

ОБЪЕДИНЕННЫЙ ИНСТИТУТ ЯДЕРНЫХ ИССЛЕДОВАНИЙ  
ЛАБОРАТОРИЯ ЯДЕРНЫХ РЕАКЦИЙ  
им. Г.Н. Флерова

*На правах рукописи*

Гикал Борис Николаевич

Новое поколение циклотронов тяжелых ионов для  
прикладных исследований и промышленного применения

Специальность 01.04.20 - физика пучков заряженных частиц и ускорительная техника

Диссертация на соискание ученой степени  
доктора технических наук

Дубна 2013

## Оглавление

<b>ВВЕДЕНИЕ</b>	3
<b>ГЛАВА 1. УСКОРИТЕЛИ ТЯЖЕЛЫХ ИОНОВ ДЛЯ ПРИКЛАДНЫХ ИССЛЕДОВАНИЙ И ПРОМЫШЛЕННОГО ПРИМЕНЕНИЯ.</b>	16
<b>1.1 Краткий обзор ускорителей, применяемых для производства трековых мембран и модификации материалов</b>	16
<b>1.2 Тенденции развития компактных циклотронов тяжелых ионов</b>	17
<b>1.3 Развитие циклотронов тяжелых ионов для прикладных задач в ЛЯР</b>	23
<b>ГЛАВА 2. КОНЦЕПЦИЯ ПРОЕКТИРОВАНИЯ ЦИКЛОТРОНОВ ТЯЖЕЛЫХ ИОНОВ ДЛЯ ПРИКЛАДНЫХ ЗАДАЧ И ПРОМЫШЛЕННОГО ПРИМЕНЕНИЯ</b>	25
<b>2.1 Ионный источник</b>	27
2.1.1 Конструкция и параметры ионных источников.	31
2.1.2 ЭЦР источники ЛЯР для циклотронов тяжелых ионов.	
<b>2.2 Аксиальная инжекция пучка</b>	34
2.2.1 Принципы выбора параметров системы аксиальной инжекции	34
2.2.2 Центр циклотрона	40
2.2.3 Система банчировки пучка ионов в каналах аксиальной инжекции циклотронов.	42
<b>2.3 Магнитная структура циклотронов</b>	49
2.3.1 Выбор магнитной структуры и способа шиммирования	50
2.3.2 Влияние фокусирующего магнитного канала на магнитное поле циклотрона.	55
2.3.3 Влияние свойств конструктивных элементов магнитной структуры циклотрона на магнитное поле.	61
<b>2.4 Высокочастотная ускоряющая система</b>	65
2.4.1 Выбор основных параметров высокочастотной системы	65
2.4.2 Конструкция основных узлов резонансной системы циклотрона	75
<b>2.5 Система вывода пучка из циклотрона</b>	77
2.5.1 Особенности вывода пучка тяжелых ионов низкой энергии методом перезарядки	77
2.5.2 Вывод пучка с использованием электростатического дефлектора	79
<b>2.6. Вакуумная система циклотрона</b>	85
2.6.1 Исходные данные и требования к вакуумной системе циклотрона тяжелых ионов	85
2.6.2 Структура вакуумной системы циклотрона, выбор оборудования и технологий.	88
<b>2.7. Выходы нейтронов и гамма-квантов из конструкционных металлов при бомбардировке тяжелыми ионами с энергией до 2,5 МэВ/нуклон</b>	91
2.7.1 Расчет выходов нейтронов и гамма-квантов	91
2.7.2 Экспериментальные исследования выходов нейтронов из конструкционных металлов при бомбардировке тяжелыми ионами с энергией 2,5 МэВ/нуклон	96
<b>ГЛАВА 3. МОДЕРНИЗИРОВАННЫЙ ЦИКЛИЧЕСКИЙ ИМПЛАНТАТОР ТЯЖЕЛЫХ ИОНОВ ИЦ-100</b>	101
<b>3.1 Описание и основные параметры циклического имплантатора ИЦ-100</b>	101
<b>3.2 Система аксиальной инжекции пучка из ЭЦР источника ионов.</b>	107
<b>3.3 Ускорение пучка ионов в циклотроне</b>	113
<b>3.4 Система вывода пучка ионов из циклотрона ИЦ-100</b>	117
<b>3.5 Канал транспортировки пучка и установка для облучения полимерной пленки.</b>	120

	<b>ГЛАВА 4. ЦИКЛОТРОН ТЯЖЕЛЫХ ИОНОВ ДЦ-60</b>	131
<b>4.1</b>	<b>Общее описание и компоновка циклотрона ДЦ-60</b>	131
<b>4.2</b>	<b>ЭЦР источник</b>	135
<b>4.3</b>	<b>Система аксиальной инжекции пучка</b>	136
<b>4.4</b>	<b>Магнитная структура</b>	140
	4.4.1 Расчет и моделирование магнитной структуры	141
	4.4.2 Измерения и формирование магнитного поля циклотрона	146
<b>4.5</b>	<b>Динамика пучка в процессе ускорения в изохронном циклотроне ДЦ-60</b>	154
<b>4.6</b>	<b>Система вывода пучка</b>	159
<b>4.7</b>	<b>Система транспортировки пучков ионов</b>	167
	4.7.1 Каналы транспортировки пучков ускоренных ионов	167
	4.7.2 Канал для прикладных исследований на пучках ионов низких энергий	170
<b>4.8</b>	<b>Вакуумная система циклотронного комплекса тяжелых ионов ДЦ-60</b>	171
	4.8.1 Численное моделирование процесса перезарядки ионов на остаточном газе	171
	4.8.2 Система вакуумной откачки циклотронного комплекса	175
	4.8.3 Параметры вакуумной системы, полученные после завершения пусковых работ	185
<b>4.9</b>	<b>Система контроля и управления</b>	187
<b>4.10</b>	<b>Исследование режимов ускоренных пучков</b>	188
	4.10.1 Ускорение ионов криптона $^{84}\text{Kr}^{+12}$ до энергии 1 МэВ/нуклон	190
	4.10.2 Ускорение ионов азота $^{14}\text{N}^{+2}$ до энергии 1 МэВ/нуклон	191
	4.10.3 Ускорение ионов азота $^{14}\text{N}^{+2}$ до энергии 1.32 МэВ/нуклон	193
	4.10.4 Ускорение ионов аргона $^{40}\text{Ar}^{+5}$ до энергии 0.58 МэВ/нуклон	196
	4.10.5 Ускорение ионов азота $^{40}\text{Ar}^{+7}$ до энергии 1.14 МэВ/нуклон	198
	4.10.6 Ускорение ионов азота $^{40}\text{Ar}^{+4}$ до энергии 0.65 МэВ/нуклон	200
	<b>ГЛАВА 5. ЦИКЛОТРОННЫЙ КОМПЛЕКС ТЯЖЕЛЫХ ИОНОВ ДЦ-110</b>	203
<b>5.1</b>	<b>Источник ионов</b>	203
<b>5.2</b>	<b>Система аксиальной инжекции пучка</b>	206
<b>5.3</b>	<b>Магнитная структура циклотрона</b>	210
	5.3.1 Магнит циклотрона	210
	5.3.2 Магнитное поле циклотрона	212
	5.3.3 Динамика движения пучка в процессе ускорения	214
<b>5.4</b>	<b>Система вывода пучка</b>	218
<b>5.5</b>	<b>Высокочастотная система циклотрона</b>	220
<b>5.6</b>	<b>Каналы пучков и установка для облучения полимерной пленки</b>	222
<b>5.7</b>	<b>Вакуумная система ускорительного комплекса</b>	224
	5.7.1 Расчет требований и основных параметров вакуумной системы циклотрона	225
	5.7.2 Экспериментальные параметры вакуумной системы	229
<b>5.8</b>	<b>Режимы работы циклотрона и ускоренные ионы</b>	230
	5.8.1 Коррекция вертикального положения пучка в системе вывода из циклотрона	230
	5.8.2 Экспериментальные исследования и оптимизация режима ускорения	234
	<b>ЗАКЛЮЧЕНИЕ</b>	242
	<b>(Основные результаты, полученные в диссертационной работе)</b>	
	<b>ЛИТЕРАТУРА</b>	245

## **ВВЕДЕНИЕ**

### **Научные и прикладные аспекты использования пучков тяжелых ионов в области нанотехнологий.**

Ионные треки экспериментально были обнаружены более 40 лет тому назад. Быстрые ионы с кинетической энергией в несколько МэВ/нуклон имеют высокую скорость выделения энергии по длине пробега иона в веществе до нескольких МэВ/мкм. Это вызывает электронное возбуждение атомов и инициирует ряд специфических «эффектов» радиационного повреждения, таких как, например, формирование ионных треков, в области которых могут развиваться процессы локального плавления, аморфизации, создания необычных фаз (фазы высокого давления), а также генерация ударных волн и разрушение материала [1, 2, 3].

С помощью пучков тяжелых ионов удается изменять свойства поверхности материала и его слоев на глубину вплоть до нескольких десятков микрон. Уже сегодня пучки тяжелых ионов широко используются в электронной промышленности для легирования полупроводниковых материалов. Таким путем можно внедрять атомы любого элемента в любой заданный материал и создавать аморфные и диэлектрические слои в полупроводниках.

В промышленных процессах используются тяжелые ионы как с низкой энергией 10-100 кэВ на заряд, так и ускоренные до энергий 1 - 4 МэВ/нуклон.

Практическое внедрение технологий с использованием тяжелых ионов сдерживается, прежде всего, малочисленностью специализированных ускорителей промышленного применения, а также недостаточной изученностью физических процессов взаимодействия тяжелых ионов с твердыми телами.

Разработка и внедрение в практику новых «ядерных технологий», использующих высокоэнергетичные тяжелые ионы, идет по четырем основным направлениям:

- теоретические и экспериментальные исследования физики радиационного повреждения,
- радиационные эффекты от единичных актов взаимодействия высокоэнергетичных ионов с твердым телом,
- радиационно-ионная и ионно-трековая модификация материалов применительно к нанотехнологиям,
- разработка и создание специализированных комплексов на базе ускорителей тяжелых ионов промышленного применения.

### **Создание нано- и микроструктур**

Нанокристаллические материалы представляют собой особое состояние конденсированного вещества – макроскопические ансамбли ультрамалых частиц с размерами до нескольких нанометров. Необычные свойства этих материалов обусловлены как особенностями отдельных наноструктур (нанокристаллитов), так и их коллективным поведением, зависящим от характера взаимодействия между наночастицами. Нанокристаллические материалы находят широкое применение в различных областях, включая биомедицину, химию, физику, электронику и материаловедение [5-6].

В соответствии с этим приобретают важность работы с использованием ускорительной базы по следующим направлениям:

- ионно-имплантационный синтез наноразмерных кластерных структур (радиационных дефектов и фаз выделений) в объеме твердого тела;

- формирование металлических наноструктур (нанопроволочки и субмикронные трубочки, нанокластеры на поверхности твердых тел), с использованием «шаблонной» технологии на базе трековых мембран [7-10].

### **Ионно-имплантационная нанотехнология**

По этому направлению развиваются работы, связанные с поиском новых современных технологий для управления свойствами твердых тел (полупроводники, металлы, полимеры и т.д.), основанные на формировании и синтезе в их объеме наноразмерных многокомпонентных фаз выделений, кристаллитов, дефектных структур. Это направление в настоящее время составляет одну из главных проблем ведущих технологических центров мира, работающих в области нанотехнологий. Особое место в этих исследованиях занимают эффекты самоорганизации наночастиц в условиях ионной имплантации, позволяющие обойти значительные технологические сложности квантовой инженерии. Основное направление подобных работ – формирование и синтез в объеме различных твердых тел наноразмерных трехмерных структур с высокой объемной плотностью, в идеальном случае – это формирование в объеме твердого тела упорядоченной решетки из нанообразований [11-13].

### **Формирование и использование ядерных треков в твердых телах**

В последнее время проявляется повышенный интерес к использованию ядерных треков для формирования одномерных (с высоким базовым размерным отношением) наноструктур из различных материалов, в частности, из металлов и сплавов в виде нанопроволочек и микротрубочек, с помощью так называемой шаблонной технологии. С этой целью рассматривается возможность использования травленных в качестве матрицы-шаблона ядерных треков в полимерных материалах. Эту методику можно рассматривать как альтернативу литографическому методу.

Производство таких субмикронных объектов весьма перспективно, например, в области микромеханики, где высокие значения поперечного размера по отношению к продольному являются определяющими. Получение реплик с травленных треков путем гальванического осаждения в них металлов можно считать первым шагом для развития микротехнологий на базе трековых мембран.

К настоящему времени разработана технология изготовления трековых мембран с диаметром пор от нескольких нанометров до десятков микрон, различных геометрических форм: цилиндрические, конические, «песочные часы» и т.п.

Нанопроволочные и микротрубочные структуры формируются заполнением пористой матрицы трековых мембран различными материалами. Процесс заполнения осуществляется электрохимическим или химическим осаждением, внедрением жидкого материала при высоком давлении [14-18].

### **Производство трековых мембран с использованием ускорителей тяжелых ионов.**

Получение трековых мембран с помощью ускорителей тяжелых ионов – одно из важнейших современных направлений применения ядерных технологий. Ядерные мембраны («ядерные фильтры», «трековые мембраны») – это особый вид ультра- и микрофильтрационных мембран, получаемых из тонких полимерных пленок путем облучения высокоэнергетичными тяжелыми заряженными частицами и последующего химического травления [19,20]. Изначально производство трековых мембран базировалось на облучении полимерных пленок осколками деления урана. Фирма Nuclepore выпускала мембраны на основе поликарбонатных пленок толщиной 6-12 мкм, которые подвергались

обработке в канале ядерного реактора, где урановая мишень служила источником осколков. «Реакторный» метод облучения имеет ряд недостатков:

1) часть осколков не пробивает пленку насквозь и останавливается в ее толще, что приводит к радиоактивному загрязнению. Поэтому дальнейшая химическая обработка не может проводиться непосредственно после облучения; необходима «выдержка» облученной пленки в течение нескольких месяцев, чтобы распались наиболее короткоживущие изотопы имплантированных в пленку радиоактивных атомов. Эта проблема особенно неприятна при высокой плотности треков ( $10^9 \text{ см}^{-2}$  и более). Наличие радиоактивности в отходах химического травления существенно усложняет всю технологическую цепочку.

2) пробег «тяжелой» группы осколков деления составляет в большинстве полимеров не более 10-12 мкм. В связи с этим метод не может быть применен к пленкам большей толщины.

3) осколки деления имеют изотропное угловое распределение, и поэтому их трудно применить в случаях, когда необходимо иное угловое распределение. Для создания массива параллельных треков требуется коллимирование, снижающее интенсивность исходного пучка на несколько порядков.

С течением времени «реакторный» метод облучения был практически полностью вытеснен «ускорительным». Ассортимент трековых мембран на мировом рынке включает поликарбонатные и полиэтилентерефталатные мембраны с толщинами от 6 до 20 мкм. Для ряда применений трековые мембраны толщиной 20 мкм признаны более перспективными. Их производство стало возможным лишь при использовании пучков ускоренных ионов с энергиями не ниже 1,5 МэВ/нуклон.

### **Особенности получения и свойства трековых мембран на основе различных полимеров**

Мембраны на основе поликарбоната (ПК) и полиэтилентерефталата (ПЭТФ) являются в настоящее время коммерческими продуктами. Технология их производства хорошо отработана. Для облучения ПЭТФ пленок применяют ускоренные ионы с удельными потерями энергии  $dE/dx$  на уровне 6-10 МэВ/мкм. В указанном диапазоне  $dE/dx$  скорость травления треков в ПЭТФ принимает максимальные значения [10]. Пучки ионов Кг с энергиями около 1 и 1,5 МэВ/нуклон могут считаться оптимальными для бомбардировки ПЭТФ пленок толщиной 10 и 20 мкм, соответственно. Поликарбонат более чувствителен к радиационным воздействиям, вследствие чего для производства трековых мембран из ПК пленок могут применяться более легкие ионы, например Ar [10]. Химическое травление облученных ионами ПЭТФ и ПК пленок проводят в растворах щелочи. Варьируя условия химической обработки, получают мембраны с диаметрами пор от  $\sim 0,01$  мкм до 10-12 мкм. Данный тип мембран остается на мировом рынке уникальным в плане точности геометрического размера пор и узкого распределения пор по размерам. Их области применения связаны в основном с аналитическими приложениями, а также биологическими и медицинскими задачами. Мембраны характеризуются умеренной химической стойкостью и неплохой теплостойкостью (до 120-150°C).

Для фильтрации агрессивных технологических сред были разработаны трековые мембраны из полипропилена и поливинилиденфторида [21,22]. Эти полимеры отличаются высокой химической стойкостью, что позволяет использовать мембраны для очистки растворов крепких минеральных кислот и щелочей. С другой стороны, это же свойство существенно усложняет технологию травления. Химическое проявление треков проводится в растворах сильных окислителей при высоких температурах. Технические сложности, высокая токсичность отходов и конкуренция с другими типами химически стойких фильтрующих материалов не позволили к настоящему времени организовать промышленное производство трековых мембран из полипропилена или поливинилиденфторида. Аналогичная ситуация имеет место в случае полиимидных мембран. Полиимид является чрезвычайно перспективным материалом, производство и потребление которого быстро

растут. На основе полиимида были разработаны трековые мембраны с уникальной термической и радиационной стойкостью [23]. Удовлетворительное качество мембран достигается лишь при облучении достаточно тяжелыми ионами (не легче криптона). Массовое производство этих типов трековых мембран может быть налажено при появлении достаточно крупного потребителя.

### Выбор энергии ионов для облучения полимерной пленки

Размер и форма пор трековой мембраны полностью определяется химическим процессом обработки облученной тяжелыми ионами полимерной пленки. Однако сам процесс зависит от массы ионов пучка, используемого для облучения. Если не рассматривать подробности химического процесса, можно сформулировать основной принцип – чем тяжелее ионы, тем короче процесс химической обработки и лучше качество получаемых фильтров. В некоторых случаях могут быть использованы ионы Ar, для большинства задач достаточно использовать пучок ионов Kr, а, например, при производстве особых химически стойких трековых мембран необходимо производить облучение ионами Xe.

Энергия ионов определяется толщиной полимерной пленки. Длина пробега иона в веществе должна быть не меньше толщины пленки. Однако нужно принимать во внимание, что во многих случаях используется облучение ионами под углом к поверхности пленки, чтобы избежать проблемы сдвоенных пор. В этом случае нужно учитывать не толщину пленки, а реальную длину трека иона [24] (рис. 0.1).

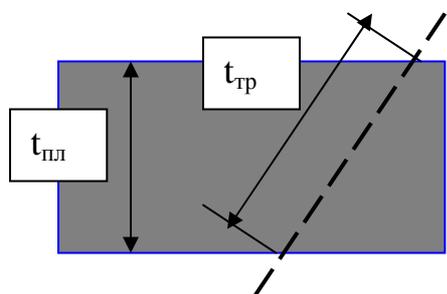


Рис. 0.1. Длина пробега иона через пленку.

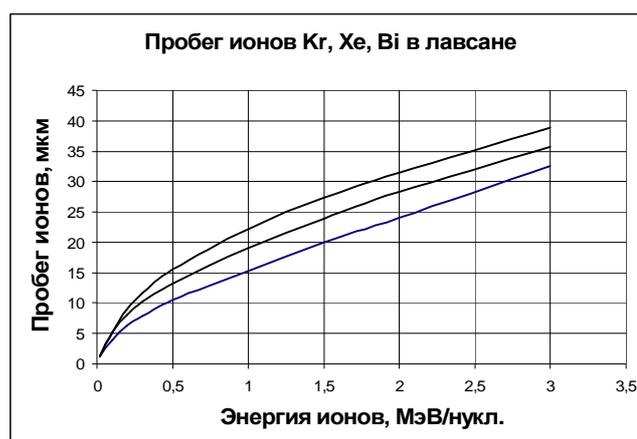


Рис. 0.2. Длина пробега иона в полимере.

Длина пробега ионов через полимерную пленку не сильно зависит от массы иона рис. 0.2. В таблице 0.1 приведены значения минимальной энергии ионов для производства трековых мембран из пленки наиболее распространенных типовых толщин.

Таблица 0.1. Минимальная энергия ионов, необходимая для облучения полимерной пленки при производстве трековых мембран.

Толщина пленки		12 мкм	19 мкм	21 мкм	30 мкм
Энергия ионов при перпендикулярном облучении	<b>Kr</b> (МэВ/нукл)	0,7	1,4	1,6	2,7
	<b>Xe</b> (МэВ/нукл)	0,4	1,0	1,2	2,2
Энергия ионов при облучении под углом 15°	<b>Kr</b> (МэВ/нукл)	0,75	1,45	1,66	2,8
	<b>Xe</b> (МэВ/нукл)	0,45	1,05	1,25	2,3
Энергия ионов при облучении под углом 30°	<b>Kr</b> (МэВ/нукл)	1,0	1,8	2,0	3,2
	<b>Xe</b> (МэВ/нукл)	0,6	1,25	1,5	2,7

Результаты фундаментальных и прикладных исследований на пучках тяжелых ионов низких и средних энергий, полученные в последнее время, убедительно свидетельствуют об актуальности и перспективности этого направления ядерной физики. Ведущие ядерно-физические центры (ОИЯИ; ИЯФ, Казахстан; ГСИ, Германия; ГАНИЛ, Франция; РИКЕН, Япония и др.) осуществляют программные исследования, направленные на получение новых экспериментальных данных, объясняющих механизмы взаимодействия тяжелых ионов с различными материалами и создающих достаточные предпосылки для использования тяжелых ионов в наукоемких технологиях. Однако промышленное применение тяжелых ионов в производственных процессах требует создания специализированных ускорителей, отличающихся высокой надежностью, простотой в обслуживании, стабильностью параметров, длительным временем непрерывной работы. Начиная с 1980-х годов в Лаборатории ядерных реакций ОИЯИ ведутся разработки ускорителей для производства трековых мембран и прикладных исследований [25-32].

Современные достижения в развитии циклотронов тяжелых ионов и прежде всего в создании источников ионов электронно-циклотронного резонанса позволили разработать концепцию проектирования циклотронов тяжелых ионов нового поколения для промышленного применения и исследований в области нанотехнологий. Базовая конструкция системы аксиальной инжекции пучка в циклотрон тяжелых ионов У-200, созданная в ЛЯР, стала основой для создания подобных систем на других ускорителях лаборатории.

В диссертационной работе приводятся основные принципы проектирования и параметры специализированных циклотронов ИЦ-100, ДЦ-60 и ДЦ-110 с внешней инжекцией пучка из ЭЦР источника, созданных в ЛЯР ОИЯИ для производства трековых мембран и прикладных исследований.

Диссертация выполнена в Лаборатории ядерных реакций ОИЯИ в соответствии с Проблемно-тематическим планом научно-исследовательских работ и международного сотрудничества Объединенного института ядерных исследований. В нее вошел цикл работ, выполненных и опубликованных автором начиная с 1982 г. и до настоящего времени.

## **Актуальность**

Изучение фундаментальных физических процессов взаимодействия частиц с твердым телом является определяющей основой их практического использования для радиационно-ионной модификации материалов.

В физике тяжелых ионов сформировалось направление научно-прикладных исследований, в основе которого лежит изучение взаимодействия ускоренных тяжелых ионов с веществом. Получение трековых мембран с помощью ускорителей тяжелых ионов является одним из важнейших направлений применения ядерных технологий. Тяжелые ионы успешно используются для модификации полимеров – немембранные технологические применения в био- и медтехнике.

Исследования по модификации материалов тяжелыми ионами, а также производство трековых мембран, получили широкое развитие в крупнейших ядерно-физических центрах США, Франции, Германии, Японии и других стран. Большинство работ в этой области выполнены на мощных ускорителях, разработанных прежде всего для выполнения широкого спектра фундаментальных научных исследований.

В настоящее время особенно актуальна задача создания специализированных ускорителей тяжелых ионов, позволяющих внедрять наукоемкие технологии путем прямого применения ускорителей в технологических процессах. В Лаборатории ядерных реакций ОИЯИ выполнена целевая программа по разработке специализированных циклотронов тяжелых ионов для производства трековых мембран и прикладных исследований.

Современные достижения в развитии циклотронов тяжелых ионов и прежде всего в создании источников ионов электронно-циклотронного резонанса (ЭЦР) позволили разработать концепцию проектирования циклотронов тяжелых ионов нового поколения для промышленного применения и исследований в области нанотехнологий. В диссертационной работе приводятся основные принципы проектирования и параметры специализированных циклотронов ИЦ-100, ДЦ-60 и ДЦ-110 с внешней инжекцией пучка из ЭЦР источника, созданных в ЛЯР ОИЯИ для производства трековых мембран и прикладных исследований.

### **Цель работы.**

Разработка физических принципов и технических решений для создания специализированных циклотронов тяжелых ионов нового поколения с системой аксиальной инжекции из внешних источников ионов типа ЭЦР для исследований и промышленного применения в области нанотехнологий с использованием пучков ионов с энергией до 2,5 МэВ/нуклон.

Разработка базовой конструкции системы аксиальной инжекции пучка ионов в циклотрон из внешнего источника, изготовление, монтаж и тестирование на циклотроне У-200.

Разработка и выполнение проекта глубокой модернизации циклического имплантатора ИЦ-100 путем создания системы аксиальной инжекции пучка из внешнего сверхпроводящего источника ионов, реконструкции всех систем циклотрона в соответствии с новой концепцией, создание специализированного канала и установки для проведения исследований и облучения полимерной пленки с использованием пучков ионов от неона до вольфрама с энергией 1-1,2 МэВ/нуклон.

Создание специализированных циклотронных комплексов ДЦ-60 и ДЦ-110 для производства трековых мембран и использования в области нанотехнологий.

### **Научная новизна и практическая ценность:**

1. Разработана концепция нового поколения специализированных циклотронов тяжелых ионов на энергию до 2,5 МэВ/нуклон с использованием системы аксиальной инжекции пучка из внешних источников ионов типа ЭЦР.
2. Впервые в отечественных научных центрах и центрах стран-участниц ОИЯИ создана система аксиальной инжекции пучка ионов в циклотрон, которая стала концептуальным решением для разработки подобных систем на циклотронах тяжелых ионов ЛЯР.
3. Разработан и выполнен проект глубокой модернизации первого в мире специализированного циклотрона тяжелых ионов ИЦ-100. Произведен переход от внутреннего источника ионов типа РIG к системе внешней инжекции из ЭЦР источника. Получены пучки ускоренных ионов неона, аргона, железа, криптона, йода, ксенона, вольфрама с энергией 1-1,2 МэВ/нуклон, которые используются для производства трековых мембран и исследований в области физики твердого тела.
4. Впервые разработан и создан специализированный циклотронный комплекс тяжелых ионов ДЦ-60 с плавной вариацией энергии для научно-прикладных исследований и промышленного применения в области нанотехнологий. Разработан и применен комплексный метод для формирования магнитной системы изохронного циклотрона ДЦ-60. Разработана и создана магнитная система многофункционального изохронного циклотрона ДЦ-60 для ускорения ионов с энергией от 0,35 до 1,77 МэВ/нуклон. Магнитная структура циклотрона позволяет за счет изменения магнитного поля плавно варьировать энергию ускоренных пучков ионов в пределах  $\pm 25\%$  от номинальной. Циклотрон создан для Университета им. Л.Н.Гумилева в Астане. На циклотроне ведутся прикладные исследования, обучаются студенты и аспиранты. Налажено серийное облучение полимерной пленки для производства трековых мембран.

5. Впервые разработан и создан специализированный высокоинтенсивный циклотрон ДЦ-110, на котором получены пучки ускоренных ионов Ar, Kr, Xe с энергией 2,5 МэВ/нуклон и интенсивностью свыше 10 мкА. Ускоритель способен облучать более 2 миллионов квадратных метров полимерной пленки в год для изготовления трековых мембран. ДЦ-110 входит в состав промышленного комплекса «БЕТА», созданного для производства каскадных плазмаферезаторов крови на основе технологии трековых мембран.

### **Сведения о практическом применении**

1. На циклотроне У-200 ЛЯР создана система аксиальной инжекции пучка, которая послужила базовой конструкцией при создании подобных систем на циклотронах У-400, МЦ-400, ИЦ-110, ДЦ-60 и ДЦ-110.
2. Выполнена глубокая модернизация циклического имплантатора ИЦ-100, на котором ведутся научно-прикладные исследования и облучение полимерной пленки в промышленных масштабах на пучках ионов от неона до висмута.
3. Разработанный в ЛЯР циклотронный комплекс ДЦ-60 установлен в научно-исследовательском центре МНИК при Евразийском национальном университете им. Л.Н.Гумилева (г. Астана, Казахстан). На пучках циклотрона ведутся прикладные исследования, обучаются студенты и аспиранты. Налажено серийное облучение полимерной пленки для производства трековых мембран.
4. Циклотронный комплекс ДЦ-110 установлен и запущен в эксплуатацию в НПК «БЕТА» (г. Дубна, Россия). Циклотрон используется на стадии облучения полимерной пленки в технологическом процессе производства плазмаферезаторов крови.

### **Апробация работы и публикации**

Научные результаты, изложенные в диссертации, опубликованы в виде препринтов ОИЯИ, в журналах ЖТЭФ, «Nucl. Phys.», «Письма в ЭЧАЯ», «Атомная энергия», ПТЭ, в трудах российских и международных конференций: 10-е Всесоюзное совещание по ускорителям заряженных частиц, 11-е Международное совещание по применению ускорителей заряженных частиц в промышленности и медицине, ЕСРМ 2006, XIV научно-техническая конференция «Вакуумная наука и техника», 18<sup>th</sup> International conference on cyclotrons and their applications, RUPAC 2012, 3-я международная научная конференция «Ядерная и радиационная физика», IX и X Международные семинары по проблемам ускорителей заряженных частиц памяти В.П.Саранцева и др.

Общее число публикаций по теме диссертации 69 из них в рецензируемых журналах – 19 [27, 28, 44, 45, 78, 79, 81, 83, 86, 88, 95, 107, 137, 171, 175, 179, 180, 186, 187] в трудах российских и международных конференций – 27 [4, 9, 29, 30, 32, 41, 57, 60, 62, 65, 70, 75, 76, 82, 97, 111, 115, 126, 138, 140, 157, 158, 162, 181, 182, 184, 185], получен один патент на изобретение [145].

### **Основные результаты диссертационной работы докладывались на конференциях:**

1. Ю.Б.Виноградов, Б.Н.Гикал, Г.Г.Гульбекян, А.И.Иваненко, Д.И.Калчев, И.В.Колесов, В.Б.Кутнер, В.Н.Мельников, Р.Ц.Оганесян, В.А.Чугреев // Система аксиальной инжекции ионов в циклотрон У-200. 10-е Всесоюзное совещание по ускорителям заряженных частиц. Дубна, 1987. Т.2. С. 143-146.
2. O.Borisov, B.Gikal, G.Gulbekyan, I.Ivanenko, I.Kalagin. Optimization of the axial injection system for U400 cyclotron (linear buncher) // Proceedings of EPAC 2000, Vienna, Austria. – P.1468-1470.
3. А.Н.Сисакян, М.Г.Иткис, С.Н.Дмитриев, Б.Н.Гикал, В.Ф.Реутов, К.К.Кадыржанов, В.С.Школьник, А.А.Арзуманов. Перспективы развития фундаментальных и прикладных

- исследований на пучках тяжелых ионов низких и средних энергий // Материалы 3-й международной научной конференции «Ядерная и радиационная физика», 4-7 июня 2001, Алматы, Казахстан, Тезисы. – Алматы: Институт ядерной физики НЯЦ РК, 2001. С.40-41.
4. B.N.Gikal, M.G.Itkis, S.N.Dmitriev, G.G.Gulbekian, J.Franko, K.K.Kadyrzhanov, A.A.Arzumanov, A.N.Borisenko, S.N.Lissukhin. The project of a specialized accelerator DC-60 designed for the interdisciplinary laboratory complex, L.N.Gumilev Euroasia state university // Proceeding 3<sup>rd</sup> International Conference Nuclear and radiation physics 4-7 June 2001, Almaty, Kazakstan. 2001. P.9-28.
  5. S.N.Dmitriev, P.Apel, G.Gulbekian, B.Gikal, O.Ivanov, V.Reutov, V.Skuratov. Accelerated heavy ions for research in life sciences: Production of membranes, nanostructures, and surface modification // First coordination Meeting: Perspectives of life sciences research at nuclear centres. Riviera, Zlatny Piasatsi (Golden Sands), Bulgaria 21-27 September 2003. Abstracts, Dubna, 2003. P.42-44.
  6. B.N.Gikal, V.Bashevoy, V.V.Bekhterev, S.L.Bogomolov, O.N.Borisov, S.N.Dmitriev, A.Efremov, G.Gulbekian, M.G.Itkis, I.A.Ivanenko, I.Kalagin, V.I.Kazacha, N.Yu.Kazarinov, I.V.Kolesov, V.Melnikov, V.Mironov, A.Tikhomirov, V.Zarubin. Project of DC-60 Cyclotron with Smooth Ion Energy Variation for Research Center in L.N.Gumilev Euroasia State University in Astana (Kazakhstan) // The 17<sup>th</sup> International conference on cyclotrons and their applications, Cyclotrons 2004. October 18-22, 2004 Tokyo, Japan. P.44.
  7. B.Gikal, V.Bashevoy, V.Bekhterev, S.Bogomolov, O.Borisov, S.Dmitriev, A.Efremov, G.Gylbekian, I.Ivanenko, V.Kazacha, N.Kazarinov, I.Kolesov, V.Melnikov, V.Mironov, R.Oganessian, A.Tikhomirov. Upgrading of the DC-40 cyclotron // The 17<sup>th</sup> International conference on cyclotrons and their applications. Cyclotrons 2004. October 18-22, 2004 Tokyo, Japan. P.39.
  8. B.N.Gikal, S.L.Bogomolov, S.N.Dmitriev, A.A.Efremov, G.G.Gulbekyan, I.A.Ivanenko, M.G.Itkis, V.I.Kazacha, N.Yu.Kazarinov, I.V.Kolesov, V.B.Zarubin. DC-60 heavy ions cyclotron for modification of metal surfaces, nano-technology and solid states physics // Сборник докладов одиннадцатого международного совещания по применению ускорителей заряженных частиц в промышленности и медицине, Санкт-Петербург, 10-14 октября, 2005. – Санкт-Петербург, СПбГУ, 2005. С.215-218.
  9. B.Gikal, G.Gulbekyan, I.Ivanenko, T.Belyakova, O.Plyasov, V.Kukhtin, E.Lamzin, M.Larionov, B.Maximov, S.Sytchevsky. Effect of actual magnetic properties of steel on field quality in DC-60 // Сборник докладов одиннадцатого международного совещания по применению ускорителей заряженных частиц в промышленности и медицине, Санкт-Петербург, 10-14 октября, 2005. – Санкт-Петербург, СПбГУ, 2005. С.224-227.
  10. B.Gikal, G.Gulbekyan, I.Ivanenko, A.Alexeev, T.Belyakova, V.Belyakov, V.Kukhtin, E.Lamzin, A.Malkov, F.Skornyakov, S.Sytchevsky. Effect of deformations caused by the ponderomotive force of magnet system quality in cyclotron DC-60 // Сборник докладов одиннадцатого международного совещания по применению ускорителей заряженных частиц в промышленности и медицине, Санкт-Петербург, 10-14 октября, 2005. – Санкт-Петербург, СПбГУ, 2005. С.219-223.
  11. Б.Н.Гикал, Г.Г.Гульбекян, И.А.Иваненко, Т.Ф.Белякова, В.П.Кухтин, Е.А.Ламзин, С.Е.Сычевский. Формирование магнитного поля в циклотроне DC-60 на основе методов математического моделирования // Сборник докладов одиннадцатого международного совещания по применению ускорителей заряженных частиц в промышленности и медицине, Санкт-Петербург, 10-14 октября, 2005. – Санкт-Петербург, СПбГУ, 2005. С.257-259.

12. B.N.Gikal, S.N.Dmitriev, S.L.Bogomolov, V.V.Bekhterev, O.N.Borisov, A.A.Efremov, G.G.Gylbekyan, I.A.Ivanenko, M.G.Itkis, N.Yu.Kazarinov, V.I.Kazacha, I.V.Kolesov, V.N.Melnikov, A.V.Tikhomirov, V.B.Zarubin, K.K.Katyrganov, K.A.Kuterbekov, A.N.Borisenko, S.N.Lysukhin. Commissioning of DC-60 cyclotron of scientific research centre // XXXV European Cyclotron Progress Meeting. ECPM 2006. Nice, France, November 2-4, 2006. P.23.
13. Б.Н.Гикал, М.В.Хабаров, О.А.Чернышев, А.В.Тихомиров. Вакуумная система циклотронного комплекса DC-60 // В материалах XIV научно-технической конференции «Вакуумная наука и техника» Сочи, Россия, октябрь 2007. С.27-31.
14. А.В.Тихомиров, Б.Н.Гикал, Г.Г.Гульбекян. Моделирование эффективности трансмиссии ускоряемых ионов для проектирования вакуумной системы циклотрона DC-60 // В материалах XIV научно-технической конференции «Вакуумная наука и техника» Сочи, Россия, октябрь 2007. С.32-36.
15. O.Borisov, B.Gikal, G.Gulbekyan, I.Ivanenko, V.Melnikov, E.Samsonov, V.Seleznev, A.Sidorov, A.Tikhomirov. Beam extraction system from DC60 cyclotron // 18<sup>th</sup> International conference on cyclotrons and their applications, Giardini Naxos, Messina, Italy, 30<sup>th</sup> September – 5<sup>th</sup> October 2007. Messina, 2007. P.24-26.
16. B.Gikal, S.Dmitriev, G.Gulbekian, P.Apel, V.Bashevoi, S.Bogomolov, O.Borisov, V.Buzmakov A.Cherevatenko, A.Efremov, I. Ivanenko, O.Ivanov, N.Kazarinov, M.Khabarov, I.Kolesov, V.Mironov, A.Papash, S.Pashchenko, V.Skuratov, A.Tikhomirov, N.Jazvitsky. Cyclotron based complex IC-100 based facility for scientific and applied research // 18<sup>th</sup> International conference on cyclotrons and their applications, Giardini Naxos, Messina, Italy, 30<sup>th</sup> September – 5<sup>th</sup> October 2007. Messina, 2007. P.27-29.
17. П.Ю.Апель, И.В.Блонская, Б.Н.Гикал, О.М.Иванов, Т.И.Мамонова, О.Л.Орелович, В.А.Скуратов, С.Н.Дмитриев. Трековые мембраны с микро- и нанопорами // Тезисы докладов Международного совещания «Микро и нанотехнологии с использованием пучков ионов, ускоренных до малых и средних энергий», Обнинск, 16-18 октября 2007. – С.13-15.
18. Б.Н.Гикал, П.Ю.Апель, С.Н.Дмитриев. Циклотронный комплекс ДЦ-60 для научно-прикладных исследований и промышленного применения в области нанотехнологий. // Тезисы докладов Международного совещания «Микро и нанотехнологии с использованием пучков ионов, ускоренных до малых и средних энергий», Обнинск, 16-18 октября 2007. С.23-25.
19. С.Н.Дмитриев, П.Ю.Апель, Б.Н.Гикал, В.Ф.Реутов, В.А.Скуратов. Наноструктурная модификация материалов при помощи пучков ускоренных ионов // Rusnnanotech 08, Тезисы докладов Международного форума по нанотехнологиям, Москва, 3-5 декабря 2008. С. 52-54.
20. B.N.Gikal. FLNR Heavy ion cyclotrons for investigation in the field of condensed matter physics industrial applications // Proceedings of RUPAC2012, Sant-Petersburg, Russia, 2012. P. 172-175.

**Патент на изобретение:**

1. Б.Н.Гикал, Ю.Г.Тетерев, А.В.Тихомиров. Способ изготовления и установки на пучок ускоренных ионов графитовой фольги. Патент на изобретение №: 2073282 , МПК: H01J H05H, 1997 г.

**Список научных работ, представляющих основные результаты диссертации, опубликованных в рецензируемых изданиях.**

1. Б.Н.Гикал, Г.Г.Гульбекян, Ф.И.Иваненко. Исследование процесса перезарядки тяжелых ионов при их ускорении в циклотронах У-200, У-300 и У-400 // ЖТЭФ, 1984, т.54, в.7. С.1288-1293.
2. Yu.Ts.Oganessian, V.K.Utyonkov, Yu.V.Lobanov, F.Sh.Abdullin, A.N.Polyakov, I.V.Shirokovsky, Yu.S.Tsyganov, G.G.Gulbekian, S.L.Bogomolov, B.N.Gikal, A.N.Mezentsev, S.Iliev, V.G.Subbotin, A.M.Sukhov, A.A.Voinov, G.V.Buklanov, K.Subotic, V.I.Zagrebaev, M.G.Itkis, J.B.Patin, K.J.Moody, J.F.Wild, M.A.Stoyer, N.J.Stoyer, D.A.Shaughnessy, J.M.Kenneally, and R.W.Lougheed. Heavy Element Research at Dubna // Nucl. Phys. A 734, 2004. P.109-123.
3. Б.Н.Гикал, Е.В.Горбачев, Н.Ю.Казаринов, В.И.Казача, Г.С.Казача, Н.И.Лебедев, А.А.Макаров, В.А.Мельников, В.И.Миронов, С.В.Рабцун, А.А.Фатеев. Система сканирования пучка тяжелых ионов // Письма в ЭЧАЯ. Дубна. 2005. Т.2, №3(126). С.97-101.
4. S.L.Bogomolov, S.N.Dmitriev, B.N.Gikal, G.G.Gulbekyan, M.G.Itkis, V.V.Kalagin, Yu.Ts.Oganessian, V.A.Sokolov. Dubna cyclotrons – status and plans // Beam Dynamics Newsletter, No.37, August 2005. P.44-51.
5. Б.Н.Гикал, С.Н.Дмитриев, Г.Г.Гульбекян, С.Л.Богомолов, О.Н.Борисов, В.А.Бузмаков, И.А.Иваненко, Н.Ю.Казаринов, И.В.Калагин, И.В.Колесов, А.И.Папаш, С.В.Пашенко, А.В.Тихомиров, М.В.Хабаров. Циклотронный комплекс ДЦ-60 для научно-прикладных исследований и промышленного применения в области нанотехнологий // Атомная энергия, 2007, т.103, вып.6. С.357-364.
6. Б.Н.Гикал, С.Н.Дмитриев, Г.Г.Гульбекян, П.Ю.Апель, В.В.Башевой, С.Л.Богомолов, О.Н.Борисов, В.А.Бузмаков, И.А.Иваненко, О.М.Иванов, Н.Ю.Казаринов, И.В.Колесов, В.И.Миронов, А.И.Папаш, С.В.Пашенко, В.А.Скуратов, А.В.Тихомиров, М.В.Хабаров, А.П.Череватенко, Н.Ю.Язвический. Ускорительный комплекс ИЦ-100 для проведения научно-прикладных исследований // Письма в ЭЧАЯ. 2008. Т.5. №1(143). С. 59-85.
7. Б.Н.Гикал, А.В.Тихомиров, М.В.Хабаров, О.А.Чернышов. Вакуумная система циклотронного комплекса тяжелых ионов DC-60 // Письма в ЭЧАЯ. 2008. Т.5. №4(146). С. 655-674.
8. V.Aleksandrov, A.Fateev, B.Gikal. Lens without poles: conceptual design and possibilities of use in the channel of scanning of cyclotron beams // Письма в ЭЧАЯ. 2008. Т.5, №7(149). С.60-63.
9. П.Ю.Апель, Б.Н.Гикал, С.Н.Дмитриев. Микро- и нанопористые структуры, получаемые в полимерах при помощи пучков ускоренных тяжелых ионов // Ядерная физика и нанотехнологии. Дубна ОИЯИ. 2008. С74-86.
10. Ю.Г.Тетерев, Б.Н.Гикал, О.М.Иванов, Г.А.Кононенко, В.И.Миронов. Монитор контроля плотности потока тяжелых ионов при получении пленочных полимерных материалов, основанный на регистрации протонов отдачи // ПТЭ, 2009, №2, С. 9-13.
11. B.Gikal, S.Dmitriev, P.Apel, S.Bogomolov, O.Borisov, V.Buzmakov, G.Gulbekyan, I.Ivanenko, O.Ivanov, M.Itkis, N.Kazarinov, I.Kalagin, I.Kolesov, A.Papash, S.Paschenko, A.Tikhomirov, and M.Khabarov. DC-60 Heavy Ion Cyclotron Complex: The First Beams and Project Parameters // Письма в ЭЧАЯ. 2008. Т.5, №7(149). С.160-165.
12. Г.Г.Гульбекян, С.Н.Дмитриев, Б.Н.Гикал, С.Л.Богомолов, О.Н.Борисов, В.А.Веревошкин, А.А.Ефремов, И.А.Иваненко, О.М.Иванов, Н.Ю.Казаринов, В.И.Казача, И.В.Калагин, И.В.Колесов, С.В.Пашенко, М.Н.Сазонов, А.В.Тихомиров, Й.Франко, М.В.Хабаров,

К.К.Кадыржанов, А.Ж.Тулеушев. Ускорительный комплекс ДЦ-350 // Письма в ЭЧАЯ. 2010. Т.7, №4(160). С.424-445.

