

Объединённый институт ядерных исследований

ТЕХНИЧЕСКИЙ ПРОЕКТ УСКОРИТЕЛЬНОГО КОМПЛЕКСА NICA

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

ТОМ II

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. Бровко, 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

ГЛАВА 3	БУСТЕР	9
3.1	Магнитная структура Бустера	11
3.1.1	Основные параметры Бустера	11
3.1.2	Основные параметры магнитной структуры Бустера	14
3.2	Магнитная система	17
3.3	Схема питания структурных магнитов и линз Бустера	22
3.3.1	Техническое описание	22
3.3.2	Размещение элементов и узлов системы питания	24
3.3.3	Система детектирования перехода сверхпроводящих обмоток в нормальную фазу	24
3.4	Системы инжекции и вывода пучка	27
3.4.1	Система инжекции пучка	27
3.4.2	Структура системы инжекции	28
3.4.3	Временные характеристики работы системы инжекции	28
3.4.4	Динамика ионов	29
3.4.5	Элементы системы инжекции	31
3.4.6	Система быстрого вывода пучка	32
3.4.7	Структура системы быстрого вывода	33
3.4.8	Временные характеристики работы системы быстрого вывода	34
3.4.9	Динамика ионов	35
3.4.10	Элементы системы быстрого вывода	36
3.5	Вакуумная система Бустера	38
3.5.1	Вакуумные условия	38
3.5.2	Средства откачки вакуума	39
3.5.3	Технические требования на изготовления пучковых камер	42
3.6	ВЧ система	43
3.6.1	Введение	43
3.6.2	Ускоряющий резонатор	44
3.6.3	Усилитель ВЧ мощности	47
3.6.4	Система управления	48
3.6.5	Конструкция станции	50
3.7	Система электронного охлаждения	51
3.7.1	Основные параметры	51
3.7.2	Магнитная система	54
3.7.3	Устройство и принцип действия центрального соленоида (секции охлаждения)	56
3.7.4	Прецизионная система измерения магнитного поля соленоида	59
3.7.5	Коррекция магнитного поля	61
3.7.6	Электростатическая компенсация дрейфа электронов	70
3.7.7	Высоковольтные источники питания	73
3.7.8	Вакуумная система	75
Литература		77
ПРИЛОЖЕНИЕ 1 К ГЛАВЕ 3		79
П.3.1 Система инжекции пучка		81

П.3.1.1 Концепция инжекции пучка в Бустер	81
П.3.1.2 Временные характеристики работы системы инжекции	95
П.3.1.3 Распределения электрических полей	97
П.3.1.4 Динамика ионов	103
П.3.1.5 Электростатический септум	109
П.3.1.6 Электрические импульсные пластины	112
П.3.1.7 Источник питания электростатического септума	116
П.3.1.8 Источники питания электрических импульсных пластин	116
ПРИЛОЖЕНИЕ 2 К ГЛАВЕ 3.....	119
П.3.2 Система быстрого вывода пучка	121
П.3.2.1 Динамика ионов	121
П.3.2.2 Ударный магнит	123
П.3.2.3 Септумный магнит	126
П.3.2.4 Источники питания подсистемы бампа замкнутой орбиты	131
П.3.2.5 Источники питания ударного магнита	132
П.3.2.6 Источник питания импульсного септумного магнита	132
ПРИЛОЖЕНИЕ 3 К ГЛАВЕ 3.....	135
П.3.3 Инжекция с электронным охлаждением	137
П.3.3.1 Введение.....	137
П.3.3.2 Схема однооборотной инжекции со стекированием ионного пучка	138
П.3.3.3 Неустойчивость ионного пучка, выбор рабочей точки.....	144
П.3.3.3 Литература.....	146
ПРИЛОЖЕНИЕ 4 К ГЛАВЕ 3.....	149
П.3.4 Коллимация перезаряженных ионов в Бустере	151
П.3.4.1 Конструкция поглощающих коллиматоров	151
П.3.4.2 Моделирование коллимации	151
ПРИЛОЖЕНИЕ 5 К ГЛАВЕ 3.....	155
П.3.5 Режим ускорения.....	157
П.3.5.1 Введение.....	157
П.3.5.2 Зависимости основных параметров ВЧ системы Бустера в течение ускорительного цикла	158
П.3.5.3 I этап ускорительного цикла	159
П.3.5.4 Адиабатический захват частиц в продольный акцептанс ускорителя	160
П.3.5.5 Ускорение частиц до промежуточной энергии	162
П.3.5.6 II этап ускорительного цикла	163
ГЛАВА 4 КАНАЛ ТРАНСПОРТИРОВКИ БУСТЕР — НУКЛОТРОН.....	167
4.1 Назначение	169
4.2 Структура канала	169
4.3 Динамика ионов.....	173
4.3.1 Рост эмиттансов пучка	173
4.3.2 Оптимизация параметров ионно-оптической системы.....	174
4.3.3 Моделирование	176
4.4 Магнитная система.....	178
4.5 Система питания магнитных элементов	180

4.6	Станция обдирки	180
4.7	Вакуумная система	181
4.8	Система криостатирования	182
ГЛАВА 5 НУКЛОТРОН		185
Аннотация		187
5.1	Основные параметры.....	187
5.1.1	Ускорительный комплекс Нуклотрона	187
5.1.2	Магнитно-криостатная система Нуклотрона	188
5.1.3	Оптическая структура, динамика пучка, система коррекции	192
5.1.4	Проект Нуклотрон-М.....	196
5.2	Магнитная система.....	199
5.3	Системы питания, защиты и эвакуации энергии	203
5.3.1	Техническое описание системы электропитания	203
5.3.2	Система эвакуации энергии	204
5.3.3	Управление системой питания	208
5.3.4	Размещение элементов и узлов системы питания	214
5.3.5	Источники питания корректоров магнитного поля	214
5.3.6	Системы детектирования активной фазы СП элементов.....	217
5.4	Системы инжекции, медленного и быстрого вывода пучка.....	219
5.4.1	Система инжекции пучка из Бустера	219
5.4.2	Система быстрого вывода пучка	223
5.5	Вакуумная система.....	226
5.6	Высокочастотная ускоряющая система Нуклотрона	228
5.6.1	Основные элементы ВЧ системы	228
5.6.2	Продольная динамика пучка в Нуклотроне.....	231
5.7	Устройства управления спином	232
5.7.1	Динамика спинов протонов в Нуклотроне с соленоидальной змейкой	232
5.7.2	Влияние сибирской змейки на орбитальные характеристики Нуклотрона	234
Литература		236
ПРИЛОЖЕНИЕ 1 К ГЛАВЕ 5.....		237
П.5.1 Ударные магниты		239
ПРИЛОЖЕНИЕ 2 К ГЛАВЕ 5.....		241
П.5.2 Магнит Ламбертсона системы инжекции пучка из Бустера		243
ПРИЛОЖЕНИЕ 3 К ГЛАВЕ 5.....		247
П.5.3 Магнит Ламбертсона системы быстрого вывода		249

Глава 3

Бустер

3.1 МАГНИТНАЯ СТРУКТУРА БУСТЕРА

3.1.1 Основные параметры Бустера

Основными задачами Бустера — промежуточного синхротрона тяжелых ионов являются: накопление $2 \cdot 10^9$ ионов золота $^{197}\text{Au}^{31+}$ и ускорение их до энергии 578 МэВ/н, которой достаточно для последующей обдирки их до состояния $^{197}\text{Au}^{79+}$.

Это позволяет существенно снизить требования к давлению остаточного газа в Нуклотроне из-за уменьшения вероятности перезарядки ионов. При этом конечная энергия ядер золота в Нуклотроне составляет 4,5 ГэВ/н. Применение электронного охлаждения в Бустере на энергии ионов 65 МэВ/н приведёт к уменьшению продольного эмиттанса пучка до величины, требуемой для сжатия сгустка по завершении его ускорения в Бустере.

Были рассмотрены возможности использования двух типов магнитов — «тёплых» и сверхпроводящих. Показано, что оба типа магнитов удовлетворяют главным требованиям, предъявляемым к параметрам Бустера. Окончательно был выбран вариант со сверхпроводящей магнитной системой, одним из преимуществ которой является возможность использования магнитов, конструкция которых аналогична конструкции магнитов Нуклотрона. Данный тип магнитов выбран также как базовый для сверхпроводящей магнитной системы синхротрона SIS-100 в проекте FAIR (GSI, Германия), что позволяет объединить международные усилия по производству подобных магнитов.

Ниже представлены конфигурация и характеристики принятого к исполнению варианта магнитной структуры кольца Бустера, в котором, по возможности, были учтены все основные особенности данного ускорителя.

Существующее положение Нуклотрона, возможные направления каналов ввода и вывода позволяют разместить Бустер с периметром 210,96 м внутри ярма магнита Синхрофазотрона. В концептуальном проекте были рассмотрены две версии структуры Бустера с периодичностью DFO и FODO. Первый вариант позволяет создать более эффективную систему электронного охлаждения и произвести коллимацию ионов, изменивших свой заряд в процессе ускорения, меньшим числом поглощающих мишеней. По этим причинам для дальнейшей проработки была выбрана структура DFO.

Магнитная система Бустера состоит из четырёх суперпериодов, каждый из которых включает 10 дипольных магнитов, 6 фокусирующих и 6 дефокусирующих линз, мультипольные корректоры для компенсации погрешностей основного поля (диполи, квадруполи), нелинейностей магнитного поля

и коррекции хроматичности (секступоли). Максимальное магнитное поле в диполях составляет 1,8 Тл.

В Бустере возможно реализовать 4 типа инъекции ионов из линейного тяжелоионного ускорителя с энергией 3,2 МэВ/н:

1. однократная однооборотная инъекция;
2. однократная двух- и трехоборотная инъекция;
3. многократная однооборотная инъекция (до трёх последовательных импульсов длительностью менее одного оборота пучка каждый, с интервалом 0,1 с между ними);
4. многократная инъекция с электронным охлаждением.

Все варианты инъекции могут осуществляться с помощью одного инфлекторного устройства и трех пар импульсных пластин, создающих локальное смещение замкнутой орбиты на время инъекции. При этом многократная инъекция с электронным охлаждением в проектной конфигурации оборудования инъекционного комплекса и Бустера поддерживается не в полной мере, и для полноценной реализации требуется модификация некоторых подсистем.

Быстрый (однооборотный) вывод переводит пучок из Бустера в Нуклотрон или, если необходимо, в экспериментальный зал для экспериментов на фиксированной мишени. Система вывода состоит из одного ударного и одного септумного магнитов.

Система медленного вывода в проектной конфигурации оборудования не предусмотрена, и будет введена на дальнейших этапах эксплуатации Бустера.

Характеристики дипольных и квадрупольных магнитов с железным ямом и обмотками из трубчатого сверхпроводника, размещение систем комплекса в существующих зданиях, максимальное использование имеющегося оборудования и экспериментальных залов определили следующие требования к структуре Бустера:

- достижение максимально возможной энергии ускоренных ионов при заданных размерах кольцевого тоннеля внутри железного ярма синхрофазотрона;
- получение интенсивности $2 \cdot 10^9$ ионов $^{197}\text{Au}^{31+}$ в импульсе;
- обеспечение высокой эффективности вывода пучка в широком диапазоне энергий, предельного снижения радиационного фона вокруг ускорителя;

- выбор минимально возможных апертур сверхпроводящих элементов кольца и их поперечных сечений в целях снижения энергопотребления;
- использование в качестве инжектора линейного тяжелоионного ускорителя на энергию 3,2 МэВ/н.

Форма кольцевого тоннеля, образованного магнитопроводом Синхрофазотрона, а также имеющиеся направления ввода и вывода пучка позволяют разместить внутри синхрофазотрона ускоритель с периметром 210,96 м и числом суперпериодов, кратным 4. Схемы расположения Бустера приведены на Рис. 3.1.1 и Рис. 3.1.2.

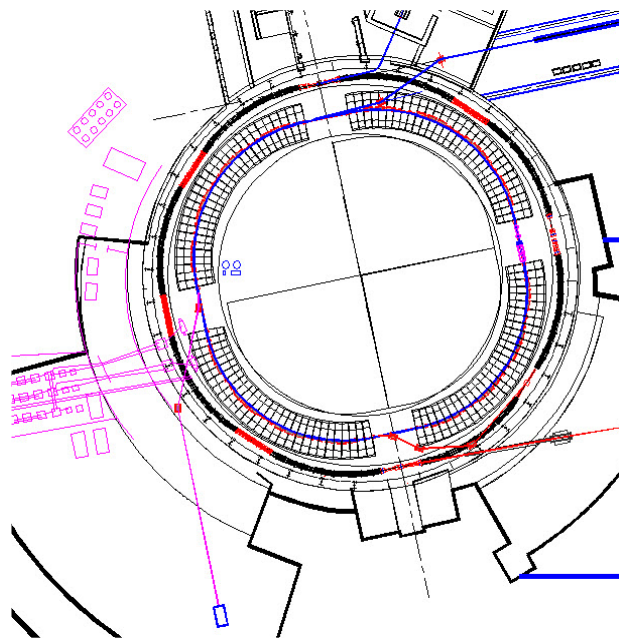


Рис. 3.1.1. Схема расположения Бустера в кольцевом магните Синхрофазотрона

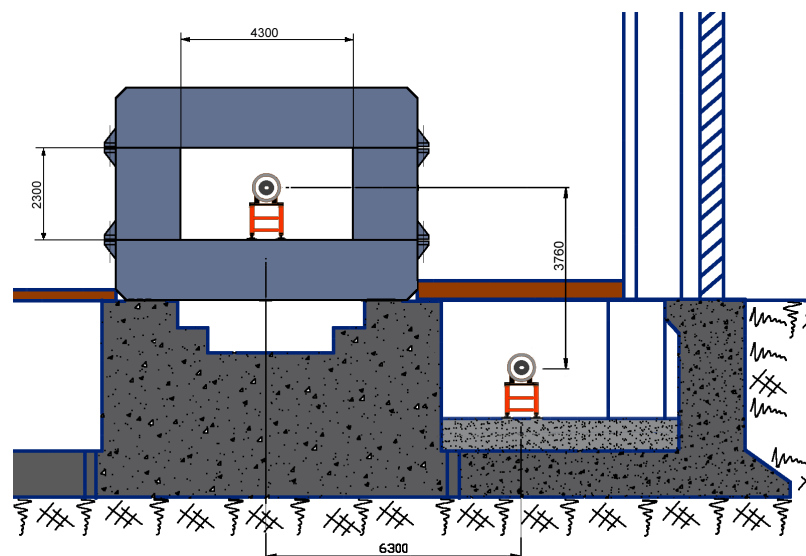


Рис. 3.1.2. Расположение Бустера относительно Нуклотрона

3.1.2 Основные параметры магнитной структуры Бустера

Магнитная структура Бустера состоит из 4-х суперпериодов, в каждый из которых входят 3 регулярных периода и один период, не содержащий дипольных магнитов. Регулярный период включает в себя фокусирующую и дефокусирующую квадрупольные линзы, 2 дипольных магнита и 4 малых свободных промежутка, предназначенных для размещения мультипольных корректоров, коллиматоров и диагностического оборудования. Периоды, не содержащие дипольных магнитов, отличаются наличием неструктурных элементов: систем инжекции и вывода пучка, ускоряющей ВЧ системы, системы электронного охлаждения. Магнитная структура Бустера и схема регулярного периода даны на Рис. 3.1.3 и Рис. 3.1.4.

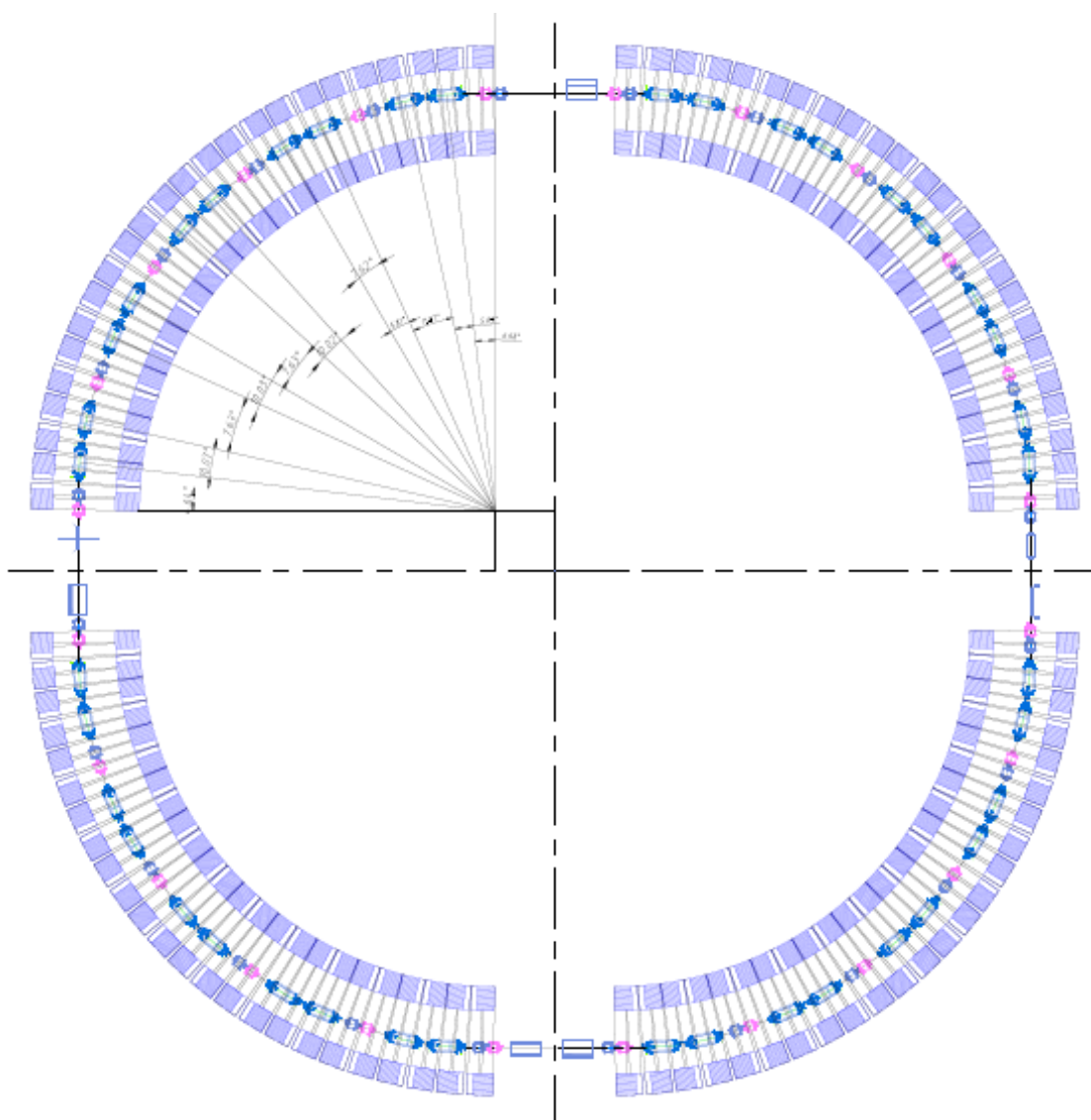


Рис. 3.1.3. Кольцо Бустера в тоннеле Синхрофазотрона

Диаграмма резонансов до 3-го порядка включительно и возможное положение рабочей точки даны на Рис. 3.1.5. Очевидно, что инжекцию и ускорение ионов желательно осуществлять, работая в области $Q_x = 4,8$ и $Q_z = 4,85$.

Динамические характеристики и огибающие на суперпериоде для выбранных частот бетатронных колебаний приведены на Рис. 3.1.6 и Рис. 3.1.7.

Выбор оптимального положения рабочей точки в синхротронах, как правило, продолжается на всех этапах создания и настройки ускорителя и не влияет на разработку отдельных систем, за исключением системы коррекции резонансов. Последняя поэтому должна быть в достаточной степени гибкой.

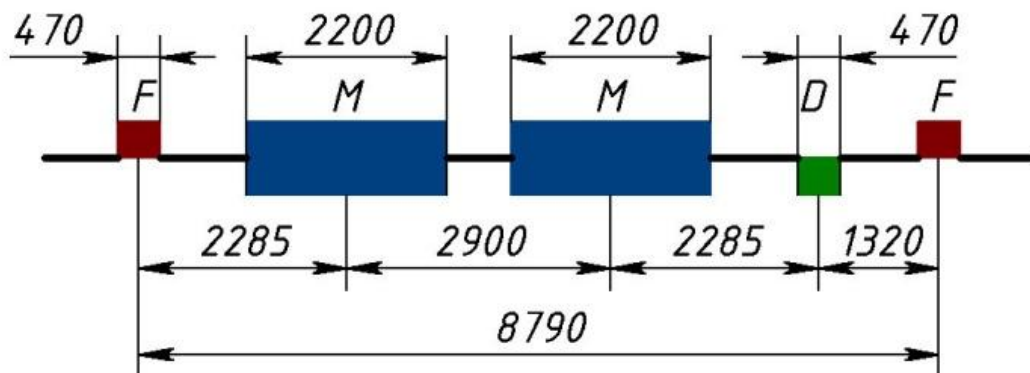


Рис. 3.1.4. Эффективные длины дипольных и квадрупольных магнитов регулярного периода Бустера

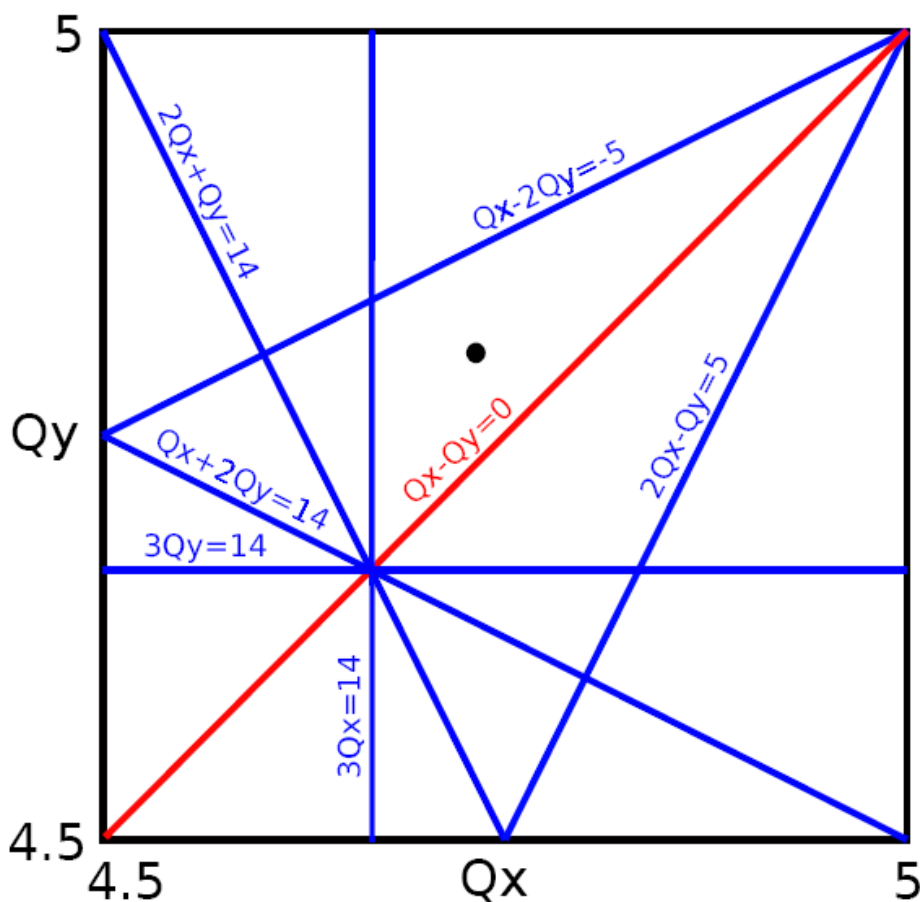


Рис. 3.1.5. Диаграмма бетатронных резонансов (до третьего порядка включительно) в окрестности рабочей точки

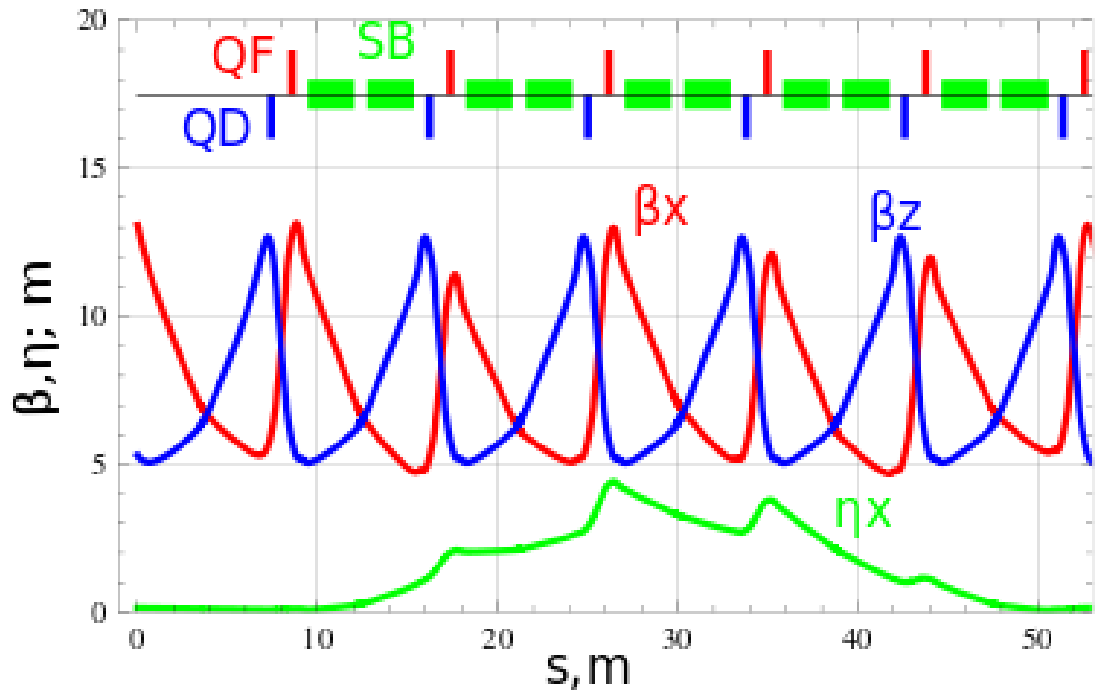


Рис. 3.1.6. $\beta_{x,z}$ и дисперсионная функции для выбранных частот в одном октанте Бустера

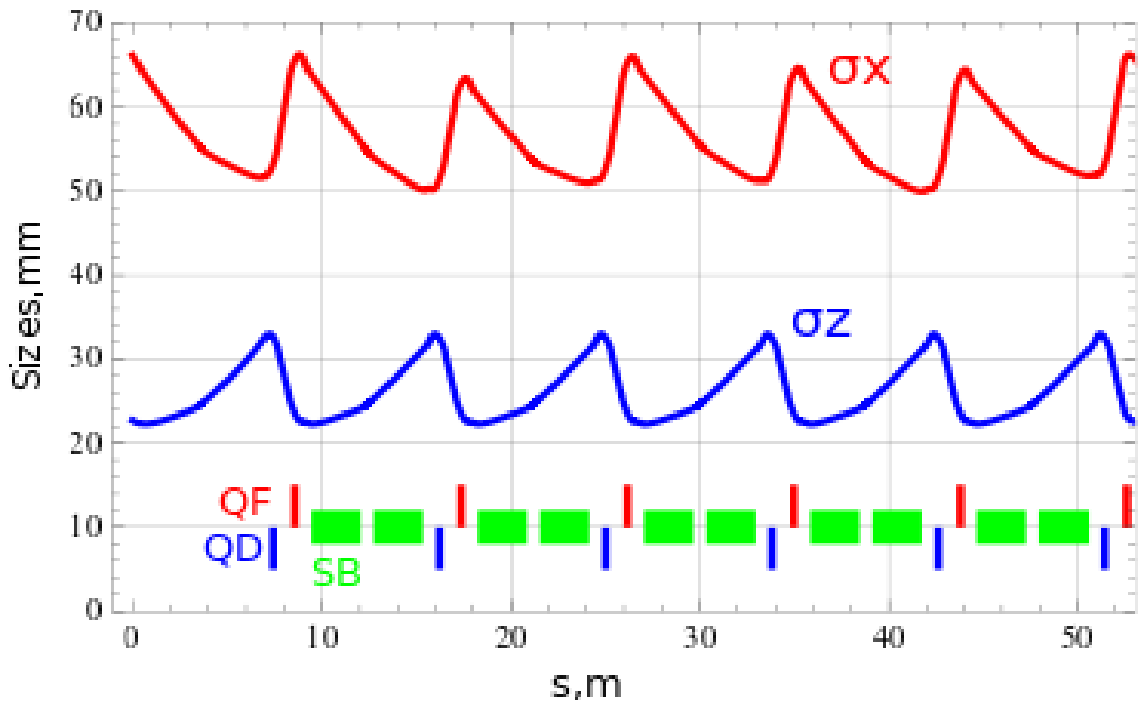


Рис. 3.1.7. Огибающие пучка в горизонтальной и вертикальной плоскостях

Основные параметры магнитной структуры Бустера даны в Таблице 3.1.1.

Таблица 3.1.1. Основные параметры магнитной структуры Бустера

1. Общие данные	
Ионы	$^{197}\text{Au}^{31+}$
Энергия инжекции	3,2 МэВ/н
Максимальная энергия	600 МэВ/н
Магнитная жёсткость при инжекции	1,6 Тл·м
Максимальная	25 Тл·м
Периметр	210,96 м
Критическая энергия	3,25 ГэВ/н
2. Структура и магнитные элементы	
Количество суперпериодов	4
Периодов типа ДФО	24
Дипольных магнитов	40
Квадрупольных линз	48
Эффективная длина: Дипольных магнитов	2,2 м
Квадрупольных линз	0,47 м
Индукция в дипольных магнитах: При инжекции	0,11 Тл
Максимальная	1,8 Тл
Градиент в линзах Ф при инжекции	1,28 Тл/м
Максимальный	21,01 Тл/м
Градиент в линзах Д при инжекции	-1,31 Тл/м
Максимальный	-21,48 Тл/м
Радиус кривизны в дипольных магнитах	14,09 м
Сагитта в дипольных магнитах	0 мм
3. Динамические характеристики структуры и пучка	
Частоты бетатронных колебаний: Q_x	4,8
Q_z	4,85
Хроматичность: $\Delta Q_x/(\Delta p/p)$	-5,1
$\Delta Q_z/(\Delta p/p)$	-5,5
Коэффициент уплотнения орбит	0,05
Амплитуда скорректированной орбиты	4 мм
Акцептанс: Горизонтальный	150 π мм·мрад
вертикальный	57 π мм·мрад
Эмиттанс пучка при инжекции $\varepsilon_{x,z}$	15 π мм·мрад
В конце ускорения ε_x	< 11 π мм·мрад
В конце ускорения ε_z	< 1,5 π мм·мрад
Импульсный разброс при инжекции	$\pm 10^{-3}$
Максимальный	$\pm 2,3 \cdot 10^{-3}$
В конце ускорения	$\pm 2,2 \cdot 10^{-4}$
Период обращения при инжекции	8,5 мкс
В конце ускорения	0,89 мкс

3.2 МАГНИТНАЯ СИСТЕМА

Магнитная система Бустера строится по аналогии с магнитной системой действующего быстроциклирующего сверхпроводящего ускорителя Нуклотрон [3.1]. Технология изготовления магнитов Нуклотрона была предложена и развита в Лаборатории высоких энергий ОИЯИ. Она отличается высокой эффективностью и надёжностью при относительной простоте и низких

затратах. Наличие в Лаборатории технологических участков для производства и испытания магнитов, а также обученного персонала делает ещё более обоснованным выбор для Бустера NICA магнитов типа «оконная рама» с обмоткой из трубчатого сверхпроводника. Периметр Бустера с максимальной жёсткостью 25 Тл·м составит около 211 м. Бустерный синхротрон планируется разместить в существующем помещении — корпусе № 1 ЛФВЭ — внутри ярма магнита Синхрофазотрона. Основные параметры структурных магнитов Бустера NICA приведены в Таблице 3.2.1 и Таблице 3.2.2. Конструкция дипольного магнита представляет из себя секторный магнит типа «оконная рама» с «холодным» ярмом из листовой трансформаторной стали толщиной 0,65 мм. Квадрупольной линзы представляет конструкцию сверхпроводящей обмоткой и шихтованным «холодным» ярмом с гиперболическими полюсами.

Таблица 3.2.1. Основные характеристики дипольного магнита Бустера NICA

Количество магнитов в кольце		40 + 1 измерительный магнит
Магнитная жёсткость, $B\rho$	Тл·м	25
Максимальная индукция магнитного поля в апертуре, B_{\max}	Тл	1,8
Минимальная индукция магнитного поля в апертуре, B_{\min}	Тл	0,11
Эффективная длина магнита, L	м	2,2
Скорость изменения магнитного поля, dB/dt	Тл/с	1,2
Неоднородность магнитного поля, $\Delta B/B$ на радиусе 30 мм		$\pm 6 \cdot 10^{-4}$
Апертура по вакуумной камере, гориз./верт.	мм/мм	128/65
Угол поворота	град	9
Радиус кривизны	м	14,09
Зазор между полюсами (гор/вер)	мм/мм	150/67
Длина железного ярма	м	2,14
Ширина ярма	м	0,31
Высота ярма	м	0,228
Физическая длина магнита	м	2,36
Масса магнита	кг	850
Ток при максимальном магнитном поле	кА	9,68
Число витков в обмотке (на полюс)		10(5)
Индуктивность	мкГн	630
Потери энергии за цикл при $B_{\max} = 1,5$ Тл	Дж/цикл	33,6
Полная длительность цикла	с	4,02
Динамические тепловыделения	Вт	8,4
Статический теплоприток (без тока)	Вт	4,4
Общие тепловыделения	Вт	12,8
Диаметр охлаждающего канала кабеля	мм	3,0
Длина кабеля в обмотке	м	54
Длина кабелей электрической связи магнитов	м	12
Перепад давления между питающим и отводящим гелиевым коллектором	кПа	≤ 27
Максимальная температура гелия в обмотке	К	4,65

Таблица 3.2.2. Основные характеристики квадрупольного магнита Бустера NICA

Количество магнитов в кольце		48 + 2 измерительных магнита
Конструкция		
Максимальный градиент магнитного поля, G_{\max}	Тл/м	21,5
Минимальный градиент магнитного поля, G_{\min}	Тл/м	1,3
Эффективная длина магнита, L	м	0,47
Скорость изменения градиента магнитного поля, dG/dt	(Тл/м)/с	14,3
Неоднородность градиента магнитного поля, $\Delta G/G$ на радиусе 30 мм		$\pm 6 \cdot 10^{-4}$
Расстояние от оси до полюса	м	0,0475
Апертура по вакуумной камере, гориз./верт.	мм/мм	128/65
Физическая длина магнита	м	0,66
Ширина ярма	м	0,226
Высота ярма	м	0,226
Масса магнита	кг	110
Ток при максимальном градиенте поля	кА	9,68
Число витков в обмотке (на полюс)		8(2)
Индуктивность	мкГн	96
Потери энергии за цикл при $G_{\max} = 13$ Тл/м	Дж/цикл	3,33
Полная длительность цикла	с	4,02
Динамические тепловыделения	Вт	0,84
Статический теплоприток	Вт	3,0
Общие тепловыделения	Вт	4,8
Диаметр охлаждающего канала кабеля	мм	3,0
Длина кабеля в обмотке	м	19
Длина кабелей электрической связи магнитов	м	12
Перепад давления между питающим и отводящим гелиевым коллектором	кПа	≤ 25
Максимальная температура гелия в обмотке	К	4,65

На Рис. 3.2.1 представлен дипольный магнит Бустера внутри криостата. Магнит закреплён в криостате с помощью 8 стержней таким образом, что после его охлаждения от комнатной до гелиевой температуры положение в пространстве оптической оси магнита остаётся неизменным. Диаметр вакуумного кожуха криостата составляет 640 мм. Между вакуумным кожухом и магнитом расположен тепловой экран, охлаждаемый потоком кипящего азота. Снизу к магниту прикреплены питающий и отводящий гелиевые коллекторы. Однослойная изогнутая обмотка магнита изготовлена из трубчатого сверхпроводящего кабеля, разработанного в ЛФВЭ ОИЯИ для магнитов Нуклотрона (см. Рис.3.2.2). Внутри кабеля имеется охлаждающий канал для циркуляции потока двухфазного (кипящего) гелия. Обмотка помещена в зазор железного ярма магнита, которое воспринимает пондеромоторные силы, действующие на обмотку. Ярмо изготовлено из листов электротехнической стали толщиной 0,65 мм, скреплённых между собой с помощью сварки к стальным уголкам и пластинам. Ярмо охлаждается потоком гелия после обмотки.

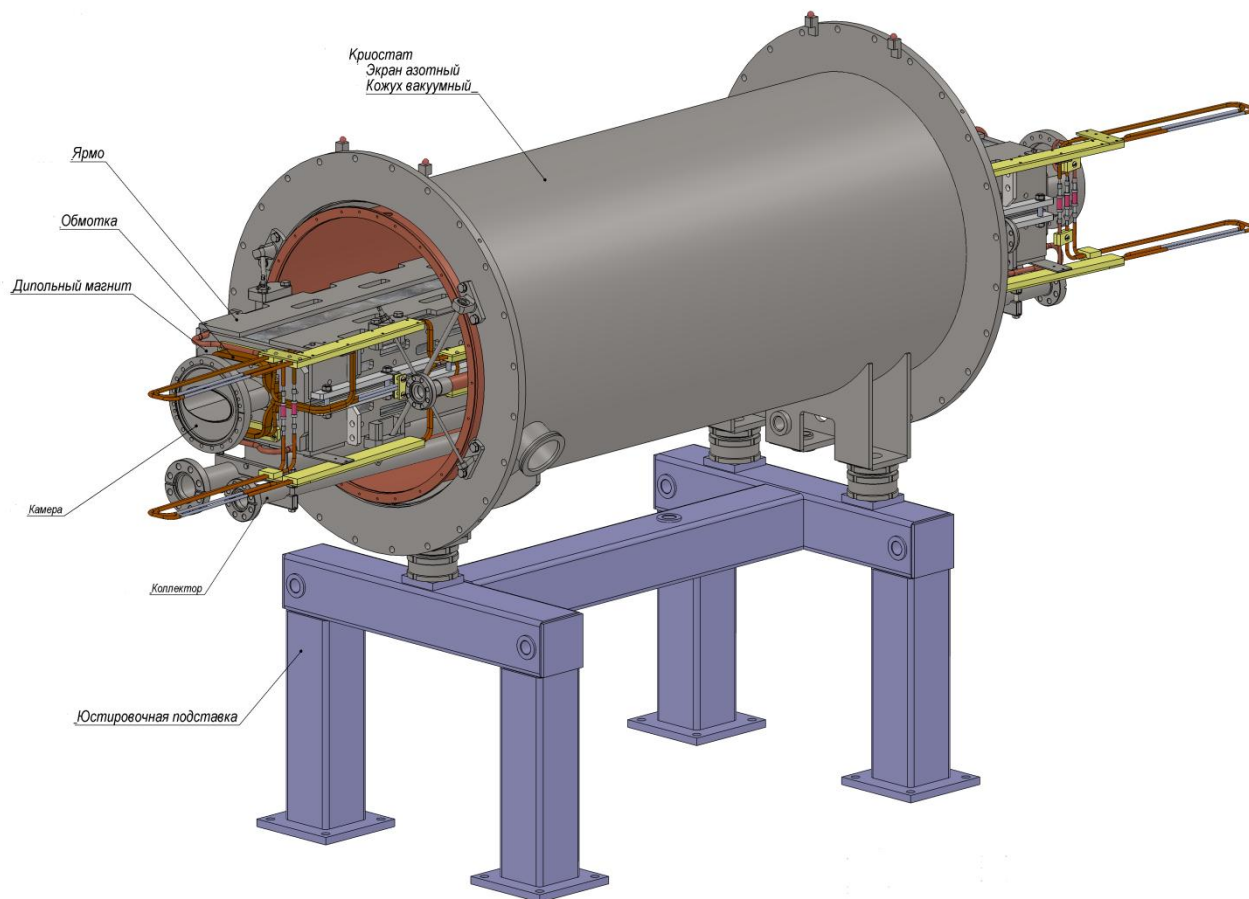


Рис. 3.2.1. Дипольный магнит Бустера NICA в криостате

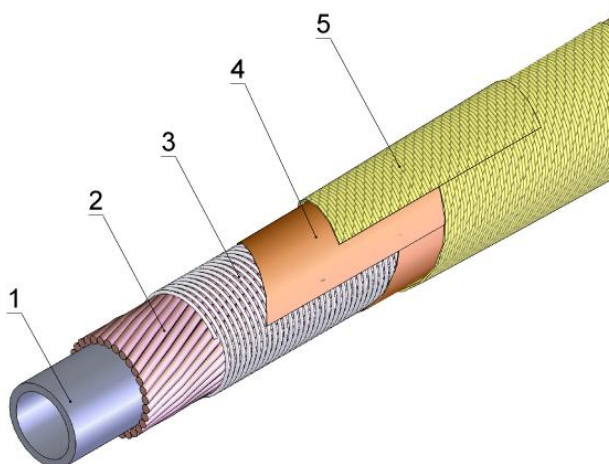


Рис. 3.2.2. Трубчатый сверхпроводящий кабель: 1 — мельхиоровая трубка; 2 — сверхпроводящий провод; 3 — бандажный провод из никрома; 4 — полиимидная лента; 5 — стеклотента, пропитанная эпоксидным компаундом

Квадрупольный магнит Бустера аналогичен магниту Нуклотрона. Квадрупольные магниты устанавливаются в вакуумные кожухи парами. На Рис. 3.2.3 представлен дублет линз Бустера в процессе сборки полуярем.

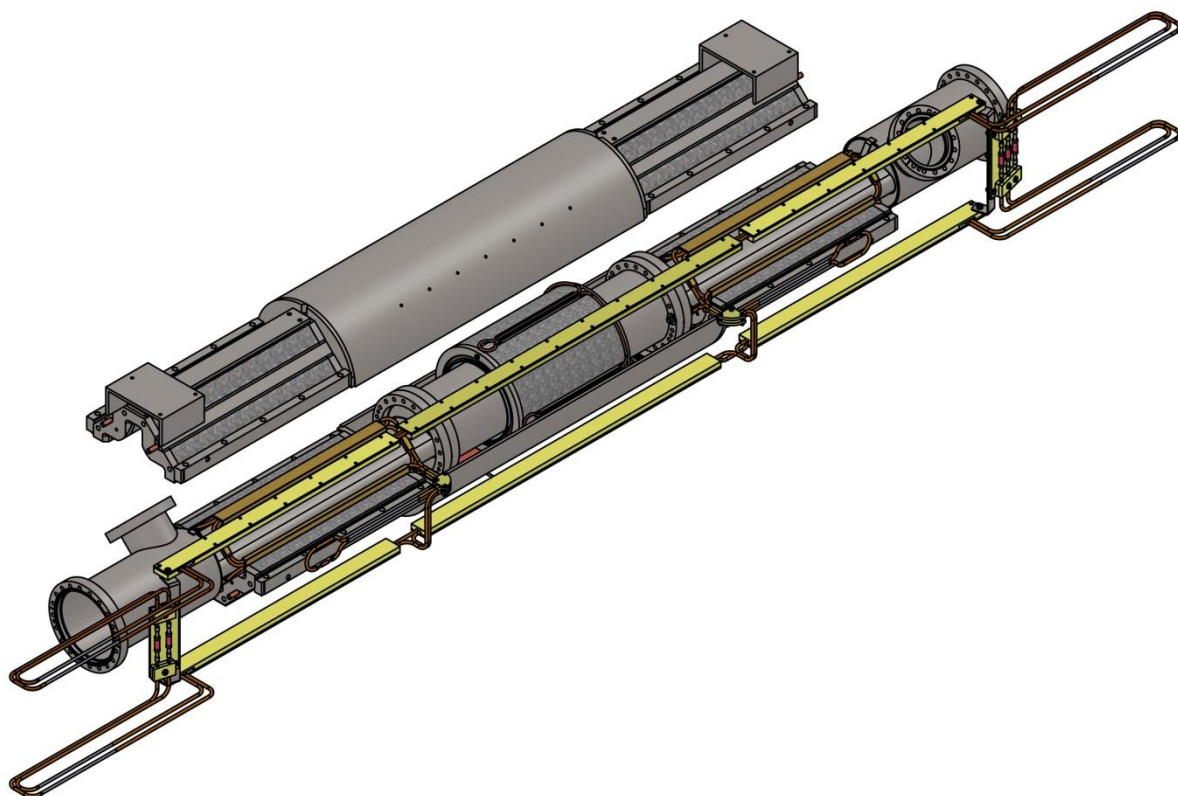


Рис. 3.2.3. Дублет линз Бустера NICA в процессе сборки полуярем. В промежутке между линзами расположен мультипольный корректирующий магнит

По изоляционному вакуумному пространству криостата магнитная система Бустера будет разделена на два полукольца. В каждом полукольце цепочка из 20 дипольных магнитов и 12 дублетов линз параллельно подсоединяются к питающему и отводящему гелиевым коллекторам. Гидравлические сопротивления структурных магнитов и неструктурных элементов подобраны так, чтобы при работе в цикле на выходе каждого из параллельных охлаждающих каналов величина массового паросодержания гелия составляла около 90 %.

Расчётные значения теплопритоков к гелию и тепловыделений в магнитах Бустера при импульсной работе в цикле приведены в Таблице 3.2.3.

Таблица 3.2.3. Тепловая нагрузка к гелию в магнитах Бустера NICA

Статический теплоприток к дипольным магнитам	Вт	180
Статический теплоприток к квадрупольным магнитам	Вт	200
Статический теплоприток к корректорам, BPM, переходам «тепло — холод», измерительным и потенциальным проводам и др.	Вт	120
Суммарный статический теплоприток к гелию	Вт	500
Динамический тепловыделения в дипольных магнитах при работе в цикле с $V_m = 1,8$ Тл, $dB/dt = 1,2$ Тл/с, $T_{ц} = 4,02$ с	Вт	344
Динамический тепловыделения в квадрупольных магнитах при работе в цикле с $G_m = 21,5$ Тл/м, $dG/dt = 14,3$ (Тл/м)/с, $T_{ц} = 4,02$ с	Вт	42
Суммарные динамические тепловыделения		386
Суммарная тепловая нагрузка к гелию в Бустере	Вт	886

3.3 СХЕМА ПИТАНИЯ СТРУКТУРНЫХ МАГНИТОВ И ЛИНЗ БУСТЕРА

3.3.1 Техническое описание

За основу при построении системы питания Бустера принято последовательное соединение структурных дипольных магнитов (суммарная индуктивность 16,4 мГн), квадрупольных фокусирующих (суммарная индуктивность 0,6 мГн) и дефокусирующих (суммарная индуктивность 0,6 мГн) линз Бустера. Основной мощный источник системы питания формирует требуемый ток (до 12100 А) с заданной скоростью роста поля (1 Тл/с) в общей цепи в соответствии с требуемым циклом, изображённом на Рис. 3.3.1.

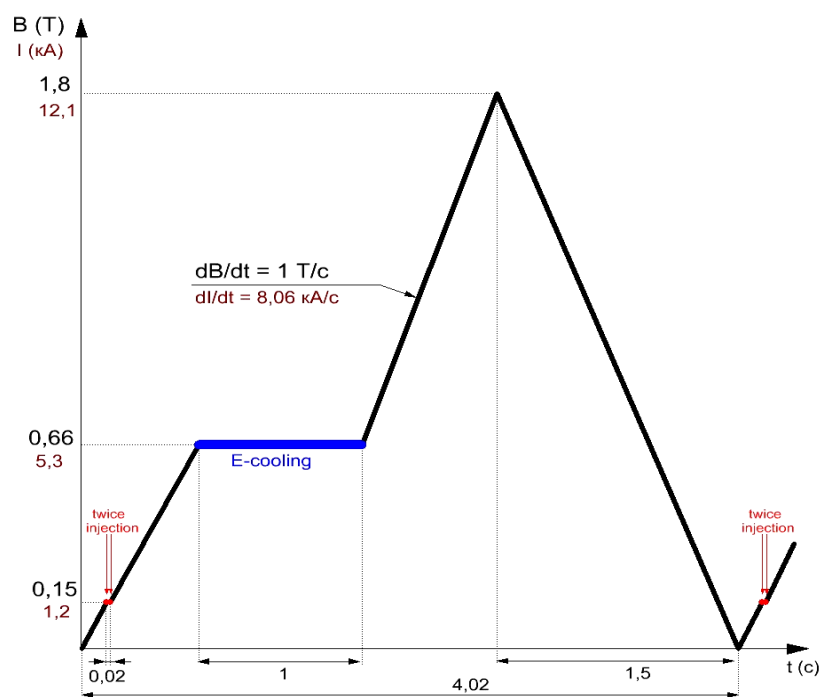


Рис. 3.3.1. Рабочий цикл магнитного поля Бустера

Для гибкого выбора рабочей точки ускорителя предназначены два дополнительных существенно меньшей мощности источника питания: один позволяет одновременно изменять градиент поля в фокусирующих и дефокусирующих линзах, другой только в дефокусирующих.

Для эвакуации запасённой энергии из сверхпроводящих элементов в случае срыва сверхпроводимости применены соединённые последовательно с цепью магнитов и линз ключи, отключаемые сигналом системы детектирования появления нормальной фазы в сверхпроводнике. Накопленная энергия рассеивается в резисторах гашения поля, включённых параллельно ключам.

Структурная схема системы питания изображена на Рис. 3.3.2.

Последовательно соединённые дипольные магниты (2 цепи 1/2МД) и квадрупольные линзы (2 цепи 1/2ЛФ и 2 цепи 1/2 ЛД) разбиты ключами эвакуации энергии (К1...4) и включены по симметричной схеме относительно питающего напряжения. Индуктивности групп и величина резисторов гашения выбраны таким образом, чтобы напряжение относительно потенциала «земли» на тоководах при эвакуации энергии не превышало 500 В.

Мощный источник питания состоит из параллельно включённых тиристорных выпрямителей ИП1, 2 запитанных от высоковольтной сети 6 кВ. Каждый из источников ИП является 12-ти фазным выпрямителем с номинальными параметрами 180 В × 6300 А, причём фазные напряжения источников сдвинуты относительно друг друга на 15 эл. гр. Совместно ИП1, 2 образуют 24-х фазный регулируемый тиристорный выпрямитель с номинальными выходными параметрами 180 В × 12600 А, что позволяет получить скорость роста поля 1 Тл/с. Пиковая мощность источника 2,5 МВт.

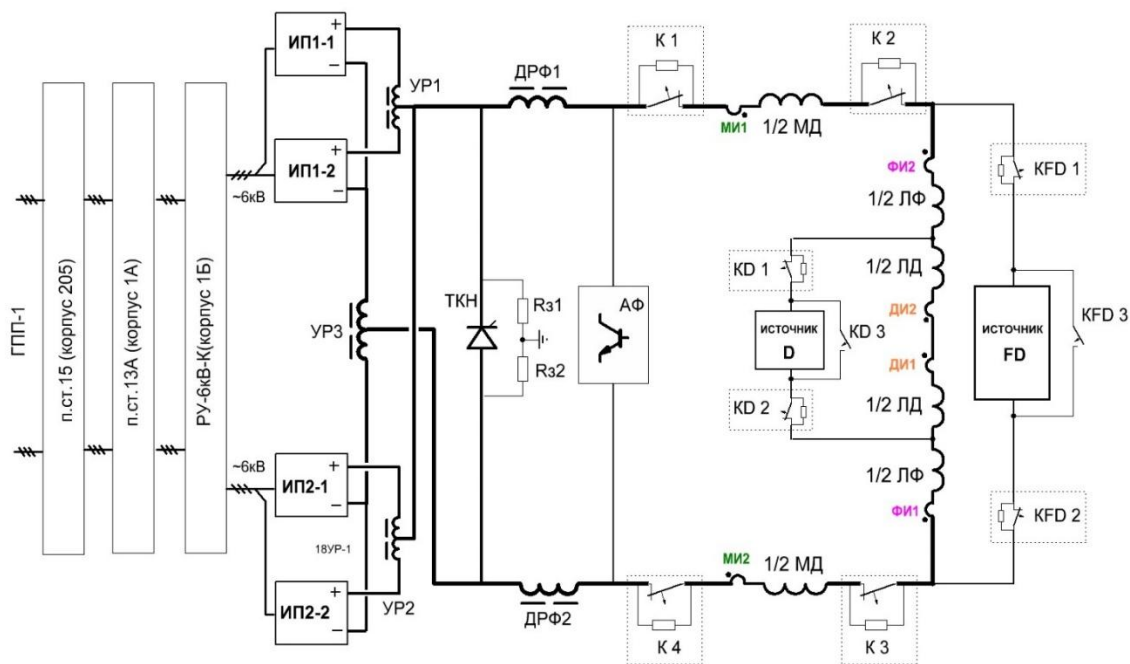


Рис. 3.3.2. Структурная схема системы питания Бустера

Фильтровые дроссели ДРФ1, ДРФ2 совместно с активным фильтром (АФ) обеспечивают требуемую величину пульсаций тока. Резисторы Rz1 и Rz2 симметрируют выходное напряжение источника относительно «земли». Тиристорный ключ ТКН шунтирует источник питания при эвакуации энергии. Дополнительный источник токодобавки в линзы FD с выходными параметрами 25 В × 400 А через ключи эвакуации энергии KFD1, 2 подключён к цепи последовательно соединённых линз. Аналогично подключается источник токодобавки в линзы D с выходными параметрами 15 В × 300 А через ключи KD1, 2 к цепи дефокусирующих линз.

В измерительных магнитах МИ1, 2, линзах ФИ1, 2 и ДИ1, 2 установлены индукционные датчики магнитного поля, сигнал с которых поступает в системы регулирования, управления и диагностики.

3.3.2 Размещение элементов и узлов системы питания

Источники ИП1, 2, элементы силового фильтра, ключ ТКН и ключи эвакуации энергии К1...4 размещены в корпусе № 1Б. Там же расположена высоковольтная распределительная подстанция РУ-6кВ-К, напряжение на которую поступает с ГПП-1 через п. ст. № 15 (корпус № 205) и п. ст. № 13А (корпус № 1А). Силовые шинопроводы от ИП1, 2 и К1...4 поступают на токовводы измерительного полупериода, в котором размещены измерительные магниты и линзы. В корпусе № 1Б располагается эквивалентная нагрузка для тестирования ИП1, 2 (на схеме не показана).

Источники токодобавки FD и D вместе со своими ключами эвакуации расположены в корпусе № 1Б. Там же располагается обрабатывающая и управляющая аппаратура системы питания Бустера.

3.3.3 Система детектирования перехода сверхпроводящих обмоток в нормальную фазу

Система детектирования перехода сверхпроводящих магнитных элементов в нормальную (резистивную) фазу функционально состоит из следующих подсистем:

- Детектор перехода — узел, выделяющий сигнал о потере сверхпроводимости.
- Электронный блок (собственно датчик перехода) — узел, преобразующий аналоговый входной сигнал от детектора (усиление, смещение уровня и т.п.), производящий его математическую обработку (определение истинности перехода путём анализа амплитуды и времени), оцифровку и запоминание аналогового сигнала, гальваническую развязку и приём-передачу управляющих сигналов (проверку, подстройку порогов, сброс и т.п.) и оцифрованного входного сигнала.
- Промежуточный контрольный блок — узел, собирающий информацию с *N* датчиков перехода для усиления и дальнейшей трансляции в систему управления и отображения информации. Служит для уменьшения количества узлов на шине обмена и повышения надёжности передачи информации.
- Система управления и отображения информации (СУОИ) — комплекс узлов и блоков, принимающих информацию с датчиков перехода, анализирующих и отображающих её. СУОИ управляет всей системой и отображает информацию о её состоянии (характер неисправности, например, «переход в нормальное состояние», и указание неисправного элемента) и передаёт эту информацию в систему управления Бустера. По запросу оператора может выводить визуальный процесс перехода на конкретном элементе.

- Программное обеспечение пользователя — программа управления и отображения работы системы на удалённом компьютере.

Детектор перехода (Рис. 3.3.3) представляет собой мост постоянного тока, составленный из магнитных элементов ускорителя M1 и M2 и балансирующего резистора R. Для защиты электрической цепи ускорителя от короткого замыкания на землю используются резисторы R1, R2, R3. При возникновении активной фазы в одном из магнитов мост разбалансируется, напряжение разбаланса обрабатывается схемой датчика перехода, и срабатывает схема эвакуации энергии.

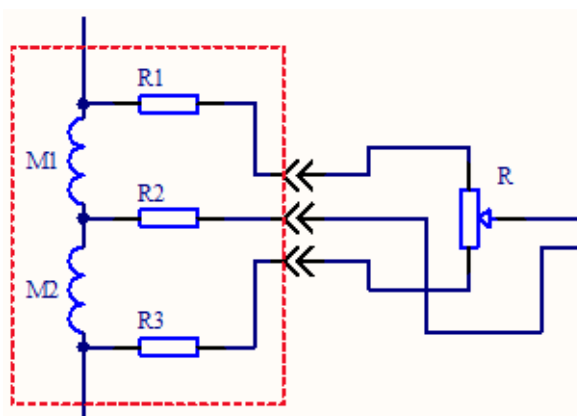


Рис. 3.3.3. Структурная схема детектора перехода

Исходя из опыта разработки и использования датчиков перехода на ускорителе Нуклотрон, предлагается.

- Применить мостовую схему измерения со средней точкой и внешними соединительными проводниками;
- Отказаться от защитных резисторов внутри криостата, так как они вносят существенные погрешности в измерительные цепи и имеют малую надёжность. За время эксплуатации ускорителя было несколько случаев выхода этих элементов из строя, как правило, в результате теплового расширения-сжатия при охлаждении. Кроме того, при их отсутствии возможно балансирование датчиков перехода без подачи напряжения от основного источника питания, что существенно облегчает оперативное обслуживание системы. Для защиты цепей ускорителя от короткого замыкания на землю непосредственно в разъёме или возле него размещаются плавкие предохранители;
- Для улучшения помехозащищённости и качества сигнала применить блоки предварительных усилителей (Рис. 3.3.4) для повышения уровня контролируемого сигнала, расположенные в непосредственной близости от контролируемого элемента (магнита).

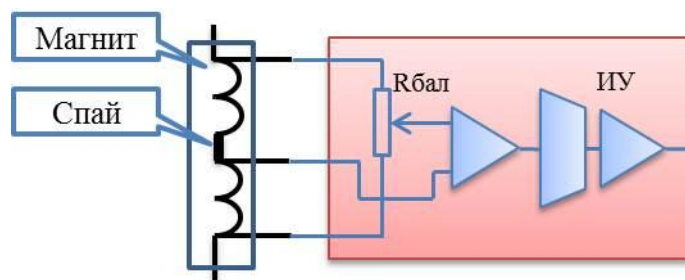


Рис. 3.3.4. Структурная схема изолированного предварительного усилителя

Следует отметить, что при включении моста со средней точкой в магнитном элементе нет опасности т.н. «симметричного перехода», так как в реальном магните в средней точке присутствует спай, а потенциальный провод припаян к началу спая. Таким образом, в одном плече полумоста включена чистая индуктивность, а в другом — индуктивность со спаем. В этом случае распространение активной фазы симметрично невозможно.

На Рис. 3.3.5 показана структурная схема электронного блока датчика перехода, принимающего сигнал с предусилителя. Усиленный сигнал обрабатывается микропроцессорным модулем, оцифровывается и записывается в память блока. При выявлении перехода вырабатывается сигнал, приводящий в действие систему эвакуации энергии. При необходимости из памяти блока извлекается массив данных, описывающий процесс изменения сигнала, происходивший до момента перехода.

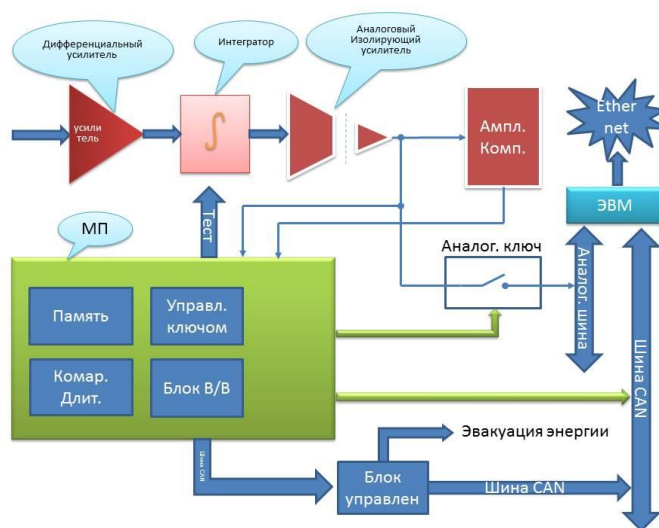


Рис. 3.3.5. Структурная схема системы детектирования перехода обмоток в нормальную фазу

Для управления всеми датчиками, установки их параметров, тестирования, поблочной развязки и пр. существует система управления и отображения информации (Рис. 3.3.6).



Рис. 3.3.6. Система управления и отображения информации

В её функции входит также приём и передача сигналов управления и отображения происходящих процессов в системе между системой датчиков и пультом управления.

3.4 СИСТЕМЫ ИНЖЕКЦИИ И ВЫВОДА ПУЧКА

3.4.1 Система инжекции пучка

Назначение

Система инжекции пучка в Бустер позволяет осуществлять многовариантную инжекцию для накопления в Бустере пучка требуемой интенсивности. Основные методы инжекции пучка в Бустер: однократный однооборотный, однократный многооборотный и многократный однооборотный. Накопление ионов осуществляется в горизонтальной фазовой плоскости Бустера. Подробное описание методов инжекции приведено в Приложении 3.1.

В Таблице 3.4.1 приведены основные параметры пучка при инжекции в Бустер.

Таблица 3.4.1. Основные параметры пучка при инжекции в Бустер

Ионы	$^{197}\text{Au}^{31+}$
Интенсивность	до $2,5 \cdot 10^9$
Энергия ионов, МэВ/н	3,2
Частота повторения стадий многократной инжекции, Гц	10
Эффективность инжекции, %	95
Поперечный 95 %-ный эмиттанс, π мм·мрад:	
– на входе септума;	15
– после филаментации в Бустере	$15 \div 150$

3.4.2 Структура системы инжекции

Основными элементами системы инжекции пучка являются электрические импульсные пластины ИП1 — ИП3 и электростатический септум ИЭС. Электростатический септум служит для ввода пучка в вакуумную камеру Бустера. Пластины служат для посадки пучка на замкнутую орбиту при использовании схемы однооборотной инжекции пучка и создания локального бампа замкнутой орбиты при использовании методов многооборотной и многократной инжекции.

Элементы системы размещаются в окрестности 1-го прямолинейного промежутка Бустера (см. Рис. 3.4.1). Электрические импульсные пластины ИП1 и ИП3 устанавливаются внутри криостата в соседних с прямолинейным промежутком периодических ячейках Бустера. Электрические импульсные пластины ИП2 и электростатический септум ИЭС устанавливаются непосредственно в 1-ом прямолинейном промежутке Бустера. Рассматриваются два варианта 1-го прямолинейного промежутка Бустера: холодный и тёплый. В холодном варианте оборудование прямолинейного промежутка устанавливается внутрь криостата. В теплом варианте большая часть прямолинейного промежутка находится при комнатной температуре; для криогенных трубчатых и сверхпроводящих кабельных коммуникаций создается байпас тёплого промежутка.

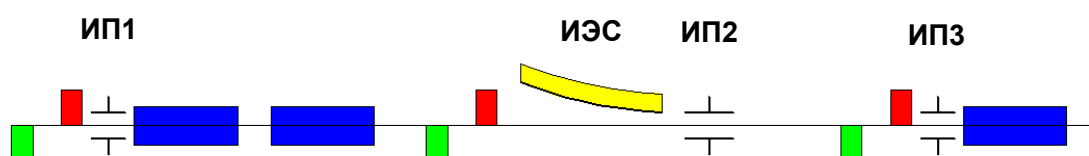


Рис. 3.4.1. Размещение элементов системы инжекции пучка в Бустере. Синим цветом обозначены структурные дипольные магниты, красным — фокусирующие квадрупольные линзы, зелёным — дефокусирующие квадрупольные линзы, жёлтым — инжекционный электростатический септум (ИЭС)

3.4.3 Временные характеристики работы системы инжекции

Режим работы электростатического септума ИЭС циклический. В течение ввода ионов в Бустер поддерживается постоянное напряжение между электродами септума. В промежутках между стадиями многократной инжекции возможно изменение напряжения.

Пластины ИП1 — ИП3 работают в импульсном режиме. При многократной инжекции частота повторения импульсов составляет 10 Гц, максимальное число импульсов подряд — 3. Различаются два режима работы пластин: одноступенчатый и двухступенчатый. При одноступенчатом режиме потенциал подаётся только на одну пластину. При двухступенчатом режиме к моменту начала ввода ионов потенциал подаётся на обе пластины, затем одна из пластин разряжается, что ведёт к скачкообразному изменению потенциала между пластинами.

Подробнее временные диаграммы работы устройств системы инжекции см. в Приложении 3.1.

3.4.4 Динамика ионов

Для определения положений и характеристик элементов системы инжекции было проведено моделирование динамики ионных пучков при инжекции в Бустер. Моделирование динамики ионов проводилось программой MAD [3.2]. При расчётах использовались результаты моделирования электрических полей в элементах системы инжекции, приведенные в Приложении 3.1.

Из множества схем инжекции пучка было отобрано 11 схем, при использовании которых горизонтальный эмиттанс накопленного пучка после филаментации фазового распределения ионов не превышает горизонтального аксептанса Бустера. В Таблице 3.4.2 даны значения горизонтальных эмиттансов пучка для отобранных схем инжекции.

Результаты моделирования динамики ионов при инжекции представлены на Рис. 3.4.2 – Рис. 3.4.4. На них для некоторых схем инжекции даны огибающие инжектируемого и накопленного пучков в окрестности 1-го прямолинейного промежутка Бустера.

Более подробно результаты моделирования инжекции ионов освещены в Приложении 3.1. Многократная инжекция с электронным охлаждением описана в Приложении 3.3.

Таблица 3.4.2. Горизонтальные эмиттансы накопленного пучка

Схема инъекции пучка	Горизонтальный эмиттанс, π мм·мрад
а) Однократная однооборотная инъекция согласованного пучка с точной посадкой на замкнутую орбиту	15
б) Однократная однооборотная инъекция со смещением пучка	15 ÷ 150
в) Однократная однооборотная инъекция несогласованного пучка	15 ÷ 150
г) Однократная многооборотная инъекция с одноступенчатым режимом	120
д) Однократная двухоборотная инъекция с двухступенчатым режимом	65
е) Двукратная однооборотная инъекция с одноступенчатым режимом и статическим вводом ионов	135
ж) Двукратная однооборотная инъекция с одноступенчатым режимом и динамическим вводом ионов	95
з) Двукратная однооборотная инъекция с двухступенчатым режимом и статическим вводом ионов	65
и) Двукратная однооборотная инъекция с двухступенчатым режимом и динамическим вводом ионов	52
к) Трёхкратная однооборотная инъекция с двухступенчатым режимом и статическим вводом ионов	135
л) Трёхкратная однооборотная инъекция с двухступенчатым режимом и динамическим вводом ионов	102

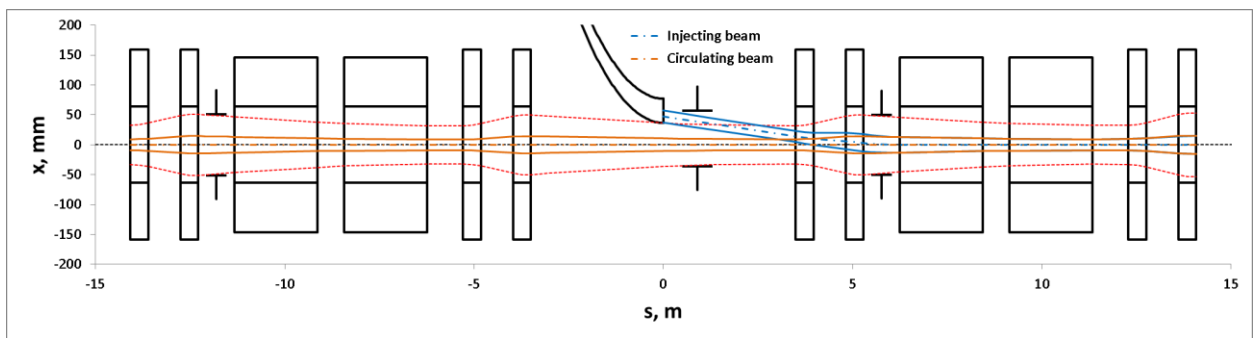


Рис. 3.4.2. Огибающие накапливаемого и накопленного пучков для основной схемы однократной однооборотной инъекции

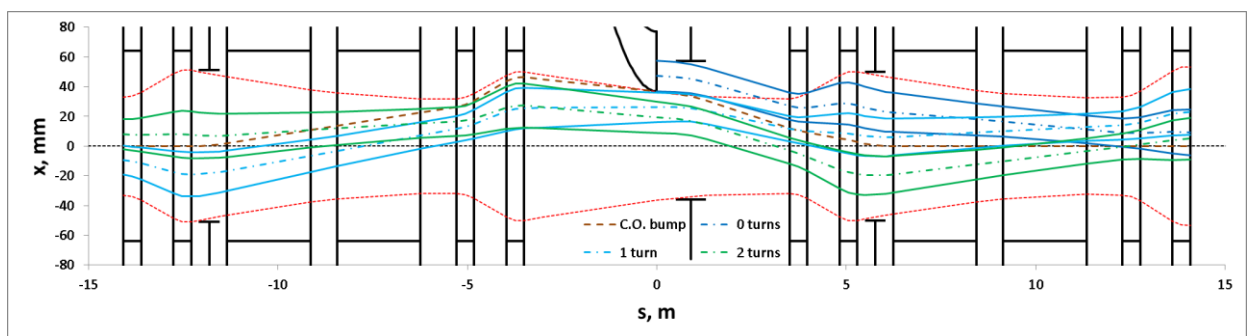


Рис. 3.4.3. Огибающие накапливаемого пучка на третьем обороте инъекции по схеме однократной многооборотной инъекции с одноступенчатым режимом работы пластин

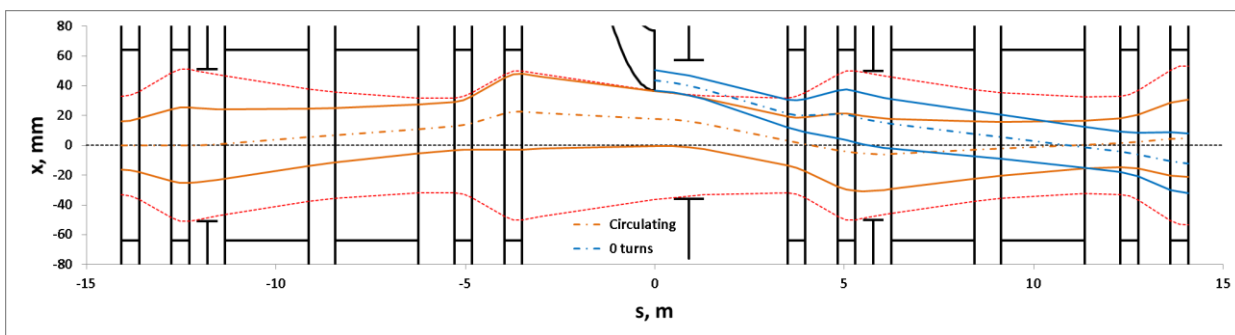


Рис. 3.4.4. Огибающие инжектируемого и накопленного пучков на третьей стадии инжекции по схеме трёхкратной однооборотной инжекции с двухступенчатым режимом работы пластин и динамическим режимом ввода ионов

3.4.5 Элементы системы инжекции

Электростатический септум ИЭС представляет собой пару криволинейных электродов, устанавливаемую внутри вакуумного бокса. Катод размещается с внешней стороны от анода. Высокое напряжение подаётся на катод, анод заземляется. Длина электростатического септума — 2 м. Зазор между анодом и катодом — 35 мм, толщина ножа септума — 1 мм. Максимальное напряжение на катоде септума — 120 кВ.

Электрические импульсные пластины ИП1 — ИП3 представляют собой три пары проводящих пластин, устанавливаемых вертикально внутри вакуумных боксов параллельно оси движения пучка. Источники питания пластин осуществляют независимую однополярную зарядку и разрядку пластин, составляющих пару. 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: 40 кВ для модулей ИП1 и ИП2, 60 кВ для модуля ИП2.

На Рис. 3.4.5 и Рис. 3.4.6 показаны элементы системы инжекции.

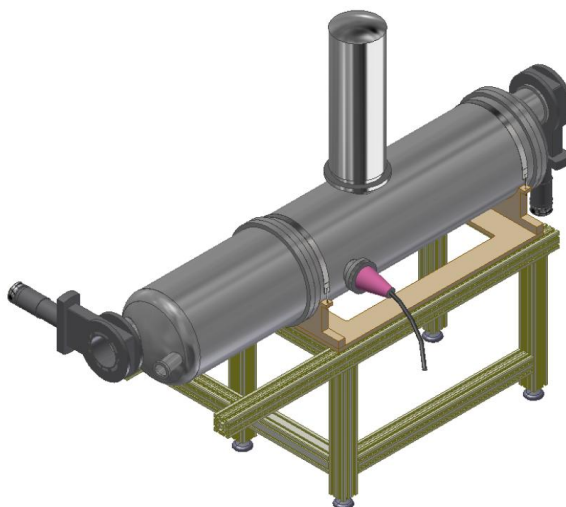


Рис. 3.4.5. Электростатический септум (трёхмерная модель тёплого варианта)

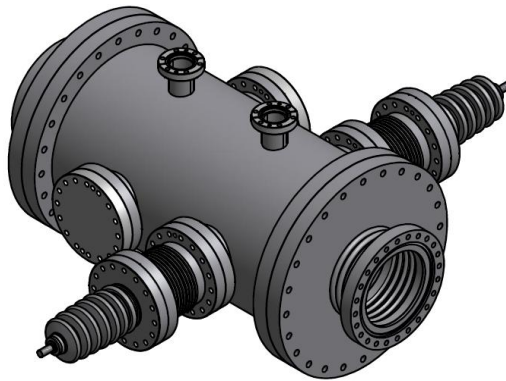


Рис. 3.4.6. Электрические импульсные пластины (трёхмерная модель вакуумного бокса пластин)

Для питания устройств системы инжекции служат источник питания электростатического септума и источники питания импульсных пластин, которые размещаются в корпусе № 1, в непосредственной близости от участка инжекции.

Источник питания электростатического септума размещается вблизи ярма Синхрофазотрона с внутренней стороны 1-го прямолинейного промежутка Бустера. Источник питания циклический, длительность активной фазы цикла — порядка 1 с. Максимальное выходное напряжение — 130 кВ. Неоднородность напряжения на плато цикла не превышает $\pm 0,1\%$.

Источники питания импульсных пластин, установленные на передвижные стойки, размещаются в непосредственной близости от модулей импульсных пластин. Источники питания импульсные. Частота повторения импульсов — 10 Гц, максимальное число импульсов подряд — 3. Длительность переднего фронта импульса (время зарядки пластины) не превышает 50 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 40 и до 20 кВ соответственно. Неоднородность напряжения на плато импульса не превышает $\pm 1\%$.

Более подробное описание элементов системы инжекции, включая источники питания, приведено в Приложении 3.1.

3.4.6 Система быстрого вывода пучка

Назначение

Система быстрого вывода пучка предназначена для однооборотного вывода ионов из Бустера с минимальными потерями. С целью ослабления требований к ударному устройству системы циркулирующий пучок смещается к ножу септума системы вывода, для чего на участке вывода создается локальный бамп замкнутой орбиты.

В Таблице 3.4.3 приведены основные параметры пучка при быстром выводе из Бустера.

Таблица 3.4.3. Основные параметры пучка при быстром выводе из Бустера

Ионы	$^{197}\text{Au}^{31+}$
Интенсивность	до $1,5 \cdot 10^9$
Энергия ионов, МэВ/н	578
Эффективность вывода, %	95
Поперечные 95 %-ные эмиттансы, π -мм·мрад	< 11 (гориз.) < 1,5 (верт.)

3.4.7 Структура системы быстрого вывода

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. Подсистемой бампа замкнутой орбиты пучок смещается к ножу септум-магнита, ударный магнит забрасывает пучок в септум-магнит, который завершает вывод пучка из Бустера.

Элементы системы размещаются в окрестности 3-го прямолинейного промежутка Бустера (см. Рис. 3.4.7). Все элементы устанавливаются внутри криостата Бустера.

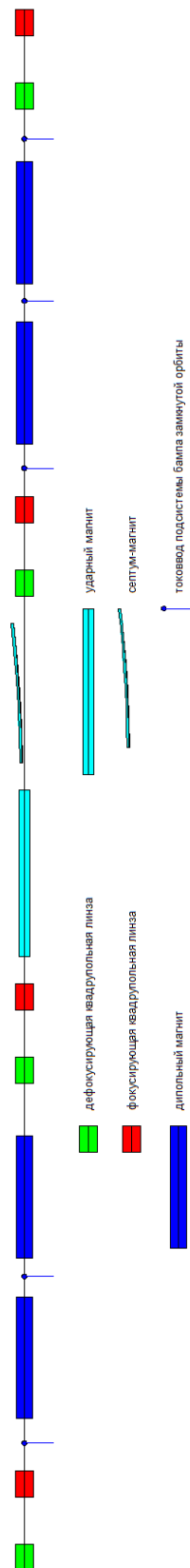


Рис. 3.4.7. Размещение элементов системы быстрого вывода пучка из Бустера

3.4.8 Временные характеристики работы системы быстрого вывода

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 токовводах подсистемы бампа.

Ударный магнит и септум-магнит работают в импульсном режиме. Частота повторения импульсов — 0,25 Гц.

3.4.9 Динамика ионов

Для определения положений и характеристик элементов системы быстрого вывода было проведено моделирование динамики ионных пучков при выводе из Бустера. Моделирование динамики ионов проводилось программой MAD [3.2].

Быстрый вывод ионов из Бустера осуществляется в 2 этапа. На первом этапе циркулирующий пучок подводится к ножу септум-магнита. На втором этапе осуществляется собственно вывод ионов из Бустера. Замкнутая орбита и огибающие циркулирующего пучка по окончании подводки показаны на Рис. 3.4.8. На Рис. 3.4.9 показаны траектория и огибающие выводимого пучка. Более подробно результаты моделирования освещены в Приложении 3.2.

