеописанной камеры системы TOF. Преимуществом фильтра Вина по сравнению с времяпролетной системой является его небольшая длина (до 30 см) и хорошая разрешающая способность. Недостатком существующих фильтров Вина (например производство Dreebit G.m.b.h. Германия), как плата за хорошую разрешающую способность, является маленькая апертура и возможность работать только с относительно малыми ионными токами; в результате анализ будет проводиться только для малой приосевой области выведенного ионного пучка, что может быть не совсем адекватно полному ионному пучку.

Криогенно-магнитная система включает сверхпроводящий соленоид и криокулер, обеспечивающий непрерывную циркуляцию жидкого гелия по замкнутому циклу и, соответственно, обеспечивающий непрерывное поддержание необходимых частей источника на температурных терминалах 4,2 °К и 40 °К. Параметры этих элементов:

- сверхпроводящий соленоид: длина намотки — 1200 мм, внутренний радиус намотки — 37,0 мм, внешний радиус намотки — 55,0 мм; 24-30 слоёв сверхпроводящего кабеля диаметром 0,75 мм с изоляцией (производство фирмы Oxford Superconducting Inc., США), количество витков в слое — 1600, максимальный рабочий ток — 150 А, соответствующее магнитное поле на оси — 6 Тл, критический ток при 4,2 °К и 6 Тл — 250 А. Каркас соленоида состоит из медной трубы (медь М1) с медными фланцами толщиной 35 мм, которые

укреплены на трубе с помощью резьбы, облуженной индием. Для крепления теплопровода, соединяющего каркас со 2-ой ступенью криокулера (температурный терминал 4,2 °К) на фланцах делаются лыски и отверстия,

- криокулер: наиболее оптимальным представляется криокулер производства фирмы Sumitomi (Япония), модель SRDK-408D-W71D с компрессором водяного охлаждения CSW-71D. Криокулер состоит из *рабочей головки*, которая через систему фланцев входит в рабочее пространство источника, и *компрессора*, который расположен отдельно. Головка криокулера обеспечивает поддержание двух температурных терминалов: 4,2 °К и 40 °К. Каркас сверхпроводящего соленоида и внутренняя часть ЭОС соединены с температурным терминалом 4,2 °К. Внешние части ЭОС соединены с температурным терминалом 40 °К. Компрессор обеспечивает непрерывное ожижение гелия и его циркуляцию к головке криокулера через гелиепровод максимальной длиной 3 м.

Криогенно-вакуумная система обеспечивает откачку рабочего пространства источника до давлений 10^{-8} Торр предварительно с помощью форвакуумного безмасляного насоса (Varian Vacuum Technologies, модель SH-100), и далее с помощью турбомолекулярного насоса (Pfeiffer, модель TMU 071 UP N, TC 100). Насосы соединены последовательно и через защитный шибер соединяются с рабочим объёмом источника. Места соединения откачивающих трубок с откачиваемым рабочим объёмом источника находятся при температуре 40 °К в районе ЭП и/или ОЭ. Дальнейшее улучшение вакуума в рабочем пространстве структуры дрейфа/ионной ловушки до значений 10^{-12} Торр происходит за счёт намораживания атомов остаточного газа на трубках структуры дрейфа, соединённых с температурным терминалом криокулера 4,2 °К.

Система ввода рабочих веществ в электронную струну в источнике «КРИОН-N» предполагается ввод рабочих веществ (атомов золота и охлаждающих газов) не от внешнего источника однозарядных ионов, как это делается в других источниках электронно-лучевого типа, а с помощью разработанной и апробированной на источнике «КРИОН-2» системы внутренней импульсной инжекции.

Ячейка импульсной инжекции атомов золота (длительность инжекции более 20 мс) представляет собой вольфрамовую проволочку, с напыленным на неё слоем золота, натянутую вблизи одной из разрезанных трубок дрейфа, находящейся на терминале 40 °К. Импульс тока через проволочку приводит к нагреву и испарению золота и его проникновению в рабочее пространство и электронную струну.

Ячейка импульсной инжекции охлаждающих газов (метан, азот, аргон), необходимых для ионного охлаждения располагается вблизи другой секции структуры дрейфа на терминале 40 °К. Ячейка представляет собой медный стержень с нанесённым слоем графита. Газы, предварительно

замороженные при 40 °K на поверхности стержня, при пропускании импульса тока через графитовую поверхность частично испаряются и проникают в рабочее пространство источника.

Возможной альтернативой является система внешней инжекции однозарядных ионов золота от внешних источников (жидкометаллический источник (AuGe) или, более вероятно, hollow cathode ионный источник (именно так сделано в BNL) через квадрупольный электростатический дефлектор. При реализации схемы внешней инжекции однозарядных ионов золота пучок первичных ионов формируется вдоль оси под углом (до 90 градусов) к оси системы ионный источник-RFQ и с помощью электростатического квадрупольного дефлектора отклоняется и инжектируется в источник вдоль оси системы со стороны отражателя (сторона вывода ионов). При этом на пластины дефлектора подаются отклоняющие напряжения до 25 кВ. После ионизации ионы выводятся из источника через дефлектор напрямую без отклонения, для этого на все пластины дефлектора подаётся одинаковый отрицательный потенциал до -25 кВ. Частота переключения напряжения пластин дефлектора 30 Гц при максимальной амплитуде (25 кВ), 50 Гц при 15 кВ. Эта система внешней инжекции однозарядных ионов в электронно-струнный ионный источник сейчас в стадии начала экспериментальных исследований (совместный проект с iThemba Labs, ЮАР).

Системы электрического питания и управления включают источники постоянного напряжения до ± 40 кВ, блоки ввода и вывода тока из сверхпроводящего соленоида, системы управления движением электронов и ионов, системы диагностики, защиты и безопасности соленоида, системы диагностики и мониторинга процессов накопления электронов и ионов в рабочем пространстве источника. Компьютеры, через которые производится контроль и автоматическое или ручное управление источником, могут располагаться, как рядом с источником (для настройки и работы в режиме off-line), так и дистанционно, в комнате управления инжекционным комплексом.

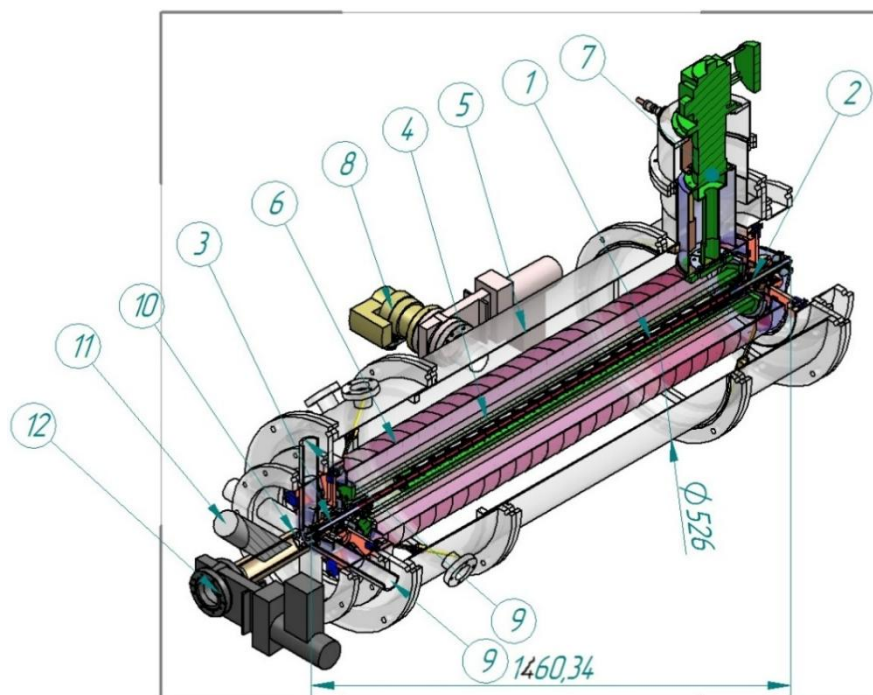


Рис. 2.3.2. Источник «КРИОН-N», 1 — элементы электронно-ионно-оптической системы, расположенные вдоль оси соленоида, 2 — электронная пушка и 3 — отражатель электронов, расположенные в рассеянных магнитных полях напряжённостью $V_{max}/20$ снаружи соленоида, в 50 мм от края его обмотки, 4 — сверхпроводящий соленоид (длина 1200 мм), 5 — внешний вакуумный кожух, 6 — медный тепловой экран, 7 — блок головки криокулера, 8 — шибер безопасности на входе турбомолекулярного и форвакуумного наносов, 9 — камера подвижных детекторов: а) позиционно-чувствительного детектора для измерения эмиттанса ионного пучка; б) детектора рентгеновского излучения для дополнительного анализа спектра зарядности полученных ионов, 10 — электростатическая линза управления выведенным ионным пучком, 11 — вход времяпролетного анализатора зарядностей ионов (база 2 м, расположен, к примеру, под углом 45° к оси системы), 12 — шибер безопасности перед входом в ускоряющий промежуток 200 кВ

2.3.2 Конструкция форинжектора

Источник «КРИОН-N» расположен на платформе, выполненной из немагнитных материалов и изолированной от «земли» (Рис. 2.3.3). На второй высоковольтной изолированной платформе размещён компрессор криокулера, охлаждающего соленоид источника «КРИОН-N» до температуры 4°K . Платформа для размещения компрессора криокулера, выполнена из немагнитных материалов и установлен на 4-х изоляторах, выдерживающих напряжение 300 кВ. Необходимость отдельного размещения компрессора криокулера от основной платформы вызвана вибрацией, которую он создаёт при работе. Обе платформы имеют общий потенциал до +120 кВ. Рассматривается два варианта организации высоковольтного питания платформы. В первом случае потенциал создается импульсным генератором высокого напряжения (длительность импульса до 50 мкс). Второй вариант постоянное питание платформы от ВВ источника напряжения. Оборудование, размещённое на высоковольтных платформах, потребляет до 15 кВт, из которых 12 кВт составляет мощность криокулера. Компрессор криокулера имеет систему водяного

охлаждения, которая размещена под потенциалом земли, а циркуляция дистиллированной воды производится через изоляционный шланг, выдерживающий напряжение не менее 300 кВ.

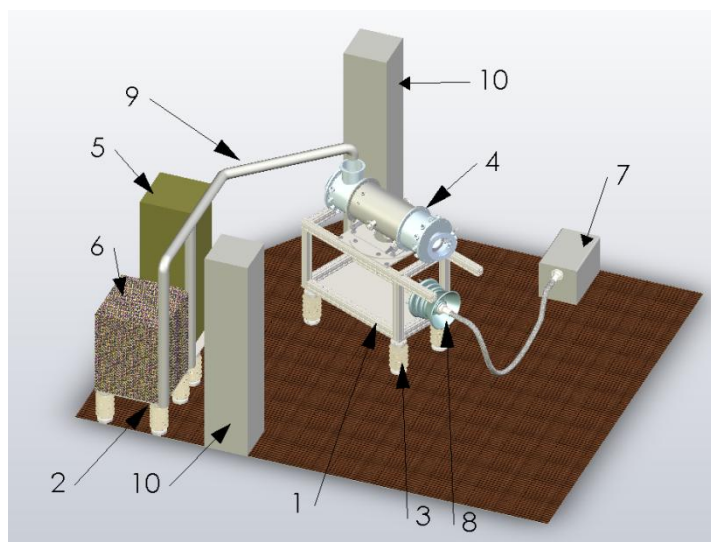


Рис. 2.3.3. Схема размещения систем источника высокозарядных ионов «КРИОН-N» в зале инжектора комплекса NICA: 1 — высоковольтная платформа для размещения источника «КРИОН-N», блоков питания и управления, выполненная из немагнитных материалов, 2 — высоковольтная платформа для размещения на ней компрессора криокулера, 3 — изоляторы на 300 кВ, 4 — источник «КРИОН-N», 5 — стойка с блоками питания и управления источником «КРИОН-N», 6 — компрессор криокулера, 7 — ВВ источник XRV-225, 8 — изолятор развязывающий, 9 — экранированный кабельный канал, 10 — колонны здания

2.3.2.1 Канал транспортировки ионов низкой энергии в HILAC

Канал транспортировки ионов низкой энергии LEVT-Н1 служит для перевода пучка с минимальными потерями от ионного источника до секции ускорителя HILAC с высокочастотной квадрупольной фокусировкой (RFQ-секции) [2.15]. В процессе перевода производится предварительное ускорение ионов и согласование фазового портрета целевых ионов с акцептансом RFQ-секцией HILAC.

Канал LEVT-Н1 предназначен для работы с ионным источником электронно-струнного типа «КРИОН-N». В Таблице 2.3.1 приведены основные параметры пучка в канале транспортировки.

Таблица 2.3.1. Основные параметры пучка в канале транспортировки ионов в HILAC

Ионы	Au ³¹⁺ и несколько соседних зарядностей
Интенсивность	~ 3·10 ⁹ (Au ³¹⁺); до 1,5·10 ¹⁰ (полный спектр)
Ток, мА	10
Энергия ионов, кэВ/заряд: на входе/на выходе	20/108
Частота повторения, Гц	10 (3 импульса за 5 с)
Эффективность перевода, %	95
Поперечный среднеквадратичный эмиттанс, π·мм·мрад: на входе/на выходе	23,2/10

Структура канала транспортировки ионов в HILAC (LEBT-HI) представлена на Рис. 2.3.4. За начало канала транспортировки принят выходной электрод источника ионов «КРИОН-N».

Ионно-оптическая система (ИОС) канала LEBT-HI состоит из двух осесимметричных магнитных линз, двойного дипольного корректора, ускоряющей трубки, вытягивающего и фокусирующего электродов. В начальной части канала с помощью электродов и ускоряющей трубки производится предварительное ускорение ионов. Поперечное согласование пучка с HILAC осуществляется магнитными линзами. Коррекция траектории пучка производится двойным дипольным корректором. Элементы ИОС канала такие же, как и в канале транспортировки ионов низкой энергии форинжектора ЛУ-20.

Диагностика пучка в канале заключается в измерении его интенсивности и профиля. Для указанных целей используется узел диагностики.

Вакуумная система канала LEBT-HI содержит узел откачки, два вакуумных шибера и ионопровод. Узел откачки предназначен для создания рабочего вакуума порядка 10^{-7} Торр и контроля давления в пучковом объеме канала транспортировки. Вакуумные шиберы служат для отсекаания пучкового объема канала от смежных источника ионов и HILAC.

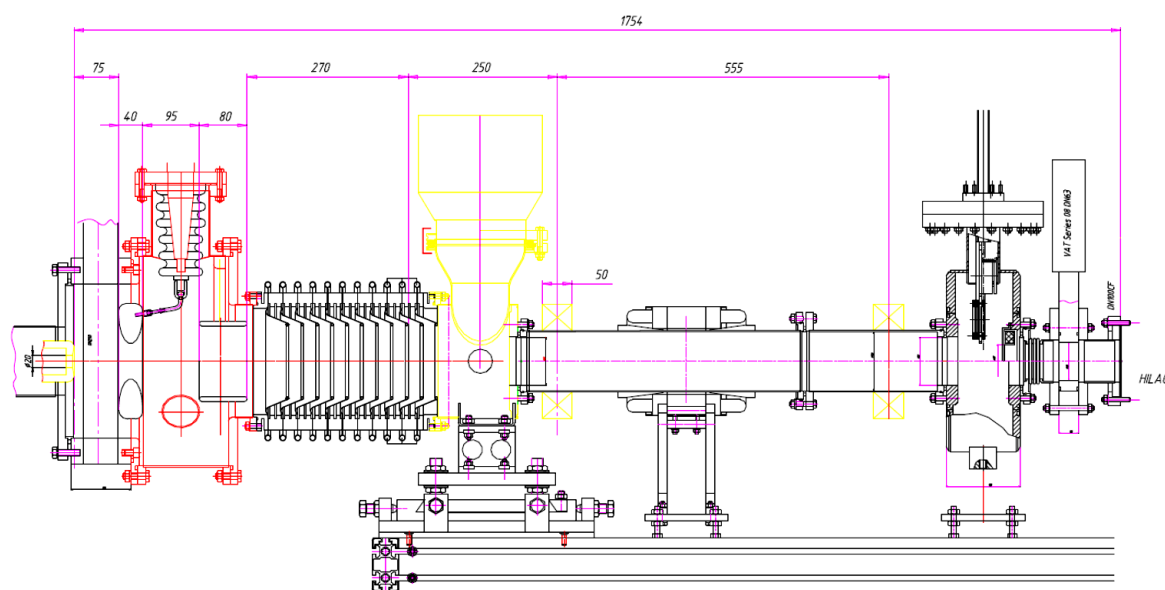


Рис. 2.3.4. Структура канала транспортировки пучка ионов низкой энергии в HILAC

Описание элементов ИОС, узла диагностики и вакуумного оборудования канала приведено в Приложении 2.1.

Для определения характеристик элементов ионно-оптической системы канала LEBT-HI было проведено моделирование динамики пучков ионов золота в канале транспортировки. Моделирование динамики ионов производилось программой MCIB04 [2.7]. При расчётах динамики

ионов использовались результаты моделирования электрических и магнитных полей в канале, приведенные в Приложении 2.2.

Было рассмотрено два значения полного тока ионного пучка (10 и 3,5 мА), соответствующие одно- и трехоборотной схемам инжекции ионов в Бустер. В Таблице 2.3.2 и Таблице 2.3.3 приведены параметры пучка ионов целевой зарядности (Au^{31+}) на входе и выходе канала транспортировки. На Рис. 2.3.5 дано начальное распределение ионов золота по зарядовым состояниям.

Таблица 2.3.2. Параметры пучка на входе канала транспортировки

Z/A	Ток, мА	4 RMS ε_n , π мм мрад	Диаметр пучка, мм	Энергия, кэВ/Z	v/c	RMS ε_{un} , π мм мрад	β , см/рад
0,157	3,5 и 10	0,24	10	20	$2,6 \cdot 10^{-3}$	23,2	26,96

Таблица 2.3.3. Требуемые параметры пучка ионов Au^{31+} на входе HILAC

Z/A	I_{inj} , мА	RMS $\varepsilon_{n,x,y}$, π мм мрад	$\alpha_{x,y}$, рад	U_{inj} , кВ	v/c	RMS ε_{un} , π мм мрад	β , см/рад	RMS x, y, см	RMS x', y', мрад
0,157	3,5	0,06	0,75	108	$6 \cdot 10^{-3}$	10	7,25	0,085	14,6

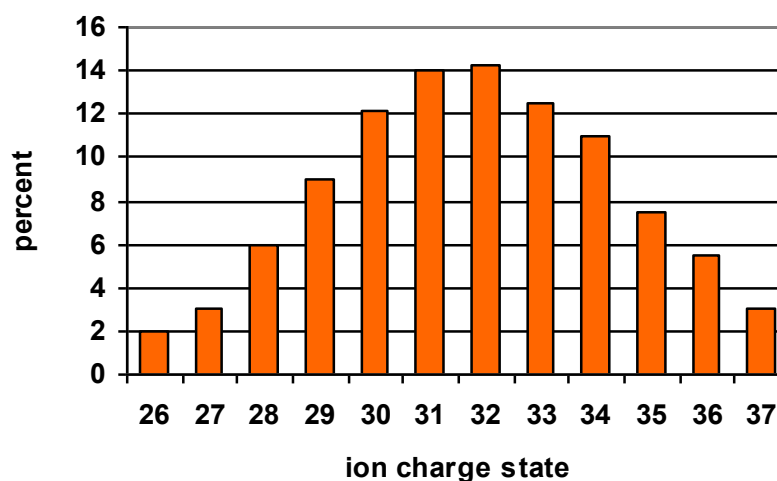


Рис. 2.3.5. Распределение ионов золота по зарядовым состояниям на входе канала транспортировки ионов низкой энергии

Ниже приведены результаты моделирования динамики ионов. Более подробные результаты моделирования приведены в Приложении 2.2.

1. Полный ток 10 мА.

Настройки ионно-оптической системы канала LEVT-Н1:

- $U_0 = U_3 = 89$ кВ, $U_1 = 30$ кВ, $U_2 = 60$ кВ, где U_0 — электрический потенциал на выходном электроде ионного источника «КРИОН-N», U_1 — электрический потенциал на вытягивающем электроде, U_2 — электрический потенциал на фокусирующем электроде, U_3 — электрический потенциал на входе ускоряющей трубки.

- Магнитные поля в осесимметричных линзах: 10 и 10,3 кГс.

На Рис. 2.3.6 показаны траектории движения ионов золота в канале LEBT-Н1.

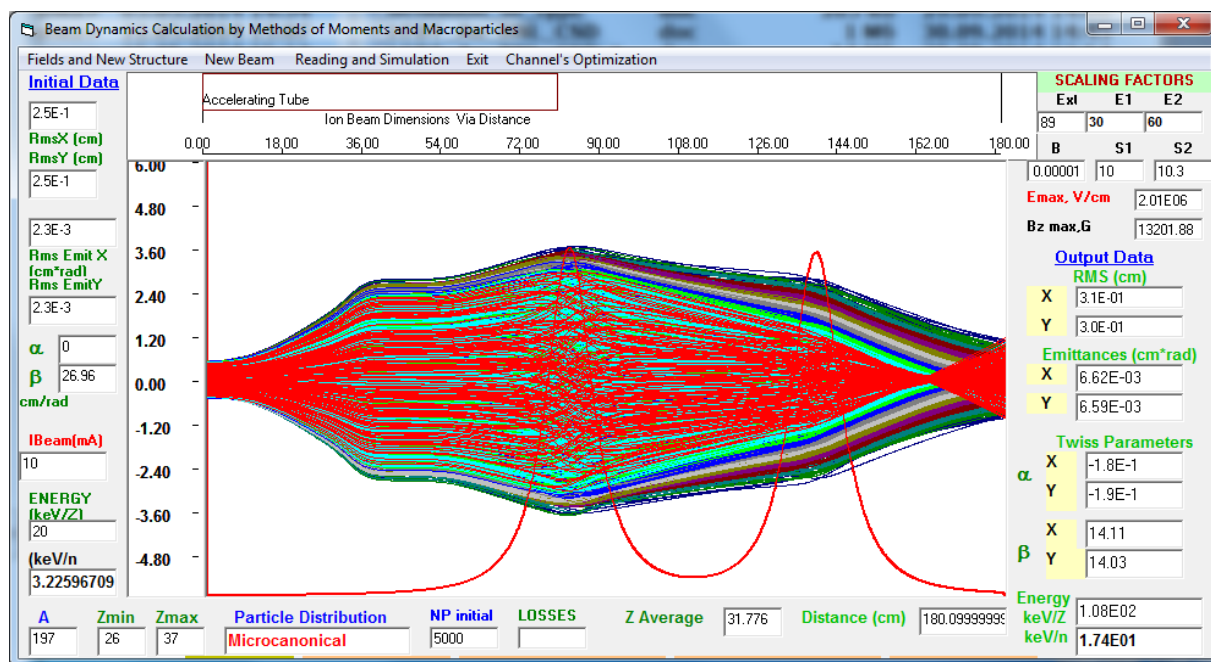


Рис. 2.3.6. Траектории ионов золота (интерфейс программы MCIB04)

2. Полный ток 3,5 мА.