13. Б.Н.Гикал, Г.Г.Гульбекян, С.Н.Дмитриев, С.Л.Богомолов, О.Н.Борисов, И.А.Иваненко, Н.Ю.Казаринов, В.И.Казача, И.В.Калагин, И.В.Колесов, М.Н.Сазонов, А.В.Тихомиров, Й.Франко. Проект циклотрона тяжелых ионов DC-110 для промышленного применения и прикладных исследований в области нанотехнологий // Письма в ЭЧАЯ. 2010. Т.7. №7(163). С. 891-896.
14. Б.Н.Гикал, Е.В.Горбачев, Н.И.Лебедев, А.А.Фатеев. Система сканирования пучка тяжелых ионов ускорителя ДЦ-110 // Письма в ЭЧАЯ. 2010. Т.7. №7(163). С. 886-890.
15. Б.Н.Гикал, С.Н.Дмитриев, Г.Г.Гульбекян, П.Ю.Апель, С.Л.Богомолов, О.Н.Борисов, В.А.Бузмаков, В.А.Веревочкин, А.А.Ефремов, И.А.Иваненко, Г.Н.Иванов, Н.Ю.Казаринов, В.И.Казача, И.В.Калагин, И.В.Колесов, В.М.Кононов, А.А.Королев, В.А.Костырев, А.М.Ломовцев, В.Н.Мельников, В.И.Миронов, С.В.Пашенко, В.А.Соколов, Н.Ф.Осипов, А.В.Тихомиров, А.А.Фатеев, М.В.Хабаров. Разработка, создание и запуск циклотронного комплекса тяжелых ионов ДЦ-110 для промышленного производства трековых мембран. Препринт ОИЯИ Р9-2013-120. Дубна, 2013. - 23 с. Письма в ЭЧАЯ. 2014. Т.11, № 2. С.233-253.
16. E.V.Samsonov, B.N.Gikal, O.N.Borisov and I.A.Ivanenko. Numerical simulation of ions acceleration and extraction in DC-110 cyclotron. Preprint JINR E9-2013-121. Dubna, 2013. 15 с. Письма в ЭЧАЯ. 2014, Т.11, № 2. С.264-277.
17. Б.Н.Гикал, В.И.Миронов, Ю.Г.Тетерев, В.Ю.Щеголев. Выходы нейтронов из конструкционных металлов при бомбардировке тяжелыми ионами энергией 2,5 МэВ/нуклон. Препринт ОИЯИ Р9-2013-126. Дубна, 2013. 10 с. Письма в ЭЧАЯ. 2014, Т.11, № 2. С.293-301.
18. Б.Н.Гикал, И.А.Иваненко, Н.Ю.Казаринов, В.И.Миронов, Е.В.Самсонов. Коррекция вертикального смещения выведенного пучка при пуско-наладочных испытаниях циклотрона ДЦ-110. Препринт ОИЯИ Р9-2013-125. Дубна, 2013. 11 с. Письма в ЭЧАЯ. 2014, Т.11, № 2. С.254-263.

#### **Положения, выносимые на защиту:**

1. Концепция нового поколения специализированных циклотронов тяжелых ионов с энергией до 2,5 МэВ/нуклон с использованием системы аксиальной инжекции из внешних источников ионов типа ЭЦР.
2. Система аксиальной инжекции пучка ионов в циклотрон, созданная впервые в отечественных научных центрах и центрах стран-участниц ОИЯИ на циклотроне У-200, которая стала базовым решением для проектов подобных систем на циклотронах тяжелых ионов ЛЯР.
3. Разработка и выполнение проекта глубокой модернизации первого в мире специализированного циклотрона ИЦ-100 для промышленного производства трековых мембран. На ускорителе создана система внешней инжекции из сверхпроводящего ЭЦР источника. Получены пучки ускоренных ионов неона, аргона, железа, криптона, йода, ксенона, вольфрама с энергией 1-1,2 МэВ/нуклон.
4. Создание и ввод в эксплуатацию специализированного циклотронного комплекса тяжелых ионов ДЦ-60 с вариацией энергии от 0,35 до 1,77 МэВ/нуклон для научно-прикладных исследований и промышленного применения в области нанотехнологий.
5. Создание и ввод в эксплуатацию специализированного высокоинтенсивного циклотрона ДЦ-110 для производства трековых мембран, ускоряющего пучки ионов Ag, Kr, Xe с энергией 2,5 МэВ/нуклон и интенсивностью свыше 10 мкА. Производительность

комплекса по облучению полимерной пленки составляет более 2 миллионов квадратных метров в год.

### Структура диссертации

Диссертация состоит из введения, 5 глав, заключения и списка литературы (189 наименований). Объем диссертации составляет 257 страниц, включающих 281 рисунок и 66 таблиц.

Во **введении** представлены научные и прикладные аспекты использования пучков тяжелых ионов в области нанотехнологий. Формулируются основные требования к циклотронам тяжелых ионов для производства трековых мембран и использования в области нанотехнологий.

В **1-й главе** приводится краткий обзор ускорителей, применяемых для производства трековых мембран и модификации полимеров. Анализируются тенденции развития компактных циклотронов тяжелых ионов в мире. Многие ускорители тяжелых ионов в научных центрах различных странах мира имеют каналы и установки для модификации материалов. В ЛЯР развитие специализированных циклотронов для прикладных задач и производства трековых мембран выделено в отдельное направление. В диссертации приводятся описание и параметры ускорителей, созданных в лаборатории для этих задач. Развитие источников ионов электронно-циклотронного резонанса существенным образом изменило критерии выбора параметров систем циклотронов тяжелых ионов с внешней инжекцией пучка.

Во **2-й главе** изложена концепция проектирования циклотронов тяжелых ионов с системой аксиальной инжекции пучка из ЭЦР источника, разработанных в ЛЯР ОИЯИ для прикладных задач и промышленного применения. Показаны способы расчета и критерии выбора основных параметров систем циклотрона: канала инжекции пучка, магнитной структуры циклотрона, высокочастотной ускоряющей системы, системы вывода пучка из ускорителя, каналов транспортировки ускоренного пучка; требования к инженерным системам, обеспечивающих работу циклотрона. Приведены опубликованные данные и результаты экспериментальных исследований выходов нейтронов из конструкционных металлов при бомбардировке тяжелыми ионами с энергией 2,5 МэВ/нуклон, выполненных на ускорителях ЛЯР. Измерение радиационной обстановки на действующих ускорителях позволило существенно уточнить базу данных для расчета биологической защиты ускорителей низкой энергии.

В **3-й главе** представлен проект глубокой модернизации циклического имплантатора ИЦ-100 – первого специализированного ускорителя тяжелых ионов, созданного для промышленного производства трековых мембран. В результате проведенной модернизации произведен переход от внутреннего источника ионов типа РИГ к системе инжекции пучка из внешнего источника. Имплантационный комплекс ИЦ-100 был оснащен системой аксиальной инжекции пучка в циклотрон, сверхпроводящим ЭЦР-источником, позволившим получить интенсивные пучки высокозарядных ионов ксенона, йода, криптона, аргона и других тяжелых элементов Периодической системы Д.И.Менделеева с энергией 1- 1,2 МэВ/нуклон. Запуск и наладка систем циклотрона ИЦ-100 проводился на пучках ионов  $^{86}\text{Kr}^{+15}$  и  $^{132}\text{Xe}^{+23}$ . Интенсивность ускоренных и выведенных пучков составляет около 3 мкА. Были также ускорены пучки ионов аргона  $^{40}\text{Ar}^{+7}$  с током более 2 мкА, железа  $^{56}\text{Fe}^{+10}$  интенсивностью 0,3 мкА, йода  $^{127}\text{I}^{+22}$  с током до 0,25 мкА, ксенона  $^{132}\text{Xe}^{+24} \sim 0,6$  мкА, вольфрама  $^{182}\text{W}^{+32} \sim 0,015$  мкА и т.д. В работе представлено описание систем циклотрона, сравниваются проектные и полученные параметры ускоренных пучков.

В **4-й главе** даны описание и компоновка циклотрона ДЦ-60. Специализированный ускорительный комплекс на базе циклотрона ДЦ-60 для проведения научно-прикладных исследований и производства ядерных мембран разработан и создан в Лаборатории ядерных реакций ОИЯИ. Комплекс был спроектирован и построен в 2004–2006 годах для

междисциплинарного научно-исследовательского центра при Евразийском национальном университете им. Л.Н.Гумилева (г. Астана, Казахстан).

Циклотрон ДЦ-60 предназначен для получения пучков ускоренных ионов в широком диапазоне изменения масс (от Li до Xe) и энергий (0,4÷1,7 МэВ/нуклон), а также обеспечивает возможность проведения экспериментов в канале низких энергий на пучках тяжелых ионов, получаемых из ЭЦР источника с напряжением экстракции до 25 кВ.

В состав ускорителя входят:

- магнит и система питания обмоток магнита,
- высокочастотная резонансная система и ВЧ генератор,
- вакуумная камера и системы высоковакуумной откачки,
- ионный источник ЭЦР типа и система инжекции пучка,
- система диагностики и коррекции пучка,
- элементы вывода пучка,
- канал транспортировки пучка низких энергий
- три канала транспортировки ускоренного пучка,
- камеры для физических экспериментов, специализированная установка для облучения полимерной пленки,
- система водоохлаждения, система контроля и управления,
- системы электропитания и вспомогательное оборудование.

В ходе пуско-наладочных работ выполнен комплекс экспериментальных исследований процессов инжекции, ускорения, транспортировки пучков ионов во всей области рабочей диаграммы. Полученные данные приводятся в тексте диссертации. Важным направлением использования циклотрона ДЦ-60 стало также обучение студентов и аспирантов путем непосредственного участия в экспериментах на физических установках.

**5-я глава** посвящена проекту нового циклотрона ДЦ-110, который является продолжением развиваемого в ЛЯР направления по созданию специализированных ускорителей для промышленного применения и прикладных исследований. Циклотрон ДЦ-110 разработан для научно-промышленного комплекса «БЕТА», предназначенного для крупномасштабного производства плазмаферезаторов крови на основе трековых мембран. В основу проекта ДЦ-110 легли научные и инженерные решения, разработанные в ходе эксплуатации циклотронов У-400, У-400М, ИЦ-100, ДЦ-60, а также новые разработки, значительно расширяющие возможности циклотрона для прикладных задач, к которым нужно отнести не только параметры пучков, но и высокую надежность и простоту обслуживания.

На циклотроне ДЦ-110 не предусматривается вариация энергии ионов и изменение отношения массы к заряду ускоряемых частиц. Такая концепция обеспечивает повышенную надежность и простоту управления комплексом.

Ускорительный комплекс комплектуется одним каналом облучения полимерной пленки. Предусмотрена возможность установки коммутирующего магнита и монтажа второго канала для увеличения производительности оборудования, за счет одновременного облучения пленки на одном канале и подготовки установки на другом.

Для получения пучков ионов с энергией 2,5 МэВ/нуклон выбран магнит циклотрона с диаметром полюса 2,0 м. В качестве ускоряемых ионов приняты  $^{40}\text{Ar}^{6+}$ ,  $^{86}\text{Kr}^{13+}$  и  $^{132}\text{Xe}^{20+}$ , которые имеют близкие отношения массы к заряду 6,667, 6,615 и 6,6, что позволяет реализовать режим ускорения практически на фиксированной частоте ускоряющей системы и фиксированном магнитном поле.

В диссертации приводятся результаты экспериментальных исследований режимов ускорения пучка. Полученные интенсивности пучков и энергия ионов полностью соответствуют проектным параметрам. Ускоритель введен в эксплуатацию в 2012 году, получены трековые мембраны из пленки, облученной на ДЦ-110.

**В заключении** приводятся основные результаты диссертационной работы.

# ГЛАВА 1. УСКОРИТЕЛИ ТЯЖЕЛЫХ ИОНОВ ДЛЯ ПРИКЛАДНЫХ ИССЛЕДОВАНИЙ И ПРОМЫШЛЕННОГО ПРИМЕНЕНИЯ.

## 1.1 Краткий обзор ускорителей, применяемых для производства трековых мембран и модификации материалов

Ускорители тяжелых ионов, работающие в научных центрах различных стран мира, как правило, укомплектованы каналами и установками для модификации материалов, в том числе специализированными установками для облучения полимерных пленок – как первой стадии в технологии производства трековых мембран.

США. Тандем в Брукхейвенской национальной лаборатории (The Tandem Van de Graaff accelerators) используется для промышленного облучения и тестирования материалов [33]. Ускоритель состоит из двух 15-мегавольтных электростатических генераторов (MP-6 и MP-7), каждый 24 м в длину, расположенных в линию. Тандем ускоряет ионы более чем 40 элементов от водорода до урана. Максимальные энергии ионов Co и I (часто используемых для облучения полимеров) составляют 270 и 370 МэВ, соответственно.

Франция. Циклотронный комплекс GANIL включает в себя источник ионов на основе электронного циклотронного резонанса (источник ЭЦР), компактный циклотрон C02, и два циклотрона с разделенными секторами SSC1 и SSC2. В зависимости от потребности может использоваться пучок ионов низких энергий (после C02), либо пучок ионов средней и высокой энергии (после SSC1 и SSC2, соответственно). Отдельно потребителям предоставляется пучок ионов «сверхнизких» энергий от другого ЭЦР источника. Для облучения полимерных пленок и производства трековых мембран в основном используется линия средних энергий (5-20 МэВ/нуклон). Энергия ионов достаточно высока, чтобы пучок мог выводиться из вакуумной камеры на воздух сквозь металлическую фольгу. Интенсивности пучков Ag, Kг и Хе составляют  $10^{11} - 10^{12} \text{ с}^{-1}$ . Имеется специальный канал для проведения промышленных облучений. Вакуумная камера снабжена лентопротяжным механизмом, позволяющим обрабатывать полимерные пленки шириной до 50 см [34].

Бельгия. CYClotron of LOuvain la NEuve (CYCLONE) – компактная многоцелевая машина, используемая для фундаментальных и прикладных исследований, в том числе в промышленном масштабе [35]. Диапазон энергий ускоряемых тяжелых ионов составляет 0,6-27,5 МэВ/нуклон. ЭЦР источник обеспечивает получение пучков ионов высокой зарядности и интенсивности. Облучение полимеров, в частности поликарбонатных пленок для производства трековых мембран, производится ионами  $^{40}\text{Ar}^{10+}$  с энергией 5,5 МэВ/нуклон.

Германия. В институте Hahn-Meitner в Берлине создана ускорительная лаборатория (два инжектора различных типов + циклотрон) для исследований в области физики твердого тела, а также тестирования и модификации материалов. Для прикладных целей используются, например, пучки Kг и Хе с энергиями от 1,5 до 6 МэВ/нуклон [36]. Создан специальный канал и камера для обработки полимерных пленок в промышленном масштабе.

В GSI (Дармштадт) на линейном ускорителе UNILAC в течение последних 20 лет проводятся интенсивные исследования воздействия пучков ускоренных ионов на материалы, в том числе исследования по трековым мембранам. Используется широкий спектр ионов – Хе, Au, Pb, U – со стандартной для данного ускорителя энергией около 11 МэВ/нуклон, хотя для подавляющего большинства прикладных задач достаточно существенно меньшей энергии [37]. Для промышленных целей ускоритель практически не используется ввиду экономической нецелесообразности.

Россия. В Лаборатории ядерных реакций ОИЯИ специализированный канал для облучения полимерных пленок на ускорителе У-300 был создан в середине 70-х годов. Для производства трековых мембран и для исследовательских задач использовались пучки ионов Хе с энергией 1 МэВ/нуклон. В течение последующих десятилетий ускорительный и

аппаратурный комплекс регулярно совершенствовался [38]. В настоящее время облучение полимеров проводится на выведенном пучке циклотрона У-400. Используются ионы более высокой энергии (например, Кг 2,5–5 МэВ/н), что позволило расширить номенклатуру выпускаемых трековых мембран. Камера облучения обеспечивает возможность обработки полимерных пленок шириной до 60 см, чтобы удовлетворить требованиям существующего стандарта в мембранной технике (фильтр-патроны 20 дюймов) [39].

В ЛЯР разработан и создан специализированный ускоритель – циклический имплантатор ИЦ-100, который успешно используется для промышленного производства трековых мембран и научно-прикладных исследований на пучках С, Ne, Ar, Kr, Xe, I, W, Вi с энергией 1-1,2 МэВ/нуклон. [28]

В Дубне работает промышленный комплекс «АЛЬФА», построенный для производства плазморефракторов крови. Базовая установка – циклотрон ЦИТРЕК разработан в Лаборатории ядерных проблем ОИЯИ. Ускоряемые ионы – Ar с энергией 2,4 МэВ/нуклон [40].

Казахстан. В 2006 году в Астане был открыт Междисциплинарный научно-исследовательский комплекс (МНИК). Специально для этого центра в ЛЯР ОИЯИ был разработан и создан циклотрон ДЦ-60, способный ускорять ионы от С до Хе с энергией (0,35 – 1,77 МэВ/нуклон). Циклотронный комплекс используется как для научных целей, так и для промышленного производства трековых мембран и продукции в области нанотехнологий [27, 41, 42].

Япония. Изохронный циклотрон AVF в Такасаки (JAERI) также является многоцелевой машиной, используемой в том числе и для исследований с полимерными материалами [43]. Типичные пучки, используемые для облучения полимеров, – ионы Кг и Хе с энергиями в несколько МэВ/ нуклон. На промышленном уровне данный ускоритель не используется.

Особое место в ряду ускорительных комплексов промышленного применения занимает циклотрон ДЦ-110, который создан для промышленного центра «БЕТА» в Дубне (Россия). Ускоритель даст возможность производить трековые мембраны с производительностью до 2 миллионов квадратных метров в год с использованием пучков ионов Ar, Кг, Хе, имеющих фиксированную энергию 2,5 МэВ/нуклон. Проект разработан в Лаборатории ядерных реакций ОИЯИ. Ускоритель введен в эксплуатацию в 2012г. [44,45].

Общим для всех перечисленных ускорителей является то, что интенсивности пучков, применяемых для практических приложений, составляют  $10^{11} \text{ с}^{-1}$  и выше. При меньших интенсивностях использование сложных и дорогих в обслуживании ускорительных установок экономически нецелесообразно. Многие из перечисленных ускорителей находятся в больших национальных или международных научных центрах, деятельность которых в основном направлена на фундаментальные исследования. Без сомнения, возможности этих ускорителей в области прикладных исследований являются уникальными. Однако для промышленного внедрения этих технологий больше подходят специализированные машины, которые делают технологический процесс экономически более выгодным.

## **1.2 Тенденции развития компактных циклотронов тяжелых ионов**

Поколение циклотронов тяжелых ионов, которое активно стало развиваться в конце 50-х годов, было ориентировано на использование внутренних источников ионов пенинговского типа (PIG) [46, 47]. В те годы альтернативы PIG не существовало. Внутренний источник обладал существенным преимуществом. Он устанавливался в центре циклотрона и не требовал дополнительных устройств для инъекции пучка в зону ускорения. Экстракция ионов производилась непосредственно из плазмы специальным электродом – пулером, установленным на одном из дуантов. Эмиттанс пучка был велик (до 1500 мм·мрад), однако аксептанс центральной области циклотрона позволял эффективно захватывать

частицы в ускорение. Естественно, из ионного источника вытягивался весь спектр ионов. Сепарация пучков по зарядам происходила на первых оборотах за счет фазового движения и фокусирующих свойств ускоряющих промежутков. В ускорение захватывалось от 1 до 5% частиц с нужным зарядом. Простота изложенной схемы позволила источнику типа PIG вплоть до 80-х годов оставаться основным источником тяжелых ионов, используемых на циклотронах. Во многих научных центрах (ЛЯР ОИЯИ, GSI (Германия), GANIL (Франция), RIKEN (Япония) и др.) были созданы группы, занимающиеся развитием PIG источником, прежде всего с целью повышения заряда тяжелых ионов и интенсивности пучков многозарядных ионов. Нельзя не отметить успехи Лаборатории ядерных реакций ОИЯИ, которая долгое время оставалась лидером этого направления [48-50].

Малое место для расположения ионного источника в центре циклотрона не давало возможности использовать какой-либо другой тип источников, кроме PIG (рис.1.1,1.2).

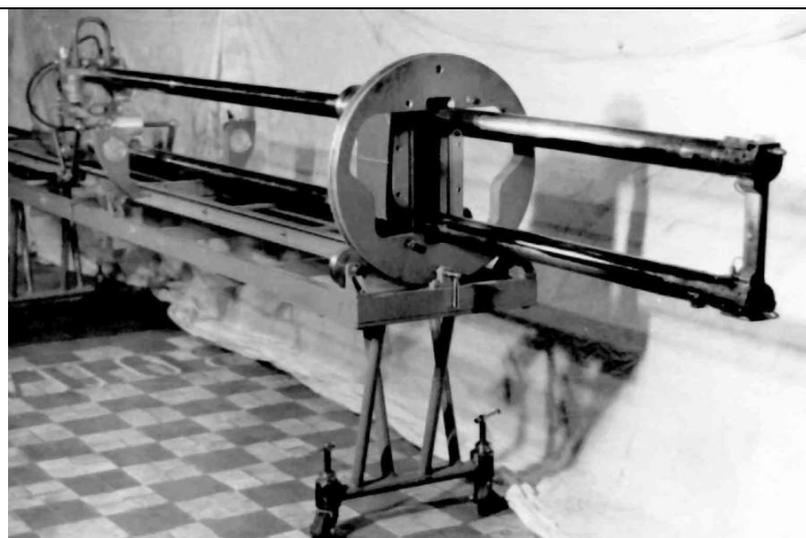


Рис. 1.1. Источник ионов типа PIG циклотрона У-300.



Рис.1.2.Источник ионов типа PIG циклотрона У-400

Свойства и возможности пеннинговского источника ионов в значительной степени определили принципы создания циклотронов тяжелых ионов.

Во-первых, нужно было обеспечить необходимый вертикальный зазор для ионного источника, длина разрядной камеры которого должна быть не меньше 120 мм плюс необходимое пространство для расположения электродов и необходимые высоковольтные пробойные промежутки. В сумме это определяло минимальный средний зазор в циклотроне, хотя для создания экономичного магнита циклотрона хотелось бы его уменьшить.

Во вторых, интенсивность пучка из ионного источника PIG с повышением заряда ионов сильно падает (рис.1.3.), поэтому для получения высокой интенсивности ускоренного пучка необходимо было ввести разумные ограничения на заряд ускоряемых ионов.

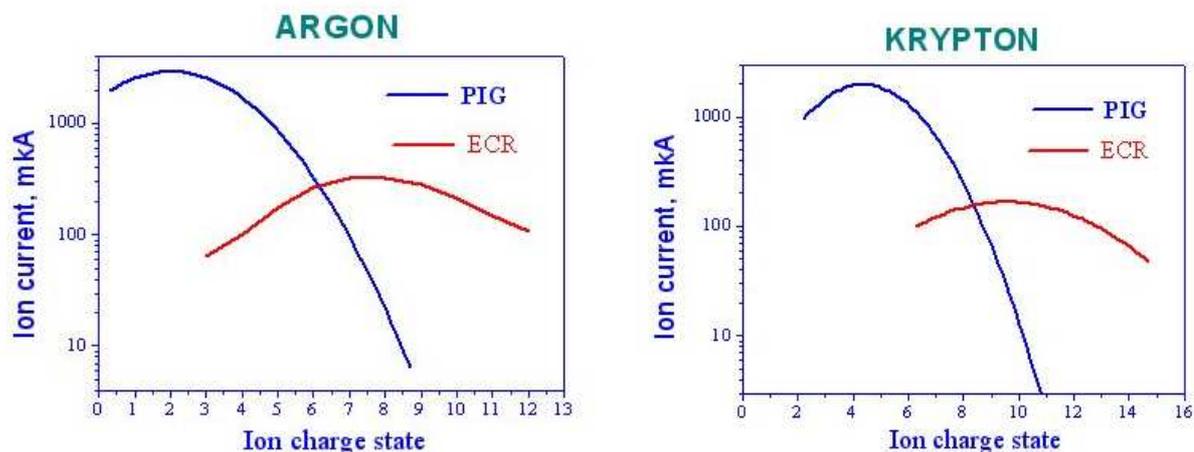


Рис.1.3. Интенсивности пучков ионов из источника типа PIG в зависимости от заряда иона.

Энергия ускоренных ионов в циклотроне определяется как  $E = k \cdot B^2 \cdot R^2 \cdot (Z/A)^2$  (где  $k$  – коэффициент,  $B$  – магнитное поле,  $R$  – радиус последней орбиты пучка в циклотроне,  $Z/A$  – отношение заряда к массе ускоряемого иона). Таким образом, для получения требуемой интенсивности пучка и энергии ионов нужно работать либо на высоком уровне магнитного поля –  $B$ , либо увеличивать радиус полюса магнита –  $R$ . Увеличение среднего магнитного поля до  $\sim 1,5$  Т происходит почти линейно с ростом тока в основной обмотке циклотрона. За счет увеличения тока можно получить  $B$  около 2 Т, однако мощность магнита в этом случае возрастает в несколько раз, примером служит кривая возбуждения магнита У-400 на рисунке 1.4. [51]. Однако такой шаг можно считать оправданным, поскольку альтернатива – увеличение диаметра полюса магнита циклотрона, который ведет к увеличению веса магнита примерно пропорционально кубу диаметра полюса (рис.1.5).

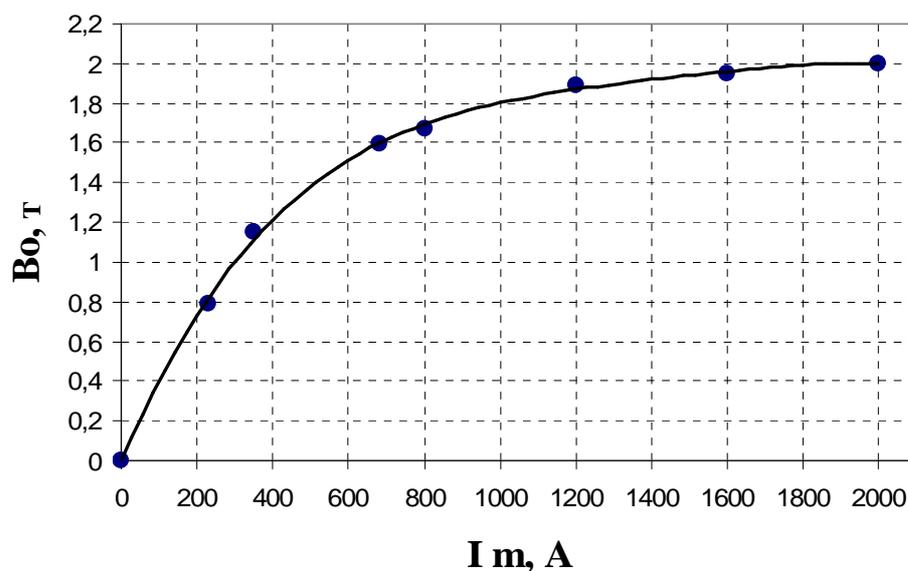


Рис.1.4. Зависимость среднего магнитного поля от тока в основной обмотке магнита циклотрона У-400.

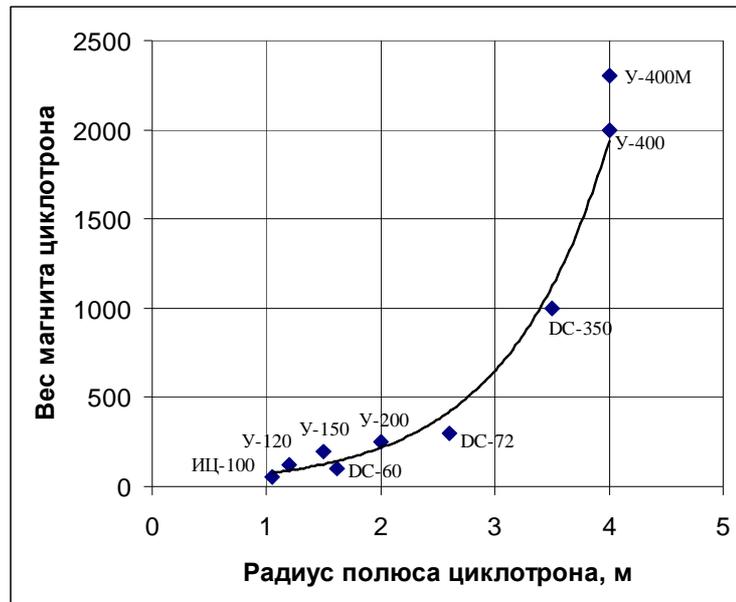


Рис.1.5. Вес магнита циклотрона в зависимости от радиуса полюса.

Как видно, перспективы развития циклотрона тяжелых ионов с внутренним источником ограничены техническими возможностями. Поэтому стремление повысить заряд ускоряемых ионов было и остается актуальной задачей.

Для циклотрона был разработан лазерный источник многозарядных ионов. Ионы ускорялись из плазмы, создаваемой лазерным лучом из мишени, расположенной непосредственно у пулера дуанта (рис. 1.6) [52, 53]. Структура ускоренного пучка в этом случае имеет ярко выраженную импульсную структуру ( $t_{\text{имп}} \sim 1$  мкс с периодом частоты следования импульсов лазера), что во многих случаях не подходило для решения физических задач, поэтому схема не получила серьезного развития на циклотронах тяжелых ионов.

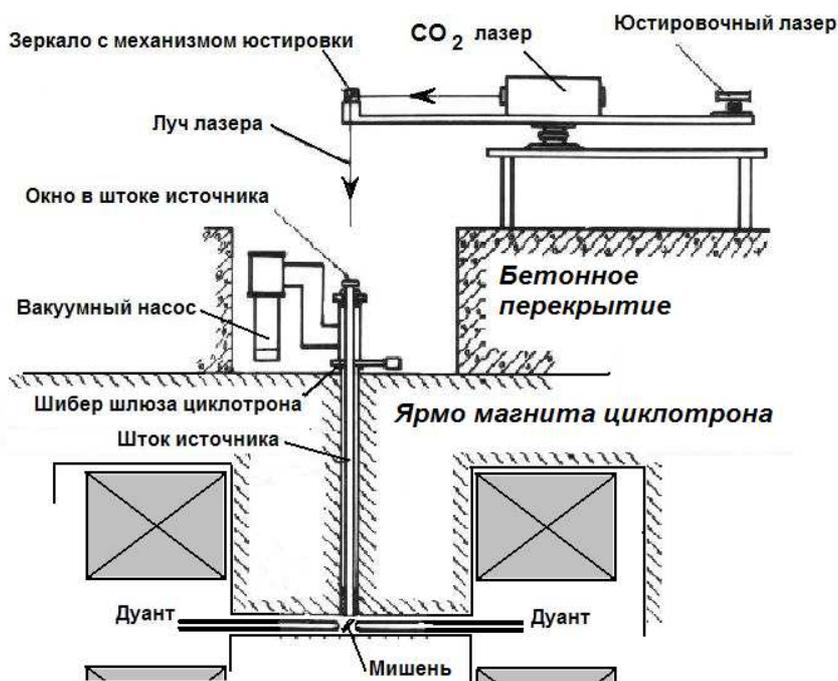


Рис. 1.6. Схема циклотрона Y-200 с лазерным источником ионов.

Развитие ионных источников привело к созданию в конце 70-х годов источника ионов нового типа – электронно-циклотронного резонанса (ЭЦР), разработанного для циклотрона. Интенсивности пучков многозарядных ионов ЭЦР источника в десятки и сотни раз превосходят интенсивности РИГ источника. Однако ЭЦР источник имеет большой размер и может быть установлен только вне камеры циклотрона, а это требует создания системы внешней инжекции пучка в центр циклотрона. Такие системы были созданы на циклотронах в научных центрах в Гренобле (Франция), GANIL (Франция) и др.[54, 55]. Впервые в отечественных научных центрах система аксиальной инжекции пучка в циклотрон была создана на циклотроне У-200 ЛЯР ОИЯИ в 1985 г. (рис.1.7). На ней были отработаны основные принципы построения таких систем для циклотронов тяжелых ионов. Полученные инженерные и физические решения легли в основу создания подобных систем на других циклотронах ЛЯР [56-62, 107].

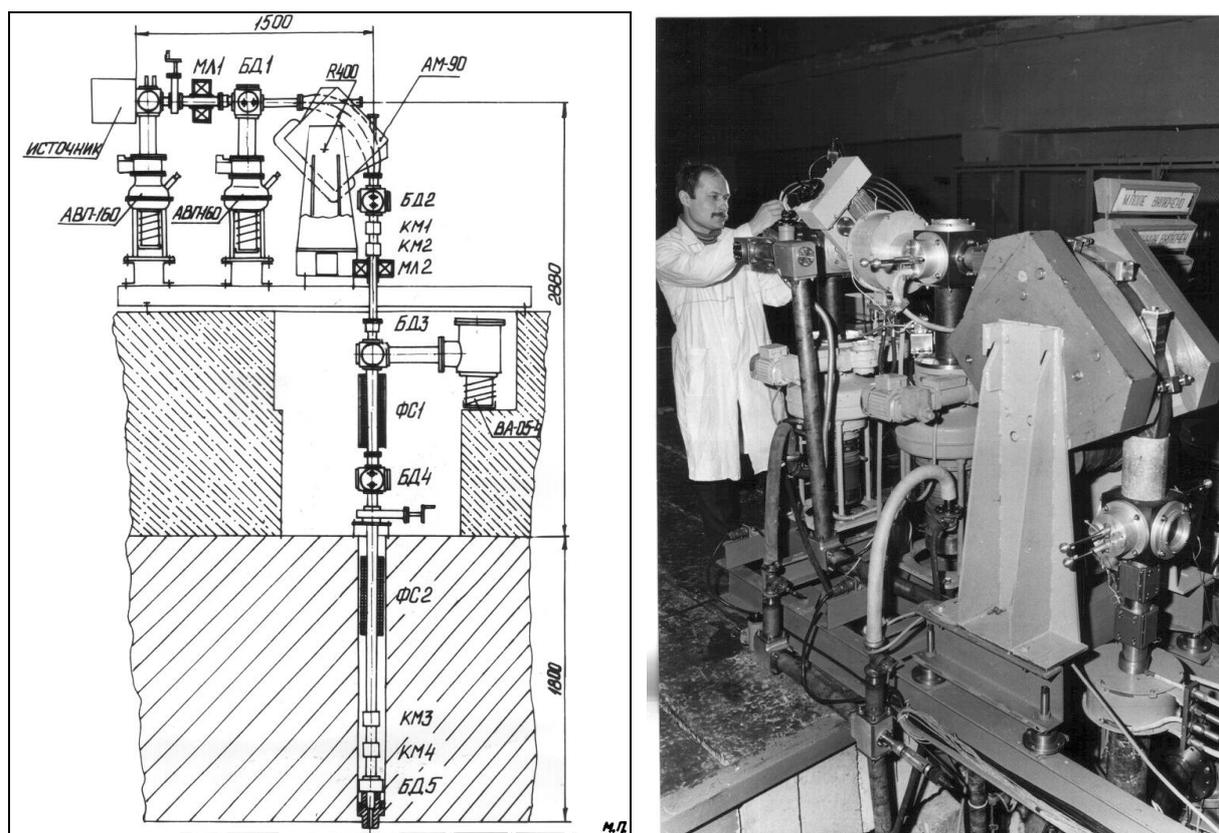


Рис. 1.7. Схема и фотография системы аксиальной инжекции циклотрона У-200.

Создание инжектора тяжелых ионов для циклотрона на базе ЭЦР источника серьезным образом повлияло на принципы построения циклотронов, в том числе создаваемых для прикладного применения.

Во-первых, ускорение ионов с более высоким зарядом позволило снизить уровень среднего магнитного поля, создавать более экономичные магниты, более широко применять современные методы компьютерного моделирования для достижения необходимых свойств магнитной структуры [63-67]. В случае перехода от источника типа РИГ к ЭЦР источнику при той же магнитной структуре циклотрона проявлялась возможность ускорения более тяжелых ионов [68-73]. Ярким примером такой модернизации служит модернизация циклотрона ИЦ-100. Ускоритель был создан в 1985 году с внутренним РИГ источником, который позволял ускорять ионы до Ag с энергией до 1 МэВ/нуклон. После установки на нем ЭЦР источника и создания системы аксиальной инжекции были получены ионы Kr, Xe, Bi, J, Mo [74-77]. В 2004–2006 годах в ЛЯР был создан специализированный циклотрон ДЦ-60 для прикладных исследований [78,79]. Новые подходы привели к созданию магнитной

структуры, позволяющей плавно варьировать энергию ионов в пределах  $\pm 25\%$  от номинальной при маломощной системе корректирующих катушек [65,80].

Во-вторых, применение внешнего ионного источника значительно снизило газовую нагрузку вакуумной системы циклотрона. Поток газа из пенинговского источника составляет около  $1 \text{ см}^2/\text{мин}$  газа при нормальном давлении, в то время как газоотделение с поверхности камеры циклотрона минимум на порядок меньше. Кроме того, натекание газа из внутреннего ионного источника происходит в центр циклотрона, а там наилучшие условия откачки из-за ограниченной проводимости зазоров на периферию вакуумной камеры, где расположены средства откачки [81]. Таким образом, переход на систему внешней инжекции не только позволяет улучшить вакуум в камере циклотрона и тем самым снизить потери пучка из-за перезарядки на остаточном газе, но и делает обоснованным переход на новые вакуумные технологии: сильфонные вводы движения, безмасляную систему откачки, применение криогенных насосов [82-84]. Например, такой переход на циклотроне ИЦ-100 улучшил рабочий вакуум в камере циклотрона с  $5 \cdot 10^{-6}$  до  $1 \cdot 10^{-7}$  Торр [77]. Распределение вакуума по радиусу в камере циклотрона У-400 в отсутствие внутреннего ионного источника и в разных режимах работы с внутренним источником ионов типа РІГ показаны на рисунке 1.8, где видно, что в случае внешней инжекции пучка среднее давление в камере циклотрона на порядок лучше [81].



Рис. 1.8 Распределение давления по радиусу в камере циклотрона У-400 в отсутствие внутреннего ионного источника (1) и в разных режимах работы с внутренним источником ионов типа РІГ (2,3,4). Верхний рисунок показывает сечение вакуумной камеры циклотрона.

В-третьих, новые технологии существенно изменили эксплуатационные свойства ускорителя. Снизилась вероятность пробоев с высоковольтных электродов и дуантов. В несколько раз увеличился срок службы изоляторов ввода высокочастотной мощности. Срок службы элементов центральной оптики практически не ограничен. В сумме ускоритель получил возможность работать целый год без напуска атмосферы в вакуумную камеру циклотрона, в то время как с РІГ источником требовалось ежемесячно проводить профилактические работы внутри камеры ускорителя и менять пуллерные накладки, распыляемые пучком тяжелых ионов ионного источника. Следует добавить, что ионный источник типа РІГ при работе на тяжелых ионах требует ежедневной замены электродов, а ЭЦР источник может работать на газах в течение нескольких месяцев без профилактики.

В-четвертых, система аксиальной инжекции позволила более эффективно использовать пучок за счет применения группирователя (банчера), позволившего увеличить

захват частиц в ускорение до 30–70%, в зависимости от интенсивности пучка и условий инжекции [85,86]. Система аксиальной инжекции позволила применить чоппер для быстрого прерывания процесса ускорения – менее 0,1 мс, что важно для многих физических экспериментов [87- 89]. За счет использования системы обратной связи на один из элементов системы аксиальной инжекции появилась возможность стабилизировать интенсивность пучка в процессе облучения с точностью лучше 1%, что во многих случаях необходимо с точки зрения технологии, например, при производстве трековых мембран.

Таким образом, циклотрон тяжелых ионов с ЭЦР источником и системой аксиальной инжекции приобрел свойства технологической машины промышленного применения и ускорителя с широкими возможностями для выполнения научно-прикладных исследований.

### **1.3 Развитие циклотронов тяжелых ионов для прикладных задач в ЛЯР**

Впервые производство трековых мембран («ядерных фильтров») с использованием ускоренных тяжелых ионов было реализовано в середине 1970-х годов на циклотроне У-300 ЛЯР ОИЯИ [1]. В дальнейшем исследования по модификации материалов тяжелыми ионами (в том числе и производство трековых мембран) получили широкое развитие в крупнейших ядерно-физических центрах США, Франции, Германии, Японии и других стран [2, 33-37, 90]. Однако большинство работ в этой области выполнены на мощных высокоэнергетических ускорителях, нацеленных прежде всего на выполнение широкого спектра фундаментальных научных исследований. Использование таких ускорителей для прикладных задач сопряжено, с одной стороны, с очень высокой стоимостью процесса облучения и, с другой стороны, существенными трудностями в обеспечении быстро меняющимися запросами партнеров, представляющих современную инновационную среду. В настоящее время особую актуальность приобретают специализированные ускорители тяжелых ионов, позволяющие оптимально решать задачи создания и внедрения наукоемких технологий и прямо нацеленные на применение в технологическом процессе.

