

КАНАЛЫ ТРАНСПОРТИРОВКИ, СИСТЕМЫ ИНЖЕКЦИИ И ВЫВОДА ПУЧКА В УСКОРИТЕЛЬНОМ КОМПЛЕКСЕ NICA

*А. В. Бутенко, В. И. Волков, С. Ю. Колесников, И. Н. Мешков,
В. А. Михайлов, С. В. Рабцун¹, А. О. Сидорин, А. И. Сидоров,
Н. Д. Топилин, Г. В. Трубников, А. В. Тузиков¹, А. А. Фатеев, В. С. Швецов*

Объединенный институт ядерных исследований, Дубна

В ОИЯИ в рамках проекта тяжелоионного коллайдера NICA ведется сооружение нового ускорительного комплекса для проведения экспериментов на встречных ионных пучках (на первой стадии проекта) и пучках поляризованных протонов и дейтронов (на второй стадии). Каналы транспортировки, а также системы инжекции и вывода пучков в синхротронах и накопительных кольцах являются важным связующим звеном всего ускорительного комплекса. В работе представлены проекты основных каналов транспортировки и систем ввода/вывода пучков. Особое внимание уделено различным аспектам динамики пучков при их переводе между ускорителями комплекса.

A new accelerator complex is constructed by the Joint Institute for Nuclear Research (Dubna, Russia) in the frame of the Nuclotron-based Ion Collider Facility (NICA) project. The goal is to provide experiments on 1) colliding ion beams at the first stage and 2) colliding polarized proton/deuteron beams at the second stage of the project. Transport beam lines and systems of beam injection/extraction into/from the NICA synchrotrons and the Collider rings are the important link for the whole accelerator facility. Designs of main beam transfer systems of the NICA complex are presented in this report. Special attention is paid to various aspects of beam dynamics during its transfer between the NICA accelerators.

PACS: 29.20.db; 29.20.dk; 29.27.Ac; 29.27.Bd; 29.27.Eg

ВВЕДЕНИЕ

Проект NICA [1] предполагает создание и развитие нового ускорительного комплекса, основанного на существующем сверхпроводящем синхротроне нуклотрон. В рамках проекта существующие ускорители ЛУ-20 и нуклотрон были модернизированы. Комплекс также будет включать новые установки: тяжелоионный источник «Крион» электронно-струнного типа, источник поляризованных протонов и дейтронов, тяжелоионный линейный ускоритель НИЛАС, сверхпроводящий синхротрон бустер, два накопительных кольца коллайдера и каналы транспортировки ионных пучков.

¹E-mail: tuzikov@jinr.ru

В данной работе представлены проекты систем трех участков перевода пучков между основными элементами ускорительного комплекса NICA:

- 1) перевода пучка из NPLAC в бустер;
- 2) перевода пучка из бустера в нуклотрон;
- 3) перевода пучка из нуклотрона в кольца коллайдера.

1. ПЕРЕВОД ПУЧКА ИЗ NPLAC В БУСТЕР

Системы перевода пучка из линейного ускорителя NPLAC в бустер включают в себя канал транспортировки пучка NPLAC–бустер и систему инжекции пучка в бустер.

Таблица 1. Основные параметры пучка при переводе из NPLAC в бустер

Ионы	Au ³⁰⁺ , Au ³¹⁺ , Au ³²⁺ (на выходе NPLAC); Au ³¹⁺ (на входе бустера)
Интенсивность	До $2,5 \cdot 10^9$ (Au ³¹⁺); до $6 \cdot 10^9$ (полный спектр на выходе NPLAC)
Ток, мА	4
Энергия ионов, МэВ/нуклон	3,2
Частота повторения инжекций пучка в бустер, Гц	0,25
Частота повторения стадий многократной инжекции, Гц	10 (3 импульса за 4 с)
Эффективность перевода, %	90
Поперечный 95 %-й эмиттанс, π мм · мрад:	
на выходе NPLAC	10
на входе бустера	15
после филаментации в бустере	15–150 (гор.) / 15 (верт.)

В процессе перевода пучка в канале транспортировки NPLAC–бустер производится разгруппирование пучка, согласование поперечного фазового портрета целевых ионов с акцептансом бустера, сепарация и поглощение нецелевых зарядностей ионов. Ионно-оптическая система (ИОС) канала транспортировки и система инжекции пучка в бустер позволяют осуществлять многовариантную инжекцию для накопления в бустере пучка требуемой интенсивности [2]. Основные методы инжекции пучка в бустер: однократный однооборотный, однократный многооборотный и многократный однооборотный. Накопление ионов осуществляется в горизонтальной фазовой плоскости бустера.

1.1. Канал транспортировки пучка NPLAC–бустер. Канал транспортировки NPLAC–бустер располагается в корпусе № 1 ЛФВЭ ОИЯИ и проходит сквозь ярмо магнита бывшего ускорителя синхрофазотрон. Траектория пучка в канале транспортировки находится в медианной плоскости бустера. Геометрия канала транспортировки NPLAC–бустер представлена на рис. 1.

ИОС канала транспортировки состоит из двух дипольных магнитов, восьми квадрупольных линз, системы двойных дипольных корректоров, направляющего блока корректоров и дебанчера (разгруппирователя). Направляющий блок корректоров, размещаемый

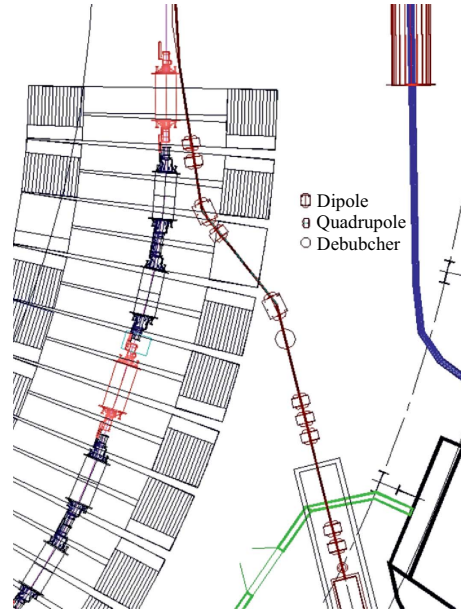


Рис. 1. Геометрия канала транспортировки HILAC-бустер

в конце канала, используется для управления траекторией пучка на выходе канала, требуемого для обеспечения различных схем инжекции пучка в бустер. Дебанчер, представляющий собой четырехзворный ВЧ-резонатор, для увеличения эффективности работы устанавливается в конце первой прямолинейной секции канала в бездисперсионной области. Сепарация зарядностей ионов осуществляется двумя дипольными магнитами, и в окрестности финального дублета линз нецелевые зарядности поглощаются.

Ниже приведены результаты моделирования динамики ионного пучка в канале транспортировки.

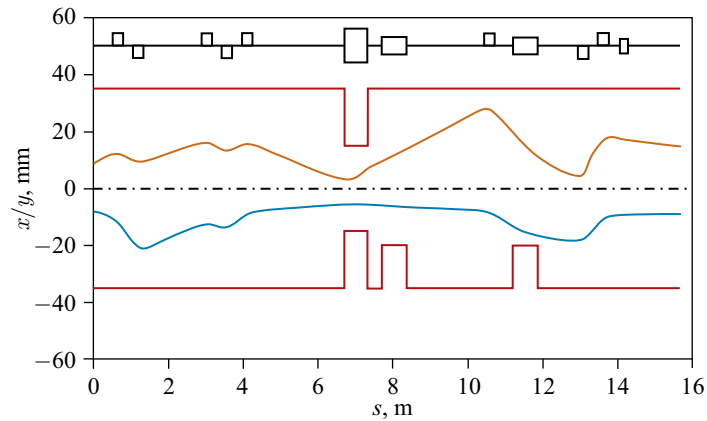


Рис. 2. Апертура вакуумной камеры и огибающие пучка целевой зарядности ионов вдоль канала. Положительные значения на оси x/y означают горизонтальные координаты, отрицательные — вертикальные

1.2. Система инъекции пучка в бустер. Основными элементами системы инъекции пучка являются инжекционный электростатический септум (ИЭС) и электрические импульсные пластины ИП1–ИП3. Пластины служат для посадки пучка на замкнутую орбиту при использовании схемы однооборотной инъекции пучка и создания локального бампа (искажения) замкнутой орбиты при использовании методов многооборотной и многократной инъекции.