Настройки ионно-оптической системы канала:

- $U_0 = U_3 = 89$ кВ, $U_1 = 50$ кВ, $U_2 = 60$ кВ.
- Магнитные поля в осесимметричных линзах: по 10 кГс.

На Рис. 2.3.7 показаны траектории движения ионов золота в канале LEBT-Н1.

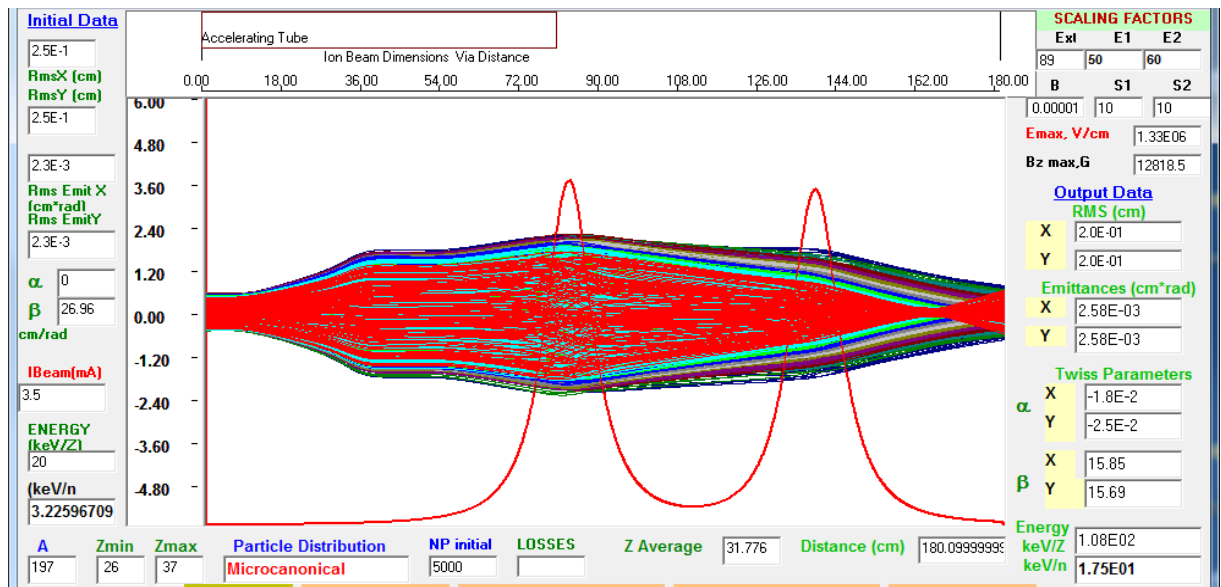


Рис. 2.3.7. Траектории ионов золота (интерфейс программы MCIB04)

В результате оптимизации параметров канала и согласования пучка ионов с HILAC можно достичь 80 ÷ 90 % попадания ионов целевой 31-ой зарядности в акцептанс ускорителя.

2.3.3 Линейный ускоритель тяжёлых ионов HILAC

Разработка и производство ускорителя тяжёлых ионов с отношением заряда к массе $q/A \geq 1/6$ и током пучка до 10 мА осуществляется совместно с компанией Bevattech OHG и Институтом прикладной физики IAP (Германия, Франкфурт). Он состоит из трех ускоряющих структур: секции RFQ и двух секций DTL с двумя согласующими каналами транспортировки пучков средней энергии (Рис. 2.3.8). Детальное описание ускорителя и его основных систем приводится в отчётах компании Bevattech OHG.

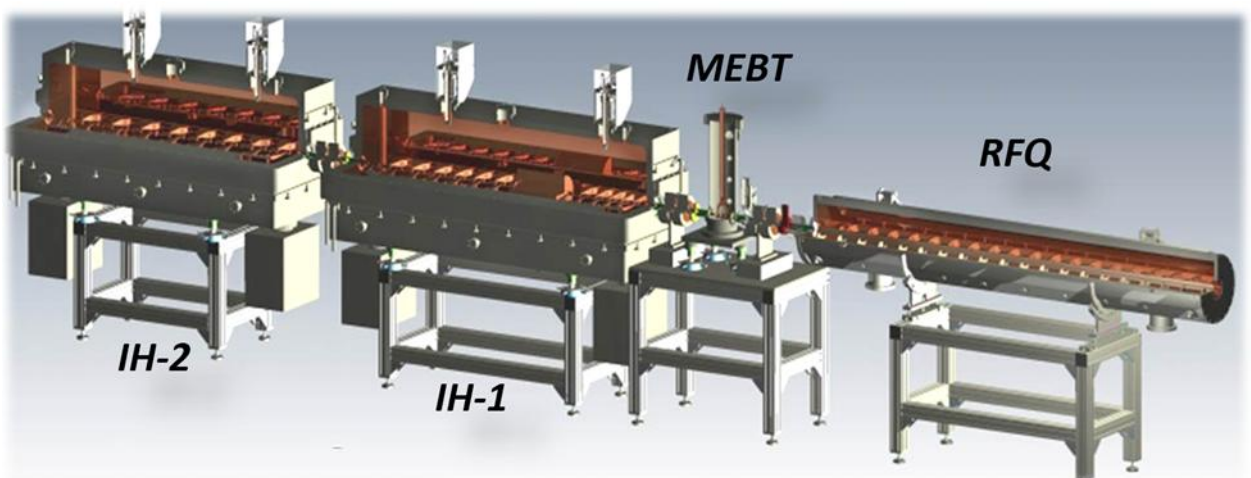


Рис. 2.3.8. Общий вид ускорителя HILAC

2.3.3.1 Ускоряющая и фокусирующая структура

Пучок, сформированный каналом транспортировки пучков низкой энергии LEBT, поступает в $\beta\lambda/2$ ускоряющую структуру с пространственно-однородной квадрупольной фокусировкой первой секции (RFQ). Применение RFQ обусловлено тем, что такая структура может обеспечить высокий коэффициент захвата пучка при низкой энергии инжекции, его группировку и дальнейшее ускорение с требуемыми параметрами. Electroды RFQ представляют собой четырёхпроводную линию (4-rod RFQ) с изменяющимся по длине расстоянием от оси до поверхности электродов и помещены в резонатор, работающий на стоячей волне типа TEM₁₁₀. Общий вид и поперечное сечение секции представлено на Рис. 2.3.9. Основные параметры RFQ приведены в Таблице 2.3.4.

Резонатор RFQ представляет собой цилиндр из нержавеющей стали длиной 3,1 м и толщиной стенки 50 мм с омеднением внутренней поверхности гальваническим способом. В резонаторе установлены 20 стоек, к которым крепятся четыре электрода с нанесённой модуляцией изготовленных из бескислородной меди. Настройка ячеек производится путём перемещения медных пластин между стойками.

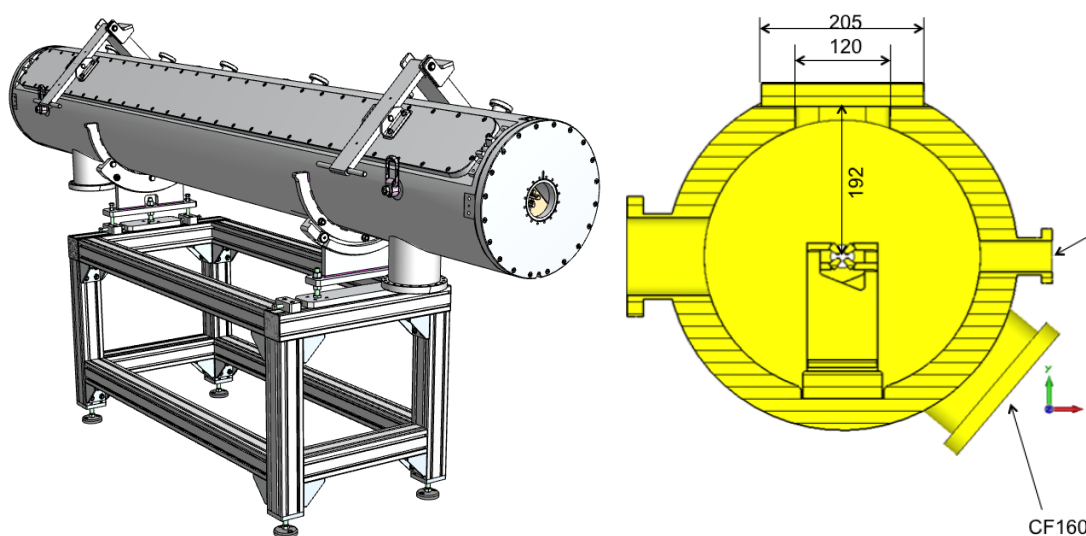


Рис. 2.3.9. Общий вид и поперечный разрез секции RFQ

Таблица 2.3.4. Параметры первой секции ускорителя — RFQ

Параметр	Единица	Значение
Входная энергия	кэВ/н	17
Выходная энергия	кэВ/н	300
Рабочая частота	МГц	100,625
Z/A	–	0,16
Ток	мА	0 ÷ 10
Напряжение на электродах	кВ	70
Коэффициент захвата	%	98
Апертура	мм	5,2 ÷ 3,0

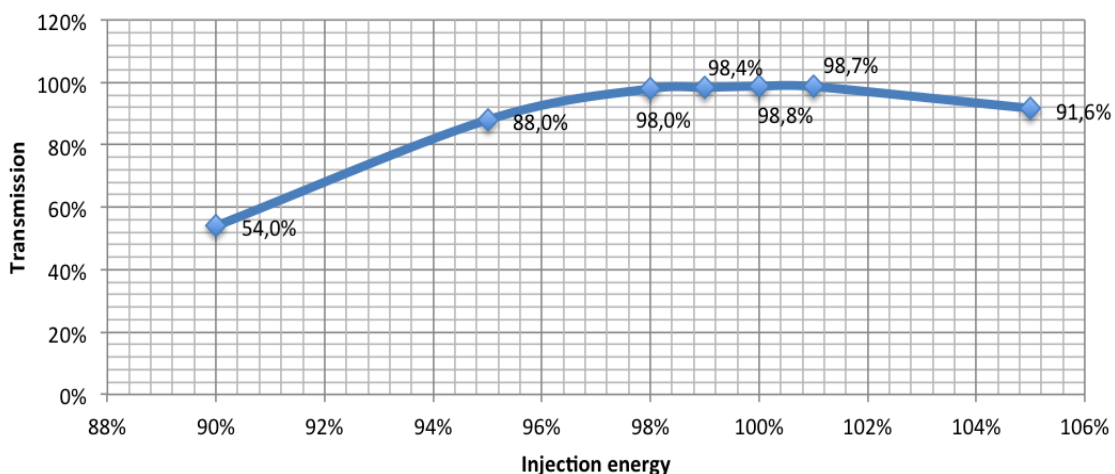


Рис. 2.3.10. Зависимость коэффициента захвата от энергии пучка на входе в RFQ

Для последующего ускорения пучка во второй и третьей секциях реализована концепция ускоряющей структуры KONUS (KOmbinierte NUll grad Struktur — нем.) — комбинированная структура с нулевой синхронной фазой. Это $\beta\lambda/2$ ускоряющая структура на основе трубок дрейфа, работающая на волне типа TEM_{110} . Основной особенностью KONUS является разделение каждого периода сетки на участки с различными задачами:

- основное ускорение в структуре с нулевой синхронной частицей с асинхронной инжекцией пучка и избыточной энергией по сравнению с синхронной частицей,
- поперечная фокусировка квадрупольными триплетами или осесимметричными линзами,
- продольная фокусировка несколькими группирующими зазорами с синхронной фазой порядка — 35° .

Таким образом, общий дефокусирующий эффект высокочастотного поля понижается, позволяя создавать относительно длинные многозазорные секции с «тонкими» трубками дрейфа без каких-либо фокусирующих элементов [2.16]. Расчёты, проведённые с помощью программы LORASR, показывают, что по сравнению с переменнo-фазовой фокусировкой ускоряющая структура KONUS обеспечивает 100 % коэффициент прохождения пучка и значительно меньший рост как поперечного, так и продольного эмиттанса [2.17]. Основные параметры второй (IH1) и третьей (IH2) ускоряющих секций приведены в Таблице 2.3.5 и Таблице 2.3.6.

Таблица 2.3.5. Параметры второй ускоряющей секции (IH1)

Параметр	Единица	Значение
Входная энергия	МэВ/н	0,3
Выходная энергия	МэВ/н	2,0
Длина	См	220
Рабочая частота	МГц	100,625
$U_{\text{eff}}(A/Q = 6,5)$	МэВ	10,46
$Q(\text{real})$	–	20,000
$Z_{\text{eff}}(\text{real})$	МОм/м	280
$P_c(\text{real})$	кВт	178
$P_{\text{tot}}(\text{real}), I = 10 \text{ мА}$	кВт	282
# Gaps	–	27
# Triplets	–	1

Таблица 2.3.6. Параметры третьей ускоряющей секции (IH2)

Параметр	Единица	Значение
Входная энергия	МэВ/н	2,0
Выходная энергия	МэВ/н	3,2
Рабочая частота	МГц	100,625
Длина	См	191
$U_{\text{eff}}(A/Q = 6,5)$	МэВ	8,00
$Q(\text{real})$	–	25,000
$Z_{\text{eff}}(\text{real})$	МОм/м	255
$P_c(\text{real})$	кВт	131
$P_{\text{tot}}(\text{real}), I = 10 \text{ мА}$	кВт	211
# Gaps	–	18
# Triplets	–	0

Разрезы и расположение трубок дрейфа в структуре IH1 приведены на Рис. 2.3.11 и Рис. 2.3.12.

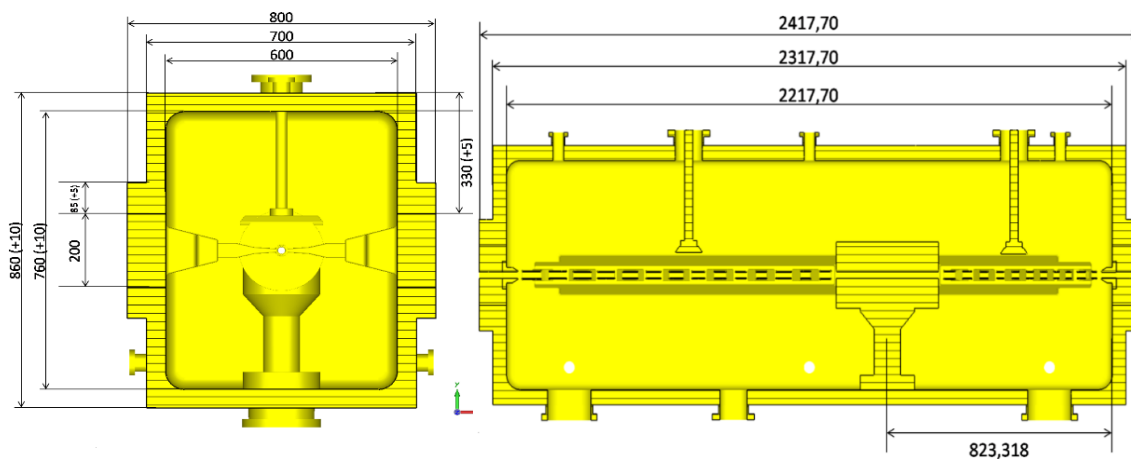


Рис. 2.3.11. Поперечный и продольные разрезы секции IH1

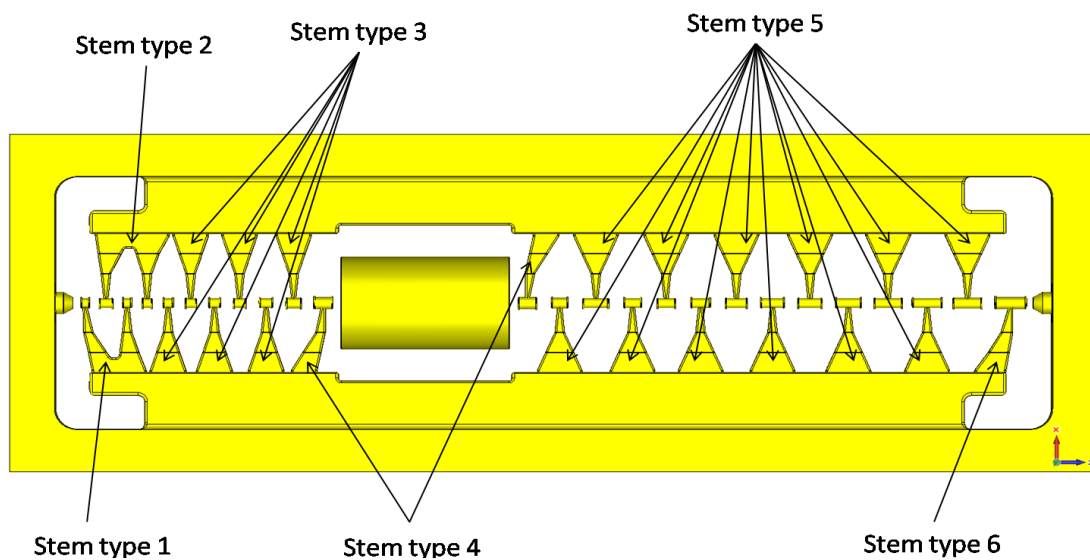


Рис. 2.3.12. Расположение трубок дрейфа в структуре IH1

Для обеспечения поперечной фокусировки, внутри резонатора IH1 установлен триплет квадрупольных линз. Линзы размещены в специальном вакуумном кожухе с системой водяного охлаждения.

Секция IH2 имеет аналогичную конструкцию, за исключением того, что в нем не установлен триплет линз, и он имеет меньшую длину.

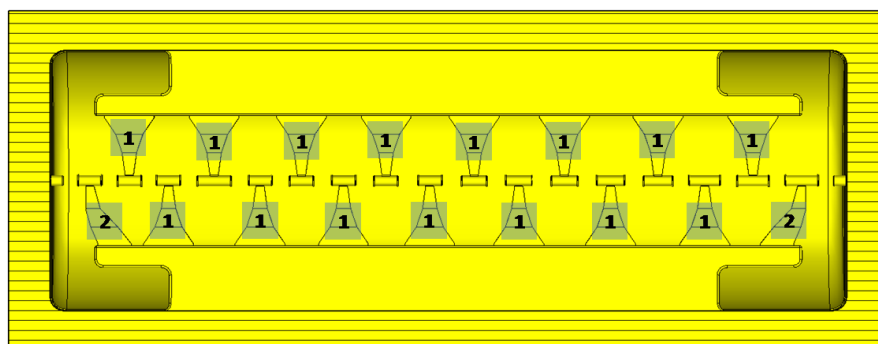


Рис. 2.3.13. Расположение трубок дрейфа в структуре IH2

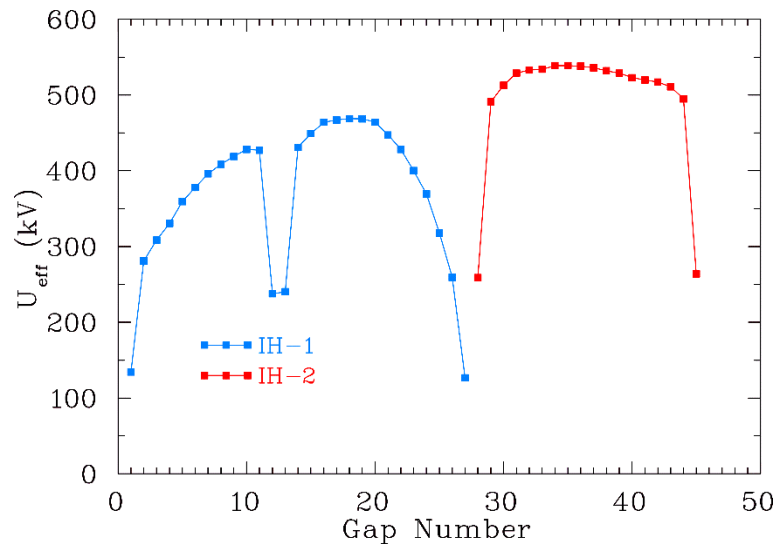


Рис. 2.3.14. Распределение ускоряющего поля в резонаторах IH1 и IH2

Для транспортировки и согласования пучка из RFQ во вторую секцию ускорителя служит канал транспортировки пучка средней энергии МЕВТ-Н1. Он состоит из двух дипольных корректоров S11 и S12, двух дублетов квадрупольных линз D1 и D2 (Рис. 2.3.15, Таблица 2.3.7). Для продольного согласования пучка частиц на входе в IH1 служит группирователь. В качестве группирователь выбран коаксиальный четырёх-зазорный четвертьволновой резонатор.

Таблица 2.3.7. Канал транспортировки из RFQ в IH1

Параметр	Единица	Значение
Длина	см	134
Банчер	кВт	4
Рабочая частота банчера	МГц	100,625
Число дублетов	–	2
Градиент магнитного поля дублетов (макс.)	Тл/м	45
Магнитное поле корректоров	Т	0,09

Поперечная фокусировка осуществляется двумя триплетами T1 и T2, один из которых размещён внутри резонатора IH1, а второй на втором канале транспортировки из IH1 в IH2 (Рис. 2.3.15).