Развитие источников электронно-циклотронного резонанса [91-93] существенным образом изменило концепцию построения компактных циклотронов тяжелых ионов. Система внешней инжекции пучка из ЭЦР источника позволила значительно расширить диапазон ускоряемых ионов в сторону более тяжелых масс, уменьшить размеры и энергопотребление циклотронов [54, 55, 94, 107].

Первая система аксиальной инжекции пучка в России и странах-участницах ОИЯИ была создана на циклотроне У-200 (ЛЯР) в 1985–1986 гг. Были ускорены ионы гелия и углерода. В 1995–1996 годах были установлены системы аксиальной инжекции пучка из ЭЦР источников на исследовательских циклотронах ЛЯР У-400 и У-400М.

Первый специализированный циклотрон ИЦ-100 для прикладных работ на пучках тяжелых ионов был создан по инициативе академика Г.Н. Флерова в 1985 году [25]. На нем использовался внутренний источник типа PIG. В 2001 году была проведена кардинальная реконструкция циклотрона, установлен источник электронно-циклотронного резонанса со сверхпроводящей магнитной структурой и создана система аксиальной инжекции пучка [28, 74, 75, 76]. Достигнутые при этом параметры в полной мере показали преимущества новой концепции построения циклотронов. Диапазон ускоряемых ионов по массам до реконструкции (при использовании внутреннего источника ионов) составлял (С – Ar), после реконструкции были получены пучки ионов Ne, Ar, Fe, Kr, I, Xe, W [77, 95]. В настоящее время циклотрон обеспечивает выполнение широкого спектра прикладных задач, включающий исследование радиационной стойкости материалов, получение и изучение наноструктурированных композиционных материалов, а также нано- и микропористых мембран [9, 10, 96].

В 2004–2006 гг. в Лаборатории ядерных реакций ОИЯИ создан специализированный ускорительный комплекс ДЦ-60 для проведения научно-прикладных исследований и коммерческого производства трековых мембран. Комплекс был спроектирован и построен

для междисциплинарного научно-исследовательского центра при Евразийском национальном университете им. Л.Н.Гумилева (г. Астана, Казахстан) [27, 32, 41].

Циклотрон ДЦ-60 уже несколько лет успешно обеспечивает выполнение программы прикладных и научных исследований на пучках ускоренных ионов в широком диапазоне изменения масс от Li до Xe и энергий (0,35÷1,77) МэВ/нуклон. Трековые мембраны, произведенные на пучках циклотрона ДЦ-60, отвечают самым высоким мировым стандартам. Циклотрон укомплектован каналом пучков ионов низкой энергии, получаемых из ЭЦР источника с напряжением экстракции до 25 кВ.

Развиваемое в ЛЯР направление по созданию специализированных ускорителей (ИЦ-100, ДЦ-60), получило свое продолжение в проекте нового циклотрона ДЦ-110 [44, 45], разработанного для научно-промышленного комплекса «БЕТА», предназначенного для крупномасштабного производства плазмаферезаторов крови на основе трековых мембран [188]. Целью этой работы были разработка и создание современного ускорительного комплекса, обеспечивающего промышленное производство трековых мембран до 2 млн. кв. м. в год. Особенность проекта – нацеленность на получение мембран для так называемого каскадного плазмафереза, требующего применения мембран с порами нанометрового диапазона, что, в свою очередь, требует высокой плотности пор и, соответственно, высокой интенсивности пучков.

В основу проекта ДЦ-110 легли научные и инженерные решения, разработанные в ходе эксплуатации циклотронов ИЦ-100, ДЦ-60, У-400, У-400М, а также новые разработки, значительно расширяющие возможности циклотрона для прикладных задач, к которым нужно отнести не только параметры пучков, но и высокую надежность и простоту обслуживания.

Проект специализированного циклотронного комплекса ДЦ-110 для промышленного производства трековых мембран включал в себя создание специализированного компактного циклотрона тяжелых ионов, инжектора многозарядных ионов на базе ионного источника типа ЭЦР и всех инженерных систем, обеспечивающих полный цикл облучения полимерной пленки – первой стадии технологии изготовления трековых мембран.

Ускорительный комплекс обеспечивает получение интенсивных пучков ионов Ag, Kr и Xe с фиксированной энергией 2,5 МэВ/нуклон, что позволяет производить трековые мембраны на основе полимерных пленок толщиной до 30 мкм. Ускоритель создан на базе магнита с диаметром полюса 2,0 м. В качестве ускоряемых ионов приняты  $^{40}\text{Ag}^{6+}$ ,  $^{86}\text{Kr}^{13+}$  и  $^{132}\text{Xe}^{20+}$ , которые имеют близкие отношения массы к заряду 6,667, 6,615 и 6,600, что позволяет реализовать режим ускорения практически на фиксированной частоте ускоряющей системы и фиксированном магнитном поле с подстройкой  $B_0$  или  $F_{\text{вч}}$  в небольшом диапазоне. Такая концепция обеспечивает повышенную надежность и простоту управления комплексом. На циклотроне ДЦ-110 используется источник ионов электронно-циклотронного резонанса, работающий на частоте 18 ГГц, который обеспечивает высокую интенсивность пучков  $^{84}\text{Kr}^{13+}$  и  $^{132}\text{Xe}^{20+}$  [97].

Для увеличения производительности оборудования на ускорителе предусмотрена возможность установки двух каналов транспортировки ускоренного пучка, что позволяет одновременно проводить облучения пленки на одном канале и готовить установку для облучения пленки на другом.

Весь цикл работ по созданию ускорительного комплекса (разработка проекта, создание и тестирование систем, монтаж и запуск) был реализован в течение 3 лет.

## ГЛАВА 2. КОНЦЕПЦИЯ ПРОЕКТИРОВАНИЯ ЦИКЛОТРОНОВ ТЯЖЕЛЫХ ИОНОВ ДЛЯ ПРИКЛАДНЫХ ЗАДАЧ И ПРОМЫШЛЕННОГО ПРИМЕНЕНИЯ

### Особенности ускорителей тяжелых ионов для научно-прикладных исследований и требования к циклотронам промышленного применения.

Исследования в области физики твердого тела, модификации материалов, разработка и использование технологий для промышленного применения требуют от ускорителей пучков ионов, различных по массам, энергии и интенсивности. Однако есть общие требования, которые можно сформулировать следующим образом:

1. Для того чтобы в процессе взаимодействия пучка ускоренных части с веществом мишени не происходили ядерные реакции, энергия ионов должна быть ниже кулоновского барьера. Это, конечно, зависит от массы ускоряемых ионов и материала мишени, для тяжелых ионов она не должна превышать  $\sim 4$  МэВ/нуклон. Нижний предел по энергии – несколько кэВ/нуклон – может быть получен непосредственно из внешнего ионного источника ( $10\text{--}25$  кэВ  $\times$  заряд иона). Для этой цели наиболее подходит ионный источник ЭЦР типа, который одновременно может быть использован как инжектор циклотрона и как источник пучков для автономных физических исследований. Пучки более высокой энергии получают после ускорения в циклотроне. Важным критерием выбора энергии является глубина проникновения ионов в вещество. Конечно, следует стремиться к наиболее широкому диапазону ускоряемых ионов. Чаще всего для проведения исследований требуются ионы Kr, Xe, J, Si, Ca, Fe, Cu, Mo, Bi. . Это предполагает, что ионный источник должен работать не только на газах, но и предусматривать возможность подачи твердого рабочего вещества из тигля в виде пара, либо иметь специальный канал для подачи летучих соединений металлов при низком давлении ( $\text{Fe}(\text{C}_5\text{H}_5)_2$ ;  $\text{Ni}(\text{C}_5\text{H}_5)_2$ ;  $\text{Cr}(\text{CO})_6$ ;  $\text{W}(\text{CO})_6$ ).
2. Свойства пучка ионов: Энергия ионов пучка, получаемого в ионном источнике, определяется напряжением инжекции. Разброс по энергии ионов в пучке из ионного источника составляет лучше 0,1%, определяется в основном стабильностью напряжения экстракции. Характерное напряжение на ионном источнике типа ЭЦР ( $10\text{--}25$ )кВ. Если источник установить на высоковольтную платформу, энергию ионов можно поднять до 100 – 300 кВ на заряд. Энергия ускоренных ионов, как правило, лежит в диапазоне 0,5 – 4 МэВ/нуклон. Разброс энергии ионов, ускоренных в циклотроне, составляет 1–2%, что удовлетворяет требованиям подавляющего числа физических экспериментов. Ускоренный пучок в циклотроне непрерывный, но имеет микроструктуру. Временная структура пучка определяется частотой ускоряющего напряжения, которая обычно лежит в диапазоне от 10 до 20 МГц, и фазовым захватом, составляющим  $20\text{--}30^\circ$ , т.о. пучок представляет собой непрерывную последовательность импульсов с периодом 50–100 нс и длительностью 2–5 нс. Соответственно ток пучка в импульсе в 15 – 20 раз выше по отношению к среднему.
3. Циклотроны, предназначенные для выполнения научно-прикладных исследований, должны иметь возможность глубокого изменения энергии ионов. Дискретное изменение энергии ионов может быть реализовано за счет изменения заряда ионов, плавное изменение – за счет вариации магнитного поля.
4. Специально нужно определить требования к циклотронам, используемым в технологии производства трековых мембран.  
- Энергия ионов выбирается, исходя из пробегов в полимерном материале (рис.0.2). Длина трека в полимере несильно зависит от массы налетающего иона. Минимальная толщина пленки, используемой для производства трековых мембран, 10-12 мкм. Чтобы ионы пролетали это расстояние, требуется энергия не менее 1 МэВ/нуклон. Чтобы обеспечить облучение пленки 20 мкм, необходима энергия 1,5 МэВ/нуклон. Для пленки

толщиной 30 мкм с учетом возможности облучения под углом к поверхности  $\pm 30^\circ$  требуется энергия 2,5 МэВ/нуклон.

- При разработке ускорителя энергия ионов выбирается исходя из максимальной толщины пленки, которая предполагается для производства фильтров. Она может быть фиксированной, не предусматривать возможность вариации. При этом конструкция циклотрона значительно упрощается, поскольку не требуется изменение частоты ускоряющей системы и уровня магнитного поля. Выбор такого типа ускорителя для технологических целей экономически обоснован.

- Наиболее подходящей частицей для облучения пленки в рутинном производстве является криптон. Пучок ионов криптона – это некий компромисс между возможностью получения интенсивного пучка ионов на циклотроне и качеством латентных треков в полимере, получающихся в результате облучения. С точки зрения последующей физико-химической обработки Хе несколько лучше, в редких случаях облучение ксеноном является единственно возможным путем получения фильтров из химически стойких пленок. При облучении пленки пучком Ag существенно удлиняется процесс последующей обработки, что ведет к некоторому ухудшению прочностных характеристик трековых мембран, а также вносит ограничения по диаметру производимых пор в пленке.

- Интенсивность пучка, используемая при облучении пленки, зависит от требуемой плотности пор в трековых мембранах, которая, как правило, не выходит за диапазон  $10^5 - 10^9$  пор/см<sup>2</sup>. Требуемая интенсивность ускоренного пучка в этих режимах –  $10^8 - 10^{12}$  част./с (соответственно для  $Kr^{15+}$  – от 3 нА до 3 мкА).

- Особое значение в технологии производства трековых мембран имеет однородность облучения пленки, которая может достигаться стабилизацией интенсивности пучка в процессе облучения и введением обратной связи на скорость перемотки пленки в зависимости от интенсивности пучка. В любом случае должна быть решена задача точности измерения тока пучка, имея в виду необходимость подавления эмиссии вторичных электронов с измерителей тока пучка и сложности с измерением низкой интенсивности – порядка 1 нА.

- При создании канала для облучения полимерной пленки следует учитывать высокий поток газа с поверхности пленки в режиме перемотки – до 2 Торр·л/с. Основной поток газа составляют пары воды. Средства откачки должны быть распределены по каналу, чтобы не допустить ухудшение вакуума в камере циклотрона. В вакуумном объеме камеры облучения целесообразно установить криогенную панель с температурой около  $-150\text{ C}^\circ$  (водяной криогенный насос), которая перехватывает основной поток паров воды.

- Принципиально важно при создании ускорителя для производства трековых мембран предусмотреть максимально надежную конструкцию и стабильную работу всех систем. Разработка ускорительного комплекса должна быть сориентирована не на достижение предельных параметров, а на выбор конструкции и режимов работы узлов с низкой вероятностью высоковольтного пробоя, температурной устойчивостью, длительным периодом работы узлов без обслуживания и т.д.

Научно-исследовательские центры созданные, на базе циклотронов с вариацией энергии ускоренных ионов, наилучшим образом подходят для университетов и технических институтов, поскольку в диапазоне энергий до 2 МэВ/нуклон отсутствует проблема радиационной опасности, можно обеспечить безопасный доступ широкому кругу пользователей, включая обучение студентов и аспирантов. Циклотроны с фиксированной энергией ускоряемых ионов оптимальны для промышленных центров, использующих «ядерные технологии» в производственных процессах.

Типичная схема циклотрона тяжелых ионов приведена на рисунке 2.1. Внешний источник ионов установлен сверху на магните циклотрона. Пучки ионов ЭЦР источника могут инжектироваться по каналу аксиальной инжекции в центр циклотрона для ускорения, либо транспортироваться по каналу на физическую установку для проведения

экспериментов на пучках низкой энергии. Ускоритель может комплектоваться несколькими каналами пучков ионов высокой энергии в зависимости от поставленных задач. В приведенной схеме показаны три канала, один из которых снабжен установкой для облучения полимерной пленки.



Рис. 2.1. Типичная схема циклотрона тяжелых ионов для прикладных задач.

Циклотронный комплекс тяжелых ионов для промышленного применения включает в себя не только ускоритель, но и инженерное оборудование, обеспечивающее работу циклотрона и установок для проведения исследований или промышленного использования пучков ускоренных ионов.

Циклотронный комплекс с внешним источником ионов и аксиальной инжекцией пучка состоит из следующих систем:

- 1) ионный источник,
- 2) система аксиальной инжекции пучка,
- 3) магнитная система циклотрона,
- 4) высокочастотная ускоряющая система, включая систему ВЧ питания,
- 5) система вывода пучка из циклотрона,
- 6) каналы транспортировки ускоренного пучка,
- 7) камеры для проведения исследований или установки промышленного использования пучков,
- 8) комплекс элементов диагностики пучка,
- 9) вакуумная система, которая разделяется на подсистемы для откачки:
  - ионного источника и системы аксиальной инжекции пучка,
  - вакуумной камеры циклотрона,
  - каналов транспортировки ускоренного пучка
- 10) система электропитания и управления.
- 11) инженерные системы: водяного охлаждения и пневмосистема.

## 2.1 Ионный источник

### 2.1.1 Конструкция и параметры ионных источников.

Выбор ионного источника во многом определяет свойства систем циклотрона. Основным и практически единственным типом ионного источника для циклотронов тяжелых ионов является источник электронно-циклотронного резонанса (ЭЦР).

ЭЦР источники начали активно развиваться в 80-е годы. Исходя из экспериментальных данных и теории, Р. Желером были сформулированы основные зависимости, связывающие параметры пучка ионов (интенсивность, заряд) и параметры ионного источника [98]:  
 - средний заряд ионов  $\langle Z \rangle$  пропорционален  $\log V_{\max}$  ( $V_{\max}$  - максимум магнитного поля),

- средний заряд ионов  $\langle Z \rangle$  пропорционален  $\log \omega_{\text{ECR}}$  ( $\omega_{\text{ECR}}$  – рабочая частота источника ионов),
- интенсивность пучка  $I(Z)$  для заряда  $Z$  обратно пропорциональна массе иона,
- интенсивность пучка  $I(Z)$  для заряда  $Z$  пропорциональна  $(\omega_{\text{ECR}})^2$

Развитие ионного источника во многом определялось техническими возможностями, прежде всего повышением рабочей частоты и, соответственно, повышением уровня магнитного поля. В настоящее время созданы и успешно работают источники до частоты 28 ГГц, разрабатывается источник ионов на частоту 56 ГГц. Для примера, на рисунке 2.2 показаны возможности по получению пучков ионов аргона ЭЦР источников, работающих на частотах 6, 14, 28 и 56 ГГц [99].

До частоты 18 ГГц ионные источники могут создаваться с использованием медных обмоток, в то время как переход на частоту 28 ГГц требует обязательного перехода на сверхпроводящие катушки. Разработаны модификации сверхпроводящих ионных источников на частоту 14 и 18 ГГц. В этом случае в несколько раз снижается потребление электрической мощности, а также увеличивается интенсивность многозарядных ионов. В таблице 2.1 приводятся типичные технические характеристики источников для разных частот.

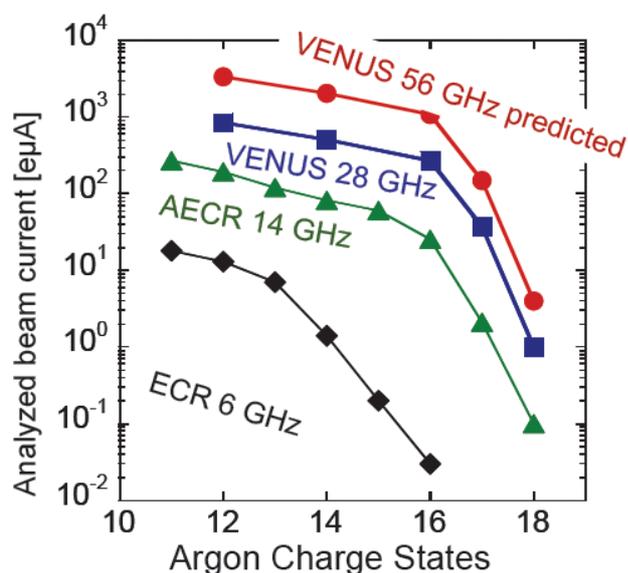


Рис. 2.2. Сравнение параметров пучка ионов Ar, полученных из ЭЦР источников, работающих на частотах от 6 до 56 ГГц.

При выборе источника ионов для циклотрона промышленного применения нужно учитывать не только его возможности по генерации интенсивных пучков ионов высокого заряда, но и эксплуатационные свойства. Для циклотронов, ускоряющих ионы от Ar до Xe до энергии 2-4 МэВ/нуклон, оптимальны источники с частотой 14, 18 ГГц. При выборе типа магнитной структуры (сверхпроводящие обмотки или медные) нужно учитывать преимущества и недостатки:

источник ионов с медными обмотками:

- более дешевый в производстве,
- прост и надежен в эксплуатации,
- простое и дешевое сервисное обслуживание,
- потребляет в 3-5 раз больше электроэнергии по сравнению со сверхпроводящим вариантом,
- уступает сверхпроводящему источнику в интенсивности пучков тяжелых многозарядных ионов

сверхпроводящий вариант:

- экономичен по электропотреблению,
- позволяет получать более интенсивные пучки тяжелых многозарядных ионов,
- дорогой в производстве, дорогие комплектующие при сервисном обслуживании,
- требуется 1-2 недели для выхода на рабочий температурный режим,
- необходима надежная бесперебойная сеть электропитания.

Таблица 2.1. Типичные технические характеристики ЭЦР источников для разных частот.

Рабочая частота ЭЦР источника	Мощность СВЧ генератора	Максимальное магнитное поле на оси источника, $B_{\max}$	Тип магнитной структуры	Потребляемая электрическая мощность
6-10 ГГц	менее 1кВт	< 1 Тл	Медные обмотки. Гексаполь – постоянные магниты	30 кВт
14 ГГц	~ 1 кВт	~ 1,25 Тл	Медные обмотки. Гексаполь – постоянные магниты	~ 60 кВт
14 ГГц	~ 1 кВт	~ 1,25 Тл	Сверхпроводящие обмотки, Гексаполь – постоянные магниты	~ 20 кВт
18 ГГц	~ 2 кВт	~ 1,9 Тл	Медные обмотки, Гексаполь – постоянные магниты	~ 150 кВт
18 ГГц	~ 2 кВт	~ 1,9 Тл	Сверхпроводящие обмотки, Гексаполь – постоянные магниты	~ 20 кВт
28 ГГц	~ 4-7 кВт	$\geq 3$ Тл	Сверхпроводящие обмотки, Гексаполь – сверхпроводящие обмотки	~ 20 кВт

В Лаборатории ядерных реакций активное развитие ЭЦР источников началось с 1995 года. Разработаны и созданы ряд ионных источников [97, 100-101], которые используются на действующих циклотронах тяжелых ионов:

**DECRIС-2** 14 ГГц – циклотрон У-400М – 1995 г.

**ECR-4M** 14 ГГц – циклотрон У-400 – 1996 г. (совместный проект ЛЯР – GANIL (Франция))

**DECRIС-3** 14 ГГц – TESLA Accelerator Installation (Белград) – 1997 г.

**DECRIС-2m** 14 ГГц - циклотрон ДЦ-72, BIONT Inc. (Bratislava) – 2003 г.

**DECRIС-SC** 18 ГГц – циклотрон ИЦ-100 – 2002 г.

**DECRIС-3** 14 ГГц - циклотрон ДЦ-60 (Астана, Казахстан) – 2006 г.

**DECRIС-4** 14 ГГц – стенд ионных источников ЛЯР – 2006 г.

**DECRIС-SC2** 18 ГГц – циклотрон У-400М 2013 г.

**DECRIС-SC3** 14 ГГц – циклотрон ДЦ-350 – проект

**DECRIС-5** 18 ГГц -циклотрон ДЦ-110 2012 г.

## Базовая конструкция источников многозарядных ионов электронно-циклотронного резонанса

ЭЦР источники используются практически на всех ускорителях тяжелых ионов в научных центрах. Их отличают высокая надежность, простота управления и достаточно длительное время непрерывной работы: более тысячи часов при получении ионов газов и, как правило, более сотни часов для ионов твердых веществ.

Базовая конструкция источника с системой подачи твердых веществ и системой экстракции ионов, разработанная в ЛЯР, показана на рисунке 2.3.

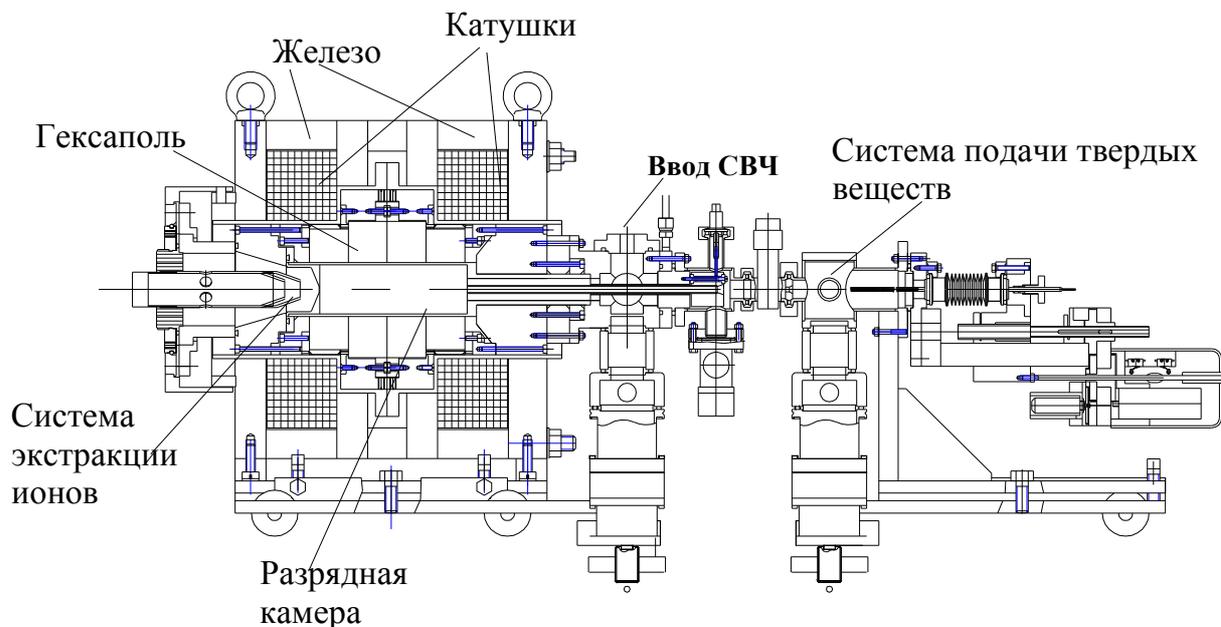


Рис. 2.3. Общий вид ЭЦР источника ионов.

Система формирования аксиального магнитного поля источника состоит из двух медных охлаждаемых водой катушек и стального ярма, расположенных на потенциале «земли». Система формирования радиального магнитного поля (гексаполь), а также пробки, обеспечивающие получение необходимой величины магнитного поля в максимумах аксиального распределения, находятся под высоким потенциалом. Изоляция этих узлов от катушек и стального ярма обеспечивается пластиковым изолятором.

Внутри гексаполя расположена разрядная камера. Для предотвращения нагрева гексаполя камера имеет двойные стенки, в зазоре между которыми предусмотрены каналы для протока охлаждающей воды. Разрядная камера соединена с медным кубом, к которому через вакуумное окно присоединен волновод.

Откачка разрядной камеры со стороны ввода СВЧ осуществляется турбомолекулярным насосом, присоединенным к кубу через вакуумный изолятор. Со стороны экстракции откачка разрядной камеры осуществляется насосами, установленными на блоке экстракции (на рисунке не показан). Блок экстракции соединен с ионным источником через вакуумный высоковольтный изолятор.

Откачка системы подачи твердых веществ также осуществляется турбонасосом, присоединенным к объему через вакуумный изолятор. От объема ионного источника система ввода твердых веществ отделена шибером, что позволяет проводить замену образца с рабочим веществом без напуска атмосферы в ионный источник.

Ионизационная камера вместе с гексаполем изолирована от корпуса источника до 25 кВ, что позволяет извлекать ионный пучок с энергией, требуемой для его инжекции в

циклотрон. Система экстракции состоит из плазменного электрода, расположенного на выходе из ионизационной камеры, и заземленного пулера.

Распределение аксиального магнитного поля в источнике ионов **DECRIС** 14 ГГц и геометрия гексаполя показаны на рисунках 2.4 и 2.5, основные параметры источника приведены в таблице 2.2.

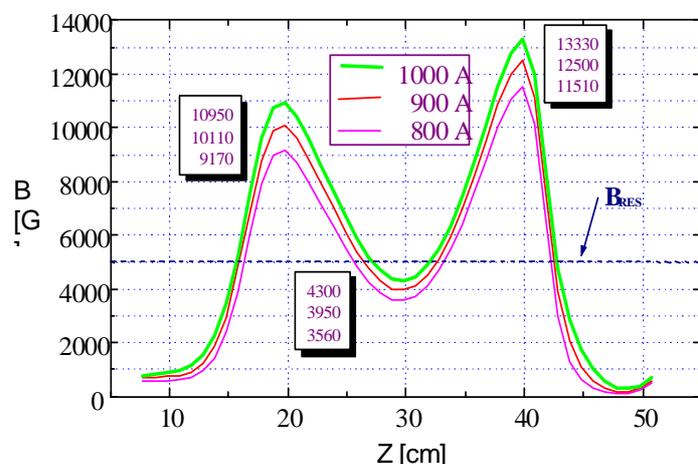


Рис. 2.4. Распределение аксиального магнитного поля при различных уровнях возбуждения. (Указаны значения поля в пиках и минимуме распределения).

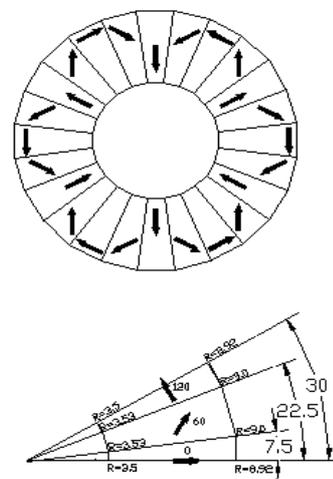


Рис. 2.5. Геометрия магнитной системы гексаполя для формирования радиального магнитного поля.

Таблица 2.2. Основные параметры источника ионов DECRIС 14 ГГц

АКСИАЛЬНОЕ МАГНИТНОЕ ПОЛЕ		ЭКСТРАКЦИЯ	
Пик на оси, сторона инжекции	1.3 Тл	Максимальное напряжение	25 кВ
Пик на оси, сторона экстракции	1.09 Тл	<b>КАТУШКИ</b>	
Расстояние между пиками	20 см	Количество катушек	2
<b>ГЕКСАПОЛЬ</b>		Проводник	8×8, Ø4.5
Внешний диаметр, центральная часть	18 см	Количество секций в катушке	5
Внешний диаметр, края	16 см	Количество витков в секции	2 × 10
Внутренний диаметр	7 см	Количество витков в катушке	100
Длина	20 см	Номинальный ток	1000 А
Магнитное поле на радиусе 3.2 см	~1,1 Тл	Максимальный ток	1300 А
<b>ПЛАЗМЕННАЯ КАМЕРА</b>		Номинальная мощность	< 70 кВт
Внутренний диаметр основной части	6,4 см	Давление охлаждающей воды	10 бар
Внутренний диаметр инжекторной части	2,8 см	Расход охлаждающей воды	2,5 м <sup>3</sup> /час
Длина основной части	22 см	Перепад температуры воды	25 °С

### 2.1.2 ЭЦР источника ЛЯР для циклотронов тяжелых ионов.

Начальная часть канала аксиальной инжекции пучка в циклотрон используется для анализа пучков по зарядам и оптимизации режима ионного источника для получения максимального тока ионов выбранного заряда. Горизонтальный участок транспортировки пучка в системах, разработанных в ЛЯР, состоит из:

1. фокусирующих элементов:

- соленоидальной линзы,
- корректирующих магнитов в горизонтальной и вертикальной плоскостях,

- квадрупольной линзы для согласования горизонтального и вертикального эмиттансов.
- 2. анализирующего 90°- магнита.
- 3. элементов диагностики (цилиндр Фарадея и коллиматоры).
- 4. система настройки и снятия ионного спектра включает в себя автоматическое управление линзой, анализирующим магнитом и измерение тока с цилиндра Фарадея.

Возможности по разрешению такой системы приведены на рисунках 2.6 и 2.7, где показаны экспериментально снятые спектры ионов Kr и Xe на циклотроне ИЦ-110 [28].

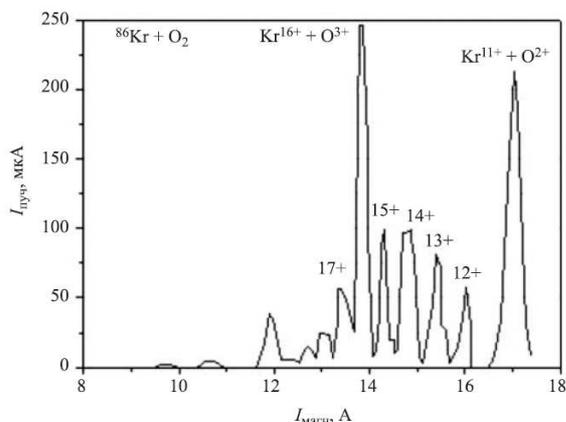


Рис. 2.6. Спектр ионов криптона, полученный из ЭЦР источника DECRIS-SC. СВЧ мощность – 380 Вт.

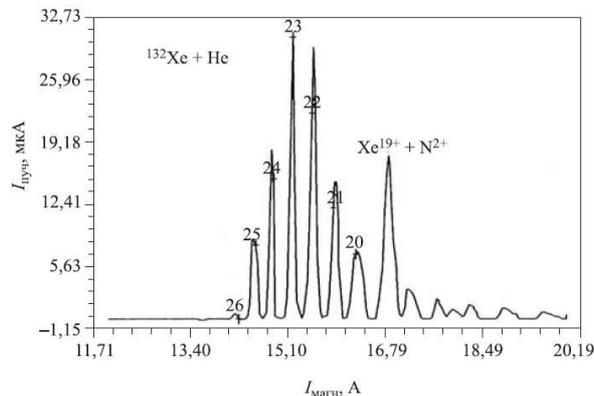
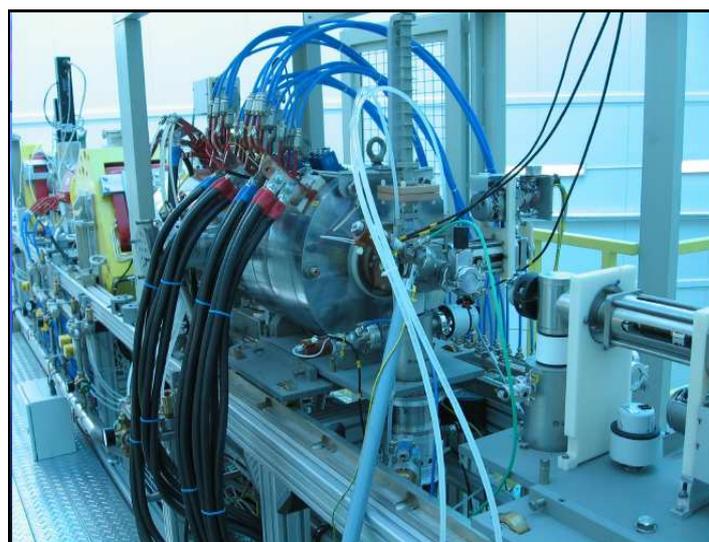


Рис. 2.7. Спектр ионов ксенона, полученный из ЭЦР источника DECRIS-SC. СВЧ мощность – 390 Вт.

В проектах циклотронов для прикладных задач и промышленного использования, разработанных ЛЯР, используются источники ионов, работающих на частоте 14 и 18 ГГц. Источники ионов **DECRIS-3**, **DECRIS-4**, **DECRIS-5** имеют медные обмотки катушек для создания магнитного поля, источники **DECRIS-SC** и **DECRIS-SC2** построены с использованием сверхпроводящей технологии при изготовлении магнитной структуры. Потребляемая мощность при использовании сверхпроводимости существенно ниже по сравнению с источниками с медными обмотками. Параметры пучков источников **DECRIS** приведены на рисунках 2.8 - 2.11. [97, 100-101].



Тип магнитной структуры: медные обмотки, гексаполь – постоянные магниты.

Частота: 14 ГГц

Потребляемая мощность: 60кВт

Заряд иона	Интенсивность пучка, мкА					
	Li	B	O	Ar	Kr	Xe
2+	300					
3+	70	200				
4+		80				
5+			660			
6+			450			
7+			40			
8+				600		
9+				340	100	
18+						45
20+						40

Рис. 2.8. Параметры пучков ионного источника **DECRIS-3**.

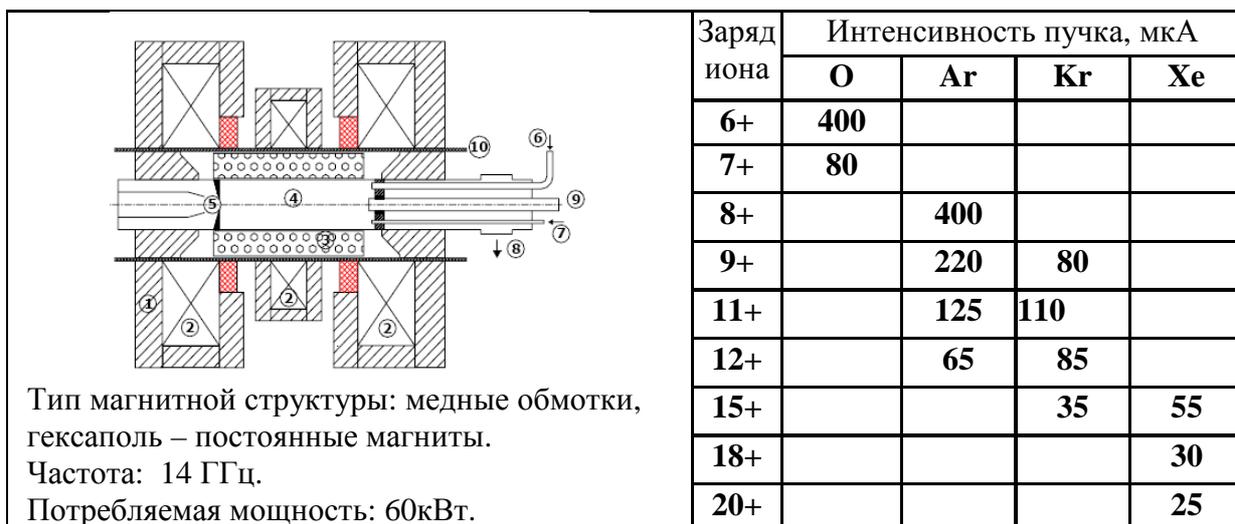


Рис. 2.9. Параметры пучков ионного источника **DECRIС-4**.



Рис. 2.10. Параметры пучков ионного источника **DECRIС-SC**.

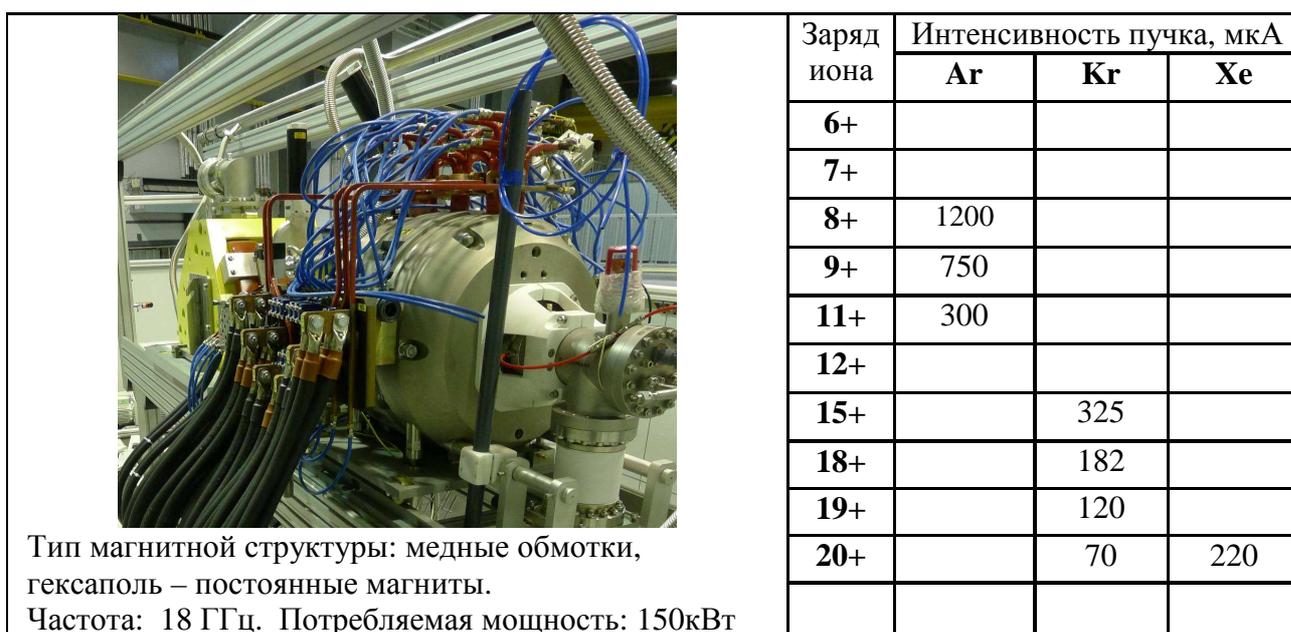


Рис. 2.11. Параметры ионных пучков из источника **DECRIС-5**.

## 2.2 Аксиальная инжекция пучка

Система внешней инжекции пучка для циклотронов тяжелых ионов имеет ряд преимуществ, главные из которых – возможность использования внешнего ЭЦР источника ионов, отсутствие натекания рабочего газа из ионного источника в камеру циклотрона, возможность многомесячной работы циклотрона без остановок на профилактические работы [94, 95, 102].

Вместе с тем при создании системы аксиальной инжекции требуется решить ряд задач, которые бы обеспечили высокий коэффициент трансмиссии пучка по каналу инжекции и эффективный захват в ускорение.

1. Система транспортировки должна обладать хорошими оптическими свойствами, акцептанс системы должен быть согласован эмиттансом пучка ионного источника.
2. Требуется обеспечить достаточно высокий вакуум в канале внешней инжекции, чтобы избежать чрезмерных потерь пучка на остаточном газе.
3. Конструкция центральной области и инфлектора должна обеспечивать при повороте пучка из вертикального канала в медианную плоскость циклотрона эффективную фокусировку и фазовый захват ионов в процесс ускорения.
4. Важным элементом канала аксиальной инжекции пучка является система банчировки пучка, которая позволяет увеличить коэффициент захвата ионов в ускорение до 10 раз. При разработке системы инжекции следует учитывать влияние пространственного заряда, который увеличивает эмиттанс пучка и снижает эффективность банчировки.

### 2.2.1. Принципы выбора параметров системы аксиальной инжекции

Выбор типов элементов внешней инжекции и их параметров взаимосвязан. Динамика движения пучка в канале транспортировки от ионного источника до центра циклотрона должна рассматриваться как единая задача с оптимизацией движения пучка на первом обороте в циклотроне.

Общим, важным параметром для всех систем является диаметр ионопровода. Он должен быть компромиссным, учитывая, что увеличение диаметра улучшает условия транспортировки, уменьшает количество фокусирующих элементов, улучшаются также условия вакуумной откачки. Большая вакуумная проводимость ионопровода позволяет обойтись меньшим количеством средств откачки. Вместе с тем увеличение диаметра ионопровода ведет к резкому увеличению мощности фокусирующих элементов – примерно пропорционально квадрату диаметра. Исходя из опыта разработки и эксплуатации, для пучка тяжелых ионов можно считать диаметр ионопровода около 100 мм оптимальным для большинства систем [74, 84, 95, 106].

### ЭНЕРГИЯ ИНЖЕКЦИИ

- Повышение энергии инжекции пучка ионов в целом положительно сказывается на эффективности транспортировки пучка по каналу инжекции, поскольку это ведет к улучшению эмиттанса пучка из ионного источника, снижению влияния пространственного заряда. Это требование особенно важно для сильноточных инжекторов, а также для пучков высокозарядных ионов.

- Минимальный предел  $U_{инж}$  устанавливает, динамика движения пучка в центре циклотрона, где должно быть обеспечено прохождение пучка вокруг конструктивных элементов центральной области [28, 44, 77].

- Выбранная энергия инжекции должна согласовываться с радиусом первого оборота в центре с тем, чтобы выполнить условие центровки пучка, которое прямым образом связано с уровнем магнитного поля, напряжением на дуантах и номером гармоники.

- Решая задачу выбора напряжения инжекции, нужно учитывать также технические возможности создания инфлектора, где должны быть обеспечены пробойные зазоры в

условиях ограниченного пространства.