Элементы системы размещаются в окрестности первого прямолинейного промежутка бустера (рис. 3). Электрические импульсные пластины ИП1 и ИП3 устанавливаются внутри криостата в соседних с прямолинейным промежутком периодических ячейках бустера. Электрические импульсные пластины ИП2 и ИЭС устанавливаются непосредственно в первом прямолинейном промежутке бустера, большая часть которого находится при комнатной температуре, а для криогенных трубчатых и сверхпроводящих кабельных коммуникаций создается байпас теплого промежутка.

ИЭС представляет собой пару криволинейных электродов, устанавливаемую внутри вакуумного бокса. Катод размещается с внешней стороны от анода. Высокое напряжение подается на катод, анод заземляется. Длина электростатического септума — 1,9 м. Зазор между анодом и катодом — 35 мм, толщина ножа септума — 1 мм. Максимальное напряжение на катоде септума — 125 кВ.

Режим работы ИЭС циклический. В течение ввода ионов в бустер поддерживается постоянное напряжение между электродами септума. В промежутках между стадиями многократной инъекции возможно изменение напряжения. Источник питания электростатического септума размещается вблизи яра синхрофазотрона с внутренней стороны

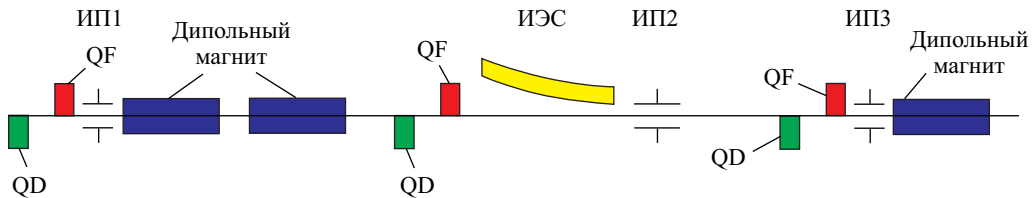


Рис. 3 (цветной в электронной версии). Размещение элементов системы инъекции пучка в бустере. Синим цветом обозначены структурные дипольные магниты, красным — фокусирующие квадрупольные линзы (QF), зеленым — дефокусирующие квадрупольные линзы (QD)

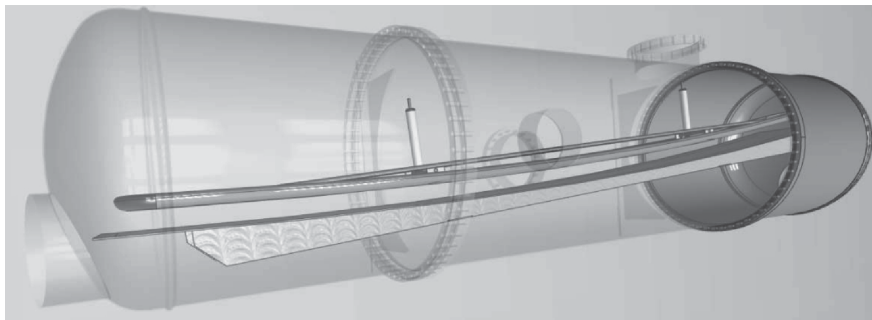


Рис. 4. Электростатический септум (трехмерная модель)

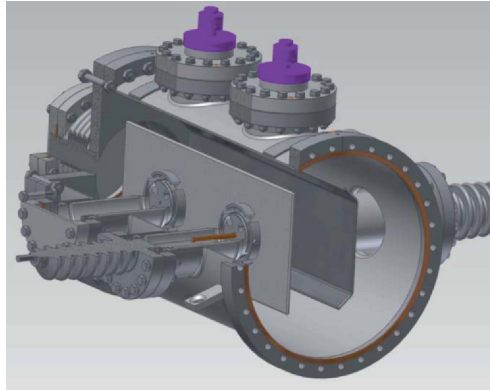


Рис. 5. Электрические импульсные пластины (трехмерная модель)

первого прямолинейного промежутка бустера. Длительность активной фазы цикла работы источника питания — порядка 1 с. Максимальное выходное напряжение — 130 кВ. Неоднородность напряжения на плато цикла не превышает $\pm 0,1\%$.

Электрические импульсные пластины ИП1–ИП3 представляют собой три пары проводящих пластин, устанавливаемых вертикально внутри вакуумных боксов параллельно оси движения пучка. Длины пластин ИП1 и ИП3 составляют 0,45 м, пластин ИП2 — 0,8 м. Зазоры между пластинами модулей ИП1 и ИП3 — 102 мм, модуля ИП2 — 93 мм. Максимальные напряжения между пластинами: 50 кВ для модулей ИП1 и ИП2, 60 кВ для модуля ИП3.

Пластины работают в импульсном режиме. При многократной инжекции частота повторения импульсов составляет 10 Гц, максимальное число импульсов подряд — 3. Источники питания пластин [3] осуществляют независимую однополярную зарядку и разрядку пластин, составляющих пару. Различаются два режима работы пластин. При одноступенчатом режиме потенциал подается только на одну пластину. При двухступенчатом режиме к моменту начала ввода ионов потенциал подается на обе пластины, затем одна из пластин разряжается, что ведет к скачкообразному изменению потенциала между пластинами.

Источники питания, установленные на передвижные стойки, размещаются в непосредственной близости от модулей импульсных пластин. Длительность переднего фронта импульса (время зарядки пластины) не превышает 5 мс, длительность плато импульса — от 8 до 30 мкс, длительность заднего фронта импульса не превышает 100 нс. По максимальному выходному напряжению источники делятся на три типа: до 60, до 50 и до 20 кВ соответственно. Неоднородность напряжения на плато импульса не превышает $\pm 1\%$.

Концепция многовариантной инжекции ионов в бустер и результаты моделирования динамики пучка подробно освещены в работе [2].

2. ПЕРЕВОД ПУЧКА ИЗ БУСТЕРА В НУКЛОТРОН

Системы перевода пучка из бустера в нуклотрон включают в себя систему быстрого (однооборотного) вывода пучка из бустера, канал транспортировки пучка бустер–нуклотрон и систему инжекции пучка в нуклотрон. В процессе перевода пучка производятся об-

Таблица 2. Основные параметры пучка при переводе из бустера в нуклотрон

Ионы: до обдирки после обдирки	Au ³¹⁺ Au ⁷⁹⁺
Интенсивность: на выходе бустера на входе нуклотрона	До $1,5 \cdot 10^9$ До $1,3 \cdot 10^9$
Энергия ионов, МэВ/нуклон: до обдирки после обдирки	578 572
Максимальная магнитная жесткость ионов, Тл · м: до обдирки после обдирки	25 10
Эффективность перевода, %: полная целевой зарядности (после обдирки)	85 95
Поперечные 95 %-е эмиттансы на выходе бустера, π мм · мрад	0,2–3 (гор.) 0,2–1,5 (верт.)
Среднеквадратичный продольный импульсный разброс на выходе бустера, 10^{-4}	1–3

дирка ионов до максимального зарядового состояния, сепарация и поглощение нецелевых зарядностей ионов. ИОС канала транспортировки обеспечивает минимальный рост поперечных эмиттансов пучка и возможность управления ими для всего диапазона параметров пучка на входе канала. Входные параметры пучка варьируются в широком диапазоне вследствие использования: 1) различных схем инжекции пучка в бустер; 2) электронного охлаждения пучка.