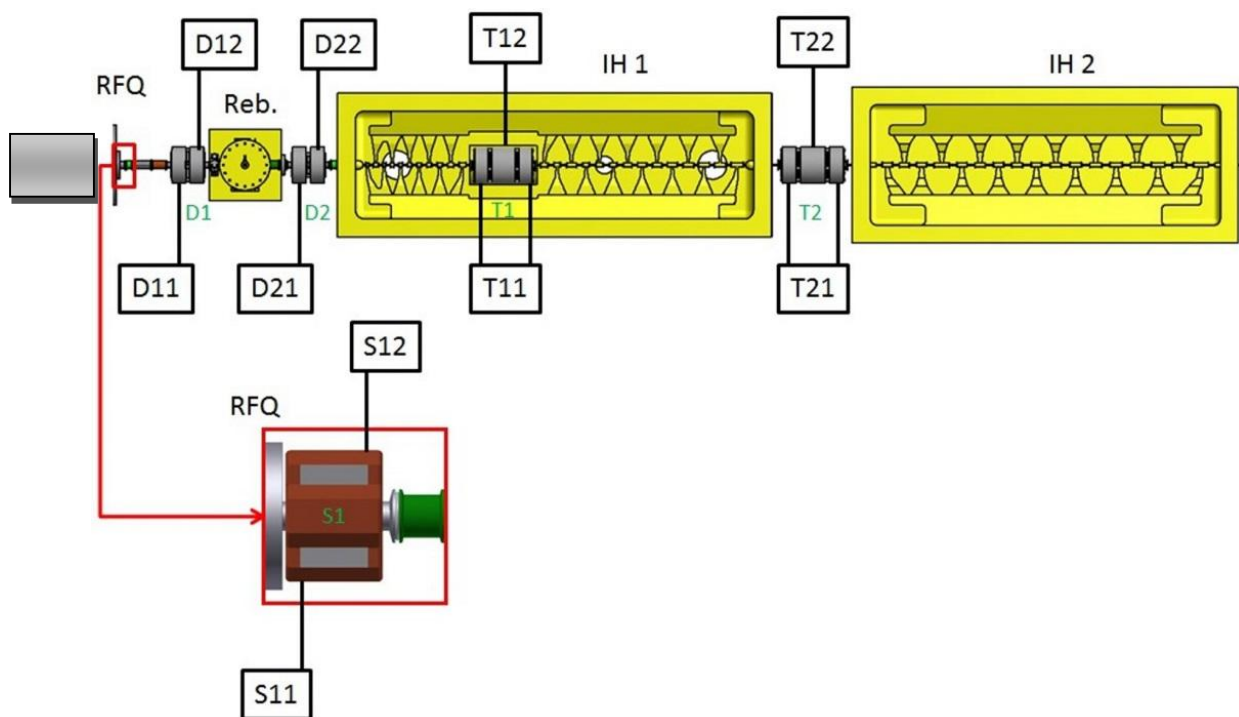


Рис. 2.3.15. Элементы каналов транспортировки пучка: D1 и D2 — дублеты, T1 и T2 — триплеты, S11 и S12 — корректоры, Reb — банчер

Результаты моделирования поперечных и продольных огибающих пучка ионов Au^{31+} с током 10 мА в канале МEBТ-НI 10 мА (программа LORASR) приведены на Рис. 2.3.16 и Рис. 2.3.17.

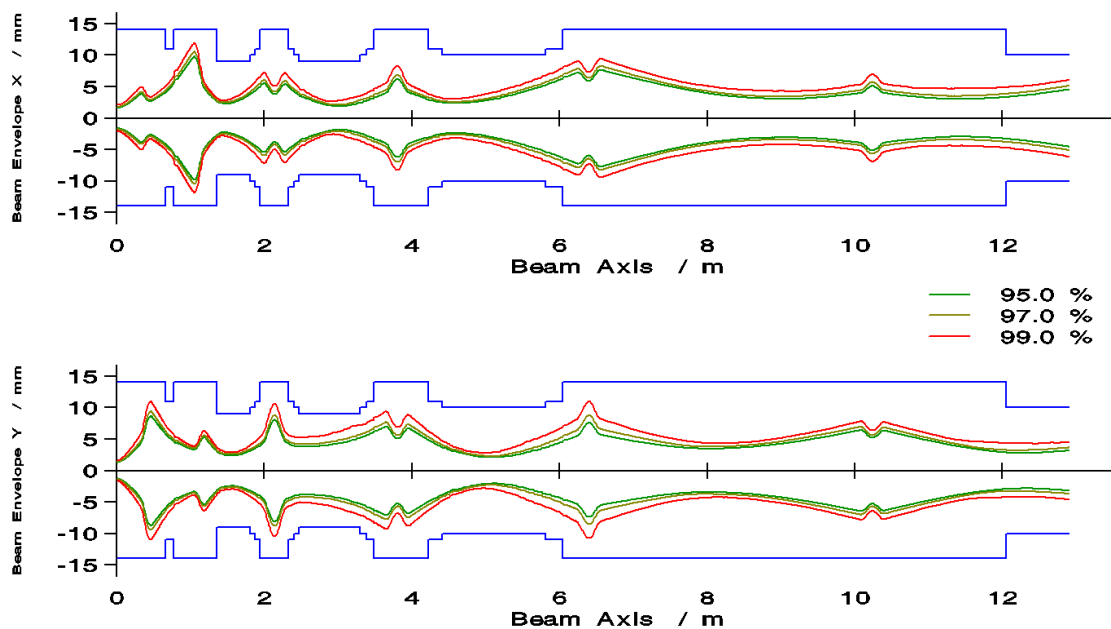


Рис. 2.3.16. Поперечные огибающие пучка ионов Au^{31+} в канале МEBТ-НI, ток 10 мА

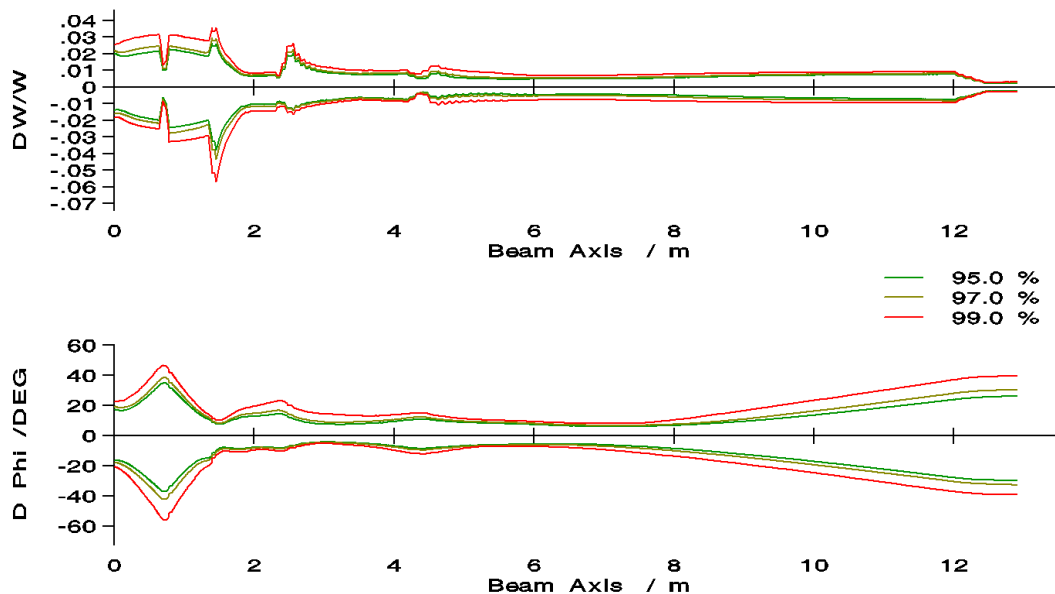


Рис. 2.3.17. Продольные огибающие пучка ионов Au^{31+} в канале МЕВТ-НІ, ток 10 мА

2.3.4 Канал транспортировки HILAC — Бустер

Канал транспортировки HILAC — Бустер служит для перевода пучка с минимальными потерями от ускорителя HILAC до Бустера [2.18]. В процессе перевода производится разгруппирование пучка, согласование поперечного фазового портрета целевых ионов с акцептансом Бустера, сепарация и поглощение нецелевых зарядностей ионов. Ионно-оптическая система канала транспортировки обеспечивает возможность инжекции пучка в Бустер с помощью различных схем инжекции и регулирование длительности пучка. В Таблице 2.3.8 приведены основные параметры пучка в канале транспортировки.

Таблица 2.3.8. Основные параметры пучка в канале транспортировки HILAC — Бустер

Ионы	Au^{30+} , Au^{31+} , Au^{32+} (на входе); Au^{31+} (на выходе)
Интенсивность	$\sim 2,5 \cdot 10^9$ (Au^{31+}); до $6 \cdot 10^9$ (полный спектр)
Ток, мА	4
Энергия ионов, МэВ/н	3,2
Частота повторения, Гц	10 (3 импульса за 5 с)
Эффективность перевода, %	95
Поперечный 95 %-ный эмиттанс, π мм·мрад: на входе/на выходе	10/15

Канал транспортировки HILAC — Бустер располагается в корпусе № 1 и проходит сквозь ярмо магнита Синхрофазотрона. Часть элементов канала располагается снаружи, часть — внутри ярма. Геометрия канала транспортировки HILAC — Бустер представлена на Рис. 2.3.18 и Рис. 2.3.19.

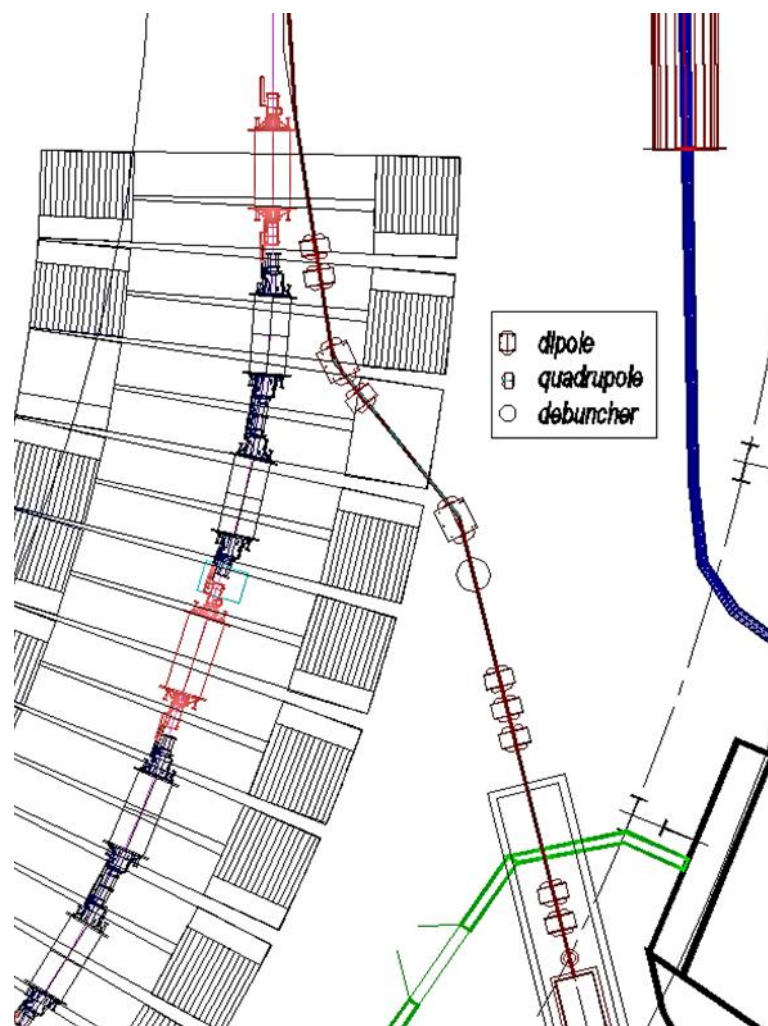


Рис. 2.3.18. Геометрия канала транспортировки HILAC — Бустер

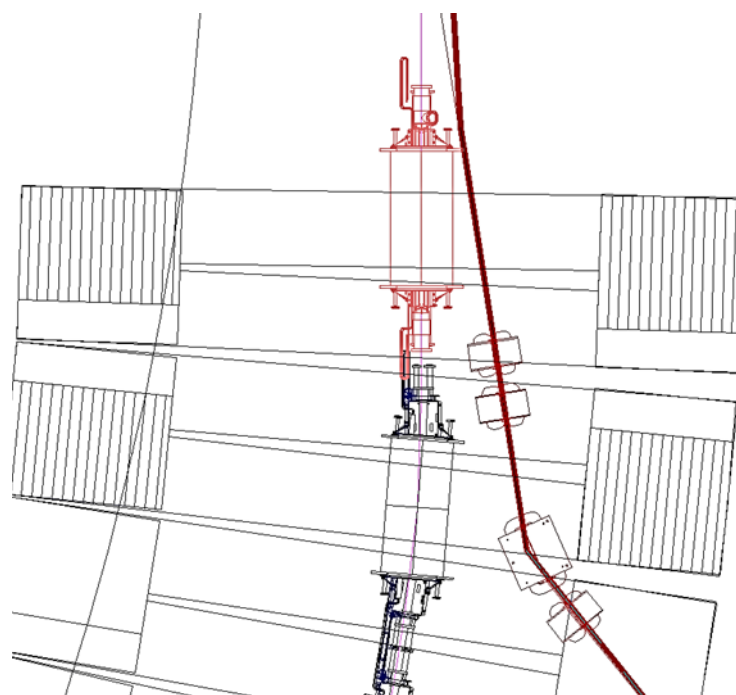


Рис. 2.3.19. Геометрия канала транспортировки HILAC — Бустер внутри яра Синхрофазотрона

Ионно-оптическая система (ИОС) канала транспортировки NIIAC — Бустер состоит из двух дипольных магнитов, 8 квадрупольных линз, системы двойных дипольных корректоров, направляющего блока корректоров, дебанчера и дефлектора. Поперечное согласование пучка со структурными функциями Бустера и сепарация нецелевых зарядностей ионов осуществляется дипольными магнитами и квадрупольными линзами канала. Коррекция траектории пучка в канале транспортировки NIIAC — Бустер производится системой двойных дипольных корректоров. Направляющий блок корректоров, размещаемый в конце канала, используется для управления траекторией пучка на выходе канала, требуемого для обеспечения различных схем инжекции пучка в Бустер. Дебанчер служит для разгруппирования транспортируемого пучка. Для увеличения эффективности разгруппирования дебанчер устанавливается в конце первой прямолинейной секции канала в бездисперсионной области. Дефлектор, размещаемый в первой прямолинейной секции канала, осуществляет импульсный сброс пучка на поглотители, позволяя регулировать длительность пучка. Описание элементов ИОС приведено в Приложении 2.3.

Диагностика пучка в канале транспортировки NIIAC — Бустер заключается в измерении его интенсивности, положения, профиля, поперечного эмиттанса, энергии ионов, энергетического разброса и фаз сгустков, интенсивности потерь транспортируемых ионов. Для указанных целей используются:

1. трансформаторы тока;
2. цилиндры Фарадея;
3. пикап-электроды;
4. проволочные профилометры;
5. ионизационные мониторы;
6. эмиттансометр;
7. измеритель энергии пучка;
8. измеритель энергетического разброса;
9. измерители фазы сгустка;
10. мониторы потерь ионов.

Вакуумная система канала транспортировки NIIAC — Бустер одержит посты откачки, вакуумные шиберы, вакуумную камеру (ионопровод) с системой прогрева и поглотители ионов. Посты откачки предназначены для создания рабочего вакуума порядка 10^{-10} Торр и контроля давления в пучковом объеме канала транспортировки. Вакуумные шиберы служат для разделения пучкового объема канала на независимые части и его отсекания от смежных ускорителей NIIAC и Бустер. Система прогрева вакуумной камеры предназначена для предварительного нагревания стенок ионопровода до $200 \div 300$ °C целью уменьшения десорбции. Поглотители ионов служат для

уменьшения десорбции со стенок вакуумной камеры в местах интенсивных потерь ионов пучка: после дефлектора и на участке сепарации нецелевых зарядностей.

Мишень-перехватчик используется в канале транспортировки HILAC — Бустер в качестве одного из элементов системы радиационного контроля и системы блокировок и сигнализации. Мишень-перехватчик служит для экстренного перекрытия ионопровода с целью прерывания перевода пучка в Бустер.

Для определения положений и характеристик элементов ионно-оптической системы канала транспортировки HILAC — Бустер было проведено моделирование динамики ионных пучков в канале транспортировки. Ниже приведены некоторые результаты моделирования динамики ионов. Более подробно моделирование освещено в Приложении 2.3.

На Рис. 2.3.20 показаны апертура вакуумной камеры и огибающие пучка вдоль канала транспортировки HILAC — Бустер. На Рис. 2.3.21 и Рис. 2.3.22 даны бета-функции и горизонтальная дисперсия пучка, соответственно.

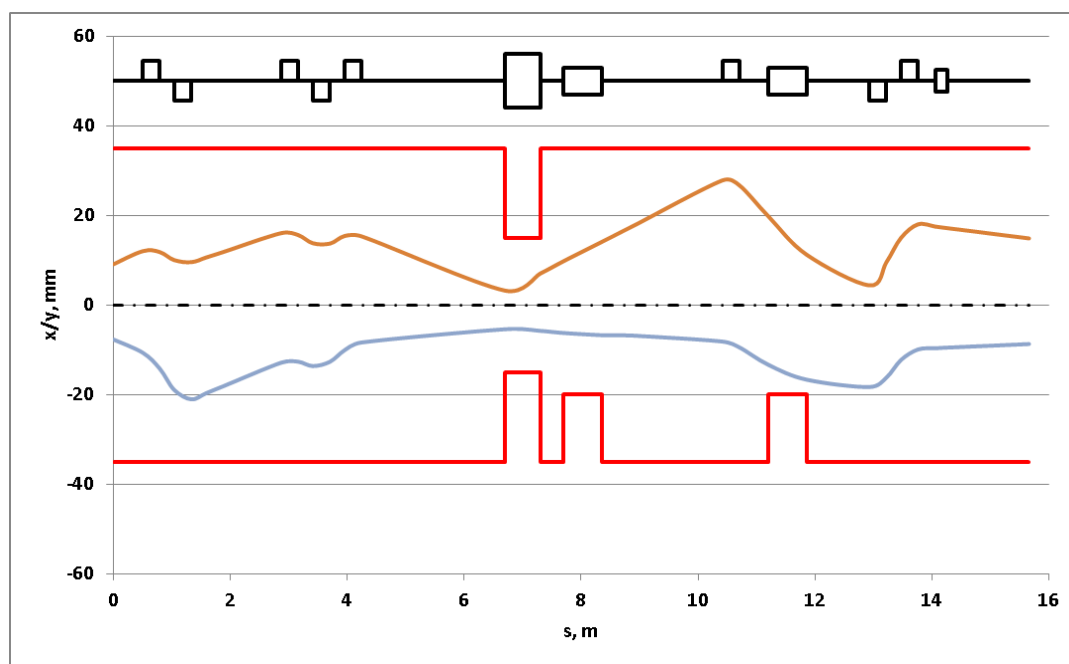


Рис. 2.3.20. Апертура вакуумной камеры и огибающие пучка вдоль канала транспортировки HILAC — Бустер. Положительные значения на оси x/y означают горизонтальные координаты, отрицательные — вертикальные

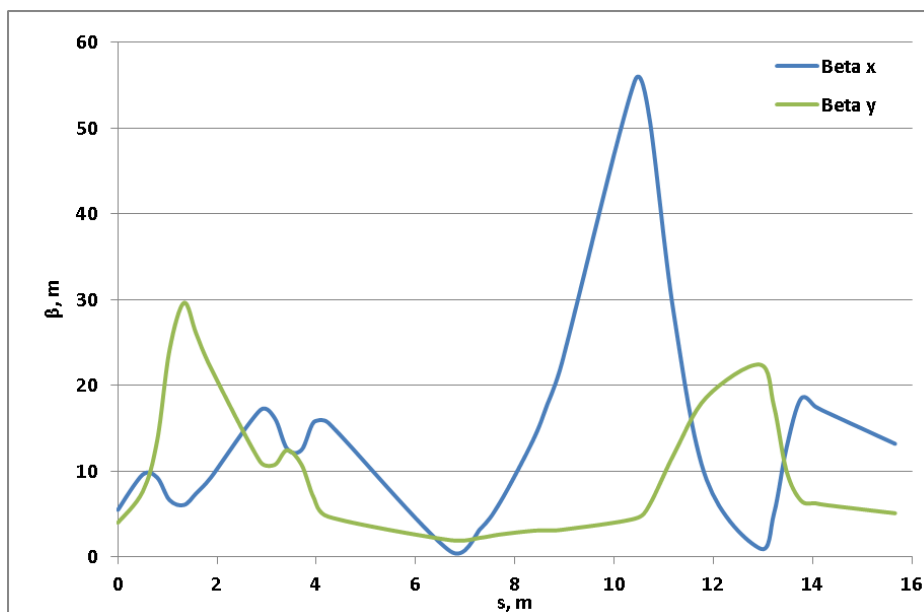


Рис. 2.3.21. Бета-функции пучка вдоль канала транспортировки NILAC — Бустер

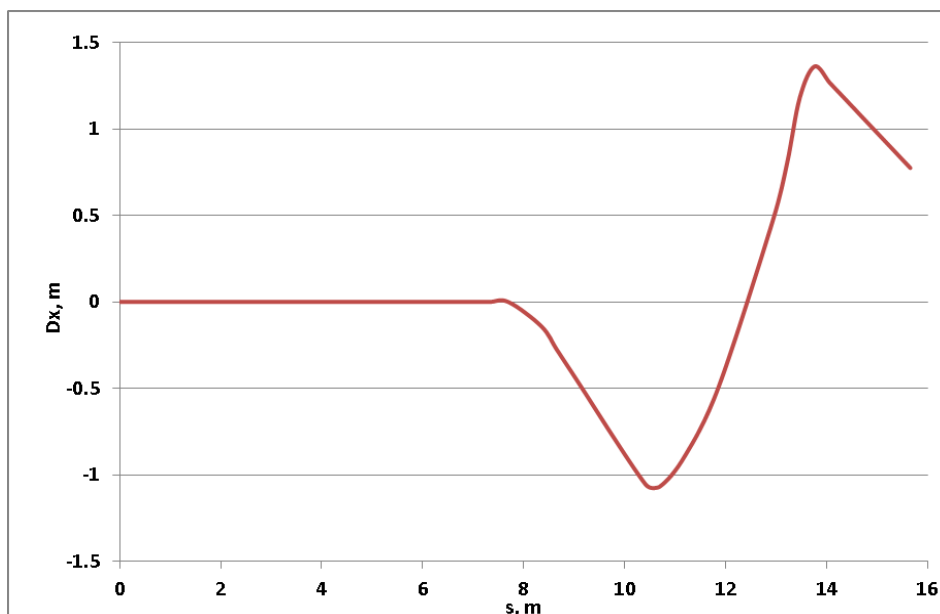


Рис. 2.3.22. Горизонтальная дисперсия пучка вдоль канала транспортировки NILAC — Бустер

2.3.5 Система ВЧ питания NILAC

Высокочастотная система ускорителя, состоящего из нескольких резонаторов, должна иметь в своём составе один задающий ВЧ генератор со стабильностью частоты $10^{-6} \div 10^{-7}$. Система автоматической подстройки должны поддерживать настройку резонаторов на частоту задающего генератора и обеспечивать соответствующую разность фаз ВЧ напряжений между резонаторами с заданной точностью.