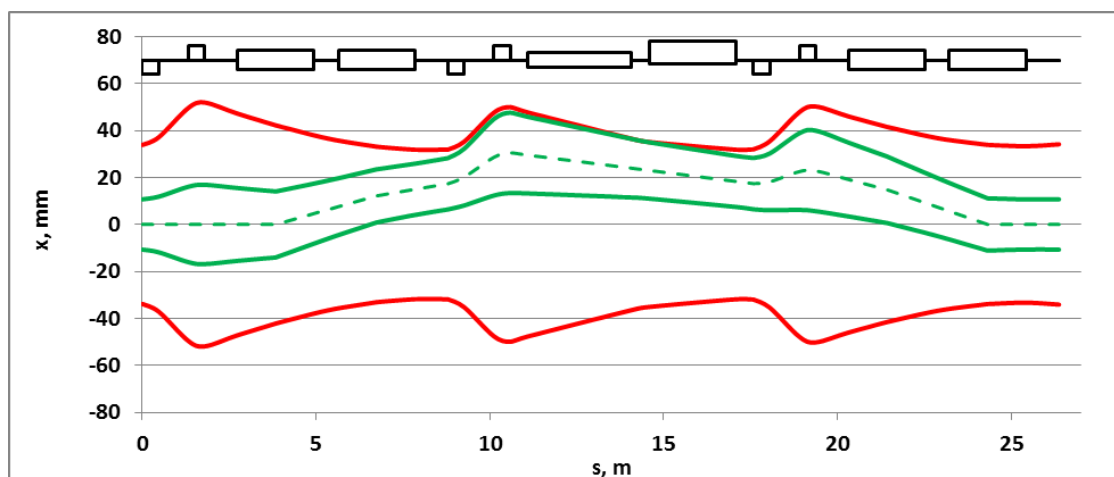


Рис. 3.4.8. Замкнутая орбита и огибающие циркулирующего пучка по окончании его подводки к ножу септум-магнита

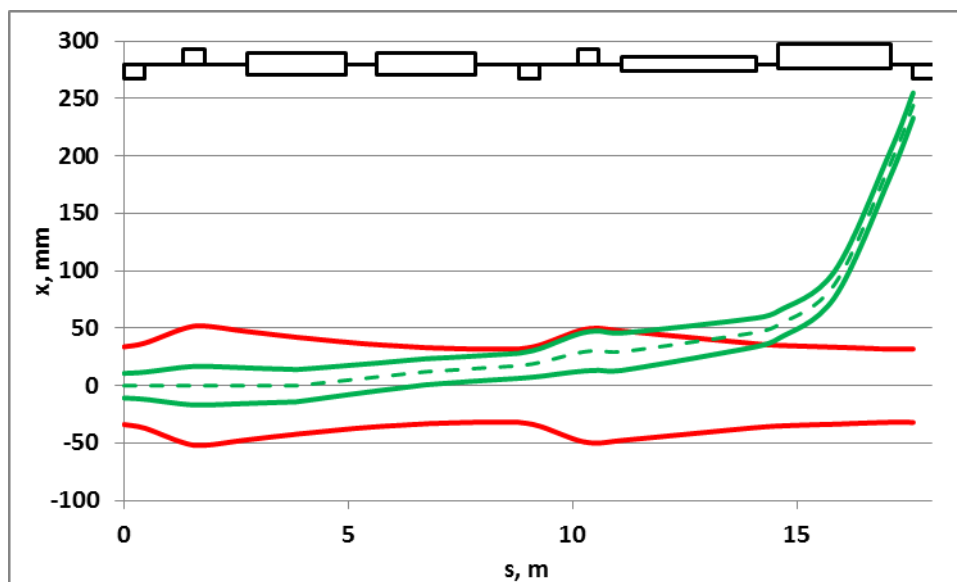


Рис. 3.4.9. Траектория и огибающие пучка, выводимого из Бустера

3.4.10 Элементы системы быстрого вывода

Подсистема бампа замкнутой орбиты состоит из 4 структурных дипольных магнитов с 5 дополнительными высокотемпературными сверхпроводящими тоководами. Тоководы подсистемы бампа замкнутой орбиты устанавливаются в смежных с дипольными магнитами коротких прямолинейных участках. Максимальные токодобавка/токоотбор составляют 400 А.

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

Септумный магнит 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 3-го прямолинейного промежутка Бустера) пластина касается медного экрана. Электрический потенциал подаётся на внешнюю пластину на выходе септум-магнита, медный экран и внутренняя пластина на выходе септум-магнита заземляются. Ток проходит по внешней пластине, 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 — 100 кА.

На Рис. 3.4.10 и Рис. 3.4.11 показаны элементы системы быстрого вывода.

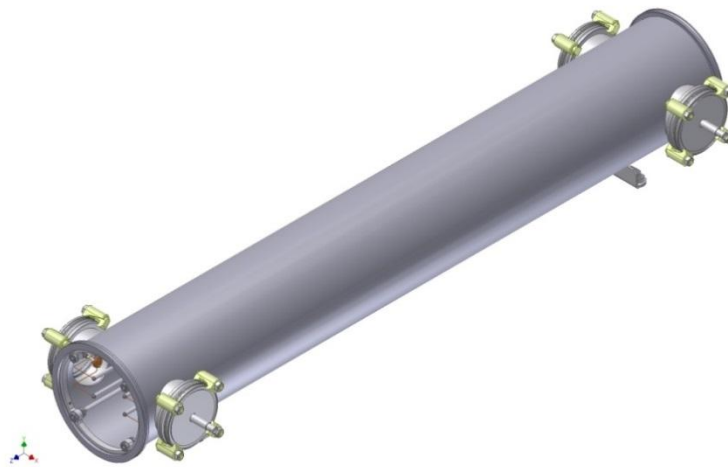


Рис. 3.4.10. Ударный магнит



Рис. 3.4.11. Септумный магнит

Для питания устройств системы быстрого вывода служат источники питания подсистемы бампа замкнутой орбиты, источники питания модулей ударного магнита и источник питания септум-магнита, размещаемые в корпусе № 1, в непосредственной близости от участка быстрого вывода.

Источники питания подсистемы бампа замкнутой орбиты располагаются в непосредственной близости от тоководов снаружи ярма Синхрофазотрона. Источник питания циклический, длительность активной фазы цикла — до 1,5 с. Максимальный ток — 400 А. Неоднородность тока на плато цикла не превышает $\pm 1\%$.

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 250 нс, а длительность плато импульса — не

менее 500 нс. Максимальный ток — 15 кА. Неоднородность тока на плато импульса не превышает $\pm 2\%$.

Источник питания септум-магнита размещается на огороженной площадке вблизи ярма Синхрофазотрона с внутренней стороны 3-го прямолинейного промежутка Бустера. Источник питания импульсный, частота повторения импульсов — 0,25 Гц. Импульс тока имеет форму, близкую к полусинусоиде, длительность импульса — около 10 мкс. Максимальный ток — 100 кА. Неоднородность тока на вершине импульса в течение вывода пучка не превышает $\pm 2\%$.

Более подробное описание элементов системы быстрого вывода, включая источники питания, приведено в Приложении 3.2.

3.5 ВАКУУМНАЯ СИСТЕМА БУСТЕРА

3.5.1 Вакуумные условия

Вакуумная система пучковой камеры Бустера разделяется на два типа: «холодная» при температуре близкой к температуре жидкого гелия и «тёплая» при комнатной температуре. «Холодная» пучковая камера располагается внутри вакуумного изоляционного объёма, который имеет две ступени откачки: предварительная и высоковакуумная.

При общей длине Бустера около 211 м большую часть занимает «холодная» камера и имеются два «тёплых» прямолинейных промежутка каждый длиной около 9 м. Поверхность «холодной» части пучковой вакуумной камеры имеет криотемпературу ≤ 10 °К, «тёплой» — комнатную ~ 300 °К. Парциальный состав остаточных газов состоит из:

- «тёплая» часть — $\text{H}_2 \sim 90\%$ и $\sim 10\%$ — CO , CH_4 , CO_2 ;
- «холодная» часть — водород и гелий (при наличии течей из изолирующего вакуумного объёма в пучковую камеру).

Оценка «холодной» и «тёплой» поверхностей дают величины для «холодной» — 60 м^2 и «тёплой» — 5 м^2 , соответственно, предполагая геометрические размеры элементов пучковой камеры $0,13 \times 0,06 \text{ м}^2$. Площадь камеры на единицу длины составит $\sim 0,3 \text{ м}^2/\text{м}$.

Соблюдая современные требования подготовки поверхностей стенок пучковой камеры, изготовленной из соответствующей таким требованиям нержавеющей стали, можно ожидать удельную величину газовыделения для «тёплых» поверхностей $\sim 10^{-13} \div 10^{-12} \text{ Торр-л/см}^2 \text{ с}$. При этом эти участки должны иметь систему термообезгаживания на месте (“in-situ bakeout”) с температурой ~ 300 °С.

В криогенной части пучковой камеры величина газоотделения холодных поверхностей на порядки меньше приведённых выше оценок, а скорость откачки, за исключением водорода и гелия, на порядки выше. Установив для откачки гелия и водорода дополнительные насосы, можно рассчитывать на давление $\leq 10^{-11}$ Торр.

Средняя величина статического давления по кольцу в этом случае будет равна $\sim 3 \cdot 10^{-11}$ Торр. Потери ускоряемых ионов $^{197}\text{Au}^{31+}$ при таком среднем вакууме составят $\sim 0,1$ %. При интенсивности инжектируемого пучка $\sim 1 \cdot 10^{10}$ ионов и перехвате ~ 90 % теряемых ионов специальной системой ловушек, стенок камеры достигнет $\sim 10^6$ ионов, что при коэффициенте вторично эмиссионной десорбции $\sim 1 \cdot 10^4$ приведёт к динамическому вакууму $\sim 3,3 \cdot 10^{-11}$ Торр. Подробнее о коллимации ионов в Бустере см. в Приложении 3.4.

Вакуумная система изолирующего объёма криогенной части ускорителя не требует сверхвысокого вакуума, вполне достаточно давление порядка $\sim 1 \cdot 10^{-7}$ Торр. Для предварительной откачки объёма до давления $\sim 1 \cdot 10^{-5}$ Торр возможно использование обычных диффузионных насосов. Наличие огромной криогенной поверхности обеспечит получение требуемого высокого вакуума.

3.5.2 Средства откачки вакуума

Вакуумные посты используются для достижения предварительного вакуума перед захлаживанием ускорителя, а так же для откачки гелия и водорода в рабочем режиме Бустера. Вакуумные посты «холодных» пучковых камер располагаются равномерно вдоль периметра Бустера в районе блоков квадрупольных линз на расстоянии около 9 м (Рис. 3.5.1). Ввиду малого поперечного сечения пучковой камеры Бустера (эллипс 130×69 мм), проводимость вакуумной камеры составляет всего 30 л/с на расстоянии 9 м, что не позволяет достигнуть среднего значения вакуума по периметру Бустера на уровне 10^{-11} Торр с использованием только постов откачки в районе дуплетов квадрупольных линз.

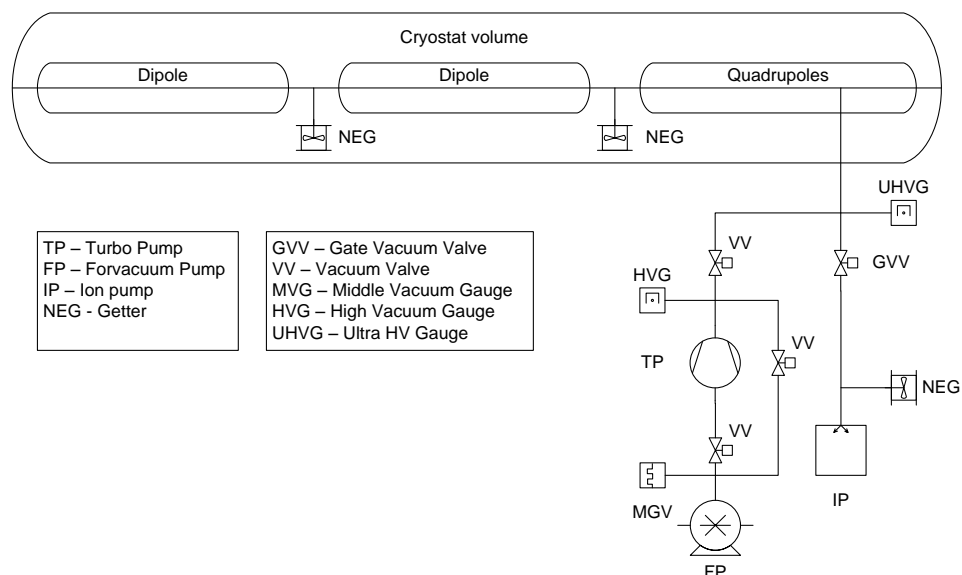


Рис. 3.5.1. Схема вакуумного поста для откачки «холодной» пучковой камеры

Пучковые камеры, которые располагаются внутри сверхпроводящих магнитов, в рабочем состоянии находятся при температуре близкой к температуре жидкого гелия ($10 \div 20$ °K). При данной температуре парциальные давления насыщенных паров практически всех элементов ниже 10^{-11} Торр за исключением неона, гелия и водорода, что позволяет использовать стенки этих камер в качестве криогенных насосов. Гелий может появляться в пучковых камерах в основном из изоляционного объёма через вакуумные уплотнения, что возможно избежать при качественной сборке вакуумной системы.

Водород поступает в камеру непосредственно из материалов вакуумных камер и требует дополнительных средств откачки, распределённых вдоль пучковой камеры Бустера. В качестве средства откачки водорода предполагается использование нераспыляемых геттеров (NEG — non evaporable getter), расположенных по возможности во всех промежутках между сверхпроводящими магнитами (в том числе и в вакуумных постах). В промежутках вне вакуумных постов геттерные насосы располагаются непосредственно в вакуумных камерах устройств, которые находятся в данных промежутках (пикап станции, ВЧ станции, кикеры и т.д.).

Геттерные насосы не работают при температурах близких к температуре жидкого гелия, для чего необходимо обеспечить тепловую развязку вакуумной камеры геттера, чтобы обеспечить поддержание температура геттера на уровне температуры жидкого азота 77 °K (-196 °C). Эта же тепловая развязка должна позволить производить активацию геттеров при температуре $250 \div 350$ °C в течение нескольких часов перед захолаживанием ускорителя

Вакуумные посты вакуумной откачки изоляционного объёма располагаются только в тех местах, где имеется «холодная» вакуумная камера (Рис. 3.5.2). Посты предварительной откачки изоляционного

объёма могут быть выполнены как в виде стационарных, так и передвижных вакуумных постов. Необходимый предельный вакуум изоляционного объёма составляет 10^{-7} Торр.

Для всех вакуумных постов необходимо подвести воздух высокого давления 6 атм для обеспечения работы вакуумной арматуры: шиберы, затворы и т.д. Источники питания и блоки управления вакуумными насосами должны находиться снаружи за радиационной защитой. Для соединения с насосами используются специальные кабели, номинальная длина которых составляет $20 \div 30$ м, максимальная длина 50 м. Данное ограничение накладывает требование, что источники питания и блоки управления вакуумных насосов должны располагаться в специальных шкафах управления снаружи радиационной защиты равномерно по кольцу. Расстояние между шкафами управления и, соответственно, расстояние между поперечными кабельными каналами в радиационной защите не должно превышать расстояние 50 м. Шкафы управления для вакуумного оборудования должны находится в условиях, соответствующих стандартным условиям для размещения электронного оборудования: температурный интервал $15 \div 40$ °С, влажность $30 \div 80$ %.

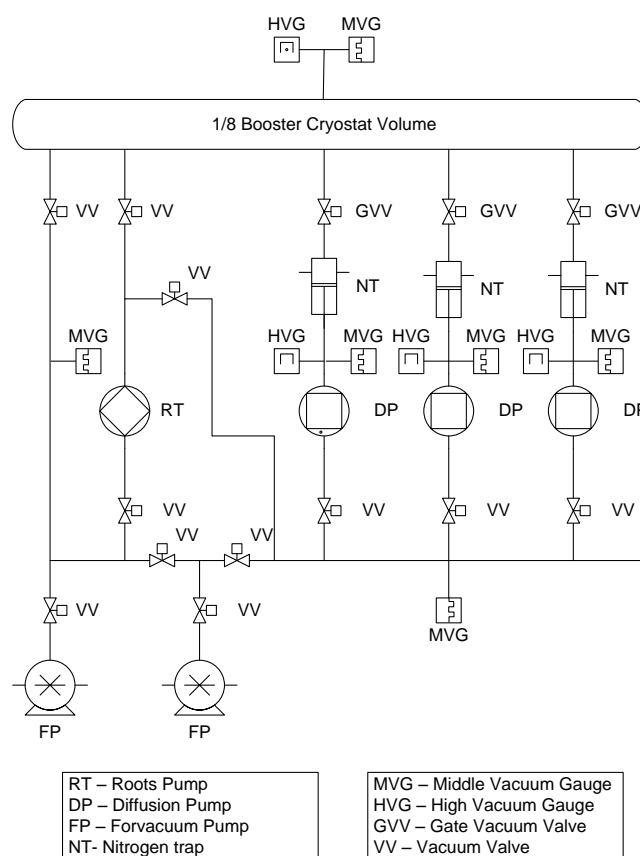


Рис. 3.5.2. Схема откачки изоляционного объёма для 1/8 периметра кольца

Состав вакуумных постов представлен в Таблице 3.5.1. Наименование использованного оборудования может быть изменено в ходе проработки вакуумных схем. Количество вакуумных постов представлено в Таблице 3.5.2 с учётом вакуумных постов для откачки прямолинейных участков (по 2 дополнительных поста на 2 «холодных» и 2 «тёплых» участка).

Таблица 3.5.1. Состав вакуумных постов Бустера

		Оборудование вакуумного поста	Пример	Количество на пост
Изоляционный объём	Предварительная откачка	Насос типа Рутса	Okata500	1
		Форвакуумный	DUO	2
		Шибер	VAT	2
		Арматура		
		Измерение		
	Высоковакуумная откачка	Диффузионный		1
		Шибер	VAT	1
		Азотная ловушка		1
		Арматура		
		Измерение		
Пучковая камера	Холодная камера	Турбомолекулярный	HiPace	1
		Ионно-геттерный	NEXTorr	1
		Форвакуумный	DUO	1
		Шибер	VAT	2
		Арматура		
		Измерение		
	Тёплая камера	Турбомолекулярный	HiPace	1
		Ионно-сублимационный	Vaclon Plus	1
		Форвакуумный	DUP	1
		Шибер	VAT	2
		Арматура		
		Измерение		

Таблица 3.5.2. Общее количество вакуумных постов Бустера

Вакуумный пост	Кол-во постов
Предварительной откачки изоляционного объёма	8
Высоковакуумной откачки изоляционного объёма	24
«Холодной» пучковой камеры	28
«Тёплой» пучковой камеры	4
ИТОГО	

3.5.3 Технические требования на изготовления пучковых камер

Для изготовления высоковакуумных камер должны использоваться материалы, которые с одной стороны имеют низкое значение парциальных давлений насыщенных паров при комнатной температуре (менее 10^{-9} Торр), т.к. до захлаживания до криогенных температур вакуумные камеры находятся при комнатной температуре при давлении остаточного газа порядка 10^{-8} Торр. Наличие материалов с высоким значением парциальных давлений насыщенных паров приведёт к их распространению по всему периметру Бустера и затруднит достижение сверхвысокого вакуума даже после захлаживания до криогенных температур.

С другой стороны материалы вакуумных камер и их соединений должны выдерживать охлаждение до криогенных температур, которое осуществляется в течение нескольких суток.

При изготовлении вакуумных камер стенки камер должны быть подготовлены в соответствии со стандартами на изготовление высоковакуумных изделий, а сами вакуумные камеры должны

проходить предварительный отжиг в вакуумных печах при температуре от 900 °С в течение 2 часов, что позволит существенно снизить натекание водорода из материалов вакуумных камер.

Если вакуумные материалы не позволяют производить предварительных отжиг при температуре 900 °С, то применение таких изделий может потребовать установку дополнительных средств откачки, что специально должно согласовываться с ответственными за вакуумную систему.

Вакуумные камеры, находящиеся в рабочем режиме при криогенных температурах, не требуют предварительного прогрева перед захлаживанием всего ускорителя. Вакуумные камеры, находящиеся в рабочем режиме при комнатной температуре (вакуумные посты, каналы транспортировки пучка в/из Бустера и т.д.), должны прогреваться при температуре не менее 250 °С в течение 36 часов после каждого вскрытия объёма на атмосферу.

Перед вскрытием пучковых камер необходимо напустить сухой азот путём испарения из жидкой фазы. Не допускать длительного нахождения (более суток) пучковых камер под атмосферой. При любых высоковакуумных работах на ускорителе необходимо использовать передвижную «чистую» комнату для предотвращения попадания пыли внутрь пучковой камеры.

3.6 ВЧ СИСТЕМА

3.6.1 Введение

Ускоряющая система Бустера ускорительного комплекса NICA для тяжёлоионной программы предназначена для ускорения ионов $^{197}\text{Au}^{31+}$, инжектируемых из линейного ускорителя при энергии 3,2 МэВ/н, до энергии 600 МэВ/н (578 МэВ/н) с последующим переводом ускоренного сгустка в Нуклотрон. Параметры ускоряющей системы Бустера для тяжёлоионной программы приведены в Таблице 3.6.1. Система должна обеспечивать следующие режимы работы:

- адиабатический захват в режим ускорения и ускорение до энергии ~ 65 МэВ/н на пятой гармонике частоты обращения);
- выход на стол магнитного поля для электронного охлаждения;
- адиабатический захват и ускорение охлаждённого пучка на первой гармонике частоты обращения;
- перевод одиночного сгустка из Бустера, его согласование с продольным акцептансом Нуклотрона.

Таблица 3.6.1. Параметры ускоряющей системы Бустера

Параметр	
Энергия инжекции из ЛУ в Бустер, МэВ/н	3,2
Разброс по энергии инжектируемого в Бустер пучка, кэВ/н	20
Импульсный разброс инжектируемого пучка ($\pm 2\sigma$)	$\pm 0,002$
Диапазон перестройки частоты, МГц	0,5 ÷ 2,65
Номер гармоники	5/1
Внешний диаметр резонатора, м	< 1,2
Размеры вакуумной камеры (диаметр), мм	160
Длина резонатора, м	≤ 2
Количество резонаторов	2
Максимальная скорость роста магнитного поля, Тл/с	1,2
Минимальная амплитуда напряжения при адиабатическом захвате, В	100
Максимальная амплитуда при ускорении, кВ	10
Амплитуда напряжения при перепуске сгустка в Нуклотрон, кВ	0,1 ÷ 10

Временной режим работы Бустера в качестве инжектора Коллайдера NICA предполагается таковым: 44 последовательных циклов ускорения, с длительностью ненулевого магнитного поля ~ 3 с сопровождаемых паузой длительностью не менее 20 мин. В течение цикла изменения поля ВЧ система работает на участках роста поля, суммарная длительность которых составляет $\sim 1,6$ с. Подробное описание режима ускорения ионов в Бустере приведено в Приложении 3.5.

Также предусмотрен автономный режим работы станций. В этом режиме при суммарном напряжении станций 10 кВ частота перестраивается в пределах 0,5 ÷ 5,5 МГц. Цикл ускорения в этом режиме будет длиться 1,5 с, период повторения цикла — 6 с. Предполагается, что после ускорения ионов будет осуществляться их медленный вывод из Бустера в каналы для физических экспериментов.

3.6.2 Ускоряющий резонатор

Ускоряющий резонатор образован двумя отрезками короткозамкнутых коаксиальных линий, разделённых ускоряющим зазором (Рис. 3.6.2). В зазоре установлен вакуумно-плотный керамический изолятор 6. Вакуумная камера и изолятор находятся под вакуумом, в остальной части резонатора — воздух. Основные параметры резонатора даны в Таблице 3.6.2.

Таблица 3.6.2. Основные параметры резонатора

Параметр резонатора	
Частотный диапазон, МГц	0,5 ÷ 5,5
Напряжение на зазоре станции, кВ	5
Диаметр вакуумной камеры, мм	160
Вакуум не хуже, Торр	$5 \cdot 10^{-11}$
Внешний диаметр станции, м	1,2
Установочная длина, м	1,4
Активная часть проводимости, приведённая к зазору резонатора, кОм	1

Для повышения шунтового сопротивления резонатора при работе на частотах в диапазоне от сотен килогерц до единиц МГц пространство между проводниками коаксиала заполняют материалом с

большой магнитной проницаемостью. В случае использования ферритов для перестройки резонансной частоты резонатора в рабочем диапазоне в процессе ускорения частиц требуется регулируемый источник тока подмагничивания и система обратной связи.

В Бустере рабочая частота изменяется более чем в 10 раз. В этом случае требуется изменять магнитную проницаемость более чем в 100 раз, что затруднительно.

С появлением аморфных материалов на основе железа и кобальта, сохраняющих большую магнитную проницаемость на частотах более 10 МГц вместо ферритов используют этот материал. В этом случае не требуется системы подмагничивания и обратных связей, большая допустимая амплитуда магнитной индукции позволяет строить компактные ускоряющие резонаторы. Однако при этом предъявляются повышенные требования к мощности выходного каскада генератора ВЧ.

В ускоряющих станциях Бустера используется аморфный материал на основе железа марки 5В-М отечественного производства. Кольца произведены в России на Ашинском металлургическом заводе. Размеры кольца $D \times d \times h = 500 \times 250 \times 15$ мм. Для использования в резонаторах технология стандартного материала 5В была доработана. В качестве опорного параметра заводу было выставлено требование получить для таких колец модуль относительной магнитной проницаемости μ_r на частоте 1 МГц не ниже 2000. Это требование было выполнено.

На графике Рис. 3.6.1 показана зависимость μ_r таких колец от частоты. Эта зависимость хорошо аппроксимируется формулой:

$$\mu_r = 2206 \cdot F^{-0.743}.$$

Здесь F — частота в МГц.

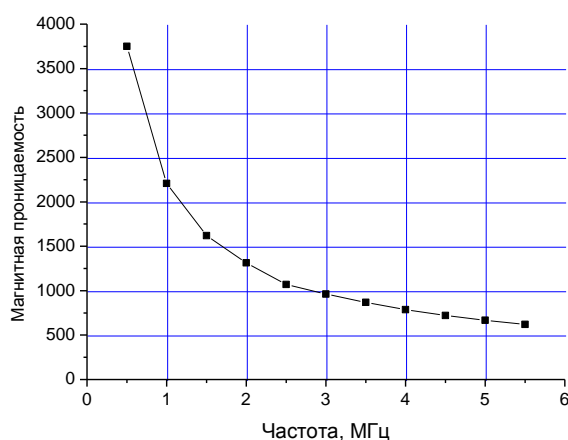


Рис. 3.6.1. Зависимость модуля магнитной проницаемости от частоты

Фазовый угол между намагничивающим током и напряжением с измерительного витка на кольце находится в пределах $10 \div 20$ градусов, так что можно считать, что нагрузка для намагничивающего тока почти активная.

В резонаторе кольца 1 (Рис. 3.6.2) склеены попарно и закреплены в обоймах, прикреплённых к наружной цилиндрической стенке резонатора. Между соседними парами колец есть зазор 10 мм для протока охлаждающего воздуха. Используется часть воздушного потока от вентилятора, охлаждающего генераторные лампы.

Воздух проходит из генераторного отсека через соединительный патрубок 5 и идёт далее между внутренним проводником коаксиала 4 и внутренней поверхностью колец, распределяясь между зазорами.

Пройдя зазор в радиальном направлении, воздух выходит наружу через отверстия в наружной цилиндрической и торцевой стенках резонатора.

При работе в штатном режиме средняя рассеиваемая мощность в кольцах резонатора ~ 3 кВт. Через патрубок 5 также осуществляется возбуждение резонатора от генератора мощности.

Для получения необходимого вакуума производился прогрев вакуумной камеры при температуре $+300$ °С. Нагревательный кабель ВИС $1 \times 0,63$ намотан непосредственно на камеру 3 (Рис. 3.6.2), теплоизоляция предохраняет остальные элементы резонатора от перегрева. Контроль температуры производится с помощью термопар. В результате прогрева получен вакуум $3 \cdot 10^{-11}$ Торр.

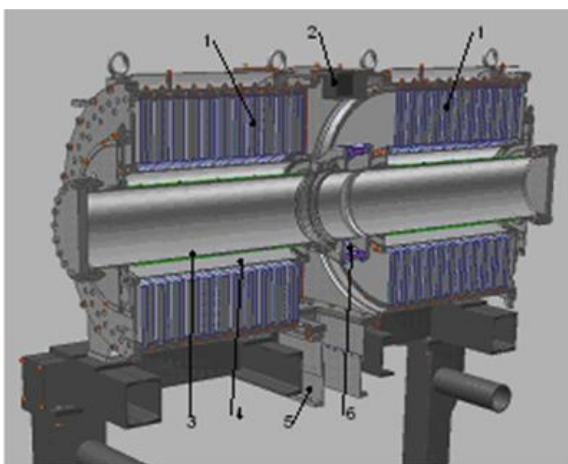


Рис. 3.6.2. Ускоряющий резонатор ВЧ станции

3.6.3 Усилитель ВЧ мощности

В выходном каскаде усилителя установлены два тетрода ГУ-36Б-1 производства ЗАО «С.Е.Д.-СПб», Санкт-Петербург, Россия. Лампы работают с противофазным возбуждением по схеме с общим катодом. Охлаждение ламп — воздушное.

Аноды ламп через блокировочные конденсаторы Сб (Рис. 3.6.3) подключены непосредственно к ускоряющему зазору резонатора. Источник анодного питания $V_a = +4.5$ кВ подключён к анодам через дроссель Др., выполненный на двух ферритовых кольцах размером $180 \times 110 \times 20$. Магнитная проницаемость материала колец — 1000. Тип используемой катушки также позволяет подавить чётные гармоники ускоряющего напряжения в зазоре.

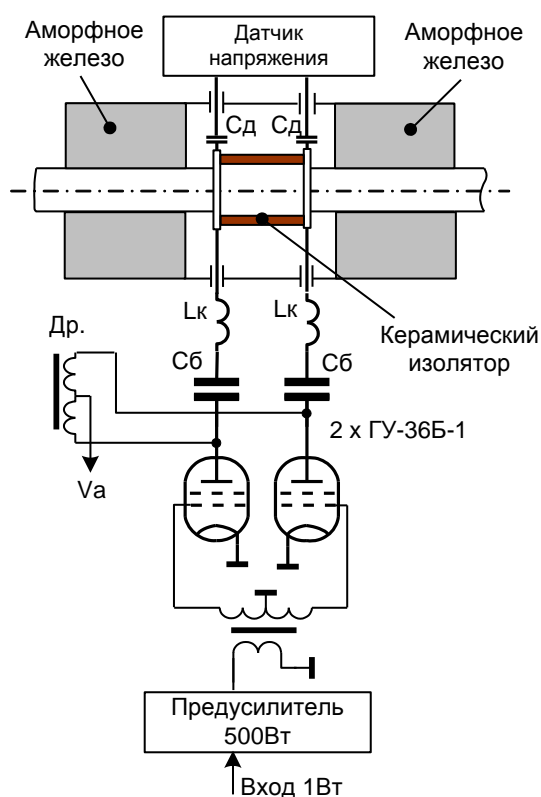


Рис. 3.6.3. Блок-схема генератора ВЧ

Лампы возбуждаются противофазно от полупроводникового предусилителя с максимальной выходной мощностью 500 Вт. Максимальная мощность на входе предусилителя — 1 Вт. При испытании станций выходная мощность предусилителя не превышала 200 Вт.

Для уменьшения нелинейных искажений ускоряющего напряжения лампы работают в цикле в режиме, близком к классу А. В паузе между циклами лампы должны быть заперты для уменьшения средней мощности, рассеиваемой на анодах.

Кроме того, так как модуль сопротивления нагрузки ламп изменяется в частотном диапазоне почти в два раза, для уменьшения средней мощности, рассеиваемой на анодах ламп постоянная составляющая анодного тока в цикле ускорения регулируется по заданной программе с помощью цепи обратной связи. На частотах с меньшим сопротивлением нагрузки постоянная составляющая увеличивается. Опорное напряжение для этой цепи вырабатывает ЦАП в системе управления.

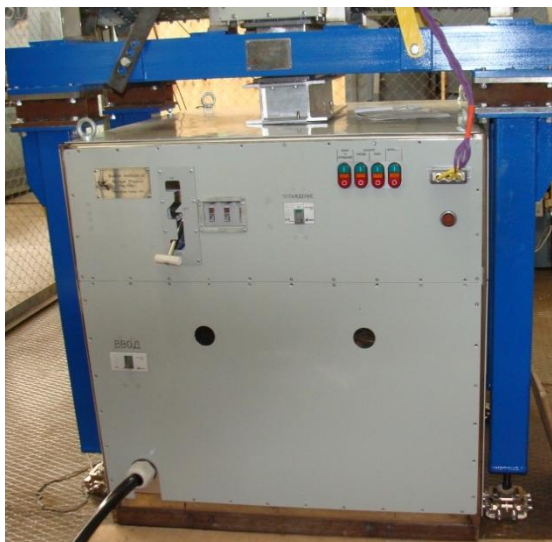


Рис. 3.6.4. Внешний вид усилителя ВЧ мощности

Импеданс резонатора, приведённый к ускоряющему зазору в значительной степени определяется распределённой ёмкостью линии, заполненной кольцами из аморфного железа и ёмкостью изолятора. При этом на краю частотного диапазона 5,5 МГц эта ёмкость сильно шунтирует ускоряющий зазор резонатора и анодного тока лампы оказывается недостаточно для обеспечения необходимого ВЧ напряжения.

Проблема устраняется коррекцией частотной характеристики импеданса, приведённого к анодам ламп. Для этого между анодами и точками подключения к резонатору последовательно с блокировочными конденсаторами включены корректирующие индуктивности $L_k \sim 10$ мкГн. Максимальная постоянная составляющая тока анода при этом не превышает 8 А на частоте 3,3 МГц, а по краям частотного диапазона ток не более 5 А. Средняя мощность, рассеиваемая на анодах ламп — 4.9 кВт при допустимом значении 15 кВт.

3.6.4 Система управления

Малосигнальная аппаратура управления обеими станциями размещена в стойке SCHROFF высотой 2000 мм. Цепи управления с помощью цепей обратной связи регулируют амплитуду ускоряющего напряжения, постоянную составляющую тока анодов ламп, защищают мощные элементы станции и персонал при возникновении аварийных ситуаций.

Датчик ускоряющего напряжения в резонаторе — ёмкостной делитель. Ёмкость делителя, подключённая к зазору $C_d = 4.7$ пФ мала, поэтому при согласовании с низким сопротивлением нагрузки возникают амплитудные и фазовые искажения сигнала. Эквивалентная схема цепи датчика показана на Рис. 3.6.5 а. Здесь C — параллельная ёмкость делителя, R — сопротивление нагрузки. Коэффициент передачи этой цепи можно записать:

$$K1 = \frac{j\omega RC}{1 + j\omega RC}$$

Эти частотные искажения можно откорректировать цепью на основе схемы 5b, подключённой к выходу 5а. Коэффициент передачи этой цепи является обратным по отношению к цепи 5а:

$$K2 = \frac{1 + j\omega RC}{j\omega RC}$$

Корректирующий усилитель находится в стойке управления.

Продетектированное напряжение от корректирующего усилителя вместе с опорным напряжением от ЦАП подаётся на усилитель сигнала ошибки (УСО). Выход УСО управляет амплитудой ВЧ напряжения, поступающей на вход предусилителя. Регулирующий элемент — микросхема AD834JR. Постоянная времени этой цепи обратной связи 150 мкс.

Постоянная составляющая тока анодов измеряется датчиками на основе элементов Холла. Сигналы с датчиков от каждой лампы вместе с опорным напряжением от ЦАП приходят отдельно в 2 УСО, выходы которых регулируют постоянные составляющие смещения первых сеток ламп. Опорное напряжение от ЦАП — общее для обеих цепей обратной связи. Постоянная времени регулирования ~ 1 мс.

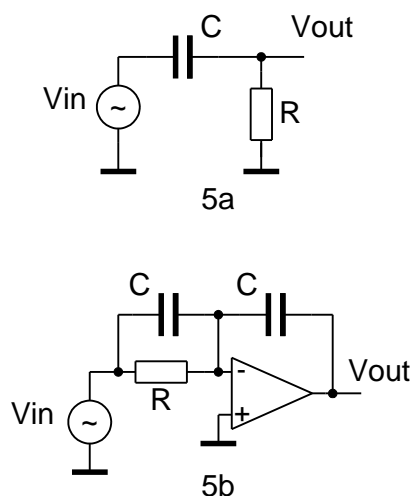


Рис. 3.6.5. Эквивалентная схема цепи датчика ускоряющего напряжения в резонаторе

В этой же стойке установлен крейт с компьютерным управлением. Он включает контроллер, связанный с центром управления ускорителя по сети ETHERNET. Контроллер управляет: задающим генератором рабочей частоты станций с использованием технологии DDS. Частота изменяется в зависимости от сигналов синхронизации, от роста ведущего магнитного поля ускорителя, а также производится коррекция частоты по сигналам от пикап-электродов, установленных в вакуумной камере ускорителя.

Особенностью задающего генератора является использование двухканальной микросхемы DDS. Каждый из каналов микросхемы работает на свою станцию. Каналы используют общий тактовый генератор и частота их выходных сигналов управляется по одной программе. Имеется возможность задавать между каналами фазовый сдвиг, так что выходные сигналы DDS сдвинуты по фазе между собой на одну и ту же величину во всем частотном диапазоне. Это сделано, чтобы обеспечить правильную фазировку ускоряющих напряжений при любом взаимном положении ВЧ станций в кольце ускорителя.

- ЦАП для задания ускоряющего напряжения и постоянной составляющей тока анодов.
- АЦП для измерения режимов работы станций.
- управляющими и входными регистрами для задания и контроля режимов работы станций.

3.6.5 Конструкция станции

Резонатор станции установлен на 4-х опорах (см. Рис. 3.6.6). Под резонатором размещён ВЧ генератор в общем экране со всеми источниками питания и управления.



Рис. 3.6.6. ВЧ станция на испытательном стенде

3.7 СИСТЕМА ЭЛЕКТРОННОГО ОХЛАЖДЕНИЯ

3.7.1 Основные параметры

Система электронного охлаждения Бустера предназначена для манипулирования с фазовым объемом ионного пучка $^{197}\text{Au}^{31+}$, как на энергии инжекции 3,2 МэВ/н в Бустер при схеме многократной инжекции, так и после ускорения ионов до некоторой промежуточной энергии порядка $65 \div 100$ МэВ/н для формирования необходимых параметров ионного пучка (Рис. 3.7.1). Время охлаждения на энергии инжекции 3,2 МэВ/н будет определяться схемой многократной инжекции. Время перестройки энергии электронного пучка с 1,5 кВ на 55 кВ составляет 0,4 с. Время охлаждения на промежуточной энергии ионов $65 \div 100$ МэВ/н составляет 1 с.

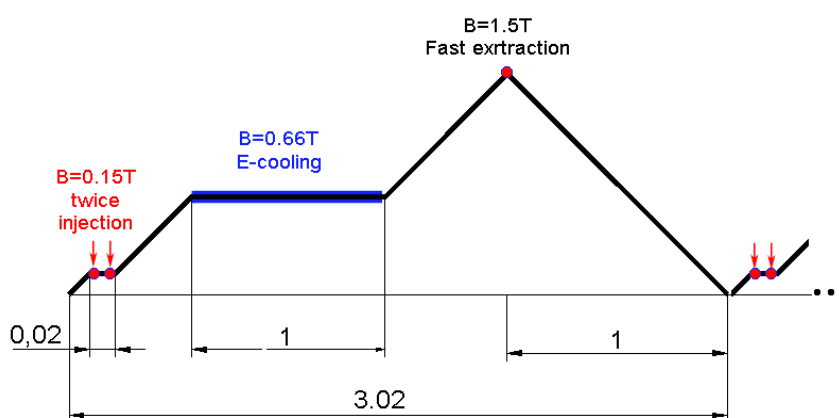


Рис. 3.7.1. Цикл работы Бустера

Система электронного охлаждения включает в себя следующие элементы (Рис. 3.7.2):

1. Электронная пушка, работающая в постоянном режиме.
2. Магнитные катушки поперечного поля и/или электростатические пластины для коррекции дрейфа электронов в поворотных торах.
3. Тороидальные соленоиды для совмещения траектории электронов с орбитой ионного пучка.
4. Прямолинейный соленоид, в секции которого происходит процесс охлаждения ионов электронами.
5. Магнитный экран для создания необходимой однородности поля в прямолинейной секции.
6. Коллектор электронов, который находится под потенциалом близким к катоду электронной пушки, что позволяет системе охлаждения работать в режиме рекуперации энергии.

7. Дипольные магниты для коррекции орбиты ионного пучка, которые компенсируют влияние поворотных торов на траекторию ионов.
8. Ионный канал Бустера, проходящий сквозь поворотные торы.
9. Две пикап станции на входе и выходе из прямолинейного соленоида для диагностики электронного пучка.

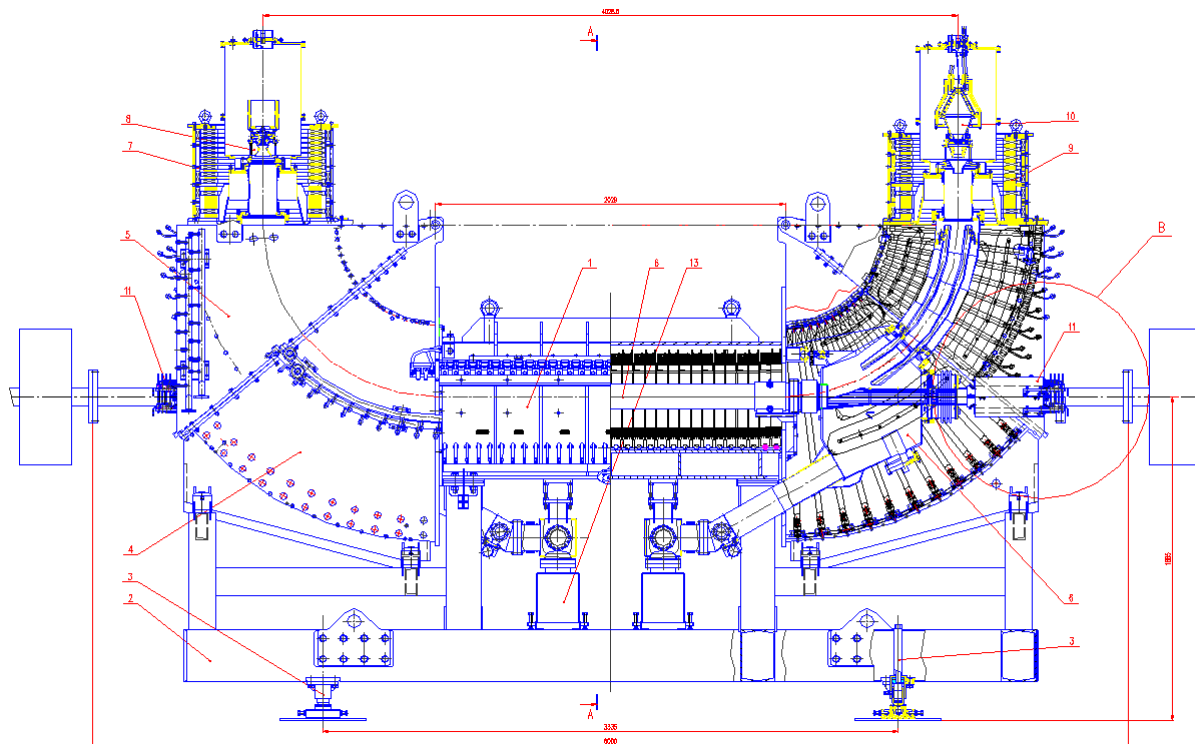


Рис. 3.7.2. Система электронного охлаждения Бустера

Электронная пушка полностью погружена в продольное магнитное поле, чтобы обеспечить необходимую однородность поля на катоде пушки. Коллектор электронов расположен в спадающем магнитном поле, причём вход в коллектор расположен примерно на краю соленоида. Изменение магнитного поля в пушке и коллектора осуществляется независимо друг от друга и от других элементов магнитной системы охладителя.

Таблица 3.7.1. Основные параметры системы электронного охлаждения Бустера

Энергия электронов, кэВ	1,5 ÷ 60
Точность регулировки энергии и её стабильность, $\Delta E/E$	$\leq 1 \cdot 10^{-5}$
Потенциал коллектора относительно катода, кВ	0,5 ÷ 2,0
Ток электронного пучка, А	0,2 ÷ 1,0
Стабильность тока пучка, $\Delta I/I$	$\leq 1 \cdot 10^{-4}$
Ток потерь электронного пучка, $\delta I/I$	$\leq 3 \cdot 10^{-5}$
Выделяемая мощность на катоде, Вт	100
Максимальная выделяемая мощность в коллекторе, Вт	2000
Длина прямолинейного соленоида, мм	2522
Полная длина системы охлаждения, мм	5715
Диаметр катода электронной пушки, см	3,0 ÷ 5,0
Продольное магнитное поле, Тл	0,1 ÷ 0,2
Однородность магнитного поля в районе катода, $\Delta B/B$	$< 10^{-3}$
Однородность в прямолинейном соленоиде, $\Delta B/B$	$< 3 \cdot 10^{-5}$
Вакуум в районе катода, Торр	$< 10^{-9}$
Вакуум на участке охлаждения, Торр	$< 10^{-10}$
Длина, мм	6000
Высота, мм	4000
Ширина, мм	1500

Основным требованием к качеству магнитного поля соленоидов является однородность магнитного поля в прямолинейном соленоиде секции охлаждения лучше, чем $\Delta B/B = 3 \cdot 10^{-5}$. Для этого вся система соленоидов располагается внутри магнитных экранов с достаточной толщиной, чтобы не было насыщения железа вплоть до максимальной величины поля в соленоидах. Необходимо также провести измерение однородности магнитного поля в прямолинейном соленоиде секции охлаждения.

Система электронного охлаждения располагается в центре четвёртого прямолинейного промежутка Бустера (Рис. 3.7.3). Основное оборудование (источники питания, шкафы управления) расположено в цокольном этаже вблизи системы электронного охлаждения (Рис. 3.7.4).

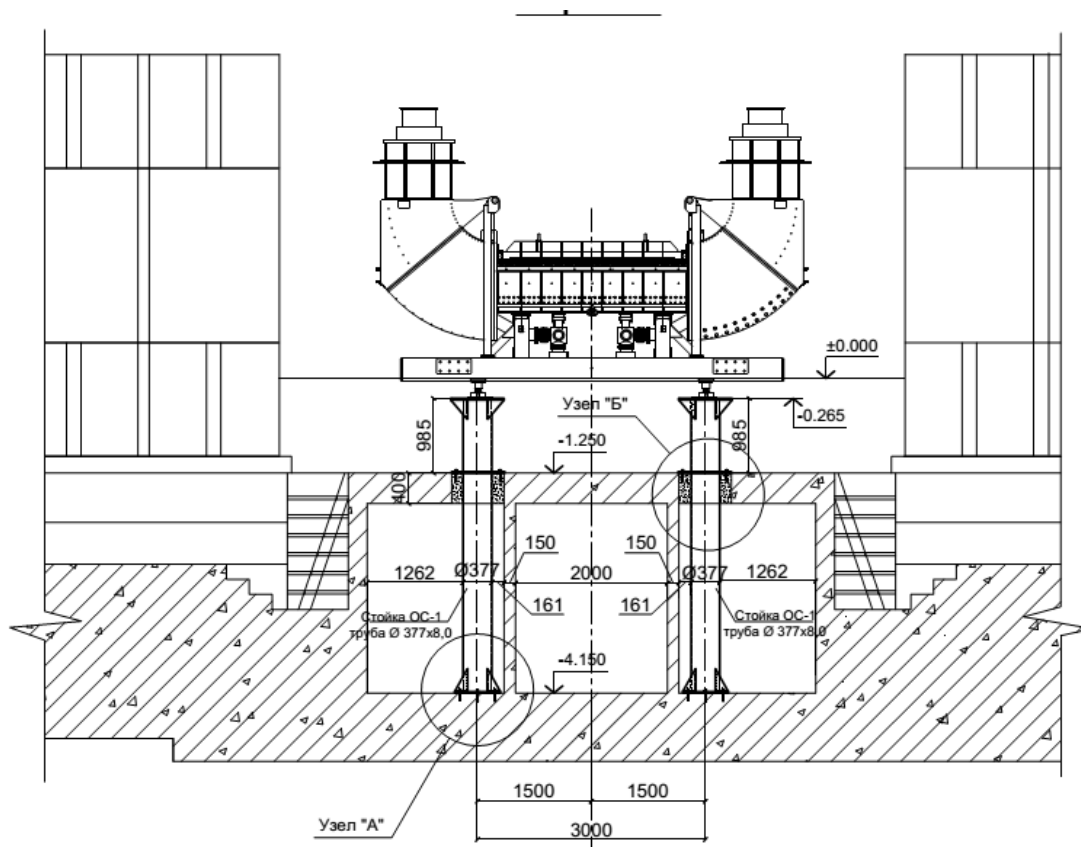


Рис. 3.7.3. Расположение в центре четвёртого прямолинейного промежутка Бустера

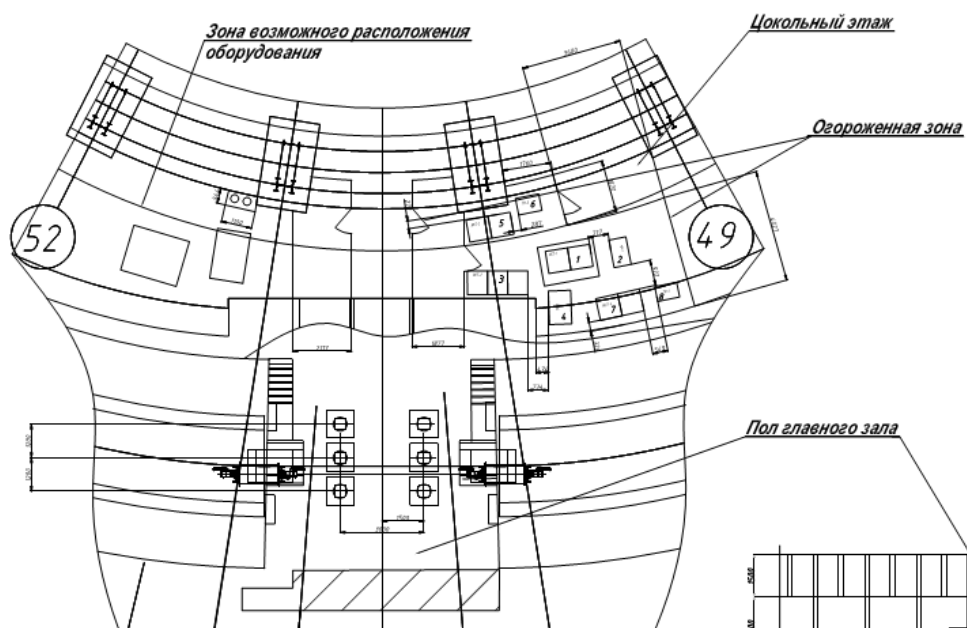


Рис. 3.7.4. Расположение основного оборудования (источники питания, шкафы управления) в цокольном этаже вблизи системы электронного охлаждения

3.7.2 Магнитная система

В установках электронного охлаждения, пучок электронов проходит свой путь от катода электронной пушки до поглощающего коллектора в непрерывном продольном магнитном поле.

Два относительно коротких соленоида позволяют сформировать электронный пучок с нужными

параметрами при его ускорении после выхода из пушки и торможении перед входом в коллектор. Тороидальные участки магнитной системы служат для поворота электронного пучка и проводки его от соленоида пушки к соленоиду охлаждения с целью сведения его с ионным пучком, а так же последующего разведения и проводки к соленоиду коллектора, после их взаимодействия. Центральный соленоид является одной из основных частей установки электронного охлаждения. В нем, собственно, и происходит взаимодействие охлаждаемого ионного пучка с электронным. В ещё одну секцию можно сгруппировать набор разнообразных корректирующих обмоток, распределённых вдоль траектории электронного пучка и предназначенных для её выравнивания, а так же дипольные корректоры, устраняющие искажения орбиты ионного пучка, возникающие вследствие наличия вертикальной компоненты поля в тороидальной части магнитной системы.

Требования на качество магнитного поля различны для различных частей установки. Наиболее они высоки для участка охлаждения — центрального соленоида. Эффективность процесса охлаждения в сильной степени зависит от качества ведущего магнитного поля, создаваемого этим соленоидом. Приемлемые скорости охлаждения могут быть достигнуты, если непараллельность, по отношению к оси соленоида, силовых линий поля B_{\perp}/B_{\parallel} в окрестности ионных траекторий не превышает величины углового разброса ионного пучка. Стремление получить предельно высокие скорости охлаждения в уже охлаждённом ионном пучке предъявляет жёсткие требования к прямолинейности силовых линий — от 10^{-4} для малых энергий электронов до величин 10^{-5} и меньше — для высокоэнергичных электронных пучков. Для достижения этих высоких требований была разработана специальная конструкция центрального соленоида, а так же методика коррекции неоднородности магнитного поля и прецизионная система его измерения.

Таблица 3.7.2. Параметры катушек и источников их питания рассчитаны на величину ведущего (продольного) магнитного поля в 1.5 кГс

Магнитная система (источник питания)	Ток, А	Напряжение, В	Мощность, кВт	Катушки магнитных систем	Число катушек	Расход воды, л/мин
Соленоид охлаждения	248	175	44	#1-катушки соленоида	30	80
Тороиды поворотов и соленоиды переходов к пушке и коллектору	780	218	170	#2-прямоугольные катушки тороидов	11 (пушка) 11 (колл.)	107
				#3-квадратные катушки тороидов	9 (пушка) 9 (колл.)	
				#4-круглые катушки переходов	8 (пушка) 9 (колл.)	50
Соленоиды пушки и коллектора	1200	84	101	#5-круглые катушки соленоидов пушки и коллектора	12 (пушка) 7 (колл.)	131.5

- стабильность тока $2 \cdot 10^{-4}$
- расход воды в группе катушек при нагреве её на выходе катушек на 10° , суммарный расход воды около 400 л/мин

Таблица 3.7.3. Параметры катушек кулера

	#1	#2	#3	#4	#5
Сечение шины, мм × мм	8 × 8	13,5 × 13,5	13,5 × 13,5	13,5 × 13,5	13,5 × 13,5
Диаметр отверстия, мм	5	7,5	7,5	7,5	7,5
Число витков	10 × 3	12	12	12	12
Число слоёв	5	6	6	6	6
Высота намотки, мм	40+4	96	96	96	96
Ширина намотки, мм	17 × 3+	30	30	30	30
Внутренний радиус катушки, мм	195	–	–	283	283
Размеры окна катушки, см × см	–	57 × 100	57 × 57	–	–
Суммарная длина шины, м	42	41,5	31,2	25	25
Вес меди, кг	16,7	51,3	38,6	31	31
Ток I , А	248	780	780	780	1200
Плотность тока j , А/мм ²	5,63	5,65	5,65	5,91	8,7
Напряжение U , В	4,49	4,34	3,26	2,6	4,4
Потребляемая мощность P , кВт	1,12	3,38	2,54	2,04	4,83
Для перепада температуры воды между выходом и входом ΔT	10°	10°	10°	10°	10°
Расход воды, л/мин	1,6	4,86	3,65	2,93	6,92
Средняя скорость воды, м/с	1,37	1,83	1,38	1,1	2,6
Перепад давления, атм	2,8	2,72	1,24	0,67	3,04
Число Рейнольдса, ($Re_{cr} \approx 2300$)	6843	13740	10330	8280	19590
Перепад температур на границе медь-вода	$0,6^\circ$	$1,1^\circ$	$1,25^\circ$	$1,35^\circ$	$2,2^\circ$

3.7.3 Устройство и принцип действия центрального соленоида (секции охлаждения)

Каждая катушка состоит из 3-х двухслойных «блинов», склеенных через специальные проставки, к которым крепятся детали для регулировки положения катушки.

Катушки соленоида охлаждения изготавливаются в двух вариантах намотки — правовинтовая и левовинтовая. Катушки соединяются гибкими соединителями через одну. Продольная обратная шина в таком соленоиде не нужна.

На Рис. 3.7.5 приведена схема коммутации катушек с чередующимися лево и правовинтовыми переходами в 1-ом слое. Условно показаны сечения катушек на участках переходов шины. Толстыми стрелками обозначены продольные токи в 1-ых слоях катушек.

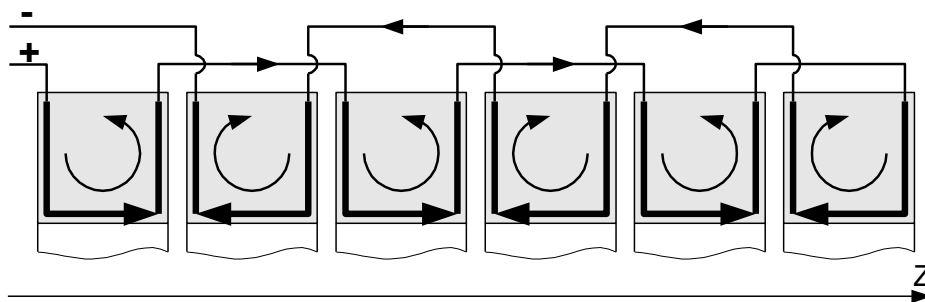


Рис. 3.7.5. Схема коммутации катушек в соленоиде без обратной шины

Центральный соленоид изготовлен двадцати девяти соединённых последовательно плоских (по отношению к диаметру намотки) катушек, закреплённых на три точки опоры относительно магнитопровода. Две из них доступны снаружи магнитопровода, что делает возможным изменение их положения в небольших пределах при помощи специальных юстировочных узлов. Благодаря зазорам между катушками они могут быть наклонены, либо повернуты на малые, (до 10 мрад), углы относительно вертикали. Это приводит к появлению вертикальной либо горизонтальной компоненты магнитного поля (проекции ведущего продольного поля).

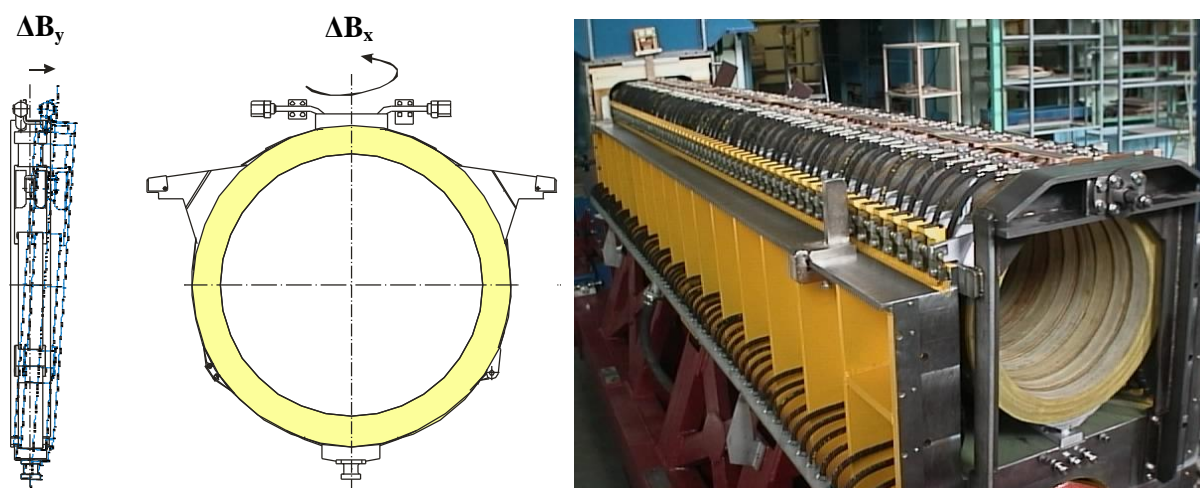


Рис. 3.7.6. Схема возникновения поперечной компоненты поля при наклоне (слева) и повороте катушки (справа)

Первичная выставка осуществляется по результатам данных измерений каждой катушки в процессе предварительного тестирования на этапе производства, где, помимо контроля качества изготовления, осуществлялось измерение отклонения магнитной оси от геометрической. Подбирая последовательность установки катушек внутри магнитопровода таким образом, чтобы погрешности изготовления соседних катушек, по возможности, компенсировали друг друга, удаётся получить однородность поля в основной части соленоида на уровне 10^{-3} . Это очень важно, поскольку такое значение неоднородности укладывается в диапазон прецизионной измерительной системы, что позволяет вести дальнейшую юстировку без дополнительных промежуточных (весьма трудоёмких) измерений с использованием корректирующих катушек.

После получения первичных измерений поля в соленоиде производится калибровка юстировочной системы, с целью поставить в соответствие смещение (наклон либо поворот) катушки и величину возникающей при этом поперечной компоненты поля. Для этого одна катушка наклоняется, либо поворачивается, в зависимости от того, какое смещение калибруется, на строго измеренный угол и измерения магнитного поля производятся ещё раз. Разность двух измерений даёт искомую калибровку. На левом графике Рис. 3.7.7 приведены результаты измерений вертикальной компоненты магнитного поля до и после наклона одной из катушек на 1мм по вертикали, что соответствует углу 0,002 радиана, а на правом Рис. 3.7.7 соответствующий отклик, который достаточно хорошо аппроксимируется гауссовой кривой.

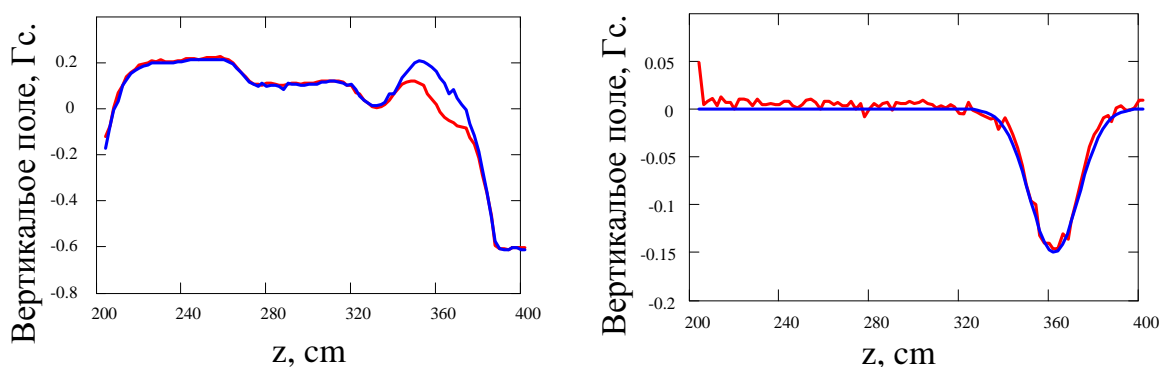


Рис. 3.7.7. Калибровка юстировочной системы. На графике слева: измерения вертикальной компоненты поля до (синяя кривая) и после (красная) наклона катушки. На графике справа: отклик и его аппроксимация гауссовой кривой

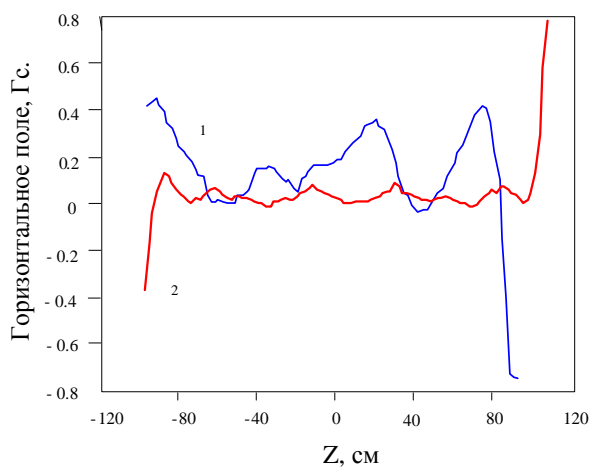


Рис. 3.7.8. Результаты измерения горизонтальной компоненты магнитного поля сразу после монтажа соленоида (кривая 1) и после нескольких итераций по коррекции положения катушек (кривая 2)

По окончательному решению каждая k -ая катушка наклоняется смещением, либо поворачивается, если корректируется горизонтальная компонента на $-y_k$. После коррекции катушек проводятся новые измерения поля. При необходимости улучшения вновь установленного поля всё повторяется заново, обычно требуется несколько итераций.

3.7.4 Прецизионная система измерения магнитного поля соленоида

Устройство этого прибора идейно опирается на конструкцию, которая применялась ранее. Первая версия разрабатывалась в ИЯФ в 1999 – 2000 гг. для настройки секций соленоида прототипа системы охлаждения, сооружаемой в Фермилаб (США). При этом, ввиду недостаточной чувствительности этого варианта при малых магнитных полях, для новых задач устройство, как магнитного датчика, так и регистрирующей системы было изменено. В дальнейшем эта версия была существенно улучшена и неоднократно применялась в ИЯФ (Рис. 3.7.9).

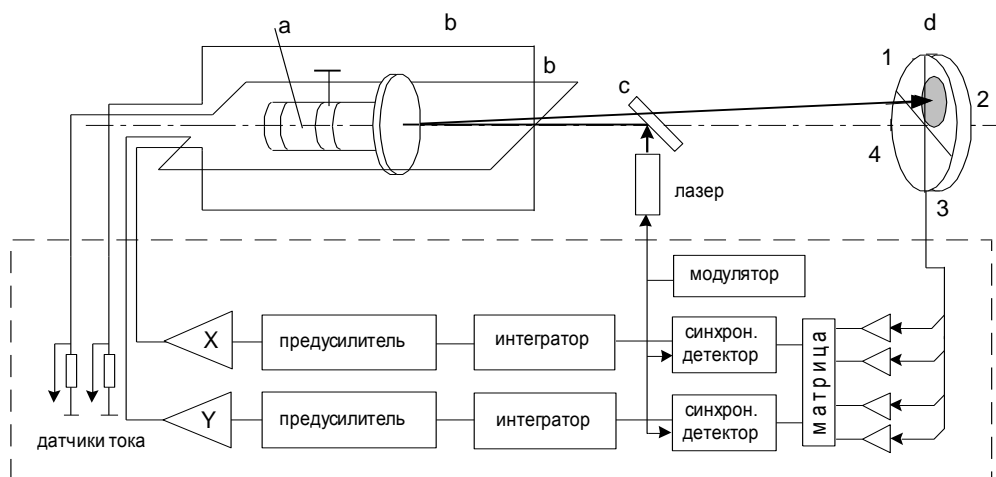


Рис. 3.7.9. Схематическое изображение измерительного устройства. Буквами обозначены: а — магнитный датчик, b — проводники компенсирующих контуров, с — светоделительная пластинка, d — фотодетектор. Внизу показан состав электронного блока, где X и Y — выходные усилители тока

Прибор функционирует следующим образом. Слаборасходящийся луч полупроводникового лазера, модулированного с частотой около 6 кГц, отражается от зеркала, закреплённого на торце магнитного стержня (а) — «стрелки» компаса, и направляется на четырёхсекторный квадрантный фотодиод (типа ФДК-142), чувствительный к положению светового пятна. Магнит подвешен на тонкой нити, закреплённой вблизи его центра тяжести, и может занимать любые положения, ориентируясь по направлению поля. Датчик окружён системой из двух взаимно перпендикулярных, ориентированных по осям координат, плоских магнитных диполей, образованных парами прямолинейных проводников (b), натянутых симметрично на определённом расстоянии вокруг оси соленоида. Диаметр чувствительной области фотоприёмника — около 13,5 мм. Показанная на рисунке светоделительная пластинка служит для разделения падающего и отражённого лучей.

Схема измерения представляет собой замкнутый контур автоматического регулирования, который включает в себя оптико-механический магниточувствительный элемент (компас) и компенсирующую систему. Смещение лазерного пятна относительно центра датчика приводит к возникновению сигнала ошибки, который воздействует на токи в проводниках, компенсируя поперечное поле, вызвавшее это смещение. При этом отражённый от зеркала луч возвращается на

оптическую линию измерения, т.е. в центр фотодетектора. По амплитудам токов определяются величины поперечных компонент магнитного поля, описывающие локальное искривление силовой линии.

Сигналы с фотодиода усиливаются четырьмя усилителями с дополнительным подавлением низкочастотных помех от посторонних источников света, и далее подаются на матрицу, преобразующую их для выработки напряжений, пропорциональных смещению светового пятна по горизонтали и по вертикали относительно центра датчика. При этом сигналы группируются по схеме $X = 1 + 4 - 3 - 2$ и $Y = 1 + 2 - 3 - 4$, где цифра соответствует номеру квадранта фотодетектора (обозначены на Рис. 3.7.9).

Сигналы с матрицы демодулируются с помощью синхронных детекторов (синхронное детектирование позволяет исключить помехи от внешней засветки фотодетектора), проходят через интеграторы, обеспечивающие устойчивость системы авторегулирования, и через буферные усилители поступают на усилители тока, в которых используются мощные полевые транзисторы. Усилители тока, нагруженные на низкоомные проводники, обеспечивали, в нашем случае, токи коррекции до 6 А при напряжении 7 В. В схеме предусмотрена возможность ручного управления токами коррекции для обеспечения захвата светового пучка в режим автоматического функционирования при больших углах наклона силовых линий, когда отражённый пучок не попадает в апертуру фотоприёмника. Принципиальным ограничением на величину тока является только чрезмерный нагрев проводников.

Детали конструкции магнитного датчика - компаса показаны на Рис. 3.7.10. Два постоянных магнита 1 цилиндрической формы с длиной и диаметром по 1 см из материала NdFeB (неодим — железо — бор), соединённые вставкой 2 из магнитно-мягкой стали, в которой расположен узел крепления нити подвески 5. К одному из торцов этого стержня приклеено зеркало 3, на другом торце закреплён противовес 4, также из магнитно-мягкой стали, с двумя парами 2 мм резьбовых отверстий, расположенных, соответственно, вдоль горизонтали и вертикали на торцевой поверхности. В эти отверстия заворачиваются небольшие винтики 6, служащие элементами настройки компаса. Масса магнитного стержня в сборе около 20 г. Нижний конец нити защёмлён специальным устройством чуть выше оси магнита. Эта сборка помещена в цилиндрический алюминиевый корпус 7 с опирающимся на него небольшим диском 9, к которому крепится верхний конец нити подвески. Вращение этого диска позволяет устранять начальное закручивание нити. Корпус является также демпфером, подавляющим свободные колебания «стрелки» компаса при его движении вдоль соленоида (без демпфера продольные колебания длятся до двух десятков секунд после остановки компаса). В качестве нити подвески вначале использовались вольфрамовые или титановые проволоки толщиной $30 \div 50$ мкм, затем — более удобная в

применении (менее упругая и значительно более долговечная) капроновая леска диаметром 0,15 мм.

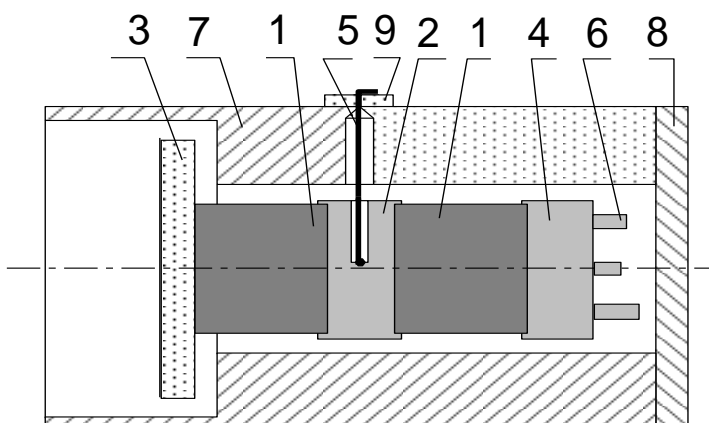


Рис. 3.7.10. Упрощённое изображение магнитного датчика-компаса. 1 — магниты, 2 — вставка, 3 — зеркало, 4 — противовес, 5 — нить, 6 — регулировочный винт, 7 — корпус, 8 — крышка, 9 — диск

Датчик-компас устанавливается на лёгкой каретке (на рисунке не показана), опирающейся восемью диэлектрическими колёсиками, расположенными, по 4, на обоих её торцах, на проводники компенсирующих контуров, которые и служат направляющими при перемещении каретки вдоль соленоида. Небольшое (единицы миллиметров) провисание проводников несущественно для соленоидов большого диаметра, имеющих значительную область в окрестности оси с практически однородным полем. Перемещение каретки обеспечивалось шаговым двигателем, продольная координата компаса (с точностью в несколько миллиметров) определяется количеством отработанных шагов. Измерение компонент поля производится при неподвижной каретке с интервалами $3 \div 4$ с, с усреднением в пределах промежутка времени порядка 10 мс. В принципе, измерения могут вестись без остановок каретки, если не требуется точной фиксации продольной координаты. Градуировка компенсирующей системы легко осуществляется как расчётным путём, так и экспериментально — прямым измерением полей при заданных токах.

3.7.5 Коррекция магнитного поля

По назначению все корректоры можно разделить на три подгруппы: коррекция поля на участке транспортировки электронного пучка, коррекция поля в секции охлаждения и компенсация орбиты ионов, выполненная в виде дипольных магнитов.

Прежде всего, нужно отметить, что чрезвычайно сложно добиться изготовления всех деталей магнитной системы с такой точностью, чтобы электронный пучок, выйдя из электронной пушки и пройдя поворот, точно попал на ось соленоида охлаждения. Для коррекции траектории электронов служит набор диполей, каждый из которых состоит из комбинации плоских обмоток. Обмотки расположены вдоль траектории поворота электронов на внутренних боковых стенках

магнитопровода. Часть корректоров создаёт горизонтальное поле, а часть — радиальное по отношению к траектории поворота. На Рис. 3.7.11, в качестве примера, приведены результаты измерения поля от горизонтальных корректоров, сделанные вдоль оси поворотного магнита (дуга с радиусом один метр). Каждый из четырёх корректоров, расположенных на разных сегментах дуги вдоль поворота, был запитан током 10 А. Поле на оси, соответственно, достигало $0.5 \div 2$ Гс, что составляет приблизительно 10^{-3} от величины продольного ведущего поля.

Изменяя ток в корректорах, можно добиться небольшого отклонения электронов по горизонтали и по радиусу поворота. Для приведённого примера это отклонение достигает $1 \div 1,5$ см для энергии электронов 40 кэВ. Система горизонтальных корректоров на участках транспортировки электронного пучка позволяет скомпенсировать дрейф, возникающий вследствие действия центробежной силы. Но, для этой же цели используются электростатические пластины.

Если в поворотных магнитах небольшие неоднородности магнитного поля в $1 \div 2$ Гс не создают никаких проблем, то в секции охлаждения, такие поперечные поля могут сильно повлиять на процесс охлаждения. Юстируя катушки центрального соленоида (как описано выше) можно добиться однородности магнитного поля на уровне 10^{-4} и лучше, как, например, изображено на кривой 1 Рис. 3.7.12. Однако если поменять величину ведущего поля, появляется заметная вертикальная компонента. Это происходит из-за проникновения вертикальной компоненты поля поворотного магнита (тороида) внутрь соленоида охлаждения.

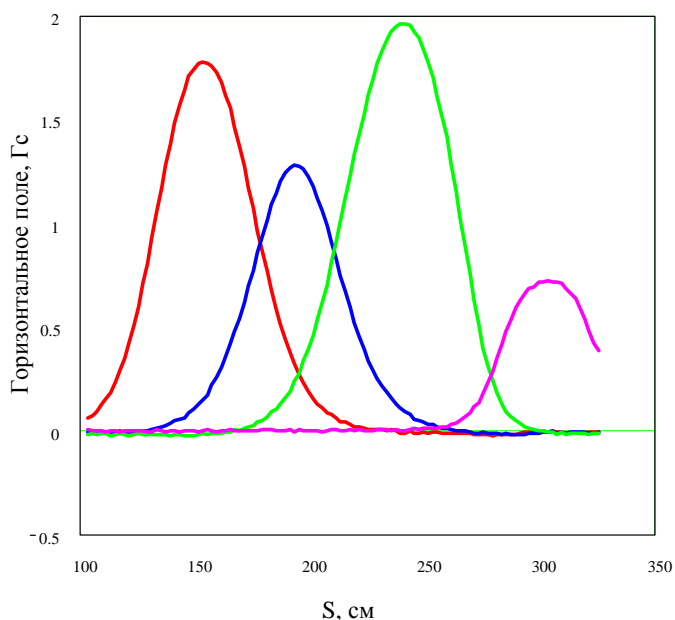


Рис. 3.7.11. Горизонтальное магнитное поле вдоль траектории поворота электронов. Кривые показывают значение поля на оси

При использовании в качестве рабочего ведущего магнитного поля той же величины, при которой производилась юстировка катушек, никаких дополнительных мер принимать не нужно. Однако,

62

если по условиям эксперимента требуется изменение ведущего поля, необходимо считаться с действием вертикальной компоненты поля. Для её компенсации применяется корректирующая катушка с линейно меняющейся густотой витков, намотанная вдоль основного соленоида. Форма создаваемого ей поля отражена на кривой 3 Рис. 3.7.13.

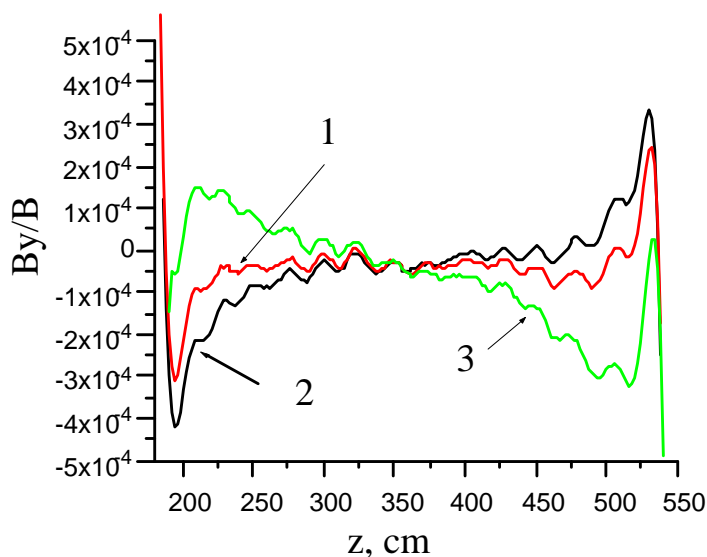


Рис. 3.7.12. Результаты измерения вертикальной компоненты магнитного поля на оси соленоида охлаждения. 1 — поле соленоида 750 Гс, 2 — 1000 Гс, 3 — 500 Гс

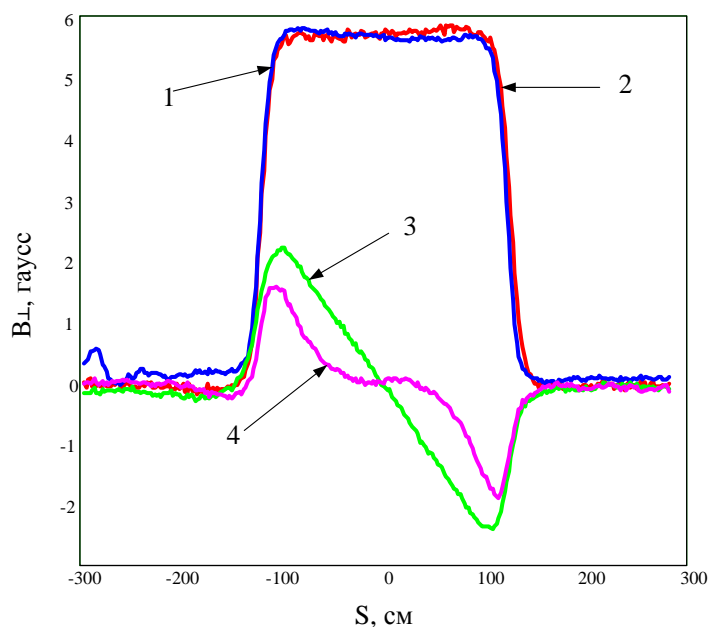


Рис. 3.7.13. Поперечные компоненты поля на оси соленоида, создаваемые различными корректирующими обмотками. 1, 2 — поле вертикальной и горизонтальной катушек нацеливания, 3 — вертикальное поле линейной коррекции, 4 — вертикальное поле кубической коррекции

Для коррекции положения электронного пучка внутри соленоида и сведения его с ионным пучком, используются горизонтальная и вертикальная обмотки, намотанные вдоль основного соленоида и создающие однородное поля, соответствующего направления (кривые 1 и 2).

Проходя через магнитную систему установки электронного охлаждения, ионный пучок испытывает удар на входе и выходе из-за наличия сильной вертикальной компоненты магнитного поля в поворотных магнитах. Для коррекции ионной орбиты в этой области используются дипольные корректоры. Магниты выполнены по классической схеме, однако несколько необычным является их расположение. Ярмо магнита сильно задвинуто внутрь тороидального поворотного участка. Это позволило сильно сократить поперечный размер вакуумной камеры, поскольку компенсация поперечного смещения ионного пучка происходит практически сразу после прохождения им участка разведения пучков.