2.1. Система быстрого вывода пучка из бустера. Основными элементами системы быстрого вывода пучка являются ударный магнит, септумный магнит и подсистема бампа замкнутой орбиты, состоящая из структурных дипольных магнитов бустера с дополнительными тоководами. Элементы системы размещаются в окрестности теплового третьего прямолинейного промежутка бустера с байпасом для криогенных трубочных и сверхпроводящих кабельных коммуникаций (рис. 6).

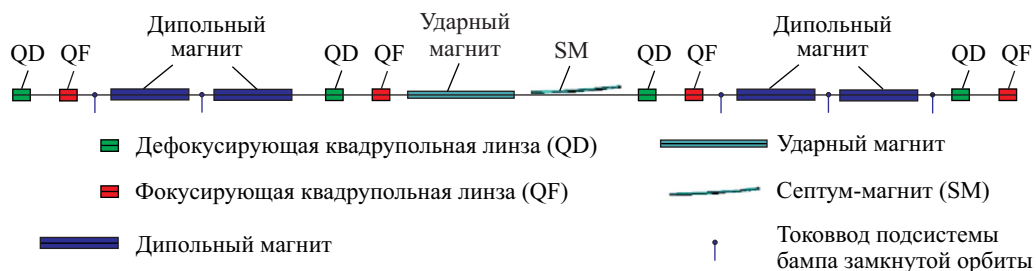


Рис. 6 (цветной в электронной версии). Размещение элементов системы быстрого вывода пучка из бустера

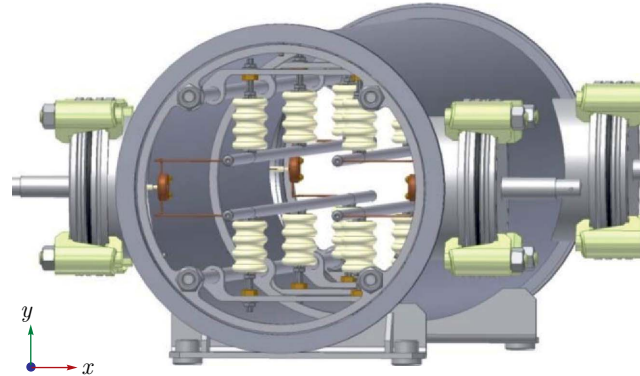


Рис. 7. Ударный магнит (трехмерная модель)

Быстрый вывод ионов из бустера осуществляется в два этапа. На первом этапе циркулирующий пучок подводится к ножу септум-магнита. На втором этапе осуществляется собственно вывод ионов из бустера.

Подсистема бампа замкнутой орбиты состоит из четырех структурных дипольных магнитов с пятью дополнительными высокотемпературными сверхпроводящими тоководами. Тоководы подсистемы бампа замкнутой орбиты устанавливаются в смежных с дипольными магнитами коротких прямолинейных участках. Максимальные токодобавка/токоотбор составляют 400 А.

Режим работы подсистемы бампа замкнутой орбиты циклический. Смещение замкнутой орбиты к ножу септум-магнита начинается до выхода ведущего магнитного поля бустера на стол вывода пучка. На столе рабочего цикла бустера поддерживаются постоянные токи в тоководах подсистемы бампа. Источники питания подсистемы бампа замкнутой орбиты располагаются в непосредственной близости от тоководов снаружи ядра синхрофазотрона. Длительность активной фазы цикла работы источников — до 1,5 с. Неоднородность тока на плато цикла не превышает $\pm 1\%$.

Ударный магнит (рис. 7) представляет собой две пары проводников, устанавливаемых внутри вакуумного бокса параллельно оси движения пучка [4]. Ударный магнит разбит на два модуля. Полная длина — 3 м. Максимальное магнитное поле — 0,13 Тл, соответствующий ток в проводниках ударного магнита — 15 кА.

Источники питания модулей ударного магнита, установленные на передвижные стойки, размещаются в непосредственной близости от модулей. Источники питания импульсные, частота повторения импульсов — 0,25 Гц. Длительность импульса тока — порядка 10 мкс, при этом длительность переднего фронта импульса — не более 200 нс, а длительность плато импульса — не менее 500 нс. Неоднородность тока на плато импульса не превышает $\pm 2\%$.

Септумный магнит (рис. 8) представляет собой токовую полосковую линию, имеющую две проводящие пластины с медным экраном. На входе септума пластины соединены друг с другом проводящими полосками, внутренняя (ближняя к оси третьего прямолинейного промежутка бустера) пластина касается медного экрана. Электрический потенциал подается на внешнюю пластину на выходе септум-магнита, медный экран и внутренняя пластина на выходе септум-магнита заземляются. Ток проходит по внешней пластине,

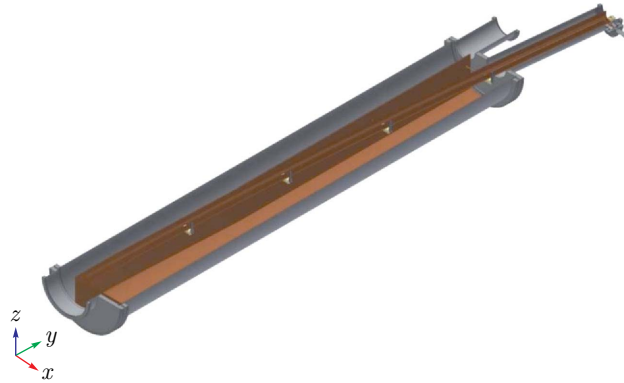


Рис. 8. Септумный магнит (трехмерная модель в разрезе)

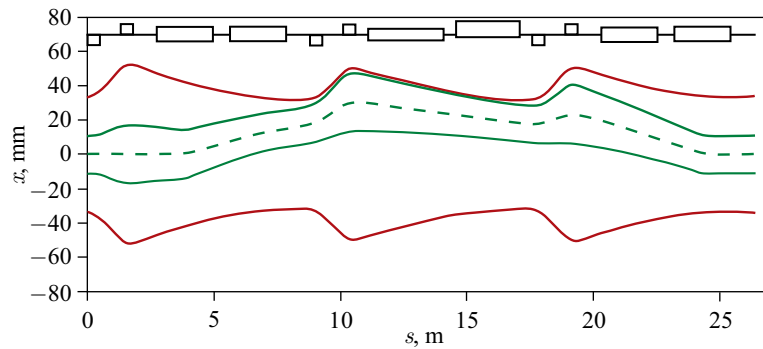


Рис. 9. Замкнутая орбита и огибающие циркулирующего пучка по окончании его подводки к ножу септум-магнита

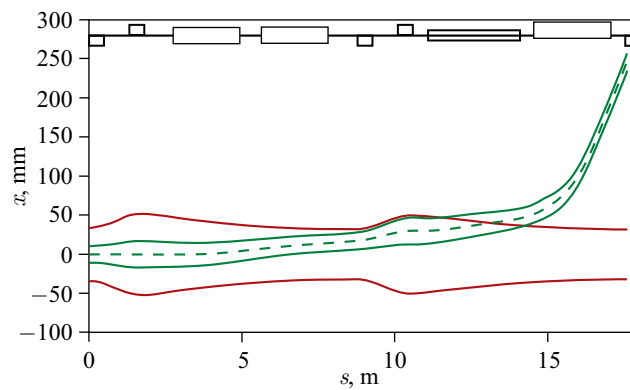


Рис. 10. Траектория и огибающие пучка, выводимого из бустера

затем растекается по внутренней пластине и медному экрану, формируя требуемое распределение магнитного поля в зазоре между пластинами септум-магнита. Длина септум-магнита — 2,5 м. Толщина ножа септума составляет 4 мм. Максимальное магнитное поле — 1 Тл, соответствующий ток в пластинах — 80 кА.