Система ВЧ-питания NILAC состоит из задающего генератора с функциями автоматической регулировки частоты (АРЧ) и фазы (АФЧ), твердотельных ВЧ усилителей, линий транспортировки ВЧ

поля, контрольно-измерительных устройств ВЧ поля и устройств подстройки частоты и распределения поля в резонаторах (Рис. 2.3.23).

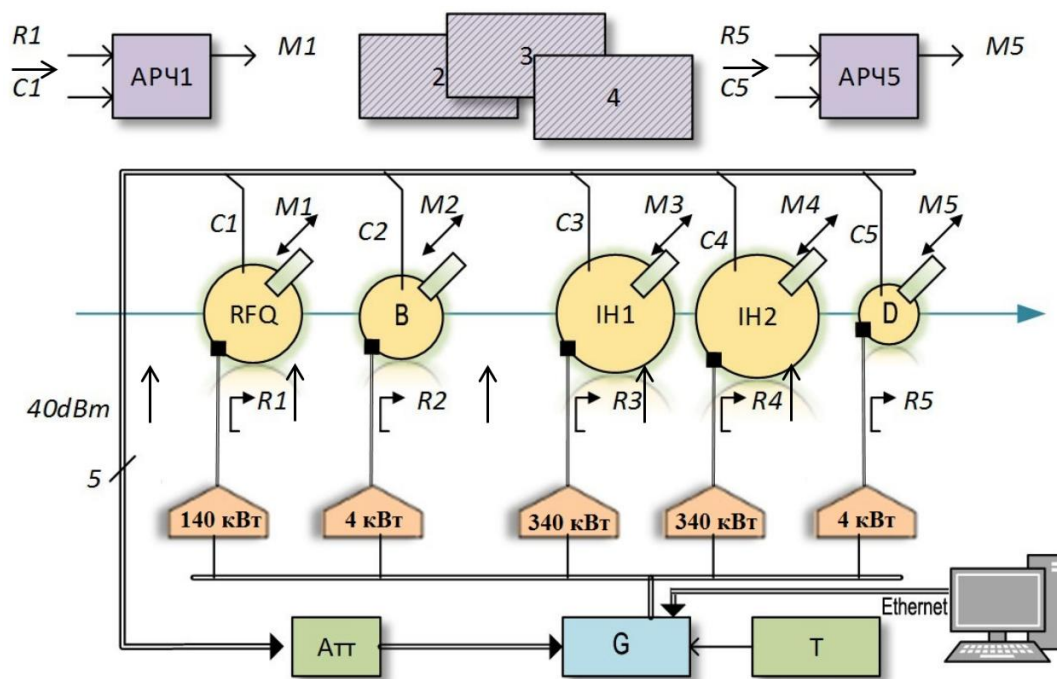


Рис. 2.3.23. Схема управления ВЧ питанием НИЛАС

Поскольку ускоритель НИЛАС состоит из пяти синхронно-возбуждаемых резонаторов, задающий генератор обеспечивает генерацию синусоидальных сигналов по пяти каналам. Каждый сигнал поступает на вход соответствующего усилителя. Стабилизация частоты резонаторов осуществляется независимыми системами регулирования для каждого из высокочастотных каналов. Опорный сигнал системы — сигнал падающей волны F_k . Поиск частоты настройки ведётся по амплитуде контрольного сигнала из резонатора C_k . Удержание частоты производится по измеренному отражённому сигналу R_k совместно с сигналом разности фаз между опорным F_k и контрольным C_k сигналами. Частота регулируется с помощью моторизованных приводов M_k . Основные параметры системы АРЧ приведены в Таблице 2.3.9.

Таблица 2.3.9. Основные параметры системы АРЧ

Параметр	Значение
Рабочая частота, МГц	100,625
Минимальный диапазон перестройки частоты, МГц	95 ÷ 105
Шаг установки частоты, Гц	1
Точность установки частоты при работе от внутреннего генератора, ppm	5
Точность регулирования фазы между каналами, град	1
Дискретность установки фазы, град	0,02
Точность измерения разности фаз между каналами, град	1

Три твердотельных ВЧ усилителя для секций RFQ, IH1 и IH2 располагаются на втором этаже здания ЭГ-5 (над экспериментальным залом НИЛАС). Номинальная выходная мощность первого усилителя

140 кВт, двух других по 340 кВт. ВЧ колебания передаются к резонаторам ускорителя посредством коаксиальных жёстких линий. Усилитель на 140 кВт состоит из одного стандартного 19" шкафа высотой 47U, а на 340 кВт из трех таких шкафов Рис. 2.3.24.

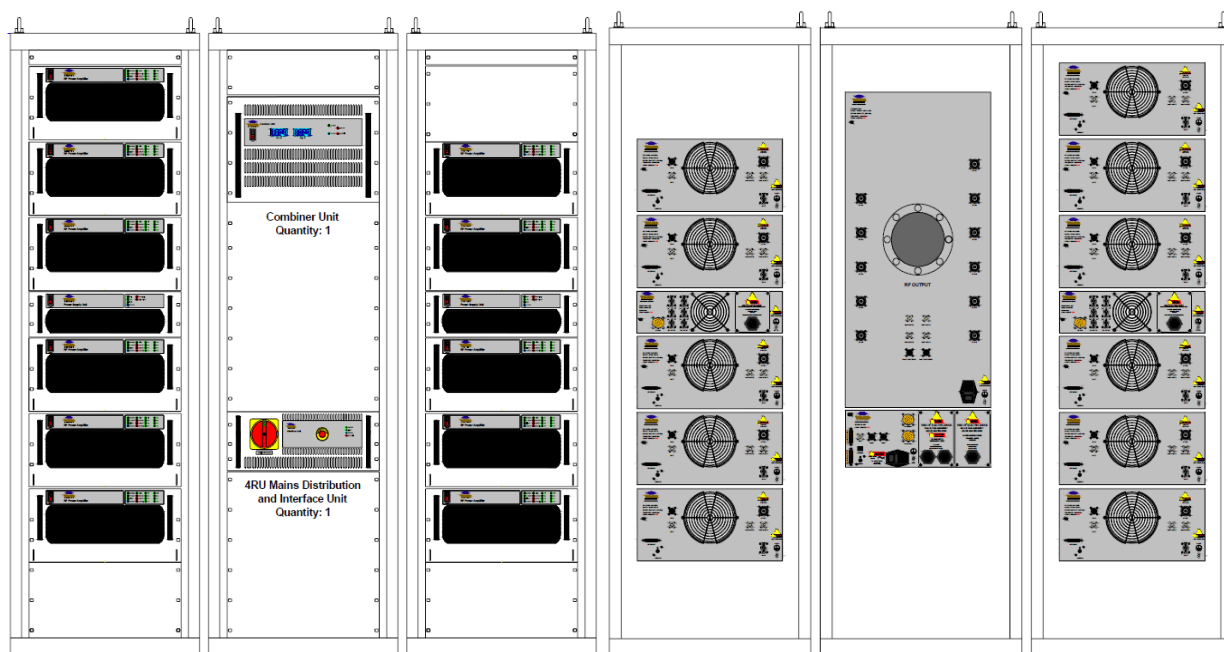


Рис. 2.3.24. Общий вид трех стоек транзисторного ВЧ усилителя на 340 кВт (спереди и сзади)

Таблица 2.3.10. Основные параметры ВЧ системы

Requirement	Value
Frequency	100.625
Bandwith (3db)	±1.5 MHz
Pulsepower Maximum	150 kHz/300 kW
Repetition Rate	10 Hz
Pulse Length	200 μ s
Rise Time	2 μ s
Linearity	< 2 dB between 10 % and 90 % of full power
Tilt	< 0.1 dB during last 40 μ s
Input	N female
Input impedance	50 Ohms
Input power	0 dBm
Output	6 1/2" flange (Coax.)
Output impedance	50 Ohms
Max. harmonic levels at ohmic load	< -24 dBc
Max. nonharmonic levels at ohmic load	< -60 dBc
Max. Reflection	Full power
Electromagnetic compatibility	EN 302 018-2/EN 301 489-11 V.1.1.1 (2002)/EN60125
Monitor RF	2 x FWD 2 x VSWR "N" connector
Trigger	Pulse
Control Logic	Siemens S7/200
Interface	Profibus Siemens

2.3.6 Вакуумная система HILAC

Вакуумная система инжекционного комплекса ускорителя тяжёлых ионов HILAC состоит из нескольких секций, разделённых проходными вакуумными затворами (Рис. 2.3.25, Рис. 2.3.26). Вакуумное оборудование инжекционного комплекса рассчитано на достижение рабочего вакуума во всех секциях выше 10^{-7} Торр.

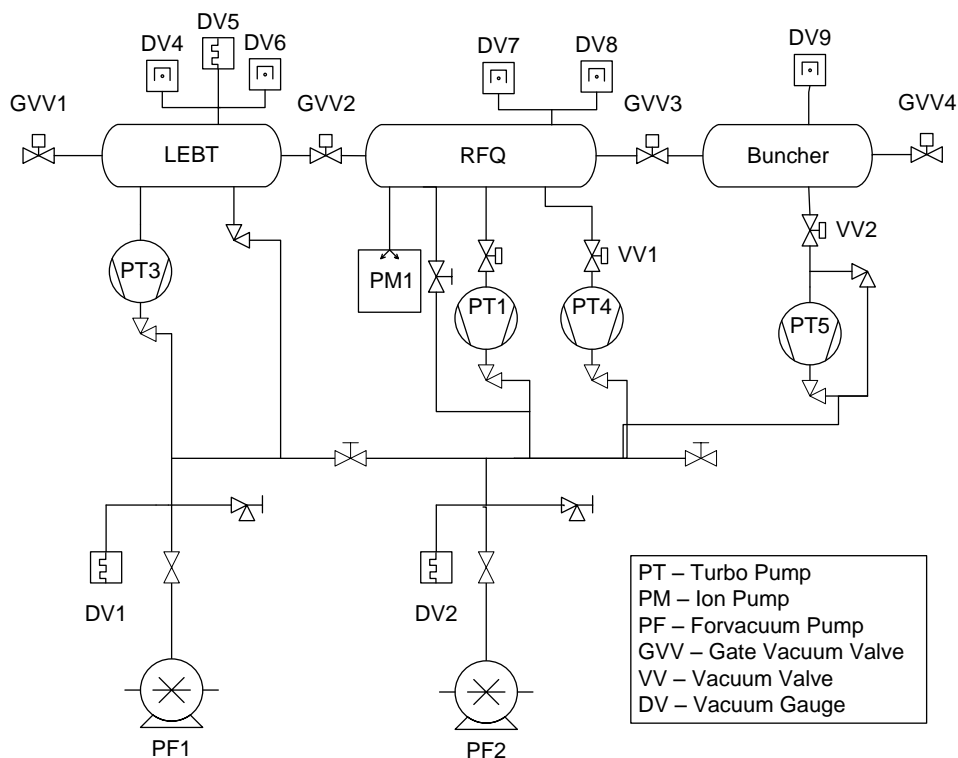


Рис. 2.3.25. Вакуумная схема предварительных ускорителей

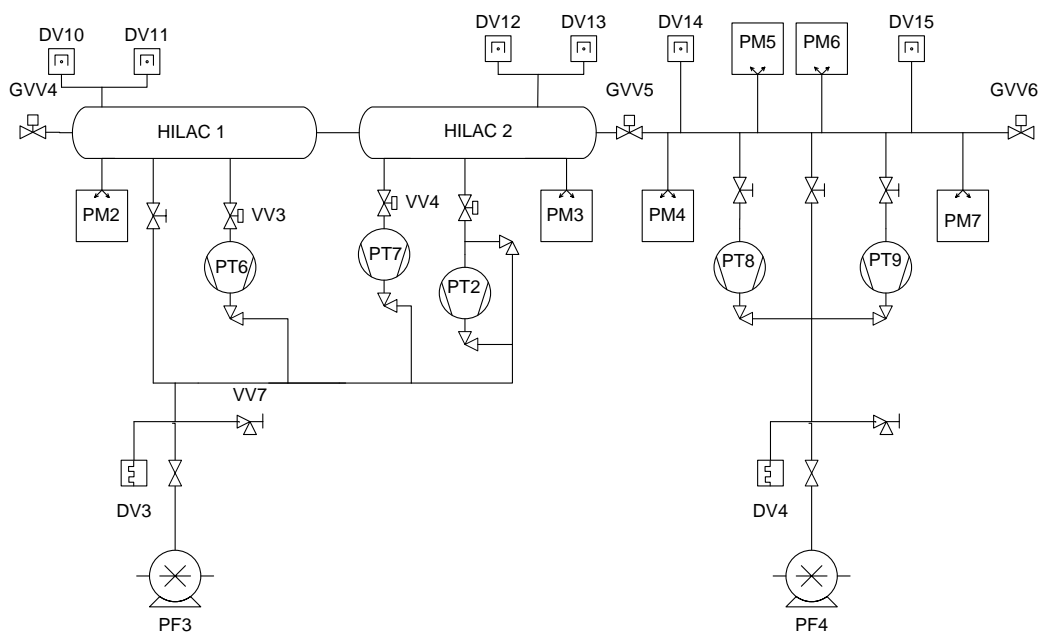


Рис. 2.3.26. Вакуумная схема ускорительных секций HILAC и канала инжекции в Бустер

Таблица 2.3.11. Список основного вакуумного оборудования инжекционного комплекса HILAC

№	pcs	Equipment	Type	Control unit	Company	Position
1	2	Turbo pump	HiPace 80	TCP 110	Pfeiffer Vacuum	PT1-PT2
2	5	Turbo pump	HiPace 700	TCP 350	Pfeiffer Vacuum	PT3-PT7
3	2	Turbo pump	HiPace 400	TCP 350	Pfeiffer Vacuum	PT8-PT9
4	7	Ion pump	IP 400	Foton	Varian	PM1-PM7
5	4	Forvacuum pump	Tri Scroll 300		Agilent	PF1-PF4
6	5	Vacuum gauge	TPR 018	TPG 300	Pfeiffer Vacuum	DV1-DV5
7	11	Vacuum gauge	IKR 060	TPG 300	Pfeiffer Vacuum	DV6-DV15
8	6	Gate vacuum valve			VAT	GVV1-GVV6
9	32	Vacuum valve			VAT	

ЛИТЕРАТУРА

- [2.1] A.V. Butenko, E.E. Donets, E.D. Donets, A.I. Govorov, V.V. Kobets, V.A. Monchinsky, I.N. Meshkov, A.O. Sidorin, G.V. Trubnikov, V.V. Fimushkin, A. Belov, O.K. Belyaev, A.P. Maltsev, Yu.A. Budanov, I.A. Zvonarev, V.V. Kapin, Injector complex of the NICA facility, Proceedings of RuPAC2010, Protvino, Russia.
- [2.2] А.В. Бутенко, А.И. Говоров, Д.Е. Донец, Е.Д. Донец, Е.Е. Донец, К.А. Левтеров, В.А. Мончинский, А.О. Сидорин, Г.В. Трубников, В.В. Фимушкин, Модернизация инжекционного комплекса Нуклотрон, Письма в ЭЧАЯ, 2012, Том 9, № 4-5(174-175), стр. 654-665.
- [2.3] V.A. Andreev, A.I. Balabin, A.V. Butenko, V.S. Dyubkov, A.I. Govorov, B.V. Golovensky, V.V. Kobets, A.A. Kolomiets, V.A. Koshelev, A.D. Kovalenko et al. Reconstruction of light and polarized ion beam injection system of JINR Nuclotron-NICA Accelerator Complex, Prob. Atomic Sci. Technol., 2013, № 6(58), pp. 8-12
- [2.4] A.V. Butenko, E.E. Donets, E.D. Donets, V.V. Fimushkin, A.I. Govorov, V.V. Kobets, A.D. Kovalenko, K.A. Levterov, V.A. Monchinsky, I.N. Meshkov, A.Y. Ramsdorf, A.O. Sidorin, G.V. Trubnikov, G.N. Kropachev, T.V. Kulevoy, A.A. Kolomiets, S.M. Polozov, H. Hoeltermann, U. Ratzinger, A. Schempp, H. Podlech, Development of the NICA injection facility, Proceedings of IPAC13, Shanghai, China.
- [2.5] A.V. Butenko, E.E. Donets, A.D. Kovalenko, K.A. Levterov, A.O. Sidorin, G.V. Trubnikov, A. Belov, E.D. Donets, V.V. Fimushkin, A. Govorov, V. Kobets, V. Monchinsky, H. Hoeltermann, H. Podlech, U. Ratzinger, A. Schempp T. Kulevoy, D.A. Liakin, S.M. Polozov, Development of NICA Injection Complex, Proceedings of IPAC 2014, Dresden, Germany.
- [2.6] V.P. Derenchuk, A.S. Belov, A multi-milliampere polarized and unpolarized negative ion source for IUCF, Proceedings of the PAC 2001, Chicago, USA.
- [2.7] V. Aleksandrov, N. Kazarinov, V. Shevtsov, Multi-Component Ion Beam code, Proceedings of the RuPAC2004, Dubna, Russia.
- [2.8] A. Kolomiets, V. Pershin, I. Vorobyov, S. Yaramishev, DYNAMION — The code for beam dynamics simulation in high current ion linac, Proceedings of EPAC98, Stockholm, Sweden, 1998, pp. 1201-1203.
- [2.9] B.I. Bondarev, A.P. Durkin, et al. LIDOS Unconventional, Helper for Linac Beam Designing. Computational Accelerator Physics Conference, AIP, Conference Proceedings 297, Los Alamos, NM 1993, pp. 377-384.

- [2.10] R. Duperrier, TOUTATIS: A radio frequency quadrupole code, *Physical Review Special Topics — Accelerators and Beams*, V. 3, 124201 (2000).
- [2.11] A.N. Govorov, I.V. Kalagin, A.D. Kovalenko, V.A. Monchinsky, V.P. Ovsyannikov, U.K. Pilipenko, V.A. Popov, E.H. Salimov, V.I. Volkov, Linac LU-20 as injector of Nuclotron, *Proceedings of the LINAC96*.
- [2.12] V. Kobets, A. Govorov, V. Monchinsky, A.V. Butenko, D.E. Donets, A.O. Sidorin, Modernization the Modulator of the RF-Generator Ion Linear Accelerator LU-20, *Proceedings of RuPAC2014*, Obninsk, Russia.
- [2.13] A.V. Butenko, V.S. Aleksandrov, E.E. Donets, E.D. Donets, D.E. Donets, A.I. Govorov, V.V. Kobets, A.D. Kovalenko, K.A. Levterov, V.A. Monchinsky, I.N. Meshkov, V.A. Mikhailov, A.O. Sidorin, G.V. Trubnikov, T.V. Kulevoy, D. Liakin, H. Hoeltermann, U. Ratzinger, A. Schempp, The Heavy Ion Injector at the NICA Project, *Proceeding of LINAC2014*, Geneva, Switzerland.
- [2.14] E.D. Donets, D.E. Donets, E.E. Donets, V.V. Salnikov, V.B. Shutov, Yu.A. Tumanova, V.P. Vadeev, J. Alessi, E. Beebe, A.I. Pikin, L. Liljeby, K.-G. Rensfelt, Electron string ion source of highly charged ions: studies and the first test on a synchrotron, *Proceedings of EPAC 2002*, Paris, France.
- [2.15] В.С. Александров, В.Ф. Шевцов, Варианты канала ESIS-RFQ: преимущества и недостатки, *Письма в ЭЧАЯ*, 2010, Том 7, № 7(163), стр. 874-879.
- [2.16] R. Tiede, U. Ratzinger, H. Podlech, C. Zhang, Konus beam dynamics designs using h-mode cavities, IAP, *Proceedings of Hadrons Beam 2008*, Nashville, Tennessee, USA.
- [2.17] S. Minaev, U. Ratzinger, B. Schlitt, APF or KONUS drift tube structures for medical synchrotron injectors — a comparison, *Proceedings of the 1999 Particle Accelerator Conference*, New York, USA.
- [2.18] А. Ангелов, В. Ангелов, А.В. Елисеев, И.Н. Мешков, В.А. Михайлов, А.О. Сидорин, Н.Д. Топилин, Г.В. Трубников, А.В. Тузиков, Каналы транспортировки пучка в проекте NICA, *Письма в ЭЧАЯ*, 2012, Том 9, № 4-5(174-175), стр. 586-590.

Приложение 1 к Главе 2

П.2.1 КАНАЛ ТРАНСПОРТИРОВКИ ИОНОВ НИЗКОЙ ЭНЕРГИИ ФОРИНЖЕКТОРА ЛУ-20

П.2.1.1 Элементы ионно-оптической системы

Осесимметричные магнитные линзы. Внутренний диаметр 108 мм, катушка 70 мм × 70 мм. Линзы создают продольное магнитное поле до 10,3 кГс, соответствующий максимальный ток в обмотке — 150000 А-в.

Узел фокусировки представляет собой секцию канала транспортировки, содержащую вытягивающий и фокусирующий электроды. Вытягивающий и фокусирующий электроды осесимметричные. Длины электродов: 40 мм (вытягивающий) и 80 мм (фокусирующий); внутренние диаметры электродов: 60 мм (вытягивающий) и 120 мм (фокусирующий). Максимальный электрический потенциал на вытягивающем электроде относительно выходного электрода ионного источника — 100 кВ. Максимальный электрический потенциал на фокусирующем электроде относительно корпуса узла фокусировки (в котором размещаются электроды) — 40 кВ. Подача высокого напряжения на электроды осуществляется посредством высоковольтных вводов.