- С точки зрения эксплуатации было бы удобно создать систему аксиальной инжекции, не требующей замены каких-либо элементов, прежде всего конструктивных элементов центральной области и инфлектора, при изменении отношения массы к заряду ускоряемых ионов. Для этого нужно обеспечить выполнения соотношения  $U_{\text{инж}} \cdot (A/Z) = \text{const}$ , где  $A$  и  $Z$  – масса и заряд ионов. При этом условии сохраняется стартовый радиус первой орбиты. Принцип “постоянной геометрии” предполагает также соответствующее изменение напряжения на дуантах, чтобы сохранить правильную центровку пучка, хотя с точки зрения дальнейшего ускорения было бы желательно обеспечить максимальное напряжение на дуантах, чтобы сократить фазовые и вакуумные потери пучка в процессе ускорения. Нужно также учитывать, что переход с одного номера гармонии на другой требует различного азимутального положения пулера дуанта. Таким образом, говоря о принципе “постоянной геометрии”, нельзя рассматривать его как абсолютный, но следует учитывать наравне с другими параметрами для компромиссного выбора напряжения экстракции ионного источника.

Поскольку источник электронно-циклотронного резонанса рассматривается как основной тип источников для циклотронов тяжелых ионов, то максимальным напряжением инжекции является 25кВ – максимальное напряжение, при котором обеспечивается надежная работа источников этого типа. Дальнейшее повышение напряжения инжекции возможно с использованием высоковольтной платформы, что для циклотронов тяжелых ионов промышленного применения экономически не обоснованно.

Минимальным напряжением инжекции нужно считать 10 кВ, и связано это с падением интенсивности пучка, втягиваемого из ионного источника ионов.

#### ФОКУСИРУЮЩИЕ ЭЛЕМЕНТЫ

Требования к системе транспортировки определяет эмиттанс ионного пучка, который должен быть согласован с аксептансом системы. Эмиттанс пучка определяется типом ионного источника и составляет 120 – 220 п мрэд для ЭЦР источника.

Для фокусировки могут быть выбраны 4 типа фокусирующих элементов:

1. Электростатические линзы
2. Электростатические квадрупольные линзы
3. Магнитные линзы типа соленоида
4. Магнитные квадрупольные линзы.

Каждый из этих типов линз имеет свои преимущества и недостатки.

Электростатические линзы имеют достоинства в том, что потребляют мало мощности. Вместе с тем, есть проблемы с эксплуатацией, прежде всего в связи с запылением изоляторов, поскольку тяжелые ионы производят распыление материала бомбардируемых поверхностей.

Магнитные линзы типа соленоида осуществляют фокусировку продольным полем, их действие на пучок относительно слабое, что приводит к необходимости создания сильных полей и потреблению большой электрической мощности. Характерное поле на оси линзы ~ 2-5 кГс, потребление мощности 2-7 кВт.

Магнитные квадрупольные линзы имеют сильное действие на пучок, потребляемая мощность до 1 кВт. Их число должно быть в два раза больше по сравнению с соленоидами.

Выбирая фокусирующие элементы, нужно учитывать рассеянное поле в аксиальном канале магнита, которое оказывает фокусирующее действие на пучок. Вместе с тем следует учитывать эффект вращения осей пучка ( $x$ ;  $y$ ) в продольном магнитном поле на угол:

$$\mu = \frac{q}{2mV} \int_{Z_1}^{Z_2} B_z dz, \quad (q - \text{заряд}, V_0 - \text{скорость частицы}, m - \text{масса}).$$

Для надежной эксплуатации ускорителя в промышленных условиях лучше подходит простая и надежная система транспортировки, основанная на магнитных линзах типа соленоида, которая имеет наименьшее число фокусирующих элементов и короткое время

настройки системы.

Для формирования пучка, выходящего из ионного источника, как правило, используется электростатическая оптика.

В системе аксиальной инжекции должны быть предусмотрены корректирующие магниты для коррекции отклонений пучка от оси, вызванных влиянием рассеянного поля магнита циклотрона и другими причинами.

## АНАЛИЗИРУЮЩИЙ МАГНИТ

Анализирующий магнит устанавливается в системе аксиальной инжекции пучка для выполнения двух функций: поворота пучка на  $90^\circ$  из горизонтальной в вертикальную часть канала и анализа ионов по зарядам и выделения пучка, нужного для ускорения.

Наиболее важна для системы инжекции первая функция. Чтобы сохранить симметричность пучка после поворота, в магните используется краевая фокусировка. На рисунках 2.12 приведен пример участка транспортировки пучка с анализирующим магнитом с радиусом 40 см, с углами торцевого скоса полюсов входа и выхода  $26,5^\circ$ , после которого получен симметричный фокус пучка. Для улучшения разрешения ионов разного заряда полезно иметь фокус пучка после магнита (рис. 2.12).

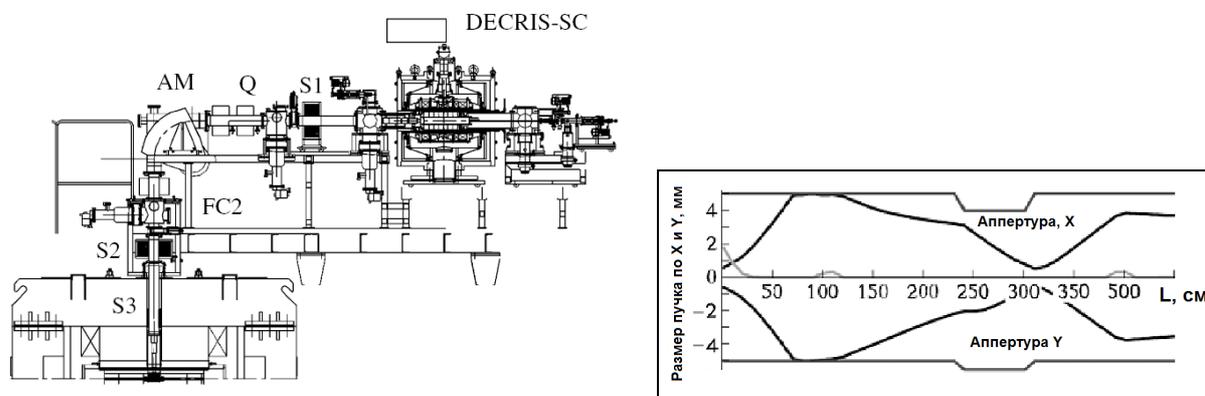


Рис. 2.12 Схема канала аксиальной инжекции пучка и огибающая пучка вдоль оси ионопровода с фокусом в месте расположения блока диагностики.

Из технических решений следует отметить необходимость использования широко апертурной камеры анализирующего магнита, не только исходя из размера пучка, но и с учетом того, что в магните происходит сепарация пучка и интенсивная бомбардировка стенок вакуумной камеры. Это вызывает интенсивную стимулированную десорбцию газа с поверхности и распыление материала камеры. Для снижения потерь пучка из-за перезарядки на остаточном газе камера должна иметь хорошую вакуумную проводимость для эффективной откачки. Для снижения распыления материала камеру целесообразно изготовить или плакировать слабо распыляемыми материалами, такими как титан, молибден, вольфрам, алюминий. Исходя из этого оптимальными параметрами магнита можно считать:

- зазор между полюсами 100-120 мм,
- радиус поворота пучка 400-500 мм,
- ширина дорожки 250 -300 мм.
- потребляемая электрическая мощность – 1-3 кВт

Разрешающая способность такого магнита показана на рисунках 2.13 и 2.14, где приведены спектры ионов Ag и Bi, полученные после 90-градусного анализирующего магнита с радиусом центральной дорожки полюса 400 мм с коллиматором на точке фокуса и без него.

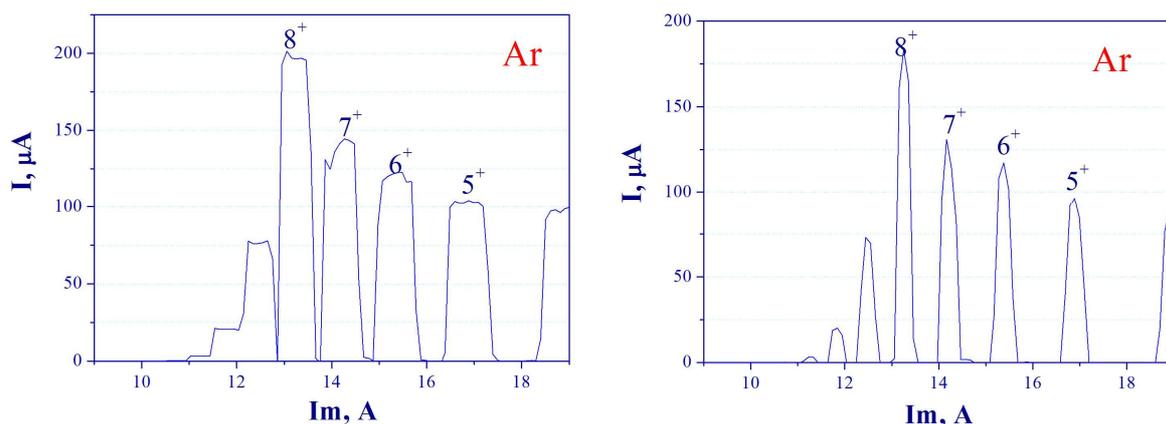


Рис. 2.13. Спектр ионов Ar после 90° анализирующего магнита с радиусом дорожки 40 см без коллиматора (слева) и с коллиматором  $\varnothing$  20 мм (справа).

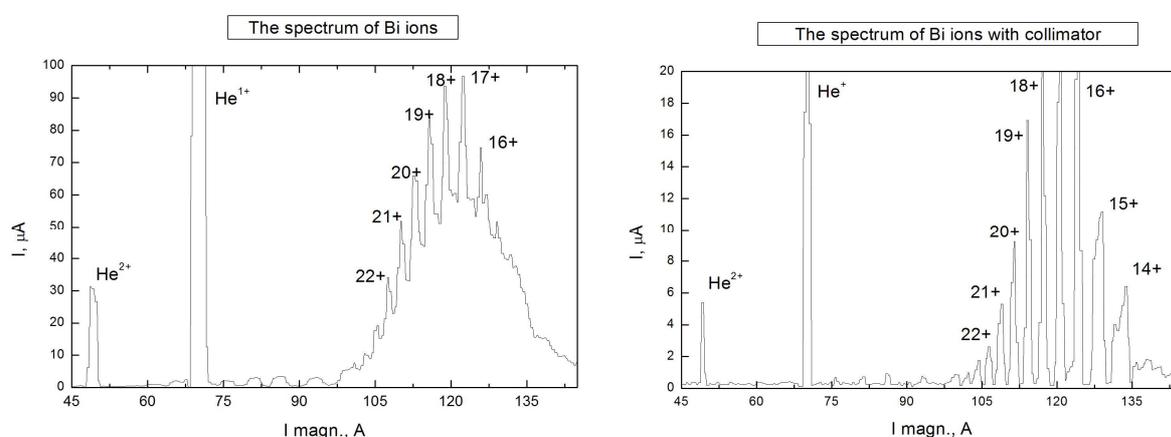


Рис. 2.14. Спектр ионов Bi после 90° анализирующего магнита с радиусом дорожки 40 см без коллиматора (слева) и с коллиматором  $\varnothing$  20 мм (справа).

## НЕКОТОРЫЕ ОСОБЕННОСТИ КОМПОНОВКИ КАНАЛА АКСИАЛЬНОЙ ИНЖЕКЦИИ ПУЧКА ТЯЖЕЛЫХ ИОНОВ.

Расчет системы аксиальной инжекции пучка может производиться по ряду программ, позволяющих оптимизировать динамику движения пучка и расположение фокусирующих элементов канала транспортировки, таких как TRANSPORT, MAD, MCIB04 [103-105] .

Основная цель, которая ставится при разработке канала инжекции, – высокая эффективность транспортировки пучка от ионного источника в центр циклотрона. При проектировании системы транспортировки пучка нужно учитывать некоторые принципы, которые улучшают свойства системы:

- в расчетах огибающая пучка не должна превышать 80% внутренней аппретуры ионопровода, поскольку реальные параметры пучка могут отличаться от расчетных; возможно также неосевое движение пучка по каналу. Попадание пучка на стенки ионопровода ведет не только к аппретурным потерям, но и к интенсивной стимулированной десорбции газа со стенок, локальному ухудшению давления и увеличению потерь ионов из-за перезарядки на остаточном газе.

- после 90° магнита, поворачивающего пучок из горизонтальной части канала в вертикальную, полезно иметь фокус пучка для улучшения разрешающей способности анализирующего магнита.

- в горизонтальной части канала между ионным источником и анализирующим магнитом транспортируются пучки всех зарядов. Высокая плотность пучка ведет к

увеличению эмиттанса пучка из-за эффекта пространственного заряда. Ионы, не предназначенные для ускорения, попадают на стенки камеры, что ведет к ухудшению вакуума и увеличению потерь. Учитывая эти эффекты, для пучков высокой интенсивности горизонтальную часть канала следует делать по возможности короткой. В этом случае пулер ионного источника находится практически в фокусе анализирующего магнита, фокусирующая линза, расположенная между источником ионов и магнитом, используется для коррекции параметров пучка на входе в магнит. Такое решение было применено, например, на сильноточном циклотроне ДЦ-110 (рис. 2.15). Огибающая пучка в системе аксиальной инъекции пучка ДЦ-110 показана на рисунке 2.16 [44, 45].

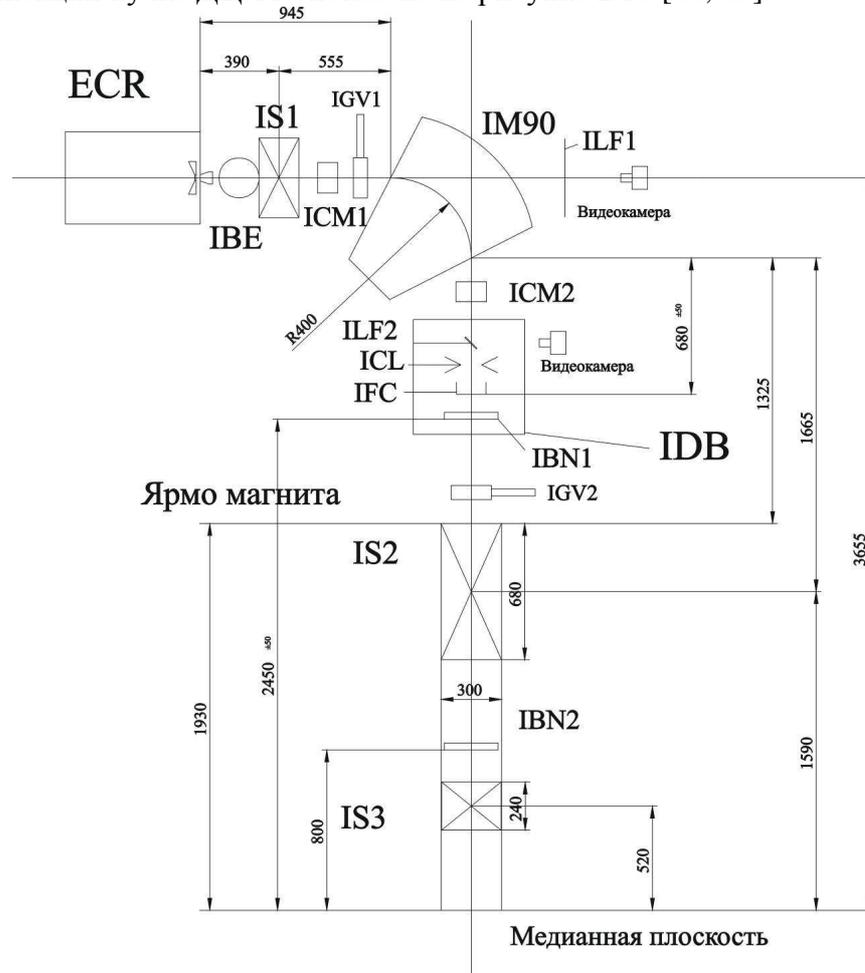


Рис. 2.15. Схема системы аксиальной инъекции пучка циклотрона ДЦ-110.

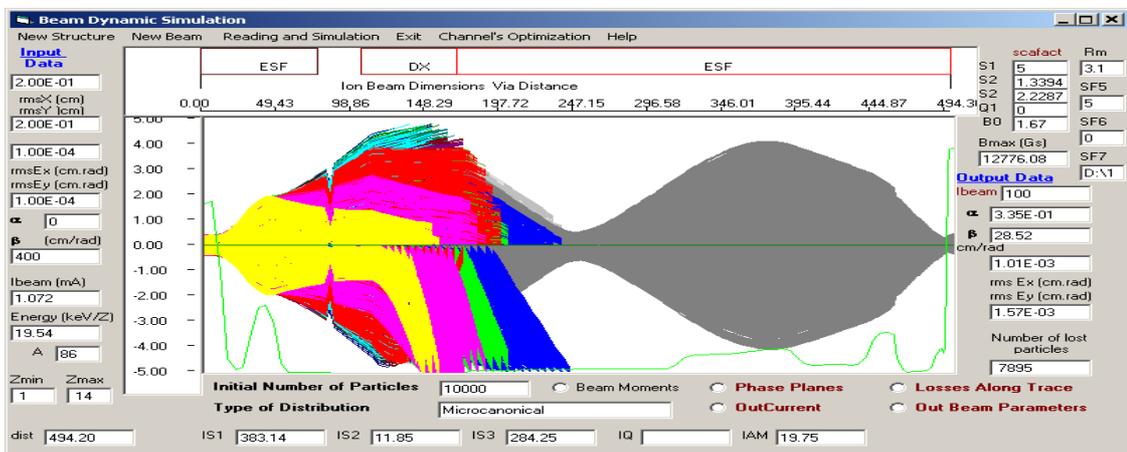


Рис. 2.16. Траектории частиц в канале. Эффективность транспортировки 100%.

## ИНФЛЕКТОР

Инфлектор в системе аксиальной инжекции служит для поворота пучка из вертикального канала в медианную плоскость. Известны три основных типа инфлекторов:

1. Электростатическое зеркало.
2. Спиральный.
3. Гиперболический.

### *Электростатическое зеркало*

Электростатическое зеркало состоит из верхнего электрода сетки, находящейся под потенциалом земли, и нижнего электрода, находящегося приблизительно под потенциалом, равным напряжению инжекции. Характеристиками зеркала являются:

- простота конструкции,
- универсальность по отношению к транспортируемым частицам,
- большой аксептанс.

К отрицательным свойствам зеркала нужно отнести:

- Плохие трансмиссионные свойства. В зеркале при повороте происходит смешивание вертикального и горизонтального эмиттансов пучка, что ведет к росту эммитансов пучка в обоих направлениях.

- Напряжение на зеркале должно быть приблизительно равным напряжению инжекции, то есть по сравнению с другими типами инфлекторов примерно в 2 – 3 раза выше, что вызывает технические трудности особенно при высоком  $U_{инж}$ .

- короткий срок службы сетки из-за быстрого распыления тяжелыми ионами.

### *Инфлектор гиперболический*

Состоит из двух параллельных плоскостей гиперболической формы. Электроды находятся под потенциалами разных знаков по величине равными  $\sim 0,5 (U_{инж})$ ,

Гиперболический инфлектор обладает хорошими оптическими свойствами. Сравнительно большой аксептанс позволяет использовать его в системах транспортировки пучков от любого типа источника ионов.

К недостаткам следует отнести:

- большие размеры,
- инфлектор требует внеосевую инжекцию пучка,
- геометрия рассчитана под одну частицу с фиксированной энергией.

### *Спиральный инфлектор:*

- компактный,
- имеет низкое напряжение на электродах 0,3-0,5 ( $U_{инж}$ )
- хорошие оптические свойства.

Недостатками являются:

- сложная технология изготовления,

- геометрия электродов рассчитана на одну частицу с определенной энергией, то есть требуется набор электродов для перекрытия широкого диапазона ускоряемых частиц.

Спиральный инфлектор в настоящее время получил наибольшее распространение. Расчет инфлектора может быть проведен с использованием ряда программ, изготовление производится на станках ЧПУ.

При разработке конструкции инфлектора важно обратить особое внимание на защиту изоляторов от запыления. Примером удачной конструкции может служить инфлектор, разработанный для циклотрона ИЦ-100. Изоляторы вынесены из зоны распыления, срок службы инфлектора без профилактики составляет около полугода (рис. 2.17) [77, 78].

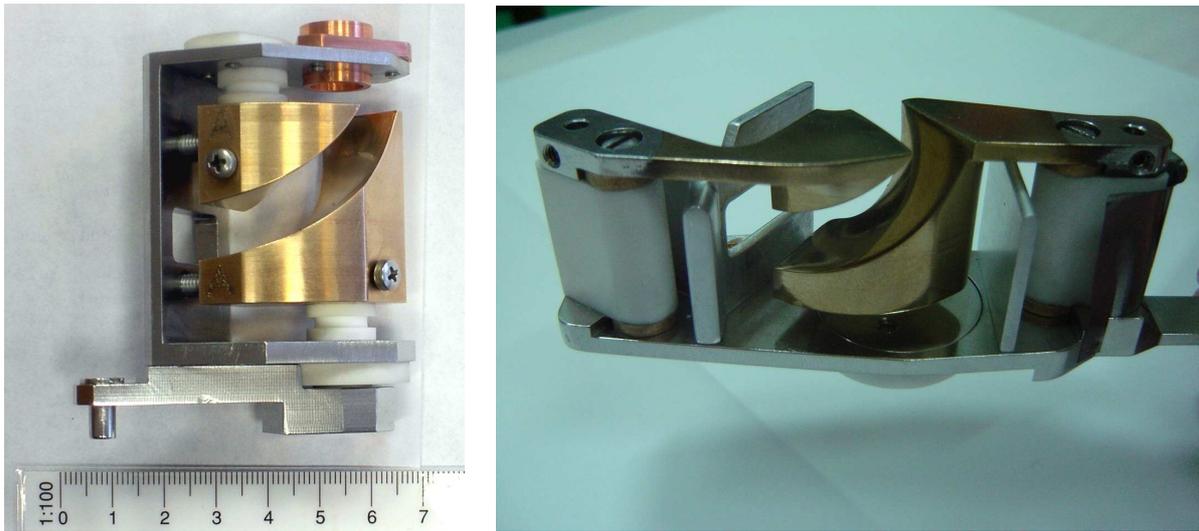


Рис. 2.17. Конструкция спиральных инфлекторов циклотронов ДЦ-60 (слева) и ИЦ-100 (справа).

### 2.2.2 Центр циклотрона

При проектировании и создании центра циклотрона следует решить несколько задач для эффективного захвата пучка в ускорение в первом ускоряющем зазоре и обеспечения минимальных потерь на первых оборотах в циклотроне:

1. формирование структуры с необходимой вертикальной и горизонтальной фокусировкой пучка для снижения аппаратных потерь,
2. максимальный набор энергии на первых оборотах для прохождения конструктивных элементов центра циклотрона,
3. центровка орбит,
4. максимально возможный фазовый захват пучка ионов в процесс ускорения.

На участке дрейфа между выходом инфлектора и входом в первый ускоряющий зазор пучок имеет тенденцию расходиться по вертикали и почти параллельный пучок по горизонтали. Радиальный и вертикальный эмиттансы пучка в начале ускорения не превышают  $200 \text{ п·мм·мрад}$ . Магнитное поле в области центральной пробки не имеет вариации, поэтому необходимая вертикальная фокусировка пучка на первых оборотах обеспечивается отрицательным радиальным градиентом спадающего магнитного поля и фокусирующим действием высокочастотного электрического поля в ускоряющих зазорах. Доминирующее значение для фокусировки пучка в центральной области циклотрона играет электрическое поле ускоряющих промежутков.

На рисунке 2.18 показаны расчеты динамики пучка ионов с  $A/Z=7$  на первых оборотах ускорения, сделанные для циклотрона ДЦ-60. Сформированное магнитное поле на уровне  $1,43 \text{ Тл}$  и геометрия ускоряющих зазоров позволяют осуществлять эффективный захват в ускорение и создают оптимальные условия движения пучка ионов в центральной области циклотрона. Темп ускорения и влияние фокусирующих сил позволяют пучку беспрепятственно обойти элементы центральной области, оставаясь в пределах вертикальной апертуры в  $33 \text{ мм}$  [108, 113].

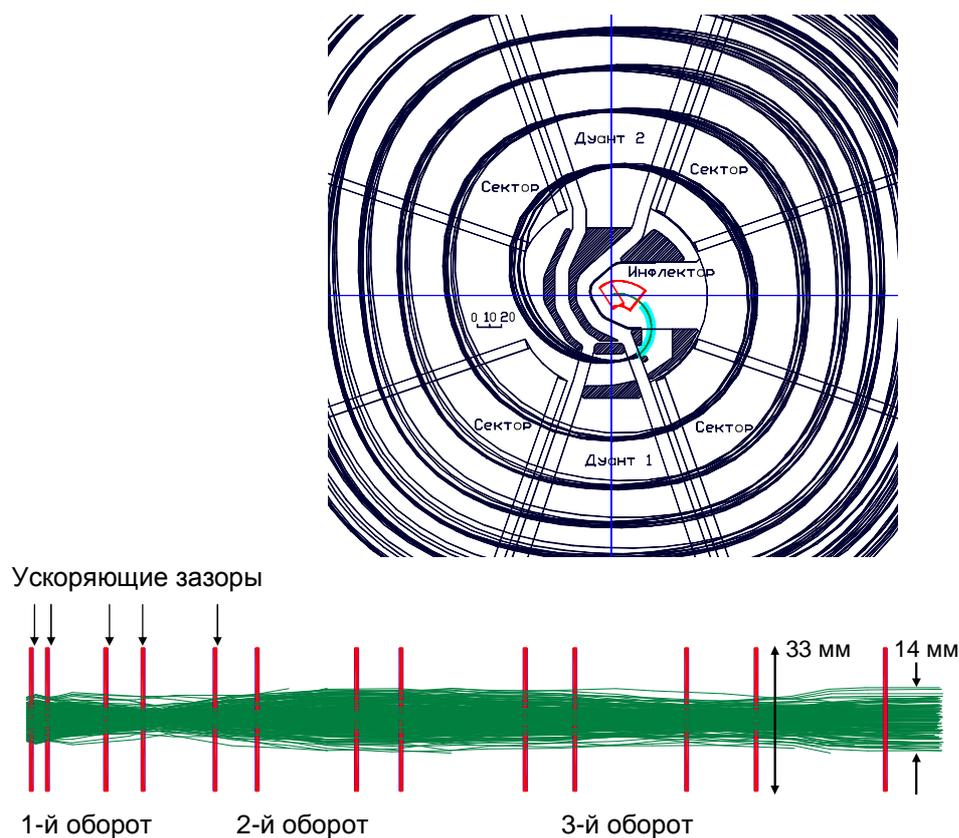


Рис. 2.18. Горизонтальное (вверху) и вертикальное (внизу) движение пучка ионов с  $A/Z = 7$  в центре циклотрона при ускорении в сформированном магнитном поле на уровне 1,43Тл. В расчете использован диапазон стартовых фаз  $\pm 10^\circ$ .

При создании центральной области важно выполнить вертикальную юстировку конструктивных элементов ускоряющих зазоров на первом обороте пучка. Точность позиционирования должна быть не хуже 0,5 мм, в противном случае могут наблюдаться вертикальные колебания пучка относительно медианной плоскости циклотрона.

На фотографиях, представленных на рисунке 2.19, показана магнитная структура циклотрона ИЦ-100, на нижних фотографиях – след от пучка на входе в первый ускоряющий зазор (слева) и изображение пучка на люминофоре на первом обороте через  $180^\circ$  от первого ускоряющего зазора (справа). Экспериментальные данные совпадают с расчетами, сделанными при разработке проекта ИЦ-100.

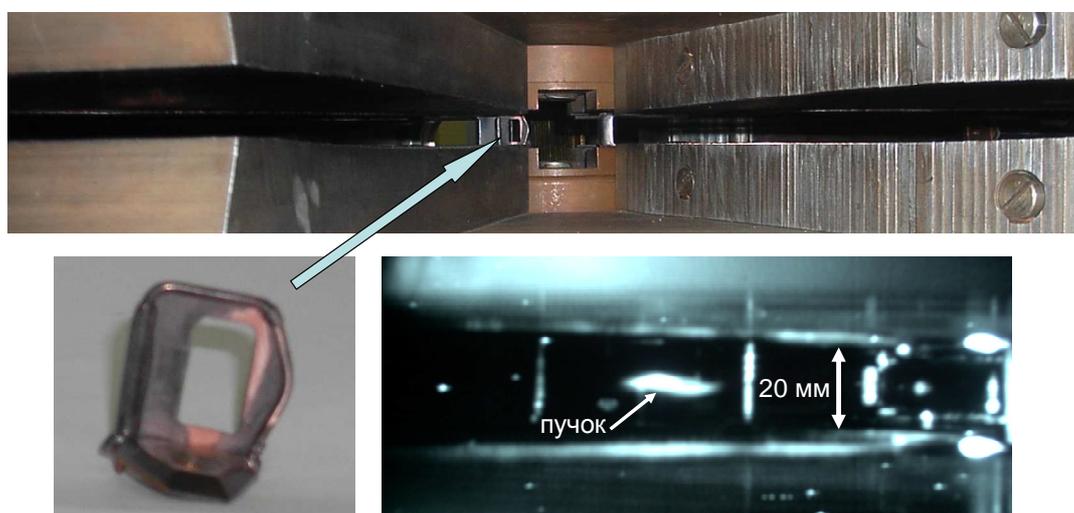


Рис. 2.19. Циклотрон ИЦ-100, изображение пучка на рамке первого ускоряющего зазора и на люминофоре на первом обороте через  $180^\circ$  от первого ускоряющего зазора.

### 2.2.3 Система банчировки пучка ионов в каналах аксиальной инжекции циклотронов.

Фазовый акцептанс циклотрона составляет примерно  $20^\circ$ – $30^\circ$ , это означает, что при равномерной плотности пучка по времени в ускорение может быть захвачено 5 - 8% пучка. Система внешней инжекции позволяет произвести компрессию частиц в нужный диапазон фаз за счет использования системы группировки (банчировки) пучка [45, 57, 71, 74, 79, 85].

Для получения максимального коэффициента захвата (группирователь) банчер должен увеличивать скорость ионов пропорционально их фазе для того, чтобы после прохождения участка дрейфа все частицы на входе в первый ускоряющий зазор дуанта находились в одной фазе. Это свойство банчера требует напряжения пилообразной формы. Современные возможности позволяют получить форму напряжения на банчере, близкой к пилообразной. Однако электроды линейного банчера можно разместить только вне аксиального канала магнита, поскольку генератор пилообразного напряжения должен располагаться непосредственно около электродов банчера. При больших токах инжектируемого пучка расположение линейного банчера на расстоянии в несколько метров от центра циклотрона значительно снижает его положительные свойства из-за дебанчирующих эффектов в канале инжекции и прежде всего эффекта пространственного заряда. Поэтому часто используют синусоидальный банчер, который можно расположить в аксиальном канале на расстоянии около 500 мм от центра. Он работает эффективно при интенсивности пучка в несколько десятков мкА.

Приближение пилообразной формы напряжения может быть получено с помощью сложения сигналов генераторов 1-й, 2-й и 3-й гармоник. Такая система банчеров используется на циклотронах, но имеет сложную систему настройки.

В ЛЯР разработана и внедрена система двойной банчировки пучка для увеличения эффективности захвата в ускорение инжектируемого пучка высокой интенсивности. В системе с двойной банчировкой линейный банчер располагается вне аксиального канала полюса магнита. Его назначение – сгруппировать инжектируемые ионы в  $180^\circ$  интервал фаз в зоне расположения синусоидального банчера, который эффективно работает в этом диапазоне фаз. Впервые такая система была применена на циклотроне У-400 (рис. 2.20) для получения интенсивного пучка ионов  $^{48}\text{Ca}^{5+}$ . Захват пучка в ускорение при интенсивности пучка 2–3 мкА достигал 65 %, при интенсивности пучка 70–80 мкА – (25–30)% (рис. 2.21) [109, 111]. В более коротком канале инжекции на циклотроне ДЦ-110 коэффициент захвата был получен около 35% при интенсивности инжектируемого пучка  $\sim 100$  мкА [45]. Такие коэффициенты невозможно было получить при использовании одного из банчеров.

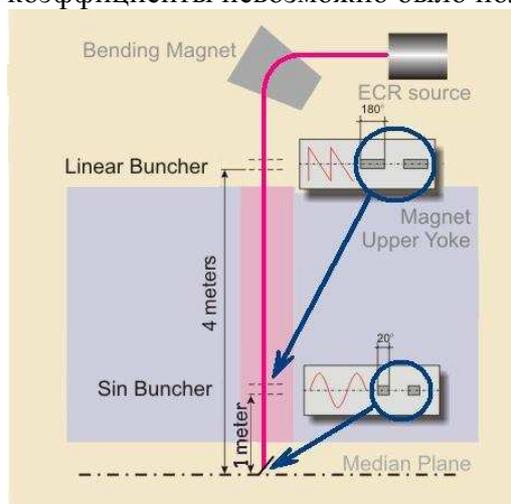


Рис. 2.20. Схема системы двойной банчировки на циклотроне У-400.

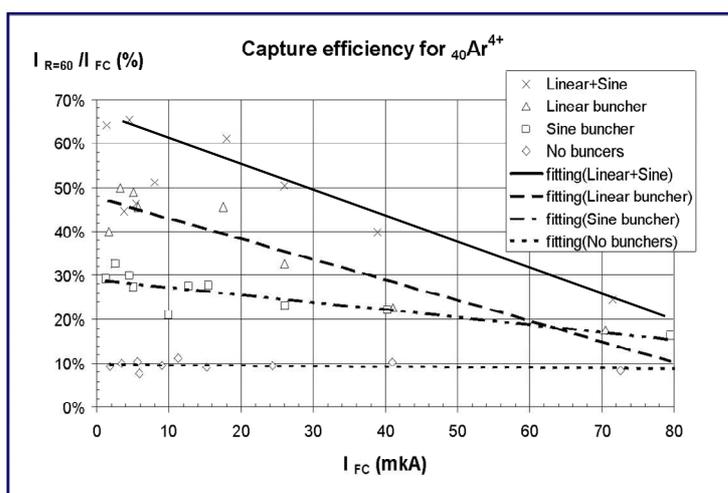
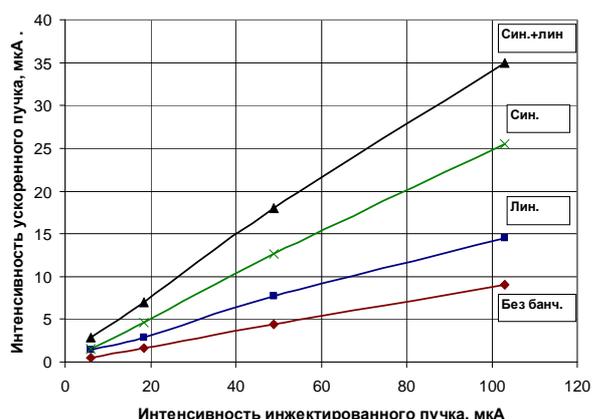


Рис. 2.21. Захват пучка в ускорение на У-400 без банчировки пучка и при использовании отдельно синусоидального, линейного банчеров и в режиме совместной работы.

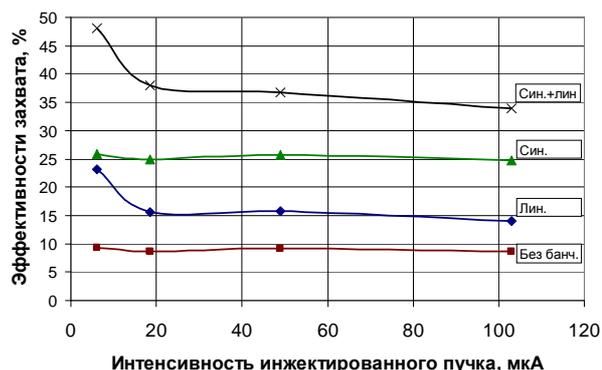
В системе аксиальной инъекции пучка циклотрона ДЦ-110 использованы также два банчера – линейный, расположенный на расстоянии 2450 мм от медианной плоскости, и синусоидальный, расположенный на расстоянии 800 мм от медианной плоскости. В процессе пусконаладочных работ на циклотроне была исследована трансмиссия пучка  $^{40}\text{Ar}^{6+}$  и  $^{86}\text{Kr}^{13+}$  по каналу инъекции и захват ионов в ускорение в зависимости от режима работы системы банчировки [45].

Экспериментальные зависимости тока ускоренного пучка  $^{40}\text{Ar}^{6+}$  и коэффициента захвата ионов в ускорение от интенсивности ускоренного пучка показаны на рисунке 2.22 и таблице 2.3.

а)



б)



в)

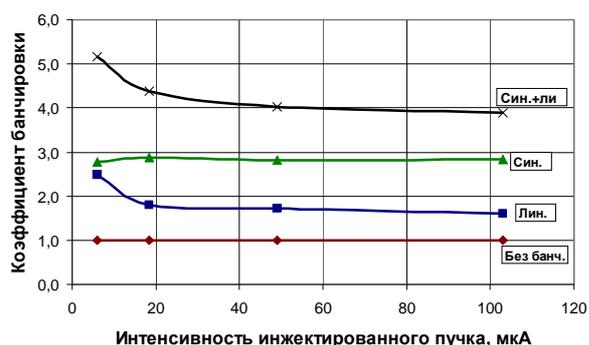


Рис. 2.22. Эффективность захвата пучка ионов  $^{40}\text{Ar}^{6+}$  в ускорение на радиусе 200 мм от интенсивности инжектированного пучка при разной комбинации включения банчеров. а) зависимость интенсивности ускоренного пучка на R=200мм от интенсивности инжектированного пучка. б) эффективность захвата пучка в ускорение от интенсивности инжектированного пучка. в) изменение коэффициента банчировки пучка при разной комбинации включения банчеров от интенсивности инжектированного пучка.

В приведенных данных видно, что коэффициент банчировки слабо зависит от интенсивности инжектируемого пучка вплоть до 100 мкА (34–38% захвата). Увеличение коэффициента захвата до 48% при низкой интенсивности инжектированного пучка (6 мкА) связано не только со снижением влияния пространственного заряда в пучке, но, главным образом, с уменьшением эмиттанса пучка при низкой интенсивности из ионного источника [45, 110]. Поскольку снижение интенсивности осуществлялось за счет уменьшения СВЧ мощности, подаваемой в разрядную камеру источника (табл. 2.4).

Таблица 2.3. Коэффициент захвата инжектированного пучка в ускорение при разной комбинации включения банчеров.

I инж, мкА	Коэффициент захвата инжектированного пучка в ускорение в %			
	без банч	Lin- вкл.	Sin- вкл.	Sin+Lin – вкл.
6	9,3	23,2	25,8	48,2
18,4	8,7	15,6	25,0	38,0
49	9,1	15,7	25,7	36,7
103	8,7	14,1	24,8	34,0

Таблица 2.4. Результаты измерения эмиттанса пучка при разной мощности СВЧ генератора.

Ion source	UHF power (W)	$I$ ( $\text{Ca}^{6+}$ ) ( $\epsilon\mu\text{A}$ )	$I$ ( $\text{He}^+$ ) ( $\epsilon\mu\text{A}$ )	Emittance ( $\pi$ mm mrad)
DECRIС-2	400	100	~500	220–350
DECRIС-4	50	100	~500	85
DECRIС-4	50	50	~500	85
DECRIС-4	100	100	~500	170
DECRIС-4	100	100	~100	100
DECRIС-4	100	100	0	95
DECRIС-4	50	100	0	85

В эксперименте линейный банчер в совокупности с синусоидальным дает дополнительный коэффициент увеличения тока ускоренного пучка в 1,5–1,8 раз.

На циклотроне ДЦ-110 были исследованы также трансмиссия пучка ионов  $^{86}\text{Kr}^{13+}$  по каналу аксиальной инжекции пучка и зависимость эффективности захвата ионов  $^{86}\text{Kr}^{13+}$  от интенсивности инжектируемого пучка в разных режимах включения системы банчеров (рис. 2.23-2.25). Отношение токов ускоренного ( $I_{\text{уск}}$ ) и инжектированного ( $I_{\text{инж}}$ ) пучка падает с ростом интенсивности в любом режиме. Отношение токов  $I_{\text{уск}} / I_{\text{инж}}$  определяется коэффициентом трансмиссии по каналу инжекции и коэффициентом захвата в ускорение. Коэффициент банчеровки пучка слабо зависит от интенсивности, т.е. снижение отношения  $I_{\text{уск}} / I_{\text{инж}}$  вызвано главным образом увеличением потерь пучка в канале транспортировки из-за увеличения эмиттанса с ростом интенсивности пучка и увеличением вакуумных потерь, вызванных ухудшением вакуума из-за стимулированной десорбции газа со стенок ионопровода. Поскольку сечение перезарядки ионов  $^{86}\text{Kr}^{13+}$  на остаточном газе значительно больше по сравнению с  $^{40}\text{Ar}^{6+}$ , то эффект снижения трансмиссии с увеличением интенсивности инжектируемого пучка  $^{86}\text{Kr}^{13+}$  проявляется сильнее.

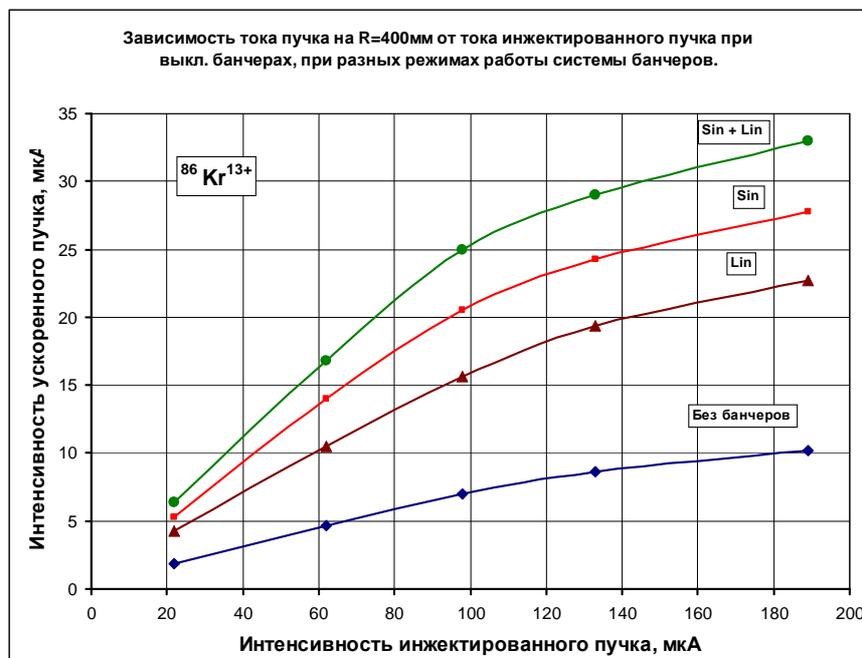


Рис. 2.23. Зависимость тока ускоренного пучка ионов  $^{86}\text{Kr}^{13+}$  на радиусе 400 мм от тока инжектированного пучка.