Источник питания септум-магнита размещается на огороженной площадке вблизи ярма синхрофазотрона с внутренней стороны третьего прямолинейного промежутка бустера. Источник питания импульсный, частота повторения импульсов — 0,25 Гц. Импульс тока имеет форму, близкую к полусинусоиде, длительность импульса — около 10 мкс. Неоднородность тока на вершине импульса в течение вывода пучка не превышает $\pm 2\%$.

На рис. 9, 10 приведены результаты моделирования динамики пучка в процессе быстрого вывода из бустера.

2.2. Канал транспортировки пучка бустер–нуклотрон. Канал транспортировки бустер–нуклотрон (рис. 11) располагается в корпусе №1 ЛФВЭ ОИЯИ и проходит сквозь ярмо магнита синхрофазотрона. Канал состоит из основного тракта перевода ионов в нуклотрон и ответвления для сброса нецелевой зарядности. Канал имеет сложную трехмерную геометрию, в значительной степени определяемую взаимным расположением бустера и нуклотрона. Поскольку синхротроны имеют различные радиусы и их медианные плоскости разнесены по вертикали на 3,7 м, транспортировка пучка в канале производится по горизонтали и вертикали одновременно. Большинство магнитных элементов канала устанавливается в наклонном положении, так что поворот/фокусировка пучка осуществляются под углом к горизонтальной и вертикальной плоскостям. Суммарная длина канала составляет 23,1 м. Азимутальный размер канала приблизительно составляет 45° , что соответствует инжекции пучка через один октант нуклотрона от точки вывода из бустера.

ИОС канала транспортировки состоит из четырех дипольных магнитов, шести квадрупольных линз, магнита Ламбертсона, системы двойных дипольных корректоров и станции обдирки. Минимизация роста поперечных эмиттансов при переводе ионов и управление эмиттансами осуществляется квадрупольными линзами канала. Сепарация нецелевых зарядностей, получаемых после обдирки ионов до максимального зарядового состояния, проводится элементами участка сепарации: дипольным магнитом ВМ1, квадрупольными линзами Q3–Q4 и магнитом Ламбертсона LM. Магнит Ламбертсона LM служит для перевода не полностью ободранных (водородоподобных) ионов в ответвление для сброса пучка, оканчивающееся поглотителем ионов. Геометрия канала позволяет использовать фундамент корпуса №1 в качестве естественного поглотителя.

Магнитная структура, горизонтальная проекция и вертикальный профиль канала представлены на рис. 12–14.

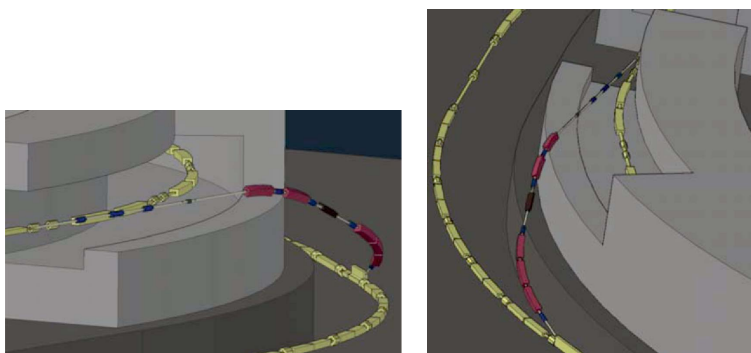


Рис. 11. Трехмерная модель канала транспортировки бустер–нуклотрон

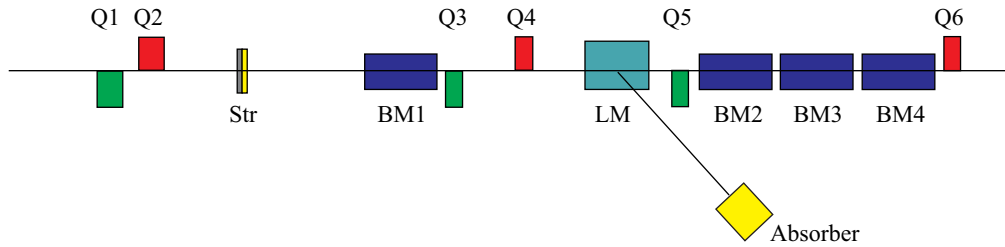


Рис. 12. Магнитная структура канала транспортировки бустер-нуклотрон. BM1–BM4 — дипольные магниты; Q1–Q6 — квадрупольные линзы; LM — магнит Ламбертсона; Str — станция обдирки; Absorber — поглотитель ионов нецелевой зарядности

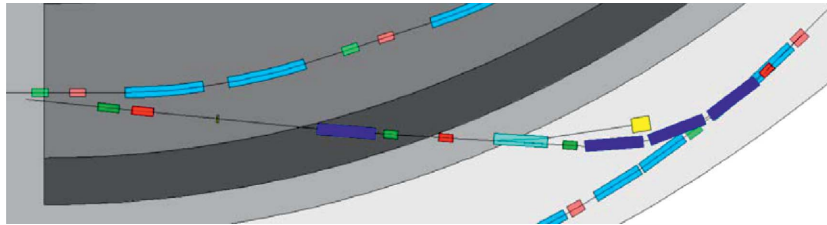


Рис. 13. Горизонтальная проекция канала транспортировки бустер-нуклотрон

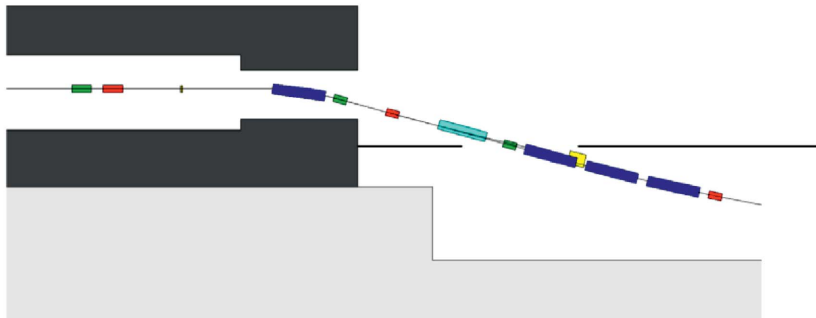


Рис. 14. Вертикальный профиль канала транспортировки бустер-нуклотрон

Перевод пучка из бустера в нуклотрон сопровождается ростом продольного и поперечных эмиттансов. Имеется три источника этого роста.

Первый источник роста эмиттансов — это обдирка ионов и сопутствующие ей многократное кулоновское рассеяние и ионизационные энергетические потери. Рассеяние ионов пучка на малые углы вследствие упругих столкновений с атомами обдирочной мишени приводит к нагреву пучка по продольному и поперечным направлениям. Процесс неупругих столкновений, связанный с ионизацией ионов пучка, а также возбуждением и ионизацией атомов мишени, ведет к росту продольного импульсного разброса пучка; при ненулевых дисперсиях пучка на обдирочной мишени наблюдается также рост поперечных эмиттансов.

Второй источник роста эмиттансов — это связь движений в магнитных элементах канала. Данный процесс ведет к появлению корреляции фазового распределения ионов

между горизонтальным и вертикальным направлениями и изменениям проекций пучка на соответствующие фазовые плоскости, т. е. изменениям горизонтального/вертикального эмиттансов.