Ускоряющая трубка имеет длину 250 мм, содержит 11 колец. Внутренний диаметр колец — 120 мм. Максимальное напряжение, создаваемое между кольцами на входе и выходе ускоряющей трубки: 150 кВ.

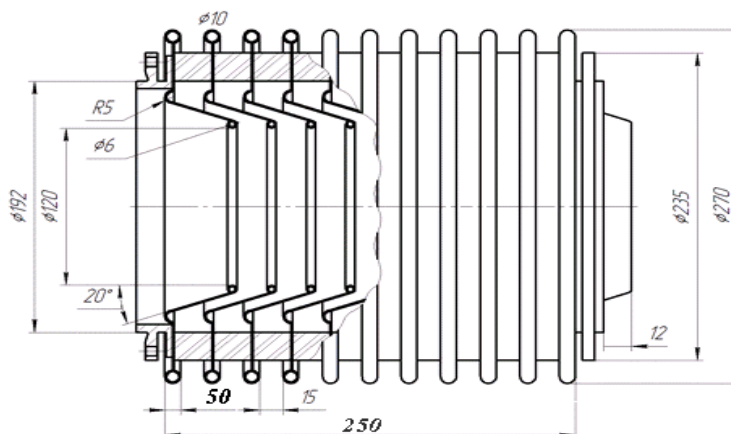


Рис. П.2.1.1. Ускоряющая трубка

Группирователь представляет собой однозачорный резонатор с сетками на трубках дрейфа. Длина группирователя — 40 мм, внутренний диаметр трубок дрейфа — 20 мм. Максимальное напряжение, создаваемое в зазоре длиной 10 мм: 10 кВ. Частота ВЧ поля — 145,2 МГц.

Конструкция группирователя показана на Рис. П.2.1.2 и Рис. П.2.1.3. Основные параметры группирователя даны в Таблице П.2.1.1.

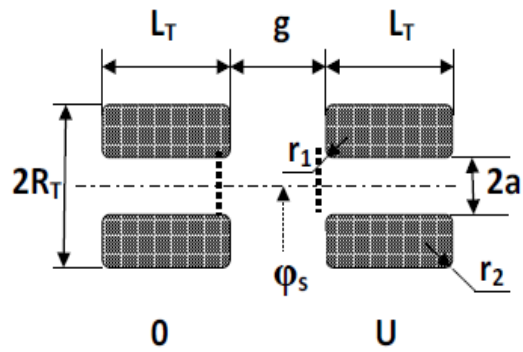


Рис. П.2.1.2. Продольное сечение группирователя

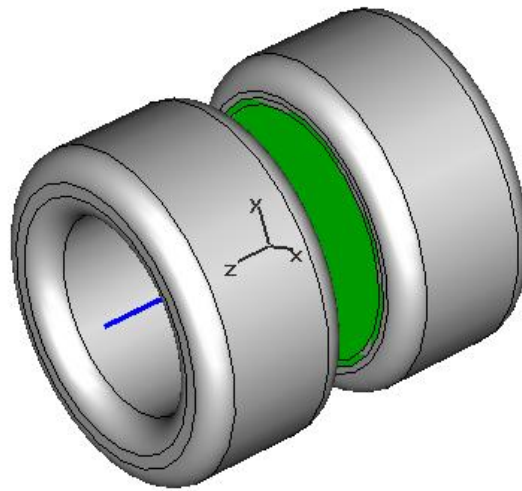


Рис. П.2.1.3. Трёхмерная модель трубок дрейфа группирователя

Таблица П.2.1.1. Основные параметры группирователя

Длина зазора, мм	10
Длина трубки дрейфа, мм	15
Полная длина, мм	40
Диаметр апертуры, мм	20
Диаметр трубки дрейфа, мм	40
Внутренний радиус скругления трубки, мм	5
Внешний радиус скругления трубки, мм	5
Максимальное напряжение на зазоре, кВ	10
Частота ВЧ поля, МГц	145,2
Фаза ВЧ поля в центре зазора	-90°

П.2.1.2 Узел диагностики

Узел диагностики включает в себя стационарно расположенный в пучке трансформатор тока (Индукционный Датчик Тока), а также многопроволочный профилометр (Многопроволочный Датчик Профиля Пучка) и цилиндр Фарадея на общем приводе.

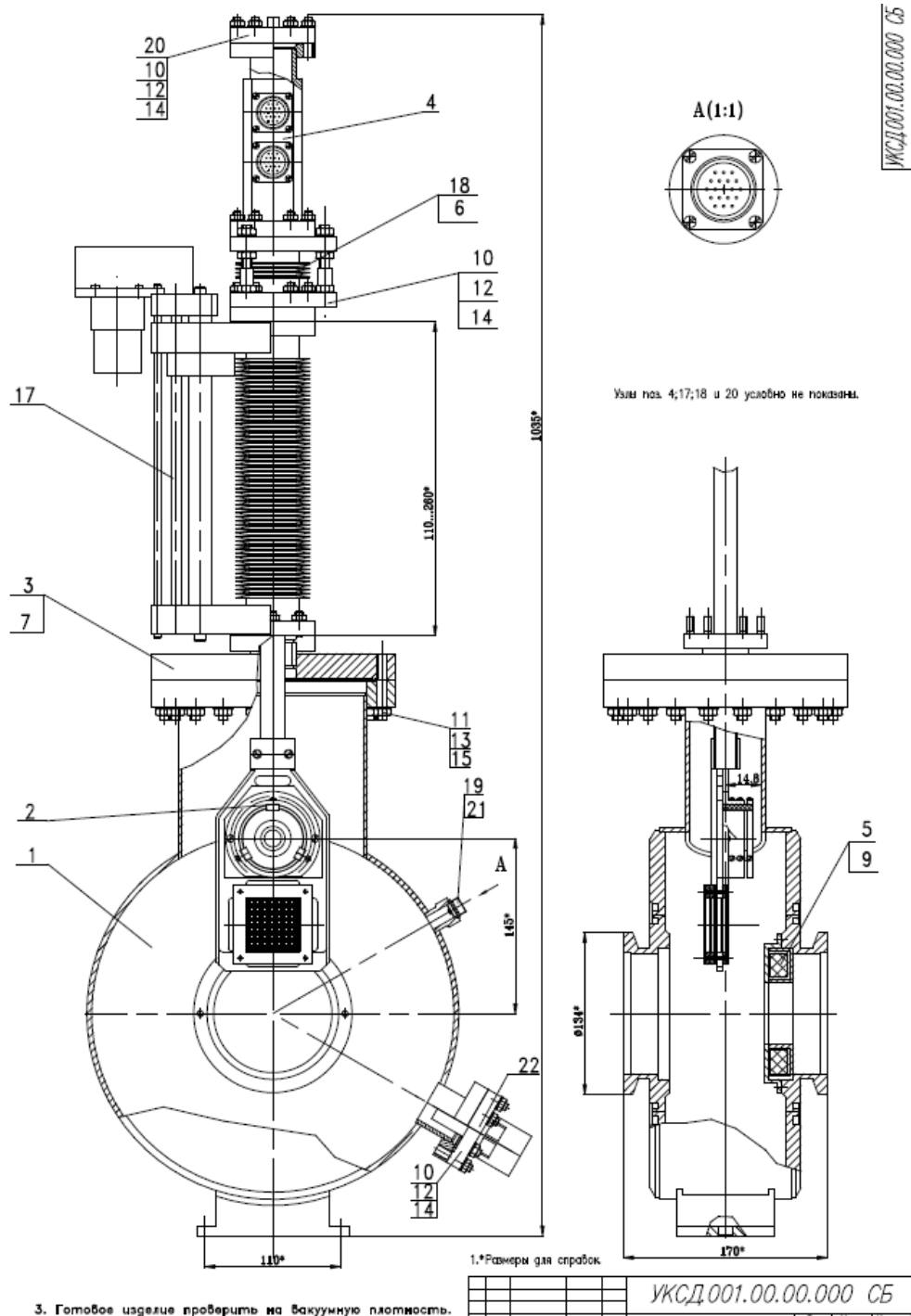


Рис. П.2.1.4. Узел диагностики

Апертура индукционного датчика тока (ИДТ) — 50 мм. Апертура многопроволочного профилометра (МДПП) — 45 мм. Входная апертура цилиндра Фарадея (ЦФ) — 40 мм.

Корпус узла диагностики изготавливается из нержавеющей стали. Рамки МДПП выполнены из фольгированного стеклотекстолита. Проволочки МДПП — позолоченный вольфрам, диаметр 100 мкм, шаг $1 \div 2$ мм.

Ввод-вывод сборки ЦФ и МДПП в область пучка осуществляется вводом движения в вакуум LSM38-150-SD производства «UHV design», либо аналогом от «KREB», при этом угловое позиционирование сборки производится блоком юстировки PA-35H-CF так же от «UHV design», либо аналогом от «KREB».

П.2.1.3 Узел откачки

Узел откачки канала транспортировки ионов низкой энергии представляет собой камеру с 2 осевыми и 5 боковыми фланцами:

- ускоряющая трубка;
- ионопровод (стандартный: ISO-F/K);
- турбомолекулярный насос (DN160 ISO-F, на струбцинах, вертикально вверх, площадь сечения сварной части не меньше площади сечения стандартного фланца);
- терморезистивный преобразователь давления (DN16 ISO-KF, -60° к горизонтальной плоскости);
- инверсно-магнетронный преобразователь давления (DN40 ISO-KF, горизонтально);
- насос предварительной откачки (DN40 ISO-KF, -60° к горизонтальной плоскости);
- запасной фланец (DN40 CF-F- горизонтально).

Корпус изготавливается из нержавеющей стали 03X17H14M2 (Stainless steel 316L).

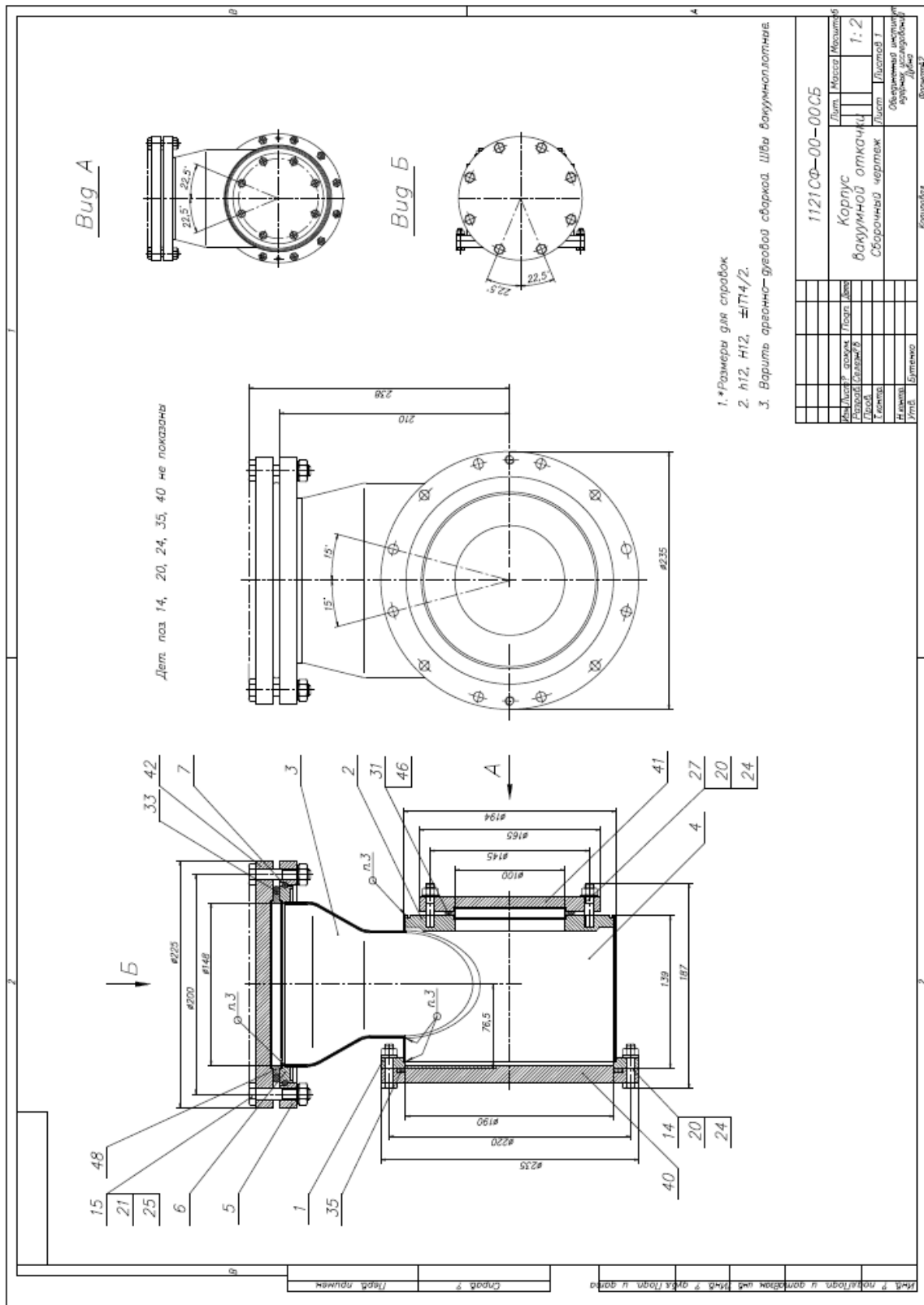


Рис. П.2.1.5. Корпус узла откачки

П.2.1.4 Распределения электрических и магнитных полей

Электрические элементы начальной части канала транспортировки (ускоряющая трубка, вытягивающий и фокусирующий электроды) совместно с выходным электродом ионного источника

формируют непрерывное распределение электрического поля, выполняющее функции предварительного ускорения и фокусировки ионов. На Рис. П.2.1.5 – Рис. П.2.1.8 представлены результаты моделирования электрических полей в начальной части канала для одного из вариантов настроек ионно-оптической системы.

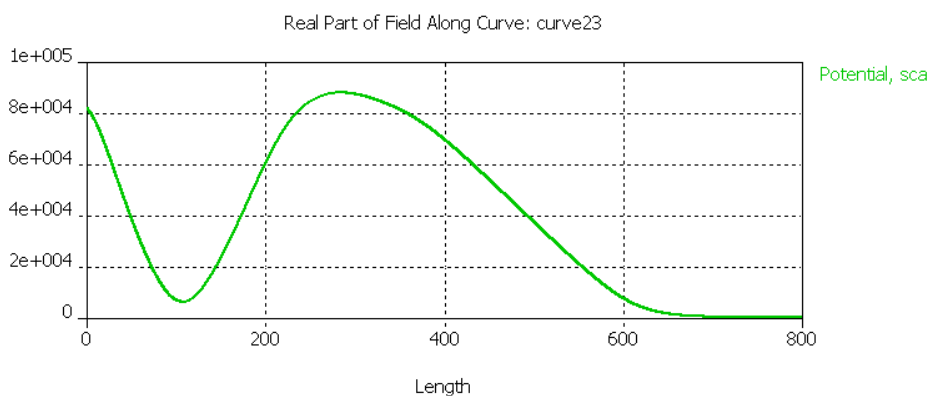


Рис. П.2.1.5. Распределение электрического потенциала на оси канала

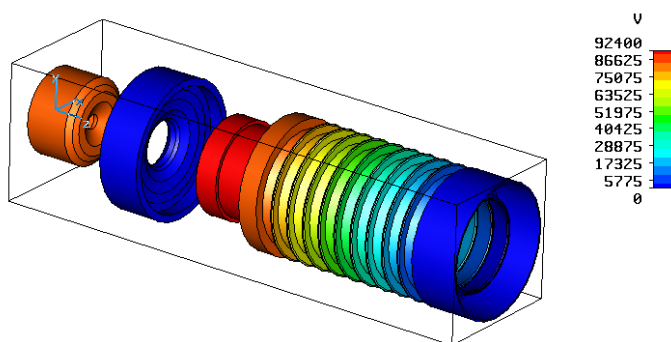


Рис. П.2.1.6. Распределение электрического потенциала на поверхностях элементов начальной части канала

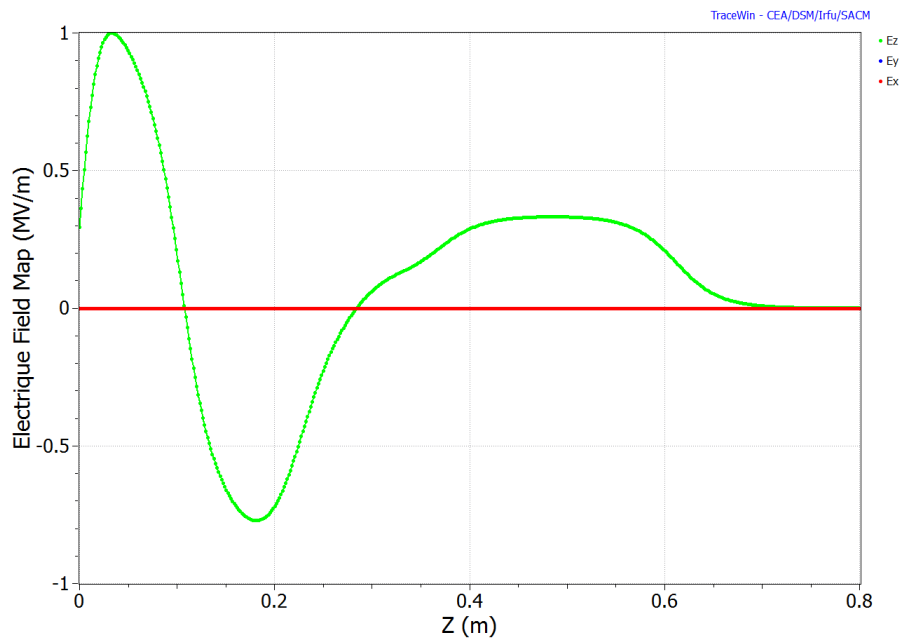


Рис. П.2.1.7. Распределение электрического поля на оси канала

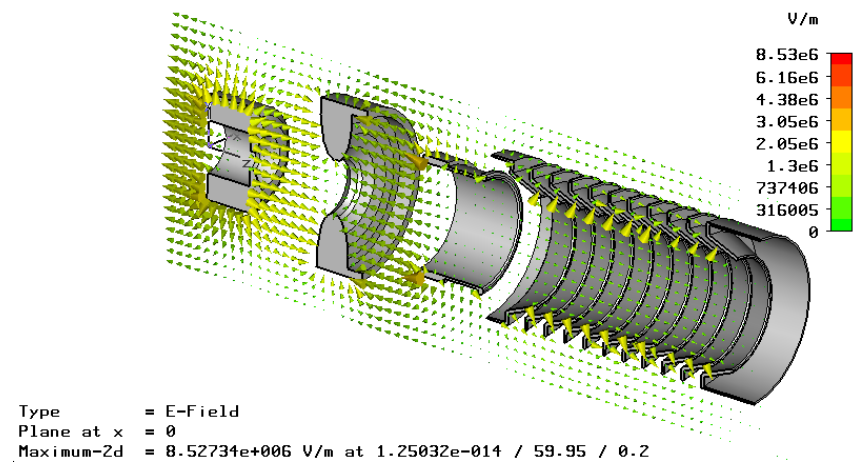


Рис. П.2.1.8. Распределение электрического поля в объёме начальной части канала

Магнитные поля осесимметричных линз в большей степени локализованы по местам размещения линз. Краевые поля распространяются приблизительно на 300 мм от центров линз. На Рис. П.2.1.9 и Рис. П.2.1.9 приведено распределение магнитных полей осесимметричных линз для одного из вариантов настроек ионно-оптической системы.

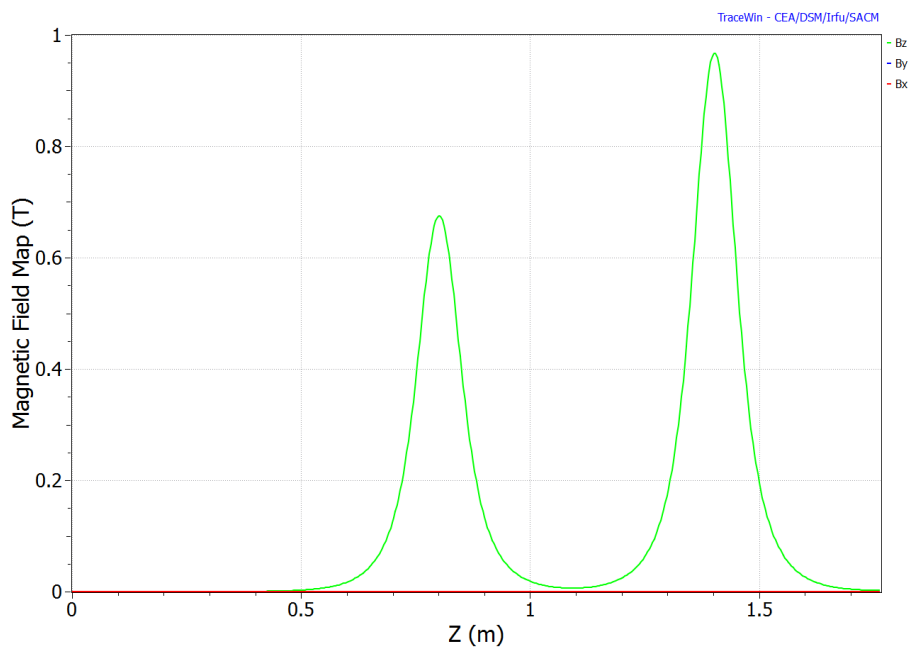


Рис. П.2.1.8. Распределение магнитных полей осесимметричных линз на оси канала

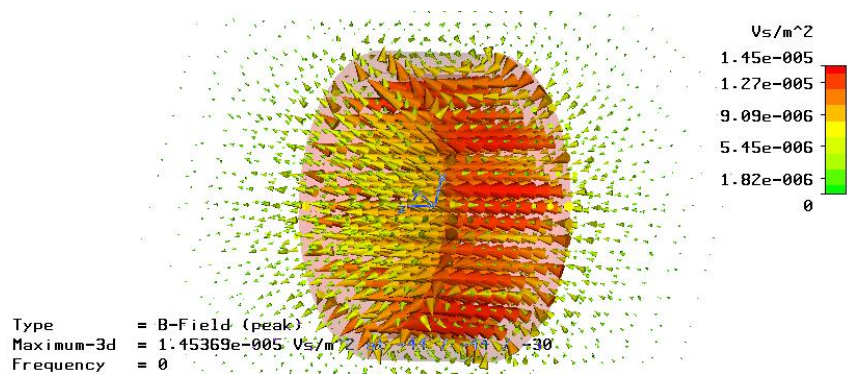


Рис. П.2.1.9. Распределение магнитного поля осесимметричной линзы

Ниже приведены результаты магнитных измерений линзы. Измерения проводились при токах 4 и 9,5 А. Стабильность тока — 0,01%.