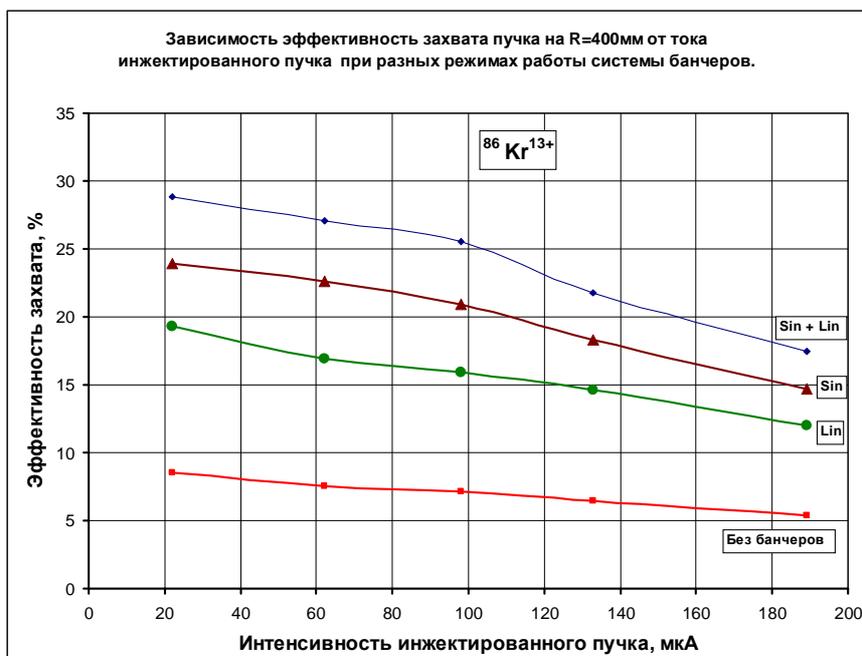


Рис. 2.24. Зависимость эффективности захвата инжектированного пучка ионов  $^{86}\text{Kr}^{13+}$  в ускорение от интенсивности пучка.

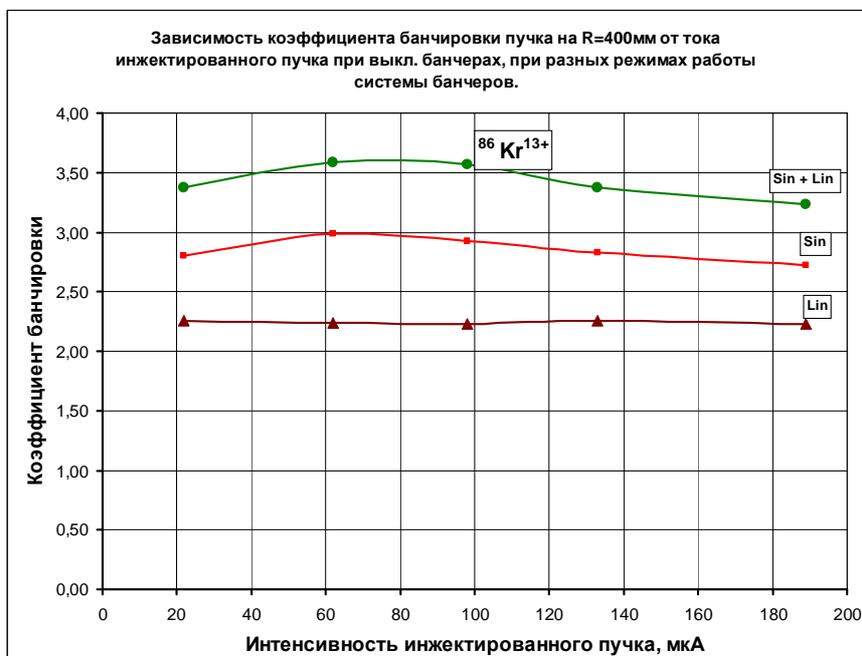


Рис. 2.25. Зависимость коэффициента банчировки от интенсивности пучка при автономной работе синусоидального и линейного банчеров и режиме двойной банчировки.

### Влияние расстояния между банчером и медианной плоскостью на коэффициент захвата ионов в ускорение.

При высокой интенсивности инжектируемого пучка расстояние от банчера до центра циклотрона существенным образом влияет на коэффициент банчировки. На рисунке 2.26 показана экспериментальная зависимость коэффициента банчировки от интенсивности инжектируемого пучка  $\text{Ar}$  на циклотроне У-400 при расположении синусоидального банчера на расстояниях в 1 м и 4 м от медианной плоскости. Влияние дебанчирующих эффектов для банчера, расположенного в 4 м от медианной плоскости, проявляется значительно сильнее. Если при интенсивности инжектируемого пучка до 10 мкА коэффициент увеличения тока ускоренного пучка за счет использования синусоидального банчера составляет примерно 4,2 раза для обоих случаев ( $L= 1,2\text{м}$  и  $4\text{м}$ ), то при токе инъекции 80 мкА банчер, расположенный на расстоянии 4 м, практически перестает работать.

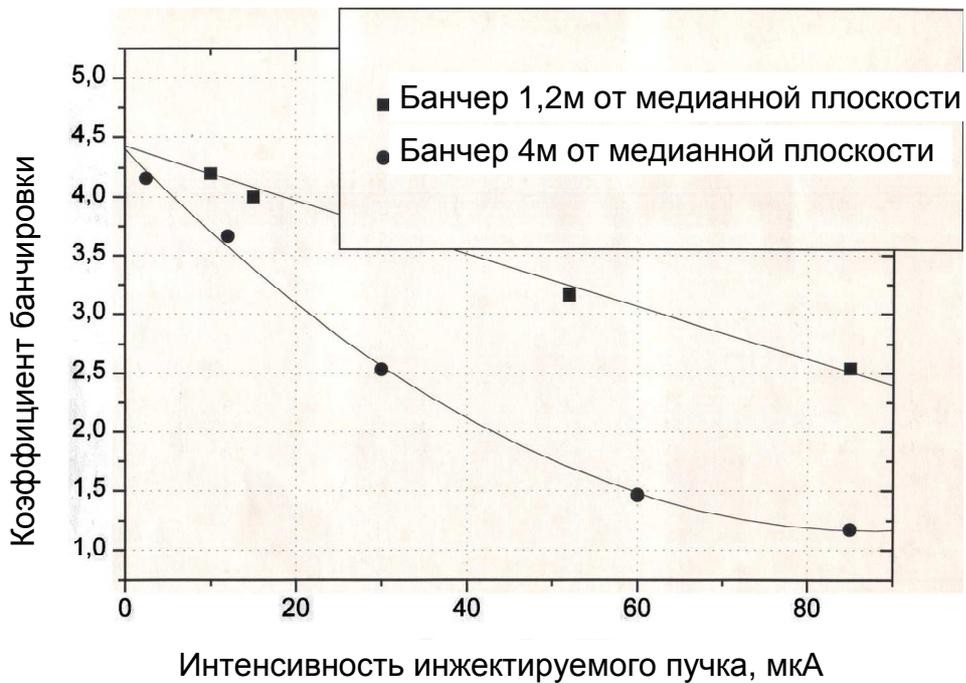


Рис. 2.26. Зависимость коэффициента банчировки от интенсивности инжектируемого пучка Ag на циклотроне У-400 при расположении синусоидального банчера в 1,2 м и 4 м от медианной плоскости.

В следующем эксперименте синусоидальный банчер в системе аксиальной инжекции пучка У-400 был приближен к медианной плоскости на расстояние 0,8 м. Эффективность захвата пучка в ускорение до (25–30)% сохранилась при интенсивности инжектированного пучка до 100 мкА (рис. 2.27) [111, 115].

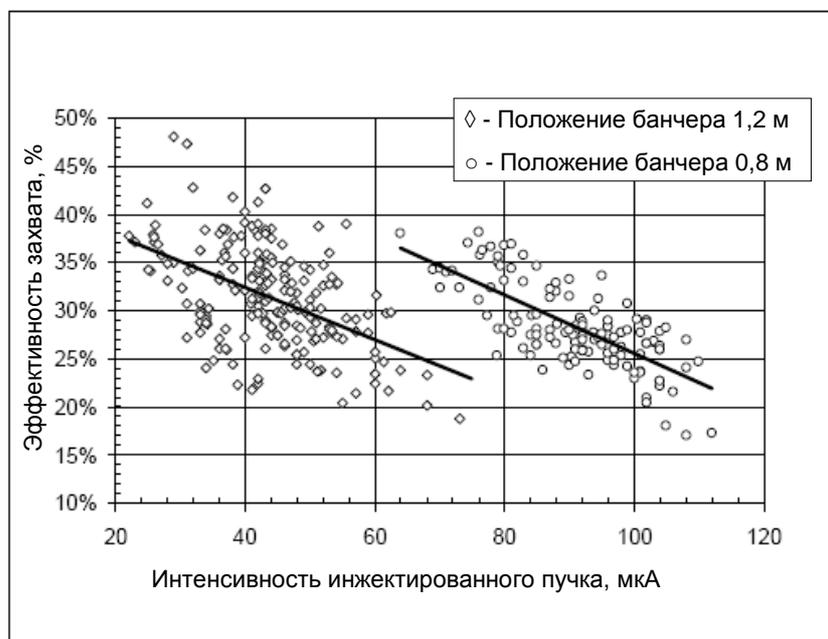


Рис. 2.27. Эффективность захвата пучка в ускорение на У-400 (отношение тока пучка из источника ионов к току ускоренного пучка на радиусе 400 мм) с использованием синусоидального банчера, расположенного на расстоянии 1,2 м и 0,8 м от медианной плоскости.

На циклотроне ДЦ-60 синусоидальный банчер расположен вне аксиального канала магнита на расстоянии 1,8 м от центра циклотрона [27, 42]. Эффективность банчировки снижается при токе инжектируемого пучка свыше 40 мкА (рис. 2.28, табл. 2.5). Измерения проводились при ускорении пучка ионов  $^{14}\text{N}^{2+}$  при частоте ускоряющей системы  $F_{\text{вч}} = 12,61$  МГц. Для сравнения: на циклотроне ДЦ-110 банчер, расположенный на расстоянии 0,8 м от медианной плоскости, эффективно работает при интенсивности до 100 мкА.

Таблица 2.5. Эффективность захвата в ускорение пучка  $^{14}\text{N}^{2+}$  на циклотроне ДЦ-60 без системы банчировки и с включенным синусоидальным банчером при разной интенсивности инжектируемого пучка.

Ток инжектируемого пучка (после сепарации), мкА	Ток пучка на радиусе 680мм без банчера, мкА	Эффективность захвата в ускорение пучка без банчера, (%)	Ток пучка на радиусе 680мм с банчером, мкА	Эффективность захвата и ускорения пучка с банчером, %	Коэфф. банчировки
12	0,55	4,58	2,03	16,9	3.7
38	1,93	5,08	6,5	17,1	3.4
74	3,66	4,95	10,3	13,9	2.8
95	4,4	4,63	11	11,6	2.5

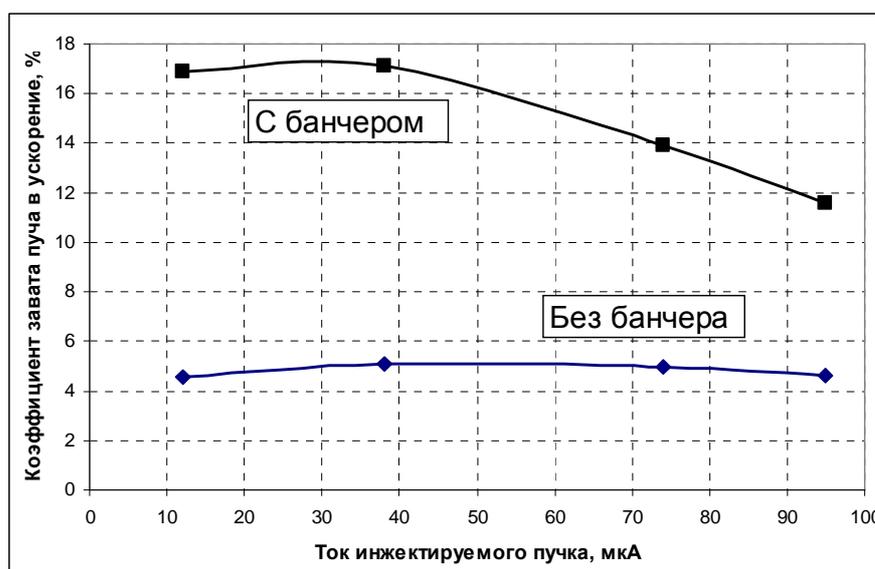


Рис. 2.28. Зависимость коэффициентов захвата пучка ионов  $^{14}\text{N}^{2+}$  в ускорение на циклотроне ДЦ-60 без системы банчировки и с включенным синусоидальным банчером, расположенным на расстоянии 1,8 м от центра при разных интенсивностях инжектируемого пучка.

### Дебанчирующие факторы, влияющие на эффективность работы банчера

В реальных условиях в системе аксиальной инжекции действует ряд факторов, снижающих эффективность банчировки. К дебанчирующим эффектам следует отнести:

- влияние пространственного заряда, который возрастает с увеличением интенсивности пучка и увеличением дрейфового участка,
- рост эмиттанса инжектируемого пучка с увеличением интенсивности,
- отклонение конструкции от идеальных условий (неоднородность электрического поля в зазоре банчера, нелинейность напряжения и др.),
- время пролета зазора банчера,
- разность длины траекторий ионов на участке дрейфа,

- дефокусирующий эффект инфлектора, который зависит от геометрии зазора инфлектора, размера пучка на входе и не зависит от интенсивности пучка, эффект вызывает дополнительный разброс по фазам порядка  $\pm 10^\circ$  (рис. 2.29, 2.30).

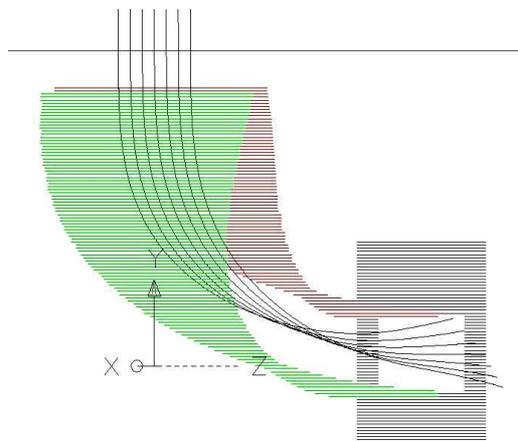


Рис. 2.29. Численное моделирование траекторий ионов при прохождении инфлектора.

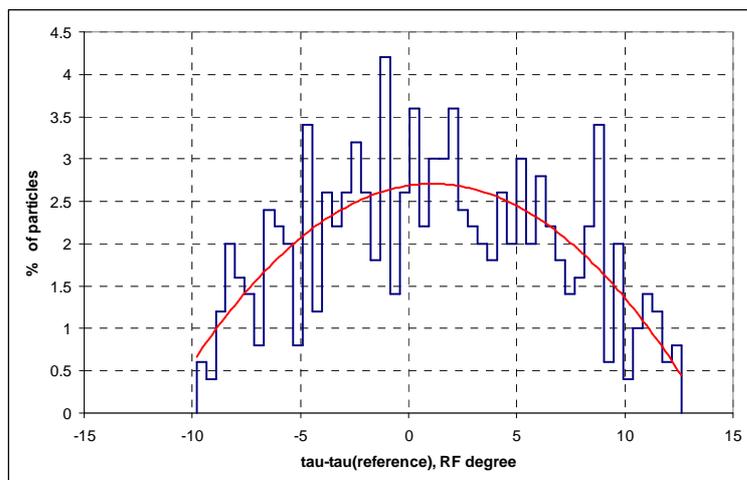


Рис. 2.30. Распределение частиц по фазам на выходе из инфлектора, при нулевом фазовом разбросе на входе.

### Влияние частоты ускоряющей системы на эффективность работы банчера

Частота обращения ионов в циклотроне определяется магнитным полем и отношением массы к заряду ускоряемых ионов. В четырехсекторных циклотронах используется ускоряющая высокочастотная структура, работающая на 2, 4, или 6 гармонике частоты обращения ионов. Более высокий номер гармоники позволяет создать резонаторы с меньшими размерами. Для циклотронов с малым радиусом полюса это особенно важно.

Увеличение номера гармоники и частоты ускоряющей системы ведет к уменьшению линейной длины сгустка ионов, который формируется системой банчеров на входе в инфлектор и в первый ускоряющий зазор.

Дебанчирующие эффекты проявляются больше с уменьшением соотношения линейной длины банча к радиальному размеру пучка, которое можно оценить по формуле:

$$S = \frac{L_{\text{банч}}}{d_{\text{пучка}}} = 13,89 \cdot 10^6 \cdot \sqrt{\frac{Z \cdot U_{\text{инж}}}{A}} \cdot \frac{\Phi_{\text{банч}}}{F_{\text{част}} \cdot n \cdot 360} \cdot \frac{1}{d_{\text{пучка}}}$$

где  $U_{\text{инж}}$  – напряжение инжекции (В),  $A$  – масса иона,  $Z$  – заряд иона,  $\Phi_{\text{банч}}$  – фазовая длина сгустка в градусах,  $F_{\text{част}}$  – частота обращения ионов (Гц),  $n$  – номер гармоники, на которой работает ускоряющая система циклотрона,  $d_{\text{пучка}}$  – диаметр пучка на входе в инфлектор (мм).

В таблице 2.6 приведены параметры системы инжекции пучка в циклотроны и коэффициент увеличения тока ускоренного пучка при использовании синусоидального банчера в зависимости от соотношения линейной длины банча к радиальному размеру пучка на входе в инфлектор ( $S$ ) для циклотронов ДЦ-60 и ДЦ-110, У-400, которые работают на 2, 4 и 6 гармониках. Из таблицы видно, что эффективность захвата пучка в ускорение на более низкой гармонике выше.

Таблица 2.6. Коэффициент увеличения тока ускоренного пучка при использовании синусоидального банчера на циклотронах ДЦ-60 и ДЦ-110, У-400.

Циклотрон	Ион	U <sub>инж</sub>	F <sub>вч</sub> МГц	Гарм.	Расстояние банчер – медианная плоскость (м)	Лин. длина сгустка при 30° захвате (мм)	S	Коэфф захвата без банч.	Коэфф. захвата син. банч		Коэфф банч.
									I <sub>инж</sub> ~3 мкА	I <sub>инж</sub> ~100 мкА	
ДЦ-110	<sup>40</sup> Ar <sup>6+</sup>	20,0	7,75	(n=2)	0,8	8,2	1	8,7%	26%	25%	3
У-400	<sup>48</sup> Ca <sup>5+</sup>	16,0	6,77	(n=2)	0,84	7,0	0,9	9-10%	29%	18%	4-5
ДЦ-60	<sup>40</sup> Ar <sup>6+</sup>	12,0	15,18	(n=4)	1,8	3,2	0,4	5-6%	20%		3,7
ДЦ-60	<sup>14</sup> N <sup>2+</sup>	12,0	14,46	(n=4)	1,8	3,31	0,41	5%	17%		3,2
								5%		12%	2,6
ДЦ-60	<sup>40</sup> Ar <sup>4+</sup>	11,0	15,2	(n=6)	1,8	2,5	0,31	3-4%	10%		2,5

## Выводы

Использование системы банчировки на канале аксиальной инжекции пучка в циклотрон позволяет значительно увеличить интенсивность ускоренного пучка за счет группировки ионов в диапазоне фазового захвата ионов в ускорение. На циклотронах ЛЯР получен коэффициент увеличения интенсивности пучка ускоренных ионов от 2 до 8 раз за счет использования системы банчировки. Коэффициент банчировки существенным образом зависит от интенсивности инжектированного пучка, частоты ускоряющей системы, напряжения инжекции, расстояния между банчером и центром циклотрона.

На циклотронах ЛЯР исследована эффективность работы синусоидального банчера и системы двойной банчировки, состоящей из синусоидального и линейного банчеров. Использование линейного банчера в дополнение к синусоидальному позволяет получить дополнительный коэффициент увеличения интенсивности ускоренного пучка в 1,5– 1,8 раза.

Экспериментально получена эффективность захвата инжектированного пучка в ускорение (50 – 65)% при низкой интенсивности (3-5) мкА, при высокой интенсивности пучка ~100 мкА достигнута эффективность захвата около 30%. Снижение коэффициента банчировки вызвано главным образом влиянием пространственного заряда.

Для повышения эффективности системы банчировки и повышения коэффициента захвата пучка в ускорение целесообразно в пределах технических возможностей:

- повышать энергию инжекции ионов,
- уменьшать расстояние между банчером и медианной плоскостью,
- снижать частоту ускоряющего напряжения путем перехода на более низкие гармоники ускорения.
- снижать размер пучка при прохождении дефлектора.

## 2.3 Магнитная структура циклотронов

Магнитные системы циклотронов тяжелых ионов, разработанных в ЛЯР, построены на базе Ш-образных магнитов. Такой тип магнитов дает свободный доступ к вакуумной камере циклотрона и обслуживанию узлов ускорителя. Поскольку пучки ионов циклотронов для прикладных задач имеют энергию несколько МэВ/нуклон, магнитная структура циклотрона создается с использованием секторов с прямыми границами. Такая структура обеспечивает достаточную фокусировку в процессе ускорения и наиболее проста в производстве.

На первом этапе проектирования циклотрона проводится комплексная компоновка и оптимизация основных узлов циклотрона, выбор характеристик, размеров, конструкторских решений.

## 2.3.1 Выбор магнитной структуры и способа шиммирования

### Метод формирования магнитного поля циклотрона

Процесс оптимизации магнитных структур циклотронов ЛЯР сочетает аналитический, численный и экспериментальный подходы к моделированию и формированию магнитной структуры изохронного циклотрона [113, 114].

На первом этапе оптимизация осуществляется на основе эмпирических закономерностей, полученных расчетным и экспериментальным путем при создании циклотронов У200, У400, МЦ400, ИЦ100, ДЦ-72, У400Р [114, 118-125]. Полученные закономерности объединены в аналитический программный блок, позволяющий проводить оценку размеров магнитопровода, параметров обмотки возбуждения и корректирующих обмоток, геометрии элементов рабочего зазора.

Результаты оптимизации первого этапа являются исходными параметрами для последующего численного моделирования трехмерных магнитных структур. На последнем этапе производится измерение магнитного поля циклотрона и производится корректировка в случае необходимости.

Современные компьютерные программы, такие как TOSCA, КОМПОТ, MERMAID [128-130] позволяют проводить трехмерные расчеты магнитных полей с высокой точностью. Компьютерное моделирование магнитной структуры сопровождается расчетами динамики пучков при ускорении в нескольких рабочих режимах. Многоитерационная задача компьютерного моделирования состоит из двух основных шагов: оптимизация веса, габаритных размеров магнитопровода, и оптимизация параметров магнитных элементов рабочей области для создания изохронных условий ускорения. Сначала подбираются оптимальные геометрические размеры электромагнита с точки зрения эффективности использования железных масс магнитопровода. Затем проводятся формирование изохронного распределения магнитного поля в основной области ускорения, формирование поля в центре и в области вывода пучка из циклотрона, расчет вкладов корректирующих катушек. Полученные в ходе формирования данные проверяются численными расчетами динамики пучков при ускорении.

Особо стоит выделить задачу по компенсации влияния пассивного магнитного канала, используемого для фокусировки пучка в системе вывода пучков из циклотрона. Установка магнитного канала вносит несимметричность в распределение магнитного поля. С одной стороны это приводит к изменению радиального распределения среднего магнитного поля, с другой – к появлению первой гармоники азимутального распределения поля.

На финальной стадии расчетов в компьютерную модель электромагнита циклотрона вносятся данные измерений магнитных свойств стали, применяемой в производстве элементов магнитопровода. Использование измеренных значений  $\mu(B)$  значительно повышает точность расчетов. Проводится также расчет и анализ деформации элементов магнитной структуры, вызванной действием объемной пондеромоторной силы.

В ходе экспериментальной части методики проводится измерение магнитного поля циклотрона и сравнение с результатами компьютерного моделирования. На основе проведенного анализа проводится необходимая коррекция отклонений.

В магнитных структурах, где используется пассивный фокусирующий канал, магнитное поле измеряется и формируется в отсутствие магнитного канала, поскольку система измерения поля не может быть смонтирована при установленных каналах в рабочее положение. Таким образом, рабочее поле циклотрона является суперпозицией сформированного измеренного поля в отсутствие магнитного канала и расчетного вклада магнитного канала. Современные методы измерения и расчета позволяют получать достаточную точность формирования. Однако для того чтобы расчеты и измерения совпадали, принципиально важно использовать измеренные характеристики железа, из которого производилось изготовление магнитной структуры [65, 66, 112, 13, 138, 140]. Метод комбинированного формирования поля был применен на ускорителях ЛЯР и показал

хорошие результаты. Параметры полученных пучков на ускорителях соответствуют расчету [41,42, 45, 79]

### Влияние способа шиммирования на свойства магнитной структуры

Для циклотронов, в которых предусмотрена вариация энергии ионов за счет изменения магнитного поля, можно построить рабочую диаграмму. Рабочая диаграмма связывает среднее магнитное поле в центре циклотрона, энергию пучка на радиусе вывода, частоту обращения ионов и номер гармоники частоты ускоряющей системы. В качестве примера на рисунке 2.31 представлена рабочая диаграмма циклотрона ДЦ-60.

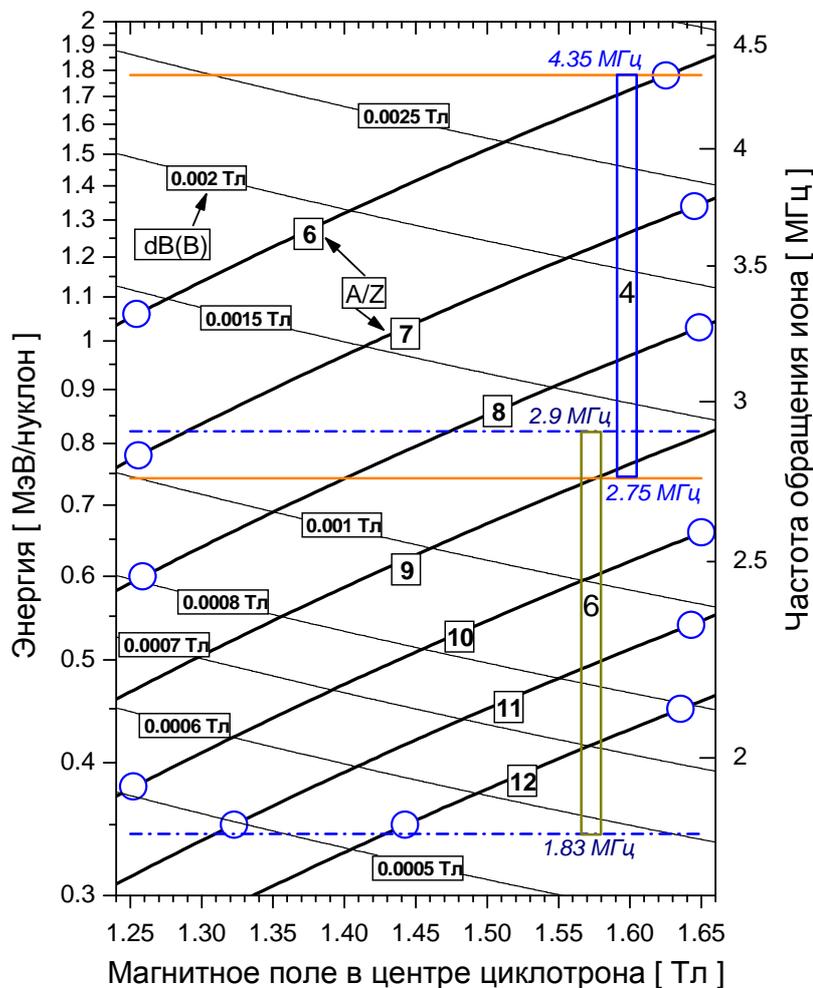


Рис. 2.31. Рабочая диаграмма циклотрона ДЦ-60

Представленная на диаграмме связь между основными характеристиками рабочего режима циклотрона определяется нижеследующими выражениями [131]:

$$T_{ion}/A = E_0 \left( \left( 1 - \left( C_1 \frac{ZR_{ext}B_0}{A} \right)^2 \right)^{-2} - 1 \right) \quad [\text{МэВ/нуклон, Тл, м}] \quad (1)$$

$$f_{RF} = n \frac{\omega}{2\pi} = C_2 (Z/A) B_0 \quad [\text{МГц, Тл}] \quad (2)$$

$$T_{ion} = E_0 (\gamma - 1) = E_0 \frac{dB}{B_0} \quad [\text{МэВ/нуклон, Тл}] \quad (3)$$

где  $R_{ext}$  – конечный радиус ускорения пучков,  $n = 4$  или  $6$  – гармоника ускоряющего ВЧ поля,  $C_1 = \frac{e}{m_0 c} = 0.32184 \text{ Тл}^{-1} \text{ м}^{-1}$  и  $C_2 = \frac{e c^2}{2 \pi E_{amu}} = 15.356122 \text{ МГц} / \text{Тл}$

Рабочая диаграмма циклотрона ДЦ-60 определяет диапазон изменения среднего магнитного поля в центре циклотрона от 1,25 Тл до 1,65 Тл. Линии, обозначенные цифрами 6-12, показывают соотношение между уровнем магнитного поля, энергией ионов и частотой обращения ускоряемых ионов с соответствующим отношением массы к заряду  $A/Z$  от 6 до 12. Линиями, обозначенными как 0,0005-0,0025 Тл, показана величина необходимого роста среднего магнитного поля от центра циклотрона до конечного радиуса для выполнения изохронных условий ускорения. По вертикали рабочая диаграмма разбита на две области, соответствующие режимам ускорения на 4 или 6 гармониках ускоряющего ВЧ поля. Эти области имеют общую зону пересечения, в которой пучки заряженных частиц могут быть ускорены как на 4-й и на 6-й гармониках ВЧ напряжения. Граничные значения рабочей области циклотрона на диаграмме обозначены кружками для каждого типа ионов ( $A/Z$ ).

В циклотронах, в которых предусматривается вариация уровня магнитного поля, существенную роль играет способ шиммирования секторов. Способ шиммирования секторов оказывает существенное влияние на поведение распределения магнитного поля по радиусу при вариации магнитного поля. Наиболее часто используют следующие способы шиммирования секторов:

- Азимутальное шиммирование, при котором проводится обработка боковых поверхностей секторов.
- Аксиальное шиммирование, при котором сектора обрабатываются со стороны медианной плоскости магнита.
- Аксиальное шиммирование, при котором сектора обрабатываются со стороны полюса.

При формировании магнитной структуры циклотрона необходимо подобрать такие способы шиммирования, которые наилучшим образом обеспечивают соответствие роста магнитного поля по радиусу с требованиями рабочей диаграммы.

В циклотронах тяжелых ионов с энергией 1–2,5 МэВ/нуклон требуемый рост поля по радиусу меньше 40 Гс, т.е. распределение практически должно оставаться плоским. Азимутальный способ шиммирования секторов в данном случае подходит наилучшим образом. Выбор основан на расчетных и экспериментальных данных, дающих представление о влиянии способа шиммирования секторов на поведение зависимости радиального роста среднего магнитного поля электромагнита  $dV(B_0)_{\text{magnet}}$ . Исследования проведены на электромагнитах циклотронов, разрабатываемых в ЛЯР ОИЯИ. Некоторые результаты этих исследований представлены на рисунке 2.32. Азимутальное шиммирование применено на циклотронах У-400Р, ДЦ-60. Аксиальное шиммирование со стороны полюса применено на циклотроне МЦ-400 и модели циклотрона ДЦ-72 [132]. Аксиальное шиммирование со стороны медианной плоскости магнита применено на циклотроне ДЦ-72 [133].

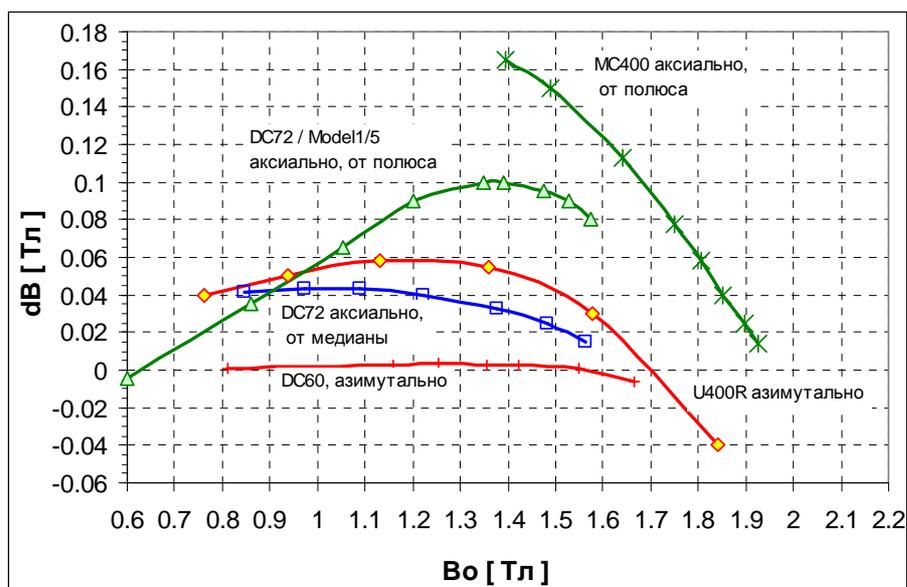


Рис. 2.32. Зависимость  $\text{dB}(B_0)_{\text{magnet}}$  для различных способов шиммирования секторов, примененных на циклотронах ЛЯР ОИЯИ.

Для циклотрона ДЦ-60 радиальное шиммирование выполнено путем смещения плоских секторов по радиусу от центра магнита, что обеспечило равномерно меняющуюся угловую протяженность сектора от  $36^\circ$  на внутреннем радиусе 80 мм до  $50^\circ$  на внешнем радиусе – 805 мм. При таком способе шиммирования рост магнитного поля по радиусу мало меняется при изменении уровня магнитного поля, что позволяет использовать маломощную систему токовой коррекции.

### Критерии формирования магнитного поля

Предварительные оценки требований на точность формирования магнитного поля, при котором обеспечиваются условия изохронизма, могут быть получены из соотношения (4) [134].

$$\Delta \sin(\varphi) \approx 2\pi h \varepsilon \frac{W}{\Delta W}, \quad (4)$$

где  $\varphi$  - фаза частицы по отношению к ВЧ напряжению,  $h$  – кратность ВЧ напряжения,  $\varepsilon = \frac{\Delta B}{B}$  – отклонение среднего поля от изохронного,  $\Delta W$  – энергия, набранная частицей за оборот,  $W$  – энергия ускоренного пучка частиц.

Полагая максимально допустимым изменение фазы ускоряемого пучка относительно ускоряющего ВЧ напряжения в пределах  $\pm 10^\circ$ , получаем предельное изменение величины  $\Delta \sin(\varphi) = 0,2$ .

Фокусирующие свойства магнитного поля обеспечиваются четырехсекторной магнитной структурой циклотрона, создающей необходимый уровень вариации магнитного поля. На первых оборотах в центре циклотрона пучок быстро покидает область резонанса  $Q_r=1$ , поэтому влияние резонанса на динамику пучка незначительно. Частоты свободных колебаний иона в основной области ускорения лежат в диапазоне  $1,01 < Q_r < 1,02$  и  $0,3 < Q_z < 0,4$  и обеспечивают радиальную и вертикальную фокусировку ускоряемых пучков ионов. В центральной области фокусировка обеспечена радиальным градиентом среднего магнитного поля и фокусирующим действием ускоряющего ВЧ поля.

Допуски на формирование магнитного поля определяются из аналитических оценок и численных расчетов влияния искажений магнитного поля на динамику пучков. Важным

фактором являются реальные точности изготовления и точности измерения магнитного поля. В целом для циклотронов тяжелых ионов 1– 2,5 МэВ/нуклон эти требования сведены к точности формирования среднего магнитного поля в области ускорения не хуже  $10^{-3}$  и к достижению приемлемого уровня первой гармоники поля не более 3 - 4 Гс. На рисунке 2.33, 2.34 показаны свойства магнитной структуры циклотрона ДЦ-60, типичные для циклотронов с такой структурой.

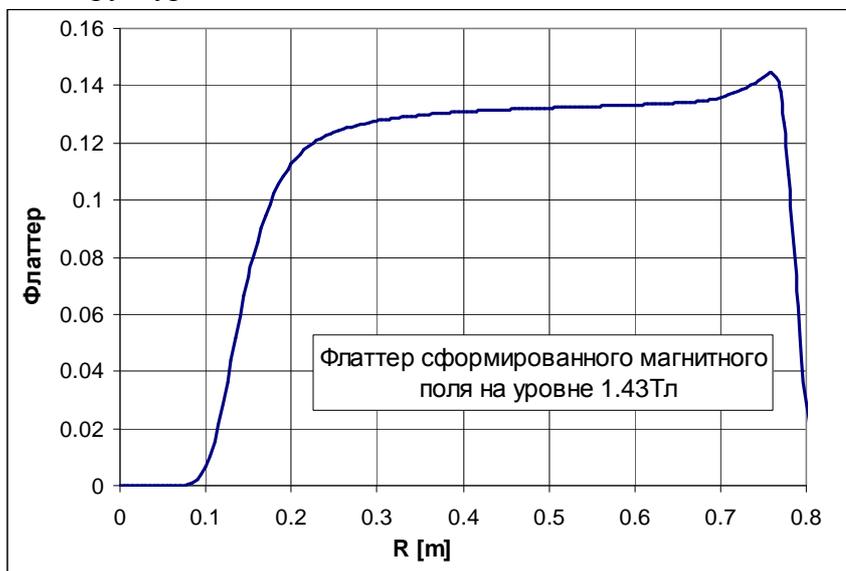


Рис. 2.33. Радиальное распределение флаттера сформированного магнитного поля на уровне 1.43 Тл.

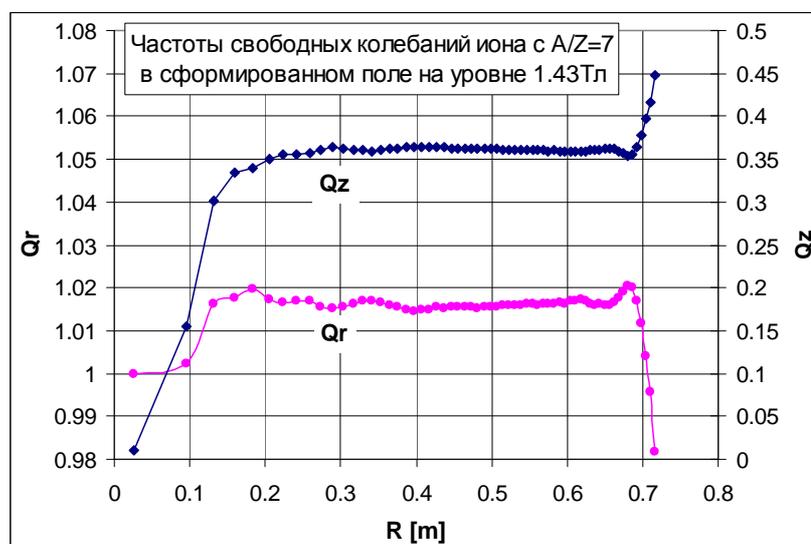


Рис. 2.34. Поведение частот радиальных и вертикальных свободных колебаний иона с отношением массы к заряду  $A/Z = 7$  в сформированном магнитном поле.

### Корректирующие катушки циклотрона

Циклотрон, разработанный для ускорения ионов в фиксированном режиме без вариации энергии ионов, может быть построен без системы радиальных корректирующих катушек, например ИЦ-100, ДЦ-110 /30, 44, 45, 79/. Требуемое магнитное поле может быть сформировано только железными массами. В циклотроне, в котором предусмотрена вариация магнитного поля, всегда предполагается использование системы коррекции распределения магнитного поля по радиусу. Азимутальные (гармонические) катушки устанавливаются в любом случае, которые главным образом требуются при оптимизации системы вывода пучка.

Система корректирующих катушек обеспечивает следующие функции оперативной подстройки:

- Подстройка формы распределения магнитного поля по радиусу для создания изохронных условий ускорения.
- Подстройка положения плоскости аксиальной симметрии магнитного поля.
- Коррекция первой гармоники магнитного поля и центровки орбит ускоряемого пучка ионов.

Радиус оптимального расположения радиальных корректирующих катушек определяется формулой:

$$R_i = R_{\max} \sqrt{\frac{N_i}{N_{\max}}} \quad (5)$$

где  $N_{\max}$  и  $R_{\max}$  – количество и максимальный радиус радиальных корректирующих катушек,  $i = 1 \dots N_{\max}$ .

Такое расположение радиальных корректирующих катушек обеспечивает оптимальные условия формирования изохронного распределения магнитного поля циклотрона.

Для части радиальных корректирующих катушек целесообразно использовать независимые источники питания для верхней и нижней обмоток. Различие тока обмоток этих катушек обеспечивает как коррекцию среднего поля, так и положение магнитной медианной плоскости циклотрона.

### 2.3.2. Влияние фокусирующего магнитного канала на магнитное поле циклотрона.

В циклотронах, имеющих электростатический вывод пучка, используется магнитный канал для фокусировки пучка в зоне вывода, обеспечивающий оптимальные условия транспортировки пучка на участке между дефлектором и входом в ионопровод [135]. Конструктивно канал расположен в непосредственной близости от края секторов (рис. 2.35), что оказывает заметное влияние на магнитное поле в рабочей области циклотрона. Это влияние выражается в изменении радиального распределения среднего магнитного поля и, что особенно важно, в появлении первой гармоники азимутального распределения магнитного поля. На рисунке 2.36 показано возмущение, вносимое каналом в распределение магнитного поля в вертикальной плоскости в среднем сечении канала [66, 67, 136].

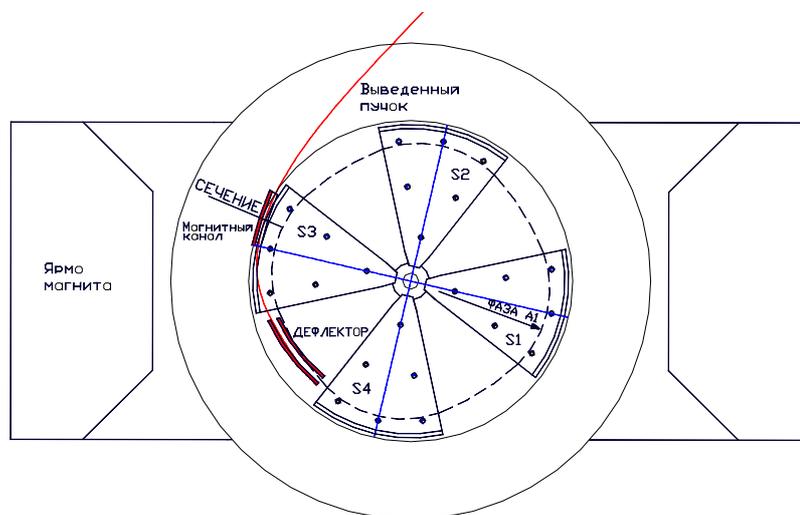


Рис. 2.35. Положение магнитного канала в циклотроне. Вид на нижний полюс.