Третий источник роста эмиттансов — это несогласование пучка на выходе канала со структурными функциями нуклотрона. В силу большого числа параметров пучка, требующих согласования (бетатронные и дисперсионные функции, коэффициенты корреляции), ограниченным набором элементов ИОС канала полного согласования пучка достичь не удастся. Таким образом, после инжекции несогласованного пучка в нуклотрон имеет место рост эффективных поперечных эмиттансов пучка вследствие филаментации фазового распределения. Несмотря на то, что рост эмиттансов в данном случае происходит в принимающем ускорителе, этот эффект следует относить к эффектам оптики ионного пучка при транспортировке в канале, так как ИОС канала отвечает за согласование пучка с нуклотроном.

С учетом вышеуказанных особенностей транспортировки пучка сформулирована задача оптимизации параметров ИОС канала. Задача оптимизации заключается в нахождении таких характеристик обдирочной мишени и градиентов квадрупольных линз, которые удовлетворяют следующим критериям:

- 1) максимальность эффективности обдирки ионов;
- 2) минимальность роста продольного эмиттанса пучка;
- 3) минимальность ухудшения поперечных эмиттансов пучка;
- 4) управление поперечными эмиттансами пучка;
- 5) полное отделение водородоподобных ионов от пучка голых ядер;
- 6) минимальность поперечных размеров пучка вдоль траектории в канале.

Критерий максимальной эффективности обдирки ионов заключается в максимизации доли полностью обдиранных ядер на выходе обдирочной мишени. Выполнение критериев максимальной эффективности обдирки и минимальности роста продольного эмиттанса обеспечивается выбором материала и толщины обдирочной мишени.

Критерий минимальности ухудшения поперечных эмиттансов может быть выражен в различных формах: минимальность конечных значений эмиттансов; минимальность роста эмиттансов (отношений начальных и конечных значений); минимальность коэффициентов заполнения аксептанса нуклотрона (отношений конечных эмиттансов к соответствующим аксептансам). В общем виде этот критерий является комбинацией приведенных форм. Под конечным эмиттансом понимается эффективный эмиттанс пучка после филаментации фазового распределения ионов в нуклотроне.

Критерий управления поперечными эмиттансами имеет следующие формы: равенство конечных горизонтального и вертикального эмиттансов (критерий круглого пучка); равенство отношения конечных горизонтального и вертикального эмиттансов заданному значению; равенство конечных горизонтального и вертикального эмиттансов заданным значениям. В зависимости от выбранной стратегии формирования эмиттанса пучка в инжекционной цепочке и в самом коллайдере NICA при оптимизации параметров ИОС может использоваться та или иная форма этого критерия. Выполнение критериев минимальности ухудшения поперечных эмиттансов и управление ими обеспечивается выбором обдирочной мишени и настройкой квадрупольных линз канала.

Критерий полного отделения водородоподобных ионов от пучка голых ядер заключается в максимизации расстояния между центрами масс пучков голых ядер и соседней зарядности на входе магнита Ламбертсона. Минимальное требуемое расстояние равно

полному размеру пучка с добавлением толщины ножа магнита Ламбертсона. Выполнение данного критерия обеспечивается выбором обдирочной мишени и настройкой квадрупольных линз начальной части канала до входа магнита Ламбертсона.

Задача оптимизации параметров ИОС решается для всего множества возможных начальных параметров пучка: продольного импульсного разброса и поперечных эмиттансов. В общем случае для каждого набора начальных параметров пучка, или режима работы бустера, может быть найден глобальный оптимум (множество оптимумов) параметров ИОС. Более практичным подходом является использование для нескольких режимов работы бустера одних и тех же параметров ИОС, не принадлежащих соответствующим множествам глобальных оптимумов, а находящихся вблизи них и удовлетворяющих заданным критериям квазиоптимальности решения.

Проведена серия оптимизационных расчетов, включающая моделирование обдирки ионов. Начальные параметры пучка брались по всем диапазонам значений, приведенным в табл. 2.

Моделирование обдирки ионов показывает, что для ионов золота Au^{31+} при энергии 578 МэВ/нуклон эффективность обдирки оценивается величиной около 90 % и ионы нецелевых зарядностей после обдирки будут составлять до 10 % пучка, при этом подавляющее большинство будет водородоподобных ионов Au^{78+} .

Моделирование динамики ионов на участке сепарации зарядностей для различных режимов работы бустера показывает, что расстояния между траекториями движения пучков Au^{79+} и Au^{78+} на входе магнита Ламбертсона могут значительно отличаться и области между пучками не имеют пересечений. В связи с этим магнит Ламбертсона устанавливается так, что нож магнита размещается за максимально возможной огибающей пучка целевой зарядности, а траектория пучка в случае необходимости смещается с помощью дипольных корректоров к ножу для обеспечения вывода ионов Au^{78+} в ответвление канала для их транспортировки к поглотителю.

Подробнее результаты моделирования динамики ионов при переводе пучка в нуклотрон для одного из ранее рассмотренных вариантов магнитной структуры канала приведены в работе [5].

2.3. Система инжекции пучка из бустера в нуклотрон. Основными элементами системы инжекции пучка являются септумный магнит и ударный магнит. Элементы системы размещаются в шестом прямолинейном промежутке внутри криостата нуклотрона (рис. 15).

Септумный и ударный магниты системы инжекции аналогичны соответствующим магнитам системы быстрого вывода пучка из бустера.

Длина септум-магнита — 2 м. Толщина ножа септума составляет 4 мм. Максимальное магнитное поле — 0,625 Тл, соответствующий ток в пластинах — 50 кА.

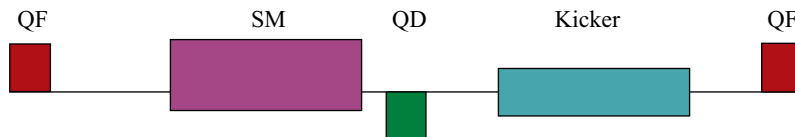


Рис. 15. Размещение элементов системы инжекции пучка из бустера в нуклотрон. QF, QD — фокусирующие и дефокусирующие квадрупольные линзы нуклотрона; SM — септум-магнит; Kicker — ударный магнит

Длина ударного магнита — 2 м. Максимальное магнитное поле — 0,1 Тл, соответствующий ток в проводниках ударного магнита — 12 кА.

Инжекция пучка в нуклотрон осуществляется по вертикали. Угол отклонения пучка септум-магнитом составляет 125 мрад, ударным магнитом — 20 мрад.

3. ПЕРЕВОД ПУЧКА ИЗ НУКЛОТРОНА В КОЛЛАЙДЕР

Системы перевода пучка из нуклотрона в коллайдер включают в себя систему быстрого (однооборотного) вывода пучка из нуклотрона, канал транспортировки пучка нуклотрон–коллайдер и систему инжекции пучка в коллайдер. В процессе перевода производится согласование поперечного фазового портрета ионов с акцептансом коллайдера. Согласование пучка осуществляется по всем структурным функциям, за исключением вертикальной дисперсии и ее производной, которые зануляются.

Таблица 3. Основные параметры пучка в канале транспортировки нуклотрон–коллайдер

Ионы	Au ⁷⁹⁺
Интенсивность	$1 \cdot 10^9$
Энергия ионов, ГэВ/нуклон	1–4,5
Магнитная жесткость ионов, Тл · м	14–45
Эффективность перевода, %	95
Горизонтальный/вертикальный 95 %-й эмиттанс, π мм · мрад	$< 3 / < 1,5$

3.1. Система быстрого вывода пучка из нуклотрона. Основными элементами системы быстрого вывода пучка являются ударный магнит и магнит Ламбертсона. Элементы системы размещаются в четвертом прямолинейном промежутке внутри криостата нуклотрона (рис. 16).