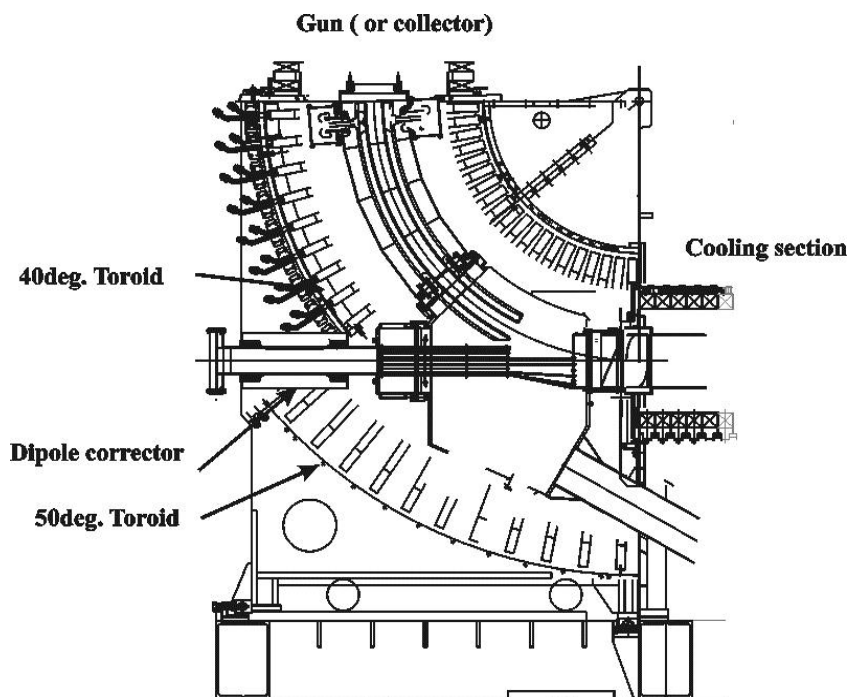


Рис. 3.7.14. Схема расположения корректирующего диполя в поворотном участке магнитной системы

Схема коррекции орбиты (Рис. 3.7.15) ионного пучка в кольце LEIR показана на рисунке выше. Синяя и красная линия показывают горизонтальное смещение ионов свинца при прохождении магнитной системы установки для энергии инжекции (4,2 МэВ/н) и экстракции (72 МэВ/н). Получив смещение, ион попадает в корректирующий дипольный магнит, где смещается в противоположном направлении. Поле корректора выбрано так, чтобы на выходе из установки частицы имели небольшой угол (10^{-3} рад) с тем, чтобы вернуть их на стационарную орбиту при помощи дополнительной коррекции, установленной на кольце (схематически изображена в правой части рисунка).

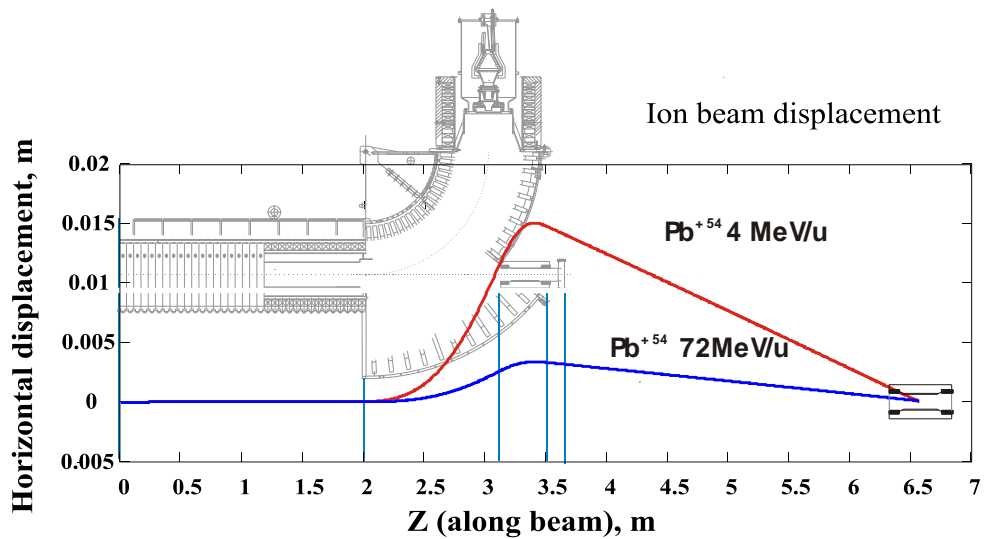


Рис. 3.7.15. Схема коррекции орбиты ионного пучка на установке LEIR (CERN)

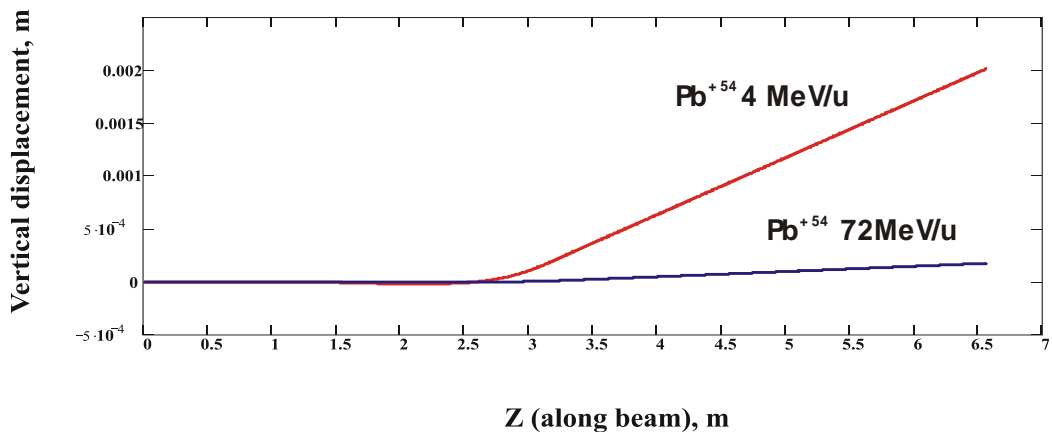


Рис. 3.7.16. Вертикальное смещение ионного пучка при прохождении установки электронного охлаждения

Проходя тороидальный участок установки, ионный пучок испытывает действие довольно сильного продольного и вертикального поля. Это приводит к появлению не только горизонтального, но и вертикального (Рис. 3.7.16) смещения. Правда, для рассматриваемого случая оно мало (всего 2 мм на энергии инжекции) и может быть скомпенсировано дополнительными слаботочными обмотками, намотанными поверх полюсов дипольного корректора (видны на фотографии).

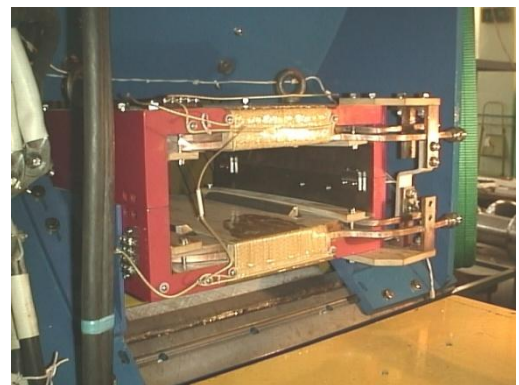
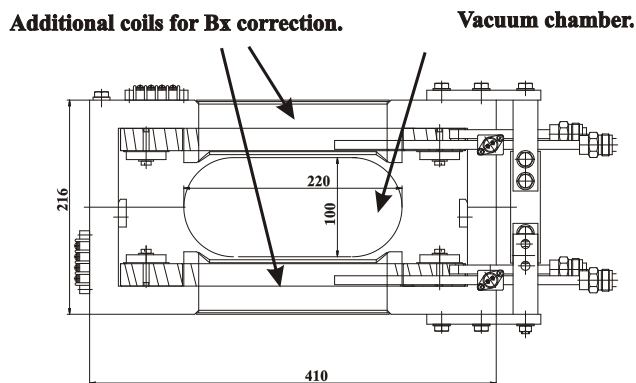


Рис. 3.7.17. Конструкция корректирующего диполя

Размещение корректоров соленоида на внутренних поверхностях прямоугольного короба магнитопровода (вместо корректоров на медной трубе) показано на Рис. 3.7.18.

Корректор вертикального поля состоит из 4-ех длинных катушек, намотанных на железные сердечники. Сечение по меди 10×40 мм, по железу 10×50 мм, длина катушек определяется длиной соленоида L . Катушки попарно прикручиваются ко дну и крышке короба, расстояние между осями пары 250 мм.

Корректор горизонтального поля также состоит из 4-ех длинных катушек, намотанных на железные сердечники. Сечение по меди 20×20 мм, по железу 20×30 мм, длина катушек определяется длиной соленоида L . Катушки попарно прикручиваются к боковым стенкам короба, расстояние между осями пары 190 мм. Для увеличения длины участка однородного горизонтального поля по краям длинных катушек добавлены как продолжение обмотки короткие катушки (180 мм) с сечением по меди 5×20 мм и по железу 5×30 мм.

При 600 ампервитках и коэффициенте заполнения 0,8 погонная мощность длинных катушек ~ 20 Вт/м. Величины полей при этом достаточные.

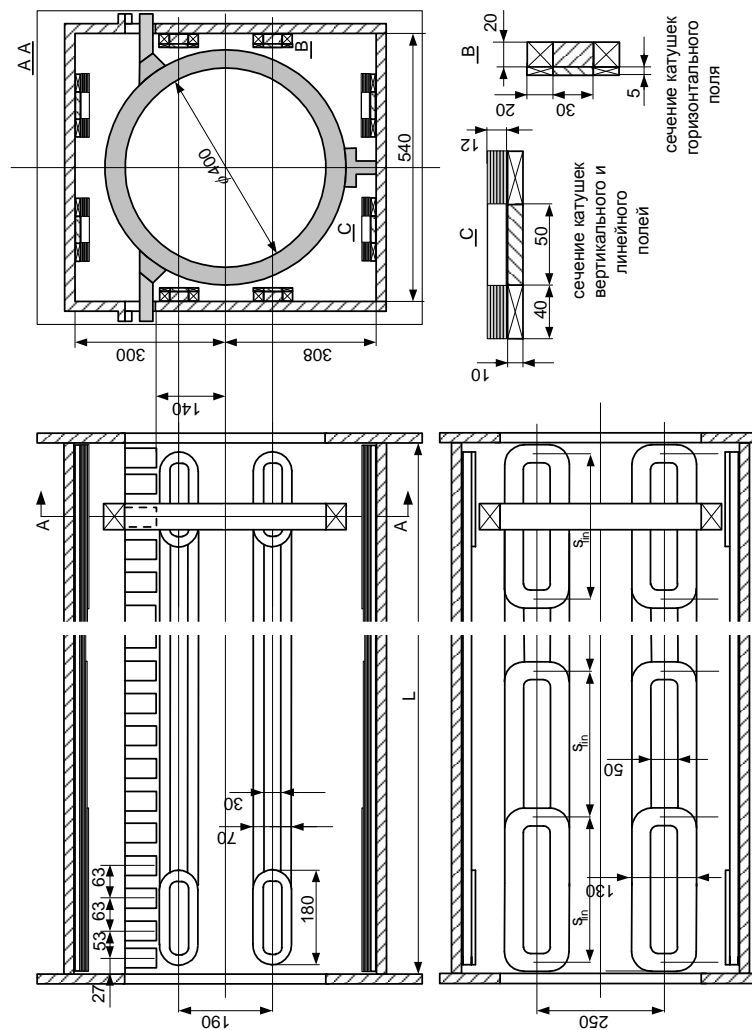


Рис. 3.7.18. Размещение катушек корректоров в соленоиде охлаждения

Корректор линейного поля размещается поверх 4-ех катушек вертикального поля и состоит из 4-ех пар катушек. Каждая пара имеет форму 2-ух лесенок к торцам соленоида с пробелом между ними в центре длиной s_{lin} . Каждая катушка пары состоит из N слоёв обмотки. 1-ый слой обмотки имеют длину $N \cdot s_{lin}$, 2-ой слой — $(N - 1) \cdot s_{lin}$, и т.д. Слои сдвинуты к торцам. Шаг ступеньки s_{lin} определяет средний виток в слое. Качественное линейное поле при наших размерах формируется, если $s_{lin} \leq 35$ см. Таким образом, при $L = 4.8$ м число слоёв $N = 6 - 7$ является достаточным. Ориентировочно сечение по меди в слое 2×40 мм. Катушки наматываются без железа. Величины полей достаточные при ~ 100 ампервитках в слое.

Коррекция поля в соленоидах пушки и коллектора выполнена аналогично, различается лишь высота обмоток, в зависимости от высоты соленоидов.

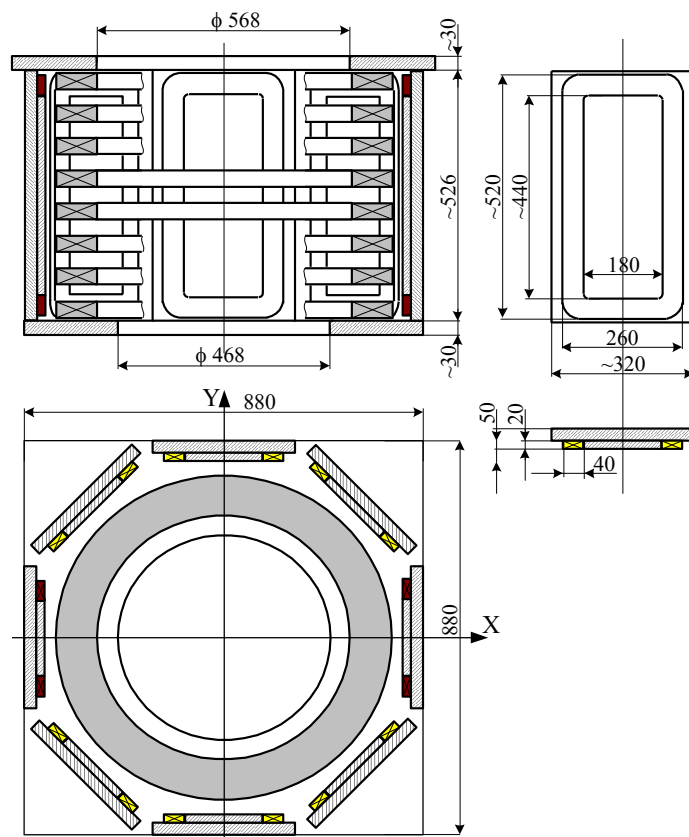


Рис. 3.7.19. Соленоид перехода пушки и его корректоры. Размеры толщины фланцев и высоты магнитопровода условные

Примерно в масштабе размещение корректоров тороидов показано на Рис. 3.7.20.

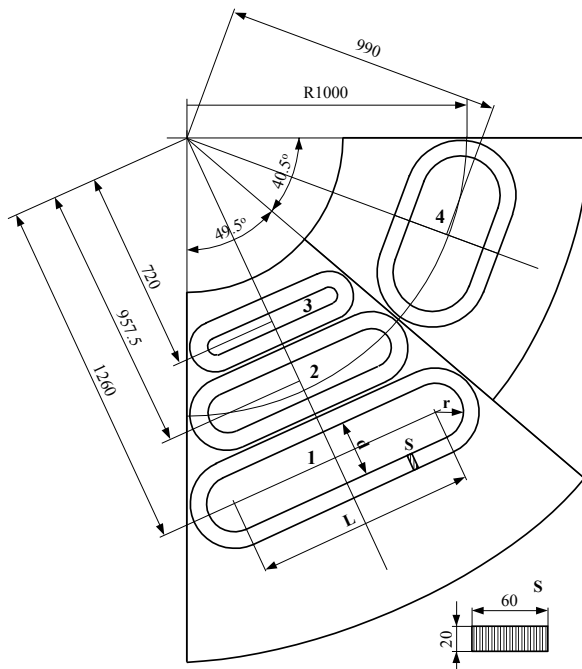


Рис. 3.7.20. Размещение новых корректоров тороидов на боковых частях их магнитопроводов

В Таблице 3.7.4 приведены размеры окон катушек, средние длины витков и потери P_n при плотности тока 1.9 А/мм^2 (ампервитки 1800, коэффициент заполнения 0,8). Катушки наматываются на железные сердечники, что увеличивает эффективность корректоров.

Таблица 3.7.4. Параметры катушек

Номер катушки	1	3	2	4
L , мм	802	461,0	587,5	281,5
r , мм	100	30	72,5	140
d , мм	200	60	145	280
Ср. длина витка, см	242,1	129,9	181,9	163,2
P_n — потери, Вт	138,9	74,5	104,4	93,6

Таблица 3.7.5. Корректоры кулера Бустера и источники их питания

Корректоры:	Число катушек и их №	P_{corr} , кВт	J_{corr} , А	Источники питания
Корректор горизонтального поля соленоида перехода пушки	2-е № 1	0,11	5	MPS-6 5A, 40V
Корректор горизонтального поля соленоида перехода коллектора	2-е № 2	0,11	5	MPS-6 5A, 40V
Корректор вертикального поля соленоида перехода пушки	6-ть № 1	0,33	5	MPS-6 5A, 90V
Корректор вертикального поля соленоида перехода коллектора	6-ть № 2	0,33	5	MPS-6 5A, 90V
Корректор горизонтального поля тороида пушки	2-е № 3 2-е № 4	0,4	5	MPS-6 5A, 90V
Корректор горизонтального поля тороида коллектора	2-е № 3 2-е № 4	0,4	5	MPS-6 5A, 90V
Корректор вертикального поля тороида пушки	2-е № 5 2-е № 6	0,43	5	MPS-6 5A, 90V
Корректор вертикального поля тороида коллектора	2-е № 5 2-е № 6	0,43	5	MPS-6 5A, 90V
Корректор горизонтального поля соленоида охлаждения	4-е № 7	0,8	15	MPS-6 20A, 90V
Корректор вертикального поля соленоида охлаждения	4-е № 8	0,8	15	MPS-6 20A, 90V
Корректор линейного поля соленоида охлаждения	8-мь № 9	~0,4	5	MPS-6 5A, 90V
Корректор горизонтального поля диполя в тороиде пушки		~0,3		MPS-6 5A, 90V
Корректор горизонтального поля диполя в тороиде коллектора		~0,3		MPS-6 5A, 90V

- Сечение обмотки S_{coil} соответствует необходимому полю корректора (ампер-витки) при плотности тока $\sim 1,9 \text{ А/мм}^2$ и коэффициенте заполнения 0,8.
- Ток в катушках корректора определяется подходящими источниками питания, отсюда число витков, сечение шины (провода).
- Ориентировочно для сечения провода $S_{\text{bus}} = 2,67 \text{ мм}^2$ подходит шина $3,15 \times 0,9$ (или круглый провод $\varnothing 1,84$), а для сечения $S_{\text{bus}} = 7,62 \text{ мм}^2$ — шина $4,75 \times 1,6$ (шины по ГОСТ 434-78).

Таблица 3.7.6. Параметры катушек

Номер катушки, №	№ 1	№ 2	№ 3	№ 4	№ 5	№ 6	№ 7	№ 8	№ 9**
Длина окна, мм	440	510	732,5	561,5	1002	521	4750/140	4710	
Ширина окна, мм	180	180	145	280	200	60	30	50	50
Радиус скругления, мм	5	5	72,5	140	100	30	15	15	15
Сечение обмотки S_{coil} , мм ²	20 × 40		20 × 60				20/5 × 20	10 × 40	2 × 40 × N_i
Сечения провода S_{bus} , мм ²	2,67	2,67	2,67	2,67	2,67	2,67	7,62	7,62	2,67
Число витков	240	240	360	360	360	360	40/10	40	19
Длина провода, м	325,7	359,3	654,9	587,2	871,5	467,6	383,88/3,77	384,8	305,26
Вес провода, кгс	7,79	8,6	15,67	14,05	20,85	11,19	26,21/0,257	26,27	7,3
R , Ом ($\rho = 0,019$)	2,32	2,56	4,66	4,18	6,2	3,33	0,957/0,0094	0,959	2,172
I , А	5	5	5	5	5	5	15	15	5
U , В	11,59	12,78	23,3	20,9	31	16,64	14,36/0,141	14,39	10,86
P_n , Вт при $\rho = 0,019$	57,94	63,92	116,5	104,5	155	83,2	215,4/2,116	215,88	54,31
Число катушек	8	8	4	4	4	4	4/8	4	8

3.7.6 Электростатическая компенсация дрейфа электронов

При движении в участке поворота установки, на электрон действует центробежная сила, что приводит к появлению дрейфа.

$$F = \frac{pV}{R},$$

где p — импульс электрона, V — его скорость, а R — радиус поворота.

При этом направление дрейфа перпендикулярно плоскости, в которой происходит поворот.

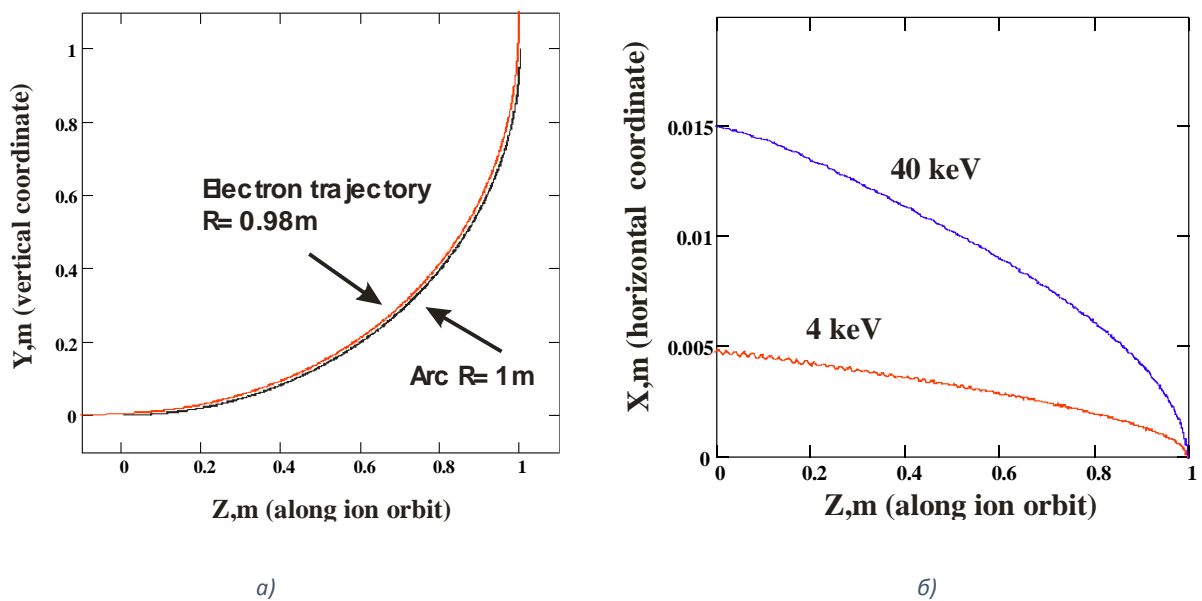


Рис. 3.7.21. Траектория (а) и смещение (б) электронов в электростатических пластинах

Траектория электронного пучка в поворотном магните (левый рисунок) и его смещение вследствие действия центробежной силы для разных энергий электрона (правый рисунок). $Z = 1$ — координата стыка соленоида и тороида.

Это смещение электронного пучка можно скомпенсировать, приложив корректирующее магнитное поле, направленное против направления дрейфа.

$$B_{correction} = \frac{p_0 c}{eR}.$$

Но, корректируя дрейф таким способом, мы устраняем отклонение от заданной траектории только для основного пучка электронов. Для отражённых же электронов, корректирующее магнитное поле будет направлено в ту же сторону, что и дрейф. Таким образом, отражённый электрон получит удвоенное смещение (пунктирная кривая на верхней части рисунка). Совершая колебания от пушки к коллектору, такой электрон будет постоянно смещаться поперёк движения и быстро попадёт на стенку вакуумной камеры.

Для большинства тяжёлоионных накопителей, в состав которых входят установки электронного охлаждения, характерны очень высокие требования на качество вакуума. Так, для колец LHC требуемое давление составляет 10^{-12} Торр. Отсюда возникают требования и на малость потерь тока в установке электронного охлаждения. Если взять эффективность (соотношение отражённых электронов к захваченным) электронного коллектора на уровне $\sim 10^{-3}$, а ток электронов в пучке равным 1 А, то потери составят около 1 мА. Эта величина может оказаться недопустимой с точки зрения вакуумных условий.

Для решения проблемы потерь электронного пучка возможно применение электростатической компенсации дрейфа в поворотном магните.

$$E_{\perp} = \frac{pV}{eR} = \frac{\gamma + 1}{\gamma} \frac{E_e}{eR}.$$

Электростатические пластины, установленные вдоль траектории поворота создают электрическое поле, компенсирующее дрейф электронов. Причём, самое важное, что эта компенсация не зависит от направления движения частиц. Это означает, что отражённые от коллектора электроны могут совершать колебания от коллектора к пушке, не отклоняясь от основной траектории (сплошная линия на верхней части Рис. 3.7.22). Совершив несколько колебаний, отражённые электроны попадают в коллектор.

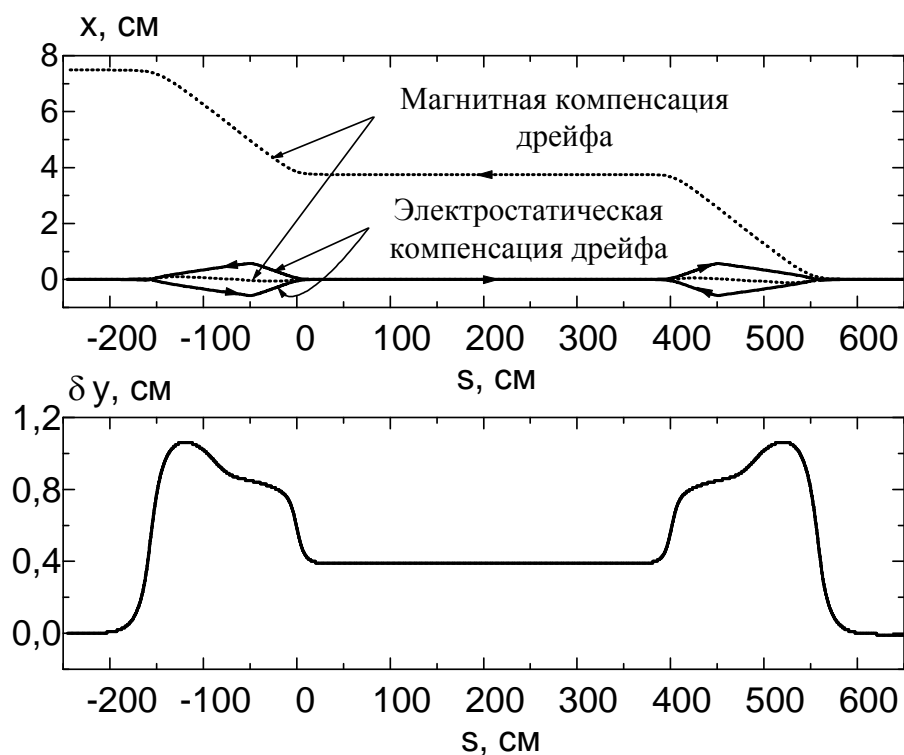


Рис. 3.7.22. Магнитная компенсация дрейфа

Развёртка траекторий электронов при магнитной компенсации дрейфа и при электростатической компенсации дрейфа — верхний рисунок. Отклонение осевой магнитной силовой линии от геометрической осевой линии — нижний рисунок.

Ниже на Рис. 3.7.23 представлены результаты измерений тока потерь электронного пучка в установке ЭХ-300. Изначально присутствовала только магнитная компенсация дрейфа (на графике — 0 напряжения на пластинах). Затем, по мере увеличения напряжения на электростатических пластинах уменьшался ток в корректирующих катушках, таким образом, чтобы дрейф основного пучка оставался скомпенсированным. Минимум тока потерь был достигнут практически при чисто электростатическом способе компенсации. Причём значение тока потерь были зафиксированы на столько малом уровне, что их измерение было затруднено из-за предела чувствительности измерительной аппаратуры. Достигнутая эффективность рекуперации электронного пучка достигла 10^{-6} , что почти на три порядка выше эффективности коллектора.

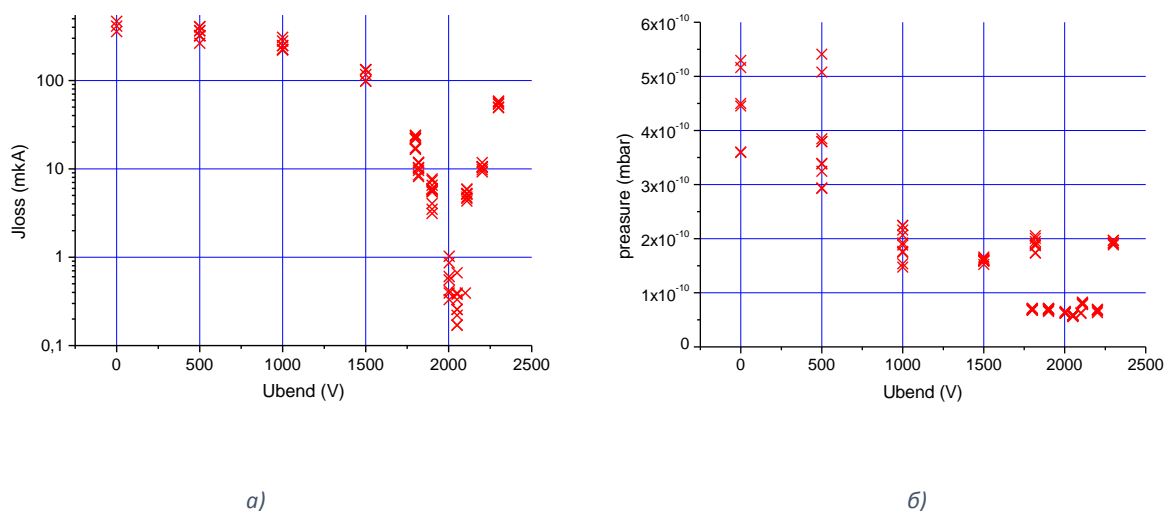


Рис. 3.7.23. Результаты измерений тока потерь электронного пучка (а) и вакуума (б) в зависимости от напряжения на электростатических пластинах на установке ЭХ-300

Улучшение вакуумных условий при переходе от магнитной компенсации дрейфа к электростатической. Снижение потерь сразу стало заметно по состоянию вакуума в установке. Видно, как уменьшилось давление остаточных газов в установке, при переходе от магнитной компенсации дрейфа к электростатической.

Помимо снижения потерь, на улучшение вакуумных условий влияет тот фактор, что пластины являются своеобразным «фильтром», притягивая ионы остаточного газа.

Отклоняющие пластины имеют радиус 1 м, расстояние между ними 90 мм. Изнутри камеры пластины крепятся на опорные изоляторы, а напряжение подаётся через высоковакуумные вводы.

Рекомендуемый тип вводов — MHV Coaxial MHV-C16, производства «Caburn MDC». Для питания пластин отклонения требуются два источника напряжения на 5 кВ с током до 1 мА.

3.7.7 Высоковольтные источники питания

Электронная пушка и коллектор установки электронного охлаждения запитаны от высоковольтного источника питания по схеме с рекуперацией энергии. Схема питания электродов пушки и коллектора, а так же измерения необходимых для работы параметров приведена на Рис. 3.7.24.

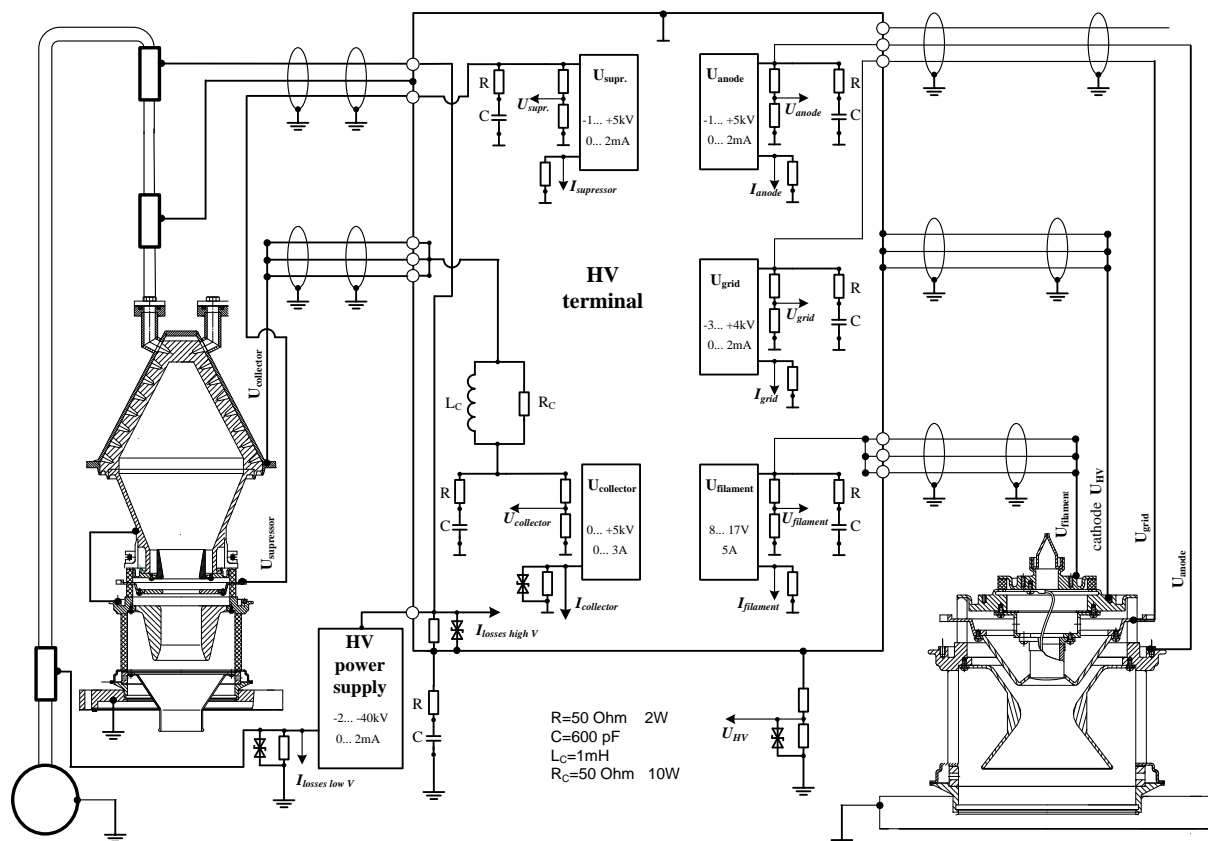


Рис. 3.7.24. Схема подключения электронной пушки и коллектора

Передача мощности для коллекторного источника питания будет осуществляться на базе разработанного для COSY трансформатора на аморфном железе. Охлаждение и электрическая изоляция осуществляется трансформаторным маслом. С заземлённой стороны на первичную обмотку подаётся мощность с 20 кГц генератора. Кольцо из аморфного железа находится под половинным потенциалом и с помощью специальной обмотки запитывает высоковольтные источники питания, выдающие +25 кВ и -25 кВ (два выпрямителя).

Таблица 3.7.7. Параметры необходимых высоковольтных источников питания

Электронный узел	Электронный блок	Напряжение, В	Ток, А	Мощность, кВт	Примечание
Генератор 20 кГц	–	700		15	
Блок трансформаторов (масляная изоляция)	Коллекторный трансформатор	700	25	12	Напряжение между обмотками 60 кВ
	Высоковольтный трансформатор	220	8	2	Напряжение между обмотками 60 кВ
Высоковольтный выпрямитель	–	+25000, –25000	0,001		Со средней точкой суммарно 50 кВ
Выпрямитель питания коллектора	–	5000	3	15	
Высоковольтный терминал	Питание анода пушки	+10000	0,002		
	Питание управляющего электрода пушки	±3000	0,002		
	Питание накала катода	20	5		
	Питание супрессора коллектора	5000	0,002		

3.7.8 Вакуумная система

Вакуумная система (Рис. 3.7.25) включает в себя следующие элементы:

1. Коллектор (условно).
2. Электронная пушка.
3. Камера приколлекторной (пушечной) откачки. Титановые сублимационные насосы 3 шт. (TSP-IKG производства «VACOM»).
4. Камеры поворотов. Содержат электростатические пластины компенсации центробежного дрейфа. Снабжены (по 2 на каждую) высоковакуумными вводами на 5 кВ (для энергии 40 кэВ).
5. Камера тороида.
6. Пикап. Конструкция зависит от используемой электроники. Содержит 4 (на каждый) коаксиальных высоковакуумных ввода.
7. Центральная камера. Изготавливается из высококачественной нержавеющей стали 316LN с магнитной проницаемостью порядка 0,01 и меньше.
8. Камера диполя.

9. Сильфонная развязка.
10. Фланцы для установки титановых сублимационных насосов, либо NEG — картриджей.
11. Узел для подключения откачного поста через вакуумный клапан (цельнометаллический прогревной). Так же содержит патрубki для подключения измерительных датчиков.
12. Сильфонная развязка.
13. Ионно-гетерный насос, обеспечивающий не менее 250 л/с (по азоту) в режиме ионного насоса и не менее 650 л/с суммарно с гетерным насосом.
14. Переход на вакуумную систему Бустера.

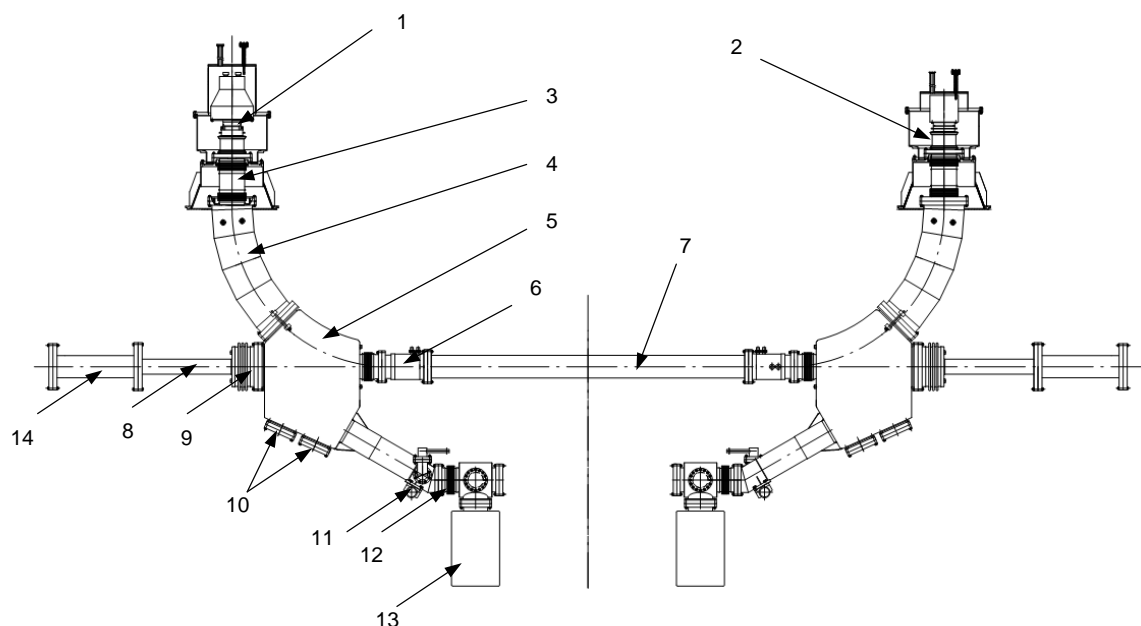


Рис. 3.7.25. Основные элементы вакуумной системы

Поскольку оксидный катод, применяемый в установке, электронного охлаждения не выдерживает напуска атмосферы после активации, то целесообразно установить дополнительные вакуумные шиберы с обеих сторон установки. Необходимо согласование с вакуумной системой кольца Бустера.

ЛИТЕРАТУРА

[3.1] H.G. Khodzhibagiyan, A.A. Smirnov “The concept of a superconducting magnet system for the Nuclotron”, Proc. of the Twelfth Int. Cryogen. Eng. Conf., ICIC12, Southampton, 1988, pp. 841-844.

[3.2] MAD — Methodical Accelerator Design, <http://mad.web.cern.ch/mad/>.

Приложение 1

к Главе 3

П.3.1 СИСТЕМА ИНЖЕКЦИИ ПУЧКА

П.3.1.1 Концепция инжекции пучка в Бустер

Существует несколько факторов риска, которые могут привести к значительным потерям ионов в инжекционном комплексе на низких и средних энергиях, что в конечном счёте ведёт к снижению светимости Коллайдера. По оценкам основные потери ионов будут наблюдаться на энергиях до 5 МэВ/н, т.е. на временном интервале от вылета ионов из источника КРИОН до начального этапа ускорения в Бустере. Тогда увеличение светимости Коллайдера (до проектного значения и выше) равнозначно увеличению интенсивности пучка, ускоренного в Бустере, которое может быть достигнуто различными способами накопления ионов. В связи с этим предлагается концепция многовариантной инжекции, которая позволит в случае необходимости увеличивать интенсивность пучка.

П.3.1.1.1 Факторы риска и способы их подавления

На этапе прохождения пучков ионов в Бустере и его инжекционной цепочке имеется несколько факторов риска, потенциально приводящих к значительному уменьшению интенсивности пучка, ускоренного в Бустере. Три из них представляются наиболее опасными: 1) потери ионов в Бустере при прохождении резонансов вследствие больших сдвигов частот бетатронных колебаний; 2) потери ионов в канале транспортировки пучков низких энергий и в ускорителе NILAC вследствие эффектов пространственного заряда; 3) ограниченность тока пучка, выведенного из ионного источника КРИОН.

Первые два фактора, приводящие к потерям ионов, связаны с эффектами собственных электромагнитных полей пучков. В синхротронах наличие собственного пространственного заряда пучка приводит к сдвигам частот бетатронных колебаний ускоряемых частиц. Для Бустера с проектными частотами $Q_x = 4,8$ и $Q_y = 4,85$ возможно пересечение бетатронных резонансов 3-го порядка $3Q_{x,y} = 14$, что приведет к резонансной раскачке колебаний ионов и их потерям.

Вторым фактором, уменьшающим интенсивность пучка, являются потери ионов в канале транспортировки пучков низких энергий и в ускорителе NILAC. Эти потери обусловлены ростом поперечного эмиттанса пучка, вызванного собственным пространственным зарядом. Ситуация усугубляется тем, что пучок ионов из источника КРИОН имеет широкий зарядовый спектр, что многократно увеличивает данный эффект.

Эффекты пространственного заряда могут быть ослаблены путём уменьшения продольной линейной плотности заряда в пучке. Это достигается двумя способами: увеличением поперечных размеров или длины пучка. Для подавления потерь ионов на бетатронных резонансах в Бустере

подходящим является увеличение поперечных размеров пучка, в то время как для подавления потерь в канале транспортировки и в линейном ускорителе потребуется увеличение длины, т.е. длительности вывода ионов из источника КРИОН.

Третьим фактором риска является значение максимального тока ионного пучка, выведенного из источника. В случае его недостаточности необходимо многократное повторение импульсов ионов с максимально возможной частотой и их накопление в Бустере.

П.3.1.1.2 Многовариантная инжекция пучка в Бустер

Для инжекции пучков заряженных частиц в синхротроны и накопительные кольца используются различные методы инжекции. Эти методы могут быть классифицированы по двум признакам: 1) число импульсов инжекции частиц; 2) длительность импульсов инжекции. По первому признаку методы инжекции делятся на однократные и многократные, по второму — на однооборотные и многооборотные методы инжекции.

Как было сказано ранее, предлагается применять различные методы инжекции ионного пучка в Бустер в качестве меры увеличения его интенсивности. Наиболее подходящие методы могут быть определены непосредственно из тех способов подавления факторов уменьшения интенсивности, которые указаны в предыдущем разделе. Но для начала следует выбрать метод инжекции пучка для проектного случая, т.е. когда рассмотренные факторы риска не оказывают значительного влияния на интенсивность пучка в Коллайдере. Т.к. наиболее простым методом инжекции пучка является метод однократной однооборотной инжекции, то он и предлагается как метод инжекции пучка по умолчанию.

Этот же метод инжекции может быть использован для подавления потерь ионов вследствие сдвигов частот бетатронных колебаний. Увеличение поперечных размеров пучка достигается ростом поперечных эмиттансов, вызванных или смещением пучка при инжекции относительно замкнутой орбиты, или несогласованием бетатронных функций инжектируемого пучка со структурными функциями Бустера.

Для уменьшения потерь ионов низких энергий вследствие эффектов пространственного заряда предлагается применять метод многооборотной инжекции. Увеличение длительности вывода ионов из источника КРИОН приводит соответственно к удлинению импульса инжекции ионов в Бустер и к заполнению ионами различных областей фазового пространства на различных оборотах инжекции.

Для подавления третьего фактора риска необходимо использовать метод многократной инжекции. В этом методе ионы заполняют различные области фазового пространства в зависимости от номера

импульса инжекции. Также в промежутках между импульсами инжекции возможно дополнительное воздействие на накапливаемый пучок, в частности, его охлаждение.

Наиболее предпочтительным является накопление ионов в горизонтальной фазовой плоскости Бустера. Накопление в вертикальной или продольной фазовой плоскости нецелесообразно ввиду таких фактов, как расположение линейного ускорителя NILAC и Бустера в одной горизонтальной плоскости и близкая к нулю дисперсия пучка в прямолинейных промежутках синхротрона.

Соответствующая система инжекции пучка должна иметь традиционный набор устройств: септум для ввода ионов в вакуумную камеру Бустера и ударные устройства для посадки пучка на замкнутую орбиту или для создания локального бампа замкнутой орбиты.

П.3.1.1.3 Потери ионов при инжекции и акцептанс Бустера

В качестве дополнительного критерия отбора методов инжекции пучка служит наличие потерь частиц, вызванных использованием рассматриваемого метода. Потери можно условно разделить на систематические (гарантированные особенностями инжекции частиц) и случайные (вызванные ошибками полей и юстировки структурных элементов и устройств системы инжекции синхротрона).

Рассмотрим методы инжекции ионного пучка в Бустер с точки зрения потерь, вызванных инжекцией, при этом ограничимся только систематическими потерями. Т.к. многовариантная инжекция в Бустер предлагается как средство увеличения интенсивности пучка на входе в Коллайдер, найдём методы инжекции без потерь ионов. Для этого определим требования к методам инжекции, обеспечивающие полное отсутствие систематических потерь.

Для случая накопления ионов в горизонтальной плоскости потери могут быть вызваны следующими факторами: 1) близостью траектории движения инжектируемого (вводимого в синхротрон через устройства системы инжекции) или накапливаемого (циркулирующего в синхротроне в течение инжекции) пучка к апертурным элементам; 2) большими амплитудами бетатронных колебаний; 3) расширением орбит.

Для подавления первого фактора, приводящего к потерям ионов в течение инжекции, необходимо обходить инжектируемым и накапливаемым пучком элементы апертуры вакуумной камеры: $X_{beam}(s) - a_{beam}(s) > X_{aper}^{inner}(s)$ и $X_{beam}(s) + a_{beam}(s) < X_{aper}^{outer}(s)$, где $X_{beam}(s)$, $a_{beam}(s)$ — положение и полуразмер пучка, $X_{aper}^{inner}(s)$, $X_{aper}^{outer}(s)$ — координаты внутренней и внешней стенок вакуумной камеры (элемента апертуры).

Потери ионов вследствие бетатронных колебаний и расширения замкнутых орбит возникают или при превышении максимально допустимой амплитуды бетатронных колебаний, или при

выпадении ионов из режима ускорения. Для этих потерь имеется зависимость от значений продольного и поперечных эмиттансов накопленного пучка и рабочего цикла ускоряющей ВЧ системы Бустера. Если рассматривать случай, когда при однократной однооборотной инжекции с точной посадкой пучка на замкнутую орбиту и полным согласованием бетатронных и дисперсионных функций (иначе, при равенстве эмиттансов инжектируемого и накопленного пучков) потери ионов отсутствуют, то исключается зависимость потерь от вертикального и продольного эмиттансов. Тогда наличие или отсутствие потерь ионов определяется значением только горизонтального эмиттанса накопленного пучка. Следовательно, необходимо определить максимальное значение горизонтального эмиттанса пучка, при котором будут отсутствовать потери для заданного рабочего цикла ускоряющей ВЧ системы Бустера, т.е. требуется удовлетворить условие отсутствия потерь ионов, находящихся внутри сепаратриссы.

Рассмотрим в приближении линейной оптики горизонтальную огибающую пучка с учётом расширения замкнутой орбиты и её отклонения от оси вакуумной камеры вследствие ошибок магнитных полей и юстировки структурных элементов Бустера. Введём следующие величины: $\varepsilon_{x,100\%}$ — бетатронный 100 %-ый эмиттанс, т.е. площадь фазового эллипса, содержащего 100 % ионов пучка с одинаковой энергией; $\Delta p/p_{max}$ — максимальное импульсное отклонение ионов пучка; $\Delta x_{c.o.}(s)$ — отклонение замкнутой орбиты от оси вакуумной камеры (для ионов с продольным импульсом равным синхронному). Тогда огибающая пучка может быть записана в следующем виде:

$$a_x(s) = \sqrt{\beta_x(s)\varepsilon_{x,100\%} + D_x(s)\frac{\Delta p}{p_{max}}} + \Delta x_{c.o.}(s), \quad (\text{П.3.1.1})$$

где $a_x(s)$ — полуразмер пучка, $\beta_x(s)$, $D_x(s)$ — бета-функция и дисперсия соответственно.

Т.к. огибающая пучка ограничена апертурой вакуумной камеры $r_x(s)$, то из равенства $a_x(s) = r_x(s)$, принимая во внимание (П.3.1.1), находим максимальное допустимое значение бетатронного 100 %-го эмиттанса пучка, т.е. акцептанс Бустера:

$$A_x = \min \frac{\left(r_x(s) - D_x(s)\frac{\Delta p}{p_{max}} - \Delta x_{c.o.}(s)\right)^2}{\beta_x(s)}. \quad (\text{П.3.1.2})$$

Определим необходимые величины для вычисления бетатронного акцептанса Бустера. Вакуумная камера Бустера имеет эллиптическое сечение с полуосями $r_x(s) = 64$ мм и $r_y(s) = 32$ мм. Проектное отклонение скорректированной замкнутой орбиты от оси камеры не превышает 5 мм. Если предположить, что ошибки полей и юстировки структурных элементов распределены равномерно по периметру Бустера, то отклонение замкнутой орбиты может быть записано следующим образом:

$$\Delta x_{c.o.}(s) = \sqrt{\frac{\beta_x(s)}{\beta_{x,max}}} \Delta x_{c.o.,max} \quad (\text{П.3.1.3})$$

где $\beta_{x,max}$ — максимальное значение бета-функции, $\Delta x_{c.o.,max}$ — максимальное отклонение замкнутой орбиты.

Для общего случая (при произвольном рабочем цикле ВЧ системы Бустера) из формул (П.3.1.2) и (П.3.1.3) находится зависимость бетатронного акцептанса от максимальной полувысоты сепаратриссы, которая имеет вид, показанный на Рис. П.3.1.1. Согласно расчётам, максимально возможное продольное импульсное отклонение ионов, захваченных в режим ускорения, будет равно $3,3 \cdot 10^{-3}$. Следовательно, горизонтальный бетатронный акцептанс Бустера равен 150π -мм·мрад.

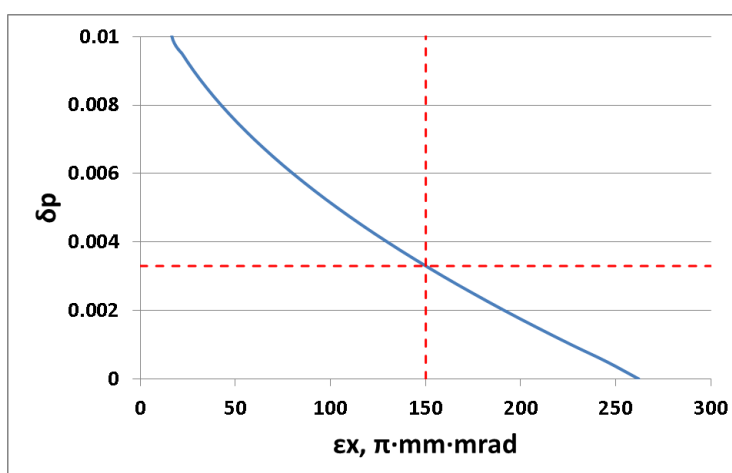


Рис. П.3.1.1. Зависимость максимального продольного импульсного отклонения b_r от горизонтального эмиттанса пучка ϵ_x

Таким образом, методы инжекции пучка в Бустер должны удовлетворять следующим условиям:

- 1) обход огибающими инжектируемого и накапливаемого пучков элементов апертуры вакуумной камеры;
- 2) горизонтальный эмиттанс накопленного пучка не должен превышать 150π -мм·мрад.

П.3.1.1.4 Концепция однократной однооборотной инжекции

Однократная однооборотная инжекция является наиболее простым методом инжекции пучков в синхротроны и накопительные кольца. В процессе инжекции с помощью данного метода пучок по горизонтали вводится в вакуумную камеру Бустера и сажается на заданную траекторию циркуляции пучка. Посадка инжектируемого пучка производится импульсным ударным устройством, которое отключается до окончания первого оборота инжектированных частиц в ускорителе.

Однократная однооборотная инжекция (как и другие методы инжекции пучка) может быть реализована при различных траекториях ввода инжектируемого и циркуляции накапливаемого (накопленного) пучков. Получаемое бесконечное множество возможных вариантов траекторий может быть разбито по некоторым качественным критериям на конечное число подмножеств, которые назовём схемами инжекции. Также, помимо траекторий пучков, схемы инжекции можно различать и по иным признакам, например, по значениям оптических функций инжектируемого пучка. Наиболее предпочтительной схемой однократной однооборотной инжекции является схема с точной посадкой инжектируемого пучка на замкнутую орбиту и полным согласованием его оптических функций со структурными функциями принимающего ускорителя. Так как в этом случае горизонтальный эмиттанс накопленного пучка равняется эмиттансу инжектируемого пучка, данная схема выбрана в качестве основной для инжекции ионов в Бустер.

В любом ином случае горизонтальный эмиттанс накопленного пучка будет больше эмиттанса инжектируемого пучка вследствие филаментации фазового распределения ионов. В связи с этим, для Бустера рассматриваются две дополнительные схемы однократной однооборотной инжекции. Первая дополнительная схема отличается от основной схемы инжекции пучка в Бустер тем, что инжектируемый пучок не выводится точно на замкнутую орбиту путём уменьшения угла отклонения пучка в импульсном ударном устройстве системы инжекции. Вторая дополнительная схема инжекции отличается от основной тем, что на выходе септума системы инжекции инжектируемый пучок имеет значения бетатронных функций отличные от согласованных значений при сохранении траектории движения.

Рассмотрим схему инжекции со смещением пучка относительно замкнутой орбиты. Для простоты вычислений будем использовать нормированные фазовые координаты, получаемые линейным преобразованием:

$$X = \frac{x}{\sqrt{\beta}}, X' = \frac{\alpha}{\sqrt{\beta}}x + \sqrt{\beta}x', \quad (\text{П.3.1.4})$$

где x, x' — «обычные» фазовые координаты, α, β — структурные функции, используемые для нормировки.

Пусть после прохождения ударного устройства пучок смещён на ΔX и $\Delta X'$ по координате и углу соответственно. Тогда эмиттанс накопленного пучка после филаментации фазового распределения ионов будет равен:

$$\varepsilon_{st} = \left(\sqrt{\varepsilon_{inj}} + \sqrt{\Delta X^2 + \Delta X'^2} \right)^2, \quad (\text{П.3.1.5})$$

где ε_{inj} — эмиттанс инжектируемого пучка.

Рассмотрим вторую дополнительную схему с инъекцией несогласованного пучка. Пусть на выходе септума инжектируемый пучок имеет значения горизонтальных бетатронных функций, равные β_{inj} и α_{inj} , при этом значения остальных оптических функций и траектория ввода пучка соответствуют основной схеме инъекции. Тогда горизонтальный эмиттанс накопленного пучка после филаментации будет равняться:

$$\varepsilon_{st} = \frac{1}{2} (\sqrt{H+1} + \sqrt{H-1})^2 \varepsilon_{inj}, \quad (\text{П.3.1.6})$$

где $H = \frac{1}{2} (\beta_0 \gamma_{inj} + \beta_{inj} \gamma_0 - 2\alpha_0 \alpha_{inj})$, $\gamma_{inj} = \frac{1+\alpha_{inj}^2}{\beta_{inj}}$, α_0 , β_0 , γ_0 — значения структурных функций Бустера на выходе септума.

П.3.1.1.5 Концепция однократной многооборотной инъекции

Однократная многооборотная инъекция является дополнительным методом инъекции пучка в Бустер, который предполагается использовать, как было сказано выше, для уменьшения потерь ионов в инжекционной цепочке Бустера от источника КРИОН до канала транспортировки NILAC-Бустера. Данный метод заключается в постепенном заполнении горизонтальной фазовой плоскости Бустера, при котором инжектированные ионы вследствие когерентных бетатронных колебаний смещаются по фазовой плоскости так, что на выходе септума системы инъекции Бустера освобождается место для вновь инжектируемых ионов. Для осуществления такого подхода перед началом инъекции в окрестности септума создается бамп замкнутой орбиты. Ввод ионов продолжается в течение двух-трех оборотов пучка на энергии инъекции.

В результате однократной многооборотной инъекции горизонтальная фазовая плоскость заполняется ионами кусочно, т.е. накопленный пучок представляет собой совокупность непересекающихся фазовых эллипсов (в линейном приближении), взаиморасположение которых зависит от фазовых координат на выходе септума как инжектируемого пучка, так и замкнутой орбиты Бустера. При этом изменение этих фазовых координат во времени может существенно влиять на заполнение ионами фазовой плоскости. Т.к. поле септума полагается квазистатическим (неизменным в течение инъекции), то далее рассматриваются схемы однократной многооборотной инъекции с возможностью изменения только полей в импульсных ударных устройствах системы инъекции.

При условии постоянства полей в ударных устройствах, замкнутая орбита Бустера в течение всего времени инъекции остаётся неизменной, и накопление ионов происходит так, как это продемонстрировано на Рис. П.3.1.2. Следует отметить, что двух- и трехоборотная инъекции проводятся одинаково.

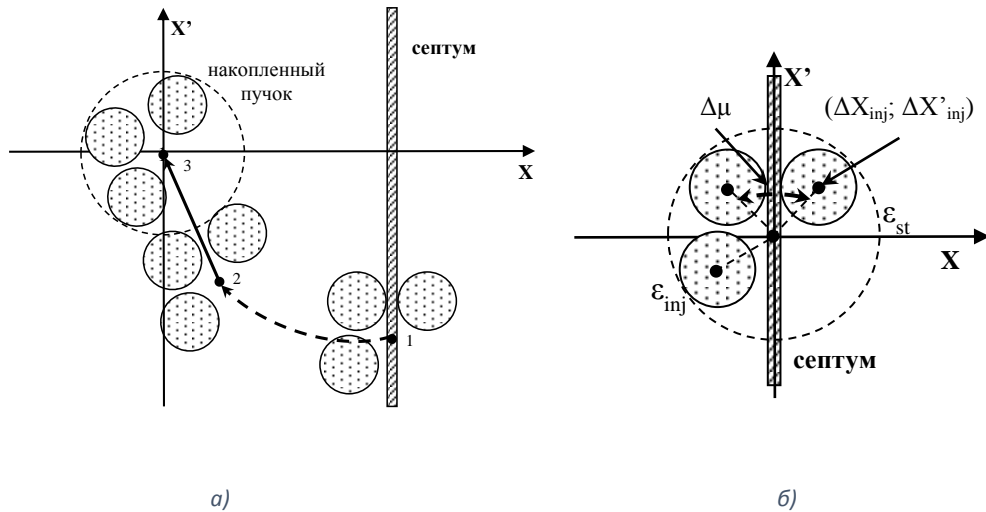


Рис. П.3.1.2. Однократная трехоборотная инжекция с постоянной замкнутой орбитой: а) фазовые портреты пучка на третьем обороте инжекции; б) накопленный пучок в конце третьего оборота инжекции и после филаментации фазового распределения ионов. Положения пучка: 1 — на выходе септума; 2 — на входе последнего ударного устройства; 3 — на выходе последнего ударного устройства

Как видно из Рис. П.3.1.2б, для фиксированного значения $\Delta\mu \equiv 2\pi(1 - \{Q_x\})$ (данное определение справедливо для случая Бустера при $\{Q_x\} \geq 0,5$) существует бесконечное множество схем инжекции, определяемых: 1) разностями фазовых координат инжектируемого пучка и замкнутой орбиты на выходе септума $\Delta X_{inj}, \Delta X'_{inj}$; 2) бетатронными функциями инжектируемого пучка $\beta_{inj}, \alpha_{inj}$. Из этого множества для использования в Бустере была найдена оптимальная схема, где критерием оптимальности являлась минимальность горизонтального эмиттанта накопленного пучка после филаментации фазового распределения ε_{st} . Найденная оптимальная схема двух- и трехоборотной инжекции пучка в Бустер удовлетворяет следующим условиям: полное согласование инжектируемого пучка со структурными функциями Бустера ($\beta_{inj} = \beta, \alpha_{inj} = \alpha$), и

$$\Delta X_{inj} = \sqrt{\varepsilon_{inj}} + \frac{h_{sep}}{2\sqrt{\beta}}, \Delta X'_{inj} = \frac{\Delta X_{inj}}{\text{tg} \frac{\Delta\mu}{2}} \quad (\text{П.3.1.7})$$

где h_{sep} — толщина ножа септума на его выходе.

Горизонтальный эмиттанс пучка, накопленного с помощью указанной схемы однократной многооборотной инжекции, не зависит от длительности (числа оборотов) инжекции и равняется:

$$\varepsilon_{st} = \left[\frac{1}{\sin \frac{\Delta\mu}{2}} \left(\sqrt{\varepsilon_{inj}} + \frac{h_{sep}}{2\sqrt{\beta}} \right) + \sqrt{\varepsilon_{inj}} \right]^2. \quad (\text{П.3.1.8})$$

В целях более компактного заполнения ионами горизонтальной фазовой плоскости Бустера и, тем самым, уменьшения эмиттанта пучка после филаментации, могут быть применены переменные поля в импульсных ударных устройствах системы инжекции. Для Бустера было предложено скачкообразное изменение полей, когда полный период инжекции делится на два временных интервала (равных целому числу оборотов пучка), на границе которых и происходит переход между

уровнями полей в ударных устройствах. Такой режим работы импульсных ударных устройств со скачкообразным изменением полей далее будем называть двухступенчатым.

Двухступенчатый режим может быть весьма эффективным при настройках ударных устройств, приводящих к глобальному искажению замкнутой орбиты. В этом случае удобно перейти к рассмотрению преобразованной замкнутой орбиты, имеющей локальный бамп с точкой разрыва на участке системы инжекции. Для этого в некоторой точке на этом участке вводится бесконечно тонкий элемент с преобразованием параллельного переноса фазовых координат. Тогда для любых значений полей в ударных устройствах системы инжекции могут быть найдены такие параметры параллельного переноса, при которых преобразованная замкнутая орбита вне участка системы инжекции будет располагаться на оси вакуумной камеры (в приближении идеальной магнитной структуры ускорителя). Таким образом, для преобразованной замкнутой орбиты будет выполняться критерий локальности бампа, создаваемого ударными устройствами системы инжекции.

В случае Бустера наиболее подходящей точкой разрыва является выход септума. Тогда импульсные ударные устройства системы инжекции Бустера разделяются на две функциональные группы: начальная группа до септума и конечная группа после него.

Вспользуемся подходом с преобразованием замкнутой орбиты при рассмотрении схем многооборотной инжекции с двухступенчатыми импульсами. Наиболее интересными из них представляются схемы с переходом на второй уровень полей в начале последнего оборота инжекции. Суть этих схем заключается в том, что на первом этапе (при первом уровне полей в ударных устройствах) инжекция осуществляется как при ранее рассмотренной схеме с постоянной замкнутой орбитой. На втором этапе ударные устройства конечной группы перестраиваются таким образом, что преобразованная замкнутая орбита в точке разрыва смещается в центр масс накапливаемого пучка. Это позволяет сгруппировать инжектированные ионы ближе к оси вакуумной камеры на выходе участка системы инжекции и, тем самым, уменьшить горизонтальный эмиттанс накопленного пучка после филаментации.

Описанный подход к многооборотной инжекции с двухступенчатыми импульсами предполагает различные схемы для различных длительностей инжекции. Оптимальная схема двухоборотной инжекции с двухступенчатыми импульсами приведена на Рис. П.3.1.3. Относительные фазовые координаты инжектируемого пучка равны соответствующим координатам для схемы инжекции с постоянной замкнутой орбитой (см. формулу (П.3.1.7)). Фазовые координаты изображающей точки преобразованной замкнутой орбиты после разрыва равны следующим значениям:

$$\Delta X_{c.o.} = 0, \quad \Delta X'_{c.o.} = \frac{\Delta X_{inj}}{tg \frac{\Delta \mu}{2}}. \quad (\text{П.3.1.9})$$

Данная схема даёт значительное уменьшение горизонтального эмиттansa накопленного пучка по сравнению со схемой с постоянной замкнутой орбитой (ср. формулы (П.3.1.8) и (П.3.1.10)):

$$\varepsilon_{st} = \left[2\sqrt{\varepsilon_{inj}} + \frac{h_{sep}}{2\sqrt{\beta}} \right]^2. \quad (\text{П.3.1.10})$$

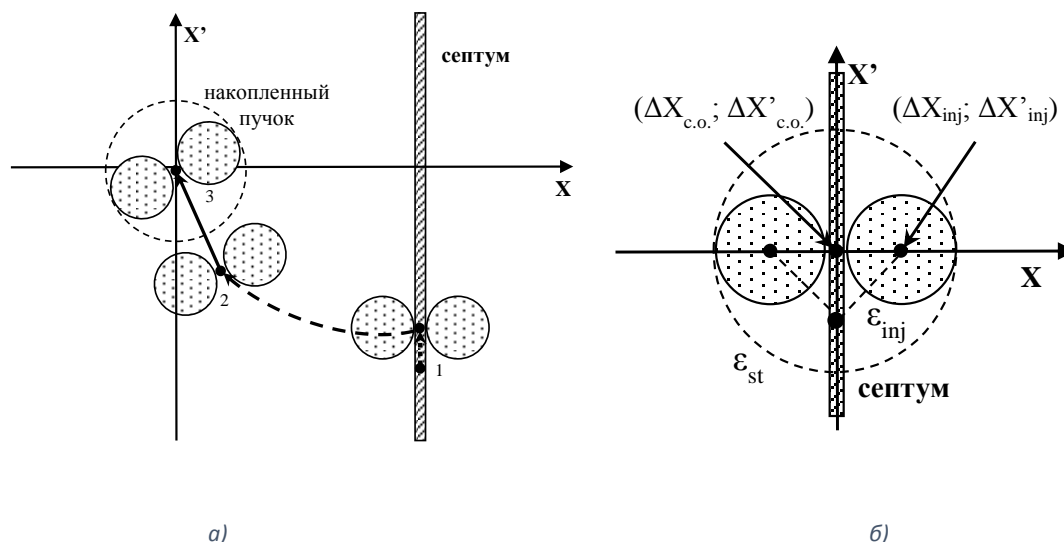


Рис. П.3.1.3. Однократная двухоборотная инжекция с двухступенчатыми импульсами: а) фазовые портреты пучка на втором обороте инжекции; б) накопленный пучок в конце второго оборота инжекции и после филаментации фазового распределения ионов. Положения пучка: 1 — на выходе септума; 2 — на входе последнего ударного устройства; 3 — на выходе последнего ударного устройства

Для трехоборотной инжекции использование двухступенчатых импульсов не даёт существенного выигрыша по горизонтальному эмиттансу пучка по сравнению со схемой с постоянной замкнутой орбитой, и далее данная схема инжекции не рассматривается.

П.3.1.1.6 Концепция многократной однооборотной инжекции

Многократная однооборотная инжекция является ещё одним дополнительным методом инжекции пучка в Бустер, который предполагается использовать в случае недостаточности тока пучка, выводимого из источника КРИОН. Данный метод заключается в двух- или трёхкратном повторении однооборотной инжекции пучка (каждое повторение далее будем называть стадией многократной инжекции). Проектная частота повторения стадий инжекции — 10 Гц. На каждой стадии накопленный к тому времени пучок подводится к ножу септума, и вновь инжектируемые ионы заполняют смежную с накопленным пучком область горизонтальной фазовой плоскости Бустера. Первая стадия осуществляется по схеме однократной однооборотной инжекции с точной посадкой пучка на замкнутую орбиту. На последующих стадиях перед началом ввода ионов на участке системы инжекции создается локальный бамп замкнутой орбиты, подводящий накопленный пучок к септуму. Непосредственно ввод ионов по длительности не превышает одного периода обращения пучка, после чего импульсные ударные устройства системы инжекции отключаются. Таким

образом, каждая стадия инжекции имеет два этапа: этап подводки накопленного пучка (отсутствует на первой стадии) и этап собственно инжекции ионов.

Как и в случае однократной многооборотной инжекции, при описанном методе (кроме первой стадии) горизонтальная фазовая плоскость Бустера заполняется кусочно. Но, ввиду того, что за время между стадиями инжекции в 100 мс фазовое распределение накопленных ионов эффективно усредняется по фазам бетатронных колебаний (вследствие филаментации), по окончании каждой стадии накопленный пучок представляет собой всегда только две несвязанные друг с другом области фазовой плоскости. Фазовый портрет пучка после каждой стадии зависит от: 1) взаиморасположения замкнутой орбиты, ранее накопленного и вновь инжектируемого пучков; 2) бетатронных функций инжектируемого пучка. Указанные величины могут изменяться во времени, при этом существуют два типа временных зависимостей: изменение величины в течение стадии инжекции и её изменение в интервалах между стадиями (иначе зависимость от порядкового номера стадии инжекции).

Положение замкнутой орбиты и накопленного пучка управляется импульсными ударными устройствами системы инжекции, поэтому возможно, как их задание для каждой стадии инжекции в отдельности, так и их изменение в течение стадии. В качестве переменного режима работы ударных устройств будем использовать ранее рассмотренный двухступенчатый режим. Для метода многократной однооборотной инжекции применим переход полей в ударных устройствах на второй уровень (переход на вторую ступень импульсов) непосредственно перед началом ввода ионов. При этом переход осуществляется только в ударных устройствах конечной группы. В этом случае центр накопленного пучка до точки разрыва лежит на преобразованной замкнутой орбите, а после разрыва он смещается относительно неё. Использование таких схем инжекции с двухступенчатыми импульсами может дать более компактное заполнение горизонтальной фазовой плоскости Бустера по сравнению со схемами с постоянной замкнутой орбитой.

В свою очередь, положение и бетатронные функции инжектируемого пучка управляются септумом системы инжекции и каналом транспортировки NIIAC — Бустер, и, вследствие неимпульсного характера их систем электропитания, возможно только медленное изменение этих величин в промежутках между стадиями инжекции. Использование различных значений бетатронных функций и положений инжектируемого пучка на различных стадиях инжекции также приводит к более компактному фазовому портрету накопленного пучка по окончании инжекции.

На основании вышесказанного реализуется большое число различных схем многократной однооборотной инжекции пучка. Эти схемы можно классифицировать по двум критериям: 1) наличие зависимости значений бетатронных функций инжектируемого пучка от порядкового номера стадии инжекции; 2) наличие скачкообразного изменения полей в импульсных ударных

устройствах системы инжекции. По первому критерию схемы инжекции разделим на схемы со статическим/динамическим режимом ввода пучка. По второму критерию — на схемы с одноступенчатым/двухступенчатым режимом работы ударных устройств системы инжекции. Наличие зависимости положения инжектируемого пучка от номера стадии инжекции считаем обязательным условием выполнения многооборотной инжекции, т.к. первая и последующие стадии имеют принципиально различный подход к вводу ионов и заполнения ими фазовой плоскости.

Рассмотрим схему инжекции со статическим режимом ввода пучка и одноступенчатым режимом работы ударных устройств, представленную на Рис. П.3.1.4.

Горизонтальный эмиттанс пучка, накопленного с использованием данной схемы, зависит, помимо положения, эмиттанса и значений бетатронных функций инжектируемого пучка на выходе септума, также и от числа стадий инжекции. При этом оптимальные положение и значения бетатронных функций, позволяющие получить минимальный эмиттанс накопленного пучка, также зависят от числа стадий.

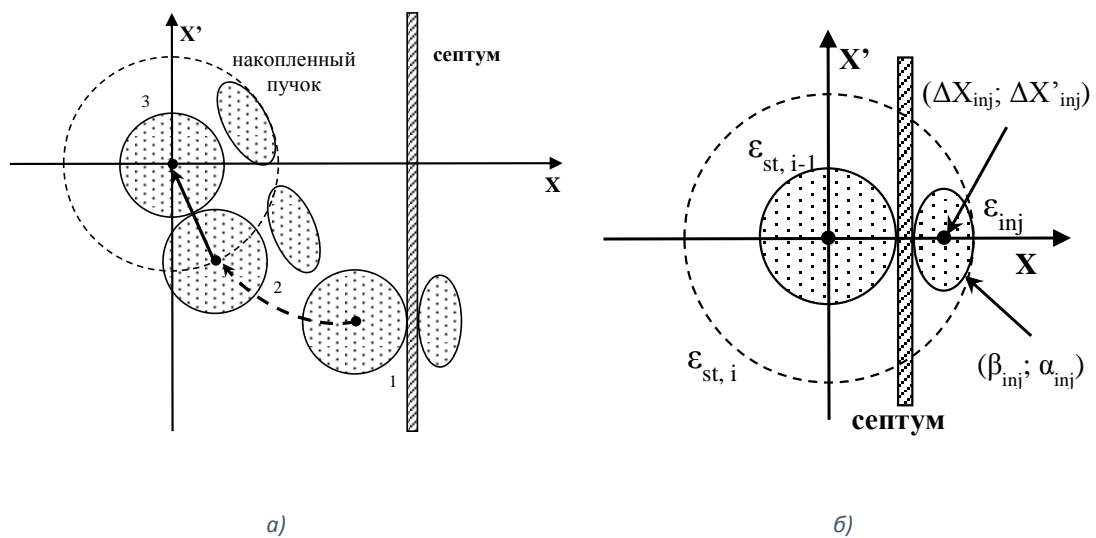


Рис. П.3.1.4. Многократная однооборотная инжекция с одноступенчатым режимом работы ударных устройств: а) фазовые портреты пучка на второй (третьей) стадии инжекции; б) накопленный пучок в конце второй (третьей) стадии инжекции и после филаментации фазового распределения ионов. Положения пучка: 1 — на выходе септума; 2 — на входе последнего ударного устройства; 3 — на выходе последнего ударного устройства

Оптимальное положение инжектируемого пучка на фазовой плоскости является величиной зависимой от его бетатронных функций и определяется выражениями:

$$\Delta X_{inj,i} = \sqrt{\epsilon_{st,i}} + \sqrt{\epsilon_{inj}} + \frac{h_{sep}}{\sqrt{\beta}}, \quad \Delta X'_{inj} = 0. \quad (\text{П.3.1.11})$$

Следует отметить, что зависимость относительной координаты $\Delta X_{inj,i}$ от порядкового номера стадии инъекции i не означает изменения положения инжектируемого пучка от стадии к стадии, а говорит об изменении положения замкнутой орбиты, которая с увеличением номера стадии отодвигается от септума:

$$X_{c.o.,i} = X_{sep} - \sqrt{\varepsilon_{st,i}}, \quad X'_{c.o.} = 0. \quad (\text{П.3.1.12})$$

Для определения оптимальных значений бетатронных функций инжектируемого пучка введём нормированные фазовые координаты (П.3.1.4), в которых для нормировки используем значения структурных функций Бустера на выходе септума $\beta_{sep}, \alpha_{sep}$. В этих координатах могут быть введены нормированные параметры Твисса $\hat{\beta}, \hat{\alpha}, \hat{\gamma} = \frac{1+\hat{\alpha}^2}{\hat{\beta}}$, с помощью которых фазовый эллипс описывается в виде $\hat{\gamma}X^2 + 2\hat{\alpha}XX' + \hat{\beta}X'^2 = \varepsilon$. Нормированные параметры Твисса выражаются через обычные следующим образом:

$$\hat{\beta} = \frac{\beta}{\beta_{sep}}, \quad \hat{\alpha} = \alpha - \frac{\beta}{\beta_{sep}} \alpha_{sep}. \quad (\text{П.3.1.13})$$

Пусть $\hat{\beta}_{inj}, \hat{\alpha}_{inj}$ — нормированные параметры инжектируемого пучка. Анализ показывает, что для оптимальной инъекции должно выполняться условие $\hat{\alpha}_{inj} = 0$. Тогда задача оптимизации сводится к нахождению значения $\hat{\beta}_{inj}$, минимизирующего эмиттанс накопленного пучка, т.е. $\hat{\beta}_{inj} = \arg \min e_n(\hat{\beta})$, где $e_n(\hat{\beta}) = \frac{\varepsilon_{st,n}(\hat{\beta})}{\varepsilon_{inj}}$ — отношение эмиттансов накопленного и инжектируемого пучков, n — число стадий инъекции. При вычислениях толщину ножа септума положим пренебрежимо малой.

Из расчётов получаем, что для двукратной инъекции ($n = 2$) оптимальное значение $\hat{\beta}_{inj}$ будет приблизительно равно 0,55, для трёхкратной ($n = 3$) — около 0,35. Отношения эмиттансов имеют следующие значения: $e_2(0,55) \approx 8,1$, $e_3(0,35) \approx 17,4$. Зависимости величин e_i на промежуточных стадиях инъекции также отличаются для двух схем: $e_1 \approx 1,8$ для двукратной инъекции; $e_1 \approx 2,8$, $e_2 \approx 8,7$ для трёхкратной инъекции.

Рассмотрим следующую схему инъекции с динамическим режимом ввода пучка и одноступенчатым режимом работы ударных устройств. При использовании данной схемы заполнение ионами горизонтальной фазовой плоскости Бустера производится аналогично предыдущей схеме инъекции (см. Рис. П.3.1.4). Отличие заключается в том, что в этой схеме величина $\hat{\beta}_{inj}$ и положение инжектируемого пучка относительно ножа септума являются функциями порядкового номера стадии инъекции. Из этого следует, что оптимальные параметры инжектируемого пучка не зависят от числа стадий в схеме инъекции (от кратности инъекции).

Из расчётов получаем следующие оптимальные значения $\hat{\beta}_{inj}$ в зависимости от номера стадии инжекции: $\hat{\beta}_{inj,1} = 1$ (пучок согласован со структурными функциями Бустера), $\hat{\beta}_{inj,2} \approx 0,4$, $\hat{\beta}_{inj,3} \approx 0,3$. Соответственно отношения эмиттансов накопленного и инжектируемого пучков равны: $e_1 = 1$, $e_2 \approx 5,7$, $e_3 \approx 12,9$.

Теперь рассмотрим схемы с двухступенчатым режимом работы ударных устройств, показанные на Рис. П.3.1.5.

В данных схемах горизонтальный эмиттанс накопленного пучка дополнительно зависит от сдвига преобразованной замкнутой орбиты в точке разрыва $\Delta X_{c.o.}$ и $\Delta X'_{c.o.}$. Оптимальные параметры инжекции, минимизирующие эмиттанс, находятся аналогично тому, как это было сделано для схем с одноступенчатым режимом. Оптимальные положения инжектируемого пучка определяются по формулам (11). Оптимальный сдвиг орбиты достигается при $\Delta X'_{c.o.} = 0$. Величины $\hat{\beta}_{inj}$ и $\Delta X_{c.o.}$ находятся из решения задачи минимизации $e_n(\hat{\beta}_{inj}, \Delta X_{c.o.}) \rightarrow \min$.