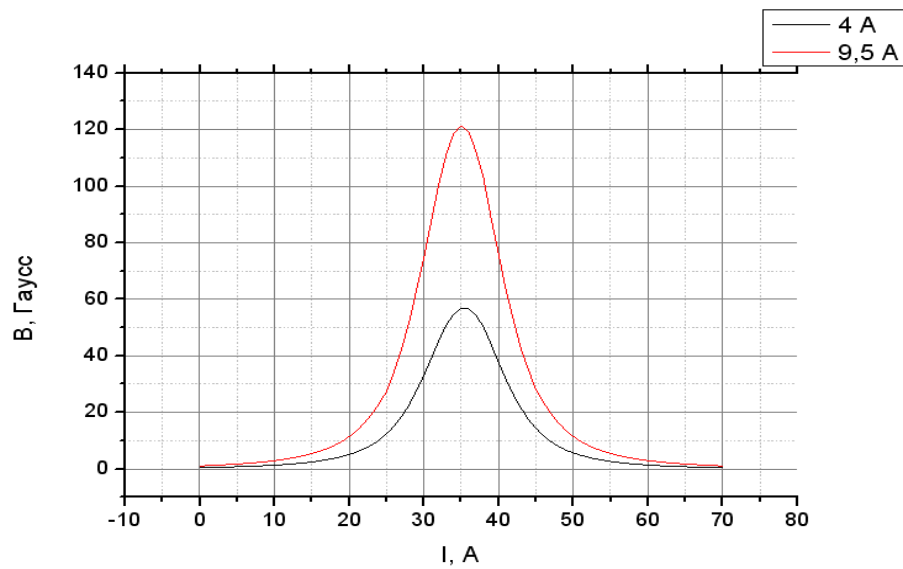


Рис. П.2.1.10. Распределения магнитного поля по оси линзы для двух значений тока в обмотке

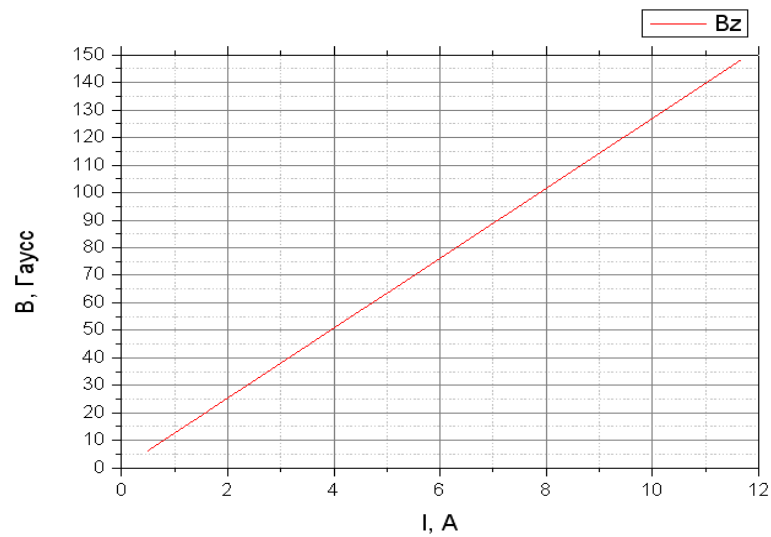


Рис. П.2.1.11. Зависимость магнитного поля в центре линзы от тока в обмотке

Электрическое ВЧ поле группирователя локализовано в зазоре между трубками дрейфа. На Рис. П.2.1.12 приведено распределение ВЧ поля группирователя.

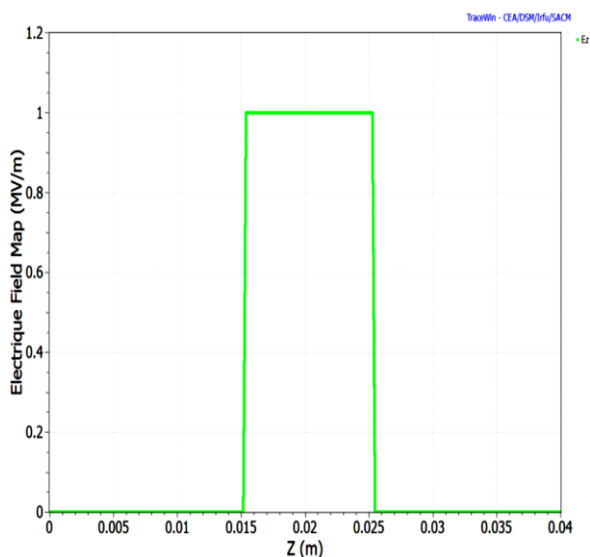


Рис. П.2.1.12. Распределение электрического ВЧ поля группирователя на оси канала

П.2.1.5 Динамика пучков

Канал транспортировки предназначен для перевода пучков различных сортов ионов, параметры которых могут значительно отличаться друг от друга. Для определения характеристик элементов ионно-оптической системы канала было проведено моделирование динамики ионных пучков в канале транспортировки. Моделирование динамики ионов производилось программой MCIB04.

Было рассмотрено несколько вариантов ионных пучков. В Таблице П.2.1.2 и Таблице П.2.1.3 приведены параметры пучков на входе и выходе канала транспортировки.

Таблица П.2.1.2. Параметры пучка на входе канала транспортировки ионов низкой энергии

Источник, сорт ионов	Z/A	Ток, мА	4 RMS ε_n , π мм мрад	Диаметр пучка, см	Энергия, кэВ/Z	v/c	RMS ε_{un} , π мм мрад	β , см/рад
Лазерный источник, $^{27}\text{Al}^{8+}$	0,3	20	2	1,9	1	0,00079	629,5	3,58
Дуоплазматрон, $^2\text{D}^+$	0,5	50	4	0,5	1	0,00146	685	0,91
					25	0,00730	137	4,56
Источник поляризованных ионов, $^2\text{D}^+$	0,5	10	2	1,5	10	0,00326	153,2	9,18
Источник поляризованных ионов, p	1	10	2	1,5	10	0,00462	108	13,0

Таблица П.2.1.3. Требуемые параметры пучка на входе секции RFQ

Z/A	I_{inj} , мА	4 RMS $\varepsilon_{n,x,y}$, π мм мрад	$\alpha_{x,y}$, рад	$\beta_{x,y}$, см/рад	U_{inj} , кВ	v/c	RMS ε_{un} , π мм мрад	RMS x, y см
0,3	0	2	0,8818	6,8	103	0,00806	62	0,205
	20		0,9472	7,21				0,211
0,5	0	2	0,8818	6,8	61,8	0,00811	62	0,205
	10		0,9906	7,545				0,216
	50	4						
1	0	2	0,8818	6,8	31	0,00813	62	0,205
	10		0,9906	7,545				0,216

Ниже приведены результаты моделирования динамики ионов.

- 1) Лазерный источник, ионы $^{27}\text{Al}^{8+}$, ток 20 мА.

Настройки ионно-оптической системы канала:

- $U_0 = U_3 = 100$ кВ, $U_1 = 0$, $U_2 = 90$ кВ.
- Магнитные поля в осесимметричных линзах: 7,5 и 9,4 кГс.

На Рис. П.2.1.13 показаны траектории движения ионов $^{27}\text{Al}^{8+}$ в канале транспортировки. На Рис. П.2.1.14 представлены огибающая и изменение поперечных эмиттансов пучка. На Рис. П.2.1.15 даны две проекции фазового распределения ионов $^{27}\text{Al}^{8+}$ на выходе канала транспортировки.

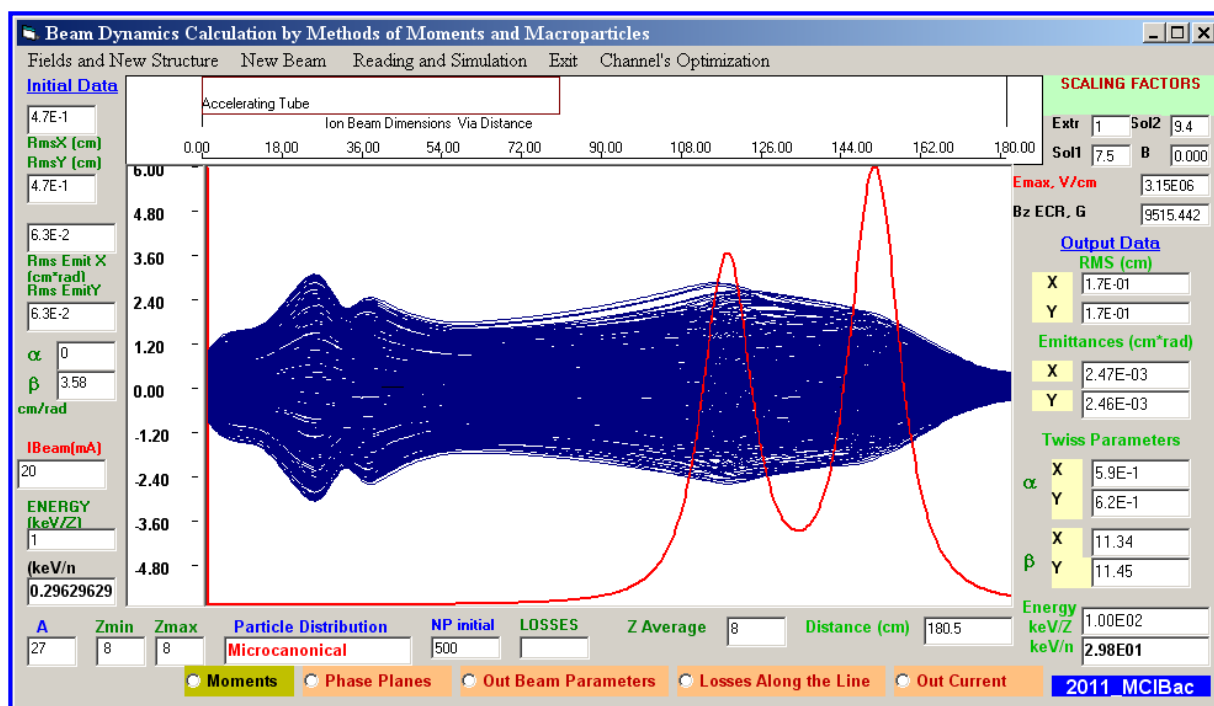


Рис. П.2.1.13. Траектории ионов $^{27}\text{Al}^{8+}$ (интерфейс программы MCIB04)

Результат согласования пучка: 85 % ионов $^{27}\text{Al}^{8+}$ в акцептансе RFQ

- 2) Источник поляризованных ионов, дейтроны, ток 10 мА.

Настройки ионно-оптической системы канала:

- $U_0 = U_2 = U_3 = 51,8$ кВ, $U_1 = 0$.
- Магнитные поля в осесимметричных линзах: 0,248 и 5,9 кГс.

На Рис. П.2.1.14 показаны траектории движения дейтронов в канале транспортировки. На Рис. П.2.1.15 представлены огибающая и изменение поперечных эмиттансов пучка. На Рис. П.2.1.16 даны две проекции фазового распределения дейтронов на выходе канала транспортировки

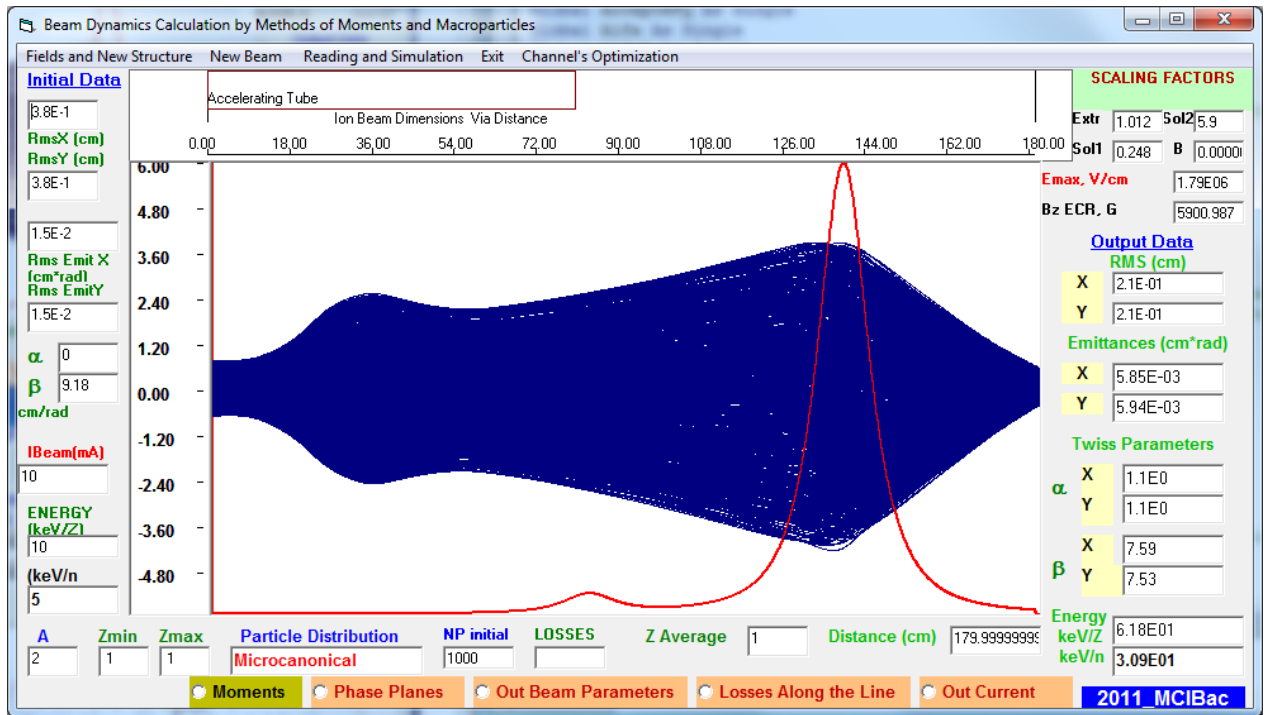


Рис. П.2.1.14. Траектории поляризованных дейтронов (интерфейс программы MCIB04)

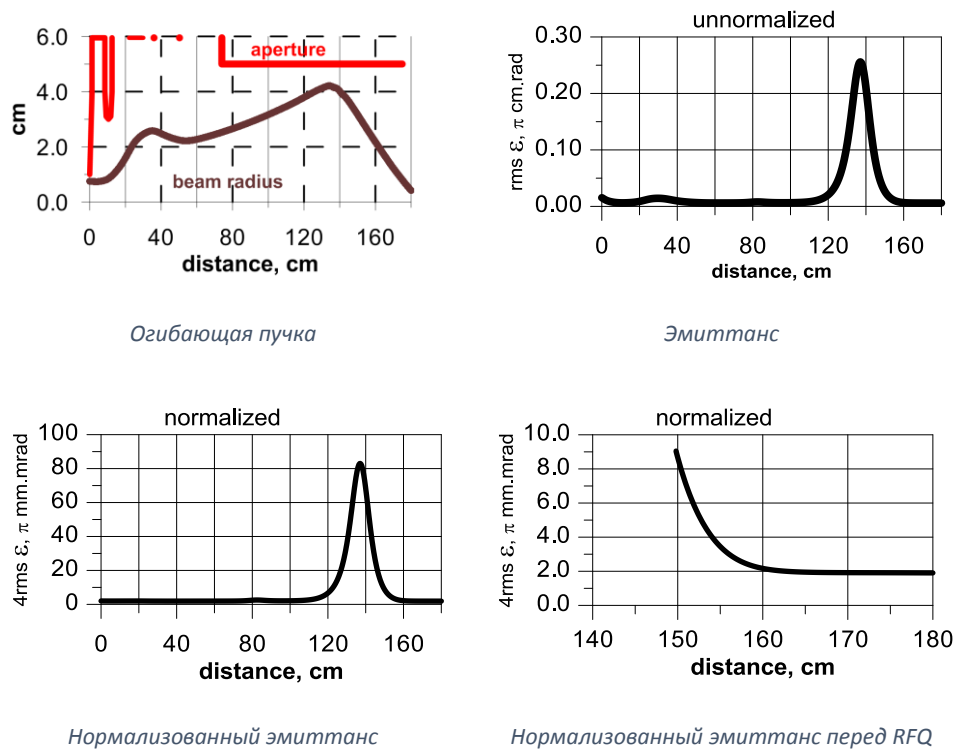


Рис. П.2.1.15. Огибающая и поперечные эмиттансы пучка

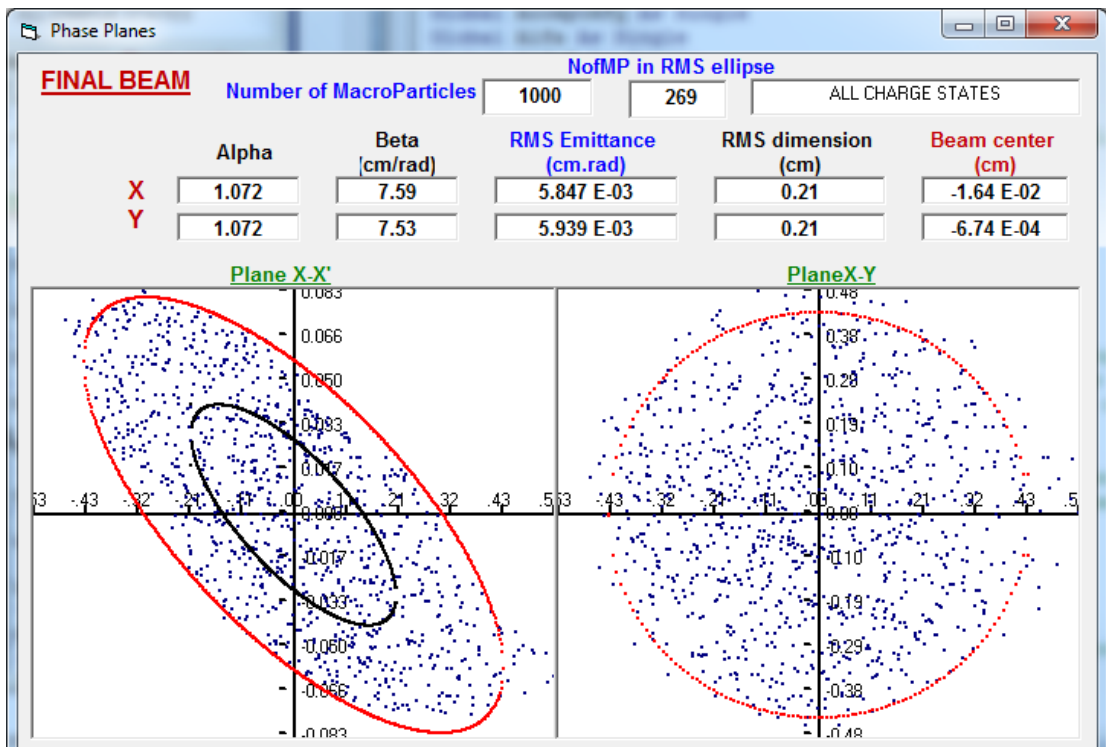


Рис. П.2.1.16. Проекция фазового распределения поляризованных дейтронов на выходе канала транспортировки (интерфейс программы MCB04)

Результат согласования пучка: 90% поляризованных дейтронов в акцептансе RFQ

3) Источник поляризованных ионов, протоны, ток 10 мА ($U_{inj} = 5$ кВ).

Настройки ионно-оптической системы канала:

- $U_0 = U_2 = U_3 = 26$ кВ, $U_1 = 0$.
- Магнитные поля в осесимметричных линзах: 1,5 и 2,85 кГс.

На Рис. П.2.1.17 показаны траектории движения протонов в канале транспортировки. На Рис. П.2.1.18 представлены огибающая и изменение поперечных эмиттансов пучка. На Рис. П.2.1.19 даны две проекции фазового распределения протонов на выходе канала транспортировки.