Быстрый вывод ионов из нуклотрона осуществляется в два этапа. На первом этапе циркулирующий пучок подводится к ножу магнита Ламбертсона. На втором этапе осуществляется собственно вертикальный вывод ионов из нуклотрона.

Подводка циркулирующего пучка к септуму магнита Ламбертсона производится на столе рабочего цикла нуклотрона. Смещение пучка на внешнюю орбиту осуществляется либо плавным уменьшением уровня ведущего магнитного поля, либо плавным увеличением частоты ВЧ-поля. После получения требуемого смещения замкнутой орбиты значения ведущего и ВЧ-полей поддерживаются на постоянном уровне.

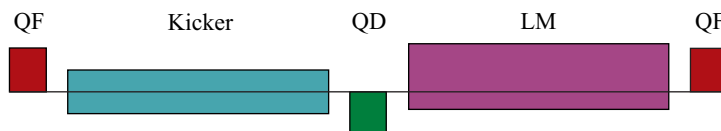


Рис. 16. Размещение элементов системы быстрого вывода пучка из нуклотрона. QF, QD — фокусирующие и дефокусирующие квадрупольные линзы нуклотрона; Kicker — ударный магнит; LM — двухсекционный магнит Ламбертсона

Ударный магнит системы быстрого вывода пучка из нуклотрона аналогичен вышеописанному четырехстержневому ударному магниту. Ударный магнит разбит на два криостатных модуля. Полная длина — 3 м. Максимальное магнитное поле — 0,13 Тл, соответствующий ток в проводниках — 15 кА.

Источники питания модулей ударного магнита размещаются внутри подставок под модули. Источники питания импульсные, частота повторения импульсов — 0,25 Гц. Длительность импульса тока — порядка 10 мкс, при этом длительность переднего фронта импульса — не более 200 нс, а длительность плато импульса — не менее 200 нс. Неоднородность тока на плато импульса не превышает $\pm 2\%$.

Магнит Ламбертсона системы быстрого вывода пучка аналогичен магниту Ламбертсона системы медленного вывода пучка из нуклотрона [6]. Магнит Ламбертсона системы быстрого вывода состоит из двух секций. Каждая секция магнита Ламбертсона устанавливается внутри отдельного криостатного модуля. Секции магнита имеют длины 0,5 и 2,5 м. Толщина септума: 5 мм в секции №1 и 10 мм в секции №2. Максимальные магнитные поля в секциях магнита: 1 Тл в секции №1 и 1,6 Тл в секции №2.

Режим работы магнита Ламбертсона циклический. Секции магнита подключаются последовательно в цепь электропитания структурных элементов нуклотрона, и цикл магнита Ламбертсона совпадает с циклом ведущего магнитного поля. Ток в обмотках магнита Ламбертсона — до 6 кА.

Ниже приведены результаты моделирования быстрого вывода пучка из нуклотрона.

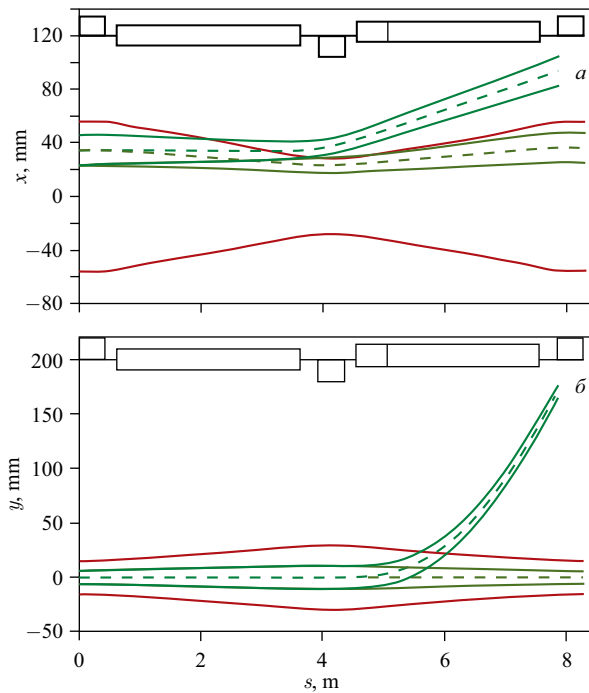


Рис. 17. Горизонтальные (а) и вертикальные (б) проекции замкнутой орбиты после смещения к септуму магнита Ламбертсона, траектории вывода огибающих циркулирующего и выводимого пучков

3.2. Канал транспортировки пучка нуклотрон–коллайдер. Канал транспортировки нуклотрон–коллайдер располагается как в существующих, так и во вновь возводимых зданиях ЛФВЭ. Канал выходит из туннеля нуклотрона (цокольного этажа корпуса 1), проходит пристройку к корпусу 1 и через помещение КТП (канала транспортировки пучка) входит в туннель коллайдера (полукольцо Е возводимого здания 17).

Канал разбит на следующие участки: головная часть, общий участок, северная ветвь канала, южная ветвь канала.

Головная часть располагается в корпусе 1 и обеспечивает перевод пучка из туннеля нуклотрона в горизонтальную плоскость на отметке +1,500 м над уровнем чистого пола здания коллайдера. Головная часть включает в себя участок от системы быстрого вывода из нуклотрона до выхода из корпуса 1. Представляет собой пучковую камеру с минимальным набором структурных элементов.

Общий участок располагается за головной частью и заканчивается секцией разветвления. Участок обеспечивает транспортировку пучка в горизонтальной плоскости на отметке + 1,500 м в пристройке корпуса 1. Секция разветвления содержит переключающий дипольный магнит, служащий для перевода пучка в ту или иную ветвь канала.

Южная (S) и северная (N) ветви канала состоят из горизонтальных арок, прямолинейных секций, согласующих секций вертикального переноса и секций инжекции. Большая горизонтальная арка S-ветви обеспечивает поворот пучка в горизонтальной плоскости на угол $24,2^\circ$, большая горизонтальная арка N-ветви — поворот пучка на угол $42,2^\circ$. Малая горизонтальная арка S-ветви обеспечивает поворот пучка на угол $1,2^\circ$ и включает в себя 1 дипольный магнит. Малая горизонтальная арка N-ветви обеспечивает поворот пучка на угол $6,7^\circ$. Большая и малая прямолинейные секции S-ветви имеют длины 97,2 м и 31,8 м соответственно. N-ветвь имеет только одну (большую) прямолинейную секцию длиной 99,6 м. Согласующие секции вертикального переноса располагаются в больших прямоли-