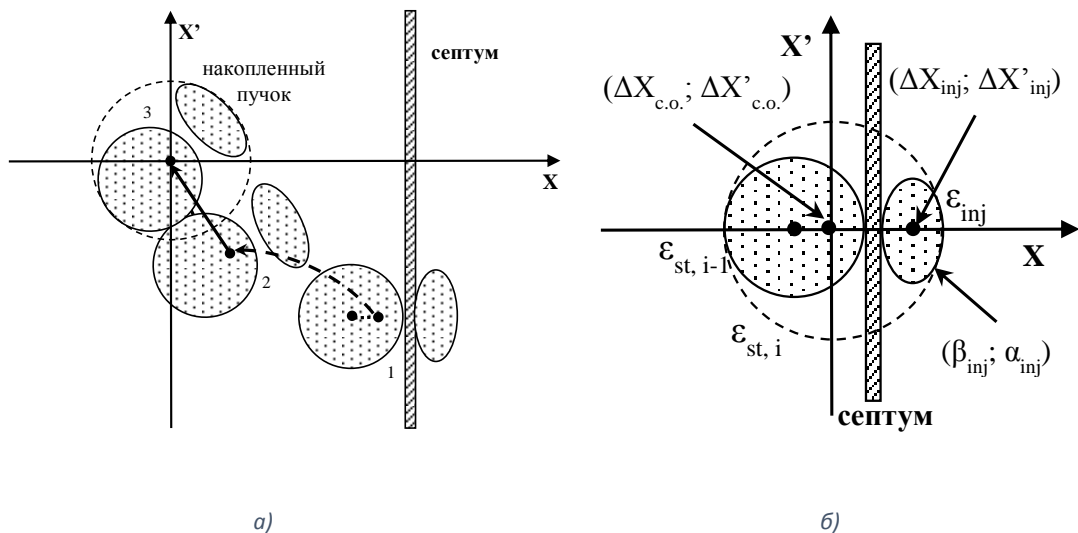


Рис. П.3.1.5. Многократная однооборотная инжекция с двухступенчатым режимом работы ударных устройств: а) фазовые портреты пучка на второй (третьей) стадии инжекции; б) накопленный пучок в конце второй (третьей) стадии инжекции и после филаментации фазового распределения ионов. Положения пучка: 1 — на выходе септума; 2 — на входе последнего ударного устройства; 3 — на выходе последнего ударного устройства

Для схемы инжекции со статическим режимом ввода пучка и двухступенчатым режимом работы ударных устройств получаем следующие оптимальные параметры инжектируемого пучка: $\hat{\beta}_{inj} = 1$ для двукратной инжекции, $\hat{\beta}_{inj} \approx 0,55$ для трехкратной инжекции. Оптимальный сдвиг орбиты в точке разрыва удовлетворяет формуле:

$$\Delta X_{c.o.} = \sqrt{\hat{\beta}_{inj} \epsilon_{inj}}. \quad (\text{П.3.1.14})$$

Отношения эмиттансов накопленного и инжектируемого пучков при оптимальных параметрах инжекции для данной схемы равны: $e_1 = 1$, $e_2 \approx 4$ для двукратной инжекции; $e_1 \approx 1,8$, $e_2 \approx 4,4$, $e_3 \approx 8,2$ для трехкратной инжекции.

Соответственно для схемы инжекции с динамическим режимом ввода пучка и двухступенчатым режимом работы ударных устройств имеем следующие оптимальные параметры инжектируемого пучка для различных стадий: $\hat{\beta}_{inj,1} = 1$, $\hat{\beta}_{inj,2} \approx 0,5$, $\hat{\beta}_{inj,3} \approx 0,4$. Оптимальные сдвиги орбиты для второй и третьей стадий инжекции по данной схеме лишь приблизительно удовлетворяют формуле (П.3.1.14):

$$\Delta X_{c.o.,2} \approx \sqrt{1,25\hat{\beta}_{inj,2}\varepsilon_{inj}}, \quad \Delta X_{c.o.,3} \approx \sqrt{1,1\hat{\beta}_{inj,2}\varepsilon_{inj}}. \quad (\text{П.3.1.15})$$

Отношения эмиттансов накопленного и инжектируемого пучков в зависимости от порядкового номера стадии равны: $e_1 = 1$, $e_2 \approx 3,2$, $e_3 \approx 6,2$.

Как видно из сравнения значений e_i , использование динамического режима ввода пучка и двухступенчатых импульсов в ударных устройствах системы инжекции даёт значительное уменьшение горизонтального эмиттанса накопленного пучка.

П.3.1.1.7 Требования к системе инжекции пучка

На основании вышесказанного, к системе инжекции пучка в Бустер предъявляются следующие требования:

1. сохранение бетатронного аксептанса Бустера;
2. создание локального бампа замкнутой орбиты;
3. двухступенчатый режим работы импульсных ударных устройств;
4. возможность медленного изменения поля в септуме.

Также из соображений минимизации горизонтального эмиттанса накопленного пучка требуется минимальная толщина ножа септума на выходе.

П.3.1.2 Временные характеристики работы системы инжекции

Режим работы электростатического септума ИЭС циклический. В течение ввода ионов в Бустер поддерживается постоянное напряжение между электродами септума. В промежутках между стадиями многократной инжекции возможно изменение напряжения.

Пластины ИП1 — ИП3 работают в импульсном режиме. При многократной инжекции частота повторения импульсов составляет 10 Гц, максимальное число импульсов подряд — 3. При одноступенчатом режиме потенциал подаётся только на одну пластину. При двухступенчатом режиме к моменту начала ввода ионов потенциал подаётся на обе пластины, затем одна из пластин разряжается, что ведёт к скачкообразному изменению потенциала между пластинами. На Рис. П.3.1.6 и Рис. П.3.1.7 даны временные диаграммы потенциалов на пластинах для одноступенчатого и двухступенчатого режимов соответственно.

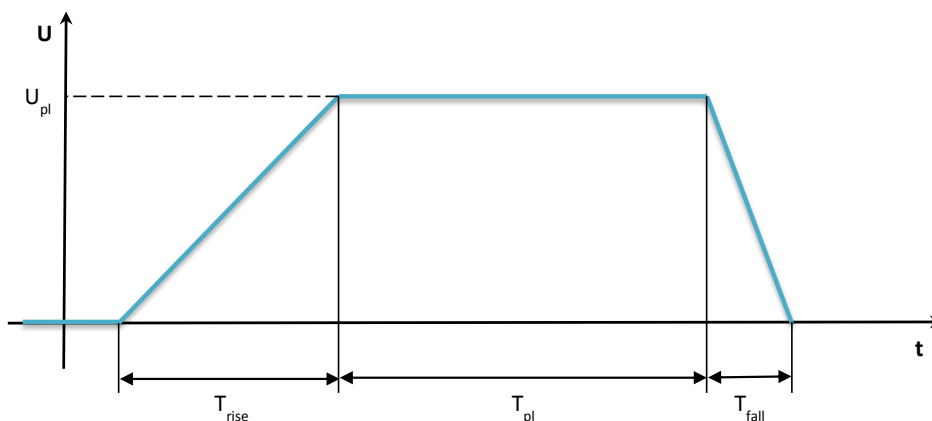


Рис. П.3.1.6. Временная диаграмма потенциалов на электрических импульсных пластинах при одноступенчатом режиме работы

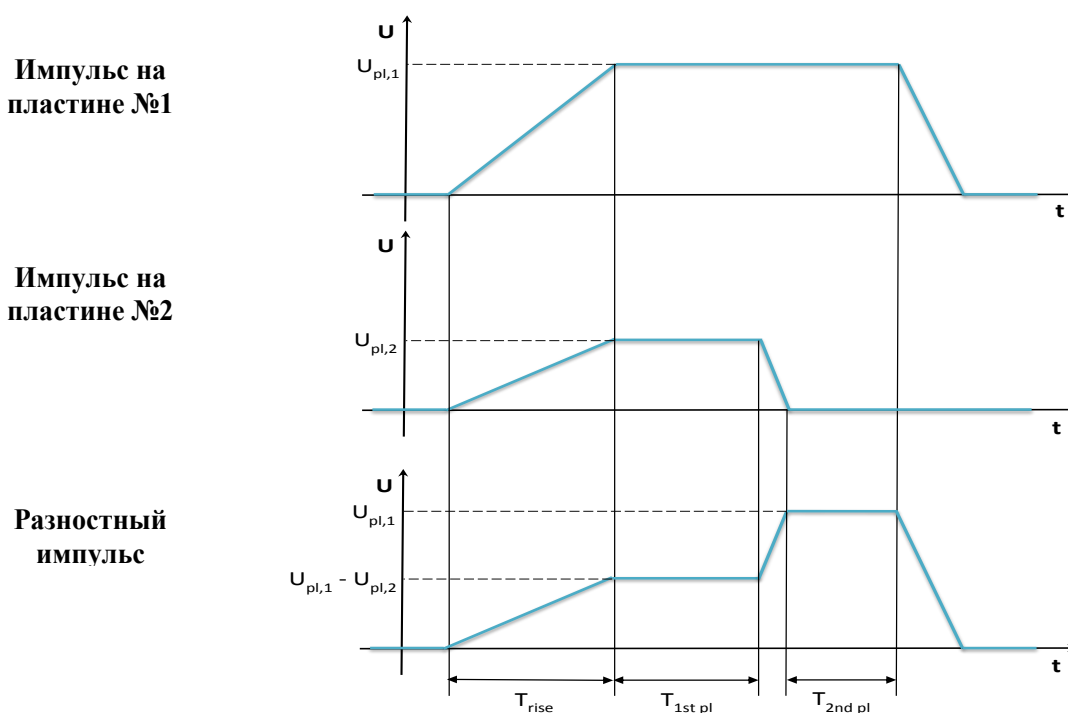


Рис. П.3.1.7. Временная диаграмма потенциалов на электрических импульсных пластинах при двухступенчатом режиме работы

Импульсы на пластинах ИП1 — ИП3 синхронизируются таким образом, что разрядка пластин начинается с задержкой относительно друг друга, равной времени пролёта пучка между пластинами.

П.3.1.3 Распределения электрических полей

На Рис. П.3.1.8, Рис. П.3.1.9 представлены результаты моделирования распределения электрического поля электростатического септума ИЭС по поперечному сечению. На Рис. П.3.1.10 – Рис. П.3.1.13 представлены результаты моделирования распределения электрического поля септума по продольному сечению. Потенциалы на электродах септума: 0 на аноде, -115 кВ на катоде.

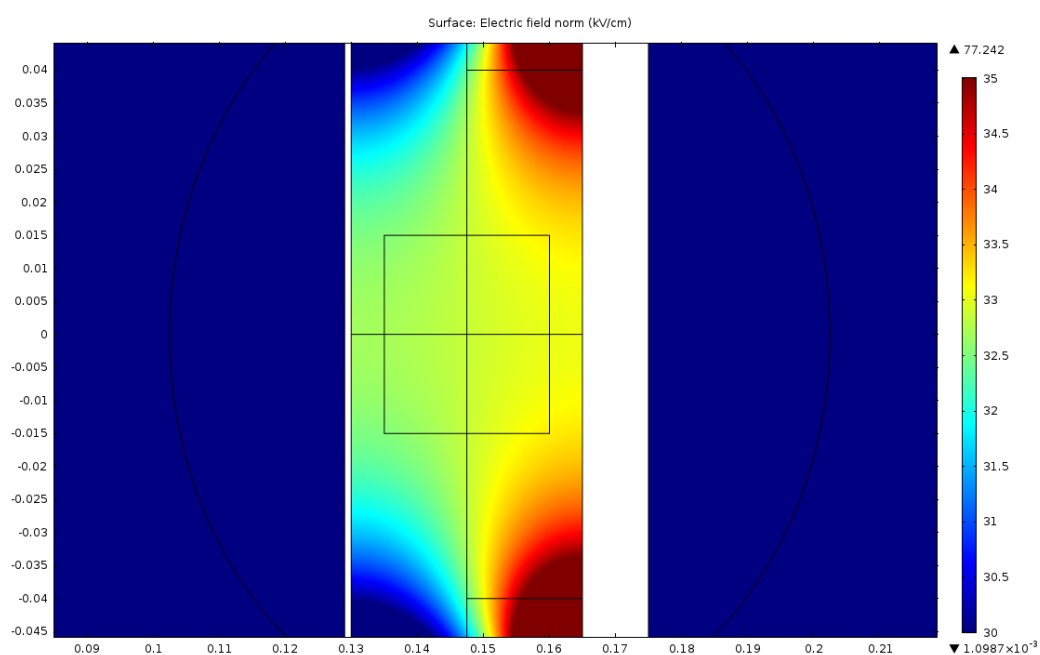


Рис. П.3.1.8. Распределение электрического поля между анодом и катодом электростатического септума ИЭС. Перекрестие в центре рисунка — центр межэлектродного зазора септума. Белая полоса слева — анод, справа — катод. Прямоугольник в центре — рабочая область септума

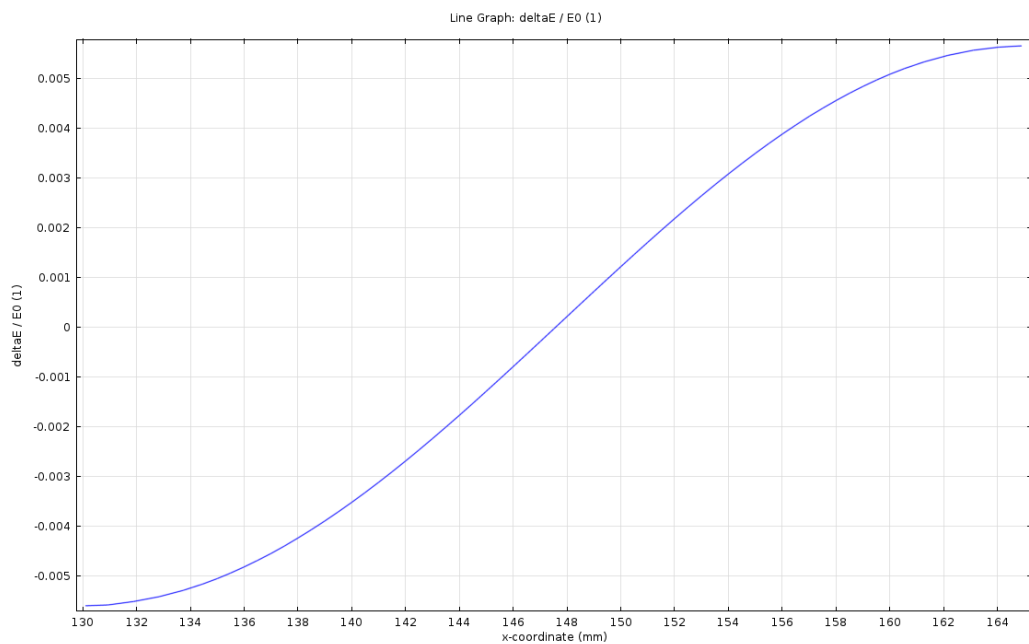


Рис. П.3.1.9. Однородность электрического поля электростатического септума ИЭС вдоль центральной горизонтальной линии ($y = 0$)

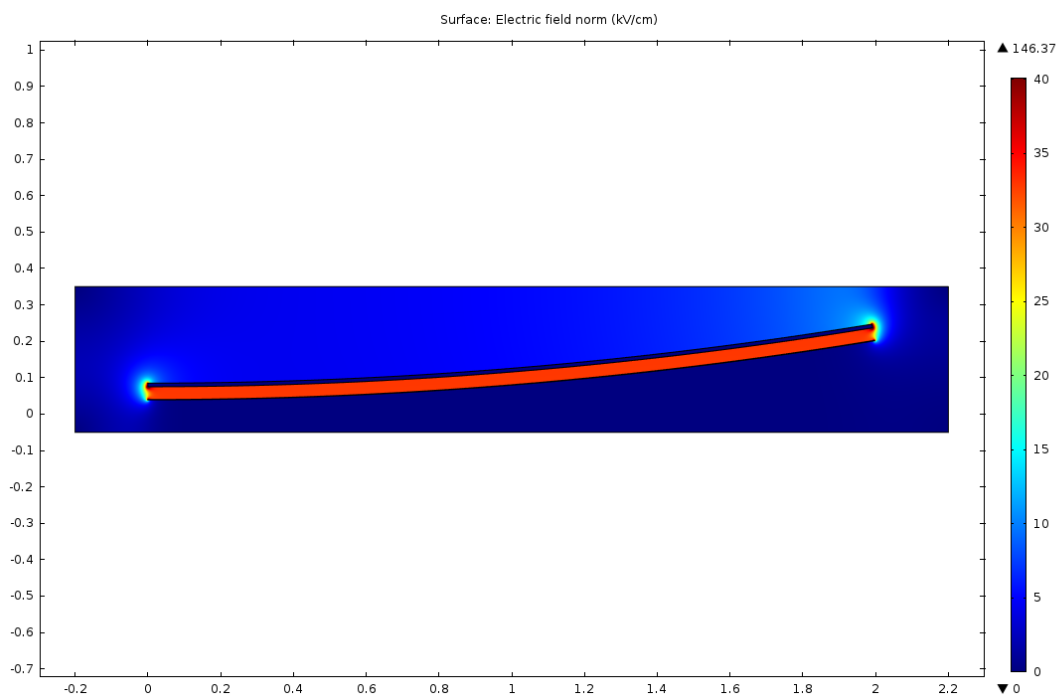


Рис. П.3.1.10. Распределение электрического поля между анодом и катодом электростатического септума ИЭС

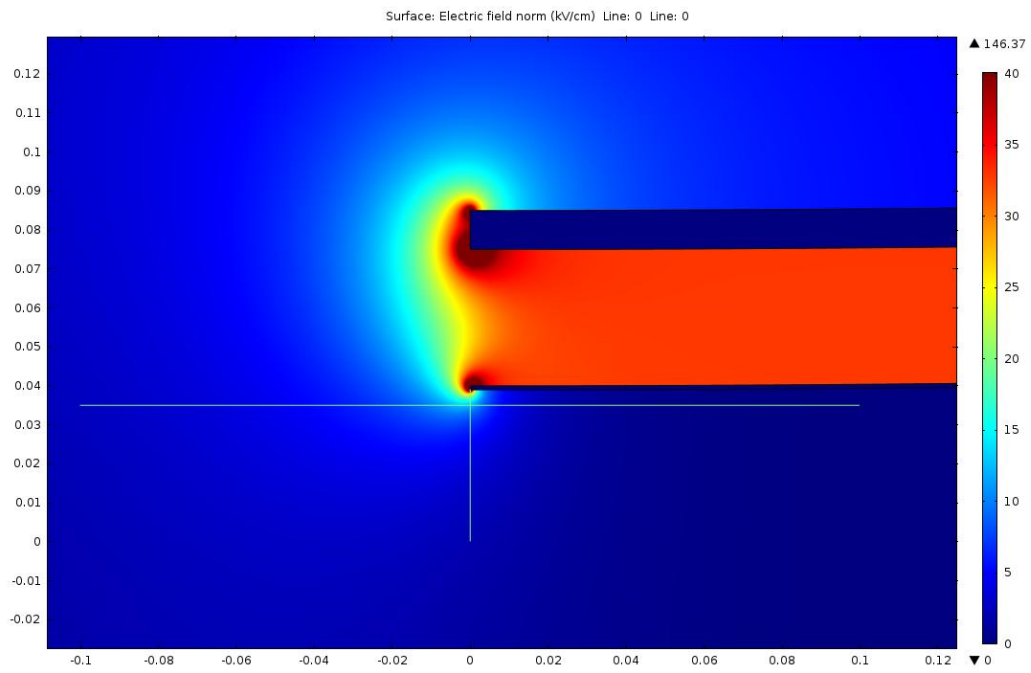


Рис. П.3.1.11. Распределение электрического поля на выходе электростатического септума ИЭС

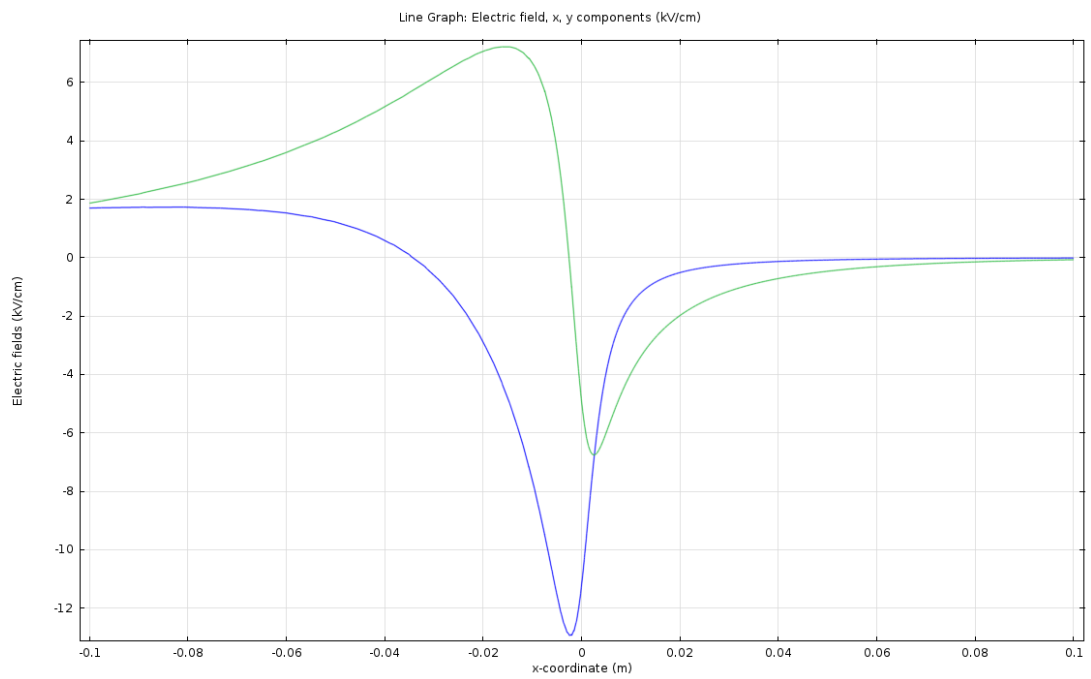


Рис. П.3.1.12. Распределение рассеянного электрического поля электростатического септума ИЭС вдоль горизонтальной линии, изображённой на Рис. П.3.1.11

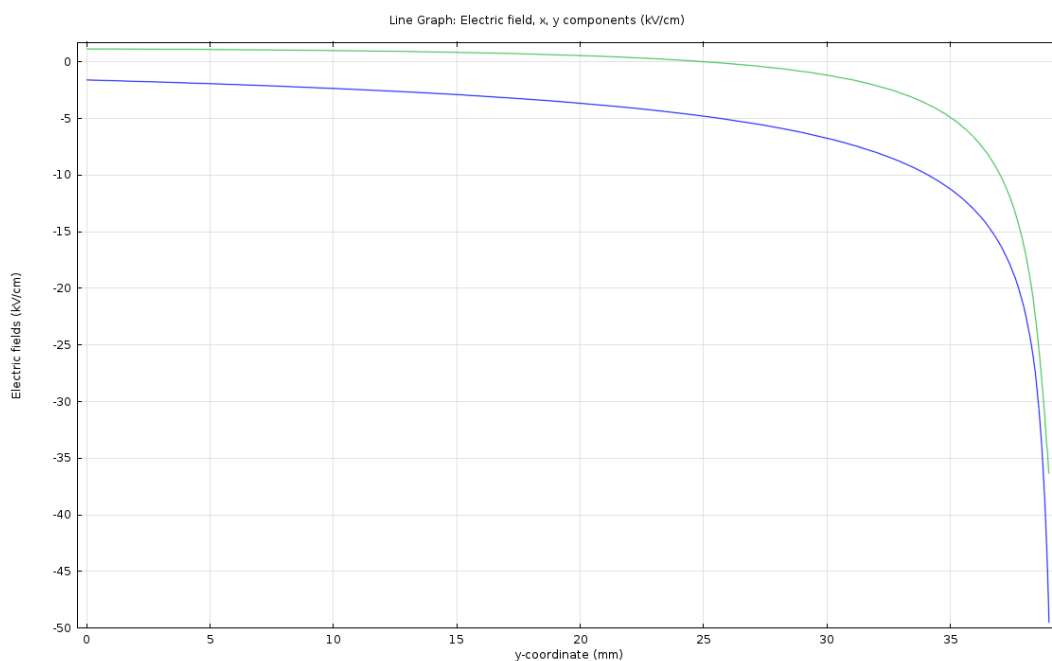


Рис. П.3.1.13. Распределение рассеянного электрического поля электростатического септума ИЭС вдоль вертикальной линии, изображённой на Рис. П.3.1.11

На Рис. П.3.1.14 – Рис. П.3.1.16 представлены результаты моделирования распределения электрического поля электрических импульсных пластин ИПЗ по поперечному сечению. На Рис. П.3.1.17 и Рис. П.3.1.18 представлены результаты моделирования распределения электрического поля электрических импульсных пластин ИПЗ по продольному сечению. Потенциалы на пластинах: 60 кВ на пластине № 1 (левая пластина на рисунках), 0 на пластине № 2 (правая пластина на рисунках).

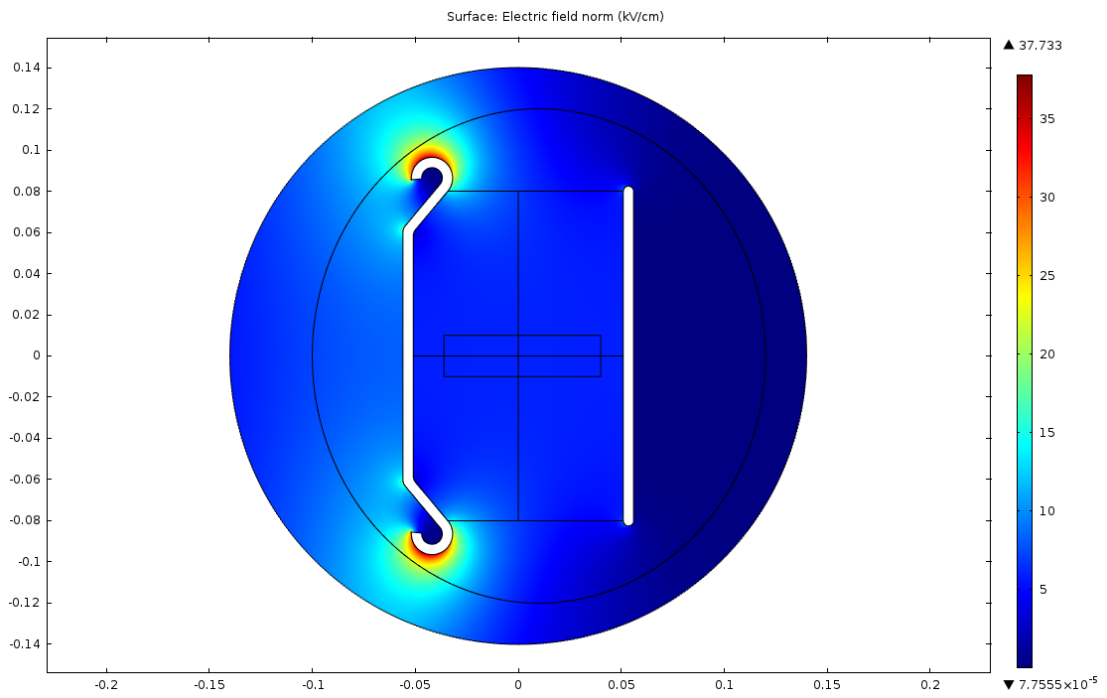


Рис. П.3.1.14. Распределение поля электрических импульсных пластин ИПЗ внутри вакуумного бокса. Прямоугольник в центре — рабочая область импульсных пластин

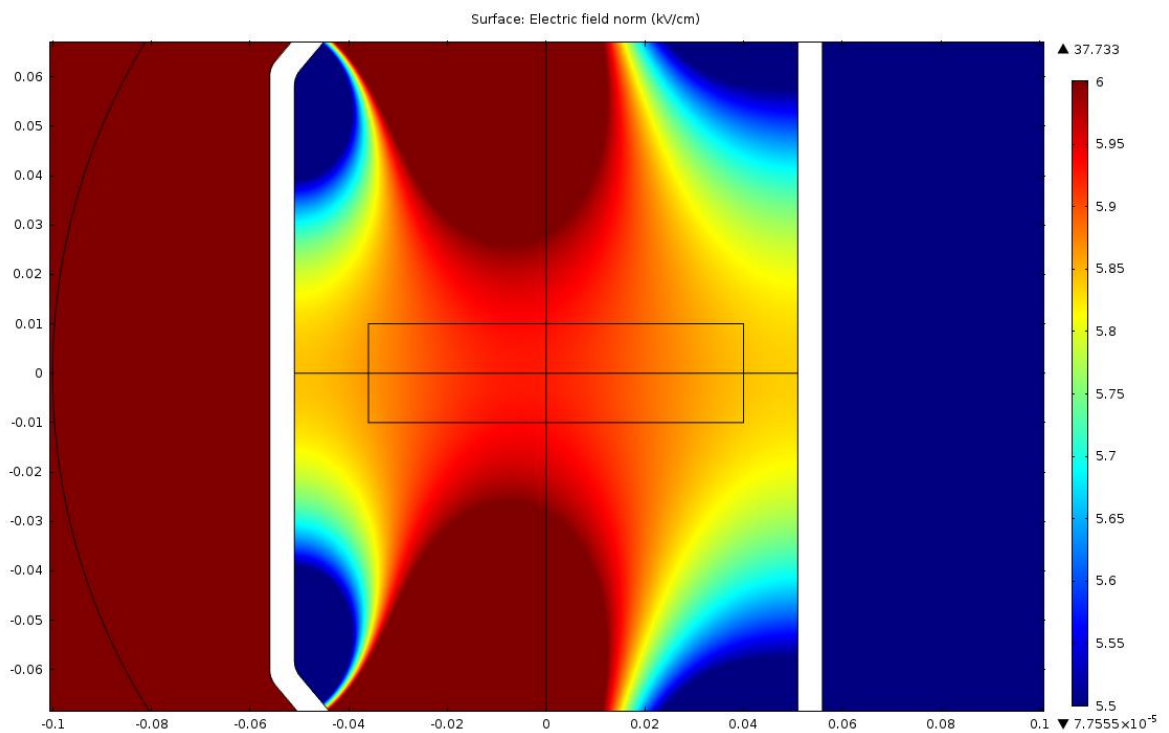


Рис. П.3.1.15. Распределение поля электрических импульсных пластин ИПЗ в рабочей области

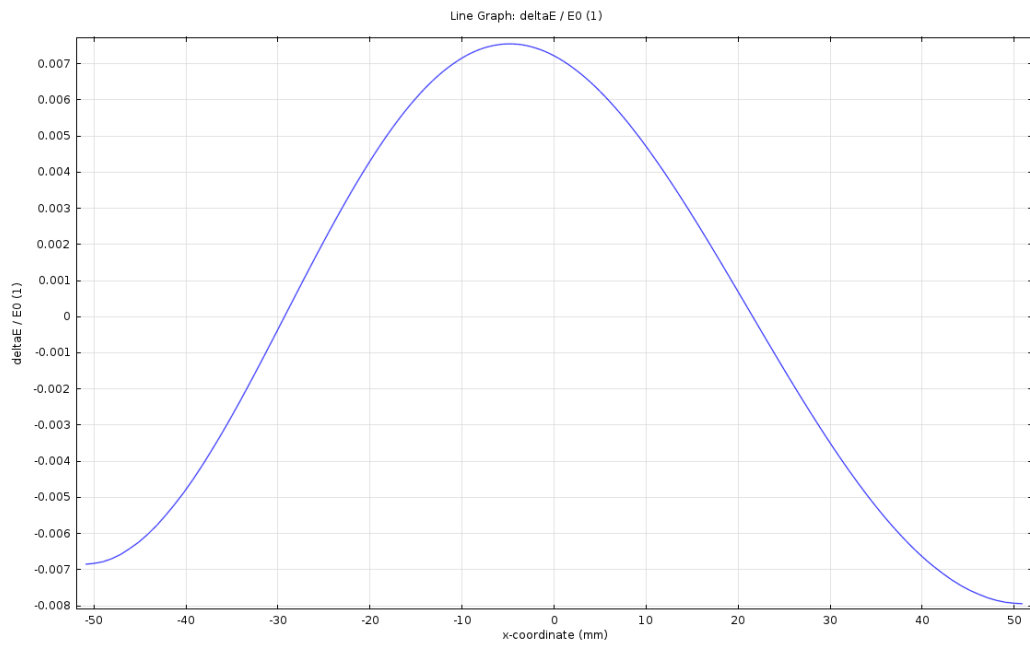


Рис. П.3.1.16. Однородность поля электрических импульсных пластин ИПЗ вдоль центральной горизонтальной линии ($x = 0$)

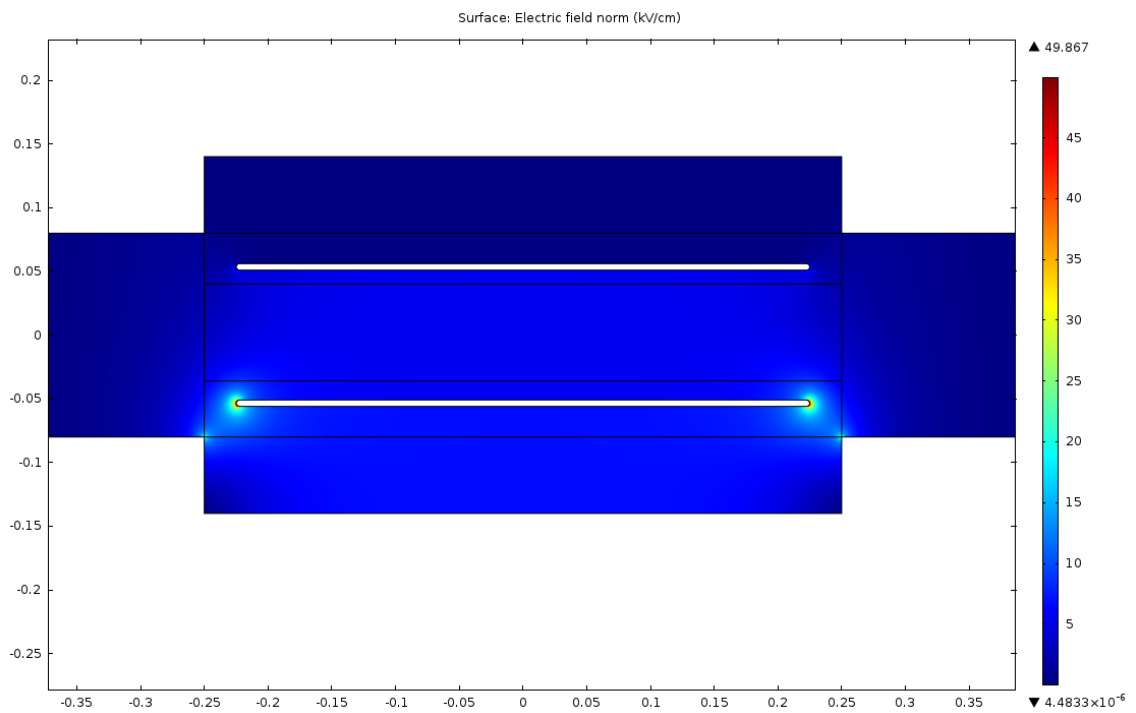


Рис. П.3.1.17. Распределение поля электрических импульсных пластин ИПЗ внутри вакуумного бокса

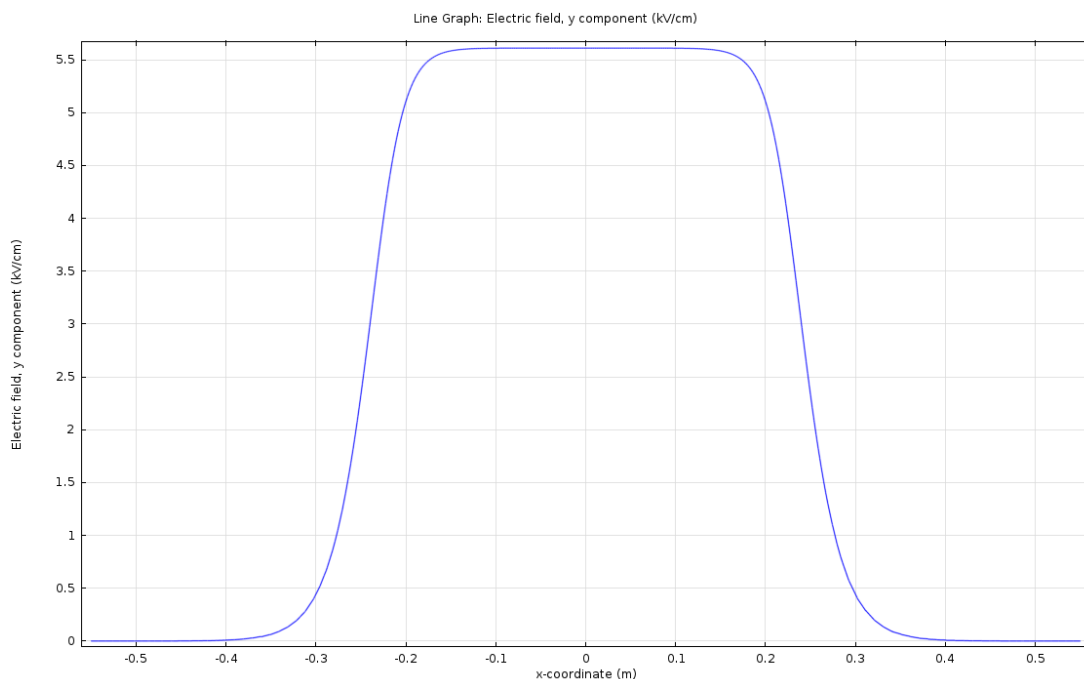


Рис. П.3.1.18. Распределение поля электрических импульсных пластин ИПЗ вдоль осевой траектории пучка

П.3.1.4 Динамика ионов

Для определения положений и характеристик элементов системы инжекции было проведено моделирование динамики ионных пучков при инжекции в Бустер. Моделирование динамики ионов проводилось программой MAD.

П.3.1.4.1 Огибающая циркулирующего пучка и положение элементов системы инжекции

Для сохранения бетатронного аксептанса Бустера устройства системы инжекции устанавливаются так, что их конструктивные элементы располагаются за максимальной огибающей пучка (огибающей пучка с эмиттансом равным аксептансу Бустера). На Рис. П.3.1.19 приведены максимальные огибающие циркулирующего пучка по горизонтали и вертикали.

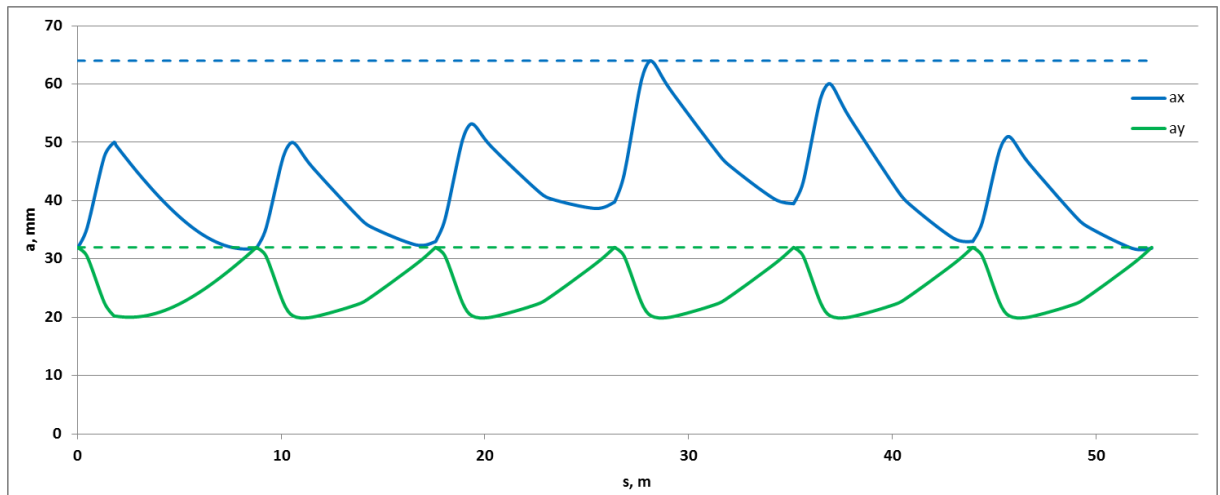


Рис. П.3.1.19. Максимальные огибающие циркулирующего пучка на одном суперпериоде Бустера

Из максимальной огибающей пучка определяются координаты различных элементов устройств системы инжекции, указанные в Таблице П.3.1.1. Положительное направление в Таблице П.3.1.1 означает направление от геометрического центра Бустера.

Таблица П.3.1.1. Координаты конструктивных элементов устройств системы инжекции относительно оси вакуумной камеры Бустера (в мм)

Нож электростатического септума на выходе	+37
Ближняя к циркулирующему пучку поверхность импульсных пластин:	
– пластина № 1 ИП1	-51
– пластина № 2 ИП1	+51
– пластина № 1 ИП2	-36
– пластина № 2 ИП2	+57
– пластина № 1 ИП3	-51
– пластина № 2 ИП3	+51

П.3.1.4.2 Накопление ионов в Бустере с помощью различных схем инжекции

Расчеты по динамике пучка при инжекции проводились в приближении идеальной магнитной структуры Бустера. В качестве начальной точки был выбран выход из электростатического септума ИЭС.

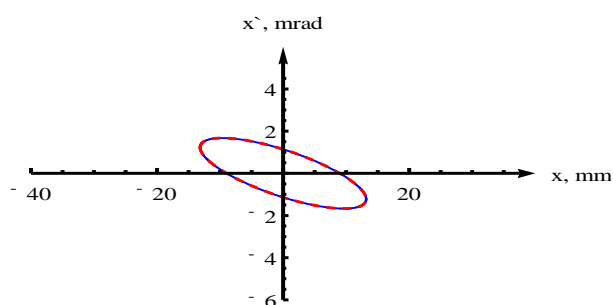
Из рассмотренного множества схем инжекции пучка было отобрано 11 схем, при использовании которых горизонтальный эмиттанс накопленного пучка после филаментации фазового распределения ионов не превышает горизонтального акцептанса Бустера. В Таблице П.3.1.2 даны значения горизонтальных эмиттансов пучка для отобранных схем инжекции. Соответствующие фазовые портреты пучка показаны на Рис. П.3.1.20.

Результаты моделирования динамики ионов при инжекции представлены на Рис. П.3.1.21 – Рис. П.3.1.26. На них для некоторых схем инжекции даны огибающие инжектируемого и накопленного пучков в окрестности 1-го прямолинейного промежутка Бустера. Параметры

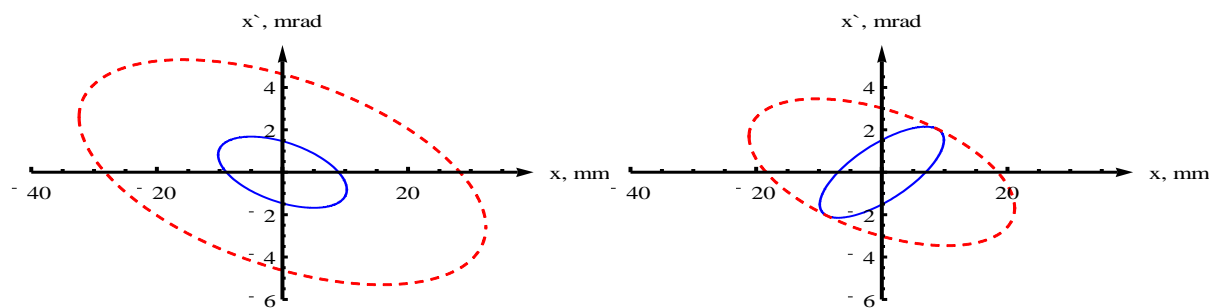
инжектируемого пучка на выходе электростатического септума, использованные при моделировании, приведены в Таблице П.3.1.3.

Таблица П.3.1.2. Горизонтальные эмиттансы накопленного пучка

Схема инъекции пучка	Горизонтальный эмиттанс, $\mu\text{мм}\cdot\text{мрад}$
а) Однократная однооборотная инъекция согласованного пучка с точной посадкой на замкнутую орбиту	15
б) Однократная однооборотная инъекция со смещением пучка	$15 \div 150$
в) Однократная однооборотная инъекция несогласованного пучка	$15 \div 150$
г) Однократная многооборотная инъекция с одноступенчатым режимом	120
д) Однократная двухоборотная инъекция с двухступенчатым режимом	65
е) Двукратная однооборотная инъекция с одноступенчатым режимом и статическим вводом ионов	135
ж) Двукратная однооборотная инъекция с одноступенчатым режимом и динамическим вводом ионов	95
з) Двукратная однооборотная инъекция с двухступенчатым режимом и статическим вводом ионов	65
и) Двукратная однооборотная инъекция с двухступенчатым режимом и динамическим вводом ионов	52
к) Трёхкратная однооборотная инъекция с двухступенчатым режимом и статическим вводом ионов	135
л) Трёхкратная однооборотная инъекция с двухступенчатым режимом и динамическим вводом ионов	102



а)



б)

е)

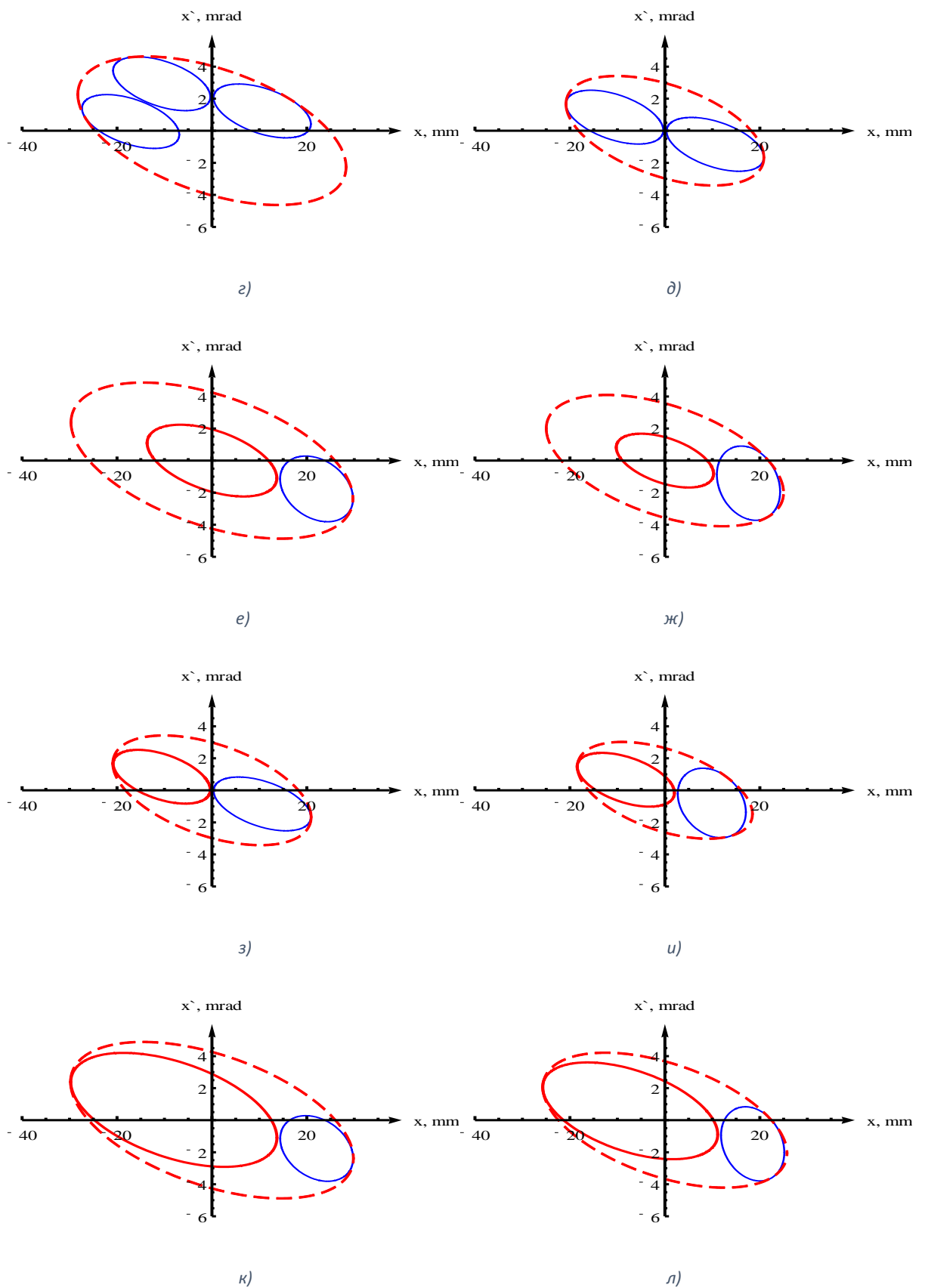


Рис. П.3.1.20. Фазовые портреты накопленного пучка в точке выхода септума по окончании инъекции и после филаментации фазового распределения ионов. Буквенные обозначения под рисунками соответствуют обозначениям схем инъекции в Таблице П.3.1.2

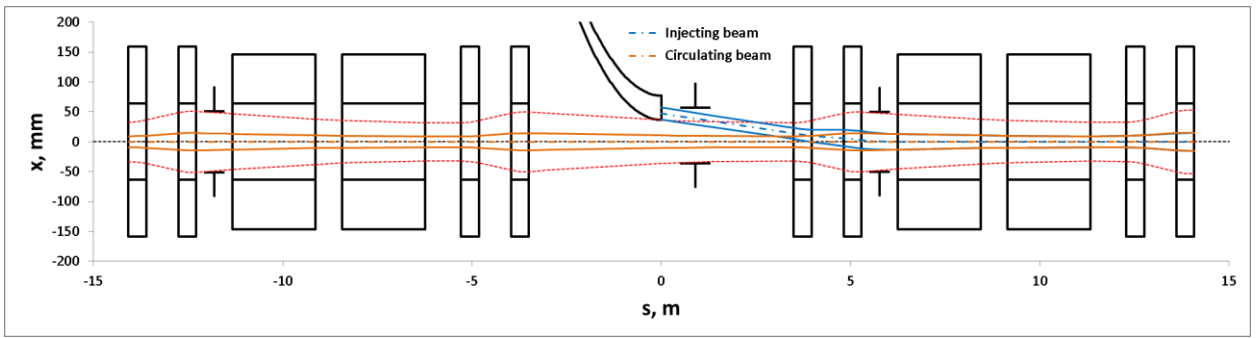


Рис. П.3.1.21. Огибающие накапливаемого и накопленного пучков для основной схемы однократной однооборотной инжекции

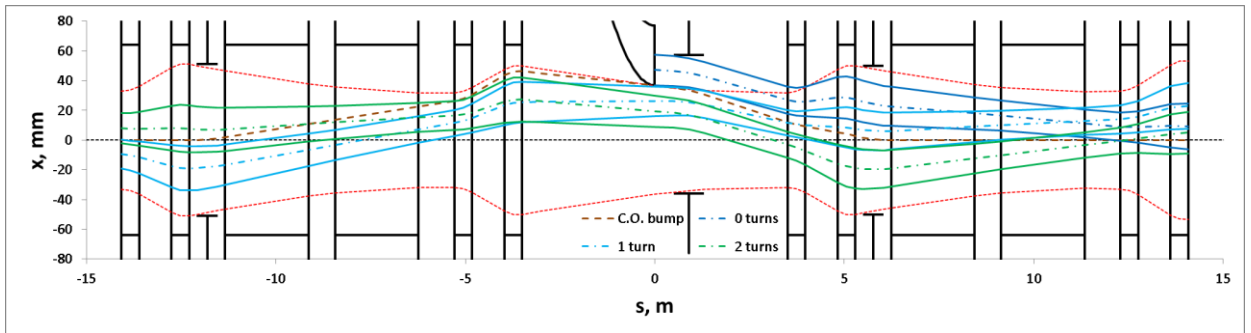


Рис. П.3.1.22. Огибающие накапливаемого пучка на третьем обороте инжекции по схеме однократной многооборотной инжекции с одноступенчатым режимом работы пластин

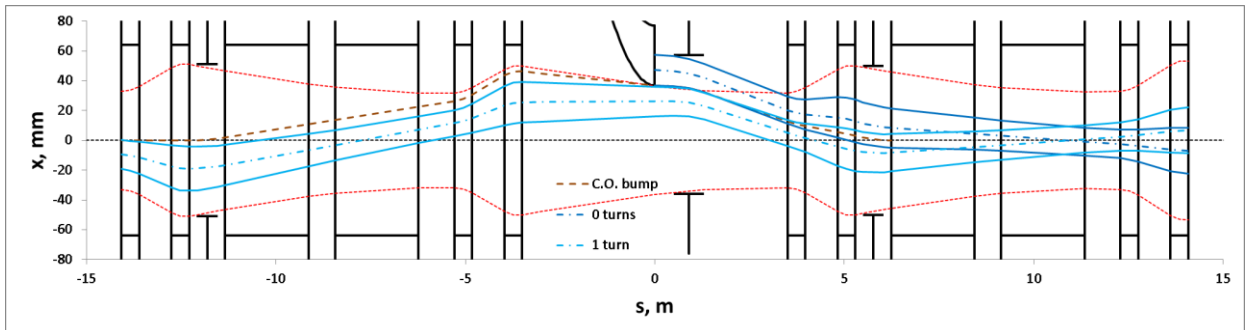


Рис. П.3.1.23. Огибающие накапливаемого пучка на втором обороте инжекции по схеме однократной двухоборотной инжекции с двухступенчатым режимом работы пластин

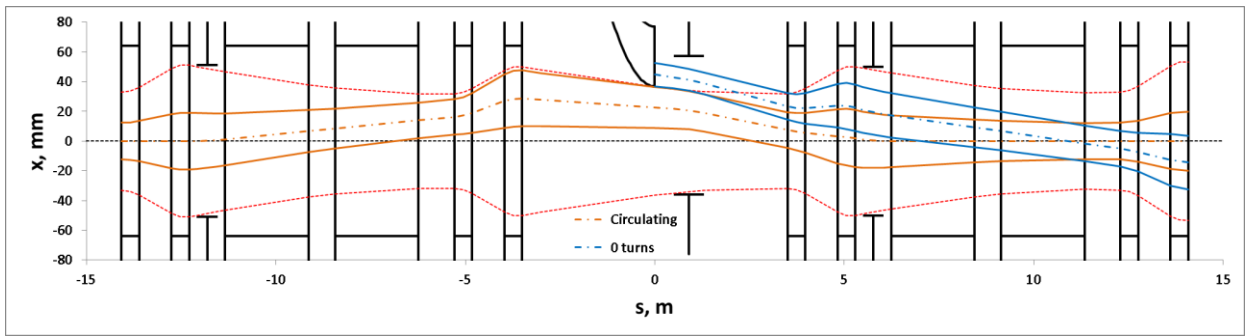


Рис. П.3.1.24. Огибающие инжектируемого и накопленного пучков на второй стадии инжекции по схеме двукратной однооборотной инжекции с одноступенчатым режимом работы пластин и статическим режимом ввода ионов

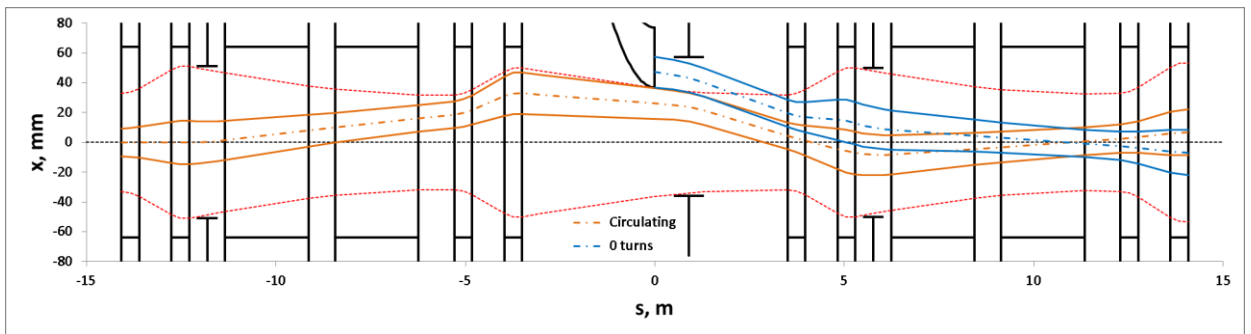


Рис. П.3.1.25. Огибающие инжектируемого и накопленного пучков на второй стадии инжекции по схеме двукратной однооборотной инжекции с двухступенчатым режимом работы пластин и статическим режимом ввода ионов

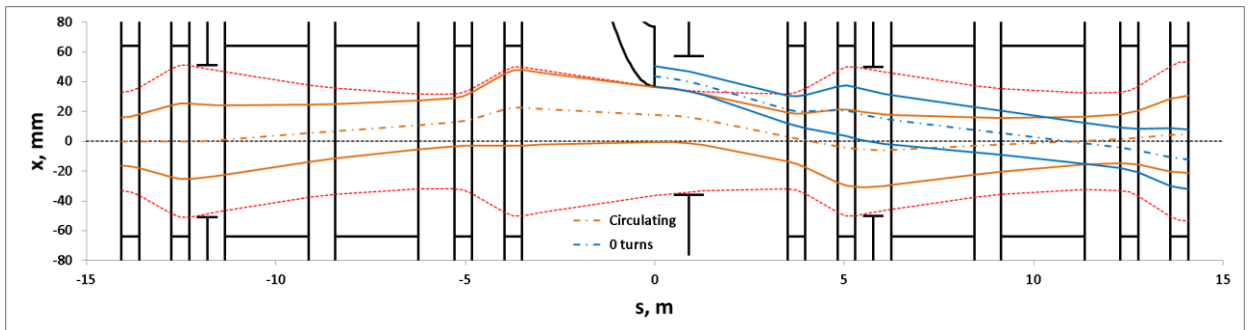


Рис. П.3.1.26. Огибающие инжектируемого и накопленного пучков на третьей стадии инжекции по схеме трёхкратной однооборотной инжекции с двухступенчатым режимом работы пластин и динамическим режимом ввода ионов

Таблица П.3.1.3. Параметры инжектируемого пучка на выходе септума

Схема инъекции	X_{inj} , мм	X'_{inj} , мрад	β_{inj} , м	α_{inj}
а), б)	47,2	-9,62	7	0,56
в)	47,2	-9,62	см. Рис. П.3.1.27	
г), д)	47,2	-1,56	7	0,56
е):				
– 1 стадия	44,7	-9,1	3,9	0,32
– 2 стадия	44,7	-3,5	3,9	0,32
ж):				
– 1 стадия	47,2	-9,62	7	0,56
– 2 стадия	43,7	-3,4	3	0,24
з):				
– 1 стадия	47,2	-9,62	7	0,56
– 2 стадия	47,2	-3,69	7	0,56
и), л):				
– 1 стадия	47,2	-9,62	7	0,56
– 2 стадия	44,2	-3,44	3,4	0,27
– 3 стадия	43,7	-3,43	3	0,24
к):				
– 1 стадия	44,7	-9,1	3,9	0,32
– 2 стадия	44,7	-3,5	3,9	0,32
– 3 стадия	44,7	-3,52	3,9	0,32

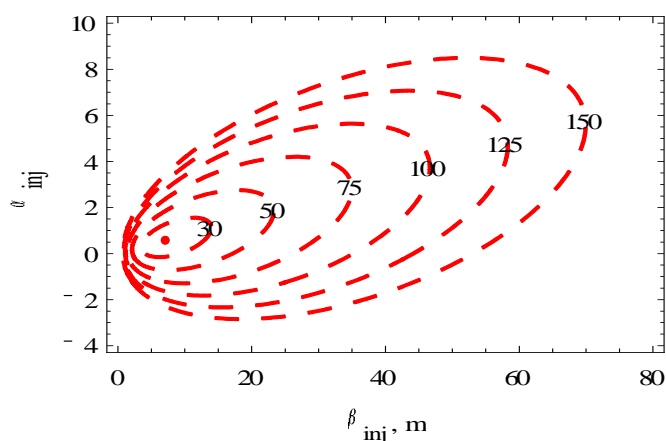


Рис. П.3.1.27. Контуры равных значений горизонтального эмиттанса накопленного пучка в зависимости от значений бетатронных функций инжектируемого пучка на выходе электростатического септума ИЭС

П.3.1.5 Электростатический септум

Электростатический септум ИЭС представляет собой пару криволинейных электродов, устанавливаемую внутри вакуумного бокса. Катод размещается с внешней стороны от анода. Высокое напряжение подаётся на катод, анод заземляется.

При проектировании электростатического септума рассматривалось 2 варианта: «тёплый» (эксплуатируемый при комнатной температуре) и «холодный» (эксплуатируемый при температуре жидкого азота около 80 °К).

П.3.1.5.1 Холодный вариант

Криостатный модуль электростатического септума включает в себя вакуумный кожух, вакуумный бокс септума, тепловой экран, систему крепления вакуумного бокса, систему подачи высокого напряжения на катод, трубочные и кабельные коммуникации.

Вакуумный бокс септума цилиндрический, с торцов имеет патрубки с фланцами для соединения со смежными вакуумными камерами. Наверху бокса размещается патрубок для подключения геттерного насоса вакуумной откачки. Через отверстие в боковой стенке вакуумного бокса с помощью высоковольтного ввода к катоду подводится высокое напряжение. Крепление катода к стенке вакуумного бокса осуществляется посредством опорных изоляторов. Стенки вакуумного бокса предполагаются разборными для возможности установки внутрь электродов.

Вакуумный кожух цилиндрический, с фланцами на торцах для соединения со смежными переходными сильфонными элементами криостата Бустера. Снизу имеются опоры для установки криостатного модуля на подставку. В боковой стенке имеется отверстие для ввода высокого напряжения.

Тепловой экран, охлаждаемый потоком кипящего азота, располагается между вакуумным боксом септума и вакуумным кожухом. Тепловой экран имеет отверстия для креплений вакуумного бокса и ввода высокого напряжения.

Трубочные и кабельные коммуникации включают гелиевые коллекторы, трубки с жидким азотом и сверхпроводящие кабели электрической связи магнитных элементов Бустера.

Система подачи высокого напряжения на катод включает два высоковольтных ввода и два проводящих стержня. Высоковольтные вводы монтируются в отверстия в стенках вакуумного бокса, в тепловом экране и в вакуумном кожухе. Проводящие стержни соединяют высоковольтные вводы друг с другом и с катодом соответственно.

Система крепления вакуумного бокса обеспечивает установку бокса внутри кожуха и юстировку его положения. Крепление вакуумного бокса к кожуху осуществляется таким образом, что после охлаждения кольца Бустера положение бокса относительно кожуха остаётся неизменным.

П.3.1.5.2 Тёплый вариант

Вакуумный бокс электростатического септума цилиндрический, с торцов имеет патрубки с фланцами для соединения со смежными вакуумными камерами. Наверху бокса размещается патрубок для подключения поста откачки тёплой пучковой камеры. Через отверстие в боковой стенке вакуумного бокса с помощью высоковольтного ввода и проводящего стержня к катоду

подводится высокое напряжение. Крепление катода к стенкам вакуумного бокса осуществляется посредством опорных изоляторов. Стенки вакуумного бокса предполагаются разборными для возможности установки внутрь электродов.

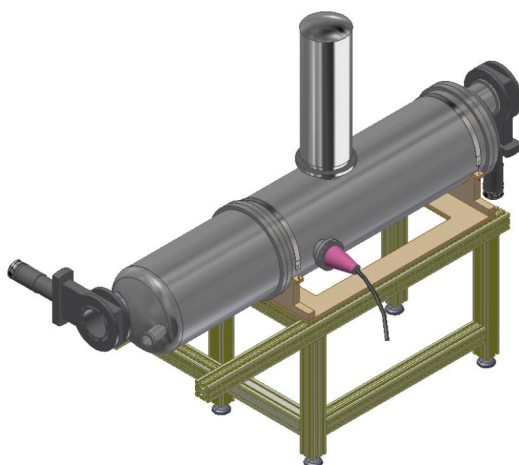


Рис. П.3.1.28. Трёхмерная модель тёплого варианта электростатического септума

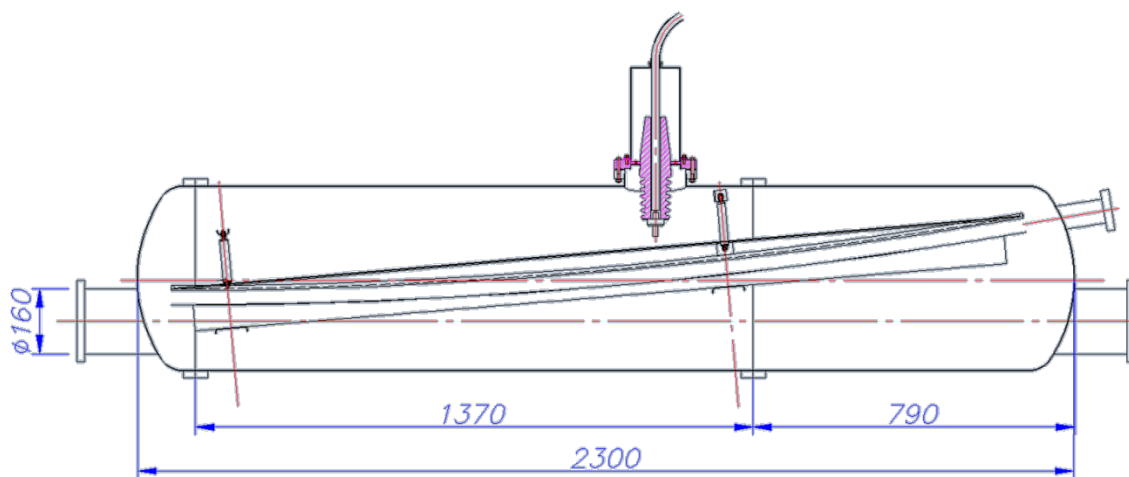


Рис. П.3.1.29. Продольное сечение тёплого варианта электростатического септума

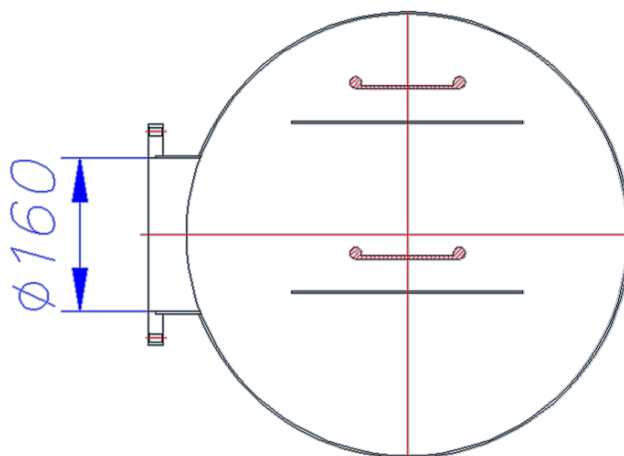


Рис. П.3.1.30. Поперечное сечение тёплого варианта электростатического септума

Характеристики электростатического септума приведены в Таблице П.3.1.4.

Таблица П.3.4.1. Основные параметры электростатического септума ИЭС

Длина	1970 мм
Зазор между анодом и катодом	35 мм
Расстояние от оси прямолинейного промежутка до анода, мм:	
– на входе септума	203
– на выходе септума	39
Радиус кривизны электродов, м	12
Толщина электродов, мм:	
– анод	1
– катод	12
Максимальный электрический потенциал на катоде, кВ	120
Неоднородность электрического поля по поперечному сечению	±1 %

П.3.1.6 Электрические импульсные пластины

Электрические импульсные пластины ИП1 — ИП3 представляют собой три пары проводящих пластин, устанавливаемых вертикально внутри вакуумных боксов параллельно оси движения пучка. Источники питания пластин осуществляют независимую однополярную зарядку и разрядку пластин, составляющих пару (обозначаемых как пластина № 1 и пластина № 2).

П.3.1.6.1 Модули пластин ИП1 и ИП3

Криостатный модуль импульсных пластин ИП1 и ИП3 включает в себя вакуумный кожух, вакуумный бокс импульсных пластин, тепловой экран, систему крепления вакуумного бокса, систему подачи импульсного напряжения на пластины, трубочные и кабельные коммуникации.

Вакуумный бокс импульсных пластин цилиндрический, с торцов имеет патрубки с фланцами для соединения с вакуумными камерами смежных модулей с дипольным магнитом и дуплетом квадрупольных линз. Наверху бокса размещается патрубок для подключения геттерного насоса вакуумной откачки. Через отверстия в боковых стенках вакуумного бокса с помощью

высоковольтных вводов к пластинам подводится импульсное напряжение. Крепление пластин к стенкам вакуумного бокса осуществляется посредством опорных изоляторов. Стенки вакуумного бокса предполагаются разборными для возможности установки внутрь пластин.

Вакуумный кожух цилиндрический, с фланцами на торцах для соединения со смежными сильфонными элементами криостата Бустера. Снизу имеются опоры для установки криостатного модуля на подставку. С боков имеются отверстия для ввода импульсного напряжения.

Тепловой экран, охлаждаемый потоком кипящего азота, располагается между вакуумным боксом импульсных пластин и вакуумным кожухом. Тепловой экран имеет отверстия для креплений вакуумного бокса и ввода импульсного напряжения.

Трубочные и кабельные коммуникации включают гелиевые коллекторы, трубки с жидким азотом и сверхпроводящие кабели электрической связи магнитных элементов Бустера.

Система подачи импульсного напряжения на пластины включает высоковольтные вводы и проводящие стержни. На каждую пластину требуются два высоковольтных ввода и два проводящих стержня. Высоковольтные вводы монтируются в отверстия в стенках вакуумного бокса, в тепловом экране и в вакуумном кожухе. Проводящие стержни соединяют высоковольтные вводы друг с другом и с пластинами соответственно.

Система крепления вакуумного бокса обеспечивает установку бокса внутри кожуха и юстировку его положения. Крепление вакуумного бокса к кожуху осуществляется таким образом, что после охлаждения кольца Бустера положение бокса относительно кожуха остаётся неизменным.

П.3.1.6.2 Модуль пластин ИП2

При проектировании модуля импульсных пластин ИП2 рассматривалось 2 варианта: «тёплый» (эксплуатируемый при комнатной температуре) и «холодный» (эксплуатируемый при температуре жидкого азота около 80 °К), аналогичный модулям ИП1 и ИП3.

Вакуумный бокс «тёплого» варианта импульсных пластин цилиндрический, с торцов имеет патрубки с фланцами для соединения со смежными вакуумными камерами. Наверху бокса размещается патрубок для подключения поста откачки тёплой пучковой камеры. Через отверстия в боковых стенках вакуумного бокса с помощью высоковольтных вводов к пластинам подводится импульсное напряжение. Крепление пластин к стенкам вакуумного бокса осуществляется посредством опорных изоляторов.

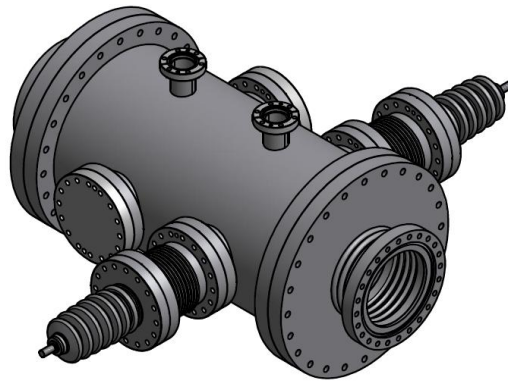


Рис. П.3.1.31. Трёхмерная модель вакуумного бокса импульсных пластин ИПЗ

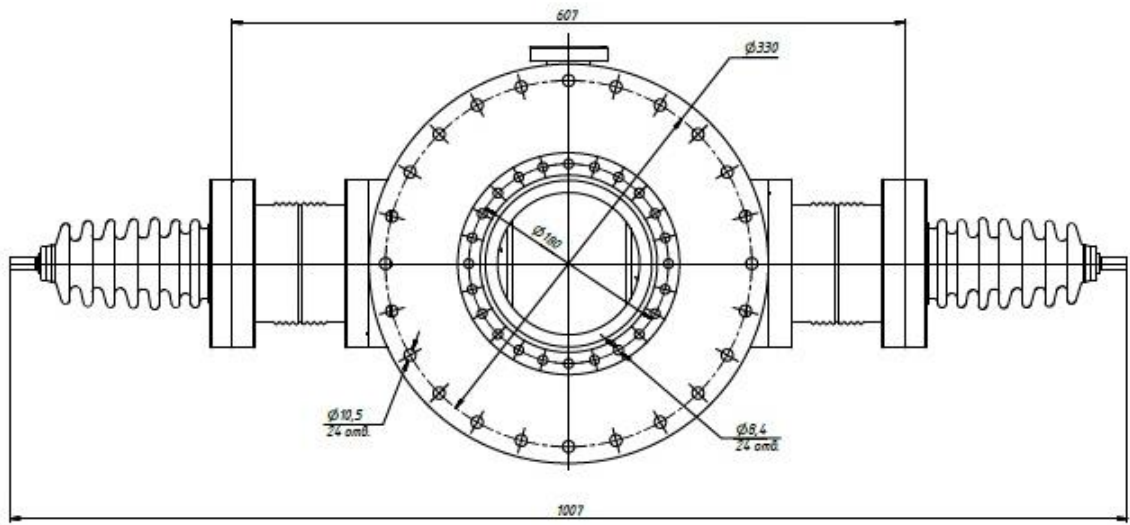


Рис. П.3.1.32. Вид вакуумного бокса импульсных пластин ИПЗ с торца

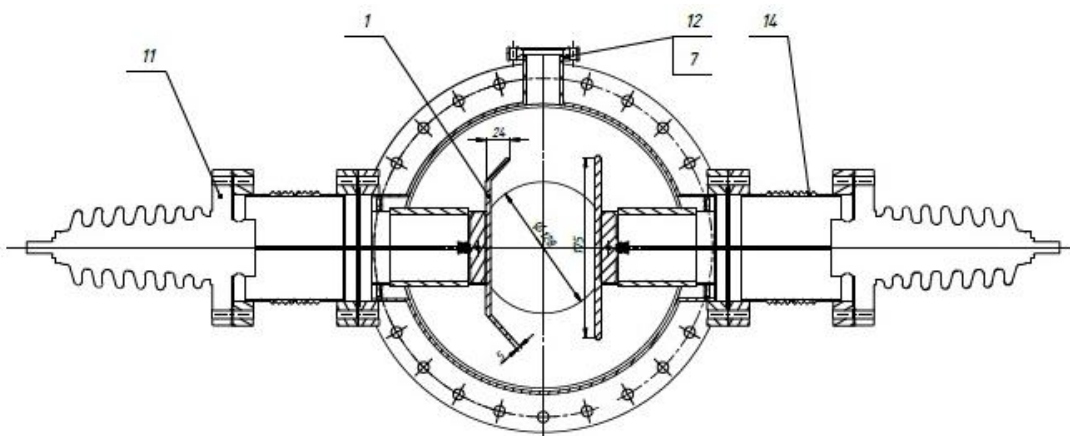


Рис. П.3.1.33. Поперечное сечение вакуумного бокса импульсных пластин ИПЗ

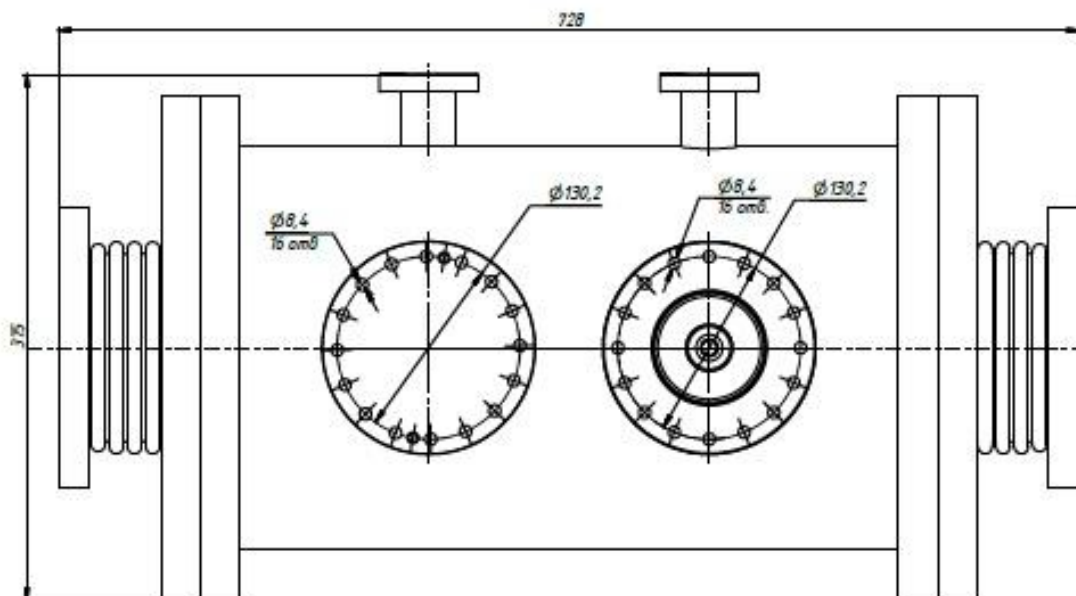


Рис. П.3.1.34. Вид вакуумного бокса импульсных пластин ИПЗ сбоку

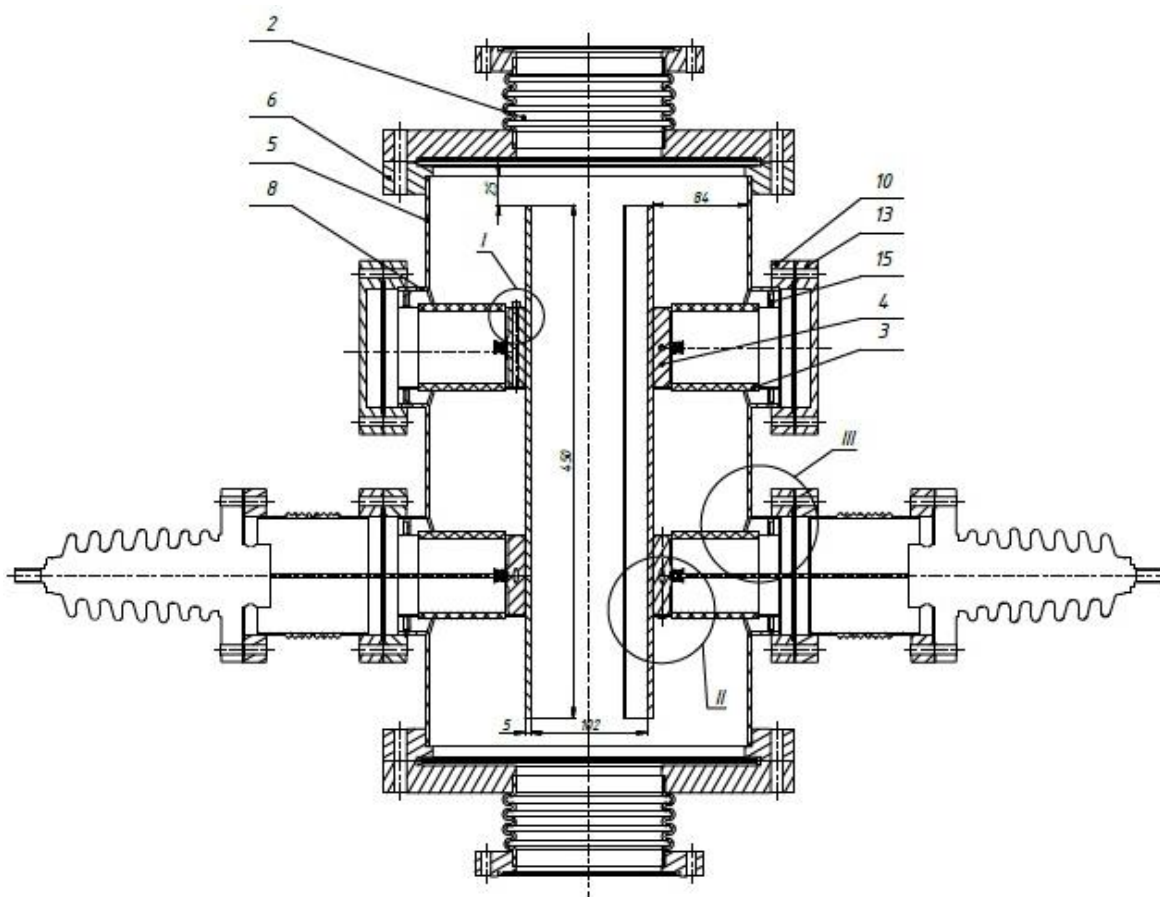


Рис. П.3.1.35. Продольное сечение вакуумного бокса импульсных пластин ИПЗ

Характеристики импульсных пластин приведены в Таблице П.3.1.5.