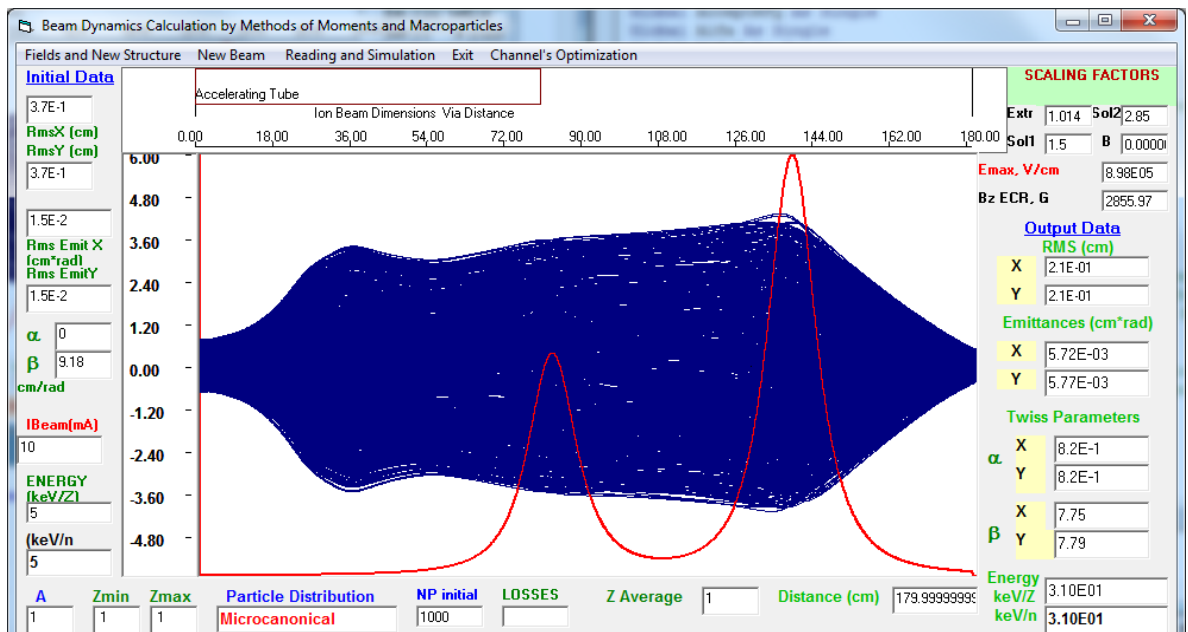
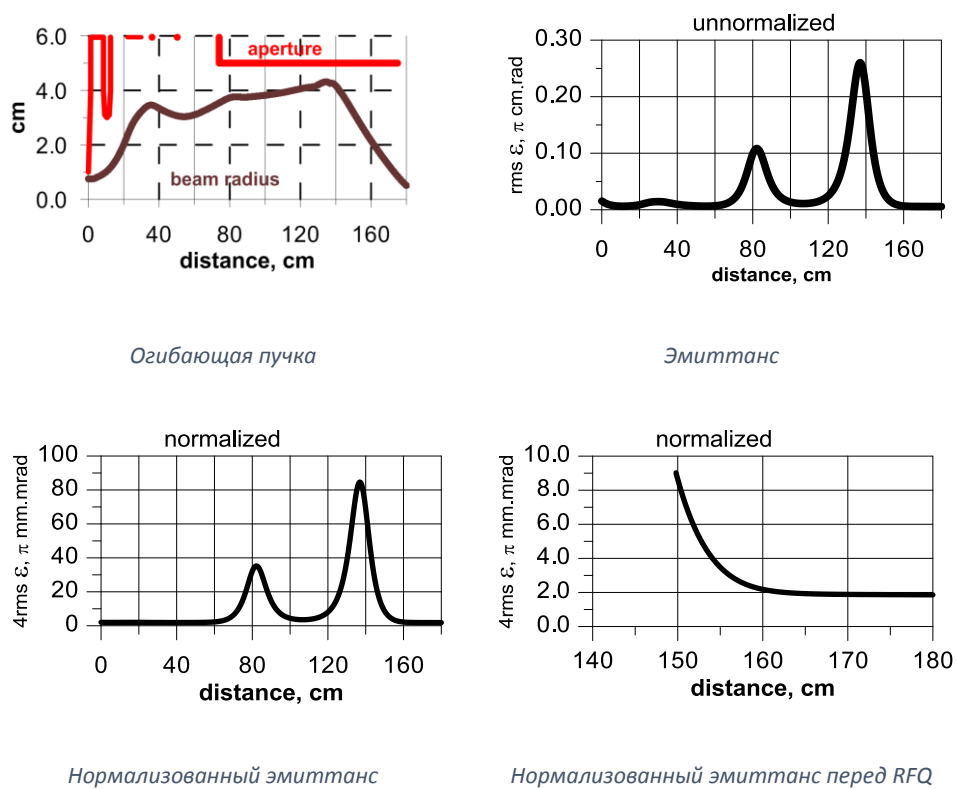


Рис. П.2.1.17. Траектории поляризованных протонов (интерфейс программы MCV04)



Огибающая пучка

Эмиттанс

Нормализованный эмиттанс

Нормализованный эмиттанс перед RFQ

Рис. П.2.1.18. Огибающая и поперечные эмиттансы пучка

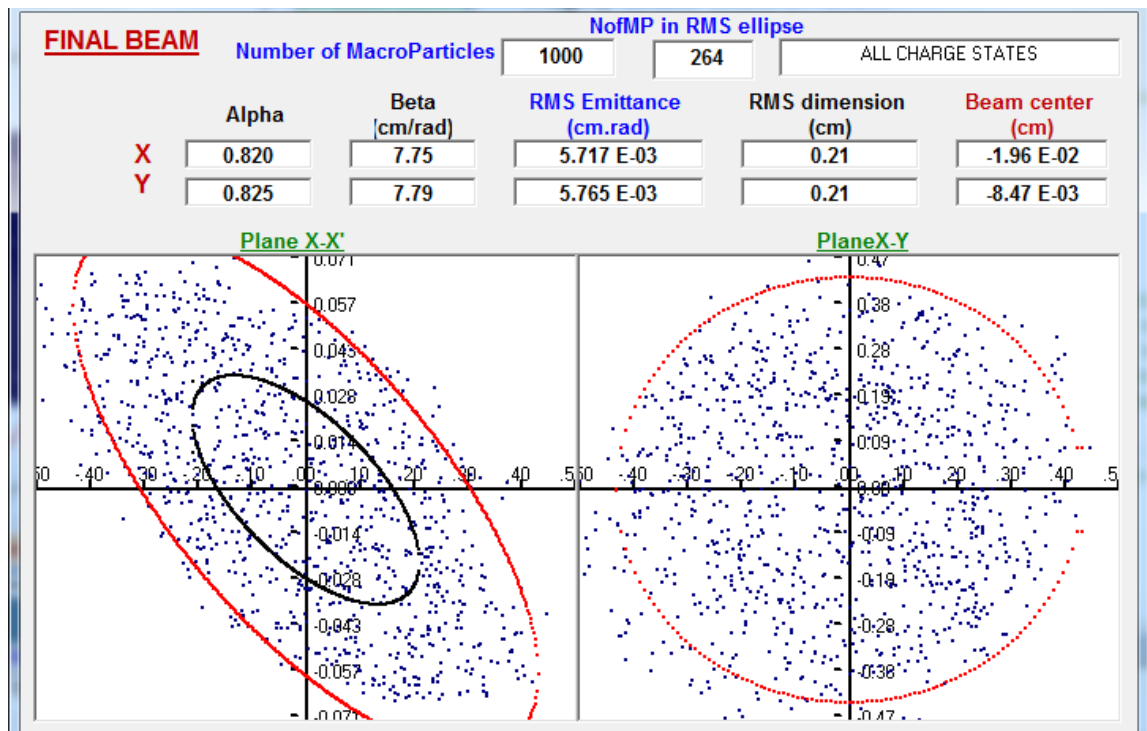


Рис. П.2.1.19. Проекция фазового распределения поляризованных протонов на выходе канала транспортировки (интерфейс программы MCB04)

Результат согласования пучка с форинжектором ЛУ-20: 93 % поляризованных протонов в акцептансе RFQ при уменьшенной энергии на входе в канал (5 вместо 10 кВ).

Приложение 2

к Главе 2

П.2.2 КАНАЛ ТРАНСПОРТИРОВКИ ИОНОВ НИЗКОЙ ЭНЕРГИИ В НІІАС

П.2.2.1 Распределения электрических и магнитных полей

Электрические элементы начальной части канала транспортировки (ускоряющая трубка, вытягивающий и фокусирующий электроды) совместно с выходным электродом ионного источника формируют непрерывное распределение электрического поля, выполняющее функции предварительного ускорения и фокусировки ионов. На Рис. П.2.2.1 – Рис. П.2.2.3 представлены результаты моделирования электрических полей в начальной части канала.

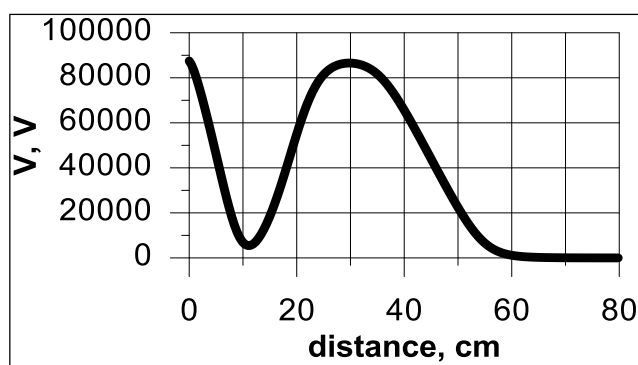


Рис. П.2.2.1. Распределение электрического потенциала на оси канала

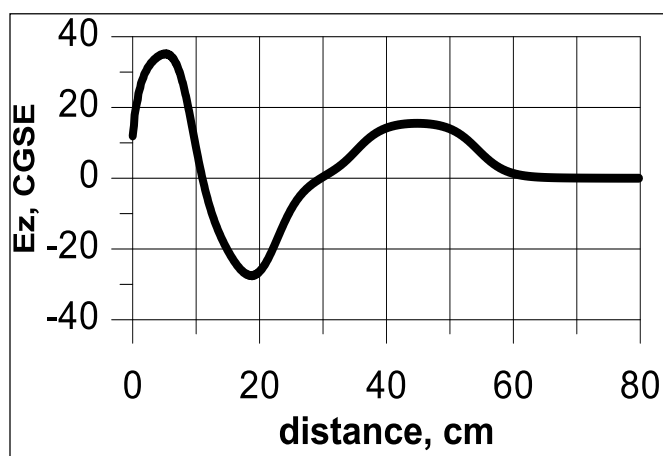


Рис. П.2.2.2. Распределение продольной компоненты электрического поля на оси канала

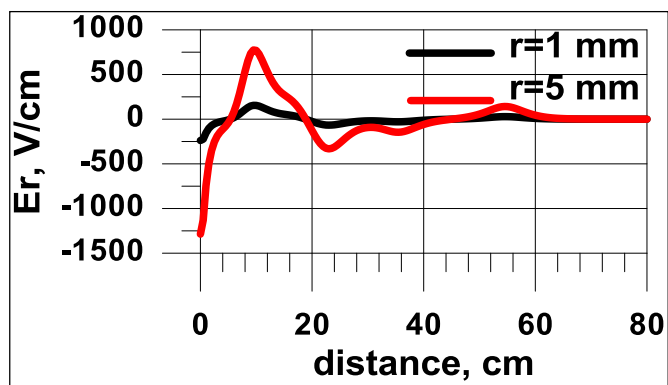


Рис. П.2.2.3. Распределение радиальной компоненты электрического поля

Магнитные поля осесимметричных линз в большей степени локализованы по местам размещения линз. Краевые поля распространяются приблизительно на 300 мм от центров линз. На рис. 4 приведено распределение магнитных полей осесимметричных линз на оси канала транспортировки.

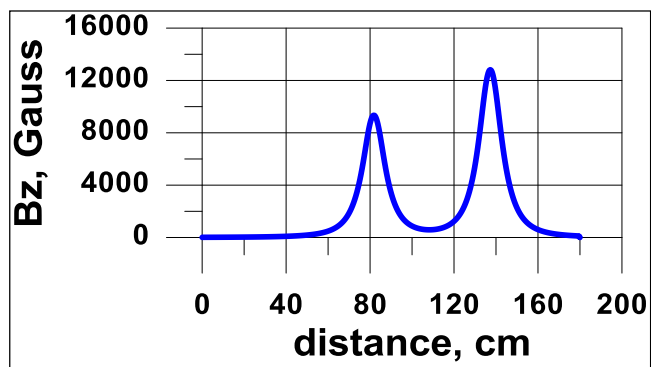


Рис. П.2.2.4. Распределение магнитных полей осесимметричных линз на оси канала

Результаты магнитных измерений линз приведены в Приложении 2.1.

П.2.2.2 Динамика пучков

Для определения характеристик элементов ионно-оптической системы канала было проведено моделирование динамики пучков ионов золота в канале транспортировки. Моделирование динамики ионов производилось программой MCIB04. Было рассмотрено два значения полного тока ионного пучка (10 и 3,5 мА), соответствующие одно- и трехоборотной схемам инжекции пучка в Бустер. В Таблице П.2.2.1 и Таблице П.2.2.2 приведены параметры пучка ионов целевой зарядности (Au^{31+}) на входе и выходе канала транспортировки. На Рис. П.2.2.5 дано начальное распределение ионов золота по зарядовым состояниям.

Таблица П.2.2.1. Параметры пучка на входе канала транспортировки ионов в HILAC

Z/A	Ток, мА	4 RMS ε_n , π мм мрад	Диаметр пучка, мм	Энергия, кэВ/Z	v/c	RMS ε_{in} , π мм мрад	β , см/рад
0,157	3,5 и 10	0,24	10	20	$2,6 \cdot 10^{-3}$	23,2	26,96

Таблица П.2.2.2. Требуемые параметры пучка ионов Au³¹⁺ на входе HILAC

Z/A	I_{inj} , мА	RMS $\varepsilon_{n x, y}$, π мм мрад	$\alpha_{x, y}$, рад	U_{inj} , кВ	v/c	RMS ε_{in} , π мм мрад	β , см/рад	RMS x, y , см	RMS x', y' , мрад
0,157	3,5	0,06	0,75	108	$6 \cdot 10^{-3}$	10	7,25	0,085	14,6

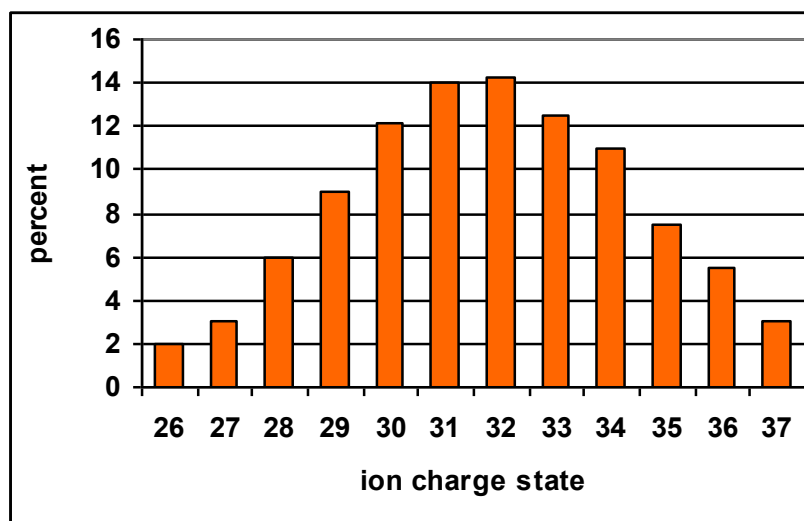


Рис. 2.2.5. Распределение ионов золота по зарядовым состояниям на входе канала транспортировки ионов в HILAC

Ниже приведены результаты моделирования динамики ионов.

- 1) Полный ток 10 мА.

Настройки ионно-оптической системы канала:

- $U_0 = U_3 = 89$ кВ, $U_1 = 30$ кВ, $U_2 = 60$ кВ.
- Магнитные поля в осесимметричных линзах: 10 и 10,3 кГс.

На Рис. 2.2.6 показаны траектории движения ионов золота в канале транспортировки. На Рис. 2.2.7 показаны проценты попадания ионов в акцептанс HILAC в зависимости от зарядового состояния. На Рис. 2.2.8 даны две проекции фазового распределения ионов Au³¹⁺ на выходе канала транспортировки.

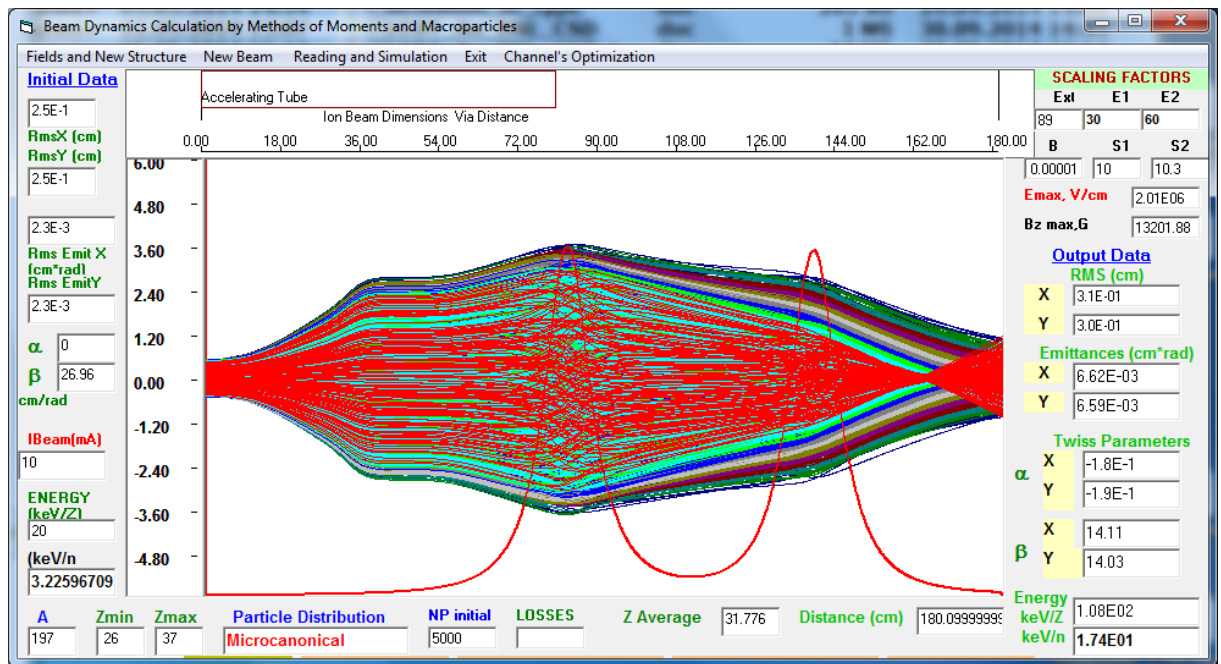


Рис. 2.2.6. Траектории ионов золота (интерфейс программы MCIB04)

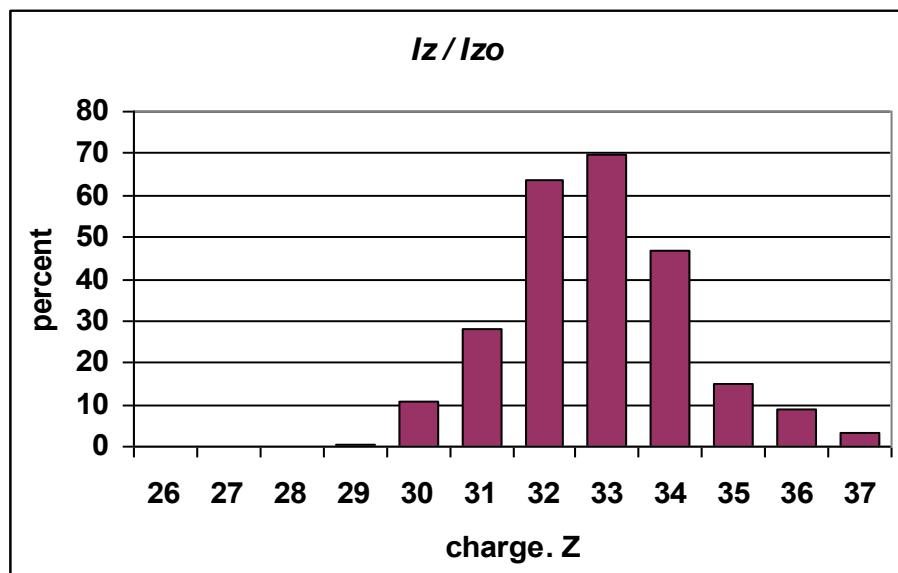


Рис. 2.2.7. Процент перевода ионов золота в аксептанс HILAC в зависимости от их зарядового состояния

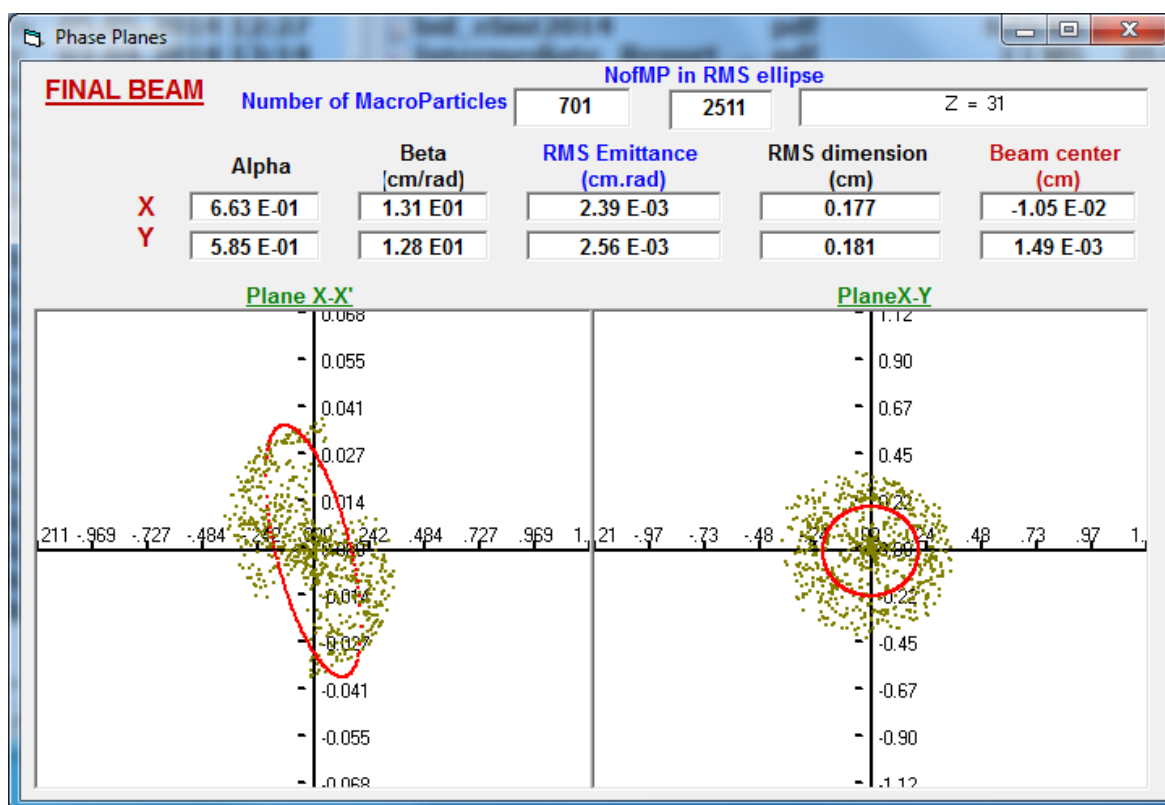


Рис. 2.2.8. Проекция фазового распределения ионов Au^{31+} на выходе канала транспортировки (интерфейс программы MCIB04)

Результат согласования пучка ионов целевой 31-ой зарядности с HILAC: 30 % ионов в акцептансе HILAC.

2) Полный ток 3,5 мА.

Настройки ионно-оптической системы канала:

- $U_0 = U_3 = 89$ кВ, $U_1 = 50$ кВ, $U_2 = 60$ кВ.
- Магнитные поля в осесимметричных линзах: по 10 кГс.