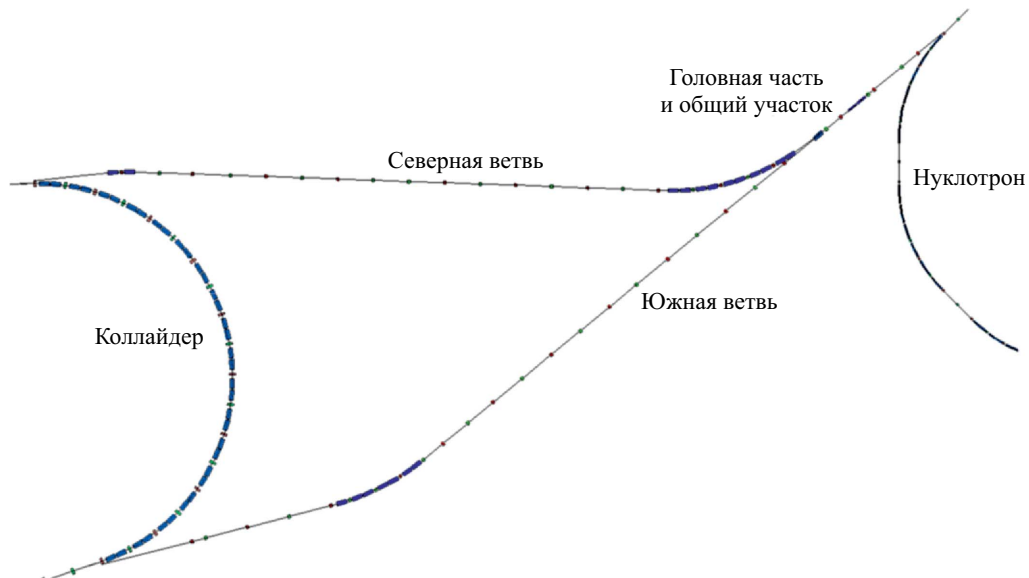


Рис. 18. Горизонтальная проекция канала транспортировки нуклотрон–коллайдер

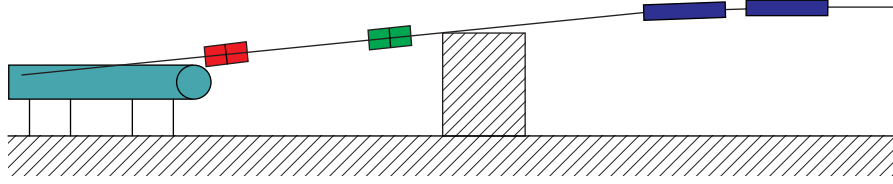


Рис. 19. Головная часть канала транспортировки нуклотрон-коллайдер

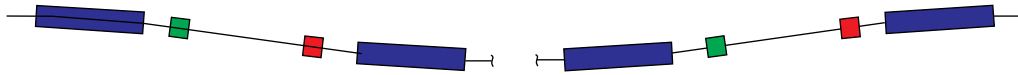


Рис. 20. Пара согласующих секций вертикального переноса

нейных секциях ветвей канала. Две согласующие секции вертикального переноса S-ветви в два этапа выводят пучок на уровень верхнего кольца коллайдера. Транспортировка пучка в большой прямолинейной секции S-ветви производится на отметках + 1,500 м, + 0,500 м и + 1,660 м над уровнем чистого пола здания 17. Две согласующие секции вертикального переноса N-ветви в два этапа выводят пучок на уровень нижнего кольца коллайдера. Транспортировка пучка в большой прямолинейной секции N-ветви производится на отметках + 1,500 м, + 0,500 м и + 1,340 м над уровнем чистого пола здания 17. Секции инъекции представляют собой короткие прямолинейные участки в концах ветвей канала непосредственно перед входами пучка в криостат коллайдера.

Длина головной части и общего участка — 27 м. Длина левой ветви — 154 м. Длина правой ветви — 144 м. Полная длина канала — 325 м.

ИОС канала транспортировки состоит из 33 дипольных магнитов, 45 квадрупольных линз и 36 дипольных корректоров. Магнитные элементы канала нормальнопроводящие, разработаны сотрудниками ИЯФ им. Г. И. Будкера (Новосибирск).

Дипольные магниты имеют эффективную длину 2 м. Зазор между полюсами магнитов — 100 мм. Максимальное магнитное поле — 1,5 Тл. Соответствующий максимальный ток в обмотках — 5 кА.

Квадрупольные линзы имеют эффективную длину 0,5 м. Диаметр вписанной в полюса окружности — 100 мм. Максимальный градиент магнитного поля — 20 Тл/м, соответствующий максимальный ток в обмотках — 2,6 кА.

Дипольные корректоры имеют длину 0,39 м. Магнитный зазор — 100 мм. Максимальное магнитное поле — 0,154 Тл. Соответствующий максимальный ток в обмотках — 125 А.

Магнитные элементы канала работают в импульсном режиме. Максимальная частота повторения импульсов зависит от места положения элемента в канале: 0,25 Гц в головной части и на общем участке, за исключением переключающего магнита секции разветвления; 0,125 Гц в остальной части канала.

Источники питания магнитных элементов размещаются в шкафах в следующих помещениях: 1) в пристройке к корпусу 1, на участке, отгороженном от трассы канала; 2) на втором этаже здания 17, в помещениях импульсных источников питания. Источники питания генерируют импульсы тока, имеющие форму полусинусоиды. Длительности импульсов: 46,2 мс для дипольного магнита; 10 мс для квадрупольной линзы; 5 мс для

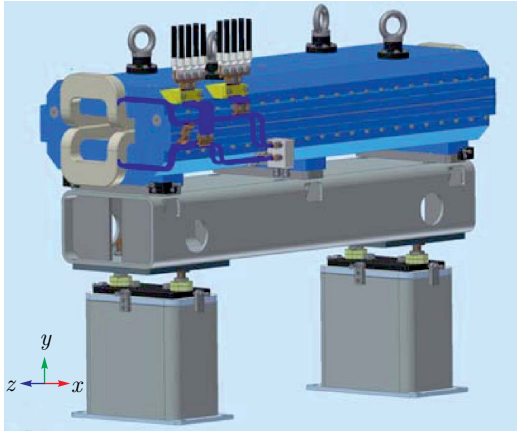


Рис. 21. Дипольный магнит на подставке (трехмерная модель)

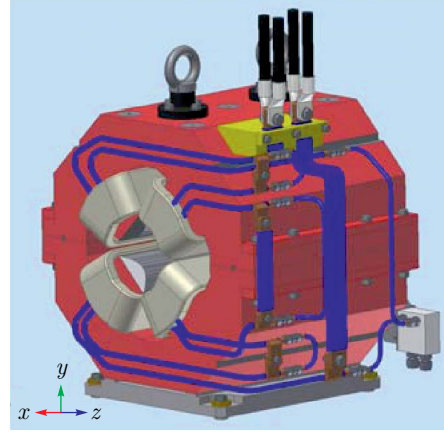


Рис. 22. Квадрупольная линза (трехмерная модель)

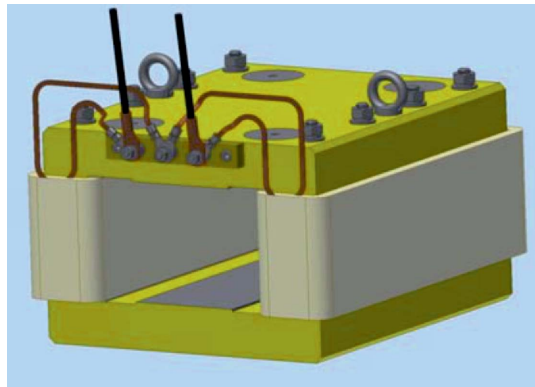


Рис. 23. Дипольный корректор (трехмерная модель)

дипольного корректора. Амплитуды тока для дипольного магнита, квадрупольной линзы и дипольного корректора 5 кА, 2,6 кА и 125 А соответственно.

Моделирование динамики ионного пучка в канале транспортировки показывает, что наиболее сложной проблемой канала с точки зрения ионной оптики является согласование вертикальной дисперсии пучка с коллайдером. Следует отметить, что в данном случае точное согласование вертикальной дисперсии практически эквивалентно ее полному подавлению (занулению), так как, несмотря на то, что в кольцах коллайдера вертикальная дисперсия подавляется не полностью, ее значение в точках инжекции пренебрежимо мало (около 3 см).

Наилучшим решением проблемы подавления вертикальной дисперсии в канале является ахроматический перевод пучка из туннеля нуклотрона в плоскости колец коллайдера, выполняемый полностью в головной части канала. Но данное решение, по ряду причин, не удастся использовать в канале нуклотрон–коллайдер. Реализуемым решением являются ионно-оптические секции с вертикальными дипольными магнитами (согласую-

щие секции вертикального переноса), размещаемые далее в ветвях канала. Наиболее подходящим местом являются большие прямолинейные секции северной и южной ветвей.