Таблица П.3.1.5. Основные параметры импульсных пластин ИП1 — ИП3

Длина пластин, мм:	
– ИП1, ИП3	450
– ИП2	800
Полная высота пластин, мм:	
– ИП1, ИП3	180
– ИП2	180
Расстояние между пластинами № 1 и № 2, мм:	
– ИП1, ИП3	102
– ИП2	93
Положение пластин относительно оси вакуумной камеры, мм:	
– пластина № 1 ИП1, ИП3	-51
– пластина № 2 ИП1, ИП3	+51
– пластина № 1 ИП2	-36
– пластина № 2 ИП2	+57
Неоднородность электрического поля по поперечному сечению	±1 %
Максимальный электрический потенциал на пластинах, кВ:	
– пластина № 1 ИП1	40
– пластина № 2 ИП1	0
– пластина № 1 ИП2	40
– пластина № 2 ИП2	15
– пластина № 1 ИП3	60
– пластина № 2 ИП3	15

П.3.1.7 Источник питания электростатического септума

Основные параметры источника питания электростатического септума даны в Таблице П.3.1.6.

Таблица П.3.1.6. Основные параметры источника питания электростатического септума

Тип источника электропитания	циклический
Максимальное напряжение	130 кВ
Максимальный ток	9,2 мА
Мощность	1200 Вт
Длительность активной фазы цикла	0,5 ÷ 1 с
Неоднородность напряжения на плато	±0,1 %

П.3.1.8 Источники питания электрических импульсных пластин

Основные параметры источников питания электрических импульсных пластин даны в Таблице П.3.1.7.

Таблица П.3.1.7. Основные параметры источников питания электрических импульсных пластин

Максимальный электрический потенциал на плато импульса, кВ:	
– источник типа 1	60
– источник типа 2	40
– источник типа 3	20
Время зарядки пластин	< 50 мс
Длительность плато импульса	8 ÷ 30 мкс
Время разрядки пластин	≤ 0,1 мкс
Неоднородность напряжения на плато	≤ 1 %
Остаточное напряжение после разрядки пластин	≤ 0,5 кВ
Число импульсов в цикле инъекции	1 ÷ 3
Частота повторения импульсов в цикле инъекции	10 Гц

На Рис. П.3.1.36 приведена концептуальная схема источников питания импульсных пластин. В качестве коммутаторов в источниках используются водородные тиратроны с полым катодом (псевдоискровые разрядники двух типов), характеристики которых даны в Таблице П.3.1.8.

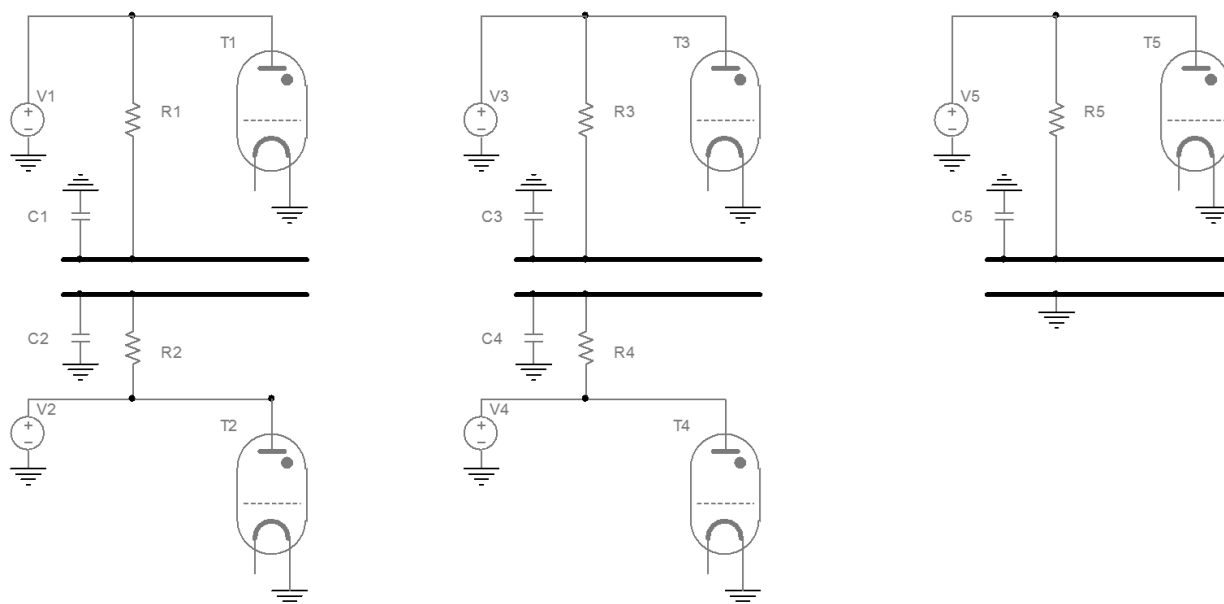


Рис. П.3.1.36. Концептуальная схема питания электрических импульсных пластин. Обозначения: $V1 \div V5$ — управляемые источники питания; $T1 \div T5$ — тиратроны; $R1 \div R5$ — разрядные резисторы; $C1 \div C5$ — полные ёмкости пластин на землю, включая ёмкости подводящих элементов

Таблица П.3.1.8. Параметры тиратронов

Модель	Напряжение, кВ	Анодный ток, кА	Средний ток, А	Габаритные размеры, $\varnothing \times H$, мм	Срок службы, Кл	Частота, кГц
ТПИ1-1к/20	0,6...25	3,0	0,1	32 × 105	$5 \times 10E6$	> 3,0
ТПИ1-5к/100*	3,0...100	5,0	0,3	125 × 220	$1 \times 10E6$	> 2,0

Устройства блокировки и сигнализации (УБС) электрических импульсных пластин обеспечивают:

1. блокировку включения накала при отсутствии охлаждения катода тиратрона;
2. блокировку включения высокого напряжения при отсутствии накала тиратрона;
3. блокировку включения высокого напряжения при открытых дверях ограждения колонны умножителя высоковольтного выпрямителя;
4. заземление высоковольтных цепей импульсных пластин при отключении высоковольтного выпрямителя или открывания двери ограждения умножительной колонны;
5. отключение высокого напряжения при отключении накала тиратрона;

6. отключение накала и высокого напряжения при исчезновении протока охлаждающей жидкости.

Сигнализация обеспечивает:

1. индикацию отсутствия охлаждения катода тиратрона;
2. индикацию включения накала тиратрона;
3. индикацию включения высоковольтного выпрямителя и наличия высокого напряжения на колонне умножителя и системе инфлекторных пластин.

Цепи УБС питаются напряжением +24 В. Все цепи напряжения 200/380 В подаются через штепсельные разъёмы и контакты закрытых кожухами реле, препятствующими возможности прикосновения к токоведущим цепям, находящимся под напряжением сети.

Приложение 2

к Главе 3

П.3.2 СИСТЕМА БЫСТРОГО ВЫВОДА ПУЧКА

П.3.2.1 Динамика ионов

Для определения положений и характеристик элементов системы быстрого вывода было проведено моделирование динамики ионных пучков при выводе из Бустера. Моделирование динамики ионов проводилось программой MAD.

П.3.2.1.1 Огибающая циркулирующего пучка и положение элементов системы быстрого вывода

Для сохранения бетатронного акцептанса Бустера устройства системы быстрого вывода устанавливаются так, что их конструктивные элементы располагаются за максимальной огибающей пучка (огибающей пучка с эмиттансом равным акцептансу Бустера). В Приложении 3.1 на Рис. П.3.1.19 приведены максимальные огибающие циркулирующего пучка по горизонтали и вертикали. Из максимальной огибающей пучка определяются координаты различных элементов устройств системы быстрого вывода, указанные в Таблице П.3.2.1. Положительное направление по горизонтали (координате x) в Таблице П.3.2.1 означает направление от геометрического центра Бустера, по вертикали (координате y) — направление вверх.

Таблица П.3.2.1. Координаты конструктивных элементов устройств системы быстрого вывода относительно оси вакуумной камеры Бустера (в мм)

Центры проводников ударного магнита, (x; y):	
– проводник № 1	(-5; -45)
– проводник № 2	(-5; +45)
– проводник № 3	(+75; -45)
– проводник № 4	(+75; +45)
Нож септум-магнита на входе	+36

П.3.2.1.2 Динамика пучка при быстром выводе из Бустера

Расчеты по динамике пучка при быстром выводе проводились в приближении идеальной магнитной структуры Бустера. В качестве начальной точки используется начало периодической DFO-ячейки Бустера с первым токовводом подсистемы бампа замкнутой орбиты.

Быстрый вывод ионов из Бустера осуществляется в 2 этапа. На первом этапе циркулирующий пучок подводится к ножу септум-магнита. В Таблице П.3.2.2 даны настройки подсистемы бампа замкнутой орбиты. Замкнутая орбита и огибающие циркулирующего пучка по окончании подводки показаны на Рис. П.3.2.1.

Таблица П.3.2.2. Настройки подсистемы бампа замкнутой орбиты

	Угол отклонения пучка, мрад	Разность требуемого и номинального токов, % (от номинального тока)	Ток в токовводе подсистемы, % (от номинального тока)
BM1	3,7	-2,4	-2,4 (токоотбор)
BM2	-1,4	+0,9	+3,3 (токодобавка)
BM3	-0,9	+0,6	-0,3 (токоотбор)
BM4	4,5	-2,9	-3,5 (токоотбор)
Замыкающий токоввод	-	-	+2,9 (токодобавка)

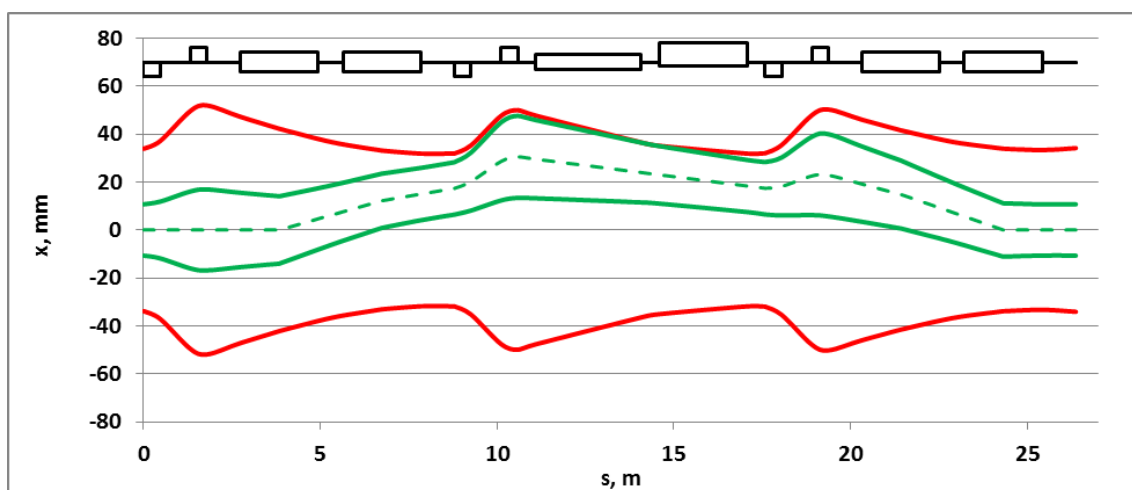


Рис. П.3.2.1. Замкнутая орбита и огибающие циркулирующего пучка по окончании его подводки к ножу септум-магнита

На втором этапе осуществляется собственно вывод ионов из Бустера. Угол отклонения пучка ударным магнитом составляет 15 мрад, септум-магнитом — 87 мрад. На Рис. П.3.2.2 показаны траектория и огибающие выводимого пучка.

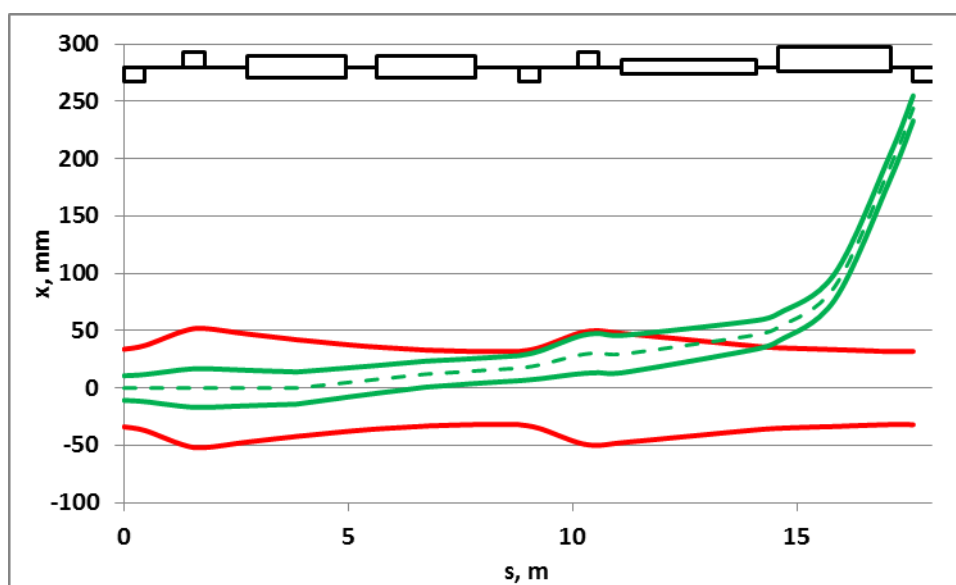


Рис. П.3.2.2. Траектория и огибающие пучка, выводимого из Бустера

П.3.2.2 Ударный магнит

Ударный магнит представляет собой две пары проводников, устанавливаемых внутри вакуумного бокса параллельно оси движения пучка. Ударный магнит разбит на два криостатных модуля. Полная длина — 3 м.

Криостатный модуль ударного магнита включает в себя вакуумный кожух, вакуумный бокс ударного магнита, тепловой экран, систему крепления вакуумного бокса, систему ввода импульсов тока на проводники, трубочные и кабельные коммуникации.

Вакуумный бокс ударного магнита цилиндрический, с торцов имеет патрубки с фланцами для соединения с вакуумными камерами смежных криостатных модулей. Наверху бокса размещается патрубок для подключения геттерного насоса вакуумной откачки. Через отверстия в боковых стенках вакуумного бокса с помощью высоковакуумных тоководов к проводникам подводятся импульсы токов. Крепление проводников к стенкам вакуумного бокса осуществляется посредством опорных изоляторов.

Вакуумный кожух цилиндрический, с фланцами на торцах для соединения со смежными сильфонными элементами криостата Бустера. Снизу имеются опоры для установки криостатного модуля на подставку. С боков имеются отверстия для тоководов.

Тепловой экран, охлаждаемый потоком кипящего азота, располагается между вакуумным боксом ударного магнита и вакуумным кожухом. Тепловой экран имеет отверстия для креплений вакуумного бокса и тоководов.

Трубочные и кабельные коммуникации включают гелиевые коллекторы, трубки с жидким азотом и сверхпроводящие кабели электрической связи магнитных элементов Бустера.

Система ввода импульсов тока на проводники включает тоководы и питающие стержни. Питание проводников ударного магнита осуществляется попарно. На каждую пару проводников требуются 4 токовода и 6 питающих стержней. Тоководы монтируются в отверстия в стенках вакуумного бокса, в тепловом экране и в вакуумном кожухе. Питающие стержни соединяют тоководы друг с другом и с проводниками ударного магнита соответственно.

Система крепления вакуумного бокса обеспечивает установку бокса внутри кожуха и юстировку его положения. Крепление вакуумного бокса к кожуху осуществляется таким образом, что после охлаждения кольца Бустера положение бокса относительно кожуха остаётся неизменным.

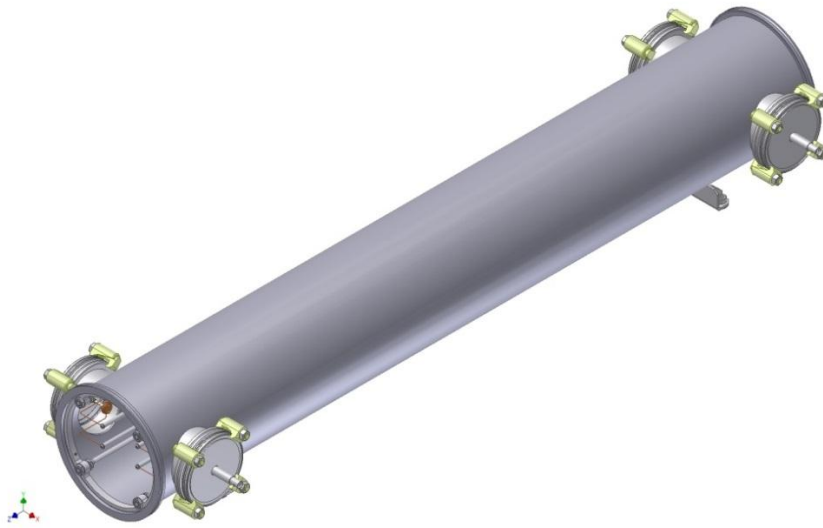


Рис. П.3.2.3. Общий вид вакуумного бокса ударного магнита

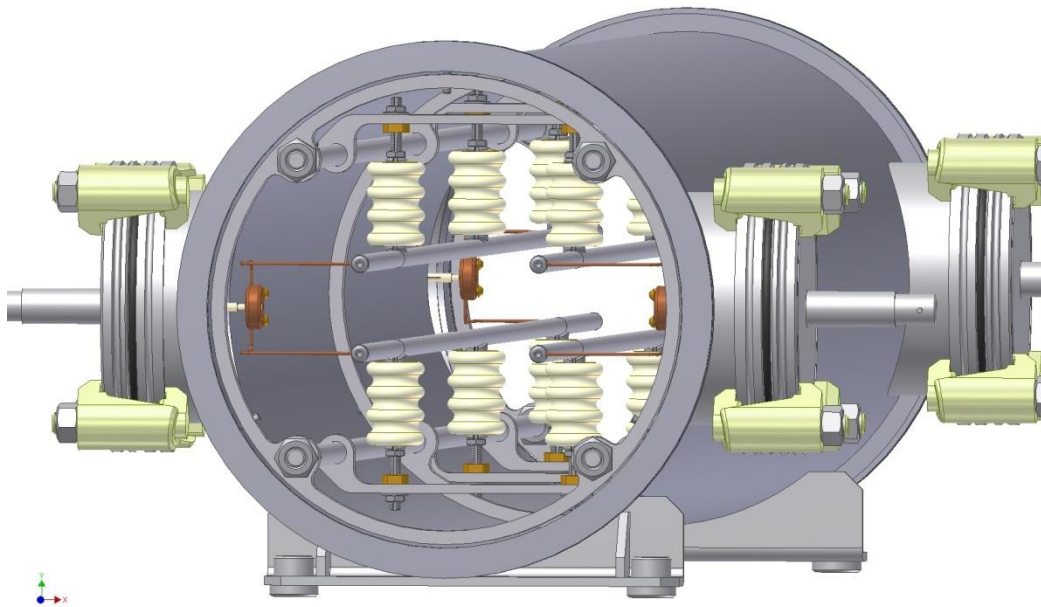


Рис. П.3.2.4. Вид спереди вакуумного бокса ударного магнита

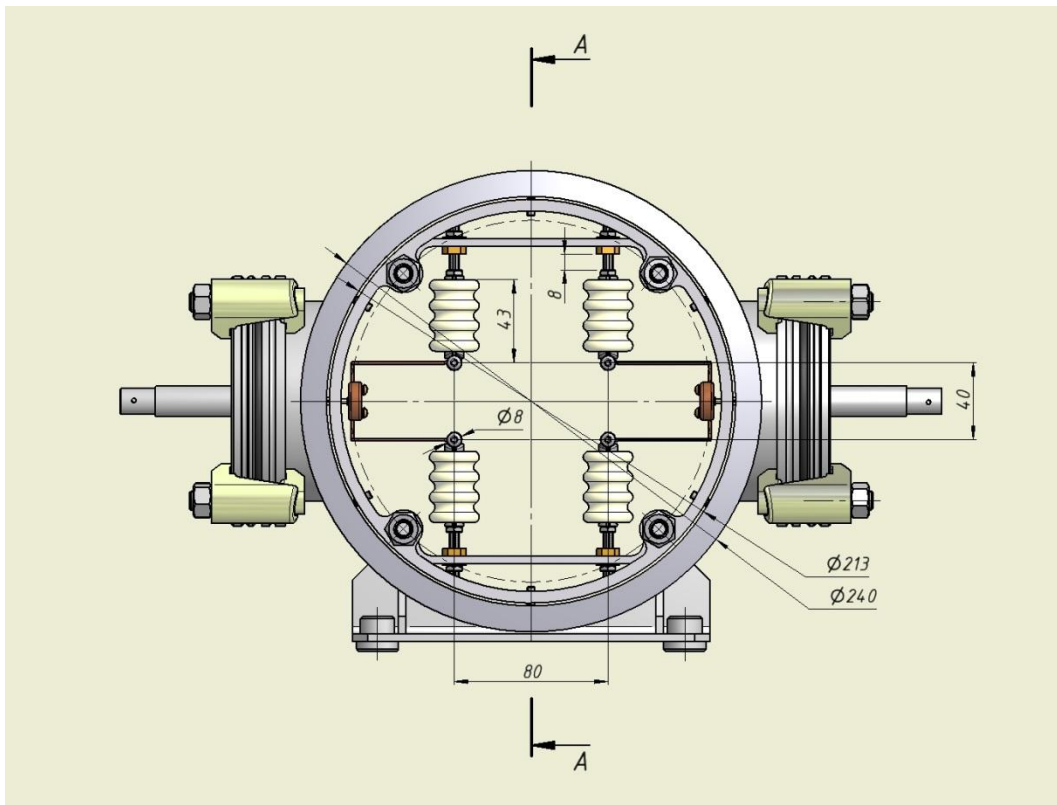


Рис. П.3.2.5. Поперечное сечение ударного магнита

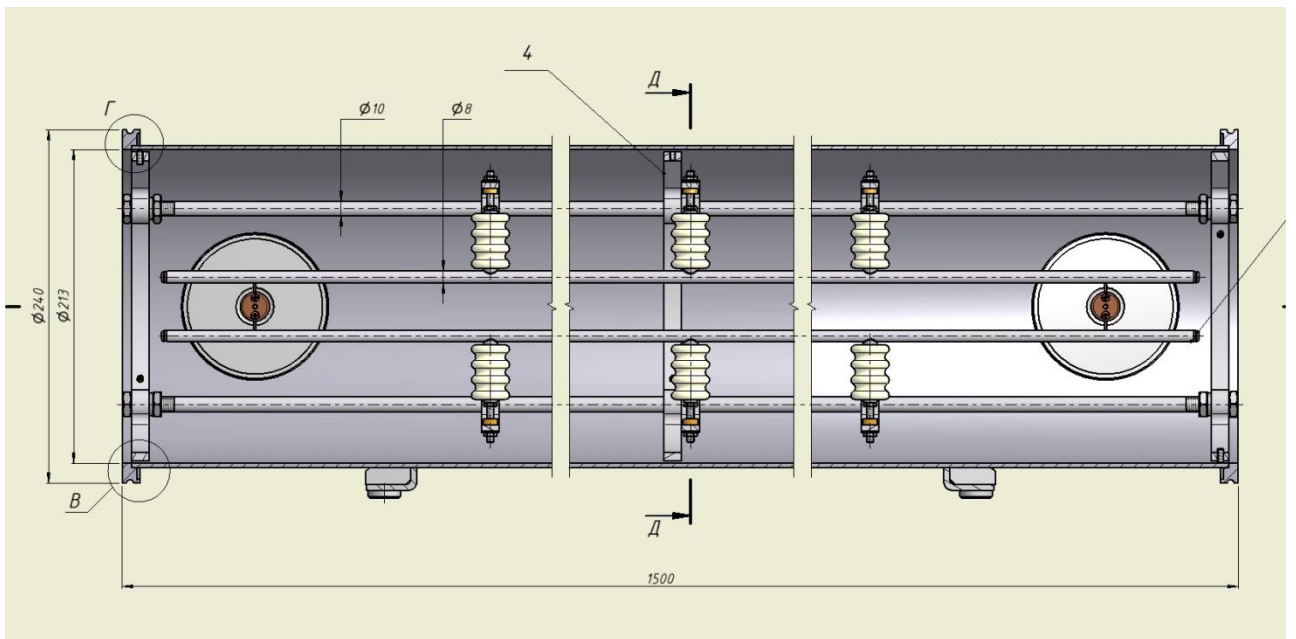


Рис. П.3.2.6. Продольное сечение вакуумного бокса ударного магнита

На Рис. П.3.2.7 показан прототип ударного магнита.

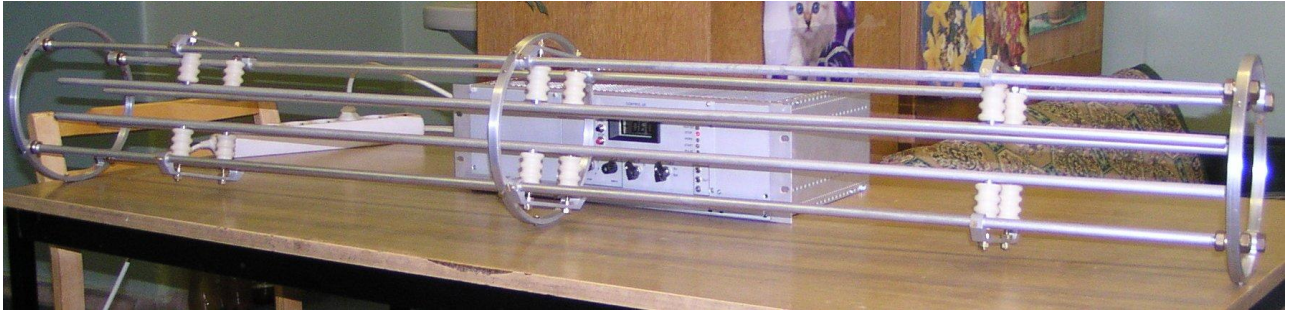


Рис. П.3.2.7. Прототип ударного магнита.

Характеристики ударного магнита приведены в Таблице П.3.2.3.

Таблица П.3.2.3. Основные параметры ударного магнита

Длина проводников, мм	1400
Диаметр проводников, мм	5
Положение проводников относительно оси вакуумной камеры (x; y), мм:	
– проводник № 1	(-5; -45)
– проводник № 2	(-5; +45)
– проводник № 3	(+75; -45)
– проводник № 4	(+75; +45)
Максимальный ток, кА	15
Максимальное магнитное поле, Тл	0,13
Неоднородность магнитного поля по поперечному сечению	±3 %

П.3.2.3 Септумный магнит

Септумный магнит 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 3-го прямолинейного промежутка Бустера) пластина касается медного экрана. Медный экран на входе имеет окно для ввода пучка. Длина медного экрана меньше длины проводящих пластин, и на выходе септум-магнита пластины размещаются вне медного экрана.

Электрический потенциал подаётся на внешнюю пластину на выходе септум-магнита, медный экран и внутренняя пластина на выходе септум-магнита заземляются. Ток проходит по внешней пластине (пластине прямого тока) и затем растекается по внутренней пластине (пластине обратного тока) и медному экрану, формируя требуемое распределение магнитного поля в зазоре между пластинами септум-магнита.

Криостатный модуль септум-магнита включает в себя вакуумный кожух, вакуумный бокс септума, тепловой экран, систему крепления вакуумного бокса, систему ввода импульса тока на пластины, трубчатые и кабельные коммуникации.

Вакуумный бокс септум-магнита цилиндрический, с торцов имеет 3 патрубка с фланцами для соединения со смежными вакуумными камерами. Наверху бокса размещается патрубок для подключения геттерного насоса вакуумной откачки. Через отверстие в боковой стенке патрубка под вывод пучка с помощью высоковакуумного токоввода к пластине прямого тока подводится импульс высокого напряжения. Пластины септум-магнита устанавливаются внутри медного экрана, закрепляемого к стенкам вакуумного бокса, и патрубка под вывод пучка. Крепление пластин к стенкам медного экрана и патрубка осуществляется посредством опорных изоляторов.

Вакуумный кожух цилиндрический, с фланцами на торцах для соединения со смежными сильфонными элементами криостата Бустера. Снизу имеются опоры для установки криостатного модуля на подставку.

Тепловой экран, охлаждаемый потоком кипящего азота, располагается между вакуумным боксом септум-магнита и вакуумным кожухом. Тепловой экран имеет отверстия для токоввода и креплений вакуумного бокса.

Трубочные и кабельные коммуникации включают гелиевые коллекторы, трубки с жидким азотом и сверхпроводящие кабели электрической связи магнитных элементов Бустера.

Система ввода импульса тока на пластины включает 2 токоввода, проходной изолятор и питающий стержень. Токовводы монтируются в отверстия в стенках патрубка вакуумного бокса, в тепловом экране и в вакуумном кожухе. Питающий стержень соединяет токовводы друг с другом. Подвод электрического импульса к пластине прямого тока осуществляется проходным изолятором.

Система крепления вакуумного бокса обеспечивает установку бокса внутри кожуха и юстировку его положения. Крепление вакуумного бокса к кожуху осуществляется таким образом, что после охлаждения кольца Бустера положение бокса относительно кожуха остаётся неизменным.



Рис. П.3.2.8. Общий вид вакуумного бокса септум-магнита

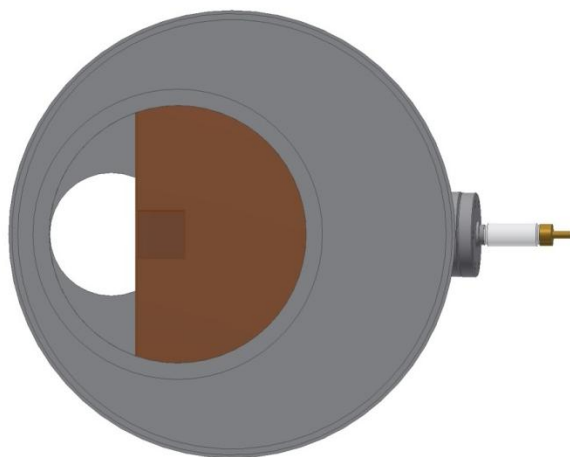


Рис. П.3.2.9. Вид входа вакуумного бокса септум-магнита

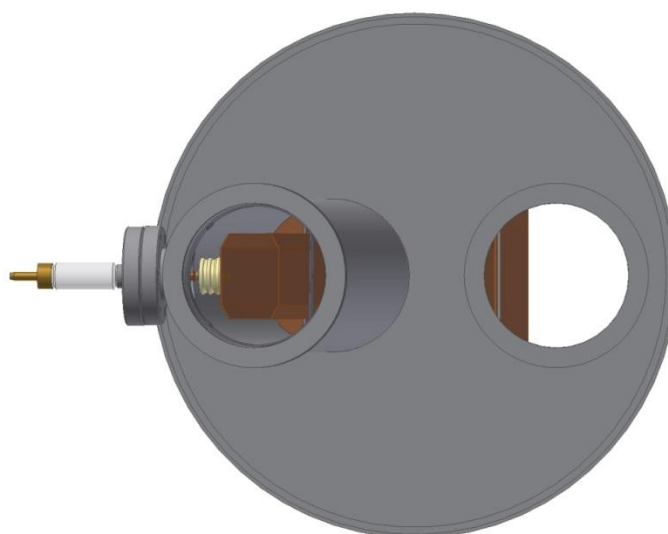


Рис. П.3.2.10. Вид выхода вакуумного бокса септум-магнита



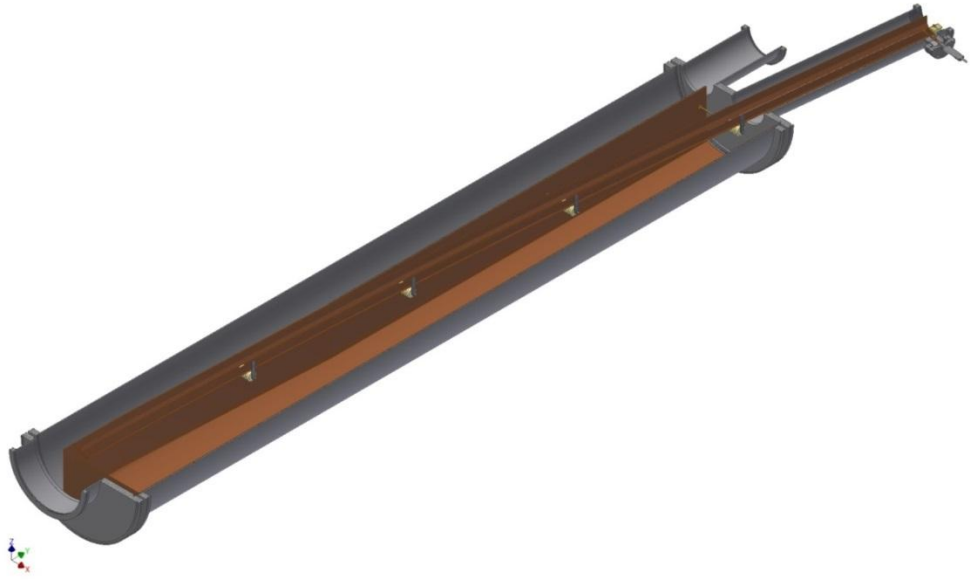


Рис. П.3.2.11. Вакуумный бокс с септум-магнитом в разрезе.

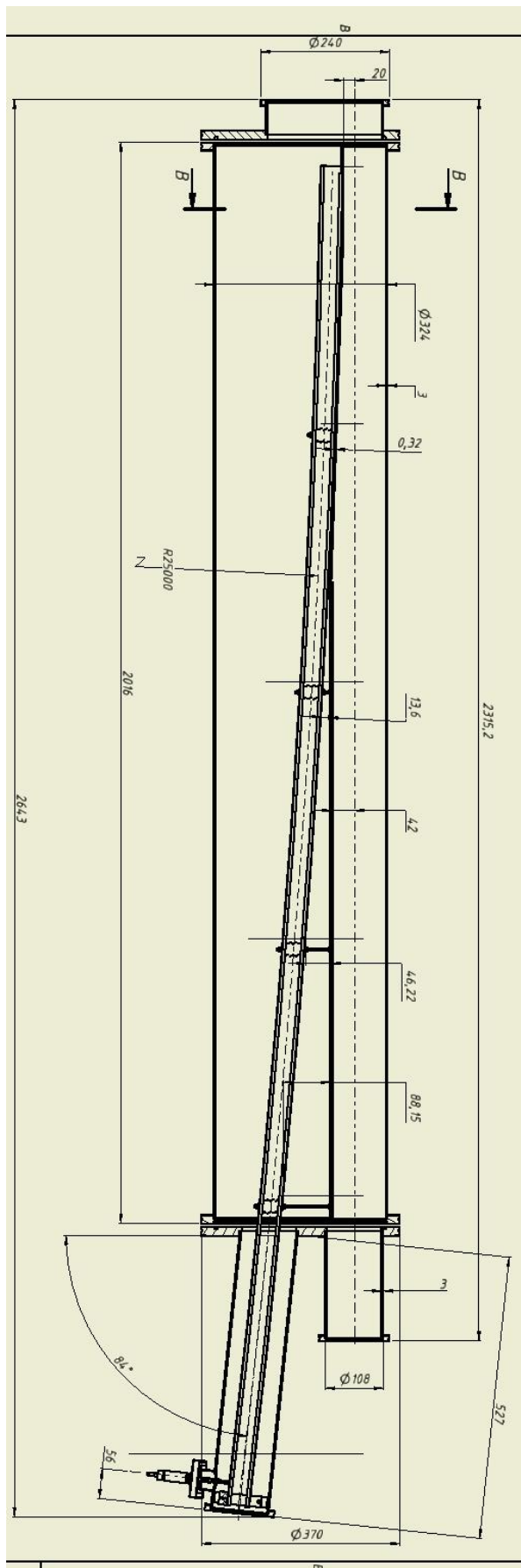


Рис. П.3.2.12. Продольное сечение вакуумного бокса септум-магнита

На Рис. П.3.2.13 показан прототип септум-магнита.



Рис. П.3.2.13. Прототип импульсного септум-магнита

Характеристики септум-магнита приведены в Таблице П.3.2.4.

Таблица П.3.2.4. Основные параметры септум-магнита

Длина, мм	2500
Зазор между пластинами, мм	35
Расстояние от оси прямолинейного промежутка до ближней пластины, мм:	
– на входе септума	37
– на выходе септума	65
Радиус кривизны пластин, м	25
Толщина пластин, мм	4
Максимальный ток, кА	100
Максимальное магнитное поле, Тл	1
Неоднородность магнитного поля по поперечному сечению	±1 %
Интеграл рассеянного магнитного поля, Гс·м	< 20

П.3.2.4 Источники питания подсистемы бампа замкнутой орбиты

Основные параметры источников питания подсистемы бампа замкнутой орбиты даны в Таблице П.3.2.5.

Таблица П.3.2.5. Основные параметры источников питания подсистемы бампа замкнутой орбиты

Тип электропитания	циклический
Длительность активной фазы цикла	0,5 ÷ 1,5 с
Частота повторения циклов	0,25 Гц
Максимальный ток	400 А
Неоднородность тока на плато	≤ 1 %

П.3.2.5 Источники питания ударного магнита

Основные параметры источников питания ударного магнита даны в Таблице П.3.2.6.

Таблица П.3.2.6. Основные параметры источников питания ударного магнита

Тип источника электропитания	импульсный
Максимальный ток, кА	15
Длительность импульса, нс:	
– передний фронт	250
– плато	500
– задний фронт	~ 10000
Частота повторения импульсов, Гц	0,25
Неоднородность тока на плато импульса	±2 %
Тип накопителя	сосредоточенная ёмкость
Суммарная накопительная ёмкость, мкФ	0,2
Запасённая энергия, Дж	160

На Рис. П.3.2.1 приведена концептуальная схема источника питания.

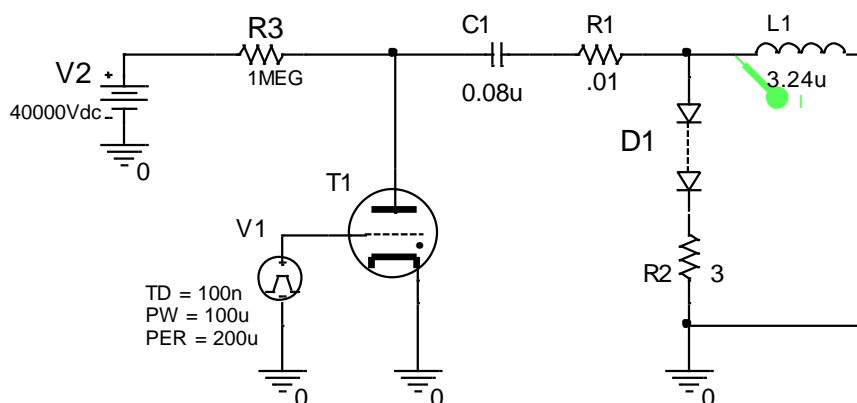


Рис. П.3.2.14. Концептуальная схема питания ударного магнита.

П.3.2.6 Источник питания импульсного септумного магнита

Основные параметры источника питания септум-магнита даны в Таблице П.3.2.7.

Таблица П.3.2.7. Основные параметры источника питания септум-магнита

Тип источника электропитания	импульсный
Форма импульса	полусинусоида
Длительность импульса	~ 10 мкс
Частота повторения импульсов	0,25 Гц
Неоднородность тока на вершине импульса	±2 %
Суммарная накопительная ёмкость	6 мкФ
Напряжение накопительной ёмкости	50 кВ
Индуктивность токовой петли в экране	1 мкГн
Импульсный ток	100 кА
Энергия в импульсе	5 кДж

На Рис. П.3.2.15 приведена концептуальная схема источника питания. На Рис. П.3.2.16 показана расчётная форма импульса тока.

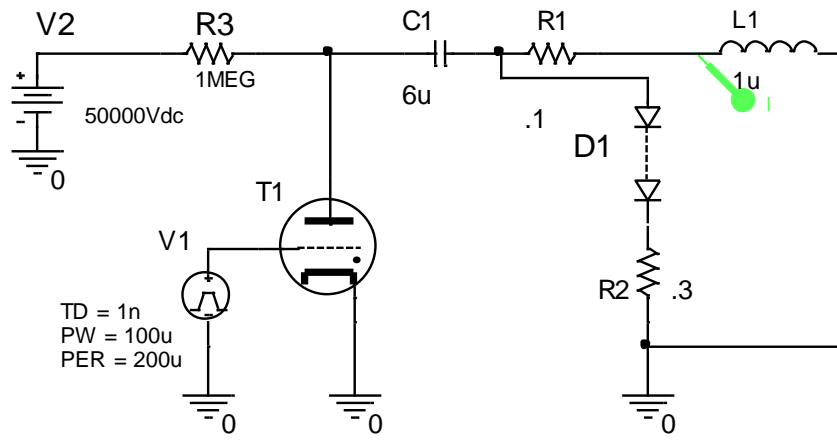


Рис. П.3.2.15. Концептуальная схема питания септум-магнита

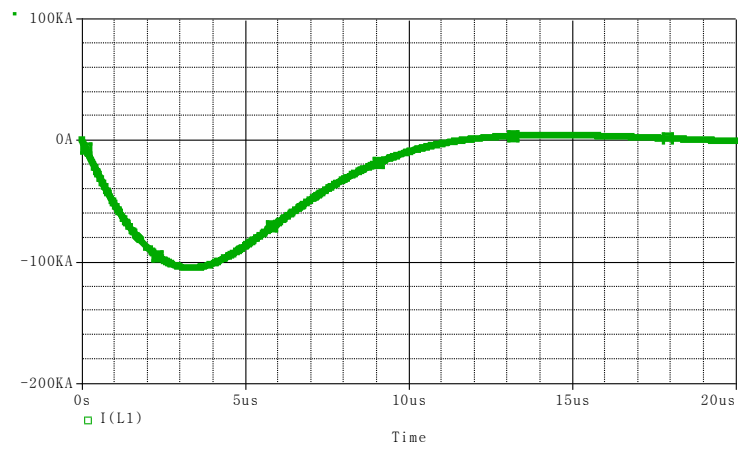


Рис. П.3.2.16. Импульс тока источника питания септум-магнита

Приложение 3

к Главе 3

П.3.3 ИНЖЕКЦИЯ С ЭЛЕКТРОННЫМ ОХЛАЖДЕНИЕМ

П.3.3.1 Введение

В Бустере планируется осуществить однооборотную инжекцию со стекированием ионного пучка в ходе электронного охлаждения с повторением циклов инжекции с частотой до 10 Гц. В ходе этой инжекции бамп орбиты смещается в горизонтальном направлении на расстояние, обеспечивающее однооборотную инжекцию пучка и накопление стека. Среднеквадратичный эмиттанс пучка на выходе из линейного ускорителя равен $\varepsilon_x/\varepsilon_y = 3 \pi$ мм·мрад. Интенсивность выведенного пучка из линейного ускорителя равна $10^8 \div 10^9$ ионов за один цикл инжекции. В Бустере предполагается вакуум на уровне $5 \cdot 10^{-11}$ Торр, а газовый состав остаточного газа таков, что при энергии инжекции 3,1 МэВ/н время жизни ионов $^{197}\text{Au}^{31+}$ составляет $3 \div 5$ с.

Основной характеристикой Бустера в качестве инжектора в Нуклотрон является средний поток, характеризующий отношение накопленных ионов к длительности цикла работы Бустера $R = N/\tau$. При интенсивности ионов $N = 10^9$, инжектируемых в ходе однооборотной одно цикловой инжекции, и длительности цикла работы Бустера $\tau = 5$ с средний поток составляет $R = 2 \cdot 10^8 \text{ с}^{-1}$. Реализация схемы инжекции со стекированием ионного пучка, с одной стороны, позволяет поднять интенсивность накопленных ионов, с другой стороны, приводит к росту длительности цикла работы Бустера за счёт увеличения длительности инжекции. Средний поток ионов при инжекции со стекированием составляет $(7 \div 8) \cdot 10^8 \text{ с}^{-1}$. При интенсивности ионов $5 \cdot 10^8 \div 10^9$ за импульс инжекции интенсивность накопленного пучка может быть увеличена в $3 \div 5$ раз.

При накоплении ионных пучков высокой интенсивности в присутствии электронного охлаждения возможно развитие когерентной неустойчивости, так называемого электронного нагрева. Чтобы избежать развития неустойчивости планируется использовать полый электронный пучок, с низкой интенсивностью в центральной области, где происходит накопление стека, и высокой интенсивностью в периферийной области, где происходит охлаждение вновь инжектируемых ионов. В этом случае инкремент развития неустойчивости может быть заметно снижен. Инкремент развития неустойчивости также существенно зависит от выбора рабочей точки. Инкремент несимметричен по отношению к разностному $Q_x - Q_y = 0$ и суммовому резонансу $Q_x + Q_y = 9$. Инкремент имеет максимум вблизи разностного резонанса и близок к минимуму в окрестностях суммового резонанса. Рабочая точка Бустера $Q_x/Q_y = 4,8/4,85$ находится в непосредственной близости от разностного резонанса $Q_x = Q_y$. В результате, при заданных плотностях электронного и ионного пучка инкремент неустойчивости близок к своему максимуму. С целью снижения инкремента неустойчивости при сохранении горизонтального бетатронного числа $Q_x = 4,8$ рассмотрена рабочая точка $Q_x/Q_y = 4,8/4,15$ с вертикальным бетатронным числом вблизи

суммового резонанса. Расчётный инкремент, рабочей точки в области суммового резонанса в несколько раз меньше, чем для рабочей точки Бустера $Q_x/Q_y = 4,8/4,85$.

П.3.3.2 Схема однооборотной инжекции со стекированием ионного пучка

Для накопления ионов $^{197}\text{Au}^{31+}$ в Бустере планируется использовать схему однооборотной инжекции со стекированием в ходе электронного охлаждения.

П.3.3.2.1 Эмиттанс пучка при инжекции в Бустер

Среднеквадратичный эмиттанс пучка $\varepsilon = \sigma^2/\beta$ на выходе из линейного ускорителя равен $\varepsilon_x/\varepsilon_y = 3 \pi \text{мм} \cdot \text{мрад}$. Для накопления ионов стека высокой интенсивности горизонтальный акцептанс составляет $\varepsilon_{ac} = 10 \pi \text{мм} \cdot \text{мрад}$. Перед инжекцией равновесная орбита стека смещена относительно септума на расстояние $(\beta_{inj} \cdot \varepsilon_{ac})^{1/2}$, где β_{inj} — горизонтальная бета-функция в области инжекции. При однооборотной инжекции бамп равновесной орбиты смещается на расстояние $2 \sigma_x = 2 (\beta_{inj} \cdot \varepsilon_x)^{1/2}$. Потери инжектируемых частиц на септуме в этом случае равны $\int_{-\sigma}^{\sigma} e^{-x^2/2\sigma_x^2} dx = 15,7 \%$. Радиус пучка, инжектированного в Бустер при одном цикле инжекции, относительно равновесной орбиты стека равен $2 (\beta_{inj} \cdot \varepsilon_x)^{1/2} + (\beta_{inj} \cdot \varepsilon_{ac})^{1/2}$. Угловой разброс инжектируемого пучка составляет $(\varepsilon_x/\beta_{inj})^{1/2}$. При однооборотной инжекции со стекированием начальный горизонтальный эмиттанс пучка в Бустере равен $\varepsilon_{in-x} = 2 \varepsilon_x + (\varepsilon_x \varepsilon_{ac})^{1/2} = 11,5 \pi \text{мм} \cdot \text{мрад}$. Относительный среднеквадратичный разброс по импульсу составляет $5 \cdot 10^{-4}$.

П.3.3.2.2 Инжекция при охлаждении однородным по радиусу электронным пучком

Дальнейшие расчёты однооборотной инжекции ионов $^{197}\text{Au}^{31+}$ выполнены с использованием кода ВЕТАСОЛ [П.3.3.1]. Ток электронного пучка равен 0,1 А, радиус пучка 2 см, пучок имеет однородную плотность по радиусу, длина секции охлаждения составляет 1,94 м. Эффективность электронного охлаждения равна отношению амплитуды второго импульса к первому импульсу и составляет 40 % при частоте повторения импульсов инжекции 10 Гц (Рис. П.3.3.1). При интенсивности инжектированного пучка 10^9 ионов максимальная накопленная интенсивность равна $4,6 \cdot 10^9$ при времени жизни ионов 4,4 с.

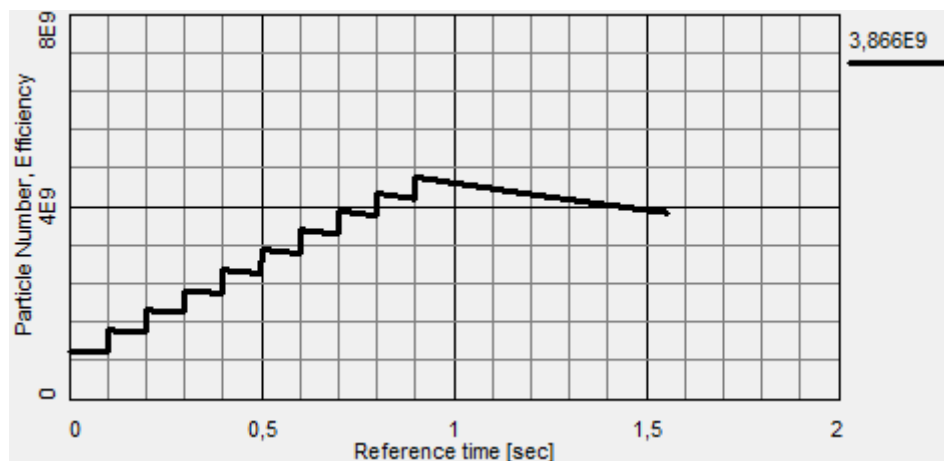


Рис. П.3.3.1. Зависимость числа накопленных частиц в Бустере при 10-ти цикловой инжекции

Средний поток ионов, характеризующий отношение числа накопленных ионов, к длительности цикла работы Бустера в схеме инжекции со стекированием ионов для $N = 4,6 \cdot 10^9$ и $\tau = 6$ с, равен $R = 7,6 \cdot 10^8 \text{ с}^{-1}$. Реализация схемы инжекции со стекированием позволяет в 3,8 раза увеличить средний поток ионов по сравнению с однооборотной одно цикловой инжекцией.

При 20-ти цикловой инжекции с частотой 10 Гц максимальная интенсивность ионов составляет $N = 7,8 \cdot 10^9$ при длительности стекирования 2 с (Рис. П.3.3.2). В этом случае средний поток ионов при $\tau = 7$ с равен $1,1 \cdot 10^9 \text{ с}^{-1}$. Дальнейшее увеличение количества циклов ведёт к росту среднего потока. Максимальный средний поток ионов ограничен рядом эффектов: некогерентными шумами стека, устойчивостью охлаждённого стека и временем жизни ионов при их взаимодействии с атомами остаточного газа.

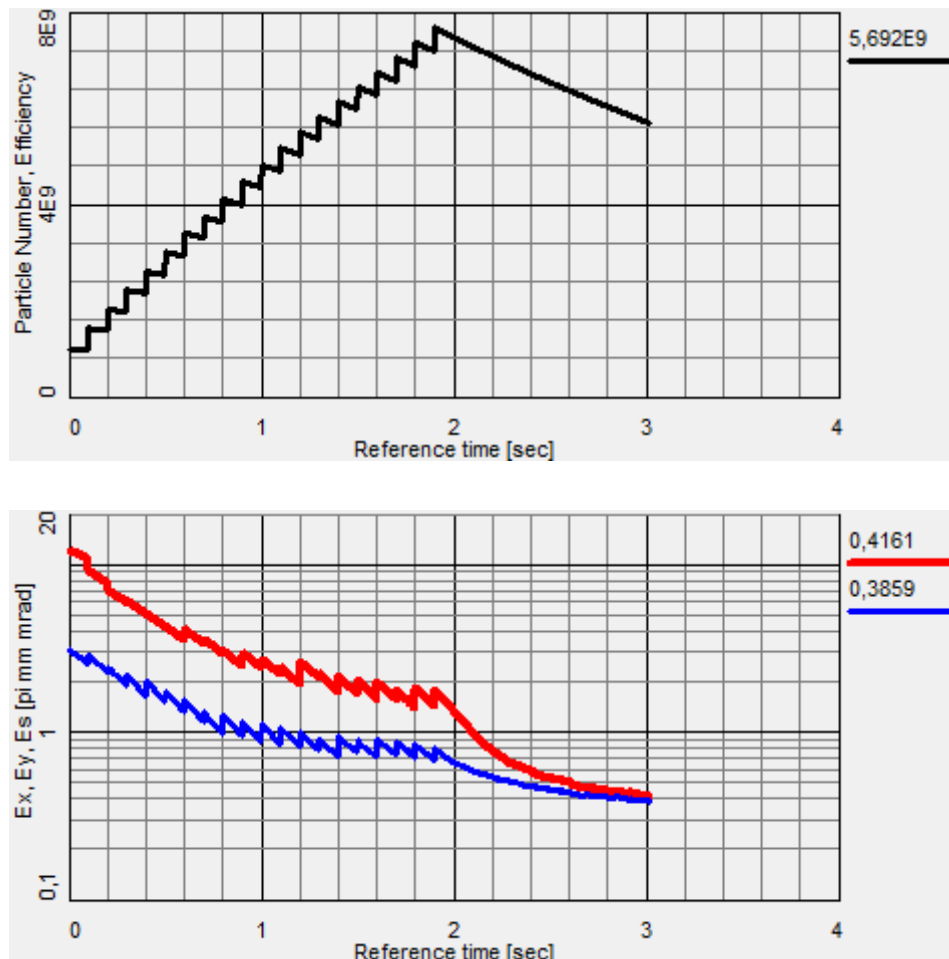


Рис. П.3.3.2. Зависимость числа накопленных частиц в Бустере при 20-ти цикловой инжекции от времени (а) и зависимость эмиттанса от времени (б)

П.3.3.2.3 Эмиттанс стека в присутствии его некогерентного шума

В приведённых на Рис. П.3.3.2 расчётах эмиттанс пучка определяется равновесием между электронным охлаждением и внутripучковым рассеянием. В присутствии некогерентных шумов стека охлаждённый эмиттанс стека определяется числом частиц в нем N и бетатронным сдвигом частоты ΔQ :

$$\varepsilon_v = \frac{r_p Z^2 N}{4\pi A \beta^2 \gamma^3 \Delta Q},$$

где Z — заряд ядра, A — атомный номер, β и γ — релятивистские факторы, r_p — радиус протона. Для $\Delta Q = 0,05$, числа частиц стека $N = 3 \cdot 10^9$ эмиттанс стека равен $\varepsilon_v = 5,5 \pi$ -мм-мрад. В результате некогерентных шумов происходит дополнительный диффузионный нагрев стека, приводящий к снижению эффективности охлаждения, а, в конечном счёте, к снижению интенсивности стека. В присутствии диффузионного нагрева эмиттанс стека ε определяется декрементом электронного охлаждения λ и ростом эмиттанса при нагреве с коэффициентом диффузии D : $d\varepsilon/dt = -\lambda \varepsilon + D$. В равновесном состоянии коэффициент диффузии равен $D = \lambda \varepsilon$. Поскольку в присутствии

некогерентных шумов эмиттанс стека пропорционален числу частиц N , то коэффициент диффузии и темп диффузионного нагрева эмиттанса также пропорциональны числу частиц стека $D \sim N$ [П.3.3.2]. В дальнейших расчётах темп диффузионного нагрева эмиттанса, пропорциональный числу частиц стека N , будем нормировать на количество инжектируемых ионов N_{inj} : $\dot{\varepsilon} = k N/N_{inj}$. Максимальная интенсивность ионов составляет $N = 5,5 \cdot 10^9$ при длительности стекирования 2 с (Рис. П.3.3.3) в присутствии шумов стека с темпом диффузионного нагрева эмиттанса $\dot{\varepsilon}_h/\dot{\varepsilon}_v = 0,3 N/N_{inj} \text{ с}^{-1}$ для 20-ти цикловой инжекции с частотой 10 Гц. Из-за некогерентного нагрева интенсивность стека снизилась в 1,4 раза. Равновесный эмиттанс стека в присутствии диффузионного нагрева и охлаждения возрос в несколько раз по сравнению с равновесным эмиттансом, определяемым внутрипучковым рассеянием и охлаждением.

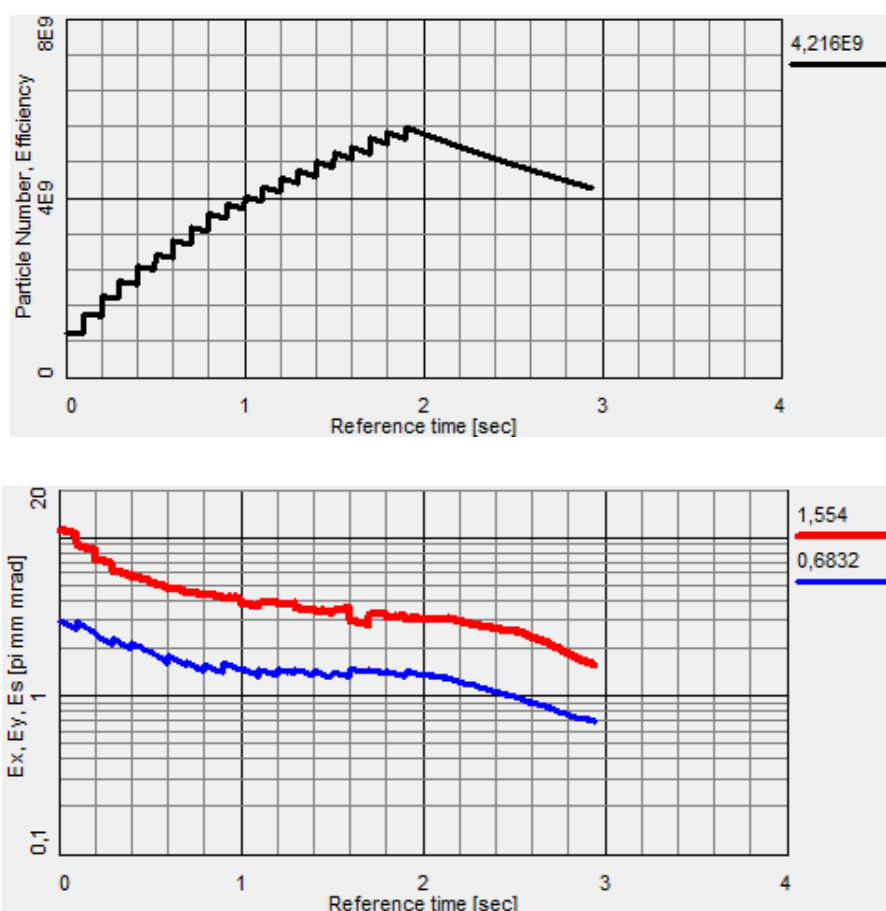


Рис. П.3.3.3. Зависимость числа накопленных частиц в Бустере при 20-ти цикловой инжекции от времени в присутствии некогерентного нагрева (а). Зависимость эмиттанса от времени (б)

П.3.3.2.4 Инжекция при охлаждении полым электронным пучком

При накоплении высокоинтенсивных ионных пучков в присутствии электронного охлаждения развивается когерентная неустойчивость стека, и реализуется режим так называемого электронного нагрева. Чтобы избежать развития неустойчивости применяют полый электронный пучок с низкой интенсивностью в центральной области, где происходит накопление стека, и

высокой интенсивностью в периферийной области, где происходит охлаждение вновь инжектируемых ионов. В этом случае инкремент развития неустойчивости может быть заметно снижен.

Внутренний радиус с пониженной плотностью $n = 5 \cdot 10^6 \text{ см}^{-3}$ равен 0,5 см. В периферийной области по отношению к радиусу 0,5 см плотность пучка составляет $n = 2 \cdot 10^7 \text{ см}^{-3}$, полный ток полого пучка равен 0,095 А. Пустота пучка не приводит к снижению накопления по сравнению с однородным пучком. В присутствии некогерентного диффузионного нагрева стека с темпом $\dot{\epsilon}_h / \dot{\epsilon}_v = 0,1 N/N_{inj} \text{ с}^{-1}$ интенсивность накопленного пучка снижается с $6,3 \cdot 10^9$ до $5,7 \cdot 10^9$. В присутствии некогерентного диффузионного нагрева стека с темпом $\dot{\epsilon}_h / \dot{\epsilon}_v = 0,3 N/N_{inj} \text{ с}^{-1}$ интенсивность накопленного пучка снижается с $6,3 \cdot 10^9$ до $4,1 \cdot 10^9$ (Рис. П.3.3.4). В присутствии некогерентного нагрева равновесный эмиттанс стека определяется внутренним радиусом полого пучка.

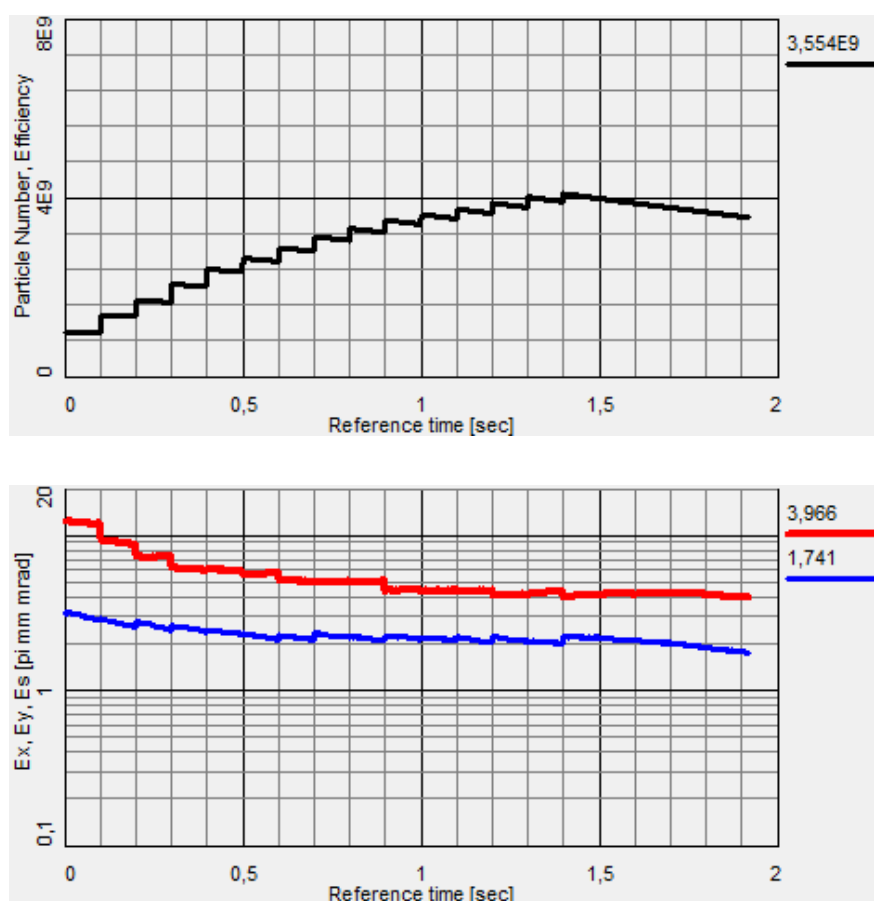


Рис. П.3.3.4. Зависимость числа накопленных частиц в Бустере при 15-ти цикловой инжекции от времени для полого электронного пучка в присутствии некогерентного нагрева ионов (а). Зависимость эмиттанса от времени (б)

Таким образом, стекирование ионов при инжекции с электронным охлаждением и полым электронным пучком в присутствии некогерентных шумов стека позволяет в 4 ÷ 5 раз увеличить средний поток ионов по сравнению с одно цикловой однооборотной инжекцией.

П.3.3.2.5 Время жизни ионов

Число накопленных ионов зависит от их времени жизни. Время жизни ионов определяется их взаимодействием с атомами и молекулами остаточного газа. Оно зависит от двух параметров: давления остаточного газа и его массового состава.

Зависимость числа накопленных ионов от времени их жизни для параметров, приведённых на Рис. П.3.3.4, представлено на Рис. П.3.3.5. Снижение времени жизни с 4,4 с до 0,65 с приводит к снижению интенсивности накопленного пучка с $4,1 \cdot 10^9$ до $2,2 \cdot 10^9$.

Примеры спектров остаточного газа в тёплых синхротронах LEAR [П.3.3.3] и HIMAC [П.3.3.4] приведены в Таблице П.3.3.1. Также в Таблице П.3.3.1 приведён пример расчётного спектра газового состава в Бустере. Время жизни практически не зависит от рекомбинации с электронами в системе электронного охлаждения. При коэффициенте рекомбинации $10^{-7} \text{ см}^3 \cdot \text{с}^{-1}$ [П.3.3.3] и токе электронного пучка 0,1 А время жизни ионов $^{197}\text{Au}^{31+}$, определяемое рекомбинацией, равно 47,6 с.

Таблица П.3.3.1. Массовый спектр остаточного газа в тёплых синхротронах LEAR и HIMAC и расчётное время жизни ионов $^{197}\text{Au}^{31+}$ при давлении $5 \cdot 10^{-11}$ Торр

LEAR, июнь 95 г.	LEAR, дек. 95 г.	LEAR, апр. 96 г.	HIMAC	Бустер
70 % H ₂ , 10 % He, 10 % CH ₄ , 10 % H ₂ O	87 % H ₂ , 7 % CH ₄ , 4 % H ₂ O, 2 % Ar	60 % H ₂ , 5 % He, 15 % CH ₄ , 20 % N ₂	50 % H ₂ , 36 % H ₂ O, 10 % CO, 4 % CO ₂	73 % H ₂ , 15 % He, 7 % CO, 5 % Ar
$^{197}\text{Au}^{31+}$ — 10,4 с	$^{197}\text{Au}^{31+}$ — 8,4 с	$^{197}\text{Au}^{31+}$ — 3,1 с	$^{197}\text{Au}^{31+}$ — 1,9 с	$^{197}\text{Au}^{31+}$ — 4,4 с

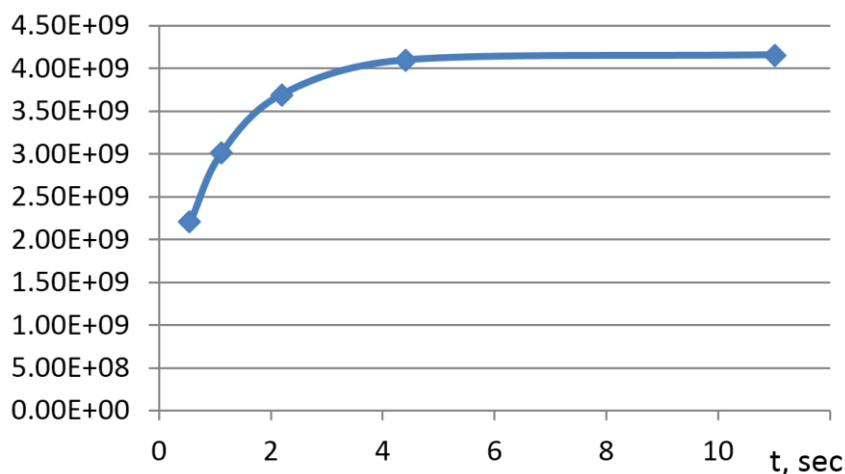


Рис. П.3.3.5. Зависимость числа накопленных ионов в Бустере от времени их жизни

П.3.3.2.6 Накопление низко интенсивных пучков

При инъекции ионных пучков $^{197}\text{Au}^{31+}$ с низкой интенсивностью 10^8 частиц за импульс однооборотной инъекции возможно их накопление в 10 ÷ 15 раз большей интенсивностью при 50-цикловой инъекции с частотой 10 ÷ 5 Гц (Рис. П.3.3.6 и Рис. П.3.3.7). Ток электронного пучка равен

0,1 А, радиус пучка 2 см, пучок имеет однородную плотность по радиусу. Снижение частоты повторения с 10 Гц до 5 Гц приводит к снижению интенсивности накопленного пучка с $1,3 \cdot 10^9$ до 10^9 за счёт конечного времени жизни ионов, равного 4,4 с. Зависимость интенсивности накопленных ионов от темпа роста эмиттанса $\dot{\epsilon}_h / \dot{\epsilon}_v = k N / N_{inj} \text{ с}^{-1}$ для диффузионного нагрева приведено на Рис. П.3.3.7. При скорости роста эмиттанса $\dot{\epsilon}_h / \dot{\epsilon}_v = 0,3 N / N_{inj} \text{ с}^{-1}$ интенсивность накопленного пучка снижается в два раза.

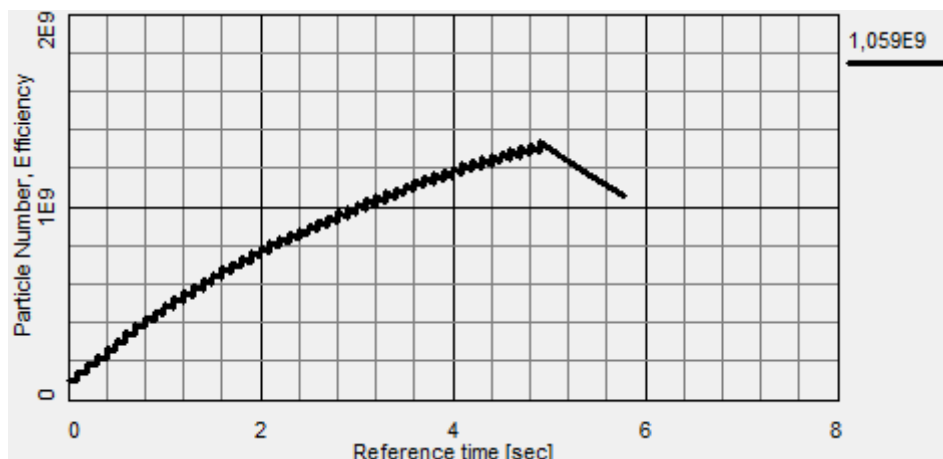


Рис. П.3.3.6. Зависимость числа накопленных частиц в Бустере при 50-ти цикловой инжекции с частотой 10 Гц от времени

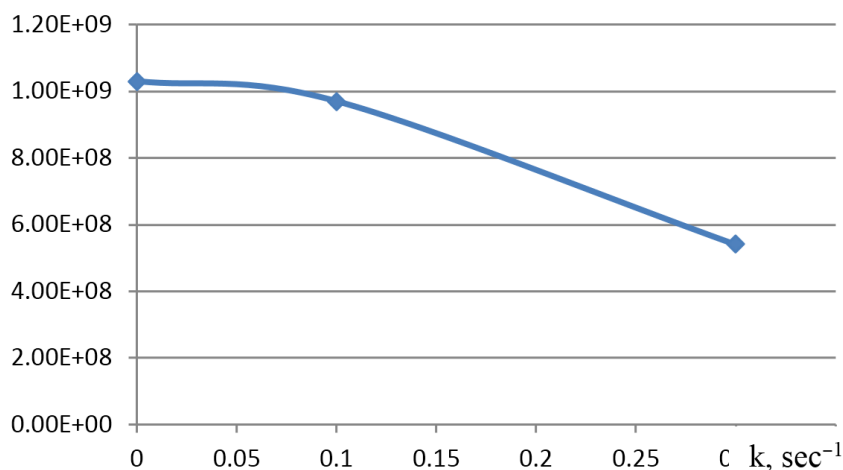


Рис. П.3.3.7. Зависимость интенсивности накопленных ионов от темпа роста эмиттанса

П.3.3.3 Неустойчивость ионного пучка, выбор рабочей точки

При накоплении ионных пучков высокой интенсивности в присутствии электронного охлаждения возможно развитие когерентной неустойчивости, так называемого электронного нагрева [П.3.3.5]. При развитии неустойчивости потери ионов драматически возрастают, когда ионная интенсивность достигает критической величины. Эффекты пространственного заряда электронного и ионного пучков, а также магнитное поле соленоида охлаждения осуществляют связь между

горизонтальными и вертикальными когерентными колебаниями. Поперечное движение центра гравитации ионного и электронного пучков описывается следующими уравнениями [П.3.3.5]:

$$\ddot{z} + i\omega_c \dot{z} + \omega_i^2 z = \omega_i^2 z_e, \quad \dot{z}_e + i\omega_d z_e = i\omega_d z$$

при начальных условиях $z(0) = z_0, \dot{z}(0) = \dot{z}_0, z_e(0) = \dot{z}_e(0) = 0$, где $\omega_c = ZeB/\gamma m_i$ — ионная циклотронная частота, $\omega_i^2 = Ze^2 n_e / 2\varepsilon_0 \gamma m_i$ — ионная плазменная частота в поле электронного пучка, $\omega_d = \omega_e^2 / \omega_{ce}$ — дрейфовая электронная частота, $\omega_e^2 = Ze^2 n_i / 2\varepsilon_0 \gamma^3 m_e$ — электронная плазменная частота, $\omega_{ce} = eB/\gamma m_e$ — электронная циклотронная частота, B магнитное поле соленоида охлаждения, n_e и n_i — электронная и ионная плотность, соответственно. Движение центра гравитации ионного пучка может быть переписано в матричной форме $X = M_{cool} X_0$ [П.3.3.5], где M_{cool} — 4×4 матрица секции охлаждения. Матрица M_{cool} соответствует неустойчивому ионному движению, потому что $|M_{cool}| \neq 1$ [П.3.3.5]. Ионное движение снаружи секции электронного охлаждения характеризуется матрицей Твисса. Однооборотная матрица Бустера M_{ring} с электронным охлаждением равна $M_{ring} = L_{dr} \cdot R_{Twiss} \cdot L_{dr} \cdot M_{sol}^{-1} \cdot M_{cool} \cdot M_{sol}$ [П.3.3.5], где L_{dr} — матрица дрейфовой секции охлаждения с отрицательной длиной $-L/2$ и M_{sol} — матрица соленоида. Особенность матрицы Бустера M_{ring} заключается в том, что модули её собственных чисел не равны 1: $\Delta\lambda_{1,2,3,4} \equiv |\lambda_{1,2,3,4}| - 1 \neq 0$ [П.3.3.5]. При малых значениях величина $\Delta\lambda$ характеризует инкремент неустойчивости $\gamma_{ins} = |\lambda| - 1$ в единицах числа оборотов иона в Бустере. Две дипольные моды возбуждаются с инкрементом γ_1 , а две другие с декрементом γ_2 . Моды имеют резонансный характер при $Q_x - Q_y = 0$. Как показано на Рис. П.3.3.8, значения γ_1 и γ_2 меняют их знаки при прохождении через резонанс связи $Q_x - Q_y = 0$.

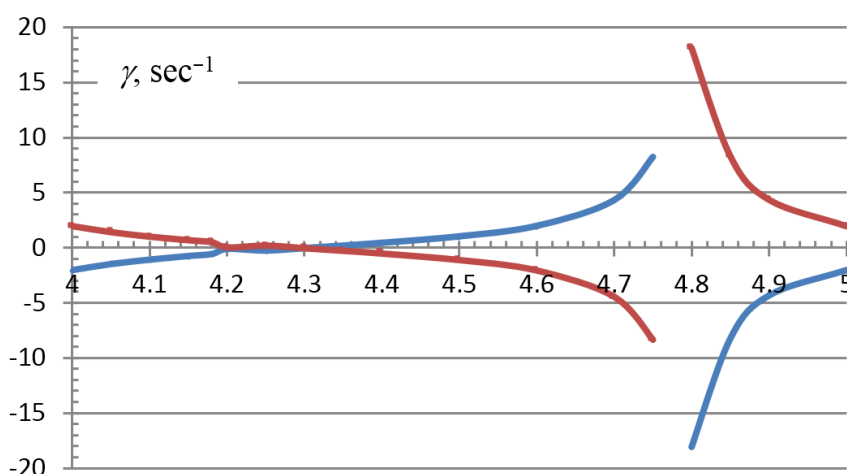


Рис. П.3.3.8. Зависимость инкремента и декремента нарастания неустойчивости от вертикального бетатронного числа при постоянном значении горизонтального бетатронного числа $Q_x = 4,8$

Для резонанса связи $Q_x - Q_y = 0$ инкремент неустойчивости в числе оборотов равен [П.3.3.5]

$$\gamma_{inst} = \frac{2\pi^2 n_e n_i \beta_{x,y} r_e r_i L^2 c}{\gamma^5 \beta^3 \omega_{ci}}$$

где n_e и n_i — электронная и ионная плотности, L — длина области взаимодействия электронного и ионного пучков, $\beta_{x,y}$ — бета функция в системе электронного охлаждения, ω_{ci} — ионная циклотронная частота. Неустойчивая мода возбуждается до резонанса и затухает после его прохождения, и наоборот затухающая мода после резонанса возбуждается. Таким образом, в системе всегда имеется возбуждённая мода. Инкремент несимметричен по отношению к разностному $Q_x - Q_y = 0$ и суммовому резонансу $Q_x + Q_y = 9$. Инкремент имеет максимум вблизи разностного резонанса и близок к минимуму в окрестностях суммового резонанса [П.3.3.4]. Зависимость инкремента и декремента от вертикального бетатронного числа при фиксированном значении горизонтального бетатронного числа $Q_x = 4,8$ для полого электронного пучка с плотностью в центре $n_e = 5 \cdot 10^6 \text{ см}^{-3}$ и числом накопленных ионов $^{197}\text{Au}^{31+} 3 \cdot 10^9$ приведена на Рис. П.3.3.8. Для снижения инкремента неустойчивости планируется использовать полый электронный пучок, в котором плотность электронов в центральной области в 4 раза ниже, чем для периферийной области. Однако, и для полого электронного пучка возможно развитие неустойчивости при высокой интенсивности ионного пучка. Инкремент развития неустойчивости существенно зависит от выбора рабочей точки [П.3.3.4].

Выбранная для Бустера рабочая точка $Q_x/Q_y = 4,8/4,85$ близка к разностному резонансу $Q_x - Q_y = 0$ и соответствует нарастанию инкремента неустойчивости, близкого к его максимальному значению. Предполагается, что в Бустере горизонтальное значение бетатронного числа будет зафиксировано, а вертикальное значение Q_y может быть изменено при вариации токов в квадрупольных линзах. Кардинальным решением при снижении инкремента является выбор рабочей точки в окрестности суммового резонанса. Рабочая точка $Q_x/Q_y = 4,8/4,15$ находится в квадранте, образованном резонансами $Q_x + Q_y = 9$, $2 Q_y + Q_x = 13$ и $4 Q_x = 19$. Расчётный инкремент, для рабочей точки в области суммового резонанса в несколько раз меньше, чем для рабочей точки Бустера $Q_x/Q_y = 4,8/4,85$.

П.3.3.3 Литература

[П.3.3.1] A. Sidorin et al, BETACOOOL Program for simulation of Beam Dynamic in Storage Rings // Nucl. Instr. Meth. A. 2006, V. 558. P. 325-328.

[П.3.3.2] Е.М. Сыресин, Некогерентные вертикальные потери ионов при многооборотной инжекции пучка с накоплением и электронным охлаждением // Письма в ЭЧАЯ. 2014. т. 11, № 4. С. 768-776.

[П.3.3.3] S. Baird et al, Recent results on lead-ion accumulation in LEAR for the LHC // Nucl. Instr. Meth. A. 1997. V. 391, P. 17-23.

[П.3.3.4] T. Uesugi et al, Cool-Stacking Injection and Damping of a Transverse Ion-Beam Instability at the HIMAC Synchrotron // Nucl. Instr. Meth. A. 2005. V. 545, P. 43-56.

[П.3.3.5] В.В. Пархомчук, В.Б. Рева, Когерентное взаимодействие ионных и электронных пучков в системах с электронным охлаждением //ЖЭТФ. 2000. Т. 118, № 5, С. 1125-1133.

Приложение 4 к Главе 3

П.3.4 Коллимация перезаряженных ионов в БУСТЕРЕ

П.3.4.1 Конструкция поглощающих коллиматоров

Конструкция тёплого коллиматора представлена на Рис. П.3.4.1.