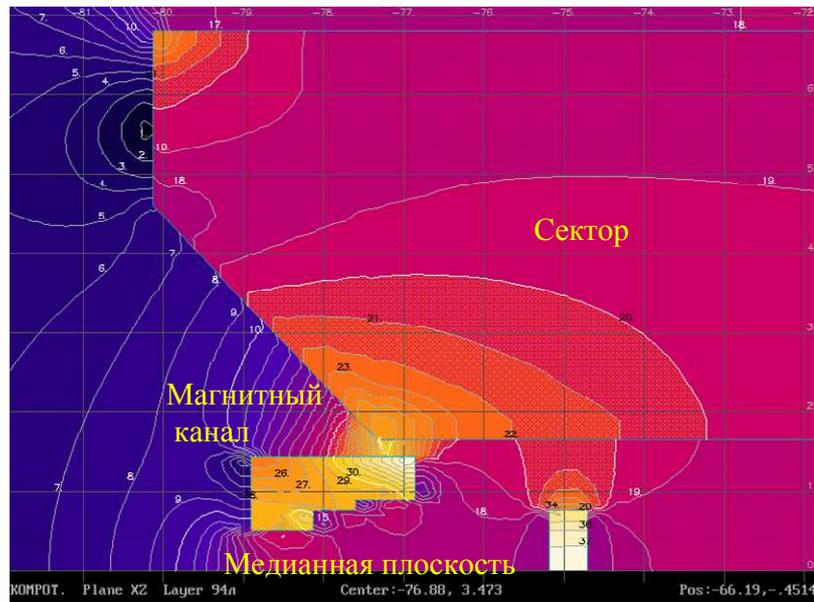


Рис 2.36. Распределение магнитного поля в вертикальной плоскости в области внешнего радиуса сектора по среднему сечению канала. Линия сечения представлена на рисунке 2.35. Эквипотенциальные линии поля представлены в кГс.

Магнитный канал берет на себя часть магнитного потока, проходящего через сектор, в области которого канал установлен. При установке магнитного канала уровень магнитного поля в пространстве между рассматриваемыми верхним и нижним секторами снижается. В остальной области рабочего зазора магнитное поле остается без изменения. Такое локальное воздействие канала приводит как к изменению уровня среднего магнитного поля, так и к появлению первой гармоники в азимутальном распределении поля. На рисунке 2.37, 2.38 представлено влияние магнитного канала на распределение среднего магнитного поля. В случае циклотрона ДЦ-60 при установке магнитного канала среднее магнитное поле изменяется от  $\approx +5$  Гс в центре циклотрона до  $\approx -18$  Гс к максимальному радиусу области ускорения [136]. На рисунке 2.39 представлено радиальное распределение амплитуды первой гармоники магнитного поля, возникающей вследствие установки магнитного канала на циклотрон. Значение амплитуды первой гармоники магнитного поля вырастает от 0 Гс в центре циклотрона до 45 Гс на конечном радиусе. Направление фазы первой гармоники – в строго противоположную сторону от места размещения канала.

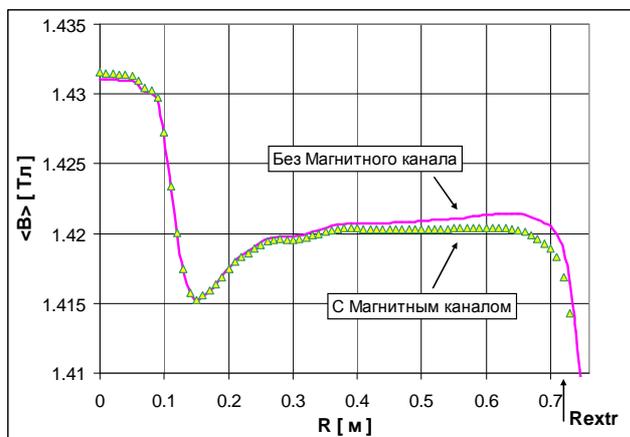


Рис. 2.37. Радиальное распределение среднего магнитного поля по радиусу циклотрона с установленным магнитным каналом и без него

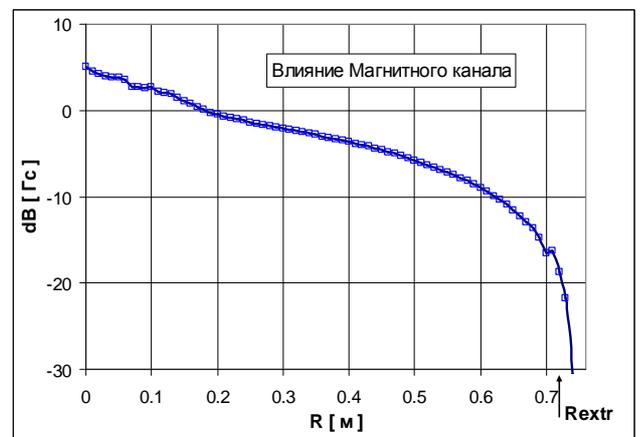


Рис. 2.38. Разность среднего магнитного поля без магнитного канала и с установленным магнитным каналом.

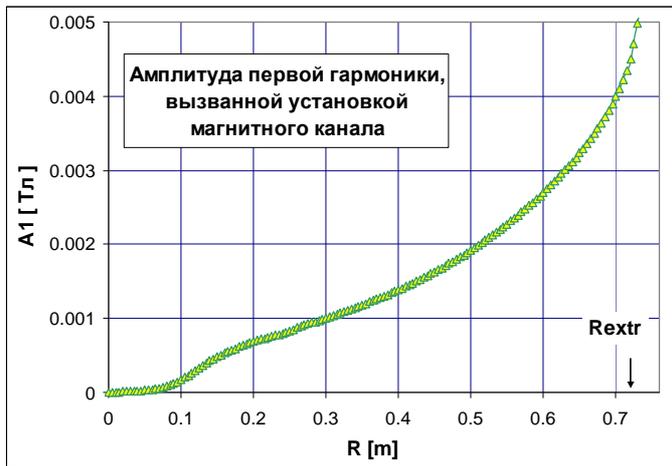


Рис.2.39. Радиальное распределение амплитуды первой гармоники магнитного поля, вызванной установкой магнитного канала на циклотрон.

Для компенсации влияния магнитного канала использованы боковые секторные шиммы Sh31 и Sh32, представляющие собой стальные пластины, расположенные по бокам секторов, рисунок 2.40. При помощи шимм проведена коррекция изменения среднего поля (рис.2.41) и компенсация первой гармоники, возникающие при установке магнитного канала. Расчет формы шимм проведен на основе полномасштабной карты магнитного поля циклотрона с установленным магнитным каналом.

Такой метод, примененный при создании циклотрона ДЦ-60, позволил сформировать рабочее поле циклотрона и получить проектные параметры пучка [66, 136].

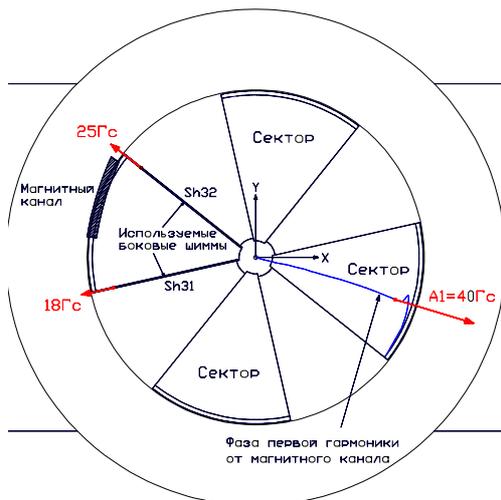


Рис. 2.40. Положение боковых секторных шимм Sh31 и Sh32, используемых для компенсации влияния магнитного канала.

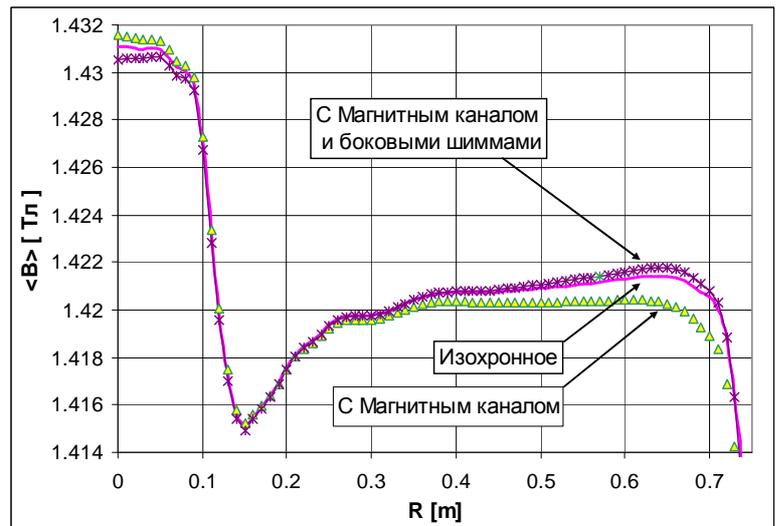


Рис. 2.41. Коррекция боковыми шиммами искажения среднего магнитного поля, возникающего вследствие установки магнитного канала.

### Использование фальшканала для компенсации возмущений магнитного поля циклотрона, вносимых фокусирующим каналом.

Присутствующий в системе пучка пассивный магнитный канал даже в условиях, когда скомпенсировано его влияние на среднее поле и подавлена первая гармоника за счет бокового шиммирования секторов, приводит к появлению опасных нечетных гармоник 3, 5, 7, вызывающих искажение орбит.

Полное подавление нечетных гармоник магнитного поля может быть выполнено путем установки компенсирующего канала (фальшканала). Компенсирующий канал представляет собой копию пассивного фокусирующего канала и устанавливается центрально симметрично с противоположной стороны полюса магнита. В этом случае

полностью компенсируются нечетные гармоники магнитного поля в зоне ускорения. Увеличение при этом четных гармоник в 2 раза не оказывает существенного негативного влияния на пучок. Среднее магнитное поле формируется за счет дополнительного бокового шиммирования секторов (рис. 2.42).

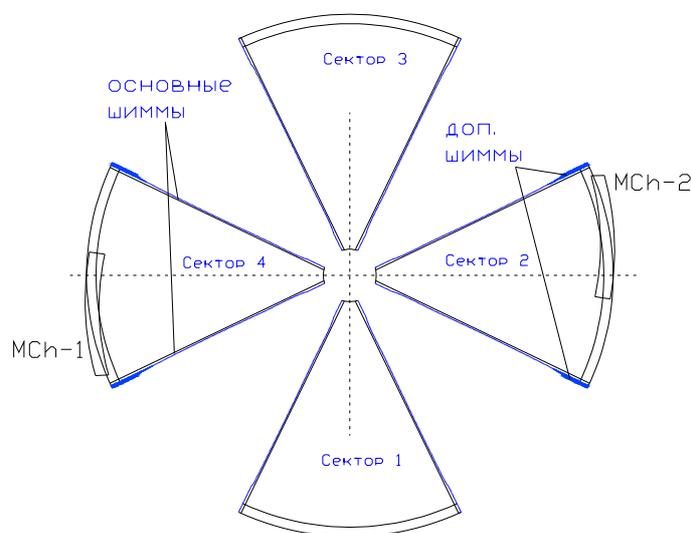


Рис. 2.42. Схема расположения основного фокусирующего канала (MCh-1) и компенсирующего канала (MCh-2) на циклотроне ДЦ-110.

Метод компенсации влияния фокусирующего канала на магнитное поле циклотрона с использованием фальшканала был применен на циклотроне ДЦ-110.

Численными методами проведено сравнение свойств магнитного поля ДЦ-110, сформированного с использованием фальшканала и без него [137].

### Магнитная система без фальшканала

Если фальшканал не устанавливается, то возмущение магнитного поля от фокусирующего канала компенсируются только путем шиммирования секторов. В этом случае можно сформировать изохронное поле и подавить первую гармонику, однако остаются другие гармоники, которые влияют на динамику пучка (рис. 2.43).

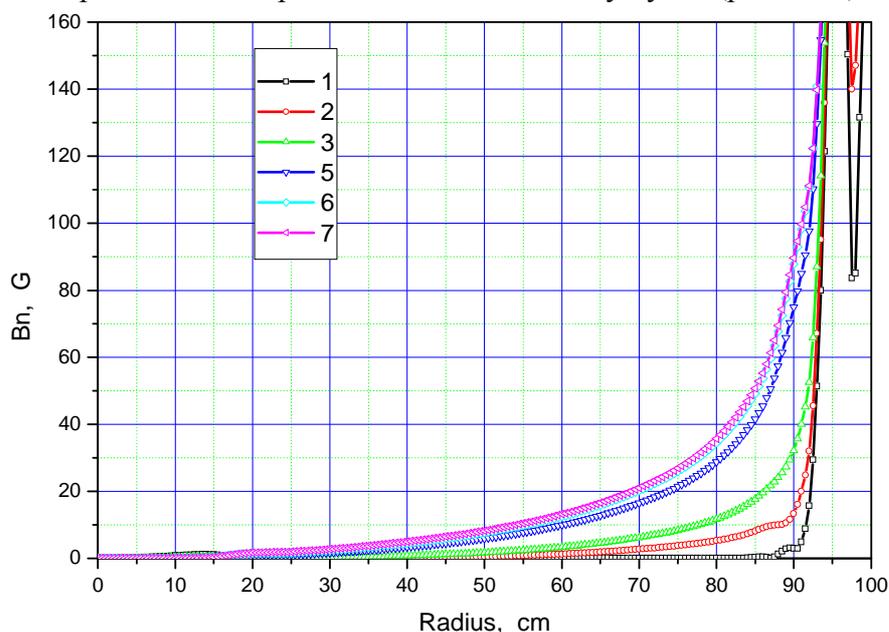


Рис. 2.43. Амплитуды гармоник возмущения магнитного поля без установки фальшканала.

Нечетные гармоники приводят к когерентным радиальным колебаниям пучка, достигающим 2,5 см на радиусе вывода, что препятствуют достижению проектной энергии ионов. Этот эффект можно ослабить, если включить азимутальные катушки, создающие 1-ю гармонику магнитного поля в области радиусов 20–60 см на уровне 17 Гс. На рисунке 2.44 сравниваются амплитуды радиальных колебаний ионов в случаях, когда гармонические катушки выключены и включены. Действие катушек позволило уменьшить когерентную составляющую колебаний с 2,5 до 1,0 см.

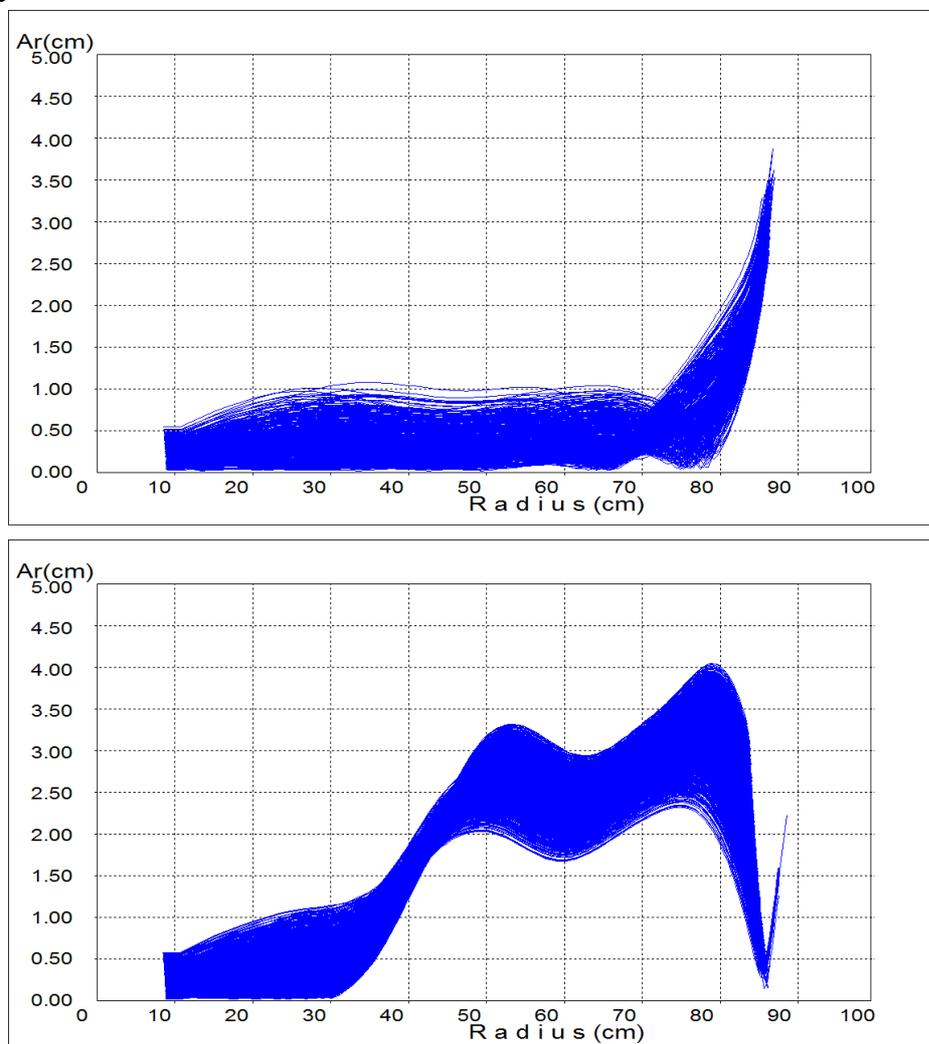


Рис. 2.44. Амплитуды радиальных колебаний ионов в зависимости от среднего радиуса орбит. Вверху – гармонические катушки выключены, внизу – гармонические катушки включены.

### Магнитная система с компенсирующим каналом

Очевидно, что установке компенсирующего канала все нечетные гармоники от канала будут подавлены, в то время как четные 2, 4, 6, ..., будут увеличены в 2 раза. Реальную опасность в этом случае может представлять только 2-я гармоника, градиент которой  $dB_2/dr$  является ведущим членом параметрического резонанса  $2Q_r=2$ . В принципе, этот резонанс может привести к росту радиальных колебаний и эмиттанса пучка. Сила действия резонанса зависит от конкретных условий: величины градиента, от того, как далеко расположена рабочая точка от резонанса, от продолжительности его действия. Амплитуда 2-й гармоники после установки компенсирующего канала показана на рисунке 2.45. В области конечных радиусов ускорения амплитуда достигает 130 Гс, а ее градиент 50 Гс/см.

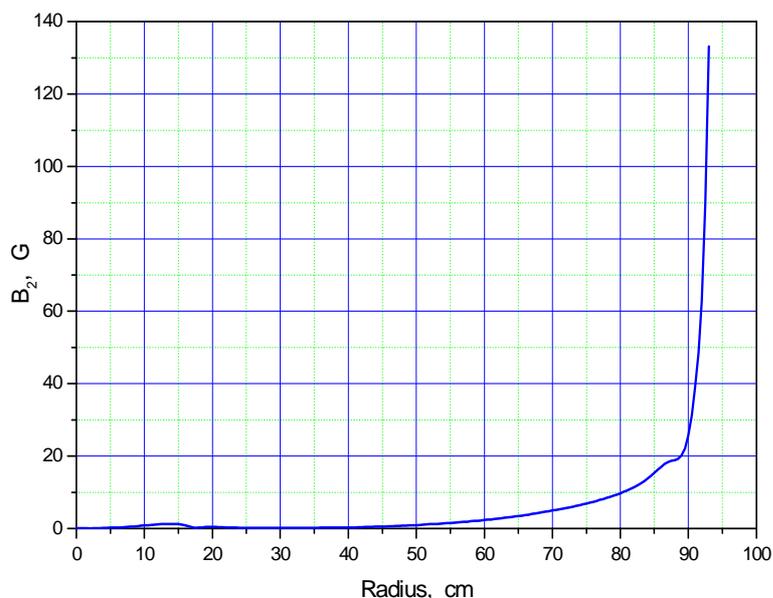


Рис. 2.45. Амплитуда 2-й гармоники магнитного поля в зависимости от радиуса при установленном фальшканале.

На рисунке 2.46 приводится сравнение амплитуд радиальных колебаний ионов в области конечных радиусов для двух случаев: (1) из магнитного поля после установки фальшканала была дополнительно удалена 2-я гармоника, и (2) в магнитном поле есть 2-я гармоника из-за установки фальшканала. Видно, что 2-я гармоника приводит к увеличению максимальной амплитуды колебаний с 1,1 см до 1,7 см. Заметное увеличение амплитуд происходит в основном у ионов, которые изначально имеют большие амплитуды. Действие резонанса  $2Q_r=2$  в этих конкретных условиях можно считать неопасным, так как число ионов с заметно возросшими амплитудами составляет не более 5% от всех ионов, да и увеличение их амплитуд на 0,6 см вполне допустимо.

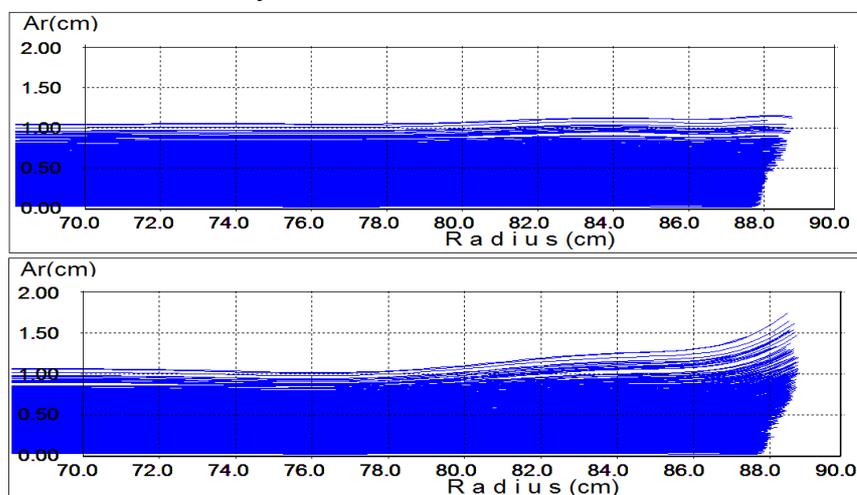


Рис. 2.46. Амплитуды радиальных колебаний на конечных радиусах ускорения. Вверху – нет гармоник возмущения, внизу – учтена 2-я гармоника.

## Выводы

Рассмотрены два способа компенсации влияния фокусирующего магнитного канала системы вывода на магнитное поле циклотрона: с использованием компенсирующего канала (фальшканала) и без него. Оба метода позволяют получить на конечном радиусе ускоренный пучок ионов требуемого качества.

При отсутствии фальшканала возмущения магнитного поля, возникающие вследствие установки фокусирующего канала системы вывода, приводят к появлению когерентных радиальных колебаний пучка, которые могут быть скомпенсированы действием токовых азимутальных катушек.

Установка фальшканала позволяет полностью избавиться от когерентных колебаний пучка на радиусе вывода.

### 2.3.3 Влияние свойств конструктивных элементов магнитной структуры циклотрона на магнитное поле.

#### Влияние магнитных свойств стали на точность расчета.

Влияние свойств стали на точность расчета показано на примере численного моделирования магнитной структуры циклотрона ДЦ-60. На рисунке 2.47 и в таблице 2.7 представлены измеренные магнитные свойства и химический состав образцов металла, использованного для изготовления магнитопровода циклотрона [138, 139].

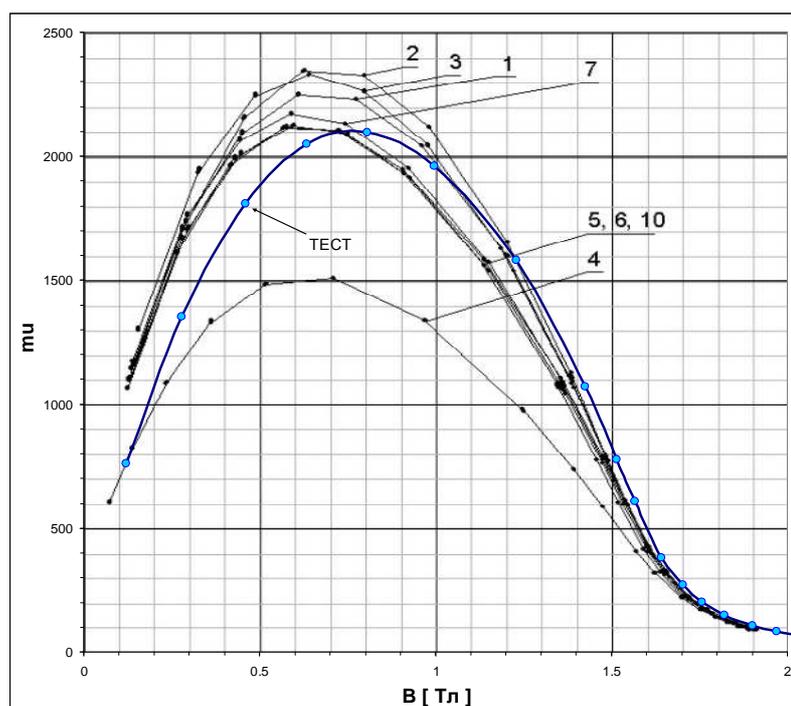


Рис. 2.47. Зависимости магнитной проницаемости  $\mu(B)$  стали образцов из различных плавков (см. табл.2.7), в диапазоне индукции магнитного поля 0–2 Тл.

Таблица 2.7. Химический состав (%) образцов стали, использованной для изготовления составных частей магнитопровода циклотрона ДЦ-60.

№ зависимости на рисунке 2.47	1, 4, 10	5	6	2, 3, 7	Тест
Составные элементы	Балки Полюса	Балки Сектора	Стойки	Балки	-
Материал	Сталь 10	Сталь 10	Сталь 10	Сталь 10	Сталь 10
C	0,08	0,08	0,06	0,08	0,07
Mn	0,40	0,53	0,40	0,38	0,26
Si	0,29	0,28	0,26	0,26	0,05
S	0,014	0,018	0,013	0,009	0,014
P	0,007	0,008	0,008	0,006	0,009
Cr	0,18	0,22	0,16	0,19	0,17
Ni	0,25	0,34	0,30	0,30	0,3
Cu	0,13	0,13	0,12	0,12	0,12

Измеренные зависимости магнитных свойств стали, используемой в производстве магнитопровода циклотрона ДЦ-60, были применены на финальной расчетной стадии формирования магнитного поля [45]. На рисунках 2.48 и 2.49 приведено сравнение

радиального распределения среднего магнитного поля в случае стандартных (взятых из справочника) и реальных свойств стали магнитопровода. Расчеты проведены при одном уровне тока основной обмотки электромагнита. Коррекция, необходимая для компенсации полученных изменений магнитного поля, была внесена в расчетную форму секторов. Во избежание искажения магнитного поля, возникающего вследствие различия в магнитных свойствах используемых сталей, все симметричные детали рабочего зазора электромагнита, прежде всего полюса и сектора, выполнены из металла одной плавки.

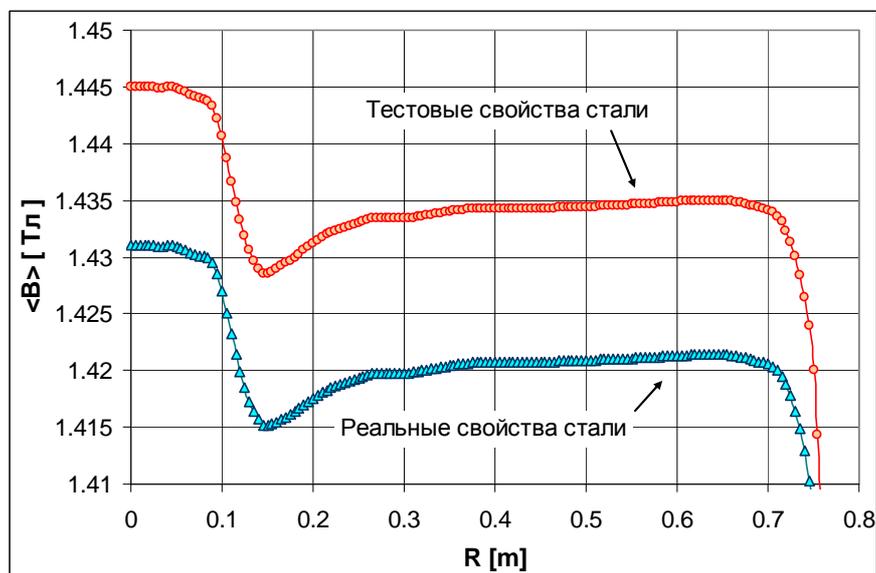


Рис. 2.48. Радиальное распределение среднего магнитного поля в случае тестовых и реальных свойств стали магнитопровода. Расчеты проведены при одном уровне тока основной обмотки электромагнита

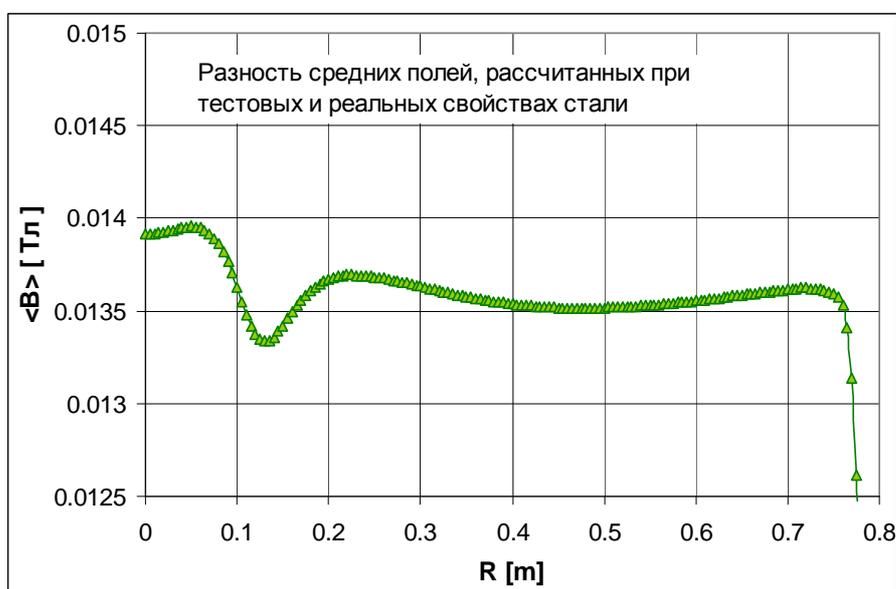


Рис. 2.49. Разность средних полей в случае тестовых и реальных свойств стали. Расчеты проведены при одном уровне тока основной обмотки электромагнита.

### Допуски при изготовлении магнитопровода циклотрона.

Определение допусков на изготовление электромагнита циклотрона формируется на основании аналитических оценок и численных расчетов влияния искажений магнитного поля на динамику пучков. С другой стороны, определяющим фактором в формировании допусков являются промышленные качества на точность изготовления составных частей и

сборки электромагнита. В целом эти требования сведены к точности формирования среднего магнитного поля в области ускорения не хуже  $10^{-3}$  и к достижению приемлемого уровня первой гармоники поля не более 3 - 4 Гс. При определении требований к точности изготовления магнита учитывались не только требования к магнитному полю со стороны расчетов динамики пучка при ускорении в циклотроне, но также возможности оперативной коррекции поля с помощью радиальных корректирующих катушек и технические возможности производства. Особое внимание уделялось точности изготовления и сборки магнитопровода, определяющей трудоемкость последующего этапа измерений и формирования магнитного поля. В таблице 2.8 для примера приведены требования к наиболее значимым геометрическим размерам в рабочей области магнитопровода. В таблице также приводятся результаты измерения указанных геометрических размеров, сделанные после сборки магнитопровода циклотрона ДЦ-60 на испытательном стенде ОИЯИ.

В программу испытаний на стенде также вошли следующие замеры:

- Измерение углового положения секторов на полюсных сборках магнитопровода при помощи специально изготовленных лекал. Замерялись расстояния между соседними секторами на внутреннем и внешнем радиусах.
- Измерение радиального положения секторов на полюсной сборке. Замерялись расстояния между центральной пробкой и носиком сектора, между внешним радиусом сектора и боковой поверхностью полюса.
- Особое внимание уделялось повторяемости результатов замеров в случае необходимости технологического подъема и опускания верхней балки вместе с верхней полюсной сборкой после окончательного монтажа электромагнита.

По результатам тестовых замеров все перечисленные параметры соответствуют требованиям к точности сборки электромагнита.

Таблица 2.8. Наиболее значимые геометрические размеры в рабочей области электромагнита циклотрона ДЦ-60.

Позиция замера	Требование чертежа	Измеренные значения после сборки магнита
Расстояние между полюсами, замер в центре каждой из 4 долин (между секторами), мм	$176 \pm 0,1$	176,1
Несоосность установки полюсов при монтаже магнитопровода	$\leq 0,05$	$0 \div 0,07$
Расстояние между центральными пробками, мм	88*	87,95
Расстояние между секторами, для 4 пар секторов в случае включенного магнитного поля, мм	$33 \pm 0,10$	$33 (-0,08 \div -0,13)$
Отклонение боковых поверхностей верхних и нижних секторов, для 4 пар секторов, мм	$\leq 0,1$	$0 \div 0,1$

\* - Расстояние между центральными пробками определено как свободный размер, так как на торцах пробок размещены съемные элементы – шиммы для коррекции магнитного поля в центральной области электромагнита.

### Деформация магнитопровода под действием пондеромоторных сил

В рабочем состоянии происходит деформация элементов магнитопровода под действием пондеромоторных сил. Деформация приводит к изменению геометрических размеров магнитопровода и, как следствие, к изменению распределения магнитного поля в рабочем зазоре электромагнита. Основное изменение геометрии происходит за счет деформации балок магнитопровода под действием магнитных сил притяжения между полюсными сборками. Такая деформация приводит к уменьшению расстояния между

полюсами. На примере магнитной структуры циклотрона ДЦ-60 показано влияние деформации на распределение магнитного поля в зазоре. Расчеты величины схождения полюсных сборок проводились при максимальном уровне среднего магнитного поля 1,65 Тл [140]. В зависимости от усилий затяжки соединительных болтов и шпилек расчет показал уменьшение зазора между полюсами в пределах 0,2 – 0,3 мм. На рисунках 2.50 и 2.51 представлено сравнение результатов расчета среднего поля на уровне 1,65 Тл для недеформированного состояния магнитопровода и в случае уменьшения расстояния между полюсами на 0,2 мм. Изменение уровня поля в рассмотренном случае составило величину 12,5 – 15,5 Гс.

В процессе стендовых испытаний электромагнита проведены замеры изменения расстояния между полюсными сборками при включенном магнитном поле на уровне 1,65Тл. Результаты замеров показали, что расстояние между секторами уменьшается на 0,3 – 0,35мм. Разброс в 0,05 мм не оказывает существенного влияния на распределение магнитного поля. В таблице 2.9 приведены измеренные величины уменьшения зазора между полюсами в рабочем режиме для магнитов циклотронов ИЦ-100, У-400, МЦ-400, У-200, ДЦ-110, ДЦ-60.

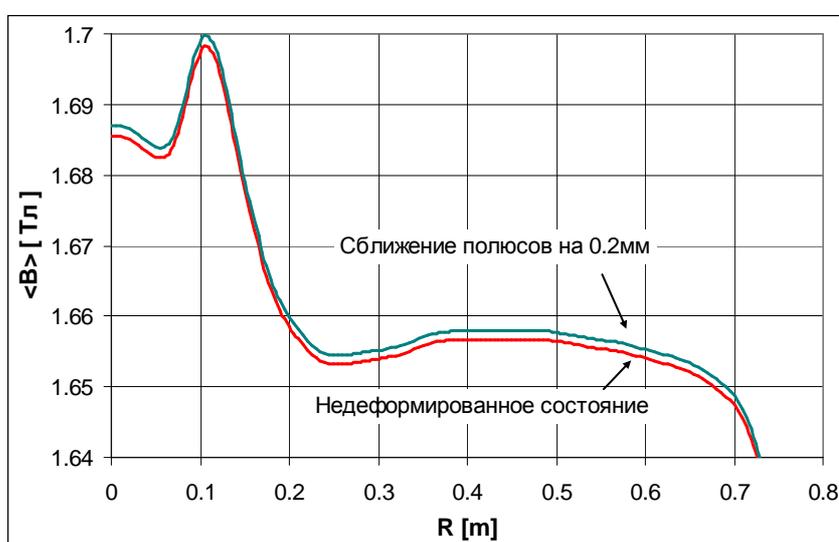


Рис. 2.50. Распределение среднего магнитного поля на уровне 1,65 Тл для недеформированного состояния магнитопровода и в случае уменьшения межполюсного расстояния на 0,2 мм.

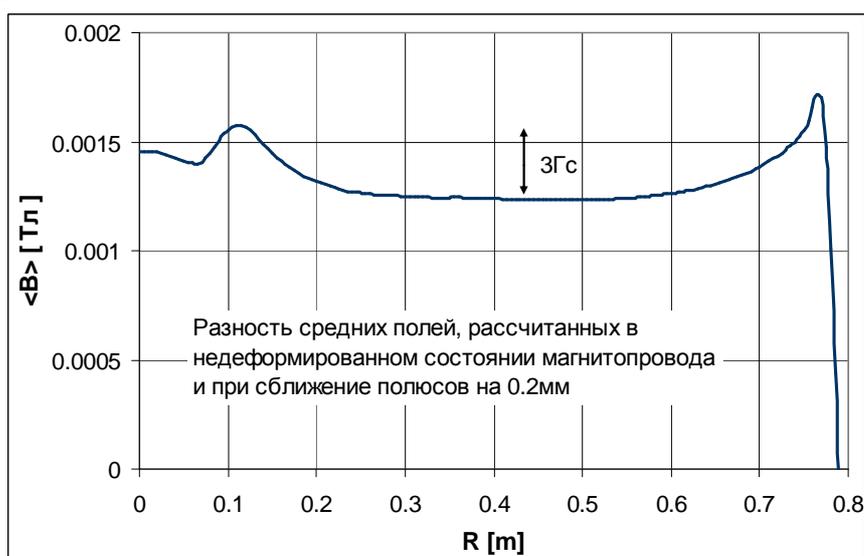


Рис. 2.51. Разность средних полей, рассчитанных в недеформированном состоянии магнитопровода и в случае сближения полюсныхборок на 0,2 мм.

Таблица 2.9. Измеренные величины уменьшения зазора между полюсами в рабочем режиме для магнитов циклотронов ИЦ-100, У-400, МЦ-400, У-200, ДЦ-110, ДЦ-60.

Циклотрон	Диаметр полюса, м	Уровень магнитного поля	Измеренное уменьшение полюсного зазора
ИЦ-100	1,0	~ 2 Тл	0,5
У-400	4,0	2-2,1 Тл	1,0
МЦ-400	4,0	1,5-1,95 Тл	1,0
У-200	2,0	2 Тл	0,5
ДЦ-60	1,62	1,25-1,65 Тл	0,35
ДЦ-110	2,0	1,65 Тл	0,66

## Выводы

1. Для создания экономичного по энергопотреблению магнита следует выбирать уровень среднего магнитного поля циклотрона, не превышающий 1,7 Тл. Магнитное поле во внешних цепях магнита не должно превышать 1,7 Тл.
2. Для создания магнитной структуры циклотрона тяжелых ионов с энергией 1– 2,5 МэВ/нуклон целесообразно использовать структуру на базе плоских секторов с прямыми границами и применением способа азимутального шиммирования, при котором проводится обработка боковых поверхностей секторов.
3. Частоты свободных колебаний иона в основной области ускорения целесообразно выбрать в диапазоне  $1,01 < Q_r < 1,02$  и  $0,3 < Q_z < 0,4$ , что обеспечивает радиальную и вертикальную фокусировку ускоряемых пучков ионов. В центральной области фокусировка обеспечивается радиальным градиентом среднего магнитного поля и фокусирующим действием ускоряющего ВЧ поля. Предельное изменение величины  $\Delta \sin(\varphi) = 0,2$  определяет допустимое отклонение фазы ускоряемых ионов и точность формирования магнитного поля. Допустимый уровень первой гармоники поля не более 3-4 Гс.
4. Комбинированный метод формирования магнитного поля с использованием измеренной карты магнитных полей и учет влияния магнитного фокусирующего канала расчетным путем позволяет получить необходимую точность формирования поля. Однако в расчетах принципиально важно использовать измеренные свойства стали, из которой изготовлены элементы магнитной структуры.
5. Уменьшение магнитного зазора за счет действия пондеромоторных сил вносит небольшие изменения в распределение магнитного поля. Уменьшение зазора должно учитываться в финальных расчетах, или планироваться корректировка во время магнитных измерений.

## 2.4 Высокочастотная ускоряющая система

Ускорение ионов в циклотроне производится с помощью высокочастотного электрического поля, создаваемого на ускоряющих электродах – дуантах. Частота ускоряющего поля кратна частоте обращения частиц в циклотроне. Типичное амплитудное напряжение на дуантах циклотронов тяжелых ионов промышленного применения –50-60 кВ.

### 2.4.1 Выбор основных параметров высокочастотной системы

Дуанты располагаются между секторами, поэтому их угловая протяженность зависит от угловой протяженности сектора и находится в диапазоне 40–50 ° (рис. 2.51)

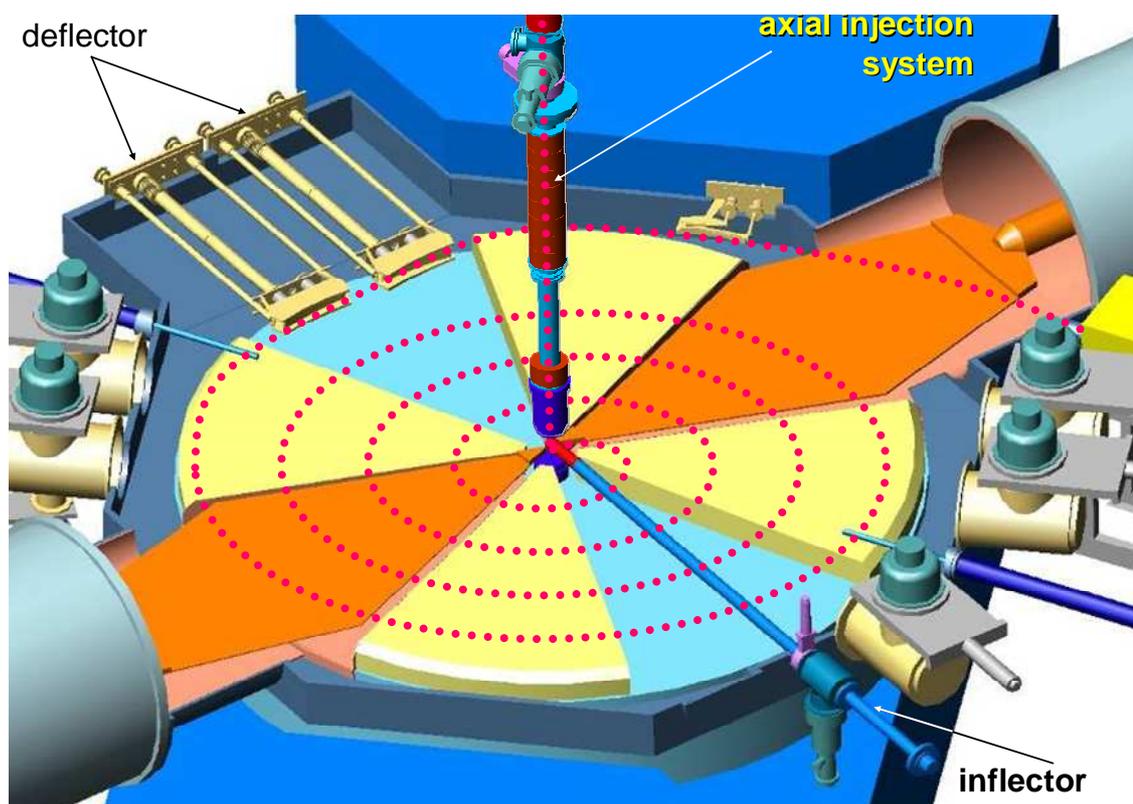


Рис. 2.52. Типичная компоновка четырехсекторной магнитной структуры и ускоряющей системы циклотрона тяжелых ионов.