Наиболее гибким вариантом представляется подавление вертикальной дисперсии в каждой ветви с помощью двух согласующих секций вертикального переноса, представляющих собой пары вертикальных дипольных магнитов с дублетами квадрупольных линз. Подавление вертикальной дисперсии достигается путем подбора набега фазы вертикальных бетатронных колебаний на участке между согласующими секциями.

По результатам моделирования динамики ионов выработана следующая концепция настройки ИОС канала:

- квадрупольные линзы головной части канала настраиваются так, что минимизируется вертикальный дисперсионный инвариант пучка ($I_{D_y} = \gamma_y D_y^2 + 2\alpha_y D_y D'_y + \beta_y D'^2_y$, где $\beta_y, \alpha_y, \gamma_y$ — вертикальные параметры Твисса, D_y, D'_y — вертикальная дисперсия и ее производная);
- квадрупольные линзы больших прямолинейных секций ветвей настраиваются на согласование параметров Твисса и подбор набега фазы горизонтальных бетатронных колебаний;
- квадрупольные линзы согласующих секций вертикального переноса и прямолинейных участков между ними настраиваются на подбор набега фазы вертикальных бетатронных колебаний;
- квадрупольные линзы малой прямолинейной секции, большой и малой арок южной ветви канала настраиваются на согласование горизонтального дисперсионного инварианта пучка ($I_{D_x} = \gamma_x D_x^2 + 2\alpha_x D_x D'_x + \beta_x D'^2_x$, где $\beta_x, \alpha_x, \gamma_x$ — горизонтальные параметры Твисса, D_x, D'_x — горизонтальная дисперсия и ее производная) между нуклотроном и верхним кольцом коллайдера;
- квадрупольные линзы большой арки северной ветви канала настраиваются на согласование горизонтального дисперсионного инварианта пучка между нуклотроном и малой аркой этой ветви;
- квадрупольные линзы малой арки северной ветви канала настраиваются на минимизацию горизонтального дисперсионного инварианта пучка.

3.3. Система инжекции пучка в коллайдер. Основными элементами системы инжекции пучка являются септум-магниты и ударные магниты, состоящие из модулей двух типов: основных и корректирующих. Элементы системы размещаются внутри криостата в прямолинейных промежутках, расположенных в арке коллайдера (рис. 24).

Септумные и ударные магниты системы инжекции аналогичны вышеописанным импульсным устройствам.

Септум-магниты имеют длину 1,5 м. Толщина ножа составляет 4 мм. Зазор между пластинами септум-магнитов — 20 мм. Максимальное магнитное поле — 1 Тл, соответствующий ток в пластинах — 80 кА.

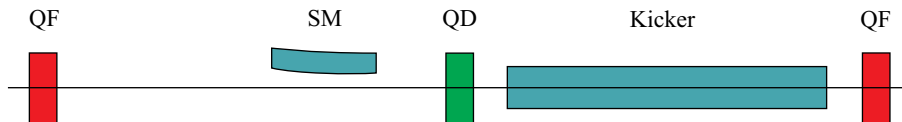


Рис. 24. Размещение элементов системы инжекции пучка в коллайдер. QF, QD — фокусирующие и дефокусирующие квадрупольные линзы коллайдера; SM — септум-магнит; Kicker — ударный магнит

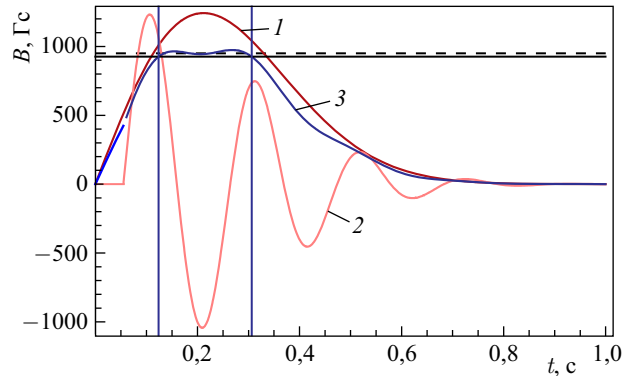


Рис. 25 (цветной в электронной версии). Временная диаграмма магнитных полей в модулях ударного магнита. Красный (1) — магнитное поле в основном модуле; розовый (2) — магнитное поле в корректирующем модуле; синий (3) — среднее магнитное поле в ударном магните

Источники питания септум-магнитов размещаются в смежных с туннелем коллайдера помещениях. Источники питания импульсные, частота повторения импульсов — 0,125 Гц, что соответствует поочередной инжекции ионов в кольца коллайдера. Импульс тока имеет форму, близкую к полусинусоиде, длительность импульса — около 10 мкс. Неоднородность тока на вершине импульса в течение вывода пучка не превышает $\pm 2\%$.

Ударные магниты состояются из трех криостатных модулей каждый: двух основных и одного корректирующего. Полная длина ударного магнита — 4,5 м. Максимальное магнитное поле — 0,13 Тл, соответствующий ток в проводниках — 15 кА.

Источники питания модулей ударных магнитов, установленные на передвижные стойки, размещаются в непосредственной близости от модулей. Источники питания импульсные, частота повторения импульсов — 0,125 Гц. Основные и корректирующие модули ударных магнитов имеют различные формы импульсов токов. Амплитуды и времена начала импульсов выбираются таким образом, что временная диаграмма интеграла магнитного поля, действующего на проходящие ударный магнит ионы, имеет плато с допустимой неоднородностью (рис. 25). Длительности импульсов в основных и корректирующих модулях — менее 900 нс, при этом эффективная длительность плато составляет 150–200 нс.

Инжекция пучка в коллайдер осуществляется по горизонтали. Угол отклонения пучка септум-магнитом составляет 34 мрад, ударным магнитом — 9,7 мрад.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Разработка проектов представленных систем перевода пучка между ускорителями комплекса NICA находится на стадии завершения. В настоящее время ведутся оптимизация систем и более детальное моделирование динамики пучков для уточнения требуемых характеристик устройств систем перевода, а также работы по техническому проектированию оборудования.

В ходе разработки данных проектов для дальнейшей реализации были выбраны нестандартные и редко встречающиеся устройства, такие как четырехстержневый ударный

магнит и импульсный септум-магнит с электромагнитной экранировкой. К настоящему времени прототипы этих устройств изготовлены и прошли испытания.

Анализ динамики пучков в ускорительном комплексе NICA показывает, что участки перевода играют заметную роль в формировании параметров циркулирующего в коллайдере пучка и все представленные системы перевода пучка удовлетворяют требованиям, налагаемым на них.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Trubnikov G. et al.* NICA Project at JINR // Proc. of IPAC'13, Shanghai, China, 2013. P. 1343–1345.
2. *Волков В. И. и др.* Концептуальный проект системы инжекции пучков тяжелых ионов в бустер ускорительного комплекса NICA // Письма в ЭЧАЯ. 2014. Т. 11, № 5(189). С. 1045–1067.
3. *Буланов В. А. и др.* Концептуальный проект системы питания отклоняющих пластин многовариантной инжекции в бустер ускорительного комплекса NICA // Там же. С. 1074–1078.
4. *Александров В. С. и др.* Выбор системы питания и конструкции выводного ударного магнита бустера NICA // Письма в ЭЧАЯ. 2012. Т. 9, № 4–5(174–175). С. 694–699.
5. *Filatov G. et al.* Transfer Channel from Booster to Nuclotron at the NICA Facility // Proc. of RuPAC 2012, Peterhof, St. Petersburg, Russia, 2012. P. 322–324.
6. *Averichev S. A. et al.* Progress in Manufacturing Main Nuclotron Extraction Elements // Proc. of EPAC'96, Sitges, Barcelona, Spain, 1996. P. 2435–2437.