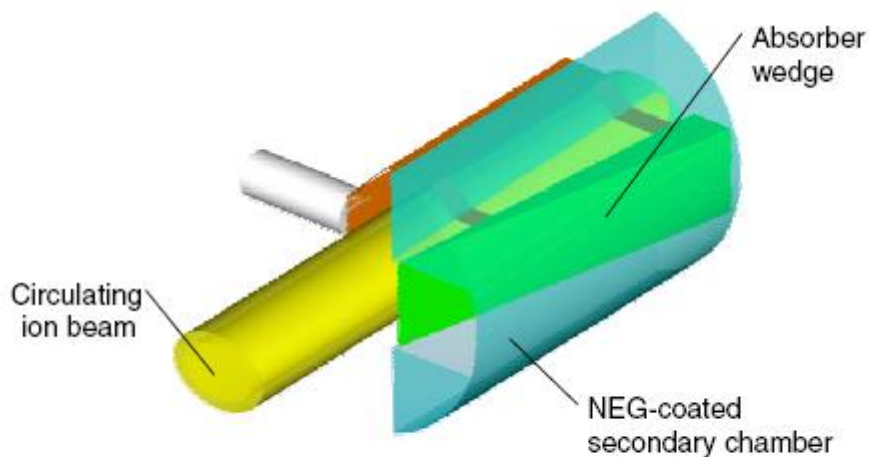


Рис. П.3.4.1. Тёплый коллиматор

Конструкция холодного коллиматора представлена на Рис. П.3.4.2.

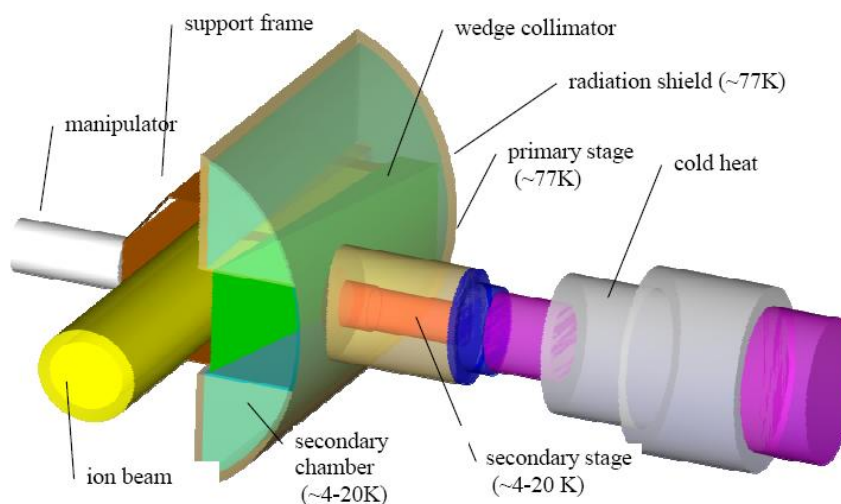


Рис. П.3.4.2. Холодный коллиматор

П.3.4.2 Моделирование коллимации

Рассмотрен процесс поглощения ионов с $Z = 32$, образовавшихся при обдирке ускоряемых ядер с $Z = 31$ в структуре DFO. В этой структуре для 100 % коллимации ионов с $Z = 32$ достаточно установить 7 коллиматоров, расположенных, как показано на Рис. П.3.4.3.

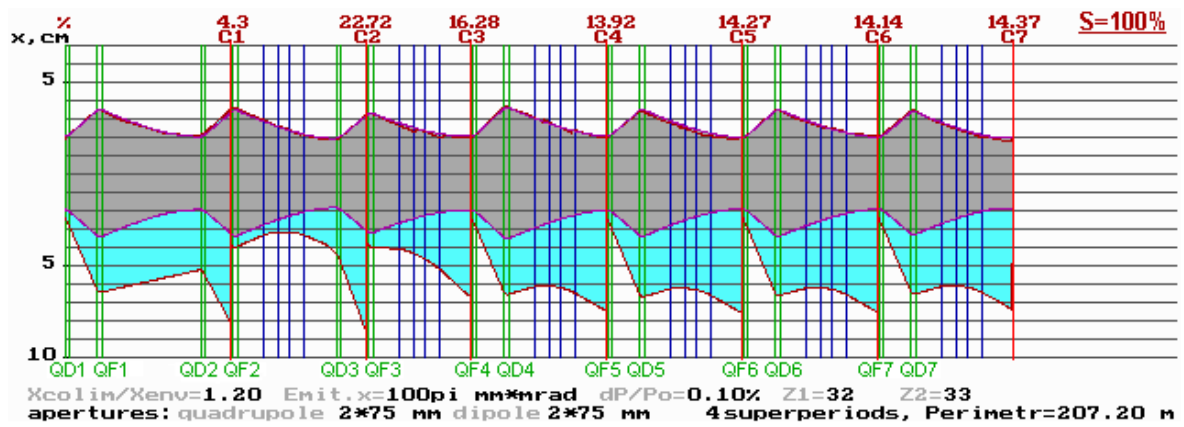


Рис. П.3.4.3. Распределение поглощаемых ядер с $Z = 32$ при 7 коллиматорах на суперпериод (100 % коллимация)

Если отказаться от коллиматора C1, на который попадает 4,3 % ионов с $Z = 32$, то получим распределение, показанное на Рис. П.3.4.4. Лишь небольшое количество ионов с $Z = 32$ (0,46 %) попадает на вторую фокусирующую линзу (QF2).

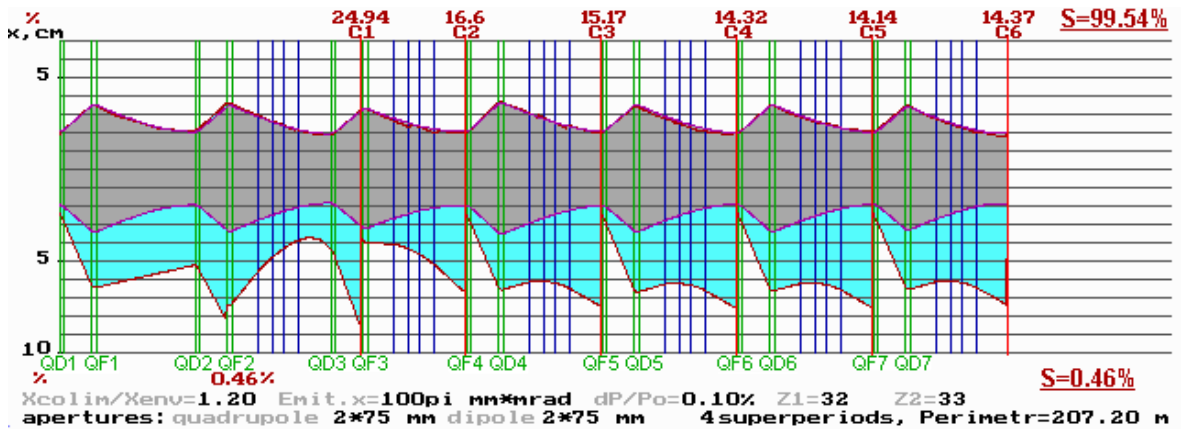


Рис. П.3.4.4. Распределение поглощаемых ядер с $Z = 32$ при 6 коллиматорах на суперпериод

Отказ от коллиматора, расположенного перед линзой QD5, (коллиматор C5 на Рис. П.3.4.2) приводит к распределению, показанному на Рис. П.3.4.5. Как видно из рисунка, суммарная коллимация при 5 коллиматорах составляет 91,06 %.

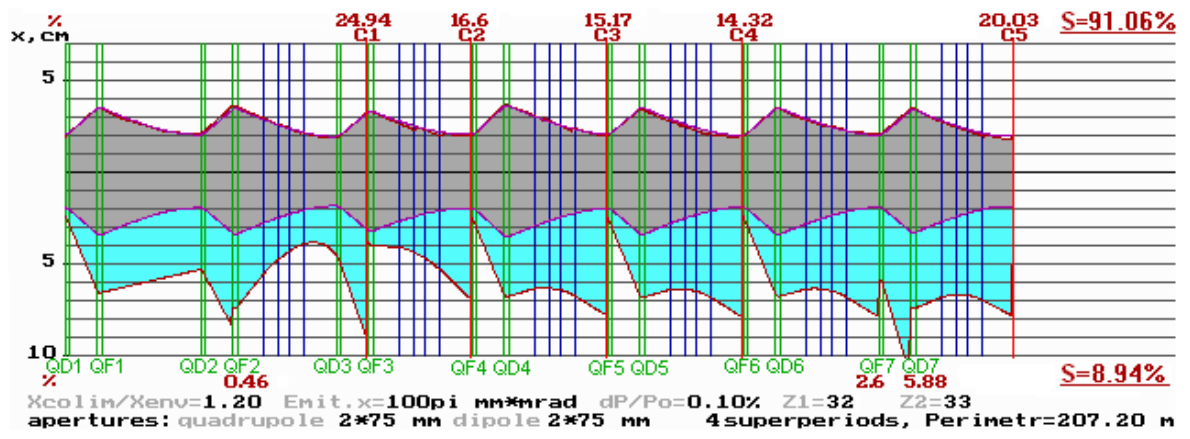


Рис. П.3.4.5. Распределение поглощаемых ядер с $Z = 32$ при 5 коллиматорах на суперпериод

Приложение 5 к Главе 3

П.3.5 РЕЖИМ УСКОРЕНИЯ

П.3.5.1 Введение

Ускоряющая система Бустера ускорительного комплекса NICA для тяжёлоионной программы предназначена для ускорения ионов $^{197}\text{Au}^{31+}$, инжектируемых из линейного ускорителя при энергии 3,2 МэВ/н, до энергии 600 МэВ/н (578 МэВ/н) с последующим переводом ускоренного сгустка в Нуклотрон. Параметры ускоряющей системы Бустера для тяжёлоионной программы приведены в Таблице П.3.5.1. Система должна обеспечивать следующие режимы работы:

- адиабатический захват в режим ускорения и ускорение до энергии ~ 65 МэВ/н на пятой гармонике частоты обращения);
- выход на стол магнитного поля для электронного охлаждения;
- адиабатический захват и ускорение охлаждённого пучка на первой гармонике частоты обращения;
- перевод одиночного сгустка из Бустера, его согласование с продольным аксептансом Нуклотрона.

Таблица П.3.5.1. Параметры ускоряющей системы Бустера

Параметр	
Энергия инжекции из ЛУ в Бустер, МэВ/н	3,2
Разброс по энергии инжектируемого в Бустер пучка, кэВ/н	20
Импульсный разброс инжектируемого пучка ($\pm 2\sigma$)	$\pm 0,002$
Диапазон перестройки частоты, МГц	0,5 ÷ 2,65
Номер гармоники	5/1
Внешний диаметр резонатора, м	< 1,2
Размеры вакуумной камеры (диаметр), мм	160
Длина резонатора, м	≤ 2
Количество резонаторов	2
Максимальная скорость роста магнитного поля, Тл/с	1,2
Минимальная амплитуда напряжения при адиабатическом захвате, В	100
Максимальная амплитуда при ускорении, кВ	10
Амплитуда напряжения при перепуске сгустка в Нуклотрон, кВ	0,1 ÷ 10

Требования на связь частоты с величиной магнитного поля и коррекцию частоты в соответствии с датчиком положения пучка следующие — $8 \cdot 10^{-5}$ в начале и $2 \cdot 10^{-5}$ — в конце ускорения.

Необходимо обеспечить связь частоты с величиной магнитного поля и коррекцию частоты в соответствии с датчиком положения пучка. Неточности в настройке и в нестабильности частоты ускоряющего напряжения приводят к отклонению пучка по радиусу:

$$\frac{\Delta f}{f} = \left(\frac{1}{\alpha \gamma^2} - 1 \right) \frac{\Delta R}{R},$$

где R — средний радиус Бустера, равный 33.6 м, γ — релятивистский фактор (1 в начале ускорения, 1,62 — в конце ускорения), α — коэффициент уплотнения орбит, равный 0,049.

Ограничение максимального отклонения орбиты по радиусу в 1 мм приводит к допуску по частоте в начале ускорения — $5.8 \cdot 10^{-4}$ и $3.5 \cdot 10^{-4}$ — в конце ускорения. Требования к вакуумным условиям: давление не выше $5 \cdot 10^{-11}$ Торр.

Временной режим работы Бустера предполагается таковым: 44 последовательных циклов ускорения, с длительностью ненулевого магнитного поля ~ 3 с сопровождаемых паузой длительностью не менее 20 мин. В течение цикла изменения поля ВЧ система работает на участках роста поля, суммарная длительность которых составляет ~ 1.6 с.

П.3.5.2 Зависимости основных параметров ВЧ системы Бустера в течение ускорительного цикла

Ускорительный цикл Бустера состоит из 2-х этапов и электронного охлаждения (Рис. П.3.5.1).

На I-м этапе инжектированный пучок адиабатически захватывается и ускоряется с 3,2 МэВ/н до 65 МэВ/н на 5-й кратности ускоряющего напряжения, площадь продольного акцептанса после захвата до вывода пучка на «стол охлаждения» поддерживается постоянной. Длительность I-го этапа — 0,450 с. Частота ускоряющего напряжения меняется от 587 кГц до 2525 кГц. На столе напряжение ВЧ адиабатически выключается и происходит охлаждение пучка. Продолжительность электронного охлаждения ~ 1 с. Энергия охлаждения выбрана минимально возможной для работы ВЧ станций на 1-й кратности.

На II-м этапе ионы адиабатически захватываются и ускоряются до 578 МэВ/н на 1-й кратности ускоряющего напряжения. Конечная энергия соответствует предельному полю в дипольных магнитах Бустера в 1,8 Тл. Частота ускоряющего напряжения меняется с 505 кГц до 1117 кГц. Продольный акцептанс во время II-го этапа ускорения во много раз превышает эмиттанс охлаждённого пучка, поэтому закон изменения амплитуды может варьироваться в широких пределах в зависимости от поставленной цели. На этапе замедления роста поля и выхода на «стол» для согласованного перевода пучка в Нуклотрон напряжение адиабатически сбрасывается до нужного значения. Длительность II-го этапа — 1,2 с.

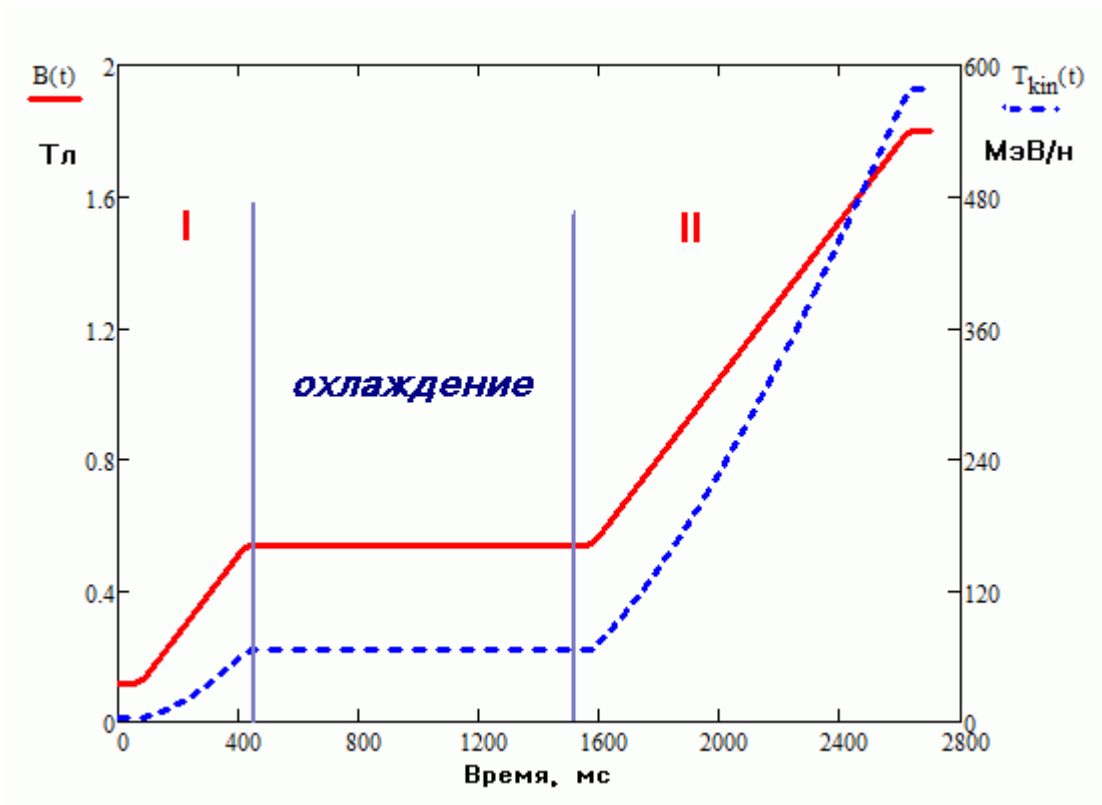


Рис. П.3.5.1. Зависимость магнитного поля и кинетической энергии от времени в течении ускорительного цикла

П.3.5.3 I этап ускорительного цикла

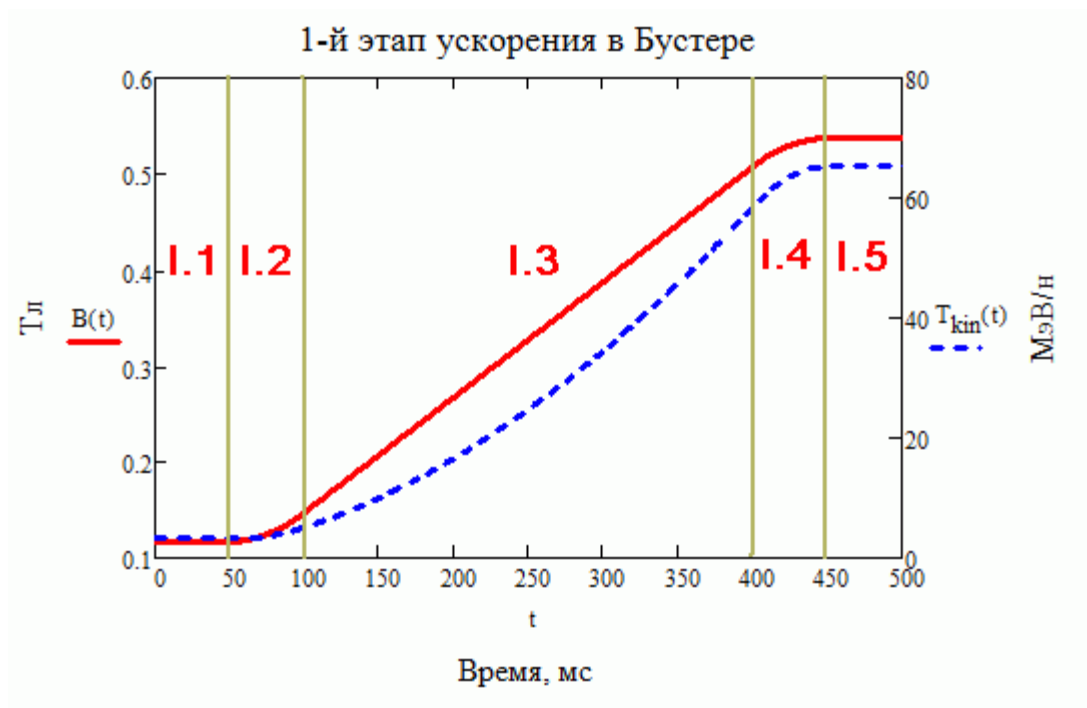


Рис. П.3.5.2. Изменение магнитного поля и энергии в Бустере от инжекции (6 МэВ/н) до дебанчирования и электронного охлаждения (65 МэВ/н)

Основная цель первого этапа ускорения в Бустере — захват инжектированного в Бустер пучка и ускорение без потерь до энергии 65 МэВ (или выше), на которой производится его электронное охлаждение.

Первый этап ускорительного цикла состоит из адиабатического захвата (АЗ) на столе инжекции и собственно ускорения с линейным ростом магнитного поля. Линейный рост магнитного поля ограничен с двух сторон короткими (50 мс) участками параболического роста или замедления поля для перехода со «стола инжекции» к ускорению и выхода на «стол охлаждения»

П.3.5.4 Адиабатический захват частиц в продольный акцептанс ускорителя

Необходимость АЗ диктуется схемой инжекции в Бустер. Схема предполагает двукратную однооборотную инжекцию длительностью 7 мкс, после которой инжектированный пучок с продольным эмиттансом ~ 30 эВ·с занимает весь периметр ускорителя.

Процесс захвата происходит при постоянной средней энергии частиц и состоит в медленном повышении высокочастотного напряжения при постоянном во времени магнитном поле. Процесс называется адиабатическим если параметры синхротронного движения меняются «достаточно» медленно, чтобы распределение частиц было в равновесии при его осуществлении. При этом продольный эмиттанс сохраняется и процесс обратим. Адиабатичность может быть оценена в численном виде через безразмерный параметр α_c :

$$\alpha_c = \frac{1}{\omega_s^2} \left| \frac{d\omega_s}{dt} \right|, \text{ где } \omega_s \text{ — угловая частота синхротронных колебаний}$$

Адиабатичность означает $\alpha_c \ll 1$. Однако, чем меньше значение коэффициента, тем дольше длится захват. При диапазоне значений $0,1 \div 0,3$ достигается разумное время захвата — не более нескольких десятков миллисекунд, а «теоретическая» эффективность захвата приближается к 100 %.

Параметры, определяющие АЗ, выбирались таким образом чтобы:

- эффективность захвата была близка к 100 %
- увеличение продольного эмиттанса в процессе захвата было минимальным
- при полученной в результате АЗ длине банча некогерентный сдвиг частоты бетатронных колебаний, вызванный пространственным зарядом, был меньше 0,1

Ниже показаны результаты численного моделирования АЗ со следующими параметрами: $V_1 = 100$ В, $V_2 = 2200$ В, $\Delta t = 0,05$ с, $\alpha_c = 0,1$.

Продольный акцептанс в конце захвата превышает эмиттанс (6σ) в полтора раза.

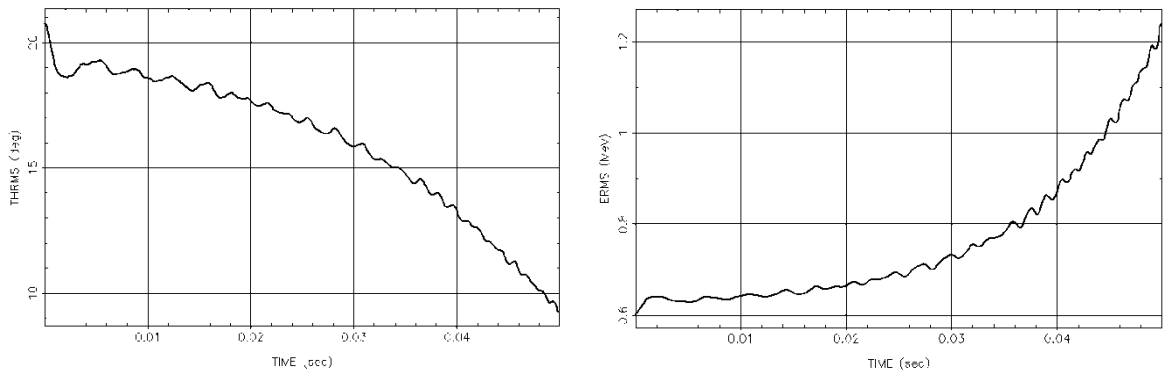
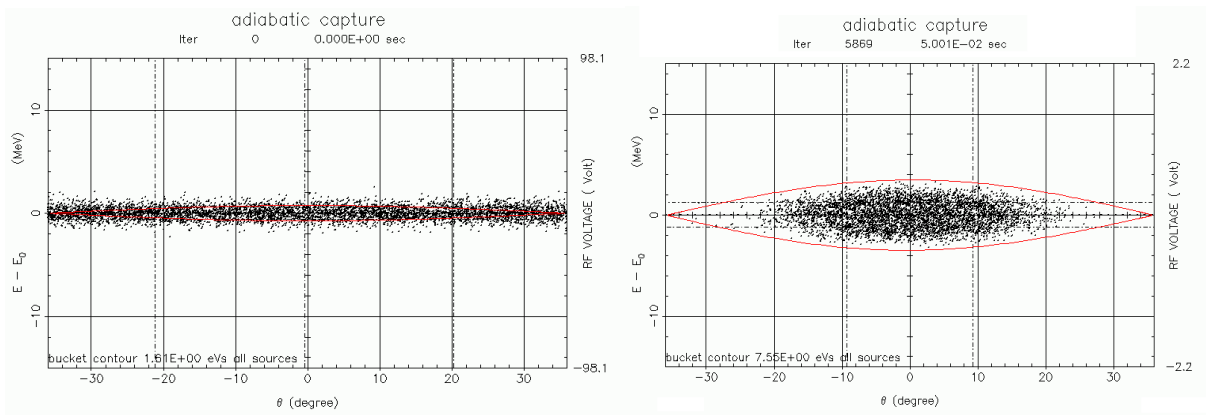


Рис. П.3.5.3. Распределение частиц в фазовом пространстве до и после АЗ (вверху) и эволюция фазовых размеров сгустка в процессе захвата (среднеквадратичный размер по азимуту в градусах — внизу слева, и среднеквадратичный размер по энергии в МэВ — внизу справа)

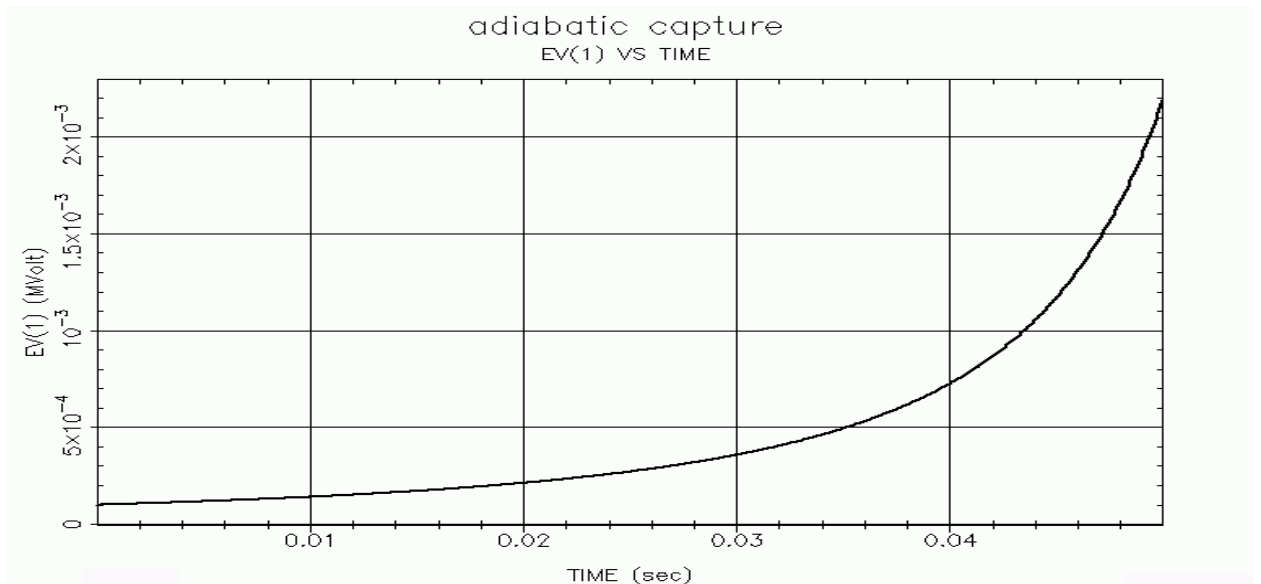


Рис. П.3.5.4. Изменение ускоряющего напряжения ($100 \text{ В} \div 2,2 \text{ кВ}$) при адиабатическом захвате

П.3.5.5 Ускорение частиц до промежуточной энергии

Ускорительный цикл полностью определяется сочетанным изменением во времени двух величин: магнитного поля $B(t)$ — главной переменной и амплитуды ВЧ напряжения на ускорительных станциях $V_{вч}(t)$ — зависимой переменной. Закон связи между магнитным полем и амплитудой ВЧ может варьироваться в зависимости от поставленной цели.

Связь амплитуды ускоряющего напряжения с изменением магнитного поля выражается:

$$V \sin \varphi_s = 2\pi R d(B\rho)/dt, \text{ где } \varphi_s \text{ — синхронная фаза, } R \text{ — средний радиус орбиты, } B\rho \text{ — магнитная}$$

жесткость. Выбор линейного роста магнитного поля с $dB/dt = 1,2 \text{ Тл/с}$ при синхронном ускоряющем напряжении равным половине амплитудного значения ВЧ определяет требование к амплитуде напряжения на ускорительных станциях в $\sim 7 \text{ кВ}$. Линейный рост магнитного поля с двух сторон ограничен переходными периодами для переходов со «стола инъекции» и на «стол охлаждения».

Эти переходные периоды должны быть достаточно медленными, чтобы соблюсти адиабатичность процессов движения частиц и были выбраны равными 50 мс с параболическим изменением магнитного поля. Начальное напряжение вовремя при переходе к ускорению определяется предыдущим адиабатическим захватом — 2.2 кВ. Главной задачей переходных периодов является избежание потерь частиц, то есть необходимо обеспечить удержание фазовых траекторий внутри сепаратрисы, форма которой меняется в смещения равновесной фазы в соответствии dB/dt .

Площадь устойчивого движения частиц (продольного акцептанса) может быть выражена так:

$$A = A_{CT} \cdot \alpha(\varphi_s), \text{ где } A_{CT} \text{ — площадь продольного акцептанса без ускорения (стационарная}$$

сепаратриса) и имеет аналитическую формулу, $\alpha(\varphi_s)$ — сложная функция от синхронной фазы, которую можно получить численными методами. Удержание в процессе переходного периода площади продольного акцептанса постоянной при хорошей адиабатичности процесса позволяет избежать потерь частиц. График напряжения ВЧ в этом случае при переходе от АЗ к ускорению показан на Рис. П.3.5.5.

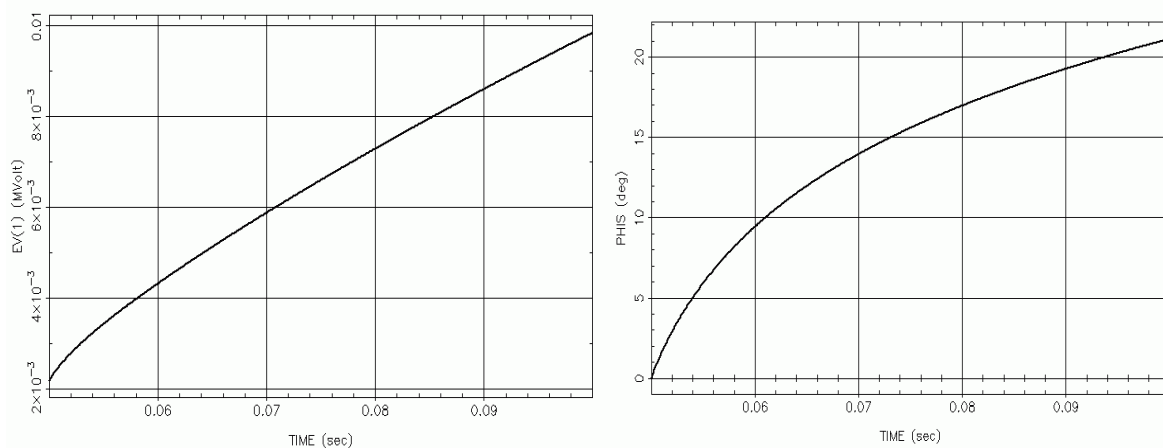


Рис. П.3.5.5. Графики изменения амплитуды (слева) и синхронной фазы ВЧ (справа) при переходе к ускорению

Необходимое конечное напряжение при достижении $dB/dt = 1,2$ Тл/сек — почти 10 кВ. Это объясняется большим начальным импульсным разбросом частиц на выходе линейного ускорителя. Ситуацию может поправить размещение дебанчера в канале HILAC — Бустер.

При замедлении и выходе на «стол» для электронного охлаждения амплитуда ВЧ продолжает меняться, поддерживая площадь акцептансы постоянно. После выхода на «стол» ВЧ адиабатически выключалась. Параметры 1 этапа ускорения в Бустере представлены в Таблице П.3.5.2.

Таблица П.3.5.2. Основные физические параметры первого этапа ускорения

	I.1	I.2	I.3	I.4	I.5
Время, с	0,0/0,05	0,05/0,1	0,1/0,4	0,4/0,45	0,45/0,475
Магн. поле, Тл	0,117/0,117	0,117/0,147	0,147/0,507	0,507/0,537	0,537/0,537
Напр. ВЧ, кВ	0,1/2,2	2,2/9,84	9,84/9,22	9,22/1,7	1,7/0,0
Частота ВЧ, кГц	587/587	587/736	736/2401	2401/2526	2526/2526
Синхр. фаза ВЧ, Град по синусу	0/0	0/21	21/22,6	22,6/0	0/0
Кин. энергия, МэВ/н	3,2/3,2	3,2/5,05	5,05/58,36	58,36/65,24	65,24/65,24
Ко-во банчей	равн./5	5	5	5	5/равн.
RMS банча по длине, м	равн./5,3	5,3/3,75	3,75/3,64	3,64/5,6	5,6/равн.
RMS банча по энергии, МэВ	0,6/1,2	1,2/2,3	2,3/7,6	7,6/5,2	5,2/3,8
$\Delta p/p (\pm 2\sigma)$	$\pm 1 \cdot 10^{-3} / \pm 2,0 \cdot 10^{-3}$	$\pm 2,0 \cdot 10^{-3} / \pm 2,3 \cdot 10^{-3}$	$\pm 2,3 \cdot 10^{-3} / \pm 6,8 \cdot 10^{-4}$	$\pm 6,8 \cdot 10^{-4} / \pm 4,2 \cdot 10^{-4}$	$\pm 4,2 \cdot 10^{-4} / \pm 3,1 \cdot 10^{-4}$
Высота сепаратрисы, МэВ	0,77/3,5	3,5/6,5	6,5/22	22/15	15/0,0
$\Delta p/p$ по сепаратрисе	$6,4 \cdot 10^{-4} / 2,9 \cdot 10^{-3}$	$2,9 \cdot 10^{-3} / 3,3 \cdot 10^{-3}$	$3,3 \cdot 10^{-3} / 9,86 \cdot 10^{-4}$	$9,86 \cdot 10^{-4} / 6,0 \cdot 10^{-4}$	$6,0 \cdot 10^{-4} / 0,0$
Синхр. част.	$1,3 \cdot 10^{-4} / 6,3 \cdot 10^{-3}$	$6,3 \cdot 10^{-3} / 1,1 \cdot 10^{-2}$	$1,1 \cdot 10^{-2} / 2,7 \cdot 10^{-3}$	$2,7 \cdot 10^{-3} / 1,2 \cdot 10^{-3}$	$1,2 \cdot 10^{-3} / 0,0$
Пиковый ток, мА	1,16/3,68	3,68/6,54	6,54/21,9	21,9/15,0	15,0/5,0

П.3.5.6 II этап ускорительного цикла

Целью второго этапа ускорительного цикла является адиабатический захват и ускорение пучка без потерь и его подготовка для перевода в Нуклотрон. Процессы аналогичны процессам I этапа ускорения и не требуют повторного детального описания. Параметры сведены в Таблицу П.3.5.3. Длительность II этапа — 1,2 с. Эмиттанс банча ($b\sigma$), после охлаждения, предполагается — 18 эВ·с.

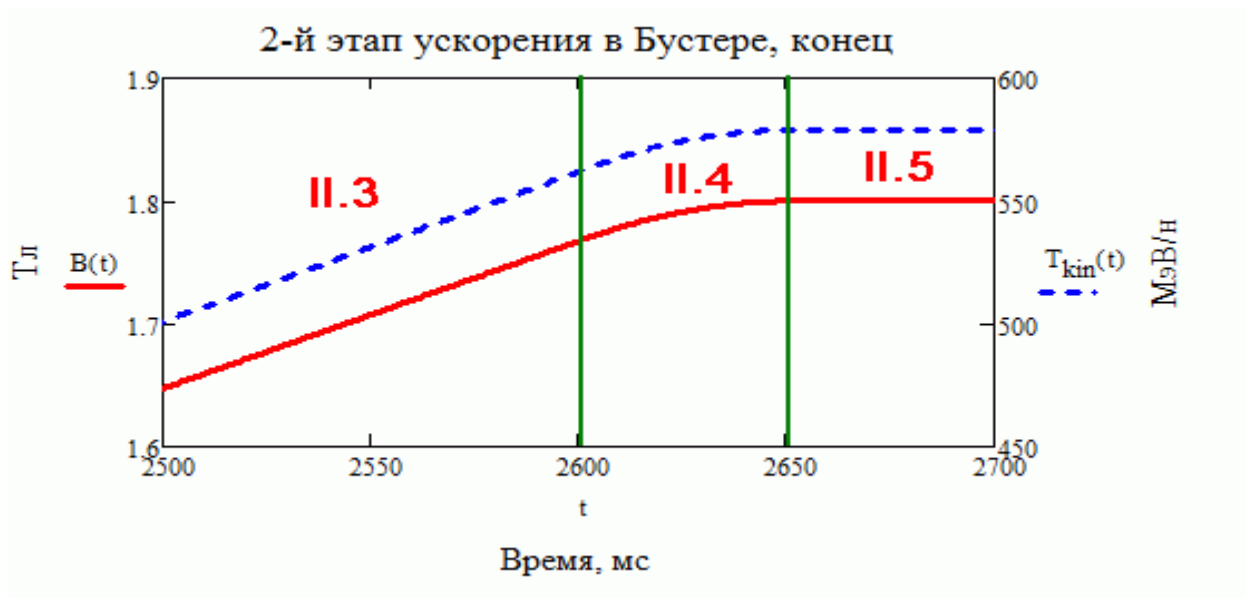
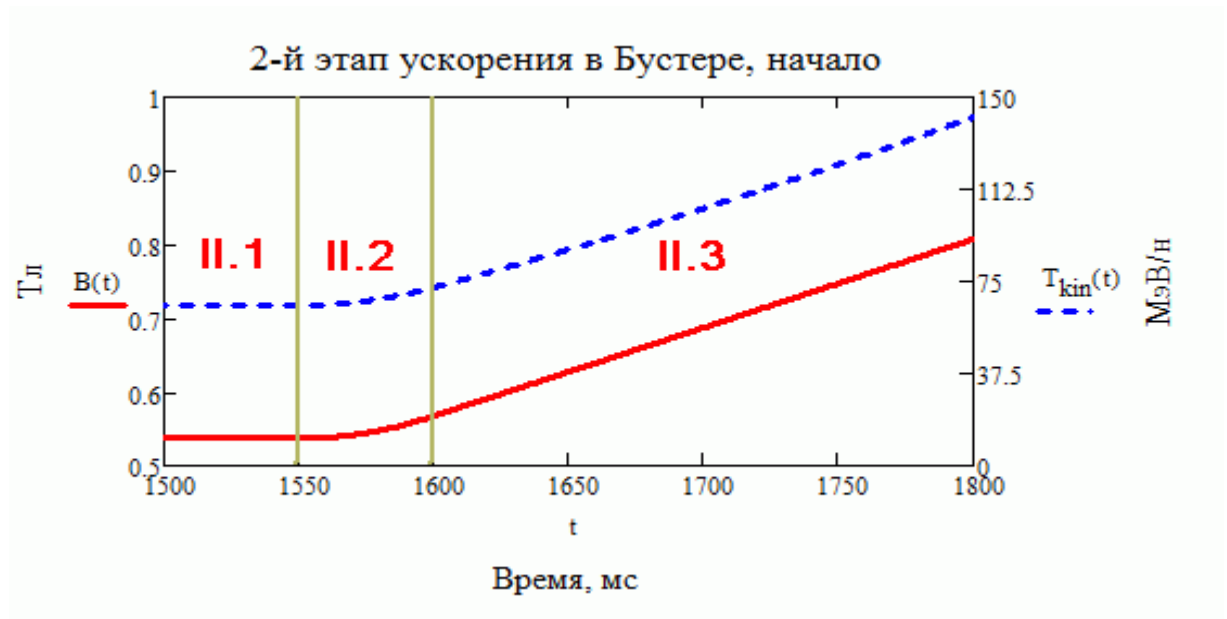


Рис. П.3.5.6. Изменение магнитного поля и энергии в Бустере от электронного охлаждения (65 МэВ/н) до перевода пучка в Нуклотрон (579 МэВ/н)

Таблица П.3.5.3. Основные физические параметры первого этапа ускорения

	II.1	II.2	II.3	II.4
Время, с	0,0/0,05	0,05/0,1	0,1/1,1025	1,1025/1,1525
Магн. поле, Тл	0,537/0,537	0,537/0,567	0,567/1,77	1,77/1,80
Напр. ВЧ, кВ	0,1/1,5	1,5/7,0	7/5,2	5,2/0,1
Частота ВЧ, Гц	505,2/529,5	505,2/529,5	529,5/1110,2	1110,2/1117,4
Синхр. фаза ВЧ, Град по синусу	0,0/0,0	0/31,2	31,2/42,1	31,2/0
Кин. энергия, МэВ/н	65,24/65,24	65,24/72,46	72,46/563,3	563,3/578,8
Кол-во банчей	1/1	1/1	1/1	1/1
RMS банча по длине, м	равн./20,6	20,6/13,78	13,78/11,16	11,16/20,94
RMS банча по энергии, МэВ	1,68/8,57	8,57/13,07	13,07/34,0	34,0/19,14
$\Delta p/p (\pm 2\sigma)$	$1,3 \cdot 10^{-4}/6,88 \cdot 10^{-4}$	$6,88 \cdot 10^{-4}/9,5 \cdot 10^{-4}$	$9,5 \cdot 10^{-4}/3,8 \cdot 10^{-4}$	$3,8 \cdot 10^{-4}/2,15 \cdot 10^{-4}$
Высота сепаратрисы, МэВ	0,0/30,7	30,7/70,3	70,3/48,4	48,4/35,5
$\Delta p/p$ по сепаратрисе	0,0/1,08 $\cdot 10^{-3}$	1,08 $\cdot 10^{-3}/2,55 \cdot 10^{-3}$	2,55 $\cdot 10^{-3}/2,68 \cdot 10^{-4}$	2,68 $\cdot 10^{-4}/3,83 \cdot 10^{-4}$
Синхр. част.	0,0/4,8 $\cdot 10^{-4}$	4,8 $\cdot 10^{-4}/9,8 \cdot 10^{-4}$	9,8 $\cdot 10^{-4}/3,98 \cdot 10^{-5}$	3,98 $\cdot 10^{-5}/2,78 \cdot 10^{-4}$
Пиковый ток, мА	5,0/20,5	20,5/32,1	32,1/83	83/44,6

Глава 4

Канал

транспортировки

Бустер —

Нуклотрон

4.1 НАЗНАЧЕНИЕ

Канал транспортировки Бустер-Нуклотрон служит для перевода пучка с минимальными потерями из Бустера в кольцо Нуклотрона. В процессе перевода производится обдирка ионов пучка до максимального зарядового состояния, сепарация и поглощение нецелевых зарядностей ионов. Ионно-оптическая система канала транспортировки обеспечивает минимальный рост поперечных эмиттансов пучка и возможность управления ими для всего диапазона параметров пучка на входе канала. Входные параметры пучка могут варьироваться в широком диапазоне вследствие использования 1) различных схем инжекции пучка в Бустер; 2) электронного охлаждения пучка.

В Таблице 4.1.1 приведены основные параметры пучка в канале транспортировки.

Таблица 4.1.1. Основные параметры пучка в канале транспортировки Бустер-Нуклотрон

Ионы	$^{197}\text{Au}^{31+}$ (на входе); $^{197}\text{Au}^{79+}$ (на выходе)
Интенсивность	до $1,5 \cdot 10^9$ (на входе); до $1,2 \cdot 10^9$ (на выходе)
Энергия ионов, МэВ/н	578 (на входе); 572 (на выходе)
Максимальная магнитная жёсткость ионов, Тл·м: – до станции обдирки; – после станции обдирки	25 11
Эффективность перевода, %: – целевой зарядности – полная	95 ≤ 80
Горизонтальный/вертикальный 95 %-ный эмиттанс, $\mu\text{мм} \cdot \text{мрад}$: – на входе; – на выходе	$0,2 \div 11 / 0,2 \div 1,5$ $4 \div 14 / 1 \div 4$
Среднеквадратичный продольный импульсный разброс, 10^{-4} : – на входе; – на выходе	$1 \div 3$ $1,5 \div 3,3$

4.2 СТРУКТУРА КАНАЛА

Канал транспортировки Бустер-Нуклотрон располагается в корпусе № 1 и проходит сквозь ярмо магнита Синхрофазотрона. Часть элементов канала располагается снаружи, часть — внутри ярма. Канал состоит из основного тракта перевода ионов в Нуклотрон и ответвления для сброса нецелевой зарядности. Канал имеет сложную трёхмерную геометрию, в значительной степени определяемую взаимным расположением Бустера и Нуклотрона. Т.к. синхротроны имеют различные радиусы, и их медианные плоскости разнесены по вертикали на 3,76 м, то 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 инъекции пучка через один октант Нуклотрона от точки вывода из Бустера.

Канал транспортировки делится на 6 частей: 2 «холодные» (с системой криостатирования сверхпроводящих магнитных элементов канала) и 4 «тёплых» (при комнатной температуре). Все магнитные элементы канала размещаются на «холодных» участках. Два «тёплых» участка отделяют «холодные» от криостатов смежных ускорителей Бустер и Нуклотрон. Центральный «тёплый» участок служит для размещения станции обдирки. Ещё одним «тёплым» участком является ответвление для сброса нецелевой зарядности. Приблизительный трёхмерный вид канала приведён на Рис. 4.2.1. Магнитная структура канала показана на Рис. 4.2.2. Горизонтальная проекция и вертикальный профиль канала представлены на Рис. 4.2.3 и Рис. 4.2.4.

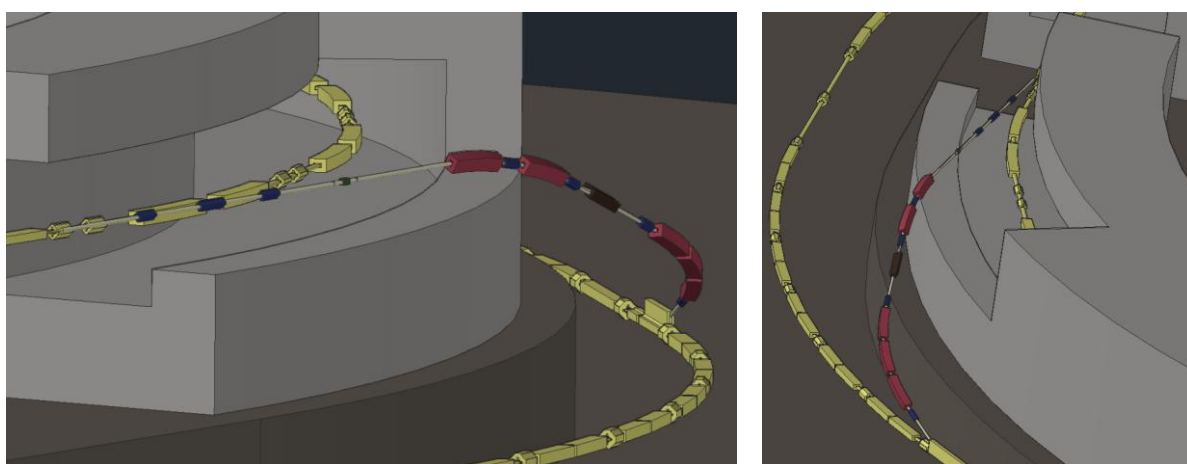


Рис. 4.2.1. Приблизительный вид канала транспортировки Бустер-Нуклотрон

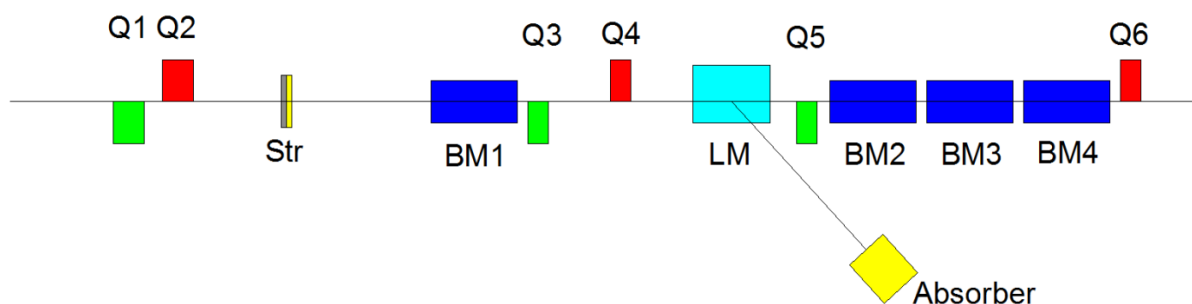


Рис. 4.2.2. Магнитная структура канала транспортировки Бустер-Нуклотрон. Обозначения: BM1 – BM4 — дипольные магниты; Q1-Q6 — квадрупольные линзы; LM — магнит Ламбертсона; Str — станция обдирки; Absorber — поглотитель ионов нецелевой зарядности

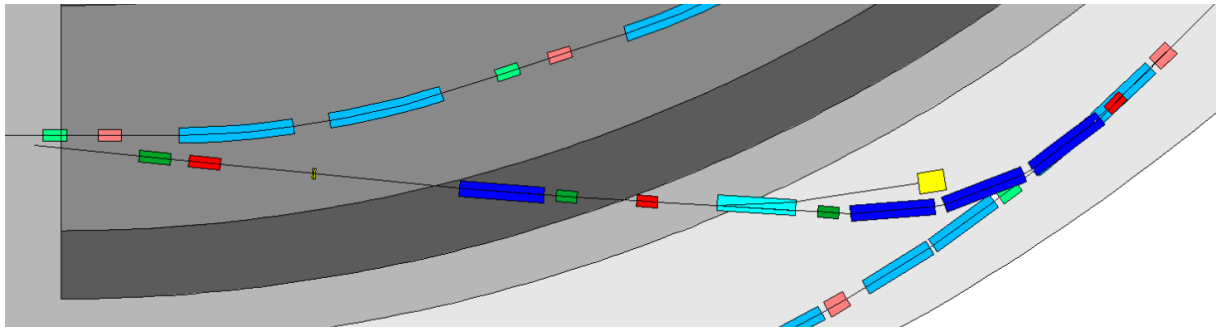


Рис. 4.2.3. Горизонтальная проекция канала транспортировки Бустер — Нуклотрон

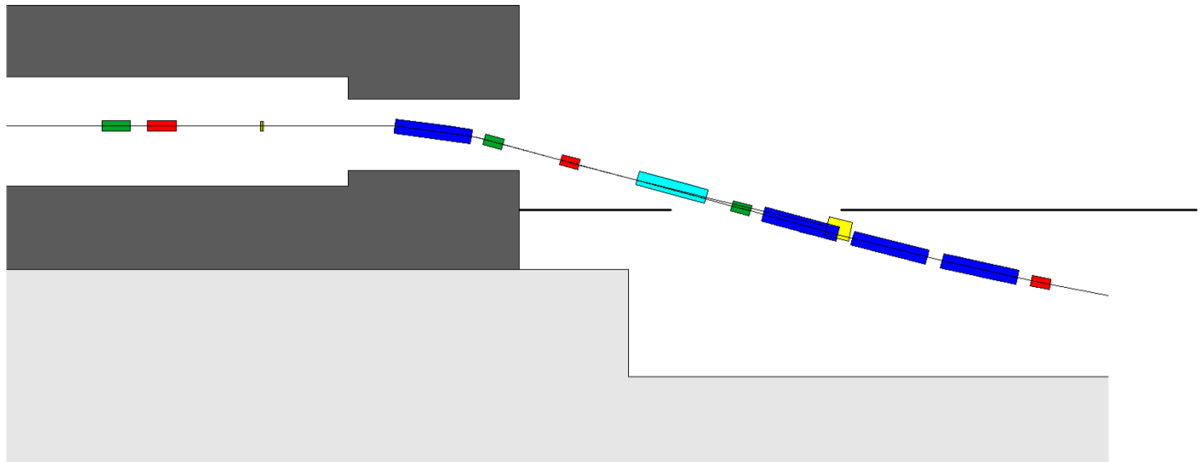


Рис. 4.2.4. Вертикальный профиль канала транспортировки Бустер — Нуклотрон

Ионно-оптическая система (ИОС) канала транспортировки состоит из 4 дипольных магнитов, 6 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. Обдирка ионов до максимального зарядового состояния и сепарация нецелевых зарядностей проводится станцией обдирки и элементами участка сепарации: дипольным магнитом VM1 квадрупольными линзами Q3 – Q4 и магнитом Ламбертсона LM. Коррекция траектории пучка в канале производится системой двойных дипольных корректоров.

Диагностика пучка в канале заключается в измерении его интенсивности, положения, профиля, поперечного эмиттанса, энергии ионов, энергетического разброса, интенсивности потерь транспортируемых ионов. Для указанных целей используются:

- 1) трансформаторы тока;
- 2) пикап-электроды;

- 3) проволочные профилометры;
- 4) ионизационные мониторы;
- 5) эмиттансометр;
- 6) измеритель энергии пучка;
- 7) измеритель энергетического разброса;
- 8) мониторы потерь ионов.

Вакуумная система канала содержит:

- 1) посты предварительной откачки изоляционного объёма;
- 2) посты высоковакуумной откачки изоляционного объёма;
- 3) посты откачки «холодной» пучковой камеры;
- 4) посты откачки «тёплой» пучковой камеры;
- 5) геттерные насосы;
- 6) вакуумные шиберы;
- 7) «холодную» пучковую камеру;
- 8) «тёплую» пучковую камеру с системой прогрева;
- 9) вакуумные кожухи криостата;
- 10) поглотители ионов.

Посты откачки изоляционного объёма предназначены для создания рабочего вакуума порядка 10^{-7} Торр и контроля давления в изоляционном объёме «холодных» участков канала транспортировки. Посты откачки пучковой камеры и геттерные насосы предназначены для создания рабочего вакуума порядка 10^{-10} Торр и контроля давления в пучковом объёме канала. Вакуумные шиберы служат для разделения пучкового объёма канала на независимые части и его отсекания от смежных ускорителей Бустер и Нуклотрон. Система прогрева вакуумной камеры предназначена для предварительного нагревания стенок «тёплой» пучковой камеры до $200 \div 300$ °С с целью уменьшения десорбции. Поглотители ионов служат для уменьшения десорбции со стенок

вакуумной камеры в местах интенсивных потерь ионов пучка: после станции обдирки и на участке сепарации нецелевых зарядностей.

Поглотитель ионов нецелевой зарядности предназначен для радиационно-безопасного сброса не полностью ободранных (водородоподобных) ионов пучка. Геометрия канала позволяет использовать фундамент корпуса № 1 в качестве естественного поглотителя.

4.3 ДИНАМИКА ИОНОВ

4.3.1 Рост эмиттансов пучка

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. Многократное рассеяние — это процесс множественного повторения упругих столкновений ионов пучка с атомами обдирочной мишени. При рассеянии ионов на малые углы этот процесс приводит к нагреву пучка по продольному и поперечным направлениям. Ионизационные потери — это потери энергии ионами при прохождении обдирочной мишени, связанные с возбуждением и ионизацией атомов мишени, а также ионизацией самих ионов. Процесс неупругих столкновений является случайным, поэтому имеют место флуктуации энергетических потерь, что ведёт 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 ведёт не к нагреву пучка и, соответственно, росту его фазового объёма, а к появлению корреляции фазового распределения ионов между горизонтальным и вертикальным направлениями и изменениям проекций пучка на соответствующие фазовые плоскости, что в свою очередь может выражаться в росте горизонтального/вертикального эмиттансов и увеличении размеров пучка.

Третий источник роста эмиттансов — это несогласование пучка на выходе канала со структурными функциями Нуклотрона. После инжекции несогласованного пучка его эффективные поперечные эмиттансы увеличиваются вследствие филаментации фазового распределения, вызванной нелинейными и хроматическими эффектами динамики ионов. Таким образом, рост эмиттансов в данном случае происходит не в самом канале транспортировки, а в принимающем ускорителе. Но этот эффект следует относить к эффектам оптики ионного пучка при транспортировке, т.к. ИОС канала отвечает за согласование пучка с Нуклотроном, а в силу большого числа параметров пучка,

требующих согласования (бетатронные и дисперсионные функции, коэффициенты корреляции), ограниченным набором элементов ИОС полного согласования пучка достичь не удаётся.

4.3.2 Оптимизация параметров ионно-оптической системы

Задача оптимизации параметров ионно-оптической системы канала 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) критерий управления поперечными эмиттансами пучка;
- 5) полное отделение водородоподобных ионов от пучка голых ядер;
- 6) минимальность поперечных размеров пучка вдоль траектории в канале;
- 7) критерий управления градиентами магнитных полей в квадрупольных линзах.

Критерий максимальной эффективности обдирки ионов заключается в максимизации доли полностью ободранных 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 акцептанса Нуклотрона (отношений конечных эмиттансов к соответствующим акцептансам). В общем виде этот критерий является комбинацией приведённых форм. Под конечным эмиттансом понимается 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 управления 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.

Критерий минимальности поперечных размеров пучка вдоль траектории заключается в минимизации апертуры пучковой камеры и максимизации аксептансов канала. Выполнение данного критерия обеспечивается настройкой квадрупольных линз канала.

Критерий управления градиентами магнитных полей в квадрупольных линзах представляет собой комбинацию следующих условий: минимальность градиентов; равенство отношений градиентов заданным значениям (в частности, равенство градиентов друг другу) в линзах одного семейства (при разбиении множества квадрупольных линз на семейства). Выполнение данного критерия обеспечивается соответственно настройкой квадрупольных линз канала.

Задача оптимизации параметров ИОС может быть решена методами однокритериальной и многокритериальной оптимизации. При однокритериальной оптимизации строится функционал, формально отражающий вышеприведенные критерии оптимальности и их веса (значимость), который минимизируется с помощью известных численных методов. При многокритериальной оптимизации строится векторная целевая функция с размерностью, равной числу критериев оптимальности, для которой находится множество компромиссных решений. Построение минимизируемого функционала и векторной целевой функции производится путём скаляризации и нормирования критериев оптимальности. Процедуры скаляризации и нормирования являются неоднозначными, следовательно, задача оптимизации параметров ИОС канала может быть формализована бесконечным числом способов. Для внесения некоторой однозначности вводятся дополнительные критерии оценки результата оптимизации, например, проверочные наборы оптимизируемых параметров пучка и варьируемых параметров ионно-оптической системы, ранжированные по степени предпочтительности.

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 каждого 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 лежащих вблизи них и удовлетворяющих заданным критериям квазиоптимальности решения.

4.3.3 Моделирование

Для определения количества, положения и характеристик элементов ИОС канала была проведена серия оптимизационных расчётов, включающая моделирование обдирки ионов. Начальные параметры пучка брались по всем диапазонам значений, приведённым в Таблице 4.3.1. Расчёты проводились с помощью программ SRIM-2006, MAD и специализированного программного кода, разработанного в ЛФВЭ. Данная программа предназначена для моделирования динамики пучков в канале транспортировки с учётом роста поперечных эмиттансов при обдирке ионов и решения вышеописанной задачи оптимизации, для чего используются метод моментов второго порядка фазового распределения ионов и методы локальной/глобальной минимизации (методы градиентного спуска и случайного поиска) соответственно.

Моделирование обдирки ионов позволяет определить её эффективность и состав ионного пучка после прохождения станции обдирки. Для ионов золота $^{197}\text{Au}^{31+}$ на энергии 578 МэВ/н эффективность обдирки оценивается величиной не менее 80 %, и ионы нецелевых зарядностей после обдирки будут составлять до 20 % пучка, при этом подавляющее большинство будет водородоподобных ионов $^{197}\text{Au}^{78+}$.

Результаты моделирования динамики ионов при переводе пучка в Нуклотрон для одного из рассмотренных вариантов магнитной структуры канала приведены ниже. Начальные параметры пучка соответствуют режиму работы Бустера при однократной однооборотной инжекции без электронного охлаждения ионов на промежуточной энергии. На Рис. 4.3.1 и Рис. 4.3.2 даны бета-функции и дисперсии пучка соответственно. На Рис. 4.3.3 показаны огибающие пучка вдоль канала. На Рис. 4.1.4 приведена эволюция поперечных эмиттансов пучка при переводе в канал и после инжекции в Нуклотрон. Параметры пучка на указанных рисунках даны в ортогональной сопровождающей системе координат пучка, в которой координатной осью Ox считается ось, имеющая минимальный угол с горизонтальной плоскостью. Т.к. магнитные элементы в различных секциях канала транспортировки устанавливаются под разными углами относительно горизонтали, то при моделировании динамики пучка использовались повороты сопровождающей системы координат, изображённые на рисунках в виде разрывов графиков.

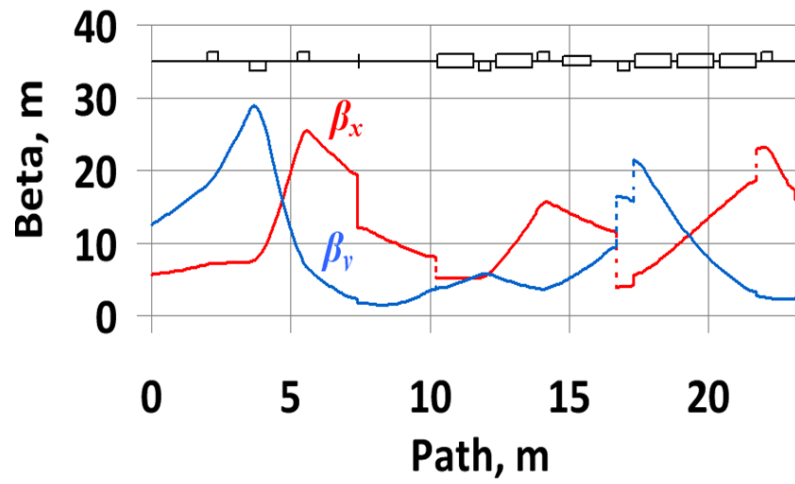


Рис. 4.3.1. Бета-функции пучка вдоль канала

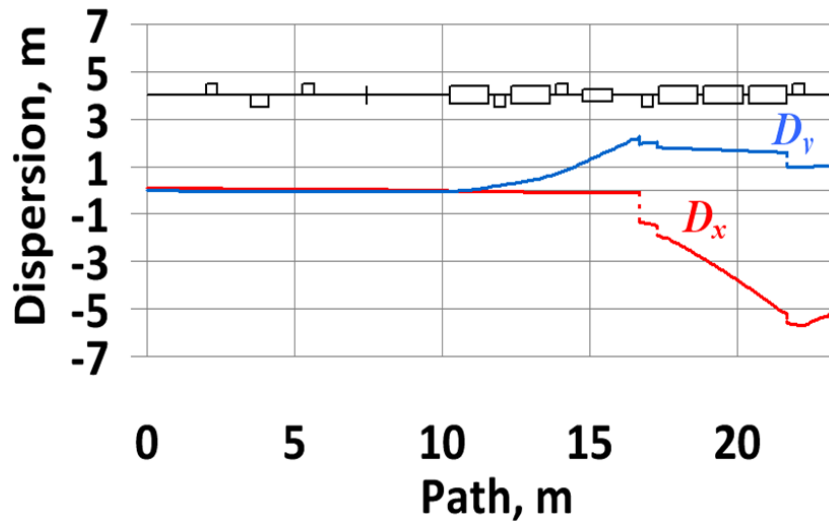


Рис. 4.3.2. Дисперсионные функции пучка вдоль канала

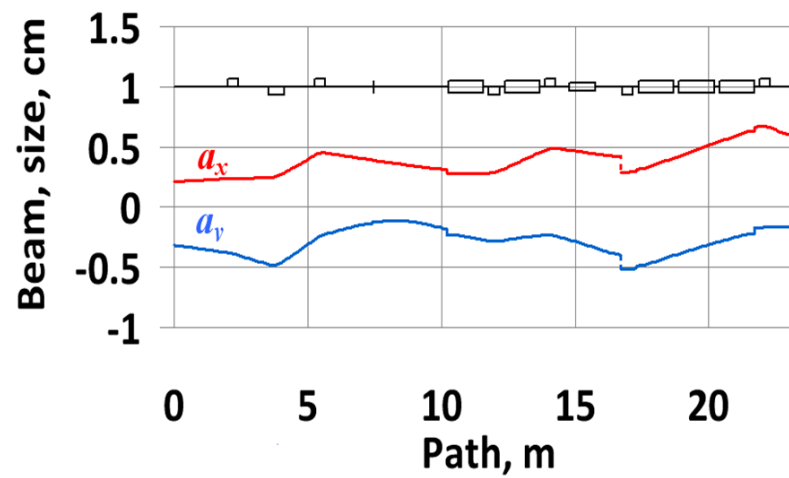


Рис. 4.3.3. Огибающие пучка вдоль канала

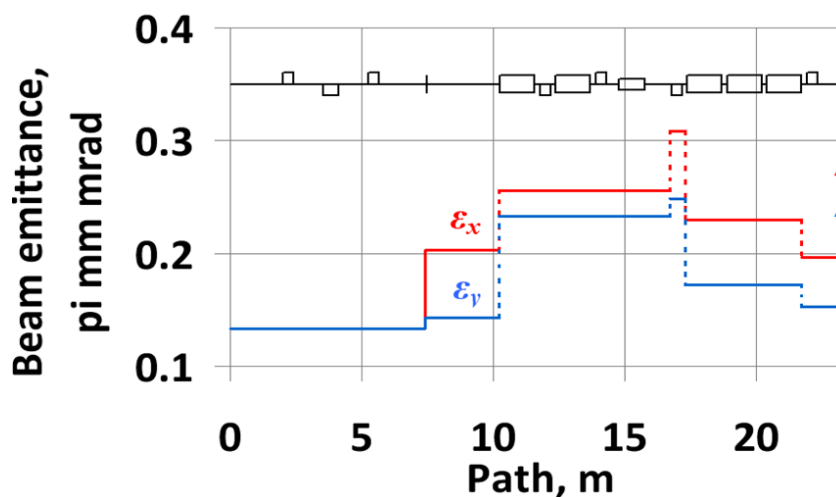


Рис. 4.3.4. Эволюция среднеквадратичных поперечных эмиттансов пучка вдоль канала. Скачкообразное увеличение эмиттансов в конце канала, указанное стрелками, изображает рост эмиттансов в Нуклотроне вследствие несогласования пучка

Моделирование динамики ионов на участке separации зарядностей для различных режимов работы Бустера показывает, что расстояния между траекториями движения пучков $^{197}\text{Au}^{79+}$ и $^{197}\text{Au}^{78+}$ 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 $^{197}\text{Au}^{78+}$ в ответвление канала для их транспортировки к поглотителю.

На Рис. 4.3.5 приведены траектории и огибающие пучков $^{197}\text{Au}^{79+}$ и $^{197}\text{Au}^{78+}$ на участке separации нецелевых зарядностей для режима работы Бустера, соответствующего однократной однооборотной инжекции без электронного охлаждения ионов на промежуточной энергии.

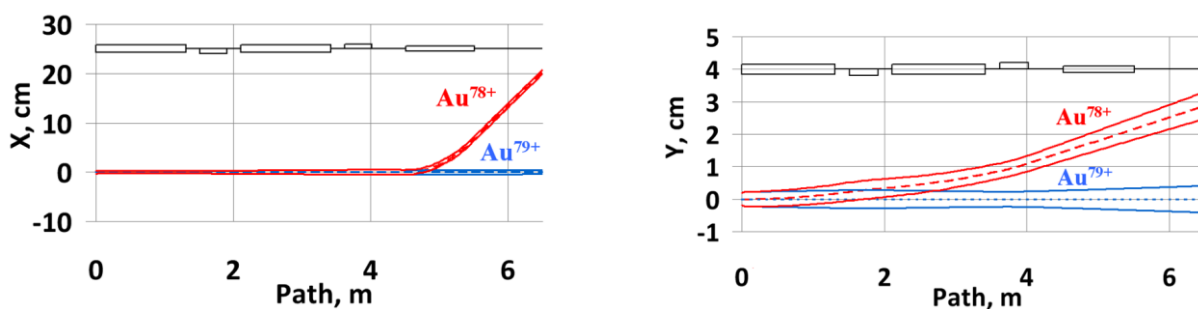


Рис. 4.3.5. Динамика ионов на участке separации зарядностей

4.4 МАГНИТНАЯ СИСТЕМА

Магнитная система канала включает в себя:

- дипольные магниты, квадрупольные линзы, магнит Ламбертсона и дипольные корректоры;
- электрические соединения магнитных элементов внутри криостата;
- сильноточные токовводы питания структурных магнитов;
- слаботочные токовводы питания корректоров.

Магнитные элементы канала сверхпроводящие с ферромагнитным ярмом, изготавливаются по той же технологии, что и магниты Бустера и Нуклотрона.

Дипольные магниты канала представляют собой секторные магниты Бустера усечённой длины. Магниты устанавливаются внутри криостата канала. Системы креплений магнитов выполняются таким образом, что каждый магнит закрепляется под определённым углом поворота относительно оси влёта пучка в него, и после охлаждения до гелиевой температуры положение и угол поворота магнита остаются неизменными. Эффективная длина дипольного магнита — 1,7 м. Максимальное магнитное поле — 1,8 Тл. Соответствующий максимальный ток в обмотках — 6 кА.

Квадрупольные линзы канала аналогичны линзам Бустера, отличаясь от них длинами ярм и числом витков обмотки. Линзы устанавливаются внутри криостата канала, каждая в отдельном криостатном модуле. Линзы Q3 и Q4 устанавливаются с поворотом относительно геометрической оси канала, что обеспечивается специальной системой креплений, отличающейся от аналогичной системы для линз Бустера. Эффективные длины линз: 0,6 м (линзы Q1, Q2) и 0,4 м (Q3 ÷ Q6). Максимальный градиент магнитного поля в линзах Q1 и Q2 — 30 Тл/м, в линзах Q3 ÷ Q6 — до 20 Тл/м (в зависимости от числа витков обмотки). Соответствующий максимальный ток в обмотках — 6 кА.

Магнит Ламбертсона канала аналогичен магнитам Ламбертсона, используемым в Нуклотроне для инжекции и вывода пучка. Магнит Ламбертсона устанавливается внутри отдельного криостатного модуля. Длина магнита — 1,5 м, толщина септума — 5 мм. Максимальное магнитное поле — 1,5 Тл. Соответствующий максимальный ток в обмотках — 6 кА.

Двойные дипольные корректоры канала аналогичны мультипольным корректорам Бустера, отличаясь от них наличием только дипольных обмоток.

Электрические соединения магнитных элементов внутри криостата канала обеспечиваются трубчатыми сверхпроводящими кабелями, аналогичными кабелям электрической связи магнитов Бустера. Сильноточные токовводы, предназначенные для питания структурных элементов (дипольных магнитов, квадрупольных линз и магнита Ламбертсона), аналогичны токовводам

Бустера на 6 кА. Слаботочные токовводы для питания дипольных корректоров аналогичны токовводам Нуклотрона на 100 А.

4.5 СИСТЕМА ПИТАНИЯ МАГНИТНЫХ ЭЛЕМЕНТОВ

Система питания канала включает в себя:

- 1) источник питания дипольных магнитов и магнита Ламбертсона;
- 2) источники питания квадрупольных линз;
- 3) источники питания дипольных корректоров;
- 4) систему эвакуации энергии;
- 5) систему детектирования перехода сверхпроводящих обмоток в нормальную фазу.

Схема питания магнитных элементов канала такова:

- Дипольные магниты и магнит Ламбертсона соединяются последовательно.
- Квадрупольные линзы разбиты на семейства. Соединение линз одного семейства — последовательное; разность градиентов магнитного поля в линзах создается с помощью различного числа витков в обмотках.
- Дипольные корректоры питаются от индивидуальных источников.

Источники питания работают на постоянном уровне токов, что позволяет минимизировать тепловыделения в магнитных элементах канала.

Системы эвакуации энергии и детектирования перехода сверхпроводящих обмоток в нормальную фазу строятся на базе аналогичных систем Бустера.

Источники питания и ключи эвакуации энергии размещаются в корпусе № 1, в непосредственной близости от канала транспортировки.

4.6 СТАНЦИЯ ОБДИРКИ

Станция обдирки размещается в канале на центральном «теплом» участке. Вариант «тёплого» исполнения обдирочной мишени, совмещённой с профилометром, приведён на Рис. 4.6.1.

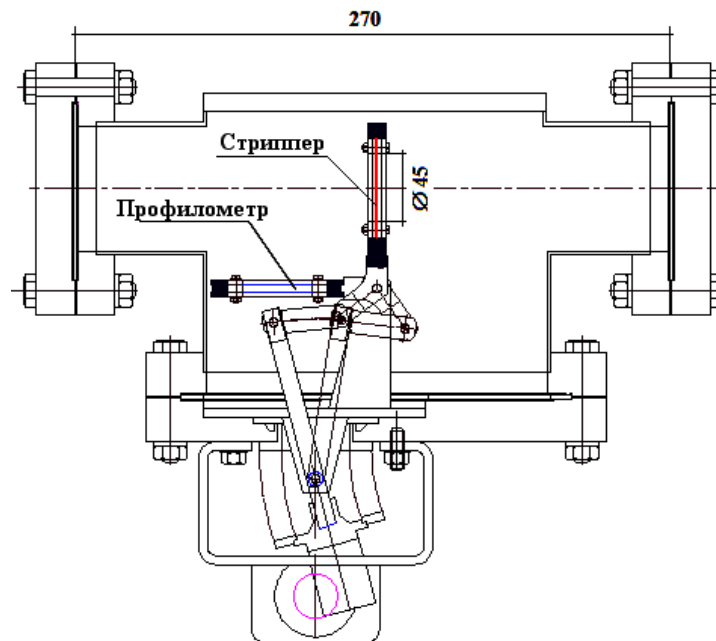


Рис. 4.6.1. Конструкция станции обдирки, совмещённой с профилометром

4.7 ВАКУУМНАЯ СИСТЕМА

Вакуумная система канала включает в себя следующие составные части (подсистемы):

- 1) вакуумная изоляционная система;
- 2) высоковакуумная система пучковой камеры;
- 3) газовая предохранительная система.

Вакуумная изоляционная система включает в себя:

- вакуумные кожухи, муфты, сильфоны;
- посты предварительной откачки изоляционного объёма;
- посты высоковакуумной откачки изоляционного объёма;
- течеискатели;
- оборудование обвязки вакуумных насосов, агрегатов и течеискателей;
- шкафы управления (с блокировками) вакуумных насосов, электрических затворов и клапанов;
- датчики давления.

Высоковакуумная система пучковой камеры включает в себя:

- «тёплую» и «холодную» пучковую камеру;
- посты откачки «тёплой» пучковой камеры;
- посты откачки «холодной» пучковой камеры;
- геттерные насосы;
- шкафы управления (с блокировками) постов откачки;
- систему активации (предварительного прогрева) геттерных насосов;
- шиберы на «тёплой» пучковой камере;
- систему обезгаживания (предварительного прогрева) «тёплой» пучковой камеры;
- поглотители ионов.

Газовая предохранительная система включает в себя:

- предохранительные клапаны-«присоски» на вакуумных кожухах канала;
- предохранительные клапаны на гелиевых коллекторах и сифонах подачи жидкого гелия в криостаты «холодных» участков канала.

Вакуумное оборудование канала аналогично используемому в Бустере. Оборудование размещается в корпусе № 1, непосредственной близости от канала транспортировки. Количество единиц оборудования вакуумной системы канала дано в Таблице 4.7.1.

Таблица 4.7.1. Общее количество вакуумного оборудования

Посты предварительной откачки изоляционного объёма	2
Посты высоковакуумной откачки изоляционного объёма	3
Посты откачки «тёплой» пучковой камеры	4
Посты откачки «холодной» пучковой камеры	3
Геттерные насосы	5
Шибера	5

4.8 СИСТЕМА КРИОСТАТИРОВАНИЯ

Система криостатирования канала делится на следующие составные части (подсистемы):

- 1) криогенная гелиевая система;
- 2) азотная система;
- 3) система мониторинга.

Криогенная гелиевая система предназначена для криостатирования магнитных элементов канала жидким гелием. Система включает в себя:

- криостаты ввода и вывода гелия из канала;
- токовводные криостаты;
- переохладители;
- гелиевые коллекторы;
- гелиевые охлаждающие каналы магнитных элементов;
- охлаждающие каналы сверхпроводящих кабелей электрической связи и токовводов;
- «холодную» запорно-регулирующую арматуру.

Азотная система предназначена для криостатирования тепловых экранов. Система включает в себя:

- азотные экраны;
- сифоны подачи и вывода азота из канала;
- «холодную» запорную и регулируемую арматуру.

Система мониторинга предназначена для наблюдения за процессом криостатирования канала по следующим параметрам: температурам на гелиевых коммуникациях, ярмах магнитных элементов, сверхпроводящих кабелях электрической связи, токовводах, тепловых экранах; давлениям и паросодержанию в гелиевых коммуникациях.

Система включает в себя:

- датчики температуры;
- датчики давления двухфазного гелия;
- датчики паросодержания.

Самостоятельную роль в мониторинге криостатирования играет система детектирования перехода сверхпроводящих обмоток в нормальную фазу.

Система криостатирования канала строится на базе аналогичного оборудования Бустера.

Глава 5

Нуклотрон

АННОТАЦИЯ

Нуклотрон сверхпроводящий протонный синхротрон с максимальной магнитной жёсткостью 45 Тл·м и периметром 251,52 м, обеспечивающий ускорение тяжёлых ионов до энергии $1 \div 4,5$ ГэВ/н. В рамках проекта NICA в последние годы реализуется программа по модернизации основных систем ускорителя — Нуклотрон-М. В данном разделе Технического проекта приводится современное состояние оборудования ускорительного комплекса Нуклотрона, а так же перечень и описание дополнительного оборудования, которое необходимо установить на ускорителе для его работы в составе инжекционной цепочки Коллайдера NICA.

5.1 ОСНОВНЫЕ ПАРАМЕТРЫ

5.1.1 Ускорительный комплекс Нуклотрона

Ускорительный комплекс Нуклотрон ОИЯИ (Рис. 5.1.1) обеспечивает в настоящее время проведение экспериментов на ускоренных пучках протонов и ядер (вплоть до ядер железа, $A = 56$) с энергиями до 5,7 ГэВ/н и 2,2 ГэВ/н соответственно. Была также продемонстрирована возможность ускорения частиц до существенно больших энергий, в частности был получен ускоренный пучок дейтронов с энергией 4,35 ГэВ/н. В настоящее время проводится модернизация ряда систем ускорительного комплекса, которые не соответствуют возможности эксплуатации Нуклотрона при максимальной проектной энергии ядер 6 ГэВ/н (для частиц с $Z/A = 0,5$).

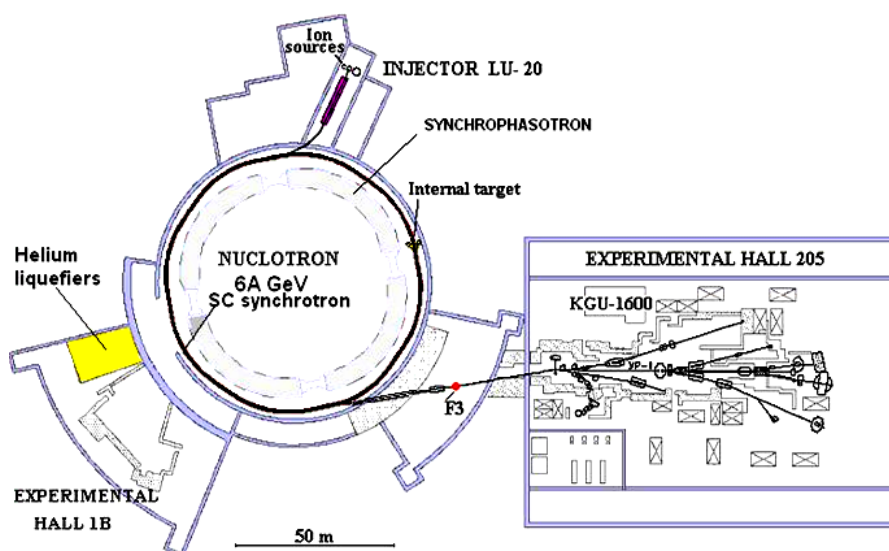


Рис. 5.1.1. Общая схема ускорительного комплекса Нуклотрон

Основными составляющими действующего ускорительного комплекса являются:

1. сверхпроводящий синхротрон — Нуклотрон, магнитно-криостатная система которого периметром 251,5 м расположена в тоннеле вокруг фундамента магнита синхрофазотрона;

2. система криогенного обеспечения Нуклотрона, состоящая из двух гелиевых рефрижераторов КГУ-1600/4,5 с необходимой инфраструктурой для хранения и циркуляции газообразного гелия, а также ёмкостями для хранения жидкого азота и линиями его транспортировки для охлаждения тепловых экранов криостата магнитов и линз кольца ускорителя;
3. инжекционный комплекс, включающий в себя источники протонов и ядер (дуоплазматрон, лазерный, электронно-лучевой, а также источник поляризованных дейтронов-Полярис), предускоритель — высоковольтный (до 800 кВ) импульсный трансформатор и линейный резонансный ускоритель типа Альвареца ЛУ-20, обеспечивающий ускорение протонов до энергии 20 МэВ и ядер с отношением заряда к массе больше 0,33 до энергии 5 МэВ/н;
4. канал транспортировки пучка от ЛУ-20 в камеру Нуклотрона с устройствами вывода пучка на равновесную орбиту;
5. система медленного резонансного вывода ускоренных пучков в направлении основного экспериментального зала (корпусе № 205) с начальным участком транспортировки пучка от выходного окна криостата Нуклотрона до точки «фокус Ф3»;
6. каналы транспортировки выведенных пучков от точки «Ф3» к экспериментальным установкам в корпусе № 205;
7. источники питания магнитов и линз кольца Нуклотрона и каналов транспортировки пучков, размещённые в отдельном здании (корпусе № 1А) с силовыми кабельными трассами;
8. система диагностики пучков, контроля и управления;
9. система ВЧ ускорения пучков в Нуклотроне;
10. радиационная защита и автоматизированная система контроля радиационной обстановки.