На Рис. 2.2.9 показаны траектории движения ионов золота в канале транспортировки. На Рис. 2.2.10 показаны проценты попадания ионов в акцептанс HILAC в зависимости от зарядового состояния. На Рис. 2.2.11 даны две проекции фазового распределения ионов Au^{31+} на выходе канала транспортировки.

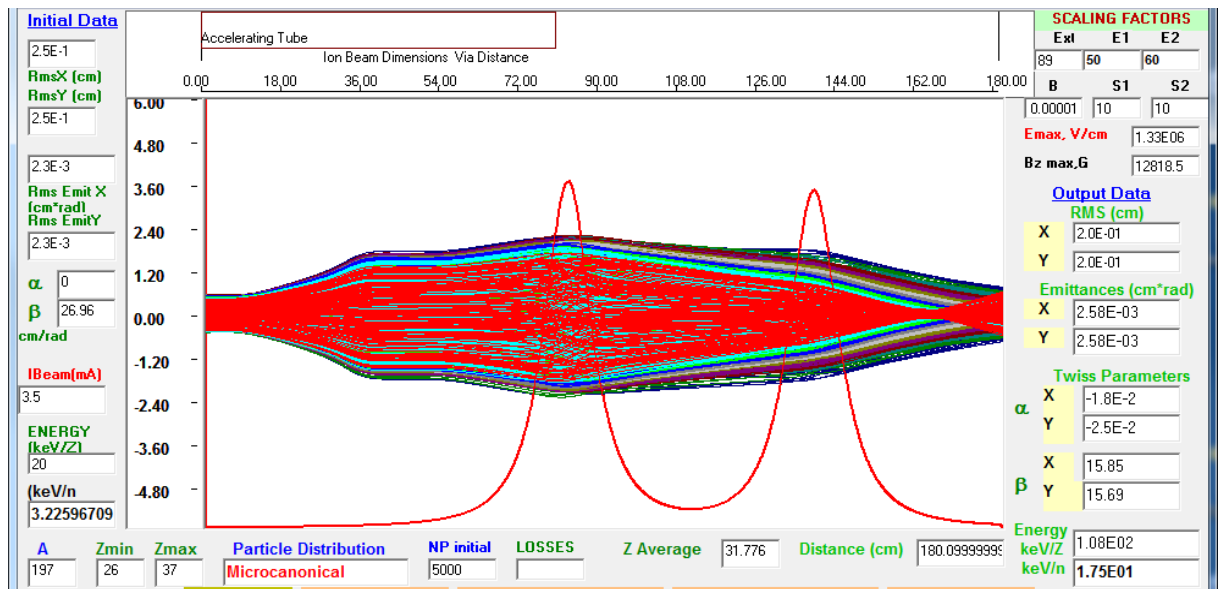


Рис. 2.2.9. Траектории ионов золота (интерфейс программы MCIB04)

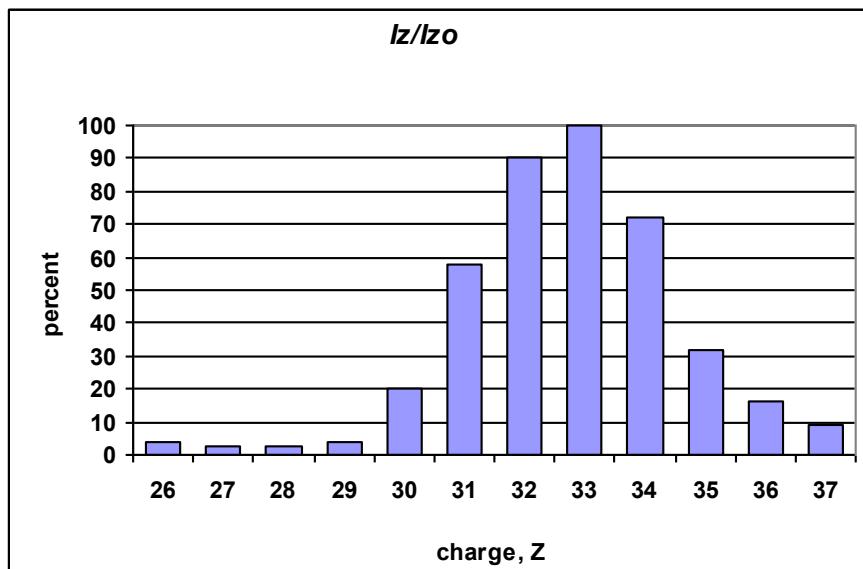


Рис. 2.2.10. Процент перевода ионов золота в акцептанс HILAC в зависимости от их зарядового состояния

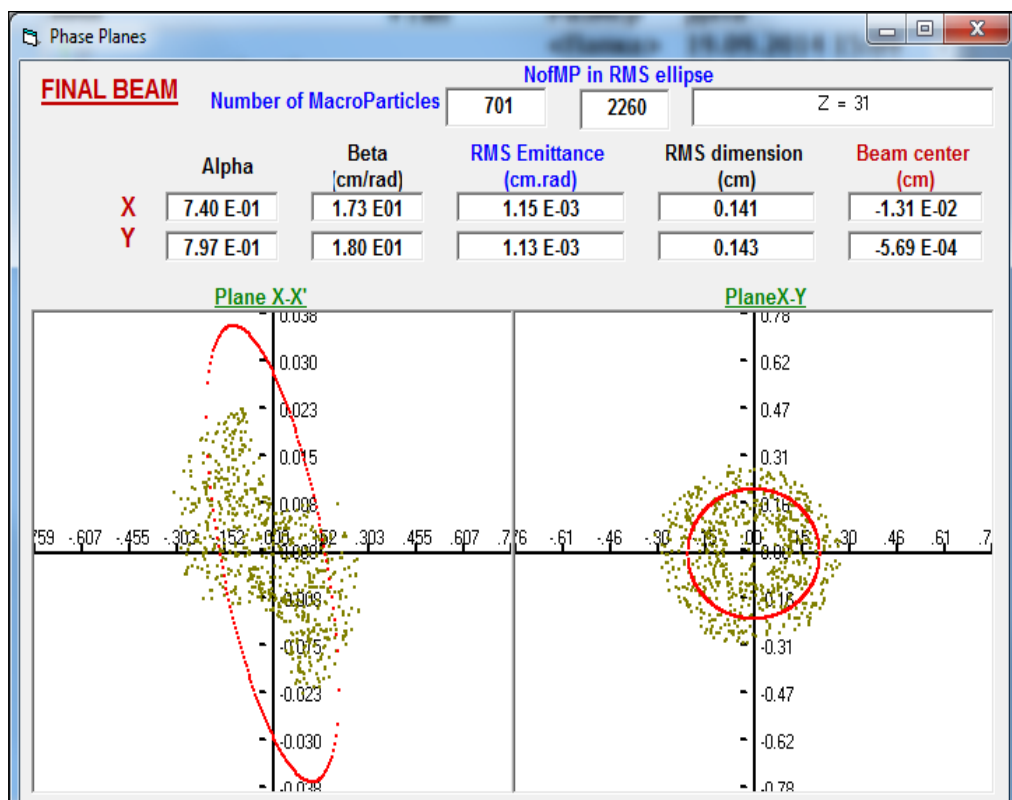


Рис. 2.2.11. Проекции фазового распределения ионов Au^{31+} на выходе канала транспортировки (интерфейс программы MCIB04)

Результат согласования пучка ионов целевой 31-ой зарядности с HILAC: 58 % ионов в акцептансе HILAC.

Моделирование показывает, что в результате оптимизации параметров канала и согласования пучка ионов с HILAC можно достичь 80 ÷ 90 % попадания ионов целевой 31-ой зарядности в акцептанс ускорителя.

Приложение 3 к Главе 2

П.2.3 КАНАЛ ТРАНСПОРТИРОВКИ НИЛАС — БУСТЕР

П.2.3.1 Дипольные магниты

Для канала транспортировки НИЛАС — Бустер используются дипольные магниты бывшего ускорителя АмPS. Основные параметры дипольных магнитов даны в Таблице П.2.3.1.

Таблица П.2.3.1. Основные параметры дипольных магнитов

Поле на полюсе, Тл	1,21
Угол поворота, град	11,25
Зазор, мм	38
Апертура, мм	81
Ширина полюса, мм	190/130
Однородность, $\times 10^4$	5
Магнитная длина, мм	647
Длина ярма, мм	590
Материал обмотки	Al
Ампер витки	39600
Количество витков	60 \times 2
Ток, А	330
Мощность, кВт	5,45
Индуктивность, мГн	60
Тип охлаждения обмотки	водяное, косвенное
Вес элемента, кг	1050

Таблица П.2.3.2. Основные параметры квадрупольных линз

Поле на полюсе, Тл	0,50
Угол поворота, град	0
Зазор, мм	95
Апертура, мм	76
Ширина полюса, мм	104
Однородность, $\times 10^4$	10
Магнитная длина, мм	290
Длина ярма, мм	250
Материал обмотки	Cu
Ампер витки	26880
Количество витков	42 \times 4
Ток, А	280
Мощность, кВт	4,1
Индуктивность, мГн	7,3
Тип охлаждения обмотки	водяное, прямое
Вес элемента, кг	310



Рис. П.2.3.3. Квадрупольная линза

П.2.3.3 Двойные дипольные корректоры

Для канала транспортировки NIIAC — Бустер используются корректоры бывшего ускорителя AmPS.

П. 2.3.4 Динамика ионных пучков

Для определения положений и характеристик элементов ионно-оптической системы канала было проведено моделирование динамики ионных пучков в канале транспортировки. Моделирование динамики ионов проводилось программой MAD. В Таблице П.2.3.3 приведены параметры пучка на входе и выходе канала транспортировки.

Таблица П.2.3.3. Параметры пучка на входе и выходе канала транспортировки HILAC — Бустер

	Вход канала	Выход канала
β_x , м	5,5	13,2
α_x	-3,5	1,2
β_y , м	4	5,1
α_y	-3	0,2
D_x , м	0	0,78
D_x'	0	-0,31
$\Delta p/p$, 10^{-3}	5	1

При оптимизации параметров элементов ионно-оптической системы требовалось удовлетворение следующих условий:

- согласование пучка со структурными функциями Бустера $\beta_{x,y}$, $\alpha_{x,y}$, D_x , D_x' ;
- ограничение на размер пучка в дебанчере (по апертуре трубок дрейфа) $a_{x,y} < a_{\max, deb}$;
- ограничение на вертикальный размер пучка в дипольных магнитах (по зазору между полюсами) $a_y < a_{y, \max, dip}$;
- ограничение на размер пучка вдоль канала (по апертуре вакуумной камеры) $a_{x,y}(s) < a_{x,y, \max}(s)$;
- нулевая дисперсия в дебанчере $D_x = 0$, $D_x' = 0$;
- сепарация нецелевых зарядностей ионов;
- близкая к максимальной эффективность разгруппирования пучка.

П.2.3.4.1 Положение дебанчера и эффективность разгруппирования

Для нахождения оптимального положения дебанчера было проведено моделирование разгруппирования пучка для различных расстояний между HILAC и дебанчером. На Рис. П.2.3.5 приведена зависимость выходного значения продольного импульсного разброса пучка от положения дебанчера. Начальное значение импульсного разброса — $5 \cdot 10^{-3}$.

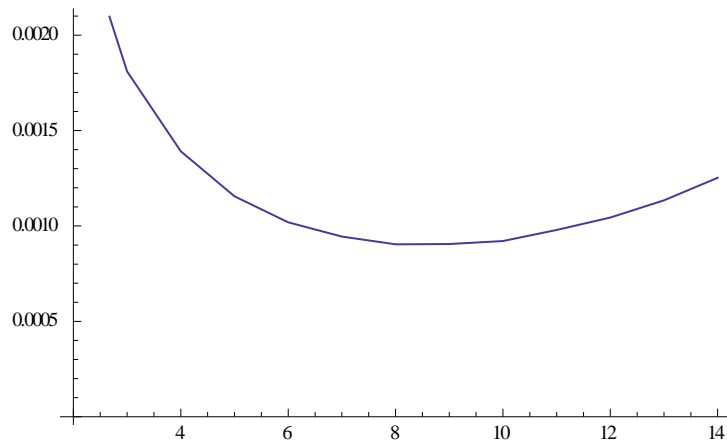


Рис. П.2.3.5. Зависимость продольного импульсного разброса на выходе дебанчера от положения дебанчера (расстояния между HILAC и дебанчером)

Был рассмотрен эффективный продольный акцептанс дебанчера, имеющий смысл максимального начального значения продольного импульсного разброса, при котором импульсный разброс на входе Бустера не превышает заданного предельного значения (взятого равным $1,5 \cdot 10^{-3}$). На Рис. П.2.3.6 показана зависимость эффективного акцептанса дебанчера от его положения.

Моделирование показало, что оптимальное положение дебанчера лежит в диапазоне расстояний от HILAC от 6 до 8 м.

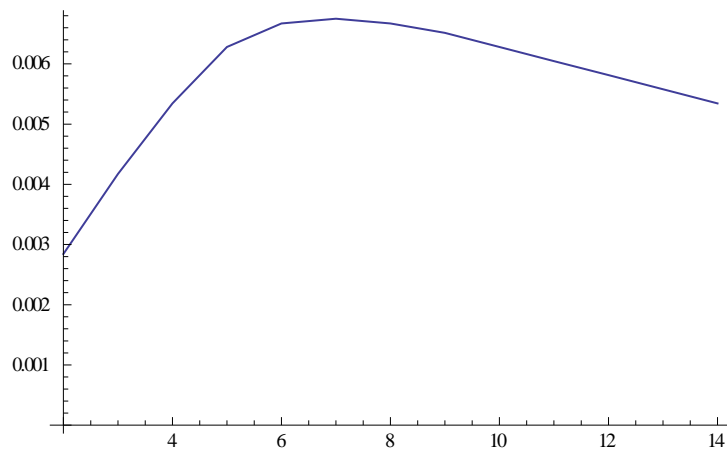


Рис. П.2.3.6. Зависимость максимального допустимого продольного импульсного разброса на входе дебанчера от положения дебанчера (расстояния между HILAC и дебанчером)

П.2.3.4.2 Согласование пучка со структурными функциями Бустера

На Рис. П.2.3.7 показаны апертура вакуумной камеры и огибающие пучка вдоль канала. На Рис. П.2.3.8 и Рис. П.2.3.9 даны бета-функции и горизонтальная дисперсия пучка соответственно.

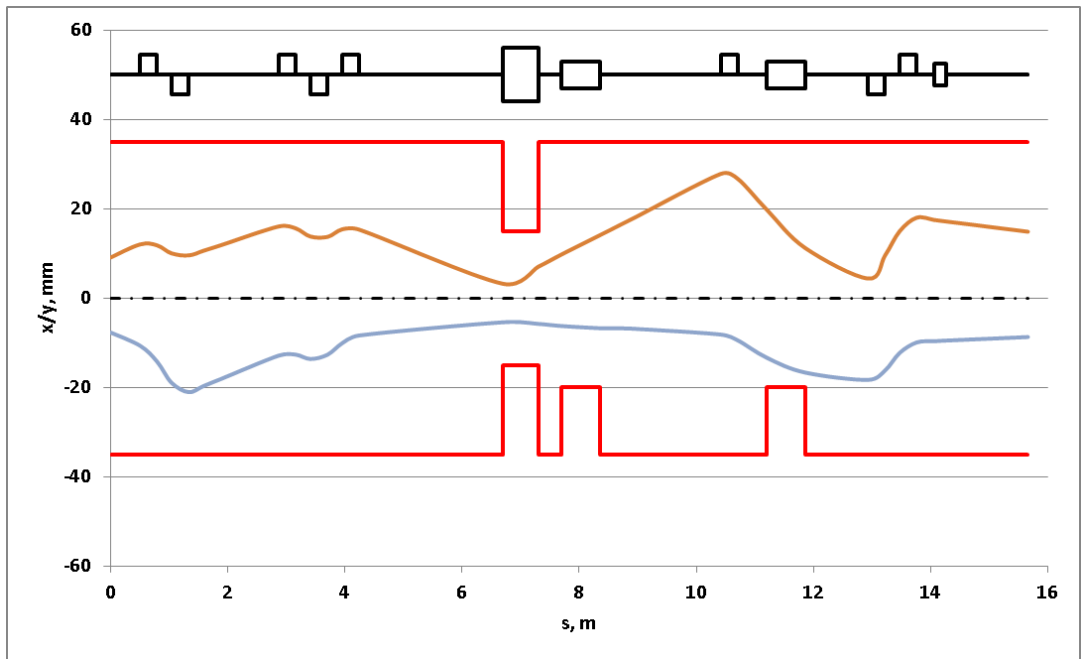


Рис. П.2.3.7. Апертура вакуумной камеры и огибающие пучка вдоль канала. Положительные значения на оси x/y означают горизонтальные координаты, отрицательные — вертикальные

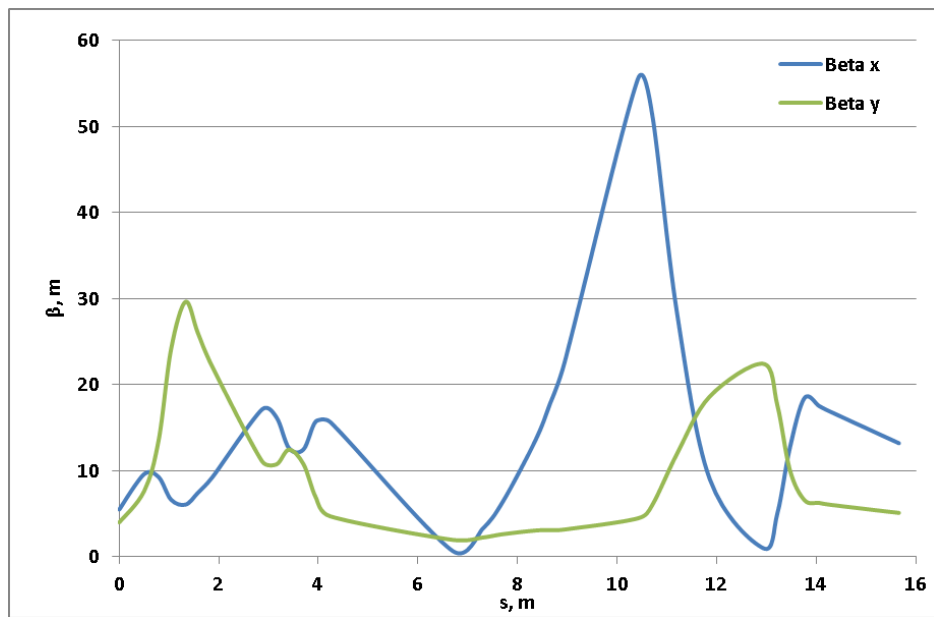


Рис. П.2.3.8. Бета-функции пучка вдоль канала

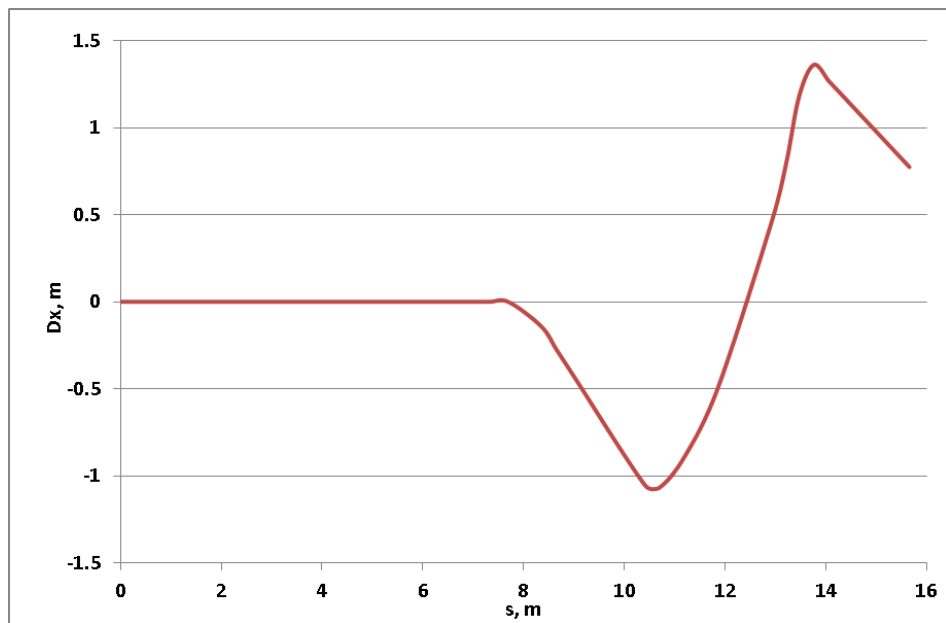


Рис. П.2.3.9. Горизонтальная дисперсия пучка вдоль канала

П.2.3.4.3 Управление траекторией пучка на выходе канала

Было проведено моделирование отклонения пучка направляющим блоком корректоров, размещаемым в конце канала транспортировки. Моделирование показало, что для обеспечения проектных схем инжекции пучка в Бустер требуемый угол отклонения пучка в направляющем блоке корректоров не превышает 5 мрад. На Рис. П.2.3.10 даны траектории пучка в конце канала для различных схем инжекции.

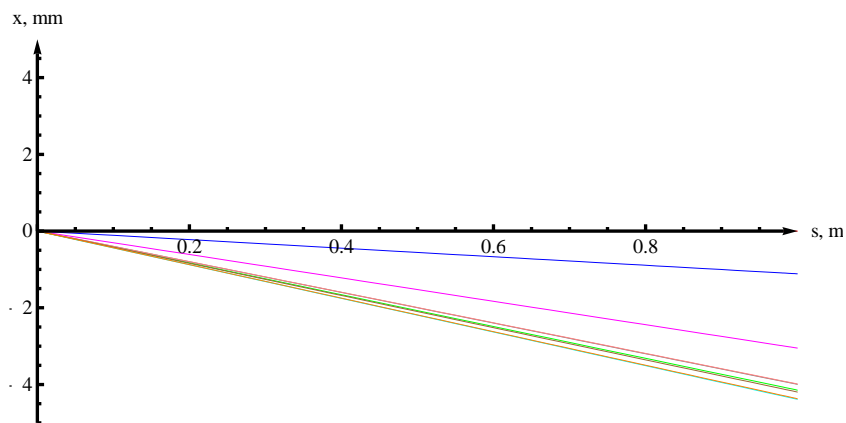


Рис. П.2.3.10. Траектории пучка в конце канала HILAC — Бустер для различных схем инжекции