В циклотронах, которые разработаны в ЛЯР для прикладных задач, резонансная ускоряющая система состоит из следующих основных узлов:

- Два расположенных диаметрально противоположно четвертьволновых коаксиальных резонатора – стальные баки, плакированные внутри бескислородной медью, и медные штоки, переходящие в дуанты.
- Закорачивающая медная пластина с прижимными шарообразными контактами, используемая для изменения частоты резонаторов.
- Петля связи, передающая высокочастотную энергию от генератора в резонансную систему.
- Триммеры точной подстройки резонансной частоты.
- Пикап электроды и измерительные петли для измерения напряжения на дуантах.

Резонансная ускоряющая система может быть выполнена в 2 вариантах:

- автономные резонаторы,
- связанные в центре четвертьволновые резонаторы.

Резонансная система, состоящая из двух четвертьволновых резонаторов, соединенных в центре перемычкой, практически представляет собой один полуволновой резонатор. В этом случае можно производить ввод мощности через одну петлю связи и иметь один элемент автоматической подстройки частоты. Главное преимущество такой системы – более простая система управления. Поскольку используются один высокочастотный усилитель, один канал подстройки частоты и не требуется система фазирования напряжения на дуантах, и, что не маловажно, такая конструкция более устойчива к механическим колебаниям дуантов. Однако перемычка в центре циклотрона требует пространства для установки, что не всегда возможно, в этом случае используются независимые резонаторы (рис. 2.53, 2.54).

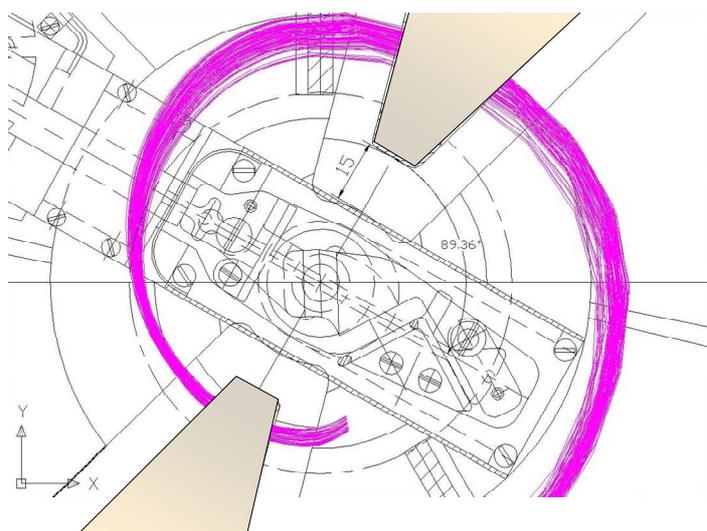


Рис. 2.53. Центральная область циклотрона ИЦ-100 с автономными резонаторами.

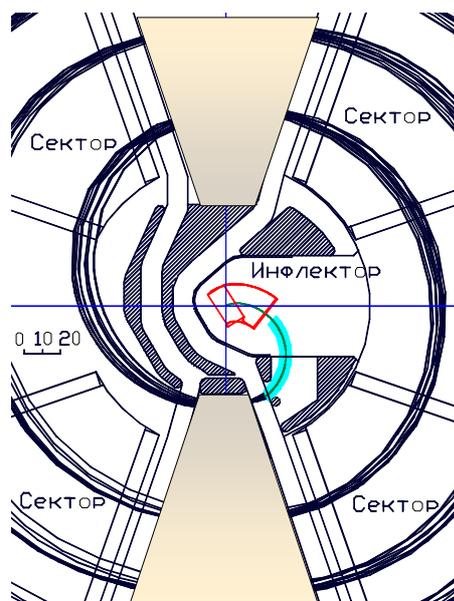


Рис. 2.54. Центральная область циклотрона ДЦ-60 с дунтами, имеющими между собой перемычку.

### Предварительный выбор геометрических размеров резонансной системы ускорителя.

Расчет резонансной системы производился с помощью программы “CyclReso” разработанной в ЛЯР ОИЯИ [141]. Она позволяет производить предварительные расчеты параметров резонаторов ускорителей. Программа рассчитывает параметры резонаторов “классического” вида, когда коаксиальный четвертьволновой резонатор нагружен с плоским дуантом, расположенным в долине циклотрона.

Точность расчета по программе “CyclReso” составляет около 10%. Это достаточно на начальной стадии проектирования при компоновке ускорителя. Результаты таких расчетов при проектировании циклотрона ДЦ-60 приведены на рисунке 2.55, 2.56.

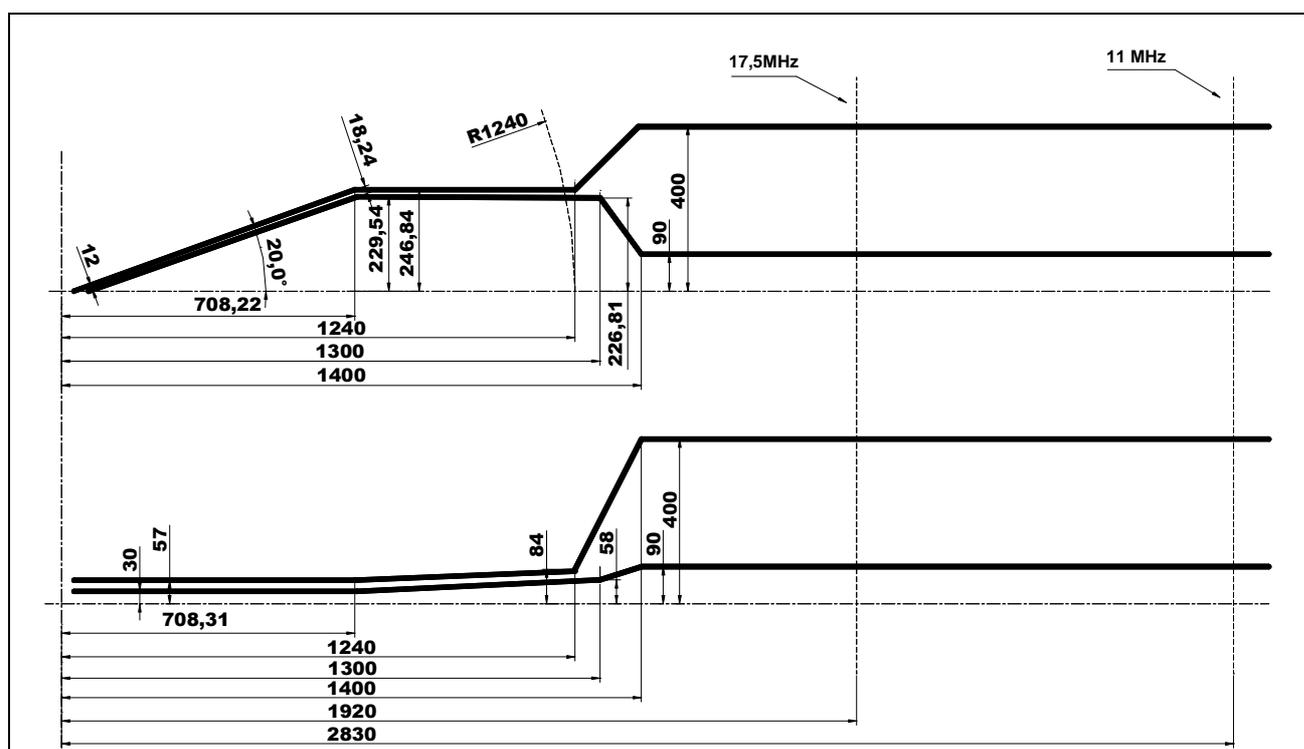


Рис. 2.55. Геометрические размеры резонансной системы циклотрона ДЦ-60.

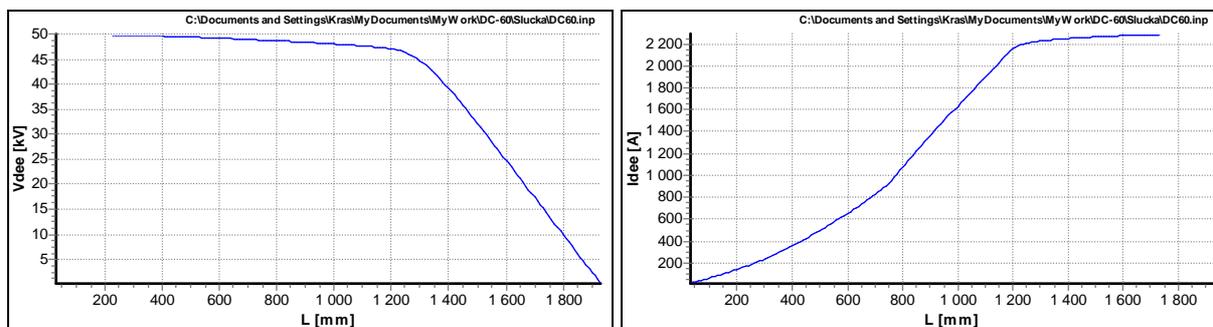


Рис. 2.56. Распределение напряжения ( $V_{dec}$ ) и токов ( $I_{dec}$ ) в резонаторе ДЦ-60 при  $F=17,5\text{МГц}$ .

### Оценка влияния точности геометрических размеров на параметры резонатора.

Программа “CyclReso” позволяет произвести некоторые расчеты, позволяющие сформулировать требования к конструктивной точности изготовления элементов резонансной системы. Для этого в модели необходимо изменить размеры самых сложных в изготовлении частей резонансной системы и проверить изменение положения закоротки при крайних рабочих частотах. В результате точность изготовления будет определяться наличием запаса при движении закорачивающей пластины из крайних положений.

В таблице 2.10 показано влияние отклонений размеров в конструкции резонаторов на положение закоротки для циклотрона ДЦ-60. Знак перед цифрой, отражающей изменение положения закоротки, указывает: если плюс, то движение от центра циклотрона; если минус – то движение внутрь резонатора.

Таблица 2.10. Влияние отклонения размеров отдельных частей резонансной системы на положение закорачивающей пластины для циклотрона ДЦ-60.

Размеры в мм		17,4MHz		11,0 MHz	
		Изменение размера (мм)	Изменение положения закоротки, мм	Изменение размера, мм	Изменение положения закоротки, мм
1	Внешний диаметр бака	+1	-1	+1	-1
2	Внешний диаметр бака	-1	0	-1	+1
3	Внутренний диаметр бака	+1	+2	+1	+5
4	Внутренний диаметр бака	-1	-2	-1	-5
5	Высота плакировки камеры	+1	+4	+1	+10
6	Высота плакировки камеры	-1	-5	-1	-11
7	Ширина плакировки камеры	+1	+6	+1	+16
8	Ширина плакировки камеры	-1	-8	-1	-19
9	Высота плакировки дуанта	+1	-4	+1	-11
10	Высота плакировки дуанта	-1	-3	-1	+9
11	Ширина плакировки дуанта	+1	-9	+1	-22
12	Ширина плакировки дуанта	-1	+7	-1	+18

В результате вычислений можно сделать вывод о довольно значительном влиянии погрешности некоторых размеров резонансной системы на резонансную частоту. Следует проверять, чтобы суммарная расстройка резонансной системы при максимальных допусках могла быть в дальнейшем скомпенсирована положением закорачивающей пластины. В то же время длина резонансного бака должна обеспечивать необходимый ход закорачивающей пластины.

Окончательный вариант конструкции ускоряющей системы выбирается исходя из закономерностей, выявленных в ходе промежуточных расчетов. Основными критериями выбора являются:

- конструктивные ограничения,

- геометрические размеры всего резонатора и положение закорачивающей пластины при максимальной частоте,
- плотность тока через контакты закорачивающей пластины,
- мощность ВЧ энергии, потребляемая резонансной системой.

Кроме этого, при определении окончательного варианта учитывались оценки условий для ВЧ пробоев в резонансной системе.

### Оценка допустимой напряженности электрического поля.

Оценка максимально допустимых электрических полей проводилась по критерию Килпатрика [142], который определяет вероятность пробоя между электродами в вакууме – один раз в час.

$$f = 0,01643 \cdot E_{\max}^2 \cdot \exp\left[\frac{-85}{E_{\max}}\right] \quad (6.1)$$

где  $f$  – частота [МГц],  $E_{\max}$  – напряжение электрического поля [кВ/см].

График этой функции в диапазоне рабочих частот циклотрона ДЦ-60 представлен на рис. 2.57.

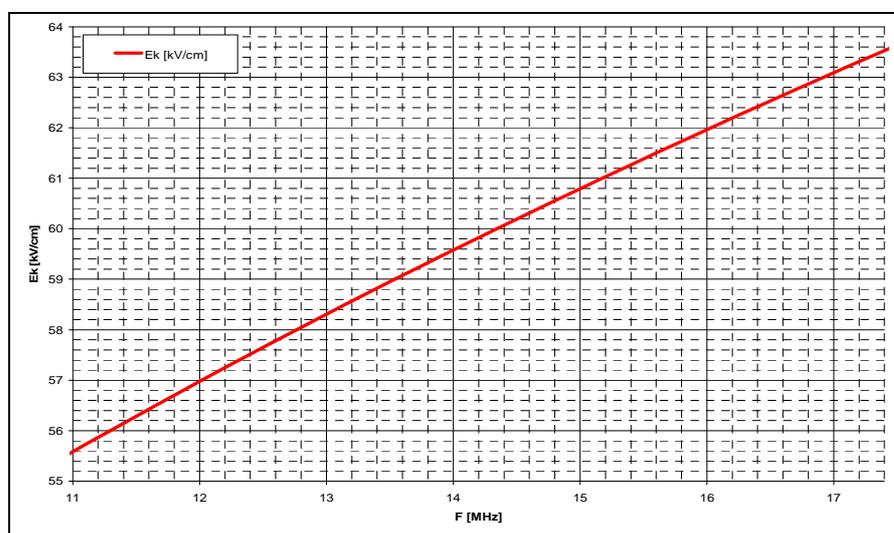


Рис. 2.57. Допустимая напряженность электрического поля по критерию Килпатрика.

Пространство над кривой определяет условия, при которых электрические пробои отсутствуют (вероятность низкая). Пространство под кривой определяет условия, при которых велика вероятность электрических пробоев.

При помощи программы POISSON [143] может быть исследована геометрия зазоров дуанта – плакировка с целью анализа напряженности электрического поля и оценки вероятности ВЧ пробоев. На рисунке 2.58, показана геометрия зазора дуанта – плакировка на циклотроне ДЦ-60 на наиболее напряженном участке на расстоянии 54 мм от центра, а также расчетное распределение электрического поля.

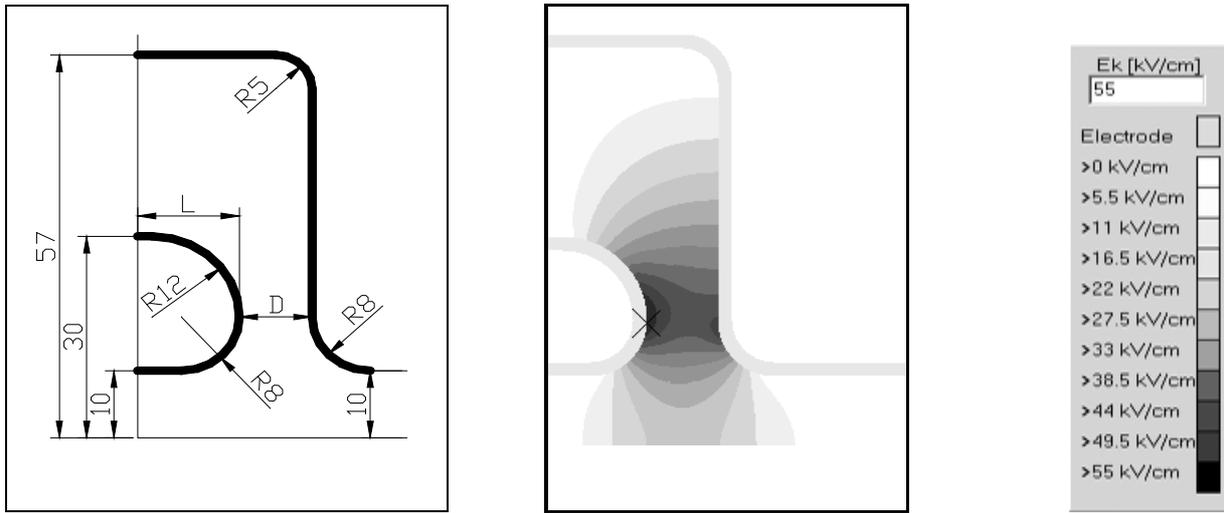


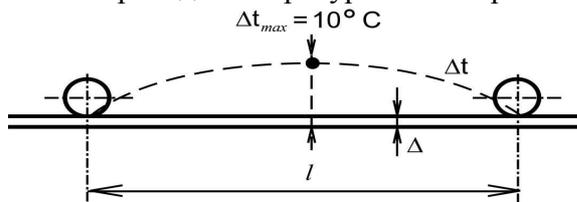
Рис. 2.58. Геометрия зазора дуант – плакировка на циклотроне ДЦ-60 на расстоянии 54 мм от центра, а также расчетное распределение электрического поля при L=14 мм, D=10 мм.

По результатам проведенных расчетов видно, что самым напряженным местом (61 кВ/см) является центральная часть циклотрона. Учитывая влияние магнитного поля на развитие ВЧ пробоев, следует отметить, что направление электрического поля перпендикулярно магнитному, что дает основание считать зазор в центральной области, равный 10 мм, допустимым. Из опыта эксплуатации циклотронов У-400, У-200 в ЛЯР ОИЯИ известно, что при зазорах в центральной части 13 мм максимальное напряжение составляет 75 кВ.

#### Расчет системы охлаждения резонаторов.

Охлаждение в циклотронах реализуется протоком воды в трубках, которые имеют теплопроводящий контакт с охлаждаемой поверхностью и которые расположены так, чтобы максимальная разница температур между трубками и серединой поверхности между ними не превышала 10° С.

Перепад температуры можно рассчитать:



$$\Delta t = \frac{1}{4} \frac{1}{\lambda} \frac{q \cdot l^2}{\Delta}, [^{\circ}\text{C}]$$

где  $\lambda$  - теплопроводность материала (для меди:  $\lambda_{Cu} = 401$  Вт/м·К при 300° К [17]),  $q$  - тепловыделение на единицу площади [Вт/м<sup>2</sup>],  $l$  - наименьшее расстояние между трубками охлаждения в месте контакта с охлаждающей поверхностью [м],  $\Delta$  - толщина [м].

Для выбранного перепада  $\Delta t$  можно оптимизировать расстояние между трубками и толщину меди. Тепловыделение на единицу площади вычисляется как

$$q = \frac{P}{S}, \quad l = \sqrt{\frac{4 \cdot \Delta t \cdot \lambda \cdot \Delta}{q}}, \text{ м} \quad \text{где } S \text{ - площадь поверхности [м}^2\text{].}$$

Общий поток воды для охлаждения резонансной системы вычислим по формуле:

$$V = 238,3 \cdot 10^{-6} \frac{\Delta P}{\Delta T}, [\text{м}^3/\text{с}] \quad (6.2)$$

где  $\Delta P$  - выделяемая мощность [кВт];  $\Delta T$  - перепад температуры входящей и выходящей воды.

Допустимое повышение температуры охлаждающей воды ( $\Delta T$ ) определяет изменение температуры резонатора, что ведет к изменению геометрических размеров и резонансной частоты. Температурные уходы должны быть скомпенсированы триммером системы автоматической подстройки частоты. Чем больше ( $\Delta T$ ), тем больше требуется диапазон подстройки триммером, – исходя из опыта эксплуатации, на циклотронах ЛЯР принята величина  $\Delta T=5^\circ$ . Для того, чтобы поток воды в трубках был ламинарным, т.е. чтобы не возникали вибрации, скорость воды ограничиваем величиной  $v < 1$  м/с, что определяется диаметром трубок охлаждения при заданном давлении, потоке воды и длине трубок.

Минимальный диаметр канала охлаждения определим из расчетного потока воды  $V$  и максимальной допустимой скорости  $v < 1$  м/с:

$$d_{\min} = 1,12 \sqrt{\frac{V}{v}}, \quad [\text{м}] \quad \text{где } V - \text{поток воды } [\text{м}^3/\text{с}] \text{ и } v - \text{скорость протока воды } [\text{м}/\text{с}]$$

### Петля связи, триммер подстройки частоты и пикап электроды.

В резонансной системе циклотронов используются две формы петли связи – прямоугольная и полукруглая (рис. 2.59). Методики расчетов хорошо известны. В резонаторах, работающих на фиксированной частоте, положение петли связи для согласования может быть проведено в период настройки и не меняться в период работы. В резонаторах с изменяющейся частотой согласование петли связи, как правило, производится за счет поворота петли. В этом случае петлю устанавливают на фланце, который может поворачиваться без нарушения вакуума, что меняет эффективную площадь петли. Пример конструкции петли связи с поворотным механизмом приведен на рис. 2.60 .

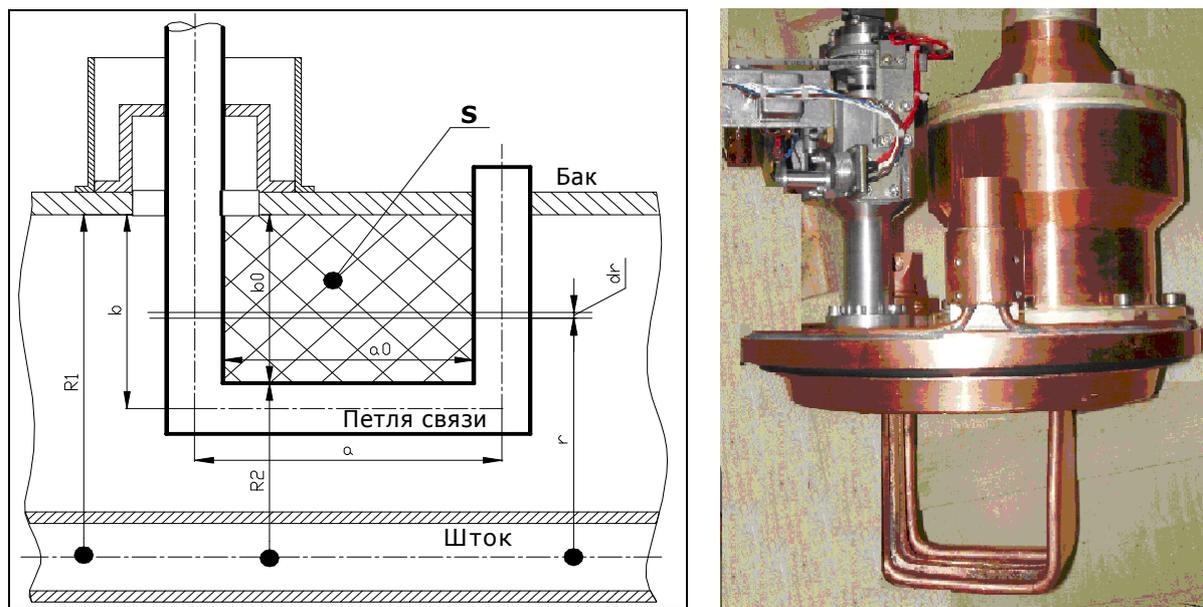


Рис. 2.59. Прямоугольная петля связи резонатора циклотрона ДЦ-60.

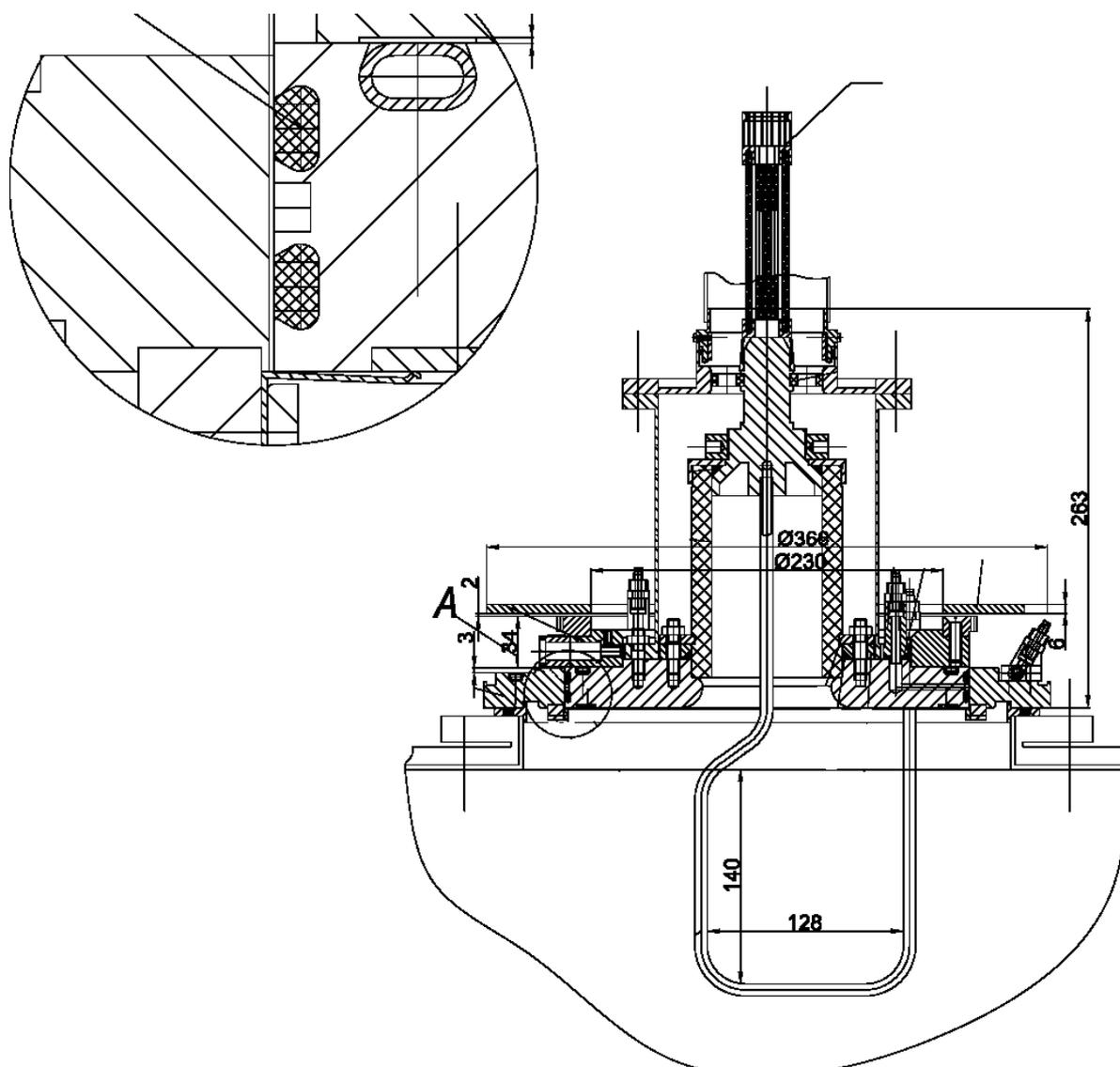


Рис. 2.60. Конструкция подвижной петли связи резонатора циклотрона МЦ-400.

### Триммер системы автоматической подстройки частоты

Система автоматической подстройки частоты резонаторов (АПЧР) предназначена для компенсации расстройки резонансной системы циклотрона, вызванной различными дестабилизирующими факторами. При настройке резонансной системы циклотрона необходимо иметь возможность грубой ( $\sim 1\div 2\%$ ) и точной ( $0,2\text{--}0,3\%$ ) подстройки частоты резонаторов. Грубая настройка резонансной системы может осуществляться либо отдельным триммером, либо синхронным движением всех закорачивающих пластин до возникновения резонанса в системе и получения приемлемого уровня коэффициента бегущей волны (КБВ). Точную подстройку частоты осуществляет короткозамкнутая поворотная петля, расположенная, как правило, на закорачивающей пластине, либо емкостной триммер – пластина, изменяющая емкость дуанта по отношению к земле. Если в резонаторах не предусмотрено устройство оперативной грубой подстройки частоты, то диапазон триммера АПЧР нужно увеличить до  $(0,6\text{--}1,0)\%$ . Диапазон в основном определяется температурным уходом частоты резонатора при переходе из холодного состояния в рабочий режим. На величину температурного ухода частоты влияет конструкция резонатора, разность температур охлаждающей воды на входе и выходе, температурная стабилизация охлаждающей воды.

При разработке конструкции исполнительного элемента нужно учитывать разную чувствительность подстройки от положения триммера, особенно при использовании

короткозамкнутой петли. Чувствительность подстройки частоты резонатора петель от углового положения определяется зависимостью

$$\frac{d(\Delta f)}{d\alpha} = \Delta f_{\max} \sin 2\alpha \quad (6.25)$$

Максимальная чувствительность подстройки при угле  $\alpha=45^\circ$ . Диапазон вращения петли от  $30^\circ$  до  $60^\circ$  ( $\Delta\alpha=30^\circ$ ) обеспечивают 50% подстройки. Диапазон вращения от  $20^\circ$  до  $70^\circ$  обеспечивают 77% подстройки. Целесообразно ограничить угол поворота петли  $\pm 25^\circ$  от среднего положения  $\alpha=45^\circ$ . Фаза ВЧ напряжения на дуантах должна поддерживаться с точностью не хуже  $1^\circ$ . Точность позиционирования петли выбирается исходя из этого условия. Использование приводов с использованием шаговых двигателей дает дополнительную возможность изменять скорость перемещения в зависимости от уровня сигнала расстройки резонансной системы, что в целом уменьшает время реакции системы на сигнал ошибки и повышает точность поддержания фазы. На рисунке 2.61 показана короткозамкнутая петля, разработанная для циклотрона ДЦ-60. Размер триммера  $196 \times 166$  мм,  $d = 16$  мм. Эффективность работы триммера ( $\Delta f/f$ ): на  $F=11$  МГц – 0,3%; на  $F=17,4$  МГц – 0,7%.

В таблице 2.11 для сравнения приведены основные параметры высокочастотных ускоряющих систем циклотронов ЛЯР.

Таблица 2.11. Сводная таблица характеристик триммеров ускорителей.

Ускоритель	У-400	МЦ-400	ИЦ-100	ДЦ-60		ДЦ-110
Частота резонансной системы (F), МГц	5,42-12,2	11,4-18,12	21.5	11,4-19,2		7,75
Конструкция резонаторов	Коаксиал $\frac{1}{4}$	Коаксиал $\frac{1}{4}$	Коаксиал $\frac{1}{4}$	Коаксиал $\frac{1}{4}$		Коаксиал $\frac{1}{4}$
Связь резонаторов.	перемычка	нет	перемычка	перемычка		перемычка
Точность установки закорачивающей пластины резонатора.	5,0	1,0	-	0,1		-
Диапазон подстройки частоты ручного триммера.	А 64,1 кГц Б 40,1 кГц	нет	нет	нет		нет
Температурный уход частоты (холодный режим – рабочий режим)	На $F=6,8$ МГц $\Delta F = 1$ кГц 0,015%	На $F=14,7$ $\Delta F = 5$ кГц 0,034%	-	-		$\Delta F = 10$ кГц 0,13% (с пучком $\Delta F = 20$ кГц 0,26%)
Диапазон подстройки частоты триммера АПЧ, кГц	$F=6,8$ МГц 13 0,19%	$F=14,7$ МГц 28 0,19%	1-й резонатор - 517(2,5%) 2-й резонатор - 320(1,5%)	$F=11,4$ 34 (0,3%)	$F=17,4$ 117 (0,6%)	47,5
Количество шагов двигателя по всему диапазону		64800	-	700		800
Тип триммера АПЧ.	Емкостной триммер	Петля	Емкостной триммер	Петля		Петля
Точность позиционирования короткозамкнутой петли в град.		$1,4 \times 10^{-3}$	$2,5 \cdot 10^{-2}$	$13 \cdot 10^{-2}$		$6,5 \cdot 10^{-2}$
Время движения по диапазону в секундах	120	120		Регулируемое		120

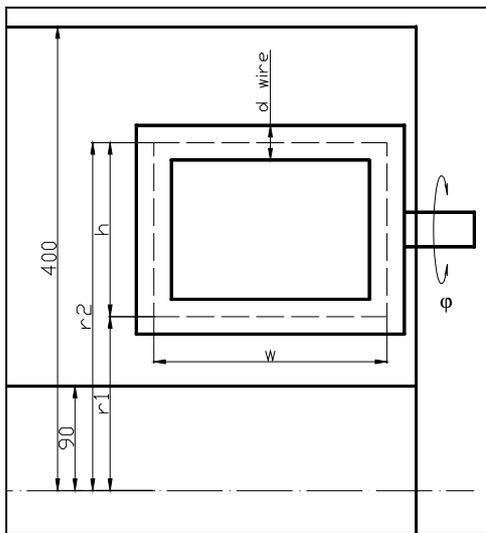


Рис. 2.61. Расположение триммера точной подстройки циклотрона ДЦ-60 на закорачивающей пластине.

### Измерение напряжения на дуантах.

Для измерения на дуантах в резонаторах циклотронов используются: пикап- электроды (рис. 2.62), установленные в отверстия в плакировке, или измерительные петли.

Сигналы используются:

- для измерения амплитуды,
- стабилизации и настройки фазы между дуантами (АПФ),
- стабилизации амплитуды,
- системы автоматической подстройки частоты (АПЧ).



Рис. 2.62. Схема пикап электрода и измерительной петли для диагностики ВЧ параметров резонатора.

Сигналы, получаемые с пикап электродов и измерительных петель, требуют калибровки. Это может быть сделано путем использования методики измерения спектра тормозного рентгеновского излучения. В нашем случае для измерений был использован полупроводниковый детектор из особо чистого германия, охлаждаемый жидким азотом. Работа детектора проверялась с использованием рентгеновских спектров  $^{152}\text{Eu}$  и  $^{133}\text{Ba}$ . Разрешение детектора для линий диапазона 30,8 – 45,5 кэВ ( $^{152}\text{Eu}$ ) составило примерно, 2,4 кэВ (FWHM). Детектор размещался горизонтально в медианной плоскости циклотрона в направлении тонкого выходного окна вакуумной камеры ускорителя. Ошибка полученного значения составляет  $\pm 2,5$  кВ на уровне амплитудного значения напряжения на дуантах 60 кВ, эта величина складывается из разрешающей способности Ge-детектора и ошибки определения «края» спектра тормозного рентгеновского излучения (ошибка определения амплитуды импульсов с пикап электрода не учитывается).

## 2.4.2 Конструкция основных узлов резонансной системы циклотрона

### Резонансный бак

Для снижения потерь частиц в процессе ускорения в циклотронах тяжелых ионов необходимо иметь вакуум в камере циклотрона  $\sim 10^{-7}$  Торр. Для снижения газоотделения с поверхности резонаторов применена технология изготовления резонаторов из нержавеющей стали и плакированных внутри бескислородной медью методом диффузионной сварки. Толщина медной плакировки 6 мм. Внутри бака установлены направляющие для передвижения закорачивающей пластины. При работе ускорителя ВЧ контурные токи нагревают плакировку бака, и поэтому с внешней стороны резонатора по всей длине бака приварены каналы, образующие контуры охлаждения 2.63.

Для удобства монтажа и проведения ремонтно-профилактических работ внутри камеры ускорителя и на резонансной системе баки расположены на откатных тележках, которые установлены на рельсах. К полу рельсы прикреплены анкерными болтами. Резонансный бак через вакуумные уплотнения стыкуется с вакуумной камерой циклотрона. На заднем фланце резонансного бака монтируется механизм юстировки дуанта, позволяющий изменять положение без нарушения вакуума.

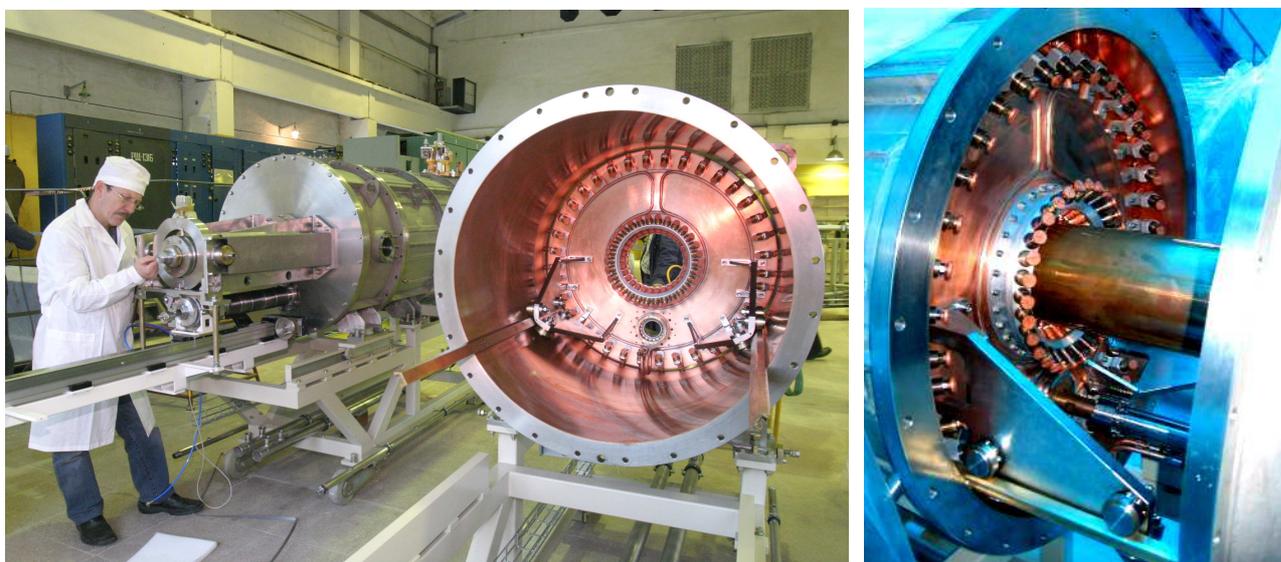


Рис. 2.63. Фотография резонаторов и закорачивающей пластины циклотрона ДЦ-60.

### Закорачивающая пластина

Для циклотронов, имеющих вариацию частоты ускоряющей системы, применяются подвижные закорачивающие пластины, которые изменяют резонансную частоту резонатора путем изменения электрической длины резонаторного объема бака. Перемещение закоротки внутри бака происходит на роликах по направляющим. Контурные ВЧ токи, протекающие по плакировкам бака и штока, замыкаются через закорачивающую пластину и ее контакты. Из опыта эксплуатации ускорителей в ЛЯР наиболее надежными зарекомендовали себя шариковые контакты закорачивающей пластины. Контактный узел – стакан, в котором усилие пружины ( $\sim 2,6$  кг) передается через ось и изолятор шарообразному контакту, скользящему по поверхности бака или штока (рис.2.64). Осевое усилие пружины на контакт регулируется при монтаже закорачивающей пластины. В рабочем режиме плотность ВЧ тока через контакты может достигать до 50 А/см. Выделяемое тепло в зоне контактов отводится водой, охлаждающей закорачивающую пластину, плакировки штока и бака.

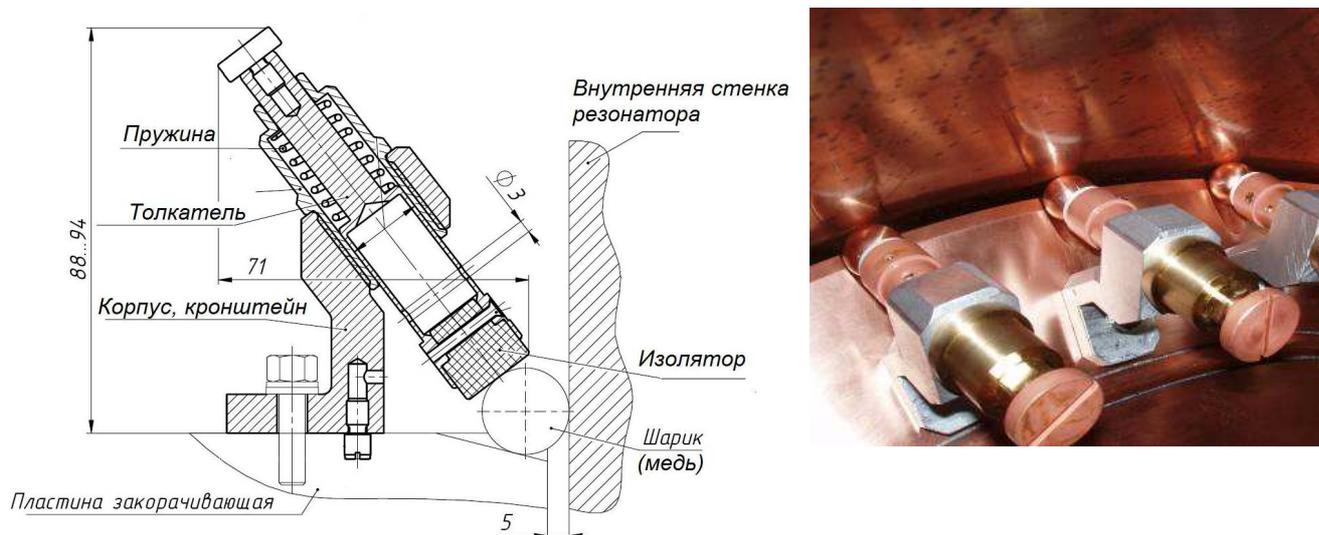


Рис.2.64. Конструкция и фотография шариковых контактов закорачивающей пластины резонатора.

Опыт эксплуатации шариковых контактов на ускорителях ЛЯР У-400М и ДЦ-60 показал высокую надежность. Такая конструкция контактов позволяет производить движение закорачивающей пластины при полной мощности ВЧ генератора. Для циклотронов, которые работают на фиксированной частоте, применение закорачивающей пластины с шариковыми контактами нецелесообразно из-за стоимости изготовления. В таких случаях можно использовать простую и надежную конструкцию контактов, выполненных в виде коротких тонких медных пластин, соединяющих подвижную пластину с внутренней стенкой резонатора (рис. 2.65). Такая конструкция позволяет варьировать частоту в пределах 1–2% от номинальной, что достаточно для оперативной подстройки в рабочем режиме.