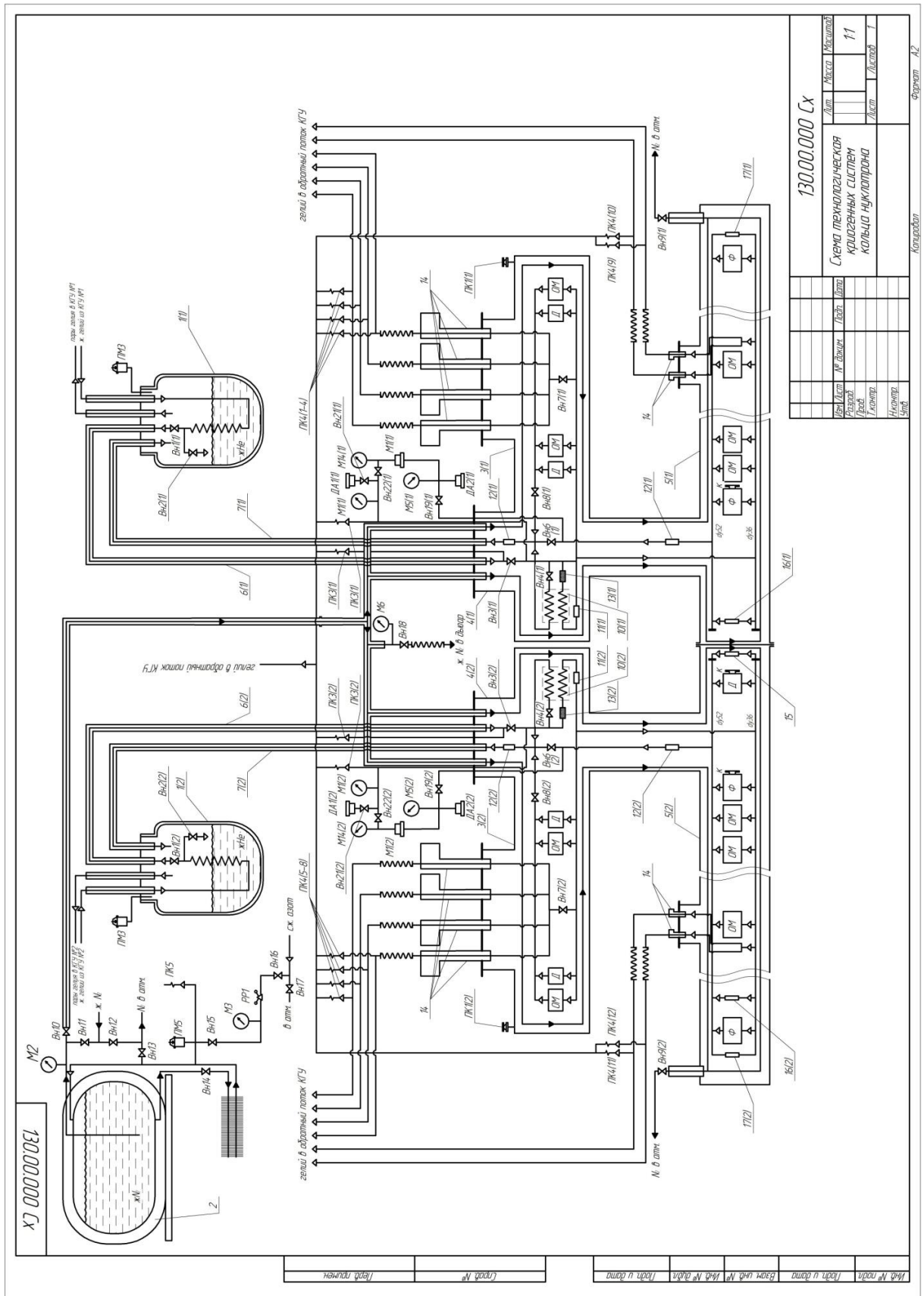
5.1.2 Магнитно-криостатная система Нуклотрона

Магнитно-криостатная система сверхпроводящего синхротрона Нуклотрон предназначена для ускорения пучка заряженных частиц (ядер) и получения проектных значений параметра пучка. Условно магнитно-криостатную систему можно разделить на следующие составные части (подсистемы):

- 1) магнитная система кольца;
 - 2) система криостатирования элементов кольца гелием;
 - 3) азотная система криостатирования тепловых экранов;
 - 4) вакуумная изоляционная система;
 - 5) высоковакуумная система камеры ускорителя;
 - 6) газовая предохранительная система.
- 1) Магнитная система кольца включает в себя:

- дипольные, квадрупольные и мультипольные магниты регулярной структуры и измерительных периодов;
 - электрические соединения магнитов внутри криостата (включая потенциальные концы и РМГ);
 - 12 токовводов на 6 кА (исключая систему сбора и измерения потоков гелия из токовводов);
 - 234 токоввода на 100 А.
- 2) Криогенная гелиевая система включает в себя (Рис. 5.1.2):
- криостаты ввода и вывода гелия и азота из полуколец;
 - токовводные криостаты;
 - переохладители;
 - гелиевые коллекторы полуколец и измерительных периодов;
 - гелиевые охлаждающие каналы магнитов, линз регулярной структуры неструктурных элементов;
 - охлаждающие каналы СП кабелей электрической связи и токовводов;
 - «холодную» запорно-регулирующую арматуру;
 - датчики температуры (включая схему соединения), давления, паросодержания и КИП.
- 3) Азотная система тепловых экранов включает в себя (Рис. 5.1.2):
- азотные экраны полуколец;
 - сифоны подачи и вывода азота из полуколец;
 - «холодную» запорную и регулируемую арматуру;
 - датчики температуры азотного экрана.
- 4) Вакуумная изоляционная система включает в себя:
- вакуумные кожуха полуколец;
 - форвакуумные насосы (АВЗ-125Д, АВЗ-20Д, Вн6, Вн7);
 - Бустерные паромасляные насосы (НВБМ-2,5, НВБМ-0,5, Бн-3);
 - агрегаты высоковакуумные паромасляные (АВП-250/630);
 - течеискатели (ТИ-14, ПТИ-10);
 - оборудование обвязки вакуумных насосов, агрегатов и течеискателей (арматура, азотные адсорберы, трубопроводы и т.д.);
 - электрощиты управления (с блокировками) вакуумных насосов, электрических затворов и клапанов;
 - датчики давления и КИП.
- 5) Высоковакуумная система камеры включает в себя:
- кольцевую высоковакуумную камеру;
 - шиберы и затворы, разделяющие камеру на участки;

- посты предварительной откачки камеры, содержащие форвакуумные и молекулярные насосы, азотные ловушки, вакуумную арматуру, датчики давления и КИП.;
 - магниторазрядные насосы;
- б) Газовая предохранительная система кольца включает в себя:
- предохранительные клапаны-«присоски» на вакуумных кожухах полуколец;
 - предохранительные клапаны на гелиевых коллекторах полуколец и сифонах подачи жидкого гелия в полукольца (исключая трубопроводы для сбора гелия после клапанов).



130.00.0000 СХ		Лист	Масштаб
СХЕМА ТЕХНОЛОГИЧЕСКОГО ХОЛОДЯЩИХ СИСТЕМ КОЛЬЦА НУКЛОТРОНА		Лист	Листов 11
Исполн.	Провер.	Инж.	Листов
Утверд.	Согласов.	Инж.	Листов
Дата	Дата	Инж.	Листов

Корректор А.З. Формат А2

Рис. 5.1.2. Схема криогенной системы Нуклотрона

5.1.3 Оптическая структура, динамика пучка, система коррекции

Нуклотрон, сверхпроводящий синхротрон ЛФВЭ ОИЯИ [5.1], создан и развивается для обеспечения программы релятивистской ядерной физики, спиновой физики с поляризованными дейтронами. В тоже время пучки Нуклотрона используются в области радиобиологии и прикладных исследований. На Нуклотроне проводятся эксперименты для фиксированной мишени на выведенных пучках и эксперименты для внутренней мишени на циркулирующих пучках. Модернизированная криогенная система Нуклотрона, оптимизированные условия охлаждения магнитов, улучшенная система защиты сверхпроводимости позволили увеличить энергию ускоренных частиц. Нуклотрон ускоряет ионы практически до максимальной расчётной энергии 6 ГэВ/н, соответствующей максимальному полю дипольных магнитов 2 Тл.

Структура Нуклотрона включает 8 суперпериодов [5.2]. Суперпериод состоит из 3-х регулярных периодов типа FODO с дипольными магнитами и 1-ого периода с длинными прямолинейными промежутками для размещения элементов ввода-вывода, ВЧ ускоряющих станций, оборудования для проведения экспериментов с внутренними мишенями. Короткие промежутки между дипольными и квадрупольными магнитами используются для размещения элементов диагностики положения замкнутой орбиты (пикап-электроды) и мультипольных корректоров систем коррекций магнитного поля. Рис. 5.1.3. В Таблице 5.1.1 приведены основные характеристики Нуклотрона. В частности, приведены динамические параметры, соответствующие двум настройкам структуры Нуклотрона, текущей и номинальной. Для них на Рис. 5.1.4 и Рис. 5.1.5 показаны амплитудные и дисперсионная функции для одного суперпериода кольца.

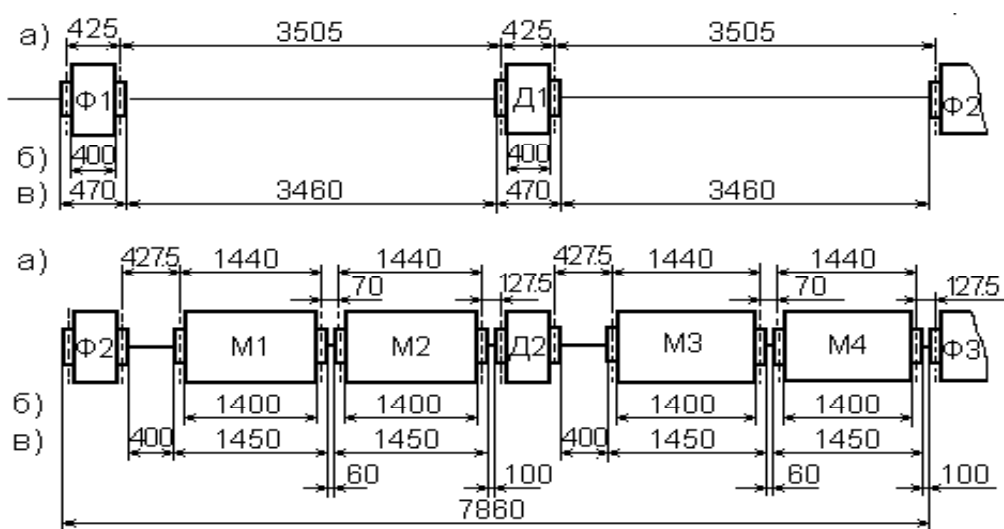


Рис. 5.1.3. Схема двух типов периодов FODO Нуклотрона: с длинными прямолинейными промежутками без дипольных магнитов и с дипольными магнитами

Таблица 5.1.1. Основные параметры Нуклотрона

Периметр, м	251,52	
Энергия инжекции, МэВ/н	5,0	
Максимальная энергия, ГэВ/н	6,0	
Количество суперпериодов	8	
Количество периодов FODO	32	
Количество дипольных /квадрупольных магнитов	96/32	
Дипольное поле при инжекции/максимальное, Тл	0,03/2,0	
Скорость роста поля, Тл/с	1,0	
Градиент квадрупольных линз при инжекции/максимальный, Тл/м	0,5/32	
Частоты бетатронных колебаний, гориз./верт.	6,8/6,85	7,36/7,43
Хроматичность горизонтальная/вертикальная	-7,7/-7,8	-8,8/-9,0
Фактор уплотнения орбит	0,0135	0,0021
Критическая энергия, ГэВ/н	7,1	19,3
Максимальное значение β -функции, горизонтальное/вертикальное, м	12,4/12,8	12,5/13,4
Макс. значение дисперсионной. функции D_x , м	2,8	3,9
Акцептанс горизонтальный/вертикальный, π мм·мрад	40/45	
Диапазон изменения ВЧ напряжения, МГц	0,6 ÷ 6,9	
Амплитуда ВЧ напряжения, кВ	8,0	
Гармоника ускоряющей частоты	5	
Средний вакуум, нТорр	1,0	

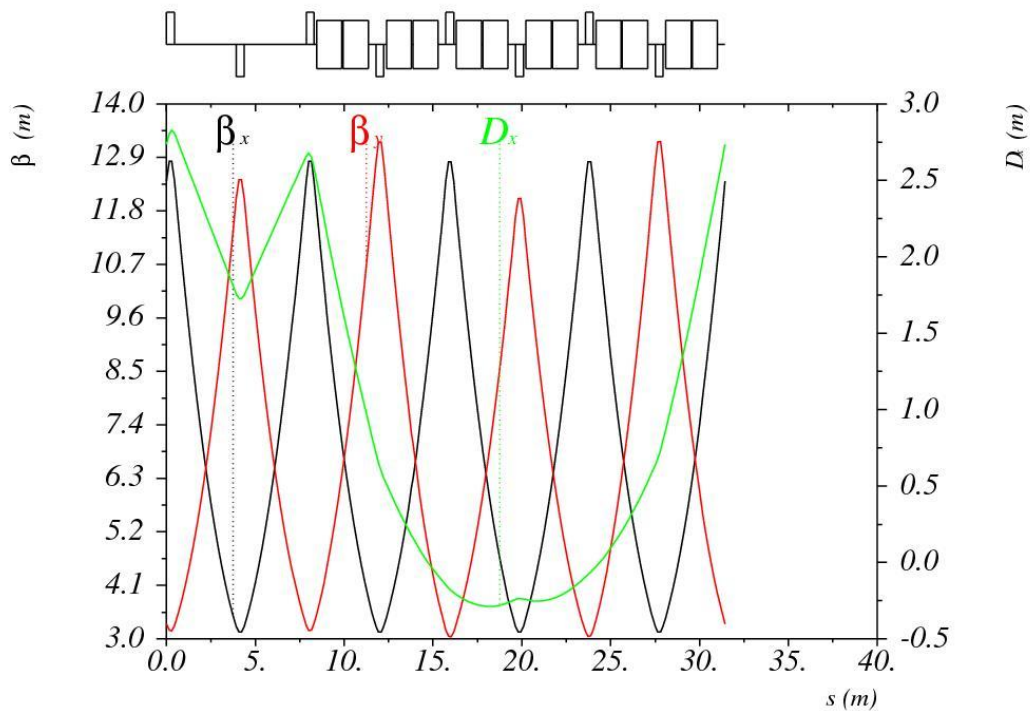


Рис. 5.1.4. Амплитудные функции Твисса β_x, β_y , дисперсионная функция D_x суперпериода Нуклотрона для частот бетатронных колебаний всего кольца $Q_x = 6,80, Q_y = 6,85$ и импульсного разброса $\Delta p/p = 0,0$

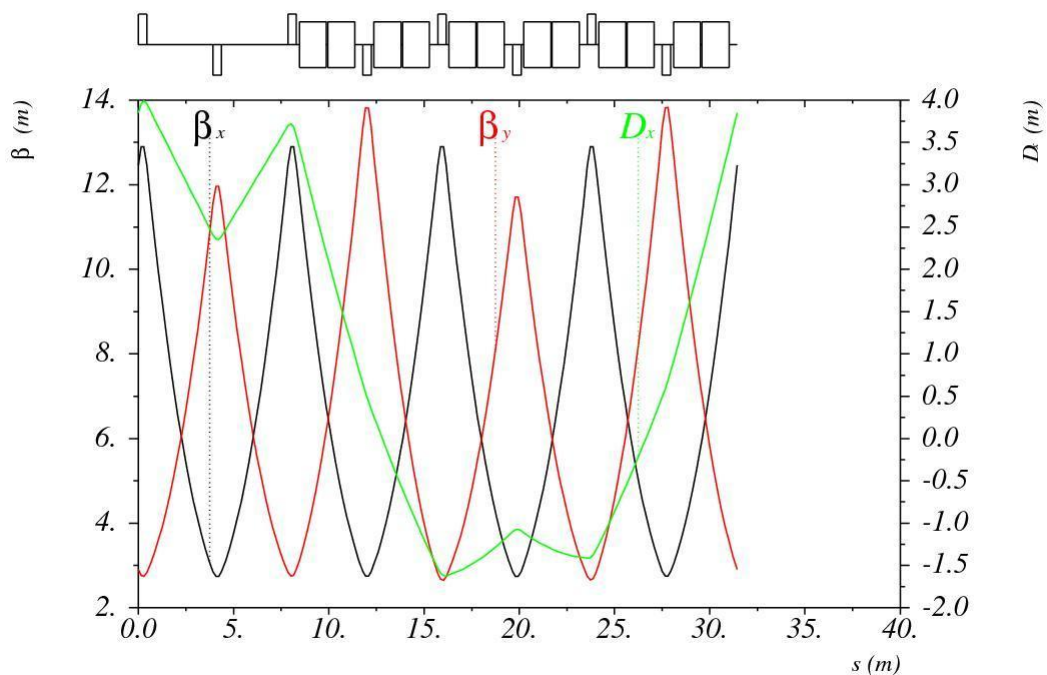


Рис. 5.1.5. Амплитудные функции Твисса $\beta_{x,y}$, дисперсионная функция D_x суперпериода Нуклотрона для частот бетатронных колебаний кольца $Q_x = 7,36$, $Q_y = 7,43$ и импульсного разброса $\Delta p/p = 0,0$

Система диагностики пучка содержит 20 электростатических пикап-электродов для определения центра тяжести пучка вдоль кольца ускорителя, систему измерения интенсивности пучка, систему измерения бетатронных частот.

Система коррекции Нуклотрона состоит из 30-и сверхпроводящих мультипольных корректоров [5.3]. Каждый корректор содержит 2-е обмотки (нормальный и косой диполь) для коррекции горизонтальной и вертикальной замкнутой орбиты, а также обмотки квадрупольного, секступольного и октупольного типа (нормальные и косые). Корректоры системы коррекции замкнутой орбиты расположены равномерно по кольцу и должны обеспечить компенсацию искажений орбиты до приемлемых величин при использовании различных алгоритмов коррекции (наименьших квадратов, гармонический, SVD, beam-bump) в статическом или динамическом режимах до максимального тока питания обмотки 100 А. Система коррекции хроматичности содержит 2-а семейства корректоров (обмоток) в каждом суперпериоде. Система октупольной коррекции также использует 2-а семейства для компенсации амплитудно-частотной зависимости в пучке, вносимой системой коррекции хроматичности. Система коррекции резонансов бетатронных колебаний позволяет корректировать ширины резонансов до 4-ого порядка независимо или одновременно для суммовых и разностных резонансов 3, 4 порядка (Рис. 5.1.6). При этом используются соответствующие комбинации квадрупольных, секступольных, октупольных обмоток (нормальных или косых). На Рис. 5.1.7 приведена схема кольца Нуклотрона, где указано

размещение структурных элементов кольца, а также дополнительного оборудования, в частности, элементов системы коррекции и диагностики.

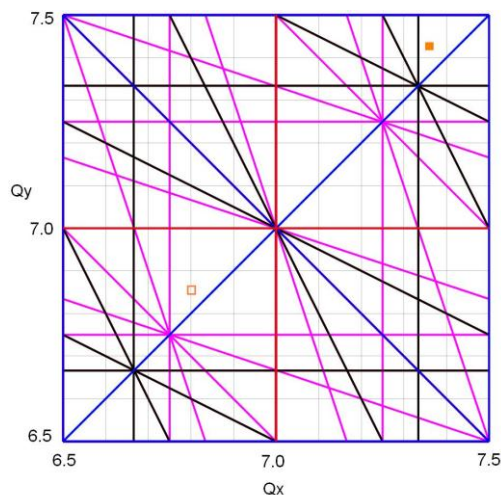


Рис. 5.1.6. Диаграмма бетатронных резонансов Нуклотрона: 1 порядка, 2 порядка, 3 порядка, 4 порядка. Указаны текущая $Q_{x,y} = 7,36/7,43$ и номинальная $Q_{x,y} = 6,80/6,85$ рабочие точки ускорителя

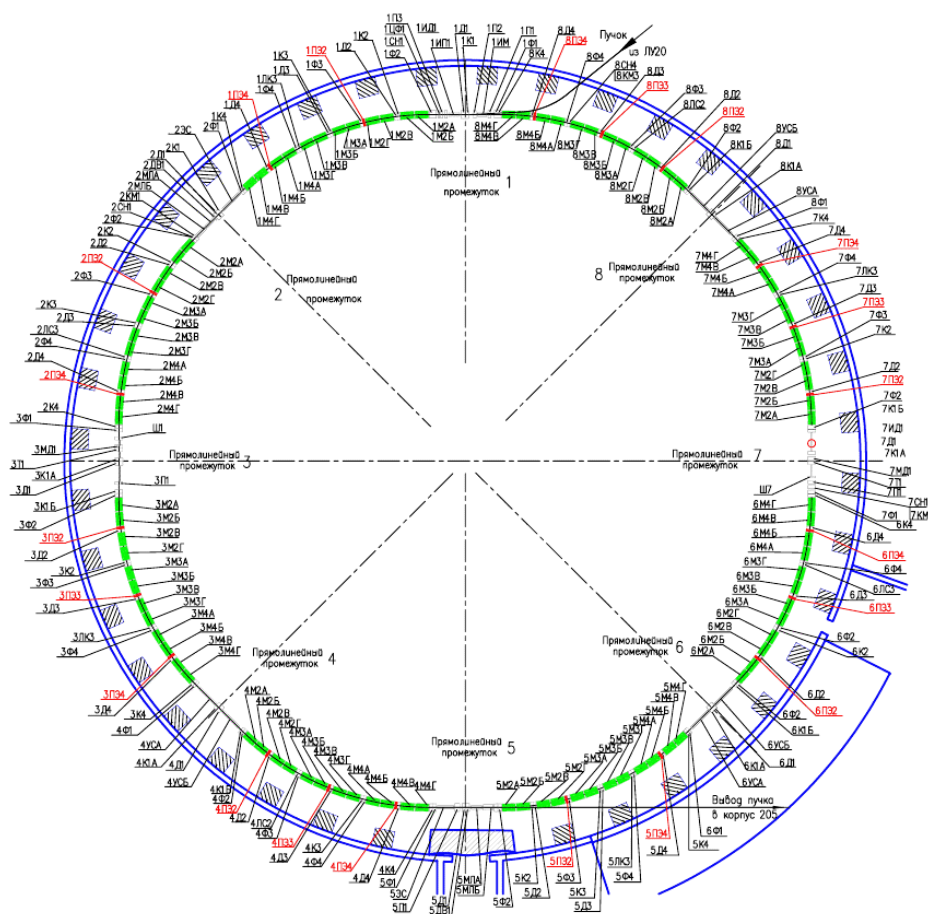


Рис. 5.1.7. Схема кольца Нуклотрона. Указаны структурные элементы: дипольные магниты (М), квадрупольные линзы (Ф, Д), а также дополнительное оборудование: ускоряющие станции (УС), элементы ввода (ИМ, ИП), вывода (ЭС, МЛ, линзы ЛК, ЛС) мультипольные корректоры (К), пикап-электроды (П) и др

Параметры пучков Нуклотрона. Нуклотрон предоставляет широкий спектр ускоренных пучков, от протонов, дейтронов до лёгких и тяжёлых ионов [5.4]. В частности, модернизированные системы Нуклотрона, обеспечивают ускорение дейтронов и ядер углерода до максимальной энергии, соответствующей практически достижимому полю дипольных магнитов 2 Тл. В настоящее время пучки дейтронов, лития, углерода и аргона используются в физических экспериментах. Увеличение интенсивности ускоренных пучков и расширение спектра используемых ионов связано с разработкой и созданием новых источников ионов: SPI (Source of Polarized Ions), LIS (Laser Ion Source), KRION-6T (ионный источник типа электронной струны) [5.5]. Лазерный источник и источник KRION-6T уже используются в ускорительной программе Нуклотрона. Ускоренные пучки предназначены как для экспериментов с внутренней мишенью, так и для внешних экспериментов, для которых осуществляется медленный резонансный вывод в диапазоне от 60 мс до 20 с [5.6].

Таблица 5.1.2. Параметры пучков Нуклотрона

Параметр	Проектное значение		Достигнутое значение	
Магнитное поле, Тл	2,0		2,0	
Скорость роста поля, Тл/с	1,0		0,8	
Период повторения, с	5,0		8,0	
	Энергия, ГэВ/н	Ионов/цикл	Энергия, ГэВ/н	Ионов/цикл
d, лёгкие ионы	6,0	$5 \cdot 10^{10}$	5,6	$1 \cdot 10^{10}$
Тяжёлые ионы	Источник KRION-6T и Бустер		Без источника KRION-6T	
$^{40}\text{Ar}^{18+}$	4,9	$2 \cdot 10^{10}$	3,5	$5 \cdot 10^6$
$^{56}\text{Fe}^{26+}$	5,4	$1 \cdot 10^{10}$	2,5	$2 \cdot 10^6$
$^{124}\text{Xe}^{48/42+}$	4,0	$2 \cdot 10^9$	1,5	$1 \cdot 10^3$
$^{197}\text{Au}^{79+}$	4,5	$2 \cdot 10^9$	–	–
Поляризованные пучки	SPI и Сибирская змейка		Источник POLARIS	
$p \uparrow$	11,9	$1 \cdot 10^{10}$	–	–
$d \uparrow$	5,6	$1 \cdot 10^{10}$	2,0	$5 \cdot 10^8$

5.1.4 Проект Нуклотрон-М

В 2007 г. в ОИЯИ начаты работы по модернизации синхротрона Нуклотрон, который является основным элементом инжекционной цепочки Коллайдера, работающего в режиме накопителя. Фактически, Нуклотрон должен обеспечивать ускорение пучков ионов до энергии эксперимента. Для ускорения ядер тяжелых элементов до максимальной энергии Нуклотрон планируется использовать в качестве конечного каскада в инжекционной цепочке, включающей в себя новый линейный ускоритель и Бустерный синхротрон (Бустер). В задачу Бустера входит накопление ионов при инжекции и ускорение их до энергии, необходимой для их эффективной перезарядки. В Нуклотроне осуществляется ускорение одиночного сгустка полностью ободранных ионов с интенсивность уровня 10^9 частиц от энергии примерно 600 МэВ/н до энергии эксперимента (от 1 до примерно 4,5 ГэВ/н).

В рамках проекта Нуклотрон-М [5.7], [5.8] осуществлена модернизация основных систем Нуклотрона:

- вакуумной системы,
- систем электропитания и защиты структурных магнитов,
- ускоряющей ВЧ-системы,
- систем управления и диагностики.

Для работы Нуклотрона в составе инжекционной цепочки Коллайдера NICA требуется дополнительно создать

- систему инжекции пучка частиц, ускоренных в Бустере,
- устройства быстрого вывода,
- устройства управления частотой прецессии спина частиц.
- модернизировать ВЧ систему для её синхронной работы с ВЧ системами Бустера и Коллайдера;
- требуется увеличить мощность основного источника тока, питающего структурные магниты и линзы, что необходимо для обеспечения роста магнитного поля 1 Тл/с.

При экспериментах на поляризованных пучках в качестве инжектора планируется использовать существующий линейный ускоритель ЛУ-20, из которого пучок инжектируется непосредственно в Нуклотрон и ускоряется до конечной энергии (от 5 до 12,6 ГэВ для поляризованных протонов). Для получения требуемой светимости столкновений интенсивность пучка должна составлять $10^{10} \div 10^{11}$ частиц за импульс. Использование Бустера для ускорения поляризованных пучков менее целесообразно, так как он имеет меньшую суперпериодичность, чем Нуклотрон, и, следовательно, более частую сетку спиновых резонансов.

Модернизация синхротрона Нуклотрон и является ключевой частью первой стадии реализации проекта NICA. Она имеет целью продемонстрировать возможность его длительной и надёжной работы при параметрах, близких к требованиям проекта NICA.

Для успешной реализации проекта NICA необходимо обеспечить длительную (около 5000 ч/г) надёжную работу ускорительного комплекса Нуклотрон, ускорение интенсивного пучка ионов с минимальными потерями до энергии, соответствующей полю дипольных магнитов 2 Тл.

Структурно проект Нуклотрон-М разбит на 10 подпроектов, соответствующих основным системам ускорительного комплекса:

- Совершенствование источников высоко-зарядных тяжелых ионов по технологии «КРИОН», создание нового источника «КРИОН-6Тс»;

- Улучшение вакуума в кольце Нуклотрона до уровня 10^{-9} Торр;
- Доведение параметров системы питания, защит и эвакуации энергии для получения магнитного поля до 2 Тл при скорости нарастания до 1 Тл/с;
- Модернизация аппаратуры ВЧ системы;
- Улучшение системы медленного резонансного вывода пучка до уровня, позволяющего обеспечить вывод тяжёлых многозарядных ионов с энергией 5 ГэВ/н;
- Модернизация каналов транспортировки пучков и их радиационной защиты, что позволит транспортировать пучки тяжёлых ионов;
- Совершенствование АСУ, создание современной и работоспособной системы диагностики и контроля параметров пучков;
- Повышение экономичности и надёжности системы криогенного обеспечения;
- Последовательная модернизация комплекса инжектора (предускоритель и линак) для ускорения тяжелых ионов с отношением заряда к массе меньше 0,33;
- Разработка и создание нового высокоинтенсивного источника поляризованных дейтронов.

Комплекс работ, которые необходимо выполнить на ускорителе для его успешной эксплуатации в составе комплекса NICA включает в себя (кроме перечисленного выше):

- модернизацию существующих, разработку и создание новой ВЧ станции,
- развитие диагностики, минимизацию потерь на всех стадиях ускорения,
- разработку и создание канала транспортировки пучка из Бустера в Нуклотрон, станции обдирки, системы сепарации и поглотитель пучка нецелевой зарядности,
- создание новой системы инжекции из Бустера на энергии примерно 600 МэВ/н,
- создание устройств по управлению спиновой частотой для ускорения поляризованного пучка протонов,
- создание систем быстрого и медленного вывода на энергии тяжелых ионов до 4,5 ГэВ/н.

В соответствии с перечисленными целями, основные усилия при выполнении проекта концентрируются на решении следующих задач:

- Обеспечение стабильной работы комплекса

Для решения этой задачи в 2008 г. проведена комплексная модернизация установки КГУ-1600/4,5 с расчётом на дальнейшее увеличение производительности, проводится поэтапное развитие инфраструктуры лаборатории, проводится модернизация системы защиты структурных магнитов Нуклотрона.

- Достижение проектной величины магнитного поля

Кроме модернизации системы защиты структурных магнитов, решение этой задачи связано с модификацией схемы электропитания магнитной системы Нуклотрона. Новая схема основана на последовательном включении дипольных и квадрупольных магнитов, что позволит эксплуатировать источники питания в номинальном режиме.

- Минимизация потерь частиц на всех стадиях ускорения

Потери частиц вызваны двумя основными причинами: несовершенством динамики частиц в процессе инжекции и ускорения, и рассеянием на остаточном газе. Дополнительным источником потерь могут быть поперечные колебания пучка, связанные с несогласованной инжекцией.

5.2 МАГНИТНАЯ СИСТЕМА

Лаборатория физики высоких энергий им. В.И. Векслера и А.М. Балдина является пионером в разработке, изготовлении и эксплуатации синхротрона, базирующегося на сверхпроводящих магнитах с полем, формируемым железным ярмом. Ускоритель Нуклотрон был построен в течение 5 лет и запущен в эксплуатацию в 1993 г. Основное оборудование его магнитной системы и многих других систем было изготовлено в экспериментальных мастерских ОИЯИ и ЛВЭ без привлечения промышленности.

Структура Нуклотрона насчитывает 8 суперпериодов. Каждый суперпериод состоит из трёх регулярных FODO периодов, четвёртый период не имеет дипольных магнитов. Регулярный период состоит из фокусирующего F и дефокусирующего D квадрупольного магнита, четырёх дипольных магнитов и двух малых прямолинейных промежутков для размещения корректирующих магнитов, датчиков положения пучка и др. Всего в кольце Нуклотрона периметром 251,5 м находятся 96 дипольных, 64 квадрупольных и 32 мультипольных корректирующих сверхпроводящих магнита.

Для Нуклотрона был предложен и разработан новый тип сверхпроводящих магнитов. Основные преимущества магнитной системы Нуклотрона следующие:

- быстроциклирующие (вплоть до 1 Гц) магниты с полем, формируемом «холодным» ярмом типа «оконная рама», и сверхпроводящей обмоткой из трубчатого сверхпроводника;
- двухфазный (кипящий) гелий в качестве криогента;
- низкие капитальные и эксплуатационные расходы, удобство в обслуживании, высокая надёжность и безопасность.

Поперечное сечение дипольного и квадрупольного магнитов Нуклотрона приведено на Рис. 5.2.1. Основные параметры магнитов указаны в Таблице 5.2.1. Железное ярмо дипольного магнита состоит из двух, а квадрупольного магнита из четырёх симметричных частей, соединённых с помощью болтов. Части ярма изготавливаются из листов трансформаторной стали толщиной 0,5 мм.

Набор из листов стали сжимается с усилием 50 кН и соединяется вместе с помощью сварки с уголками и торцевыми накладками.

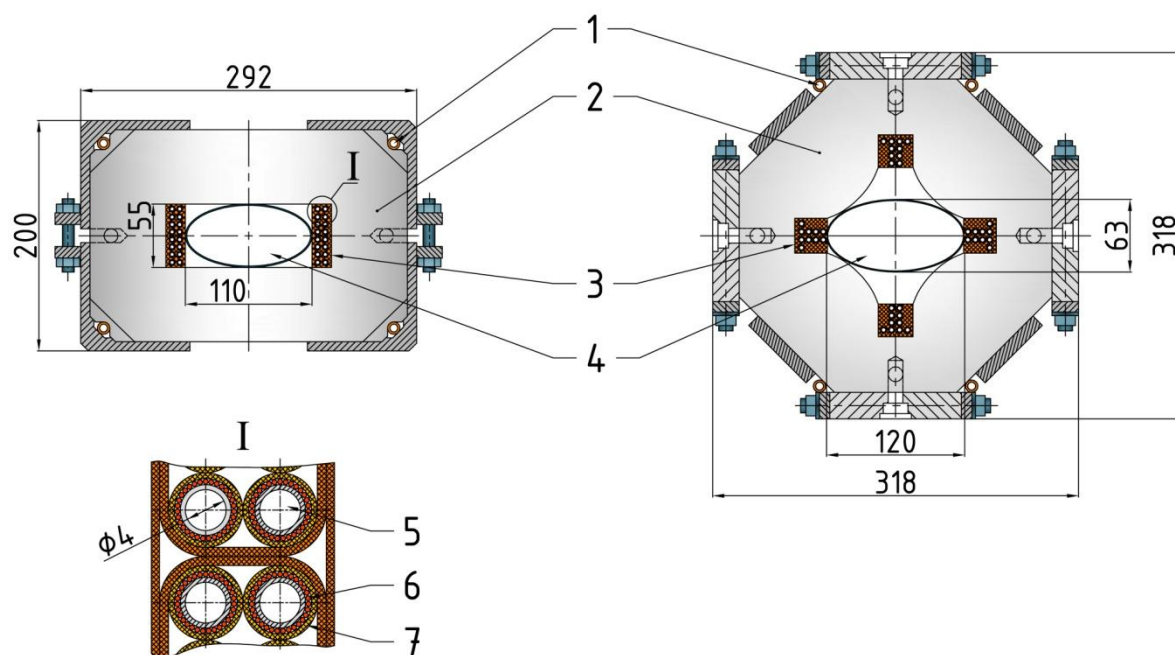


Рис. 5.2.1. Поперечное сечение дипольного (слева) и квадрупольного (справа) магнитов: 1 — трубка для охлаждения ярма; 2 — железное ярмо; 3 — сверхпроводящая обмотка; 4 — пучковая камера; 5 — двухфазный гелий; 6 — мельхиоровая трубка; 7 — сверхпроводящий провод

Таблица 5.2.1. Основные характеристики магнитов Нуклотрона

Параметр	Диполь	Квадруполь
Число элементов	96	64
Масса, кг	500	200
Апертура (гориз./верт.), мм/мм	110/55	120/63
Длина ярма, мм	1370	430
Физическая длина, мм	1462	450
Число витков в обмотке	2 × 8	4 × 5
Длина кабеля в обмотке, м	62	24
Поле при номинальном токе 6 кА, Тл	1,98	—
Градиент поля при токе 5,6 кА, Тл/м	—	33,4
Запасённая энергия, кДж	19,8	6,9
Динамические тепловыделения, Вт:		
при $dB/dt = 2$ Тл/с, $B_m = 2$ Тл, $f = 0,5$ Гц	21	12
при $dB/dt = 4$ Тл/с, $B_m = 2$ Тл, $f = 1,0$ Гц	53	21

Медная трубка для охлаждения ярма припаяна к уголку. Апертура полу ярма изготовлена с точностью $\pm 0,02$ мм, а его длина с точностью $\pm 0,1$ мм. Высокая точность сборки ярма обеспечена 8 штифтами, расположенными на обоих его торцах.

Кабель обмотки содержит мельхиоровую трубку диаметром 5 мм, поверхность которой покрыта эпоксидным компаундом и обвита 31 сверхпроводящим проводом диаметром 0,5 мм. Для обеспечения хорошего теплового контакта проводов с трубкой поверх проводов спирально с шагом 0,4 мм и с усилием натяжения 10 Н навита проволока из нихрома толщиной 0,2 мм. Электрическая

изоляция кабеля состоит из двух слоёв полиимидной плёнки толщиной 0,04 мм и двух слоёв стеклотенты, пропитанной эпоксидным компаундом. Седлообразная обмотка изготавливается из двух половин с помощью приспособления для намотки и подвергается термической обработке в печи для полимеризации эпоксидного компаунда. Кабель изображён на Рис. 5.2.2, его основные параметры приведены в Таблице 5.4.2.

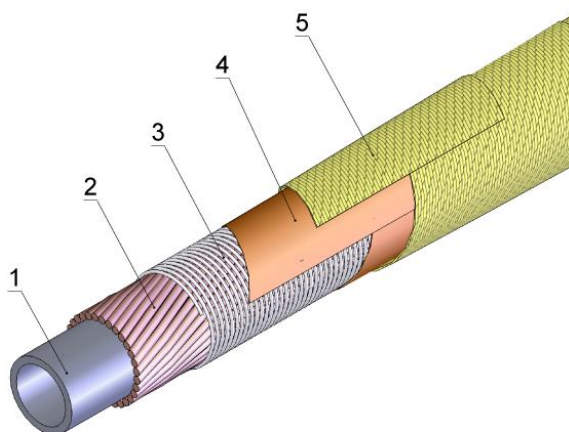


Рис. 5.2.2. Кабель Нуклотрона: 1 — мельхиоровая трубка; 2 — сверхпроводящий провод; 3 — бандажная проволока; 4 — полиимидная плёнка; 5 — стеклотента, пропитанная эпоксидным компаундом

Таблица 5.2.2. Основные параметры сверхпроводящего кабеля

Параметр	Ед.	Значение
Тип кабеля	трубчатый	
Число СП проводов	шт.	31
Диаметр провода	мм	0,5
Сверхпроводник	NbTi	50 %/50 %
Диаметр СП нити	мкм	10
Число нитей в проводе		1045
Шаг скрутки:		
– нитей	мм	4,5
– проводов	мм	47
Мельхиоровая трубка:		
– наружный диаметр	мм	5,0
– внутренний диаметр	мм	4,0
Минимальный критический ток	А	7500

Кольцо ускорителя состоит из двух криостатов полуколец. Криостат полукольца собран из магнитно-криостатных модулей (Рис. 5.2.3). Магнит закреплён внутри вакуумного кожуха криостата диаметром 540 мм с помощью 8 стержней (9) из нержавеющей стали. Тепловой экран (14) диаметром 490 мм обернут 20 слоями супер-изоляции, расположен между магнитом и вакуумным кожухом (8) и охлаждается потоком кипящего азота в трубах (7). Имеется три типа магнитно-криостатных модулей: с дипольным магнитом, с фокусирующим и дефокусирующим квадрупольным магнитом. Перед установкой в кольцо ускорителя каждый модуль проходит комплексные испытания на стенде при рабочих условиях. При установке в кольцо ускорителя

соединяются следующие элементы соседних модулей: гелиевые коллекторы (2), трубы с жидким азотом (7), пучковая камера (4) и разборный кожух (5).

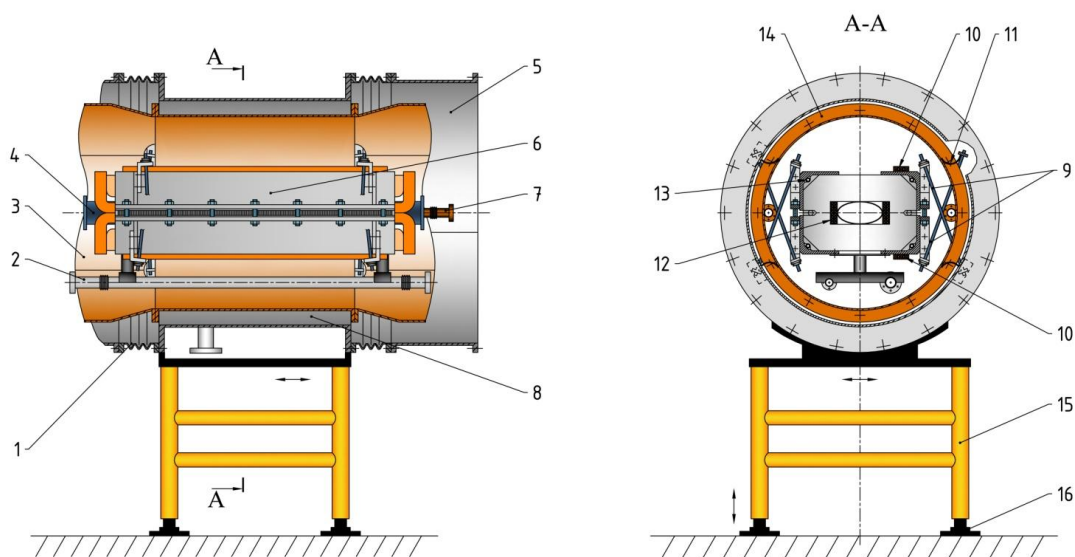


Рис. 5.2.3. Магнитно-криостатный модуль Нуклотрона: 1 — сильфонный компенсатор; 2 — гелиевые коллекторы; 3 — разборный тепловой экран; 4 — пучковая камера; 5 — разборный кожух; 6 — железное ярмо; 7 — труба для жидкого азота; 8 — вакуумный кожух; 9 — стержни подвески; 10 — СП кабели связи; 11 — тепловой мост; 12 — обмотка; 13 — трубка для охлаждения ярма; 14 — тепловой экран; 15 — подставка; 16 — домкрат

Все магниты ускорителя соединены в три группы электрических цепей: М, MR — дипольные магниты; F и D — фокусирующие и дефокусирующие квадрупольные магниты (Рис. 5.2.4). Для электрического питания цепи дипольных магнитов используется 4 пары тоководов на 6 кА, а для питания цепей квадрупольных магнитов F и D используется по 1 паре тоководов на 6 кА.

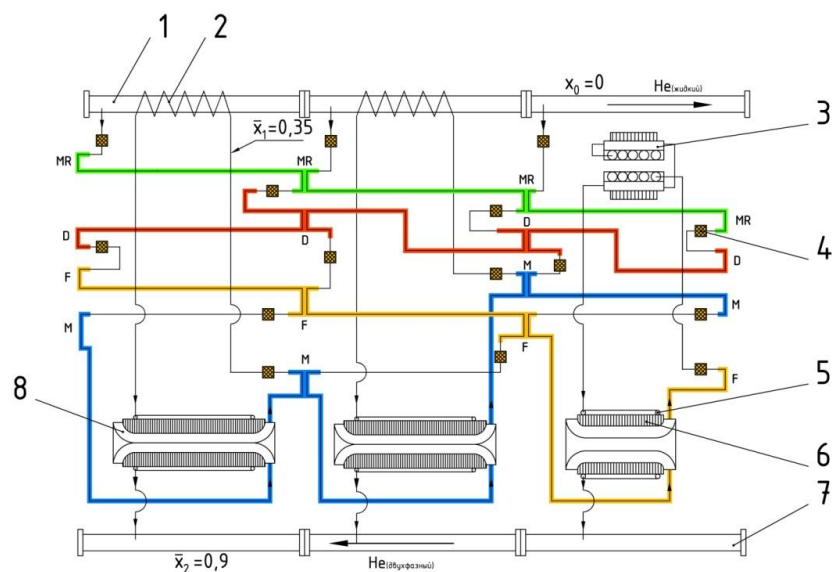


Рис. 5.2.4. Схема электрических и гелиевых соединений магнитно-криостатных модулей: 1 — питающий коллектор; 2 — дополнительный переохладитель; 3 — мультипольный корректор; 4 — проходной изолятор; 5 — трубка для охлаждения ярма; 6 — квадрупольный магнит; 7 — обратный коллектор; 8 — обмотка дипольного магнита; MR, F и D — кабели электрической связи дипольных, фокусирующих и дефокусирующих магнитов; x — массовое содержание пара в потоке гелия

Кроме собственной электрической цепи магнита каждый модуль содержит транзитные кабели электрической связи магнитов двух других групп. Для электрического соединения соседних модулей необходимо выполнить четыре спая сверхпроводящих кабелей в каждом промежутке между магнитами. Все гелиевые каналы модуля подсоединены к питающему и отводящему коллектору этого модуля и проверяются на вакуумную плотность на стенде. Такая технология сборки модулей с высокой вероятностью исключает гелиевые течи в изоляционный объем криостата.

5.3 СИСТЕМЫ ПИТАНИЯ, ЗАЩИТЫ И ЭВАКУАЦИИ ЭНЕРГИИ

5.3.1 Техническое описание системы электропитания

За основу при построении системы питания Нуклотрона-М принято последовательное соединение структурных дипольных магнитов (суммарная индуктивность 100 мГн), квадрупольных фокусирующих (суммарная индуктивность 10 мГн) и дефокусирующих (суммарная индуктивность 10 мГн) линз Нуклотрона. Основной мощный источник системы питания формирует требуемый ток (до 6000 А) с заданной скоростью роста поля (1 Тл/с) в общей цепи. Для гибкого выбора рабочей точки ускорителя предназначены два дополнительных существенно меньшей мощности источника питания: один позволяет одновременно изменять градиент поля в фокусирующих и дефокусирующих линзах, другой только в дефокусирующих. Структурная схема системы питания изображена на Рис. 5.3.1.

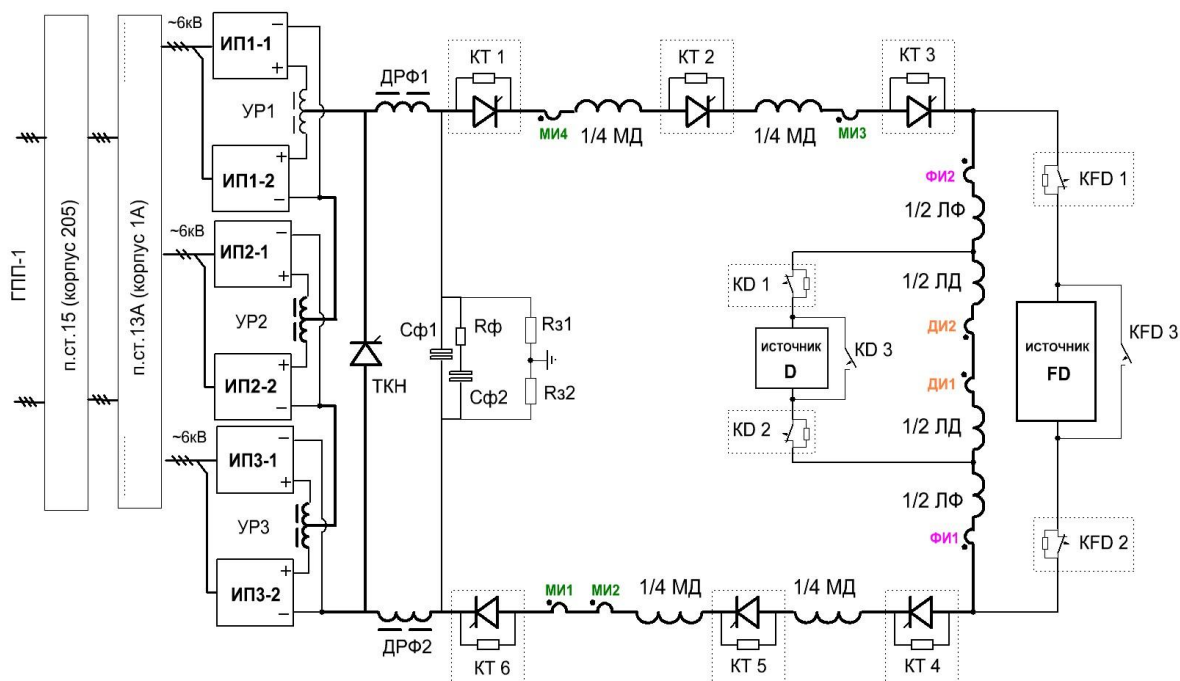


Рис. 5.3.1. Структурная схема системы питания Нуклотрона-М

Мощный источник питания состоит из последовательно включённых тиристорных выпрямителей ИП1...3 запитанными от высоковольтной сети 6 кВ. Основой силовой части ИП1-1, 2, ИП2-1, 2 и ИП3-1, 2 является доработанный 6-ти фазный выпрямитель типа ТПВ-3150/230 с номинальными параметрами 150 В × 3150 А. Анодные трансформаторы выпрямителей выполнены по схеме «зигзаг», причём в ИП1-1, ИП2-1 и ИП3-1 анодные напряжения смещены на «+15 эл. гр.», а в ИП1-2, ИП2-2 и ИП3-2 на «-15 эл. гр.». Совместно ИП1...3 образуют 12-ти фазный регулируемый тиристорный выпрямитель с номинальными выходными параметрами 450 В × 6300 А, что позволяет получить скорость роста поля 1 Тл/с. На первом этапе проекта Нуклотрон-М источник состоит из ИП1, 2 (цеховые номера источников 19ТВ и 20ТВ) с номинальными выходными параметрами 300 В × 6300 А и позволяет обеспечить работу с ростом поля 0,6 Тл/с. На следующем этапе добавляется ИП3.

Элементы ДРФ1, ДРФ2, Сф1, Сф2, Rф составляют силовой фильтр источника. Резисторы Rз1 и Rз2 симметрируют выходное напряжение источника относительно «земли». Тиристорный ключ ТКН шунтирует источник питания при эвакуации энергии. Дополнительный источник токоотбора из линз FD с выходными параметрами 80 В × 600 А через ключи эвакуации энергии KFD1, 2 подключён к цепи последовательно соединённых линз. Аналогично подключается источник токодобавки в линзы D с выходными параметрами 70 В × 200 А через ключи KD1, 2 к цепи дефокусирующих линз. В измерительных магнитах МИ1...4, линзах ФИ1, 2 и ДИ1, 2 установлены индукционные датчики магнитного поля, сигнал с которых поступает в системы регулирования, управления и диагностики.

5.3.2 Система эвакуации энергии

Для эвакуации запасённой энергии из сверхпроводящих элементов в случае срыва сверхпроводимости применены ключи КТ1...6, соединённые последовательно с цепью магнитов и линз. Они управляются сигналом внешней системы детектирования появления нормальной фазы в сверхпроводнике. При возникновении сигнала ключ размыкается и накопленная в магните энергия рассеивается в резисторах гашения поля, включённых параллельно ключам. Постоянная времени вывода тока 160 мс обеспечивает эвакуацию энергии из СП магнита без его существенного нагрева. Последовательно соединённые дипольные магниты (4 цепи 1/4 МД) и квадрупольные линзы (цепь ЛД + ЛФ) через ключи эвакуации энергии (КЭЭ) КТ1...КТ6 (Рис. 5.3.1) подключены к источнику по симметричной схеме относительно питающего напряжения. Индуктивности групп магнитов и величины резисторов гашения выбраны таким образом, чтобы напряжение относительно потенциала «земли» на тоководах при эвакуации энергии не превышало 500 В как в штатном режиме (Рис. 5.3.1) так и при выходе из строя одного из ключей. Тиристорный ключ ТКН шунтирует источник питания при эвакуации энергии.

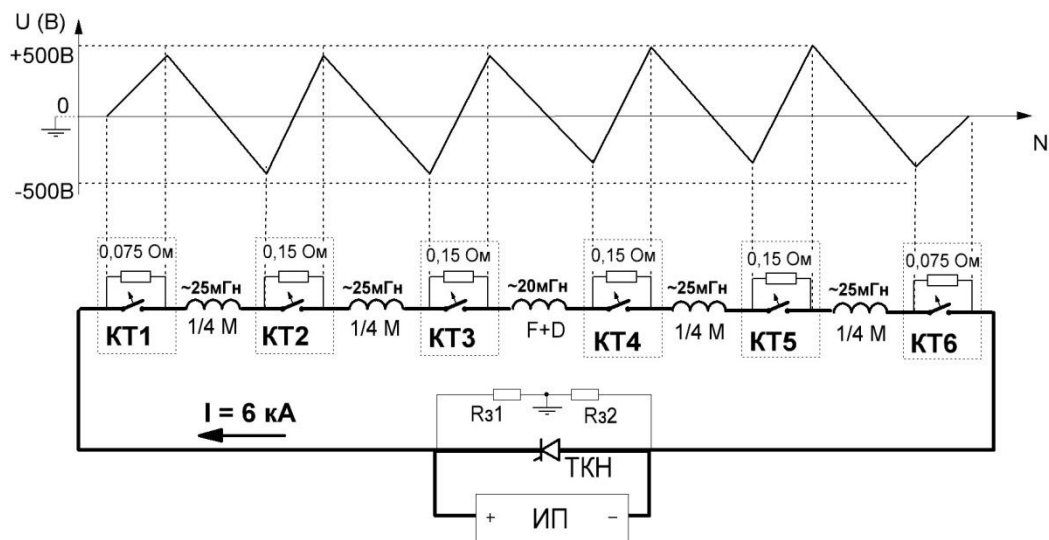
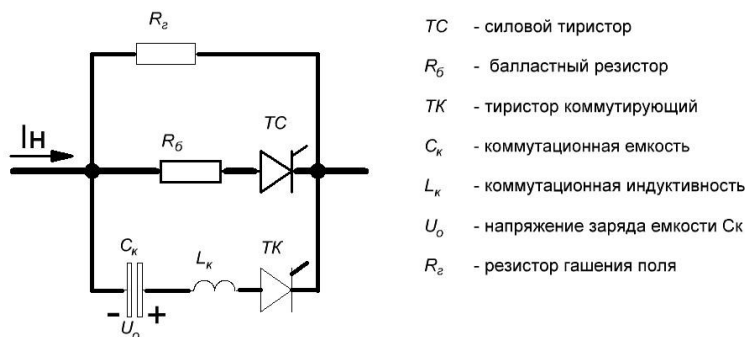


Рис. 5.3.2. Диаграмма распределения потенциала по магнитным элементам Нуклотрона относительно «земли» при эвакуации тока 6 кА

В системе эвакуации энергии из структурных магнитов Нуклотрона балластный резистор устанавливается снаружи криостата совместно с КЭЭ. В основе силового коммутатора КЭЭ лежит схемотехника бесконтактного тиристорно-конденсаторного ключа. Это силовое полупроводниковое устройство имеет большой коммутационный ресурс, что является важным фактором для быстроциклирующего ускорителя. Базовая схема КЭЭ изображена на Рис. 5.3.3.



- TC - силовой тиристор
- R_б - балластный резистор
- TK - тиристор коммутирующий
- C_к - коммутационная емкость
- L_к - коммутационная индуктивность
- U_о - напряжение заряда емкости C_к
- R_г - резистор гашения поля

Рис. 5.3.3. Схема ключа эвакуации энергии

Требования к КЭЭ:

1. ключ должен состоять из минимально возможного числа параллельно включённых тириستоров,
2. силовой полупроводниковый элемент должен выбираться с коэффициентом загрузки по току не более 0,8 и коэффициентом запаса по напряжению не менее 1,5,
3. в составе устройства должны использоваться приборы и компоненты длительного время выпускаемые промышленностью,
4. каждый силовой тиристор должен быть снабжён датчиком тока,

5. управление ключом должно быть независимым от других устройств.

Для КЭЭ Нуклотрона в качестве ТС и ТК был выбран силовой быстродействующий тиристор типа ТБ373-2000-20 с параметрами: среднее значение тока не более 2000 А, действующее значение тока не более 3200 А, время выключения не менее 80 мкс, максимальное рабочее напряжение не более 2000 В, допустимая производная тока не более 200 А/мкс, допустимая производная напряжения не более 500 В/мкс, защитный показатель не более 8000 (103А2с).

В качестве балластных резисторов R_6 были выбраны резисторы-шунты типа РКш173-0,0005 с номинальным сопротивлением 0,5 мОм и допустимой мощностью рассеивания 4 кВт. Основным достоинством РКш173 является практически полное отсутствие индуктивной составляющей, что позволяет эффективно измерять ток, как в статике, так и при процессах коммутации. Компактность и простота конструкции силовой сборки ТС- R_6 при использовании резисторов РКш173 приводит к меньшим издержкам при монтаже и эксплуатации. Для оптимизации процессов включения ТС и равномерного распределения тока между параллельно включёнными ветками произведён подбор пар ТС- R_6 . Итоговая принципиальная схема КЭЭ изображённая на Рис. 5.3.4.

Для повышения надёжности работы схемы вывода постоянного тока, текущего через цепи ТС1...ТС4, применены две параллельно включённые коммутационные цепи Ск1-Лк1-ТК1 и Ск2-Лк2-ТК2 (Рис. 5.3.4), каждая из которых самостоятельно способна обеспечить перехват тока из ТС.

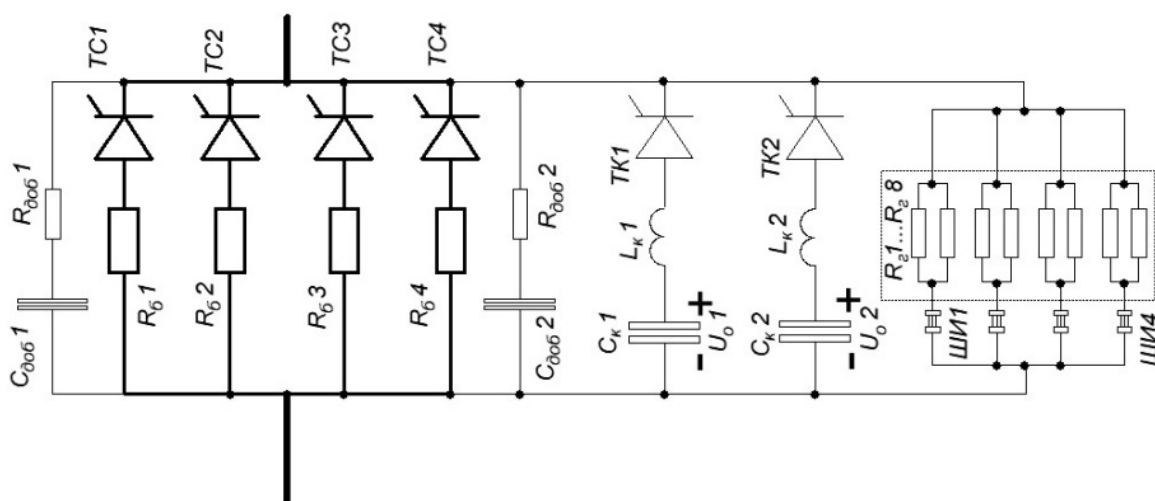


Рис. 5.3.4. Принципиальная силовая схема ключа эвакуации энергии

Параметры коммутационной цепи должны обеспечивать:

1. нормированный — без превышения предельных динамических параметров-вывод тока из силовых тиристоров ТС1...ТС4;
2. гарантированное время приложения запирающего напряжения к силовым тиристорам ТС1...ТС4;

3. режимы работы коммутационных тиристоров ТК1 и ТК2 без превышения паспортных данных.

Исходя из расчётов коммутационных процессов и предъявляемых требований для каждой коммутационной цепочки выбраны $L_k = 3 \text{ мкГн}$ и $C_k = 6 \text{ мФ}$ с предварительным зарядом не менее 250 В. Батарея C_k собрана из 30 параллельно включённых конденсаторов типа МБГВ-1000 В-200 мкФ. Индуктивность L_k это катушка из 2-х витков диаметром 200 мм провода типа КГ сечением 70 мм^2 . Цепь с такими параметрами обеспечивает перехват тока из ТС с приложением отрицательного напряжения к анод-катоду ТС в течении 160 мкс — интервал $t_{3п}$ на Рис. 5.3.5 а. При работе одновременно 2-х коммутационных цепей эффективность вывода повышается — интервал $t_{3п} = 360 \text{ мкс}$ на Рис. 5.3.5 б.

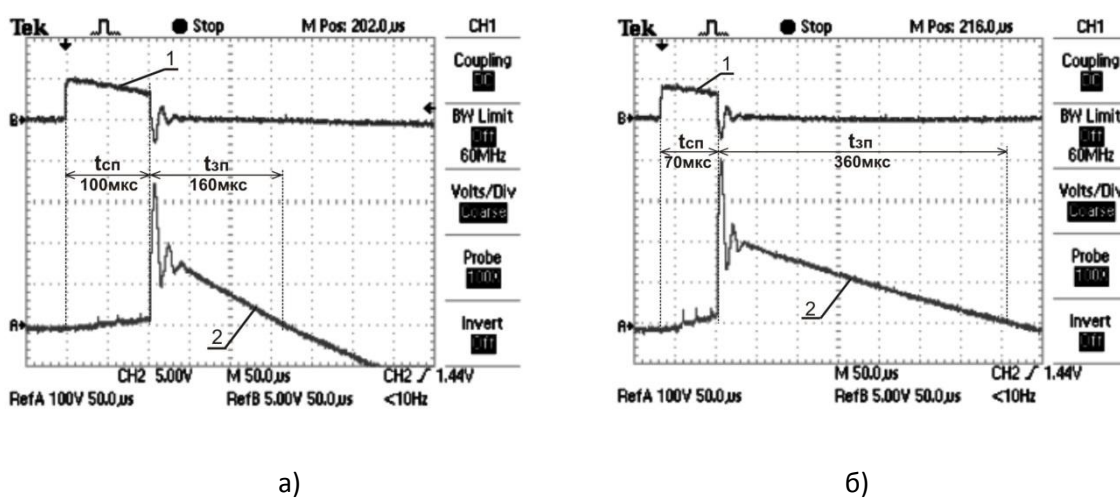


Рис. 5.3.5. Осциллограммы напряжения датчика производной тока ТК1 (луч 1) и инверсного напряжения анод-катод ТС (луч 2) при коммутации тока 6 кА: а) одной коммутационной цепью, б) двумя одновременно коммутационными цепями

Резисторы гашения поля R_g выбираются исходя из требований вывода тока из цепи сверхпроводящих магнитных элементов с постоянной времени равной 160 мс. Для ключей КТ1 и КТ6 (Рис. 5.3.1 и Рис. 5.3.2), это соответствует 0,075 Ом, для ключей КТ2...5 — 0,150 Ом. Все резисторы гашения поля собраны из блоков типа БУ2 с номинальным сопротивлением 0,58 Ом и током 102 А. Для ключей КТ1 и КТ6 параллельно соединяются 8 таких блоков с суммарным сопротивлением 0,073 Ом. Для ключей КТ2...5 параллельно соединяются 4 таких блока с общим сопротивлением 0,145 Ом. Импульсный ток, текущий через резисторы при эвакуации не превышает допустимые перегрузочные значения для данного типа.

Резистор гашения каждого ключа разбит на 4 группы. Последовательно с каждой группой включён токовый шунт ШИ (Рис. 5.3.3) типа ШИ750. Токовый сигнал с ШИ поступает в блок контроля процесса эвакуации который диагностирует целостность сопротивления R_g . Для снижения влияния индуктивности силовых соединительных цепей был выполнен монтаж с подключением ШИ непосредственно к точкам соединения балластных резисторов $R_{g1...8}$ с магистральным

винопроводом. В результате схема электронных узлов измерения тока R6 существенно упростилась.

При коммутации, в момент прекращения протекания тока через ТС, на анод-катоде образуется «шпилька» перенапряжения кратно превышающая рабочее напряжение. Для уменьшения этой «шпильки» в схему параллельно R6-ТС включены две снабберные цепочки из последовательно соединённых сопротивления Rдоб и конденсатора Cдоб (Рис. 5.3.3). Сопротивление Rдоб состоит из 3-х соединённых параллельно резисторов величиной 3 Ом типа ПЭВ-7,5. Конденсатор Cдоб — ёмкость 1 мкФ типа МБГЧ-1000 В. Электрически эти цепочки подключены к силовым шинам первой и последней по монтажу сборкам R6-ТС.

Для обеспечения надёжной работы КЭЭ в целом предназначены электронные блоки управления и контроля параметров силовых элементов и процессов, проходящих в штатном режиме и при эвакуации. Схема КЭЭ состоит из следующих составных частей (Рис. 5.3.6):

- блока питания, который формирует гальванически развязанное напряжение питания электронных схем всех блоков и заряжает конденсаторные батареи Ск1 и Ск2,
- блока включения ТС, предназначенного для формирования импульсов включения ТС1...4 с тремя независимыми каналами блокировки и включения ТС при эвакуации энергии,
- 2-х блоков включения ТК независимо друг от друга формирующих импульсы запуска обоих ТК с внутренним контролем исправного состояния,
- блока защит, который служит для нормализации входных сигналов с датчиков тока, напряжения, температуры, давления охлаждающей воды, их обработки и формирования выходных сигналов,
- блока согласования, предназначенного для приёма-передачи внешних сигналов, формирования команд управления блоками включения ТС и ТК,
- блока диагностики, фиксирующего сигналы состояния КЭЭ, с промежуточной архивацией и последующей передачей этой информации в систему управления (Рис. 5.3.7).

Схемы контроля и диагностики КЭЭ работают автономно, что повышает надёжность работы всего комплекса и обеспечивает гарантированную эвакуацию энергии даже при нарушении штатного функционирования какого-либо устройства.

5.3.3 Управление системой питания

Работа системы электропитания осуществляется в циклическом режиме — на Рис. 5.3.6 представлена структурная схема управления системой питания. Параметры цикла задаются оператором посредством программирования цикло задающей аппаратуры. С источниками питания и системой детектирования срыва сверхпроводимости КЭЭ соединяются через исполнительные сигналы на аппаратном уровне по 4-ем каналам:

- цикл,
- эвакуации энергии (ЭЭ),
- аварийного снятия цикла (АСЦ),
- запрет подачи цикла (ЗЦ).

Сигнал цикла является технологическим и служит для синхронизации работы всех подсистем. Сигналы ЭЭ, АСЦ и ЗЦ являются защитными и приводят к отключению части или всей системы электропитания. Сигнал ЭЭ имеет наивысший приоритет — это значит, что при формировании ЭЭ осуществляется и аварийное снятие цикла, и запрет подачи последующего цикла. При формировании АСЦ также запрещается подача последующего цикла. Передача сигналов ЭЭ, АСЦ, ЗЦ построена по принципу токовой петли: нормальное состояние — протекание тока 10 мА, аварийное — отклонение тока на величину ± 1 мА и более. Сигнал цикла передаётся в виде логического уровня 5 В при разрешении подачи тока.

Сигнал Цикла. Цикло задающая аппаратура генерирует тактовый сигнал, поступающий в буферный усилитель системы управления тиристорным выпрямителем (СУТВ) с которого он поступает во все подсистемы электропитания для синхронизации работы.

Сигнал ЭЭ запускает алгоритм вывода накопленной энергии из сверхпроводящего магнитного элемента при появлении нормальной фазы. Механизм вывода заключается в следующем: датчик перехода фиксирует наличие срыва сверхпроводимости и выдаёт сигнал ЭЭ (разрывает токовую петлю). При этом КТ1...6 вводят последовательно со сверхпроводящей нагрузкой резисторы гашения поля, а источник питания переводится в инверторный режим.

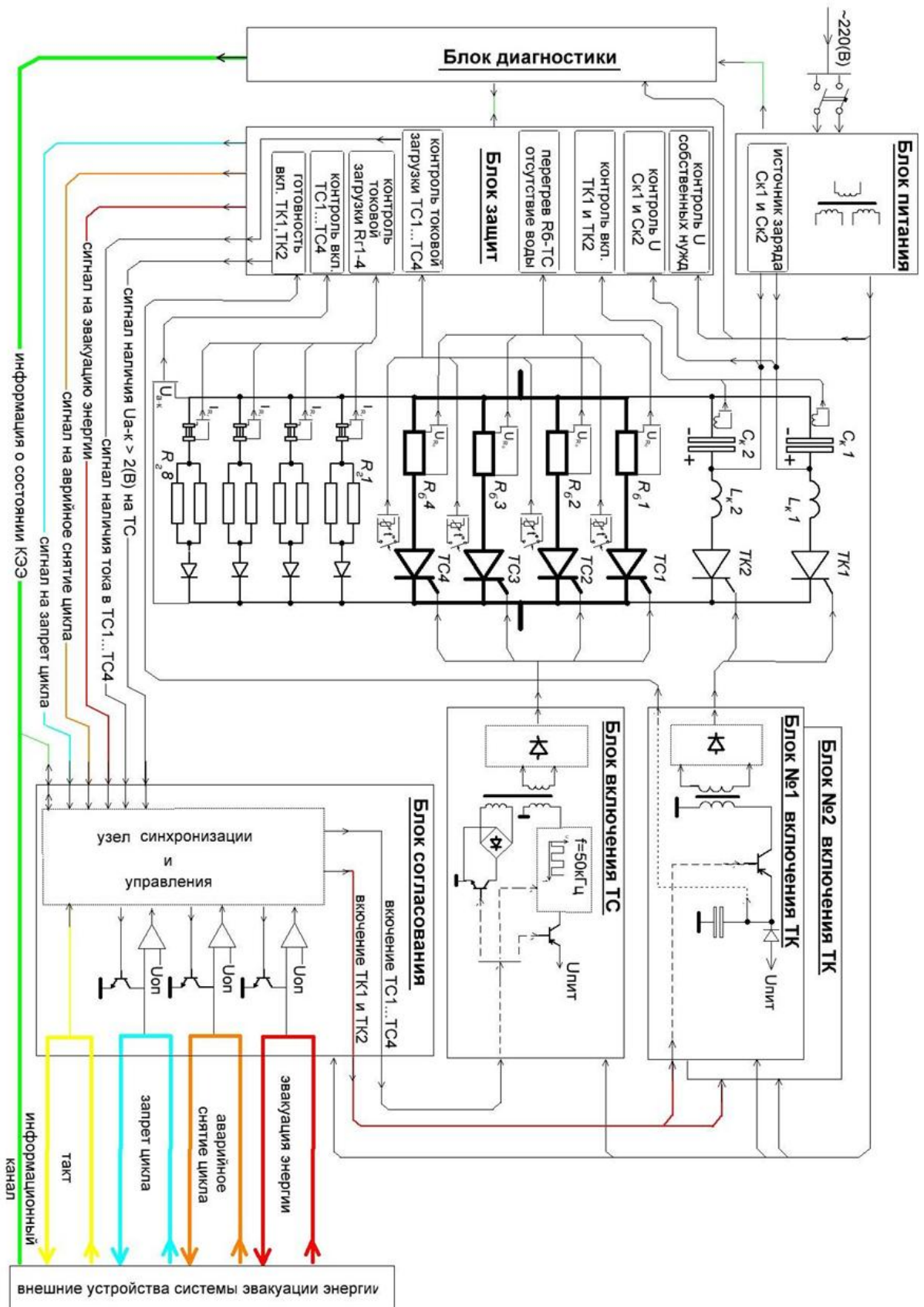


Рис. 5.3.6. Блок схема ключа эвакуации энергии элементах Нуклотрона

События вызывающие ЭЭ:

- срыв сверхпроводимости в магнитных элементах,
- понижение заряда конденсаторных батарей Ск на 10 % ниже номинальной величины в любом из КЭЭ,
- просадка напряжения питания электронных блоков управления и защит КЭЭ,
- снижение заряда ёмкостного накопителя узла формирования импульсов отключения КЭЭ.

Сигнал АСЦ обеспечивает мгновенное снятие тока в случаях нарушения штатной работы КЭЭ1...6 или источников 19ТВ, 20ТВ. Механизм снятия заключается в переводе источников электропитания в инверторный режим.

События вызывающие АСЦ:

- снижение заряда конденсаторных батарей Ск на 5 % от номинальной величины в любом из КЭЭ,
- нарушение равномерности токовой загрузки силовых тиристоров ТС в КЭЭ,
- не включение силовых тиристоров ТС в штатном режиме,
- отклонение от заданной величины напряжения питания электронных блоков управления и защит КЭЭ,
- нагрев силовых тиристоров ТС свыше 45°С,
- превышение током источника 19, 20ТВ заданной величины,
- ухудшение изоляции силовых цепей источника 19, 20ТВ и нагрузки относительно «земли» (земляная защита),
- перегорание силового предохранителя тиристорного выпрямителя,
- просадка напряжения собственных нужд электроники управления 19, 20ТВ,
- срабатывание защит высоковольтных цепей питания 19, 20ТВ.

Сигнал ЗЦ запрещает подачу следующего цикла в случаях как штатной, так и не штатной работы систем датчиков перехода, эвакуации энергии, источников электропитания, которые не требуют мгновенного снятия тока текущего цикла. Механизм исполнения при этом состоит в блокировании сигнала Цикла.

События вызывающие ЗЦ:

- не включение ТК в любом из КЭЭ при эвакуации энергии,
- не отключение по управлению одного или нескольких ТС в любом из КЭЭ при эвакуации энергии,
- пробой или закорачивание перехода анод-катод одного или нескольких ТС в любом из КЭЭ при эвакуации энергии,
- отсутствие сигнала на включение ТК в любом из КЭЭ при эвакуации энергии,

- нарушение равномерности токовой загрузки в цепи резистора гашения поля КЭЭ при эвакуации энергии,
- отсутствие протока охлаждающей воды в КЭЭ,
- нагрев силовых тиристоров свыше 35°C в любом из КЭЭ.
- отсутствие протока охлаждающей воды в 19, 20ТВ,
- оператором Нуклотрона при установке тумблера «запрет-разрешение» цикла блока дистанционного управления системой электропитания в положение запрет.

Информация об аварийных событиях в КЭЭ фиксируется и архивируется в блоке диагностики. Впоследствии эти данные поступают на концентратор системы управления, где производится анализ процессов отключения с формированием исполнительных и информационных сигналов.

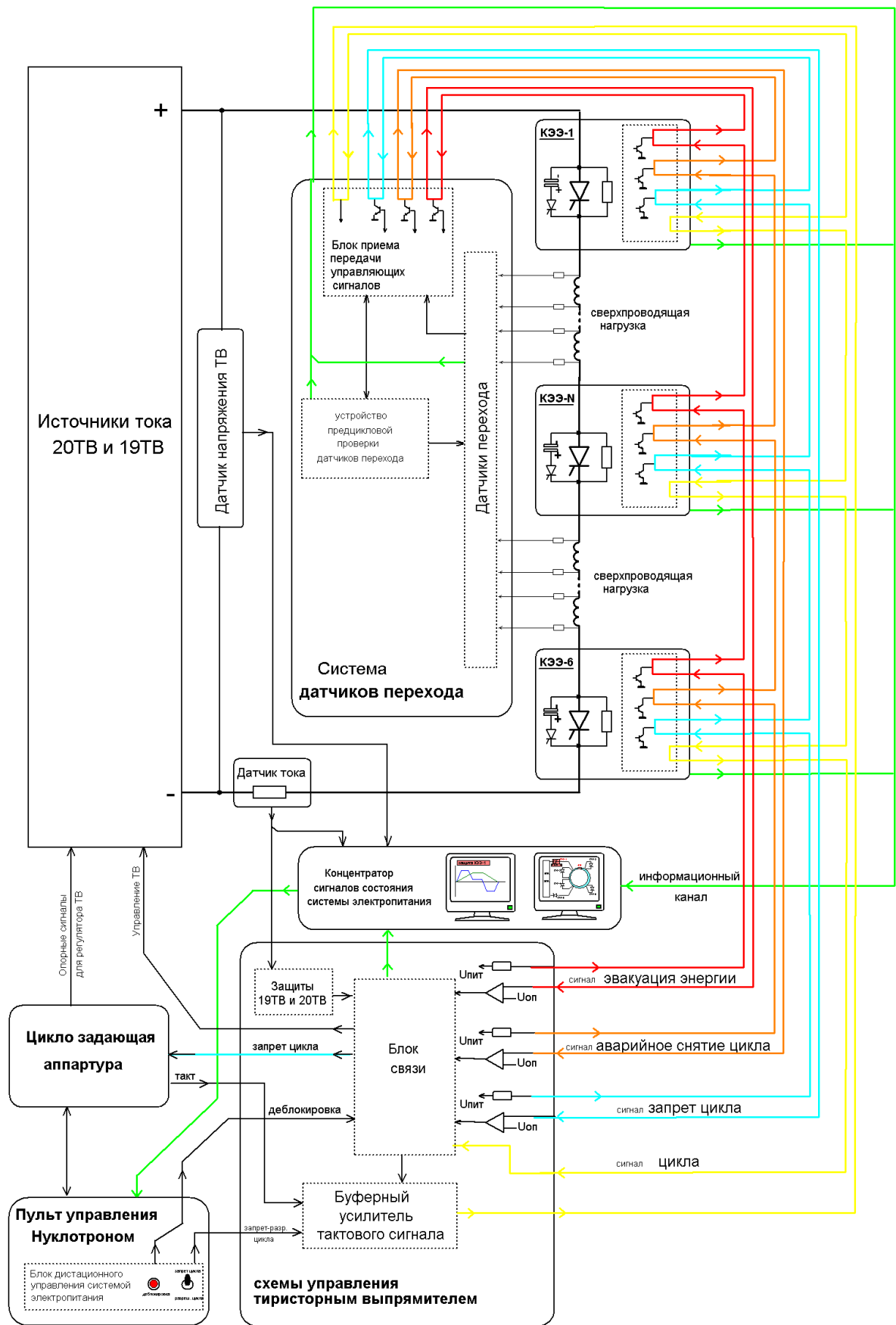


Рис. 5.3.7. Структурная схема управления системой питания

5.3.4 Размещение элементов и узлов системы питания

Источники ИП1...3, элементы силового фильтра и ключ ТКН размещены в корпусе № 1А. Там же расположены источники токоотбора FD и токодобавки D вместе со своими ключами эвакуации и комплекс циклозадающей, мониторирующей и управляющей аппаратуры. Сетевое напряжение 6 кВ на высоковольтную распределительную подстанцию № 13А корпуса № 1А подаётся с ГПП-1 через подстанцию № 15 из корпуса № 205. Силовые шинопроводы из корпуса № 1А через переключающий пункт корпуса № 1Б поступают на ключи эвакуации энергии, размещённые в цокольном этаже корпуса № 1. Ключи эвакуации соединяются с токовводами измерительного полупериода, в котором размещены измерительные магниты и линзы.

ИП1 это тиристорный выпрямитель с цеховым номером 19ТВ, ИП2 — тиристорный выпрямитель 20ТВ. После проведения доработки по силовым и контрольным цепям в качестве ИП3 предполагается использовать 23ТВ. Источники токоотбора FD и токодобавки D это тиристорные выпрямители с последовательно включённым линейным транзисторным регулятором, цеховые номера 37ТВ и 22ТВ соответственно.

Ключи эвакуации энергии КТ1...6 разработаны, изготовлены, испытаны и приняты в эксплуатацию. Силовые трассы и коммутационные узлы подсистемы эвакуации расположены в цокольном этаже и туннеле кольца Нуклотрона корпуса № 1.

Система питания позволяет обеспечить безаварийную работу сверхпроводящих магнитных элементов до поля 2 Тл и поддерживать при этом требуемую относительную точность тока на уровне 10^{-4} при ускорении от момента инжекции до «стола» и $2 \cdot 10^{-5}$ на «столе» тока при медленном выводе пучка из кольца ускорителя.

5.3.5 Источники питания корректоров магнитного поля

Источники тока PS 140-8 разработаны по техническому заданию ЛФВЭ Электротехническим институтом "EVPÚ a.s.", г. Нова Дубница, Словакия. В настоящее время успешно функционирует система коррекции магнитного поля Нуклотрона, в состав которой включены 50 источников питания указанного типа, изготовленные по контрактам с ОИЯИ. Электротехнический институт готов продолжить изготовление оборудования для Бустера и Коллайдера комплекса NICA.

Основные технические характеристики источников питания корректоров магнитного поля представлены в Таблице 5.3.1.

Таблица 5.3.1. Технические параметры источников питания

Входное питающее напряжение	1 NPE 230В/220В/АС/50 Гц
Входной ток, не более	будет согласован
Максимальная мощность источника	1120 Вт
Выходное напряжение источника, не более	8 В DC
Выходной ток, не более ($I_{\text{макс.}}$)	140 А DC
Индуктивность нагрузки	25 мГн
Температурный коэффициент выход. тока $I/^\circ\text{C}$	300 ppm от $I_{\text{макс.}}$
Класс устойчивости тока в течение 8 час.	500 ppm от $I_{\text{макс.}}$
Пульсация выходного напряжения (p-p)	40 мВ
Разрешение установки тока	16 бит
Разрешение измерения тока	16 бит
Диапазон установки выходного тока	0...100 %
Изменение выходного тока в зависимости от изменения нагрузки 80...100 %	200 ppm от $I_{\text{макс.}}$
Изменение выходного тока в зависимости от изменения входного напряжения ± 10 %	100 ppm от $I_{\text{макс.}}$
Коэффициент нагрузки	100 %
Точность установки выходного тока	± 1 %
Устойчивость к короткому замыканию	Да
Режимы работы	статический/динамический со скоростью/изменения тока от 0 до 100 А/с.
Степень устранения помех на сетевых зажимах по STN EN 55011	класс А
Шум на расстоянии 1 м от преобразователя	< 65 дБ
КПД при максимальной мощности	более 80 %
Изоляционная прочность вход/каркас	3,5 кВ DC
Изоляционная прочность вход/выход	5,3 кВ DC
Изоляционная прочность выход/каркас	2,5 кВ DC
Охлаждение	воздушное принудительное (внутренние вентиляторы)

Местное управление и контроль:

- цифровая индикация выходного тока и напряжения (цифровые 3,5-значные вольтметры);
- включение/выключение сетевого питания;
- установка порога срабатывания защиты по максимальному току;
- переключение полярности выходного тока;
- сброс аварийных сигналов;
- перезапуск источника после отказа с восстановлением параметров установленных до отказа;
- переключение управления местное/дистанционное;
- индикация режимов работы;

Дистанционное управление и контроль:

- аналоговое управление выходным током. Входным элементом регистрации сигнала является инструментальный усилитель с большим коэффициентом подавления синфазных помех. Изоляционная прочность относительно входа, выхода и корпуса не менее 2,5 кВ DC;

- аналоговый контроль выходного тока источника. Изоляционная прочность относительно входа, выхода и корпуса не менее 2,5 кВ DC;
- включение/выключение источника;
- сброс аварийных сигналов;
- перезапуск источника после отказа с восстановлением параметров, установленных до отказа;
- изменение направления тока нагрузки;
- контроль статуса источника;
- диагностика срабатывания защит;
- Дистанционное управление и контроль по 6-ти последним пунктам производится по каналу связи RS 485;

Защиты:

- от короткого замыкания и перегрузки на стороне переменного тока;
- защита от сверхтока в цепи нагрузки;
- от перегрева силовых элементов контура источника;
- от падения напряжения промежуточной цепи;
- от падения питающего напряжения электроники цепей управления;
- от срыва сверхпроводимости.

Изменение направления выходного тока:

- переключение производится с помощью двух переключающих реле;
- реле не изменяет состояние контактов при исчезновении питающего напряжения и в аварийном режиме;
- контур управления обеспечивает коммутацию в обесточенном состоянии.

Дизайн — проект источников показан на Рис. 5.3.8.

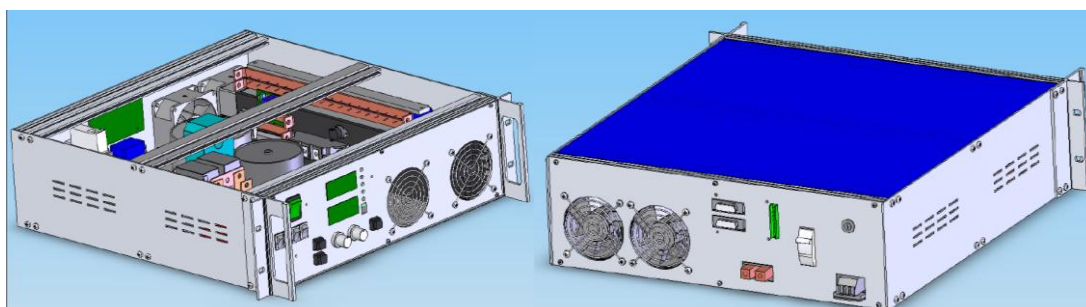


Рис. 5.3.8. Дизайн — проект источников питания

5.3.6 Системы детектирования активной фазы СП элементов

В основу детектирования перехода из сверхпроводящей фазы в нормальную был положен метод мостового включения контролируемых элементов с последующим анализом полученного сигнала на соответствие критериям перехода (Рис. 5.3.9).

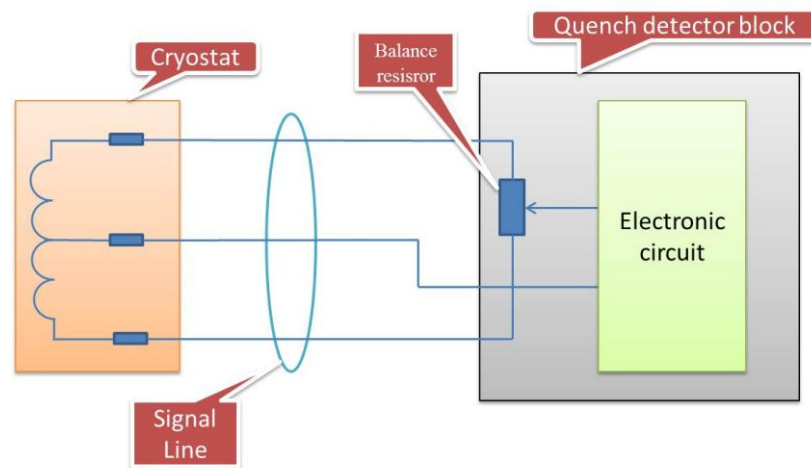


Рис. 5.3.9. Мостовой метод детектирования перехода

Все сверхпроводящие элементы ускорителя соединены в мосты попарно с дублированием соединительных транспортных линий. Фрагмент схемы защит (одного полукольца) показан на Рис. 5.3.10.

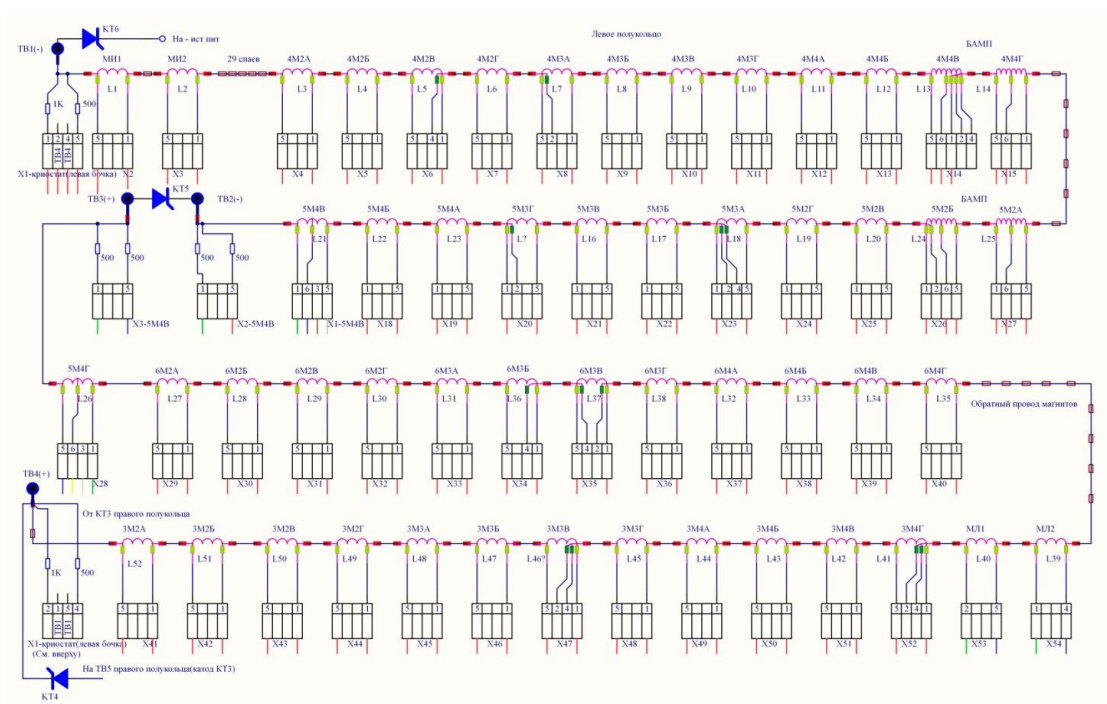


Рис. 5.3.10. Фрагмент схемы защит

Этот метод за время эксплуатации ускорителя детектирования показал свою надёжность и безотказность в работе.

Тем не менее, в процессе эксплуатации ускорителя были выявлены неустранимые помехи, возникающие в системе детектирования из-за различия физических параметров единичных контролируемых элементов. Помехи возникают из-за разбаланса моста на высоких частотах, когда происходит быстрое (менее чем 20 мс от нуля до максимума) нарастание напряжения источника питания. Характерный вид помех показан на Рис. 5.3.11. Для устранения влияния этих помех появилась необходимость включения дополнительных датчиков со средней точкой.

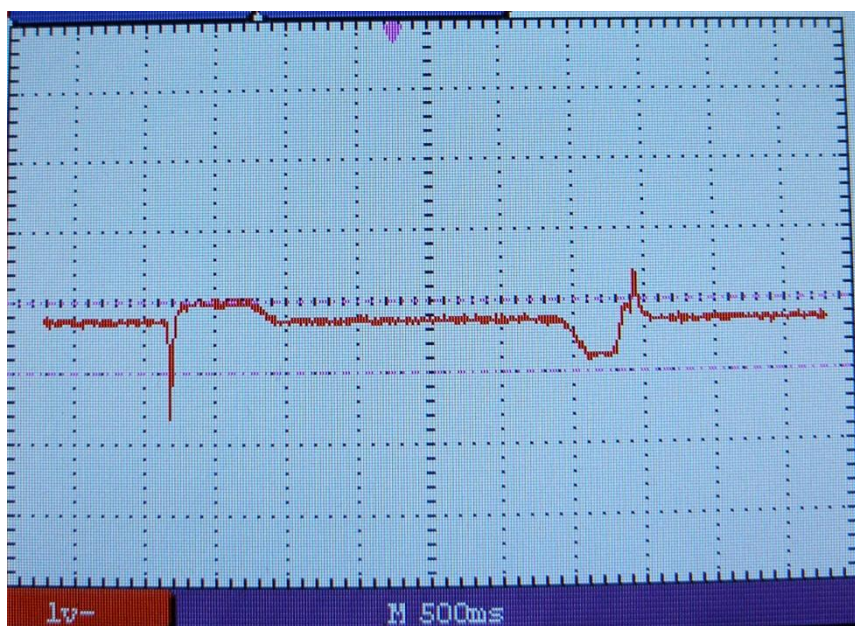


Рис. 5.3.11. Осциллограмма сигнала с моста с помехами

В дальнейшем развитии ускорителя предусматривается установка новых ВТСП токовводов, для которых потребуется разработка несколько иного подхода к методу детектирования и разработка, изготовление и подключение новых электронных блоков. Поскольку падение напряжения на ВТСП токовводах при возникновении нормальной проводимости составляет всего $3 \div 5$ мВ, требуется разработка предварительных усилителей для трансляции сигнала токоввода, которые необходимо устанавливать в непосредственной близости от контролируемого токоввода (Рис. 5.3.12).

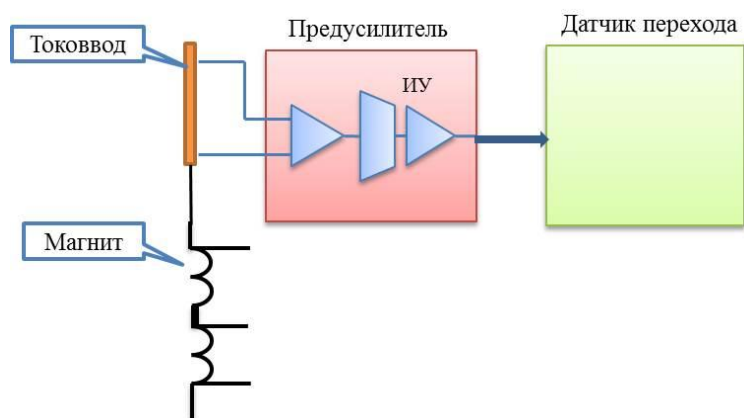


Рис. 5.3.12. Блок схема защиты ВТСП токоввода

Для улучшения контроля и анализа переходов планируется усовершенствовать систему управления защитами и добавить в неё функцию контроля процесса на датчике в реальном времени с записью процесса в файл. Структурная схема защит показана на Рис. 5.3.13.



Рис. 5.3.13. Блок схема узлов системы защит

5.4 СИСТЕМЫ ИНЖЕКЦИИ, МЕДЛЕННОГО И БЫСТРОГО ВЫВОДА ПУЧКА

5.4.1 Система инjection пучка из Бустера

Назначение

Система инjection пучка из Бустера в Нуклотрон предназначена для однооборотной инjection ядер тяжёлых элементов с минимальными потерями. В Таблице 5.4.1 приведены основные параметры пучка при инjection в Нуклотрон.

Таблица 5.4.1. Основные параметры пучка при инжекции в Нуклотрон

Ионы	$^{197}\text{Au}^{79+}$
Интенсивность	до $1,1 \cdot 10^9$
Энергия ионов, МэВ/н	572
Эффективность инжекции, %	95
Горизонтальный/вертикальный 95 %-ные эмиттансы, $\mu\text{мм}\cdot\text{мрад}$:	
– на входе системы инжекции;	до 14/до 4
– после филаментации в Нуклотроне.	до 16/до 7

Структура системы инжекции

Основными элементами системы инжекции пучка являются трехсекционный магнит Ламбертсона и ударный магнит. Магнит Ламбертсона служит для вертикального перевода пучка в медианную плоскость Нуклотрона. Ударный магнит служит для посадки пучка на замкнутую орбиту.

Элементы системы размещаются в 6-ом прямолинейном промежутке внутри криостата Нуклотрона (см. Рис. 5.4.1).

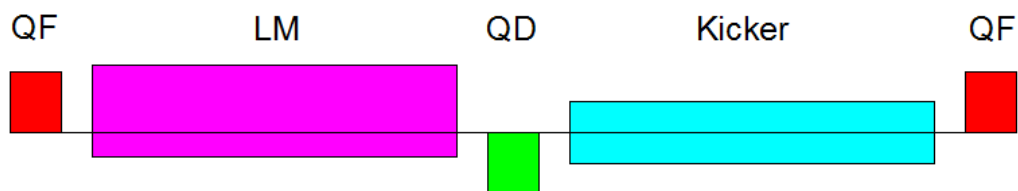


Рис. 5.4.1. Размещение элементов системы инжекции пучка из Бустера в Нуклотрон. Обозначения: QF, QD — фокусирующие и дефокусирующие квадрупольные линзы Нуклотрона, LM — трехсекционный магнит Ламбертсона, Kicker — ударный магнит

Временные характеристики работы системы инжекции

Режим работы магнита Ламбертсона циклический. В течение ввода ионов из Бустера поддерживается постоянный ток в обмотках магнита.

Ударный магнит работает в импульсном режиме. Частота повторения импульсов — 0,25 Гц.

Динамика ионов

Для определения положений и характеристик элементов системы инжекции было проведено моделирование динамики ионных пучков при переводе из Бустера в Нуклотрон. На Рис. 5.4.2 и Рис. 5.4.3 показаны траектория и огибающие инжектируемого пучка в горизонтальной и вертикальной проекциях соответственно.

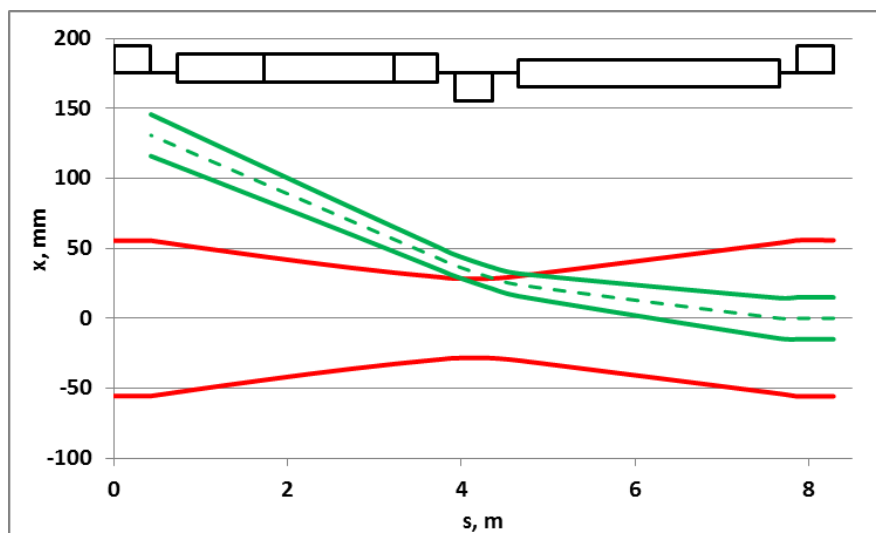


Рис. 5.4.2. Горизонтальная проекция траектории и огибающей инжектируемого пучка

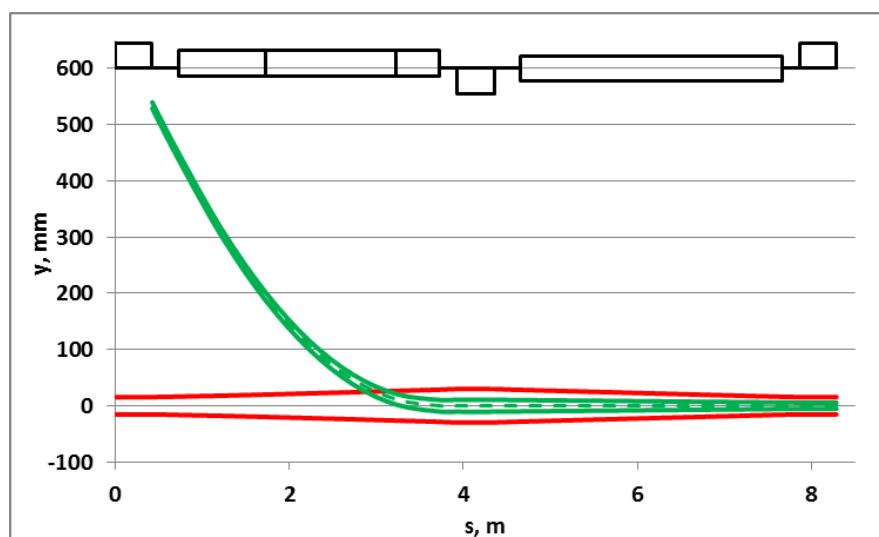


Рис. 5.4.3. Вертикальная проекция траектории и огибающей инжектируемого пучка

Элементы системы инжекции

Магнит Ламбертсона системы инжекции состоит из трех секций. Секция магнита Ламбертсона представляет собой дипольный магнит с двумя апертурами: областью ввода и областью циркуляции пучка. В области ввода пучка обмотками создается горизонтальное магнитное поле, отклоняющее инжектируемый пучок. Область циркуляции пучка отделена перегородкой (септумом) от области ввода, магнитное поле в области циркуляции отсутствует. Каждая секция магнита Ламбертсона устанавливается внутри отдельного криостатного модуля. Секции магнита имеют длины 1, 1,5 и 0,5 м. Толщина септума: 15 мм в секциях № 1 и № 2, 5 мм в секции № 3. Максимальные магнитные поля в секциях магнита: 1,2 Тл в секциях № 1 и № 2, 1 Тл в секции № 3. Ток в обмотках магнита Ламбертсона — 400 А.

Ударный магнит системы инъекции аналогичен ударному магниту системы быстрого вывода пучка из Бустера. Ударный магнит разбит на два криостатных модуля. Полная длина — 3 м. Максимальное магнитное поле — 0,06 Тл, соответствующий ток в проводниках — 8 кА.

На Рис. 5.4.4 и Рис. 5.4.5 показаны элементы системы инъекции. Более подробное описание элементов приведено в Приложениях 5.1 и 5.2.

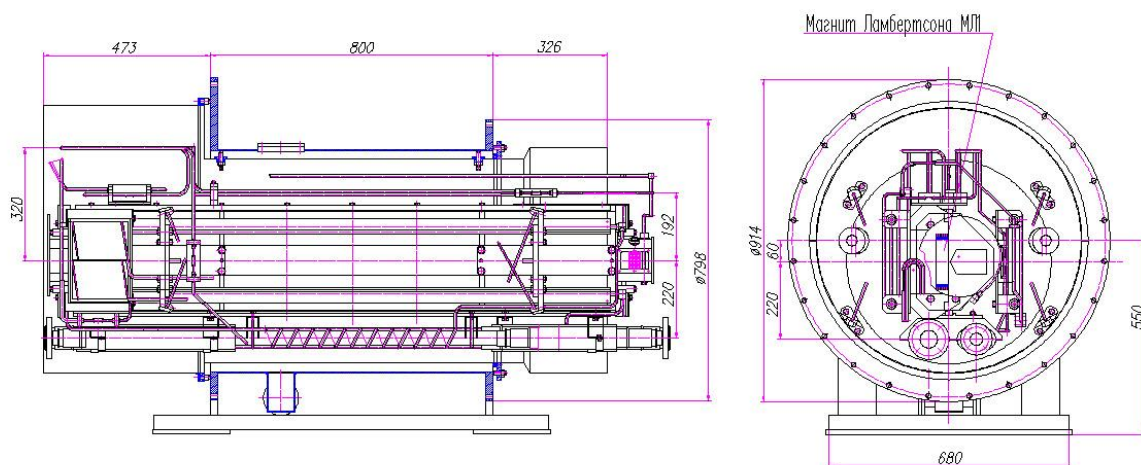


Рис. 5.4.4. Аналог секции № 3 магнита Ламбертсона

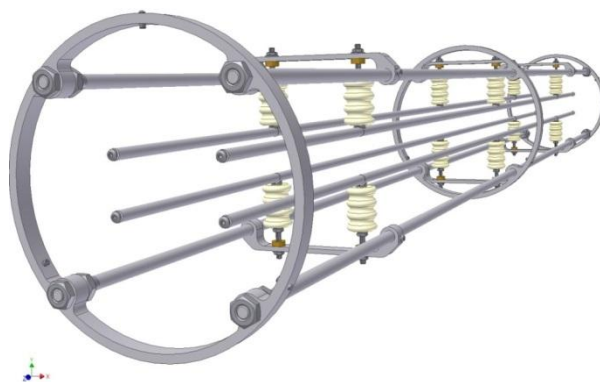


Рис. 5.4.5. Вид ударного магнита с опорной конструкцией

Для питания элементов системы инъекции служат источник питания магнита Ламбертсона и источники питания модулей ударного магнита, которые размещаются в туннеле Нуклотрона.

Источник питания магнита Ламбертсона располагается в непосредственной близости от тоководов снаружи кольца Нуклотрона. Источник питания циклический, длительность активной фазы цикла — порядка 1 с. Максимальный ток — 400 А. Неоднородность тока на плато цикла не превышает $\pm 1\%$.

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 плато импульса — не менее 500 нс, а длительность заднего фронта импульса не превышает 250 нс. Максимальный ток — 8 кА. Неоднородность тока на плато импульса не превышает $\pm 2\%$.

5.4.2 Система быстрого вывода пучка

Назначение

Система быстрого вывода пучка предназначена для однооборотного вывода ионов из Нуклотрона с минимальными потерями. С целью ослабления требований к ударному устройству системы циркулирующий пучок смещается к септуму системы вывода. Подводка пучка к септуму осуществляется либо изменением ведущего магнитного поля, либо изменением энергии пучка с помощью ВЧ-системы Нуклотрона.

В Таблице 5.4.2 приведены основные параметры пучка при быстром выводе из Нуклотрона.

Таблица 5.4.2. Основные параметры пучка при быстром выводе из Нуклотрона

Ионы	$^{197}\text{Au}^{79+}$
Интенсивность	до $1 \cdot 10^9$
Энергия ионов, ГэВ/н	$1 \div 4,5$
Эффективность вывода, %	95
Поперечные 95 %-ные эмиттансы, $\mu\text{мм}\cdot\text{мрад}$	< 14 (гор.)/ < 6 (верт.)

Структура системы быстрого вывода

Основными элементами системы быстрого вывода пучка являются ударный магнит и магнит Ламбертсона. Ударный магнит забрасывает пучок в магнит Ламбертсона, который осуществляет вертикальный вывод пучка из Нуклотрона.

Элементы системы размещаются в 4-ом прямолинейном промежутке внутри криостата Нуклотрона (см. Рис. 5.4.6).

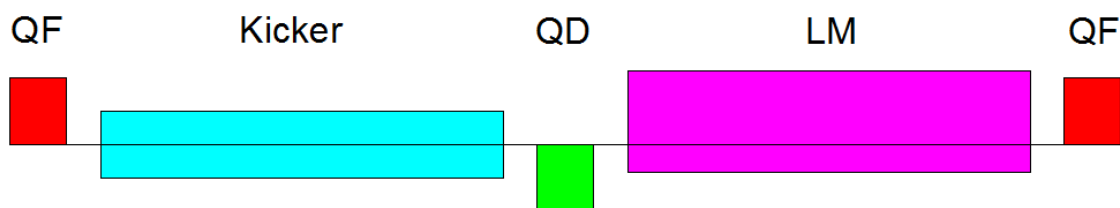


Рис. 5.4.6. Размещение элементов системы быстрого вывода пучка из Нуклотрона. Обозначения: QF, QD — фокусирующие и дефокусирующие квадрупольные линзы Нуклотрона, Kicker — ударный магнит, LM — двухсекционный магнит Ламбертсона

Временные характеристики работы системы быстрого вывода

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.

Ударный магнит работает в импульсном режиме. Частота повторения импульсов — 0,25 Гц.

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.

Динамика ионов

Для определения положений и характеристик элементов системы инжекции было проведено моделирование динамики ионных пучков при быстром выводе из Нуклотрона. Быстрый вывод ионов из Нуклотрона осуществляется в 2 этапа. На первом этапе циркулирующий пучок подводится к септуму магнита Ламбертсона. На втором этапе осуществляется собственно вывод ионов из Нуклотрона. На Рис. 5.4.7 и Рис. 5.4.8 показаны замкнутая орбита после смещения к септуму магнита Ламбертсона, траектория вывода, огибающие циркулирующего и выводимого пучков в горизонтальной и вертикальной проекциях соответственно.

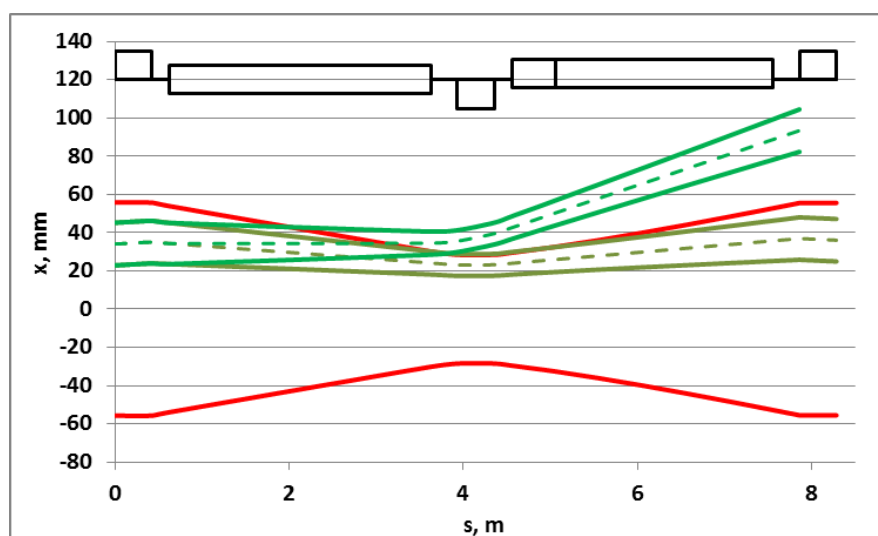


Рис. 5.4.7. Горизонтальные проекции замкнутой орбиты после смещения к септуму магнита Ламбертсона, траектории вывода, огибающих циркулирующего и выводимого пучков

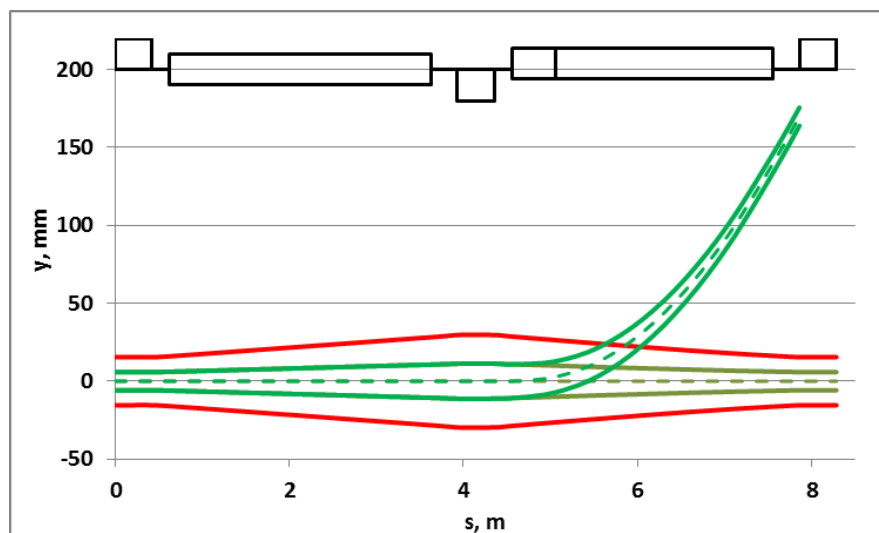


Рис. 5.4.8. Вертикальные проекции замкнутой орбиты после смещения к септуму магнита Ламбертсона, траектории вывода, огибающих циркулирующего и выводимого пучков

Элементы системы быстрого вывода

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

Магнит Ламбертсона системы быстрого вывода пучка аналогичен магниту Ламбертсона системы медленного вывода пучка. 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. Ток в обмотках магнита Ламбертсона — до 6 кА.

Более подробное описание элементов приведено в Приложениях 5.1 и 5.3.

Для питания элементов системы быстрого вывода служат основной источник питания магнитной системы Нуклотрона и источники питания модулей ударного магнита, размещаемые внутри подставок под модули. Источники питания модулей ударного магнита 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. Максимальный ток — 15 кА. Неоднородность тока на плато импульса не превышает $\pm 2\%$.

5.5 ВАКУУМНАЯ СИСТЕМА

Кольцевая высоковакуумная камера Нуклотрона сечением 120 × 63 мм изготовлена из нержавеющей стали толщиной 0,5 мм. Камера допускает перепад давления 1,5 атм. как с внешней, так и с внутренней стороны. Разборные соединения отдельных частей камеры выполнены в виде фланцев с медным уплотнением типа conflate. Фланцы стягиваются при помощи хомутов, а на некоторых участках болтами.

За исключением одного участка (7-ой прямолинейный промежуток) длиной около 3 м, вся камера расположена внутри криостата кольца и окружена изоляционным вакуумным пространством. К некоторым участкам камеры, расположенным в больших прямолинейных промежутках, припаяны змеевики из медной трубки для охлаждения камеры жидким гелием. Участки камеры, расположенные в криостатных блоках дипольных и квадрупольных магнитов, охлаждаются за счёт излучения от холодных поверхностей магнитов, а также за счёт теплового контакта (касания) с железным ярмом.

Два шибера (на 3-ем и 7-ом прямолинейных промежутках) с медным уплотнением позволяют разделить камеру на две части. Каждая часть соответствует половине кольца ускорителя. «Тёплый» участок (на 7-ом п/п) отделяется от остальной части камеры при помощи двух затворов.

Состыкованные между собой магнитно-криостатные блоки образуют вакуумный кожух Нуклотрона. Стыковка обеспечивается фланцевыми соединениями с резиновым уплотнением прямоугольного сечения. Кожух разделён на 2 части (полукольца), имеющие отдельный изоляционный вакуум.

Для успешной реализации проекта NICA необходимо обеспечить длительную (около 5000 ч/г) надёжную работу ускорительного комплекса Нуклотрон, ускорение интенсивного пучка ионов с минимальными потерями до энергии, соответствующей полю дипольных магнитов 2 Тл. До начала модернизации, время работы Нуклотрона ограничивалось двумя сеансами в год, общей протяжённостью примерно 150 ч. Максимальная величина поля в дипольных магнитах, достигнутая в то время 1,5 Тл. Количество ускоренных частиц не превышало 30 % от числа инжектированных в Нуклотрон. Стабильность работы комплекса зависит как от общего состояния инфраструктуры лаборатории, так и от надёжности работы основных систем ускорителя.

В модернизации нуждалась вакуумная система ускорителя. Изоляционная вакуумная система Нуклотрона полностью соответствует требованиям ускорителя и не нуждалась в существенной модернизации. Требования к давлению остаточного газа в пучковой камере Нуклотрона определяются основными режимами работы ускорителя в составе комплекса NICA.

При ускорении лёгких ионов основным механизмом потерь частиц из-за взаимодействия с остаточным газом является однократное рассеяние на большие углы. Сечение рассеяния

максимально при энергии инжекции (20 МэВ для протонов и 5 МэВ/н для дейтронов) и уменьшается в процессе ускорения. При темпе роста поля 1 Тл/с для уменьшения потерь до уровня менее 5 % необходимо обеспечить плотность остаточного газа (основным компонентом предполагается гелий) до величины, соответствующей давлению 10^{-7} Па при комнатной температуре (азотный эквивалент).

При эксплуатации комплекса NICA в режиме столкновения пучков тяжелых ионов планируется осуществить в Нуклотроне ускорение полностью ободранных ионов с энергии инжекции примерно 600 МэВ/н. В этом режиме при давлении остаточного газа 10^{-7} Па (азотный эквивалент при комнатной температуре) потери частиц в течение цикла ускорения составляют менее 1 %.

Наиболее жёсткие требования к вакуумным условиям соответствуют режиму ускорения частично ободранных ионов при инжекции непосредственно из линейного ускорителя (такой режим будет реализован до ввода в эксплуатацию Бустера). При этом основным механизмом потерь частиц является изменение их зарядового состояния за счёт потери электронов при взаимодействии с атомами остаточного газа. Требования к вакуумным условиям в таком режиме оценивались при проектировании Бустера, и было доказано, что для сохранения потерь на начальном участке ускорения в пределах нескольких процентов необходимо уменьшение давления до уровня 10^{-9} Па. Поэтому одной из основных задач Бустера является существенное увеличение энергии и полная обдирка ионов перед инжекцией в Нуклотрон, что практически снимает проблему потерь частиц на остаточном газе.

Для создания пучка в камере Нуклотрона должно поддерживаться давление не выше 10^{-7} Па. Данное условие обеспечивается системой откачки, которая состоит из форвакуумного спирального насоса TriScroll 300, который является безмасляным объёмным вращательным насосом, турбомолекулярных насосов TMU 071 YPN и TMU 261 YPN, и магниторазрядного насоса IPT 200, производящих высоковакуумную откачку.

Дальнейшее понижение давления обеспечивается явлениями криоконденсации и криосорбции молекул остаточного газа на металлических стенках вакуумного объёма, охлаждающихся жидким гелием, находящимся в криостатах. Применение криогенных жидкостей вызвано необходимостью охлаждения обмотки соленоида до температуры жидкого гелия с целью получения её сверхпроводимости. Жидкий азот также является тепловым экраном и служит для уменьшения теплопритока к жидкому гелию.

Основное оборудование вакуумной системы располагается по периметру кольцевого ускорителя длиной 252 м и эксплуатируется в условиях радиационного облучения (около 80 Гр/г). Прямоугольниками обозначены 64 структурные линзы магнитной системы (Рис. 5.5.1). С целью уменьшения воздействия радиационного облучения на электронику блоки электрического питания

и управления турбонасосами TCP 350 и блоки питания магниторазрядных насосов помещены в четыре щита и вынесены из тоннеля ускорителя за бетонную защиту, расположенную по внутреннему радиусу тоннеля. Дистанционное управление оборудованием осуществляется из пульта управления линейным ускорителем ЛУ-20, который расположен в 80 м от центра зала ускорителя. Электрическое питание вакуумного оборудования осуществляется переменным током с напряжением 220 В.

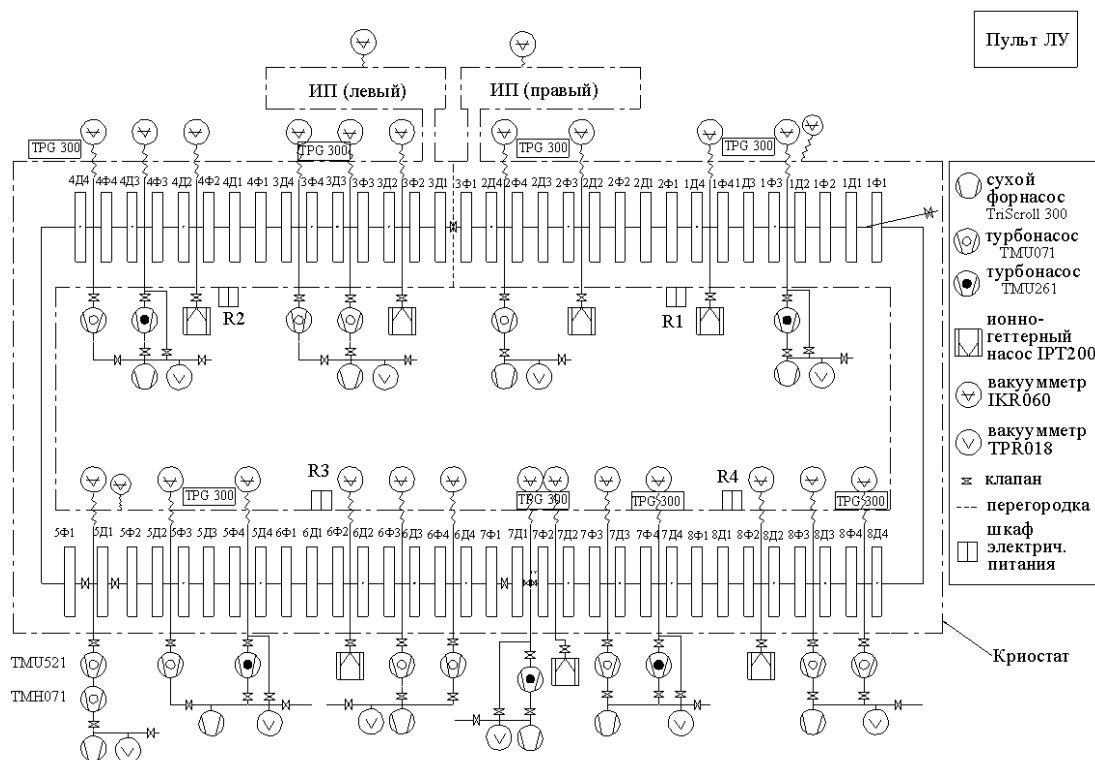


Рис. 5.5.1. Схема вакуумного оборудования пучковой камеры

Таблица 5.5.1. Состав основного вакуумного оборудования пучковой камеры

Наименование оборудования	Кол-во
Сухой форнасос TriScroll 300	10
Турбонасос TMU071	12
Турбонасос TMU261	5
Турбомолекулярный насос TCP350	17
Турбонасос TMU521	2
Ионно-геттерный насос IPT200	7
Вакуумметр IKR060	27
Вакуумметр TPR018	10
Вакуумметр TPG300	14

5.6 ВЫСОКОЧАСТОТНАЯ УСКОРЯЮЩАЯ СИСТЕМА НУКЛОТРОНА

5.6.1 Основные элементы ВЧ системы

Ускорение частиц в Нуклотроне осуществляется с помощью устройств типа «дрейфовая трубка», позволяющих минимизировать выделение тепла в холодной полости ускорителя. Высокочастотное

ускоряющее напряжение подаётся на дрейфовые трубки через специальные вводные устройства от внешних резонаторов, установленных над вакуумным кожухом. Резонаторы совместно с электрической ёмкостью дрейфовых трубок образуют колебательный контур, возбуждаемый мощным широкополосным генератором. Всего имеется две ускоряющие станции диаметрально расположенные на кольце ускорителя.

Оконечные каскады генераторов расположены на площадках вблизи прямолинейных участков ускорителя в местах размещения дрейфовых трубок. Аппаратура управления и предварительного усиления располагается на удалённом (~ 450 м) пульте управления.

Перестройка резонаторов осуществляется следящей аппаратурой автоматической перестройки частоты (АПЧ) путём подмагничивания ферритового заполнения. Аппаратура АПЧ включает фазовый детектор, усилитель подмагничивания и программатор. Фазовый детектор и усилитель располагается вблизи резонаторов, программатор входит в состав удалённо-расположенной аппаратуры управления.

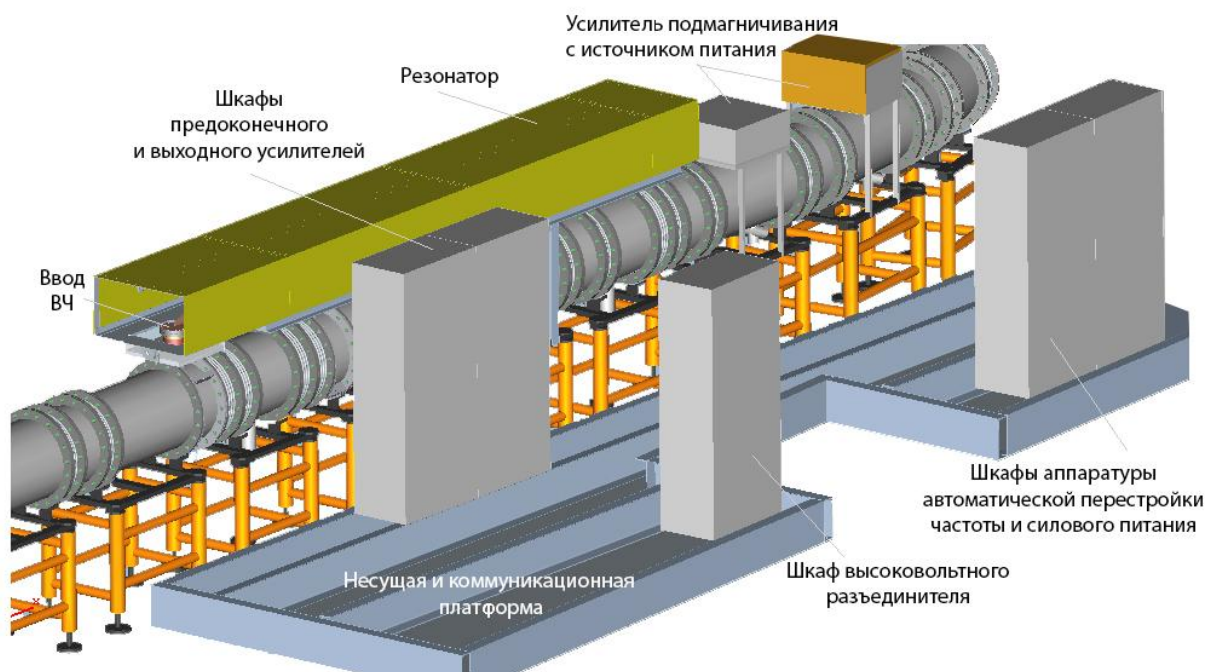


Рис. 5.6.1. Расположение основных элементов оборудования ускоряющей станции на кольце ускорителя



Рис. 5.6.2. Общий вид ускорительной станции на кольце Нуклотрона (слева), усилитель подмагничивания ферритов с источником питания (справа)

Конструктивно резонаторы выполнены в виде двух параллельно включённых четвертьволновых укороченных коаксиальных линий с ферритовым заполнением ферритовыми кольцами надетыми на внутренние трубы коаксиала, в которых проложена обмотка подмагничивания. Длина линий 4 м. Ферритовые кольца типа 600НН 125 × 80 × 14. Между кольцами для отвода тепла проложены алюминиевые шайбы. Диапазон изменения тока подмагничивания 0 ÷ 300 А. Охлаждение — воздушное.

В выходных каскадах генераторов применены мощные радиолампы ГУ-44 с водяным охлаждением. Диапазон рабочих частот ускоряющих станций 0,6 ÷ 6,0 МГц, что соответствует принятой пятой кратности ускорения. Возбуждение резонаторов осуществляется подачей ВЧ напряжения с анода лампы выходного каскада через разделительные конденсаторы к средней части внутренних труб линии (с коэффициентом включения 0,4). Максимальное значение амплитуды напряжения, получаемого на резонаторах — 9 кВ, что соответствует 5,5 кВ ускоряющего напряжения на одну станцию с учётом эффективности дрейфовых трубок.

В состав ускоряющих станций входит оборудование высоковольтного питания, воздушного и водяного охлаждения, контроля, управления, устройств защиты и блокировок.

Для работы ускорителя в комплексе NICA проводится модернизация ВЧ станций с целью совершенствования точностных и динамических характеристик её систем:

- 1) аппаратуры управления амплитудой ускоряющего напряжения;
- 2) аппаратуры программного управления перестройкой резонаторов;
- 3) взаимной фазировки ускоряющих станций.

Модернизируются системы силового и высоковольтного питания.

5.6.2 Продольная динамика пучка в Нуклотроне

Характеристики пучка и параметры ВЧ в Нуклотроне представлены в Таблице 5.6.1.

Таблица 5.6.1. Характеристики пучка и параметры ВЧ в Нуклотроне

Количество частиц	$1 \div 1,5 \cdot 10^9$
Интервал энергий, МэВ/н	1000/4500
Частота ВЧ, МГц	1,05/1,17
Номер гармоники	1
Продольный эмиттанс сгустка, эВ·с	<3
Амплитуда ВЧ при захвате, кВ	8,5
Амплитуда ВЧ при росте поля, кВ	$7 \div 10$
Скорость роста магнитного поля, Тл/с	1
Максимальное время ускорения, с	1,6

После ускорения $^{197}\text{Au}^{31+}$ до энергии 576 МэВ/н в Бустере, осуществляется перепуск в Нуклотрон. В канале транспортировки между Бустером и Нуклотроном пучок проходит через обдирочную мишень, с потерей всех электронов. При этом энергия ионов уменьшается приблизительно на 4 МэВ/н. Перевод осуществляется при постоянном магнитном поле в согласованную со сгустком сепаратрису Нуклотрона (bunch to bucket). Параметры перевода (напряжения на станциях Бустера и Нуклотрона при перепуске) могут варьироваться в широких пределах. Выбранное напряжение ВЧ станций Нуклотрона в 8,5 кВ является одним из возможных сценариев.

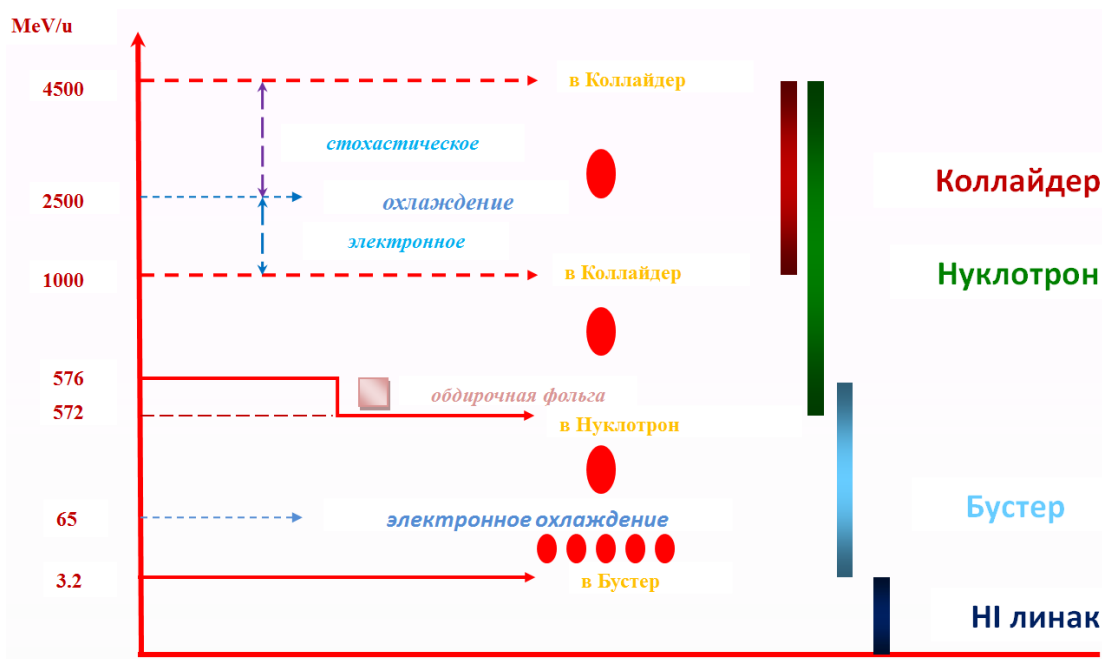


Рис. 5.6.3. Схема работы комплекса NICA

После перевода сгустка в Нуклотрон магнитное поле ускорителя возрастает по параболе ($40 \div 50$ мс) до достижения величины $dB/dt = 1$ Тл/с. Этот темп роста поля сохраняется до достижения требуемой энергии. Завершение процесса ускорения и выход на «полку» магнитного

поля для перевода пучка в Коллайдер также осуществляются при изменении поля по параболическому закону.

Основные параметры сгустка в процессе ускорения в Нуклотроне приведены в Таблице 5.6.2.

Таблица 5.6.2. Параметры сгустка в Нуклотроне

	Инжекция	Ускорение	Вывод
Время, с	0,0	1,55	1,59
Магнитное поле, Тл	0,446	2,01	2,03
Напряжение ВЧ, кВ	8,5	8,5	0,2
Частота ВЧ, кГц	935	1174	1174,4
Синхронная фаза ВЧ, град	41	41	0
Кинетическая энергия, эВ/н	572	4450	4500
Количество банчей	1	1	1
Ср. кв. размер банча по длине, м	5,8	2,0	3,4
Ср. кв. размер банча по энергии, МэВ	30	112	71
$\Delta p/p (\pm 2\sigma)$	$\pm 3,2 \cdot 10^{-4}$	$\pm 2,2 \cdot 10^{-4}$	$\pm 1,4 \cdot 10^{-4}$
Высота сепаратрисы, МэВ	210	2320	816
$\Delta p/p$ по сепаратрисе	$\pm 1,1 \cdot 10^{-3}$	$\pm 2,6 \cdot 10^{-3}$	$\pm 7,8 \cdot 10^{-4}$
Синхронная частота (tune)	$3,9 \cdot 10^{-4}$	$3,6 \cdot 10^{-5}$	$6,6 \cdot 10^{-6}$

5.7 УСТРОЙСТВА УПРАВЛЕНИЯ СПИНОМ

5.7.1 Динамика спинов протонов в Нуклотроне с соленоидальной змейкой

Нуклотрон планируется использовать в качестве инжектора поляризованных протонов и дейтронов для Коллайдера NICA. Решение задачи сохранения поляризации дейтронов и протонов в процессе ускорения пучка в Нуклотроне позволит также работать с поляризованными пучками на выведенной мишени в экспериментальном зале.

Вертикальная поляризация дейтронов практически не изменяется во всем диапазоне энергии Нуклотрона (до 11 ГэВ). Таким образом, для работы с поляризованными дейтронами не требуется дополнительных устройств в Нуклотроне.

Для протонов основная трудность сохранения поляризации в процессе ускорения пучка связана с пересечением множества опасных спиновых резонансов, из которых наиболее опасными являются 6 внутренних резонансов, возникающих при взаимодействии спина с бетатронным движением, и 25 целых резонансов, связанных с несовершенством магнитной структуры Нуклотрона.

Для подавления спиновых резонансов во время ускорения поляризованных протонов планируется использовать соленоидальную сибирскую змейку. Для полной сибирской змейки, вращающей спин на π -рад вокруг продольного направления на энергии 5 ГэВ, требуется интеграл продольного поля $VL = 22$ Тл·м. При этом исключается пересечение всех опасных резонансов с любыми бетатронными частотами. Использование частичной сибирской змейки также решает проблему сохранения поляризации в процессе ускорения, при этом ограничивается допустимый диапазон бетатронных частот. Для 50 % частичной сибирской змейки (половинная змейка), вращающей спин на $\pi/2$,

интеграл поля уменьшается в 2 раза и составит величину $BL = 11$ Тл·м. Допустимый диапазон частот при этом ограничивается интервалом, в котором дробная часть бетатронной частоты лежит в интервале: $|\nu_{1,2} - k| < 0,25$.

На Рис. 5.7.1 показано устойчивое направление поляризации спина в Нуклотроне для полной сибирской змейки и половинной сибирской змейки.

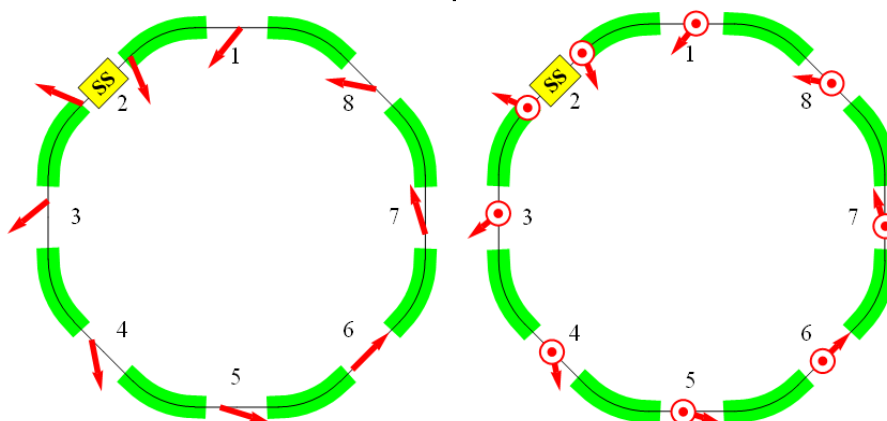


Рис. 5.7.1. Равновесная поляризация в Нуклотроне для полной (слева) и половинной (справа) сибирских змеек

При установке полной сибирской змейки во втором промежутке поляризация в противоположном шестом промежутке будет направлена вдоль скорости. При движении частицы спин проворачивается вокруг вертикального направления в арках первой половины Нуклотрона, переворачивается вокруг скорости в сибирской змейке и далее восстанавливает своё направление во второй половине Нуклотрона.

При уменьшении поля соленоида появляется вертикальная проекция спина. Для половинной сибирской змейки угол спина с вертикалью составляет 45° . При дальнейшем уменьшении поля этот угол продолжает уменьшаться. Допустимый диапазон бетатронных частот также уменьшается. При выключении сибирской змейки спин ориентируется вдоль вертикали и становится неизбежным пересечение опасных спиновых резонансов.

При работе с поляризованными протонами в Нуклотроне с соленоидальной змейкой необходимо согласовать направление поляризаций при инжекции пучка из ЛУ-20 в кольцо Нуклотрона. То есть нужно довернуть вертикально поляризованные протоны из ЛУ-20 до требуемого направления равновесной поляризации в месте инжекции пучка в Нуклотрон. Необходимый поворот поляризации можно обеспечить во время транспортировки пучка до Нуклотрона, с помощью пары соленоидов, интегрированных в канал транспортировки.

5.7.2 Влияние сибирской змейки на орбитальные характеристики Нуклотрона

Сибирскую змейку планируется разместить во втором суперпериоде Нуклотрона в двух свободных промежутках, разделённых дефокусирующей линзой. Схема расположения соленоидов Сибирской Змейки показана на Рис. 5.7.2, на котором K_F , K_D обозначают градиенты фокусирующих и дефокусирующих квадруполь в единицах магнитной жёсткости $K = (\partial B_y / \partial x) / B\rho$, $K_S = B_S / B\rho$ — поле соленоида в единицах магнитной жёсткости.

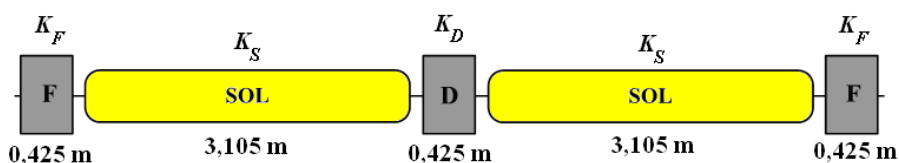


Рис. 5.7.2. Схема расположения соленоидов Сибирской Змейки в Нуклотроне без компенсирующих квадруполь

На Рис. 5.7.3 показаны области допустимых значений бетатронных частот (окрашены зеленым цветом) для сохранения поляризации пучка в процессе ускорения при использовании полной ($\Psi = \pi$) и частичных змеек ($\Psi = 3\pi/4$, $\Psi = \pi/2$) в Нуклотроне. При увеличении угла вращения спина в соленоиде Ψ происходит уменьшение размеров клетки устойчивости и увеличение области допустимых значений бетатронных частот для работы частичной змейки.

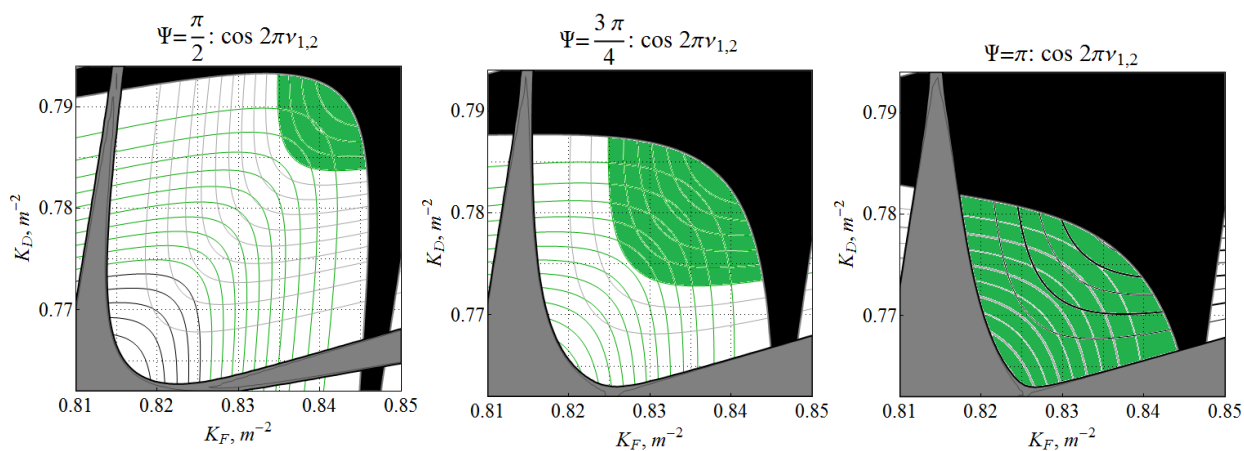


Рис. 5.7.3. Области допустимых значений бетатронных частот при использовании частичной змейки в Нуклотроне

Для половинной змейки ($\Psi = \pi/2$) интеграл продольного поля составляет $BL = 11,2$ Тл·м при импульсе 6 ГэВ/с, а поле в соленоиде примерно равно 1,8 Тл. Таким образом, при использовании соленоидов с максимальным полем не превышающем 4 Тл, половинная змейка позволяет решить задачу сохранения поляризации протонов во всем диапазоне энергий Нуклотрона. Значения бетатронных частот должны при этом удовлетворять соотношению $\cos 2\pi\nu_{1,2} > 0$.

На Рис. 5.7.4 показаны β -функции и дисперсионные функции для Нуклотрона с половинной змейкой при следующих значениях приведённых градиентов: $K_F = 0,838$, $K_D = 0,785$. Для

рассматриваемого примера значение коэффициента расширения орбит отрицательно, что означает отсутствие критической энергии.

Значения β -функций для Нуклотрона с половинной змейкой не превосходят значений β -функций для Нуклотрона без змейки. Для Нуклотрона со змейкой дисперсионные функции имеют знакопеременный характер по обоим направлениям, при этом максимальное значение дисперсии примерно в три раза превосходит максимальное значение дисперсии в Нуклотроне без змейки.

$$\Psi=0.5\cdot\pi, K_F=0.838\text{ м}^{-2}, K_D=0.785\text{ м}^{-2}, \alpha=-0.041.$$

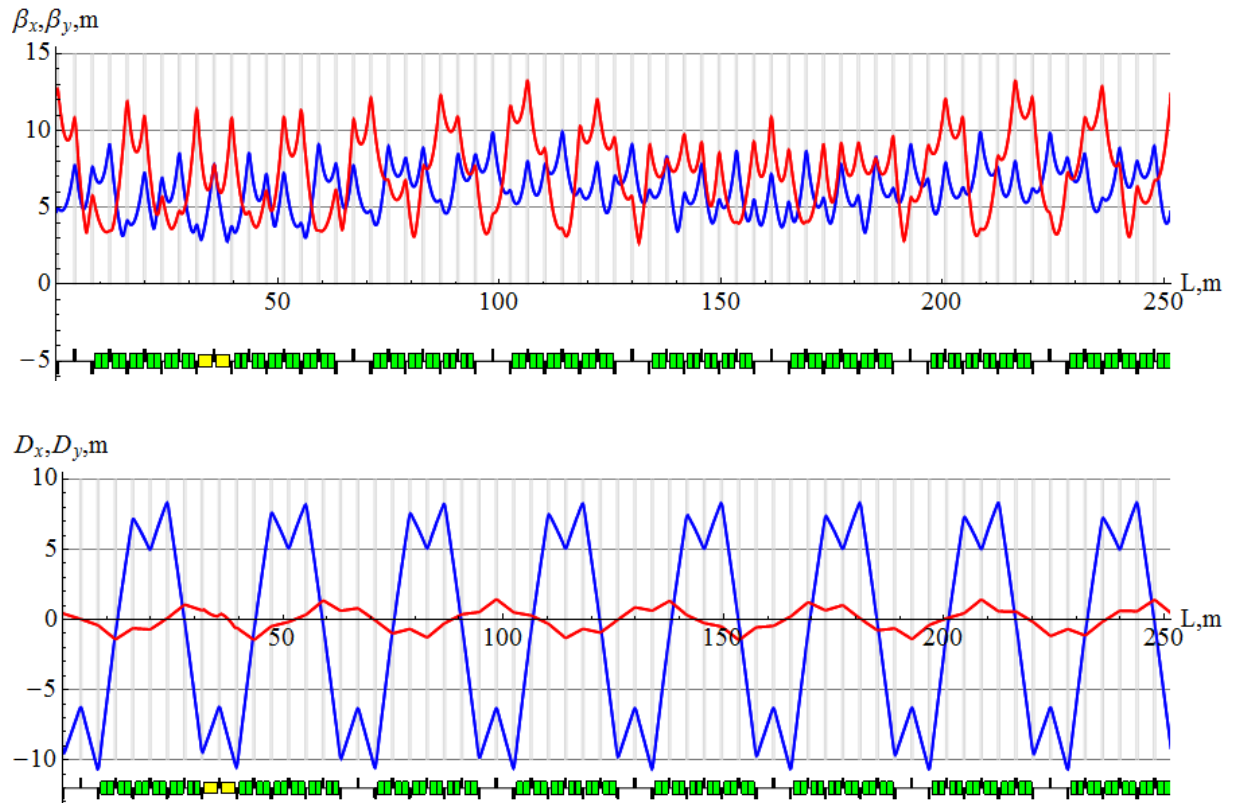


Рис. 5.7.4. β -функции и дисперсионные функции в Нуклотроне с половинной змейкой

ЛИТЕРАТУРА

- [5.1] А.А. Смирнов, А.Д. Коваленко, Нуклотрон — сверхпроводящий ускоритель ядер в ЛВЭ ОИЯИ (создание, работа и развитие) Письма ЭЧАЯ 2004 т. 1, № 6(123) с. 11-40.
- [5.2] Baldin A.M. et al., Nuclotron Status Report, IEEE Trans. on Nucl. Sci., NS-30, 4:3247 (1983).
- [5.3] Issinsky I.B., Mikhailov V.A., Shchepunov V.A., Nuclotron Lattice, Proceedings of the 2-nd EPAC, Nice, 1990, Vol. 1, p. 458.
- [5.4] Mikhailov V.A., Shchepunov V.A., Magnetic Field Correction System of Nuclotron, Proceedings of XIII Russian Conf. on Particle Accelerators, Dubna, 1992, p. 253.
- [5.5] G. Trubnikov et al., Status of the NICA project at JINR, Proceedings of IPAC2014, Dresden, Germany.
- [5.6] A. Sidorin et al, Status of the Nuclotron, Proceedings of RuPAC2014, Obninsk, 2014, p. 283.
- [5.7] Аверичев А.С. и др. Итоги 46-ого и 47-ого сеансов Нуклотрона. Сообщение ОИЯИ Р9-2013-140, Дубна, 2013.
- [5.8] Агапов Н.Н., Алфеев А.В., Андреев В.А., и др., Ход реализации проекта «Нуклотрон-М» (по итогам сеансов № 37, 38), Сообщения ОИЯИ, Р9-2009-38, Дубна 2009.
- [5.9] Аверичев А.С., Агапов Н.Н., Алфеев А.В., и др., Итоги 39-го сеанса Нуклотрона, Сообщения ОИЯИ, Р9-2009-131, Дубна 2009.
- [5.10] V.I. Chernikov, I.B. Issinsky, O.S. Kozlov, V.A. Mikhailov, S.A. Novikov, Status of the Nuclotron Slow Extraction System, Proceedings of PAC95, p. 1918.

Приложение 1

к Главе 5

П.5.1 УДАРНЫЕ МАГНИТЫ

Ударные магниты системы инъекции пучка из Бустера в Нуклотрон и системы быстрого вывода пучка из Нуклотрона аналогичны ударному магниту системы быстрого вывода пучка из Бустера. Каждый ударный магнит разбит на два криостатных модуля. Полная длина магнита — 3 м.

Криостатный модуль ударного магнита включает в себя собственно ударный магнит с опорной конструкцией, вакуумный кожух, тепловой экран, систему крепления ударного магнита, систему ввода импульсов тока на проводники, трубочные и кабельные коммуникации.

Опорная конструкция ударного магнита представляет собой цилиндрический остов. Крепление проводников ударного магнита к опорной конструкции осуществляется посредством опорных изоляторов.

Вакуумный кожух цилиндрический, с фланцами на торцах для соединения со смежными сильфонными элементами криостата Нуклотрона. Снизу имеются опоры для установки криостатного модуля на подставку. С боков имеются отверстия для тоководов.

Тепловой экран, охлаждаемый потоком кипящего азота, располагается между ударным магнитом и вакуумным кожухом. Тепловой экран имеет отверстия для креплений ударного магнита и тоководов.

Трубочные и кабельные коммуникации включают гелиевые коллекторы, трубки с жидким азотом и сверхпроводящие кабели питания магнитных элементов Нуклотрона.

Система ввода импульсов тока на проводники включает тоководы и питающие стержни. Питание проводников ударного магнита осуществляется попарно. На каждую пару проводников требуются 2 токовода и 2 вилкообразных питающих стержня. Тоководы монтируются в отверстия в тепловом экране и в вакуумном кожухе. Питающие стержни соединяют тоководы с проводниками ударного магнита.

Система крепления ударного магнита обеспечивает установку опорной конструкции с проводниками ударного магнита внутри кожуха и юстировку её положения. Крепление ударного магнита к кожуху осуществляется таким образом, что после охлаждения кольца Нуклотрона положение проводников магнита относительно кожуха остаётся неизменным.

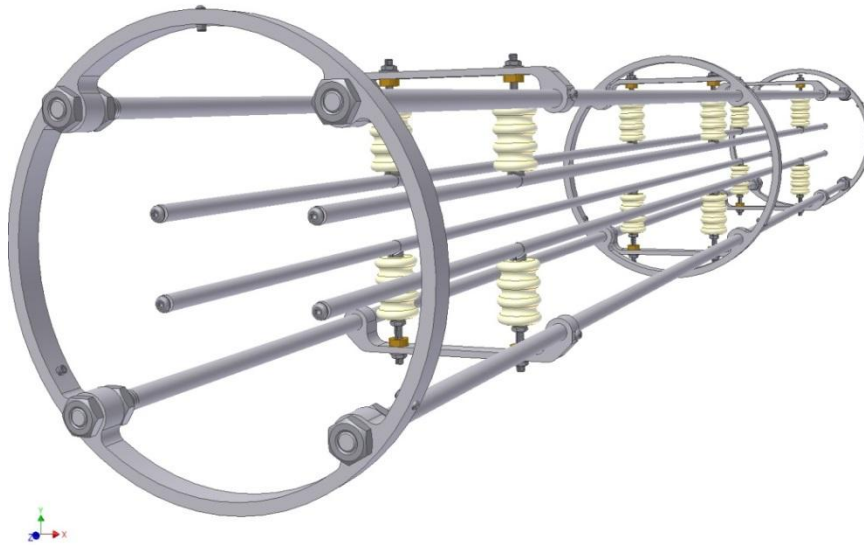


Рис. П.5.1.1. Вид ударного магнита с опорной конструкцией

Основные характеристики ударных магнитов приведены в Таблице П.5.1.1.

Таблица П.5.1.1. Основные параметры ударных магнитов

Длина проводников, мм	1400
Диаметр проводников, мм	10
Максимальный ток, кА:	
система инъекции	8
система быстрого вывода	15
Максимальное магнитное поле, Тл:	
система инъекции	0,06
система быстрого вывода	0,13
Неоднородность магнитного поля по поперечному сечению	±3 %

Приложение 2

к Главе 5

П.5.2 МАГНИТ ЛАМБЕРТСОНА СИСТЕМЫ ИНЖЕКЦИИ ПУЧКА ИЗ БУСТЕРА

Магнит Ламбертсона системы инъекции состоит из трех секций. Секция магнита Ламбертсона представляет собой дипольный магнит с двумя апертурами: областью ввода и областью циркуляции пучка. В области ввода пучка обмотками создается горизонтальное магнитное поле, отклоняющее инжектируемый пучок. Область циркуляции пучка отделена перегородкой (септумом) от области ввода, магнитное поле в области циркуляции отсутствует.

Каждая секция магнита Ламбертсона устанавливается внутри отдельного криостатного модуля. Криостатный модуль включает в себя собственно секцию магнита, вакуумный кожух, тепловой экран, систему крепления яра магнита, систему ввода тока в обмотки магнита, систему охлаждения яра магнита, трубочные и кабельные коммуникации.

Вакуумный кожух цилиндрический, с фланцами на торцах для соединения со смежными переходными сильфонными элементами криостата Нуклотрона. Снизу имеются опоры для установки криостатного модуля на подставку. В верхней стенке вакуумного кожуха секции № 1 имеются патрубки для установки высокотемпературных сверхпроводящих тоководов.

Тепловой экран, охлаждаемый потоком кипящего азота, располагается между секцией магнита и вакуумным кожухом. Тепловой экран имеет отверстия для креплений секции магнита. Тепловой экран секции № 1 также имеет отверстия для сверхпроводящего кабеля питания.

Трубочные и кабельные коммуникации включают гелиевые коллекторы, трубки с жидким азотом и сверхпроводящие кабели электрической связи магнитных элементов Нуклотрона.

Система ввода тока в обмотки магнита включает тоководы, сверхпроводящие кабели и трубки с двухфазным гелием. Тоководы монтируются в патрубки вакуумного кожуха секции № 1. Сверхпроводящие кабели обеспечивают последовательное соединение тоководов и обмоток магнита Ламбертсона. Трубки с гелием служат для подачи двухфазного гелия в охлаждающие каналы сверхпроводящего кабеля из прямого коллектора и его возврата в обратный коллектор.

Система охлаждения яра магнита состоит из общей для всех секций магнита Ламбертсона трубки с двухфазным гелием, охлаждающей яра секций магнита контактным путём. Подключение трубки к прямому и обратному гелиевым коллекторам осуществляется на входе и выходе магнита Ламбертсона соответственно.

Система крепления яра магнита обеспечивает установку секции магнита внутри кожуха и юстировку его положения. Крепление секции магнита к кожуху осуществляется таким образом, что после охлаждения кольца Нуклотрона положение секции магнита относительно кожуха остаётся неизменным.

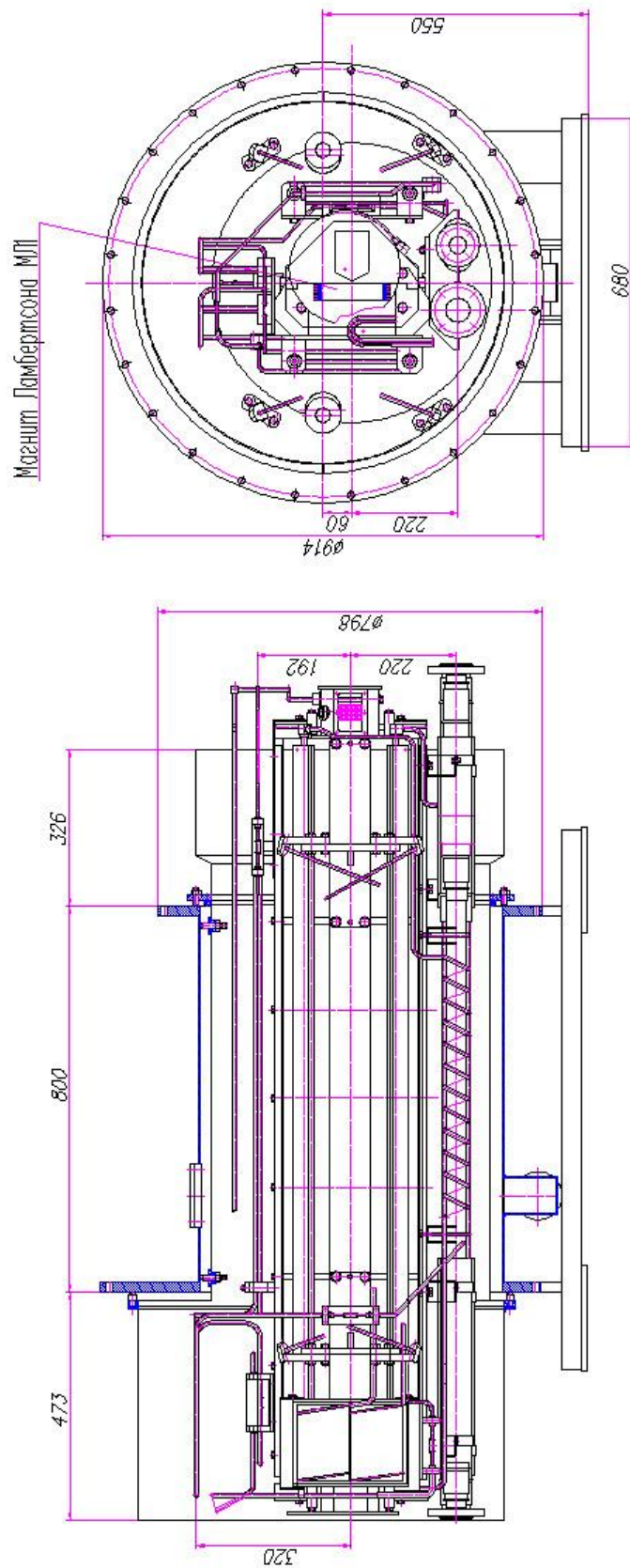


Рис. П.5.2.2. Криостатный модуль существующего аналога секции № 3 магнита Ламбертсона

Основные характеристики магнита Ламбертсона приведены в Таблице П.5.2.1.

Таблица П.5.2.1. Основные параметры магнита Ламбертсона системы инъекции

Длина, мм:	
секция № 1	1
секция № 2	1,5
секция № 3	0,5
Толщина септума, мм:	
секция № 1	15
секция № 2	15
секция № 3	5
Максимальный ток, А	400
Максимальное магнитное поле, Тл:	
секция № 1	1,2
секция № 2	1,2
секция № 3	1

Приложение 3 к Главе 5

П.5.3 МАГНИТ ЛАМБЕРТСОНА СИСТЕМЫ БЫСТРОГО ВЫВОДА

Магнит Ламбертсона системы быстрого вывода пучка аналогичен магниту Ламбертсона системы медленного вывода пучка. Магнит Ламбертсона системы быстрого вывода состоит из двух секций. Каждая секция магнита Ламбертсона устанавливается внутри отдельного криостатного модуля. Криостатный модуль включает в себя собственно секцию магнита, вакуумный кожух, тепловой экран, систему крепления ярма магнита, систему электрической связи обмоток магнита, систему охлаждения ярма магнита, трубочные коммуникации.

Вакуумный кожух цилиндрический, с фланцами на торцах для соединения со смежными переходными сильфонными элементами криостата Нуклотрона. Снизу имеются опоры для установки криостатного модуля на подставку.

Тепловой экран, охлаждаемый потоком кипящего азота, располагается между секцией магнита и вакуумным кожухом. Тепловой экран имеет отверстия для креплений секции магнита.

Трубочные коммуникации включают гелиевые коллекторы и трубки с жидким азотом.

Система электрической связи обмоток магнита включает сверхпроводящие кабели и трубки с двухфазным гелием. Сверхпроводящие кабели обеспечивают последовательное включение обмоток магнита Ламбертсона в цепь питания структурных магнитных элементов Нуклотрона. Трубки с гелием служат для подачи двухфазного гелия в охлаждающие каналы сверхпроводящего кабеля из прямого коллектора и его возврата в обратный коллектор.

Система охлаждения ярма магнита состоит из общей для всех секций магнита Ламбертсона трубки с двухфазным гелием, охлаждающей ярма секций магнита контактным путём. Подключение трубки к прямому и обратному гелиевым коллекторам осуществляется на входе и выходе магнита Ламбертсона соответственно.

Система крепления ярма магнита обеспечивает установку секции магнита внутри кожуха и юстировку его положения. Крепление секции магнита к кожуху осуществляется таким образом, что после охлаждения кольца Нуклотрона положение секции магнита относительно кожуха остаётся неизменным.

Основные характеристики магнита Ламбертсона приведены в Таблице П.5.3.1.

Таблица П.5.3.1. Основные параметры магнита Ламбертсона системы быстрого вывода

Длина, мм:	
секция № 1	0,5
секция № 2	2,5
Толщина септума, мм:	
секция № 1	5
секция № 2	10
Максимальный ток, кА	6
Максимальное магнитное поле, Тл:	
секция № 1	1
секция № 2	1,6