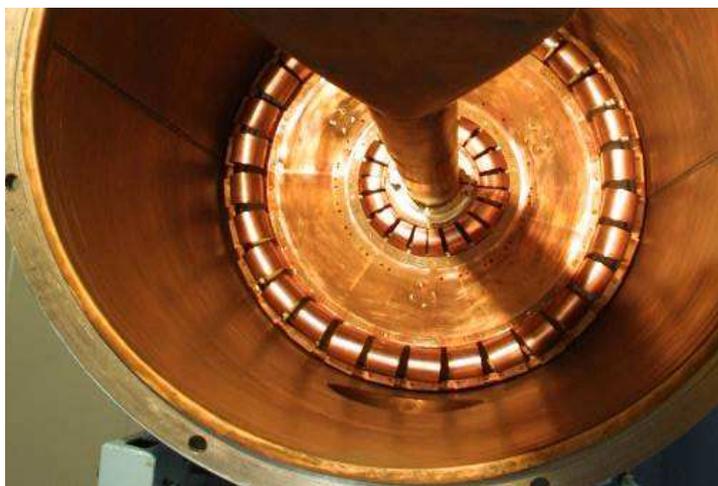


Рис. 2.65. Фотография конструкции закорачивающей пластины с использованием контактов, выполненных в виде коротких тонких медных пластин.

### Дуанты и антидуанты

Дуанты (рис. 2.66) состоят из следующих основных единиц: каркас, плакировка с трубками охлаждения, пулер. Верхняя и нижняя плакировки дуантов крепятся к каркасам титановыми винтами. Каркасы, в свою очередь, крепятся к сферической части штока. В «носовой» части дуантов устанавливается пулер. Пулеры противоположных дуантов

соединяются между собой медной контактной перемычкой, если используется схема соединенных дуантов. Для надежной фиксации и юстировки дуантов внутри камеры циклотрона в продольном, поперечном и вертикальном направлениях сконструирована опора штока с механизмом юстировки.

Типичные технические характеристики механизма юстировки дуанта:

- |   |                            |                       |
|---|----------------------------|-----------------------|
| - ход штока, (мм)   |                            | $\pm 10$              |
| - перемещение торца штока, (мм)   | в горизонтальной плоскости | $\pm 5$               |
|   | в вертикальной плоскости   | $\pm 5$               |
| - угол отклонения штока (мах), в горизонтальной и вертикальной плоскостях (град), |                            | 0,25                  |
| - контроль  |                            | визуальный, по шкалам |
| - привод, тип   |                            | ручной / винт- гайка  |

Дуант располагается в долине магнита циклотрона, которая закрыта медной конструкцией – антидуантом.



Рис. 2.66. Фотография дуанта циклотрона ДЦ-60 в сборе.

## 2.5 Система вывода пучка из циклотрона

Система вывода пучка циклотрона тяжелых ионов основывается на двух методах:

1. метод перезарядки ионов на тонкой фольге,
2. электростатический вывод.

### 2.5.1 Особенности вывода пучка тяжелых ионов низкой энергии методом перезарядки

Метод вывода пучка ионов из циклотрона с азимутальной вариацией магнитного поля предложен Флеровым Г.Н., Оганесяном Ю.Ц. и Вяловым Г.Н. в 1964 г. [144].

На протяжении многих лет он используется на циклотронах ЛЯР У-200, У-400, У-400М, показал высокую надежность [4,5,49,70,146-150]. Одним из ограничений при использовании этого метода является время жизни перезарядной фольги. В ускорителях лаборатории были испытаны разные материалы и технологии производства фольг [145]. Наилучшим образом в работе показали себя углеродные фольги. При изготовлении фольги важно получить высокую плотность напыления без примеси побочных веществ. Время жизни фольги существенно зависит от массы и энергии ионов, а также от технологии производства [151].

## Время жизни углеродных перезарядных мишеней в интенсивных потоках тяжелых ионов

Наиболее часто в циклотронах тяжелых ионов используются углеродные фольги толщиной 20 - 100 мкг/см<sup>2</sup> (0,1- 0,5 мкм). Эти фольги имеют конечное время жизни  $\tau_l$ .

В ИЯИ РАН (г. Троицк) разработана методика расчета времени жизни углеродных мишеней, исходя из основных принципов физики радиационных повреждений [152, 153]. Предложенная модель разрушения фольг была использована для расчета времени жизни углеродной мишени толщиной 50 мкг/см<sup>2</sup> ( $h_0 = 0,25$  мкм), применяемой в циклотроне У-400 для вывода пучка [146]. Основная интенсивность пучка попадает на площадь  $\sim(0,3 - 0,5)$  см<sup>2</sup>. По мере разрушения края фольги перезарядка пучка происходит на удаляющейся кромке. Из экспериментальных данных можно сделать вывод, что за срок службы фольги разрушается приблизительно площадь, равная двум-трем площадям сечения пучка  $S$ . Этот процесс ограничен тем, что со временем ухудшается качество пучка, так как перезарядка происходит уже не на ровном, а на изогнутом крае. Таким образом, при расчетах следует принимать срок службы фольги равным времени разрушения площади (2-3)  $S$ .

На рис. 2.67, 2.68 представлены рассчитанные зависимости времени жизни фольги от плотности потока частиц для указанных выше ионов. Проведено сравнение расчетных данных с экспериментальными результатами, полученными на циклотроне У-400 на пучках ионов В, Ne, Ar, Cu и Kr [146].

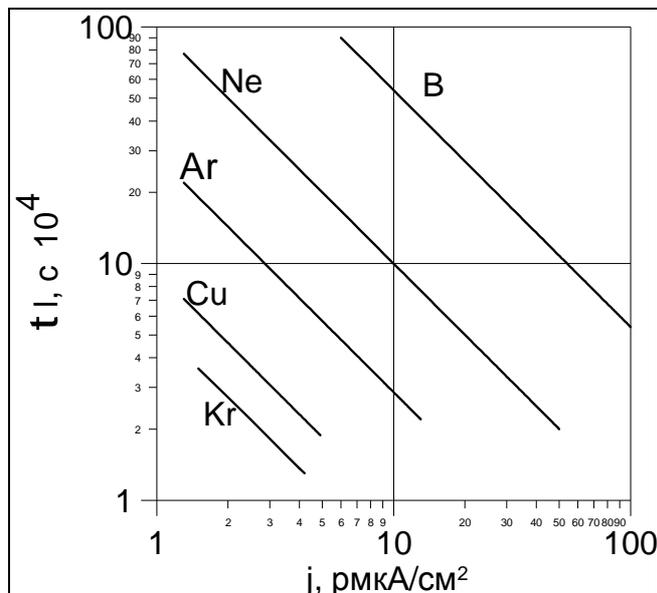


Рис. 2.67. Рассчитанные зависимости времени жизни углеродной мишени от плотности потока частиц. Толщина мишени 50 мкг/см<sup>2</sup> (0,25 мкм), энергия ионов  $E = 1$  МэВ/нуклон.

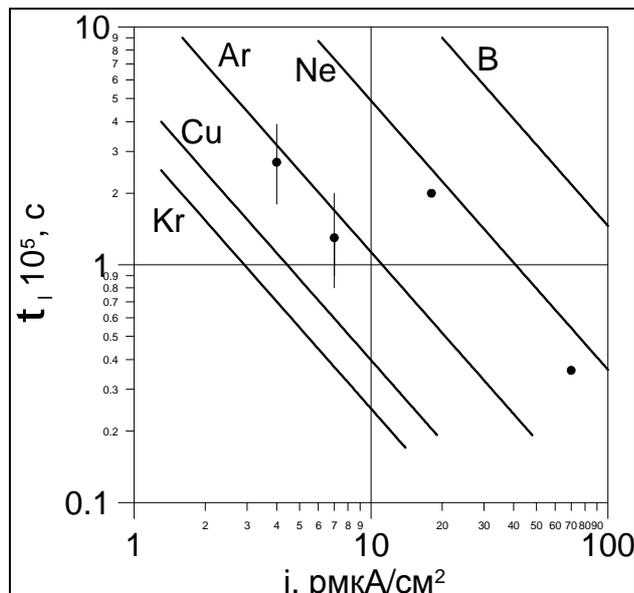


Рис. 2.68. Рассчитанные зависимости времени жизни углеродной мишени от плотности потока частиц. Толщина мишени 50 мкг/см<sup>2</sup> (0,25 мкм), энергия ионов  $E = 5$  МэВ/нуклон, точками указаны экспериментальные данные, полученные на циклотроне У-400.

Время жизни перезарядной фольги при выводе пучка ионов из циклотрона можно оценить по формуле [156]:

$$T[\text{час}] \approx (3 \div 6) \cdot 10^3 \frac{E \left[ \frac{\text{МэВ}}{\text{нукл}} \right]}{Z_p^2 \cdot j \left[ \frac{\text{pA}}{\text{см}^2} \right]}$$

где:  $Z_p$  – номер элемента иона,  $E$  – энергия ионов,  $J$  – плотность тока пучка ионов на мишени

## Эффективность вывода пучка методом перезарядки

Вторым важным фактором, ограничивающим применение метода вывода пучка ионов методом перезарядки, является разброс зарядов ионов после прохождения фольги. Поскольку для транспортировки используется только один заряд, то эффективность вывода напрямую зависит от зарядового распределения. На рис. 2.69 показана максимально возможная эффективность вывода пучка от энергии и массы ионов [154-156].

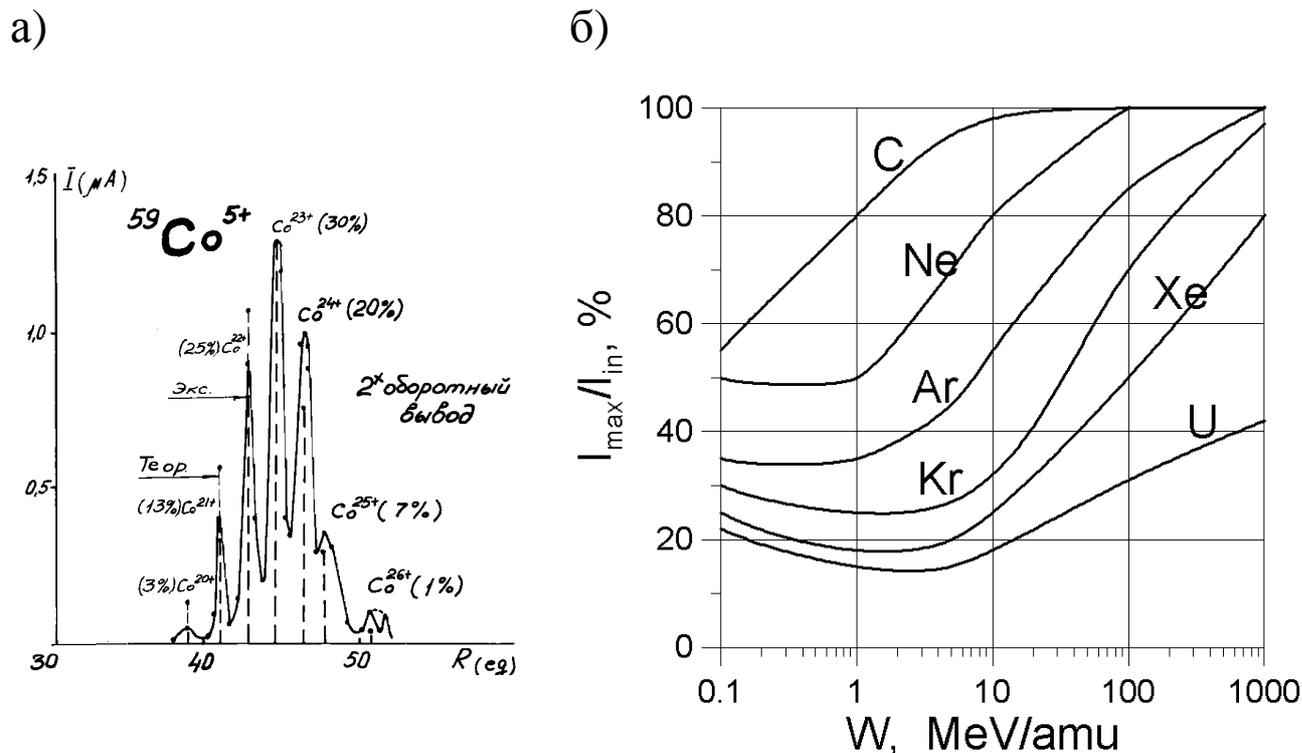


Рис. 2.69. Спектр ионов кобальта по зарядам после перезарядной фольги на циклотроне У-400 при выводе  $^{59}\text{Co}^{5+}$  с энергией 3,9 МэВ/нуклон (а). Расчет максимально возможной эффективности вывода пучка ионов методом перезарядки в зависимости от энергии и массы ионов (б).

Вывод пучка методом перезарядки эффективно работает для легких ионов и ионов высокой энергии. Поскольку циклотроны тяжелых ионов промышленного применения должны производить пучки ионов с массой до Хе и энергией 1-2,5 МэВ/нуклон, то метод вывода пучка с использованием перезарядных фольг является неэффективным.

### 2.5.2 Вывод пучка с использованием электростатического дефлектора.

Система вывода с использованием электростатического дефлектора позволяет отклонить пучок из зоны ускорения с помощью электрического поля и направить в ионопровод. На входе в ионопровод необходимо обеспечить хорошее качество пучка, согласовать ось ионопровода с направлением движения пучка для его эффективной транспортировки по каналам к физическим установкам.

Выбор направления вывода определяется как свойствами системы вывода, так и компоновкой основных систем ускорителя. На рисунке 2.70 приведена схема циклотрона ДЦ-60 и траектории пучка выведенных ионов [108, 135].

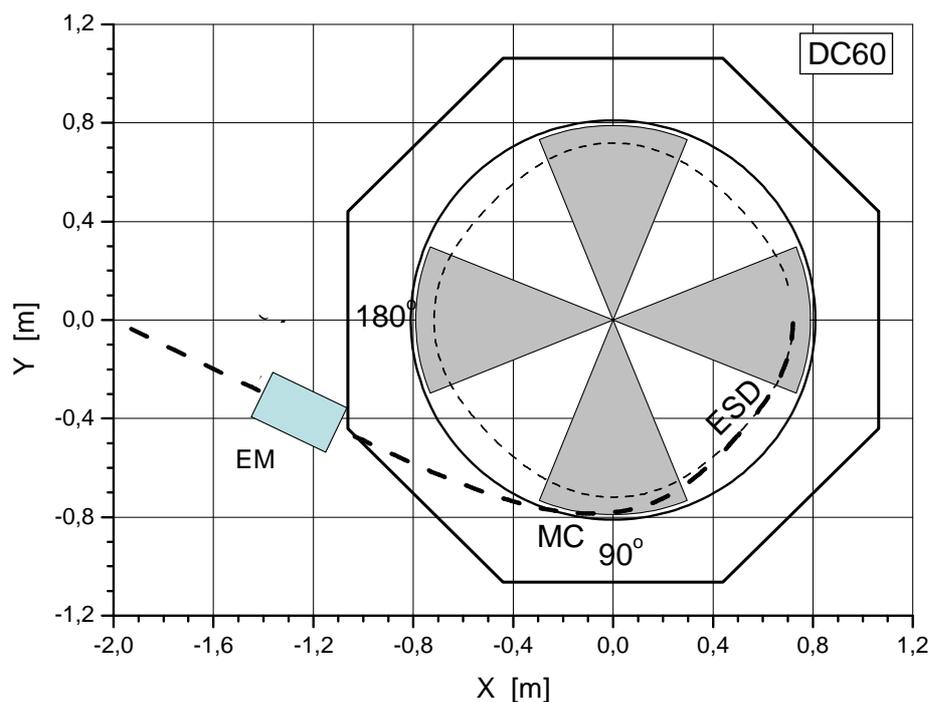


Рис. 2.70. Схема ускорителя ДЦ-60 с расположением секторов элементов системы вывода пучка. Азимут траектории отсчитывается по часовой стрелке.

Основные элементы системы вывода пучка:

- **Электростатический дефлектор (ESD)**, отклоняющий пучок из камеры циклотрона, расположен в долине циклотрона;
- **Фокусирующий магнитный канал (МС)**, располагается в зоне максимального градиента спадающего магнитного поля циклотрона, который на краю сектора составляет (30-35) Тл/м. Магнитный канал служит для компенсации дефокусирующего действия спадающего поля и формирования размеров и эмиттанса пучка входе в ионопровод, согласованного в акцептансом канала транспортировки.
- **Диагностические элементы:**
  - ✓ **пробник вывода**, расположенный между дефлектором и магнитным каналом (PE1) и позволяющий оптимизировать положение дефлектора и магнитного канала;
  - ✓ **профиломер и люминофор**, расположенные в выводном патрубке на выходе из вакуумной камеры и позволяющие определять форму и интенсивность выведенного пучка.
- **Магнит вывода (EM)**, располагается в начале канала транспортировки пучка, служит для согласования направления движения пучка с осью ионопровода, необходимый угол коррекции  $\pm 2,5^\circ$ .

#### Численное моделирование вывода пучка

В расчетах динамики используются как расчетные, так и измеренные карты магнитного поля. Из анализа динамики пучка в магнитных полях видно, что орбиты на конечном радиусе ускорения не имеют пространственного разделения, дефлектор захватывает ионы с последних 2-3 орбит. Результат численного моделирования положения орбит пучка, сделанный для циклотрона ДЦ-110 [137], приведен на рисунке 2.71.

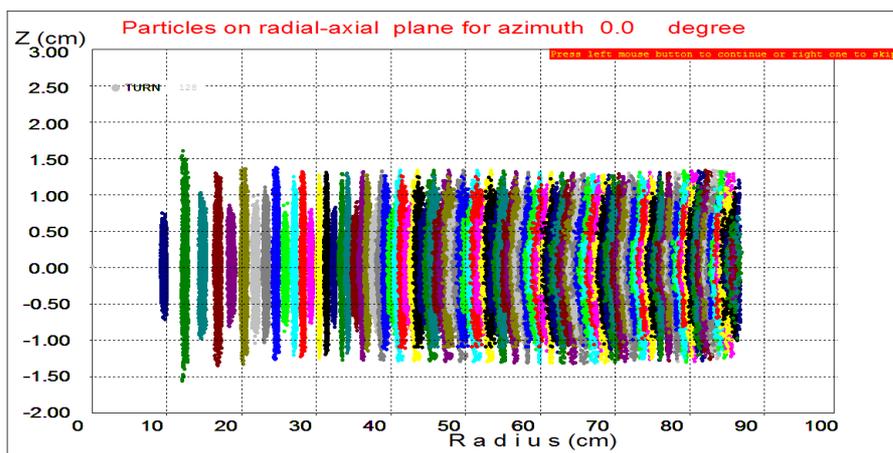


Рис. 2.71. Положение ускоренных ионов на плоскости (R, Z) с шагом один оборот.

При проведении пусконаладочных работ на циклотроне ДЦ-60 было исследовано разделение орбит в процессе ускорения в разных режимах с использованием дифференциального пробника радиальной протяженностью 10 мм. На рисунке 2.72 показана радиальная зависимость тока пучка ионов при ускорении  $^{84}\text{Kr}^{12+}$ . Пробник не зафиксировал разделение орбит на радиусах более 400 мм [78, 79].

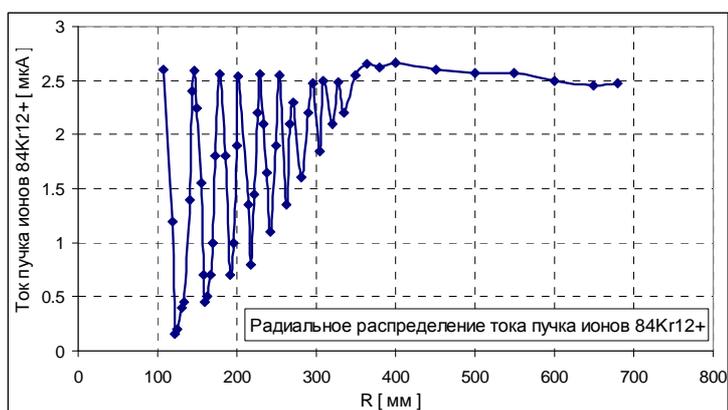


Рис. 2.72. Радиальная зависимость тока пучка ионов  $^{84}\text{Kr}^{12+}$ .

Расчеты динамики пучка в измеренных магнитных полях позволяют достаточно точно определить горизонтальный и вертикальный эмиттансы пучка на входе в электростатический дефлектор. Для циклотронов с энергиями 1–2,5 МэВ/нуклон в технической концепции, разработанной в ЛЯР, параметры пучка на входе в дефлектор можно оценить в следующих пределах.

- горизонтальный эмиттанс ( $\epsilon_x$ ) = 10–15  $\pi$  мм·мрад;
- вертикальный эмиттанс ( $\epsilon_z$ ) = 15–20  $\pi$  мм·мрад;
- разброс ионов по энергии ( $\delta W$ ) =  $\pm 2\%$ .

### Конструкция элементов системы вывода пучка

#### Электростатический дефлектор

Электростатический дефлектор располагается в свободной от дуантов долине циклотрона. Дефлектор представляет собой две пластины с заданной кривизной поверхностей (“септумная” и “потенциальная”), между которыми создается электрическое поле, отклоняющее пучок. Кривизна пластин дефлектора выбирается исходя из радиусов кривизны выводных траекторий пучка ионов. Расстояние между пластинами – около 10 мм. Для уменьшения вероятности пробоя при разработке конструкции принята максимальная напряженность электрического поля 60-70 кВ/см.

Основные потери пучка происходят в основном на начальной части «септумной» пластины. Соответственно, она должна быть изготовлена из тугоплавкого материала с малой толщиной для уменьшения потерь пучка. В качестве материала для «септумной» пластины может быть использован, например, молибден. В качестве материала для потенциального электрода должен быть использован материал с малым коэффициентом распыления при бомбардировке пучка тяжелых ионов. В разработанных конструкциях использовались титан и алюминиевые сплавы.

#### *Расчет температурных нагрузок на дефлектор*

Часть пучка при его выводе попадает на дефлектор, в основном на «септумную» пластину. В критическом случае возможно высаживание на ней всего пучка. Проведены расчеты температуры на «септумной» пластине при выделении полной мощности пучка 300 Вт. Материал пластины – молибден, толщина 0,3 мм, высота 40 мм. Сверху и снизу для охлаждения припаяна медная трубка.

Численные оценки показали, что минимальная площадь, на которой высаживается пучок, составляет  $\approx 10\text{мм} \times 50\text{мм}$ . В расчетах температуры рассматривались три варианта:  $10 \times 10 \text{ мм}^2$ ,  $10 \times 50 \text{ мм}^2$ ,  $10 \times 100 \text{ мм}^2$ .

Расчет проводился по программе DesignSpace v5.0. Мощность пучка  $P=300$  Вт при равномерном распределении по всей зоне. Охлаждение осуществляется через теплопередачу на медные трубки охлаждения. В расчете учитывается отвод тепла излучением абсолютно черного тела по закону Стефана–Больцмана. В таблице 2.12 приведены расчетные максимальные температуры  $T_{\max}$  [°C] для разных зон, где высаживается пучок. Приведена тоже мощность, которая уходит излучением абсолютно черного тела  $P_{\text{irad}}$ .

Таблица 2.12. Результаты расчетов температуры септума при мощности пучка 300 Вт.

Размер пучка [мм <sup>2</sup> ]	$T_{\max}$ [°C]	$P_{\text{irad}}$ [W]	$P_{\text{irad}}$ [%]
10 x 10	2292	~120	~40
10 x 50	<b>1104</b>	~65	~23
10 x 100	621	~25	~10

Расчеты показали, что для минимально возможной зоны высаживания пучка  $10 \times 50 \text{ мм}^2$  при мощности 300 Вт максимальная температура нагрева пластины дефлектора  $T_{\max}$  не превысит  $1104^\circ\text{C}$ , что значительно ниже температуры плавления молибдена  $T_T=2620^\circ\text{C}$ . Точность расчета составляет  $\sim 30 \div 40$  %.

#### *Потенциальный электрод*

В конструкциях циклотронов ЛЯР в качестве материала для потенциальной пластины дефлектора выбраны титан или сплавы алюминия. В настоящее время накоплен положительный опыт применения электродов дефлектора из титана. Геометрия поверхности потенциального электрода определяется в основном требованием на однородность электрического поля между электродами в области пучка и максимально допустимой величиной напряженности поля в дефлекторе, при которой отсутствуют пробои в нем.

Величина критической напряженности поля в дефлекторе зависит от условий его эксплуатации. При давлении остаточного газа в области дефлектора порядка  $(1-0,5) \cdot 10^{-6}$  Торр средняя длина свободного пробега электронов и ионов в остаточном газе составляет  $\sim (1 \div 2)$  см и сравнима с межэлектродным расстоянием в дефлекторе. Ионизация в газе слабо влияет на механизм пробоя. В указанных условиях эксплуатации дефлектора электрическая прочность в нем определяется механизмом вакуумного пробоя между металлическими поверхностями. В этом случае за максимальную напряженность поля может быть принята величина равная  $\sim 80\text{кВ/см}$ .

На рисунке 2.73 показана принятая геометрия электродов разработанного дефлектора. Радиус кривизны боковых и фронтальных поверхностей потенциального

электрода выбран равным 10 мм. Разность потенциалов между электродами при расчетах принималась 75 кВ, расстояние между электродами 12 мм. Минимальное расстояние между боковой поверхностью электрода и поверхностью защитного кожуха дефлектора составляло 15 мм. На рисунке 2.73 показано распределение электрического поля в области входа пучка в дефлектор (боковое сечение дефлектора перпендикулярно рабочим поверхностям электродов в плоскости оси пучка) Из расчетов видно, что максимальная напряженность возникает в точках сопряжения основной плоскости потенциального электрода с его боковой поверхностью и составляет менее 81 кВ/см.

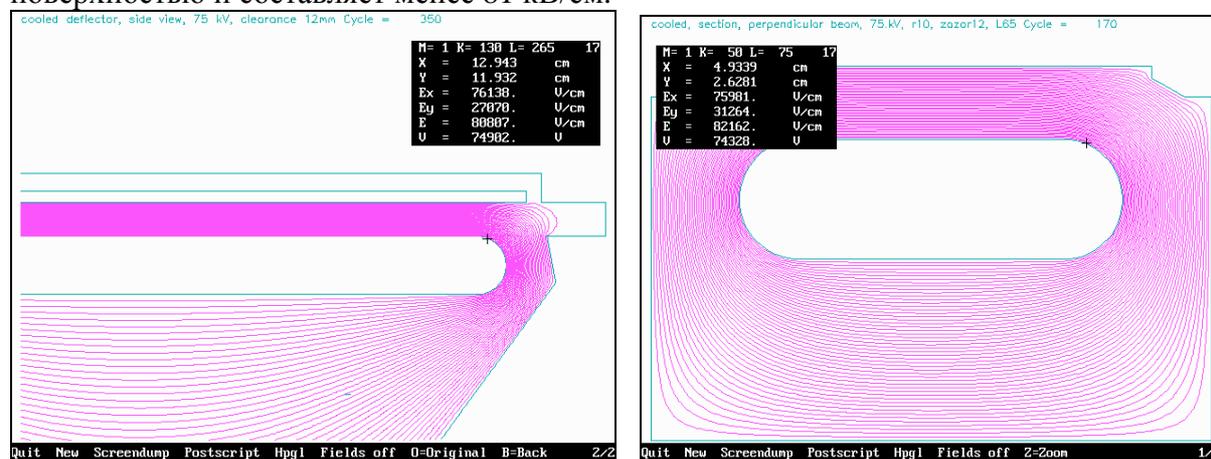


Рис.2.73. Распределение электрического поля в продольном и поперечном сечениях дефлектора.

Выводимые ионы, попадая на поверхность «потенциального» электрода, выбивают вторичные электроны, которые вызывают высоковольтный разряд. Для подавления данного эффекта в плоскости «потенциального» электрода сделано углубление глубиной 1 мм на высоту  $\pm 10$  мм относительно медианной плоскости, что позволяет улавливать вторичные электроны. Выбиваемые вторичные электроны двигаются вдоль силовых магнитных линий и вновь попадают на «потенциальный» электрод. Для дополнительной защиты по вертикали (сверху и снизу) от «потенциального» электрода установлены молибденовые пластины, уменьшающие вероятность возникновения высоковольтного пробоя.

Конструкция дефлектора предусматривает возможность независимого перемещения входа и выхода дефлектора для настройки на «ядро» пучка и согласования выводной траектории с положением дефлекторных пластин.

#### *Магнитный фокусирующий канал*

Выводная траектория проходит через область больших радиальных градиентов магнитного поля, вызывающих дефокусировку пучка в горизонтальном направлении. Максимальные градиенты краевого магнитного поля (30-35 Тл/м). Для согласования эмиттанса выводимого пучка с аксептансом канала транспортировки используется фокусирующий магнитный канал (ФМС). Магнитный канал должен обеспечивать фокусирующий в горизонтальном направлении градиент магнитного поля  $G \approx 5$  Т/м в рабочей апертуре 25 мм по горизонтали и 10 мм по вертикали.

Двухмерные и трехмерные расчеты геометрии магнитного канала показали, что для обеспечения требуемого градиента магнитного поля требуется канал с изменяющимся поперечным сечением вдоль длины. В качестве компромиссного решения конструкция магнитного канала может состоять из нескольких частей. Например, для ДЦ-60 был выбран вариант канала, состоящий из двух частей [135]. На рисунке 2.74 показаны сечения начальной части канала ( $1/4$  длины) и второй части канала ( $3/4$  длины).

На рисунке 2.75. показано измеренное радиальное распределение магнитного поля в рабочей апертуре фокусирующего канала для 4 азимутов при уровне магнитного поля  $B_0 = 1,45$  Тл. Величина радиального градиента магнитного поля меняется по длине магнитного канала, но интегральный градиент соответствует требуемой величине.

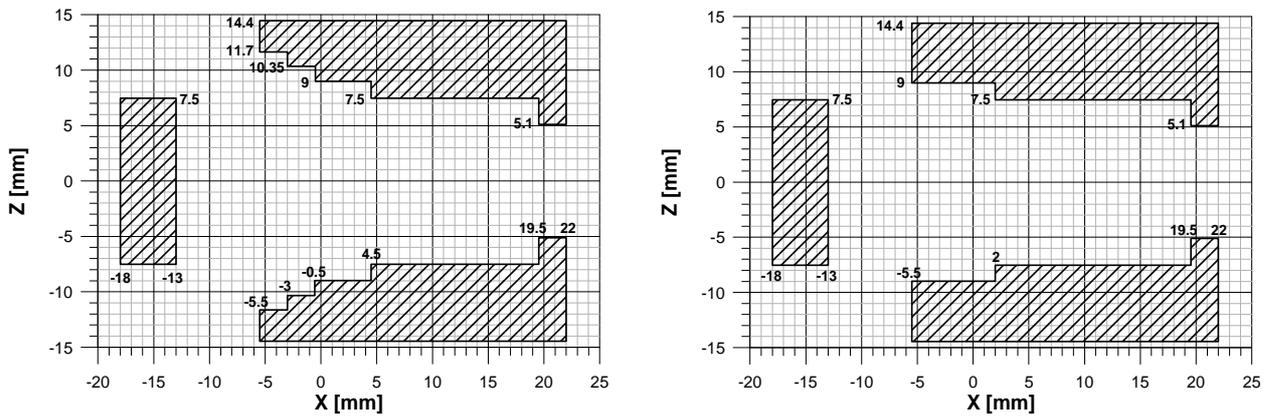


Рис. 2.74. Сечение первой и второй части магнитного канала ДЦ-60.

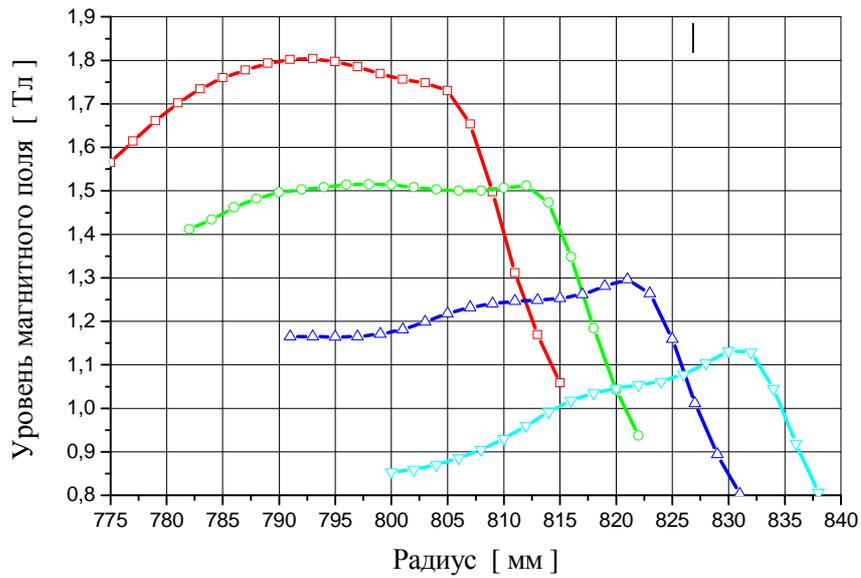


Рис.2.75. Измеренное радиальное распределение магнитного поля в апертуре фокусирующего магнитного канала для 4 сечений при уровне магнитного поля  $B_0=1.45$  Тл

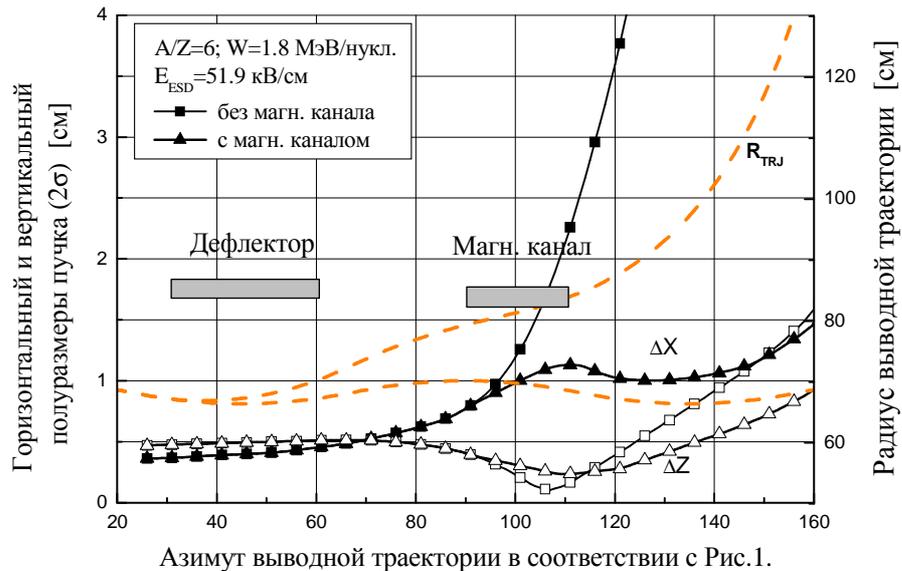


Рис. 2.76. Горизонтальная ( $\Delta X$ ) и вертикальная ( $\Delta Z$ ) огибающие пучка (полуразмер) с фокусирующим магнитным каналом и без него. Пунктирной линией показаны радиусы равновесной орбиты и выводной траектории.

На рисунке 2.76 показан пример расчета для циклотрона ДЦ-60 огибающих пучка ионов с  $A/Z=6$  и  $E=1,8$  МэВ/нуклон с магнитным каналом и без него. Фокусирующий магнитный канал позволяет получить выведенный пучок на выходе из вакуумной камеры циклотрона с горизонтальным размером  $\Delta X \approx 30$  мм и вертикальным размером  $\Delta Z \approx 20$  мм.

## Выводы

- В циклотронах тяжелых ионов с энергией 1–2,5 МэВ/нуклон целесообразно использовать систему вывода пучка с использованием электростатического дефлектора. Она имеет более высокий коэффициент вывода по сравнению с системой вывода методом перезарядки.
- Система электростатического вывода пучка должна включать в себя пассивный фокусирующий канал для согласования эмиттанса пучка с аксептансом канала транспортировки.
- Влияние железа, расположенного в магнитном канале, должно учитываться при формировании магнитного поля циклотрона.
- Эффективность вывода пучка, экспериментально полученная на циклотронах ИЦ-100, ДЦ-60, ДЦ-110, составляет 60–70%.

## 2.6 Вакуумная система циклотрона

### 2.6.1 Исходные данные и требования к вакуумной системе циклотрона тяжелых ионов

Процесс оптимизации вакуумной системы циклотрона заключается в сочетании требования к снижению потерь пучка из-за перезарядки на остаточном газе с техническими возможностями и стоимостью создания вакуумной системы.

Вакуумная система циклотрона состоит из трех подсистем, каждая из них отвечает определенным требованиям к уровню вакуума и технологии подготовки внутренних поверхностей.

1. Вакуумная подсистема ионного источника и канала аксиальной инжекции пучка (ионы имеют низкую энергию, высокое сечение перезарядки, длина канала примерно 5–10 м).
2. Вакуумная подсистема камеры циклотрона (ионы набирают энергию от энергии инжекции до максимальной на радиусе вывода, сечение падает с ростом энергии ионов).
3. Вакуумная подсистема каналов транспортировки (укоренные и выведенные ионы в каналах транспортировки имеют низкое сечение перезарядки, основное требование к вакууму в каналах, как правило, сводится к снижению натекания газа из канала до допустимого значения, которое не влияет на давление в камере циклотрона).

Эффективность трансмиссии пучка  $T$  по длине пути  $L$  в условиях перезарядки ионов на остаточном газе определяется следующим образом:

$$T = \exp \left\{ - 3.3 \times 10^{16} \int_0^L P(\ell) \sigma(\beta) \cdot d\ell \right\},$$

где  $P$  – давление в Торр,  $d\ell$  – элемент длины пути иона в см,  $\beta$  – относительная скорость ( $v/c$ ),  $\sigma$  – сечение перезарядки иона на остаточном газе в см<sup>2</sup>/молекула (температура газа 293°K).

На базе экспериментальных данных потерь ионов вследствие перезарядки на молекулах остаточного газа, полученных как на ускорительных установках ЛЯР У-200, У-300, У-400 и У-400М [81, 82, 84, 157-160], так и ускорителях в других центрах мира, и анализа теоретических исследований и полуэмпирических моделей, описывающих процесс перезарядки ионов [161] в Лаборатории ядерных реакций разработаны программы GENAP [163] и VACLOS [162], позволяющие получать исходные данные для проектирования вакуумных систем циклотронов тяжелых ионов.

Программы GENAP [163] и VACLOS [162] позволяют проводить численное моделирование вакуумных потерь пучка ионов из-за перезарядки на остаточном газе для канала аксиальной инъекции, для оценки вакуумных потерь ионов в процессе ускорения и в каналах транспортировки ускоренных пучков на физическую мишень.

В расчетах по программам GENAP и VACLOS учитываются геометрия вакуумных камер, распределение давления по траектории движения ионов и изменение сечения перезарядки в зависимости от энергии ионов. Сочетание этих программ позволяет оценивать эффективность трансмиссии ионов в ускоряемом диапазоне энергии для вакуумной камеры практически произвольной геометрии. Программы с помощью вводимых коэффициентов позволяют учитывать состав остаточного газа, в том числе при работе с внутренним источником, натекание газа из которого является основной компонентой остаточного газа. Доминирующими компонентами остаточного газа в камере циклотрона с внешней инъекцией являются азот и вода. На рисунке 2.77 приведены спектры остаточного газа в вакуумной камере циклотрона У-400 в режимах ускорения ионов из внутреннего РИГ-источника и при отсутствии внутреннего источника, что имитирует условия с внешней инъекцией пучка [81].

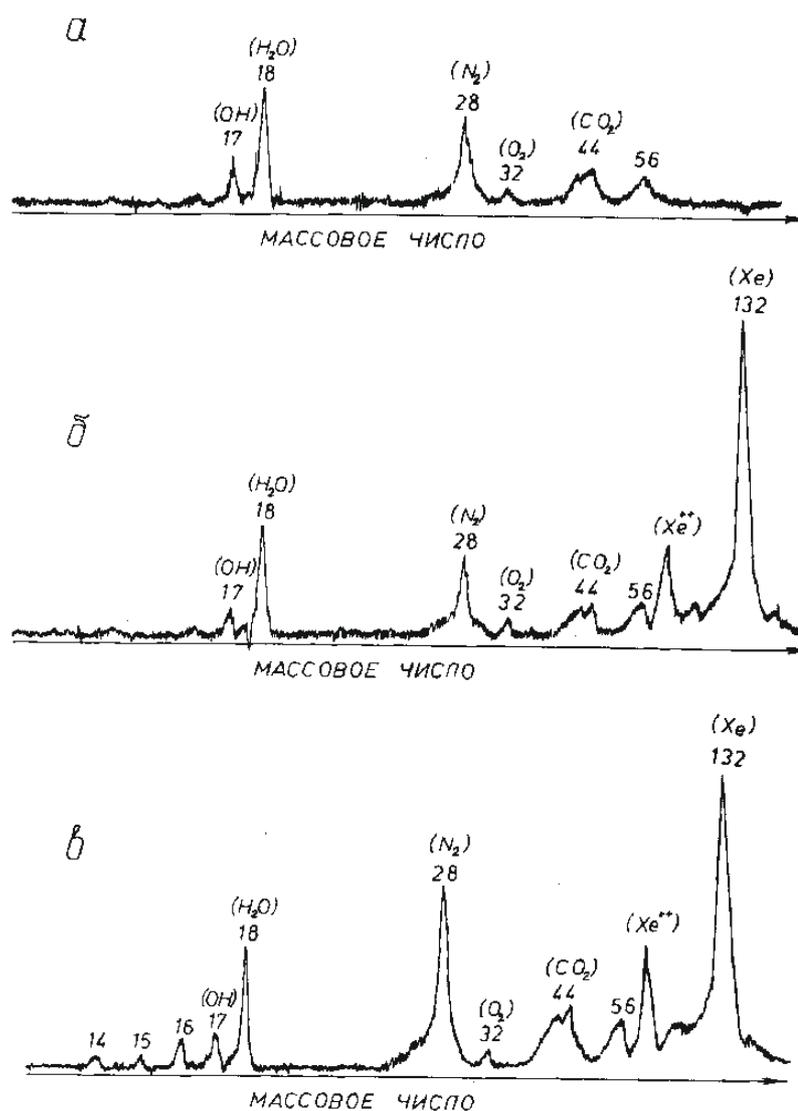


Рис. 2.77. Спектры остаточного газа в вакуумной камере циклотрона У-400 с внутренним источником типа РИГ в режимах:

- а) без ионного источника, в отсутствие ускоряющего напряжения;
- б) при работающем ионном источнике на Хе, но в отсутствие ускоряющего напряжения;
- в) при ускорении пучка.

Для формирования требований к вакуумной системе в первую очередь рассматривались наиболее высокозарядные тяжелые ионы, а также ионы с минимальной энергией, как имеющие наибольшие потери и определяющие требования к вакуумной системе.

Поскольку методика расчета основана на анализе экспериментальных данных, результаты расчета хорошо совпадают с измерениями на циклотронах. На рисунках 2.78, 2.79 показаны расчетные и измеренные коэффициенты трансмиссии для ионов ксенона, криптона, аргона, неона ( $1,2-1,5$  МэВ/нуклон) на циклотронах ИЦ-100 и ДС-60 [28,78,].

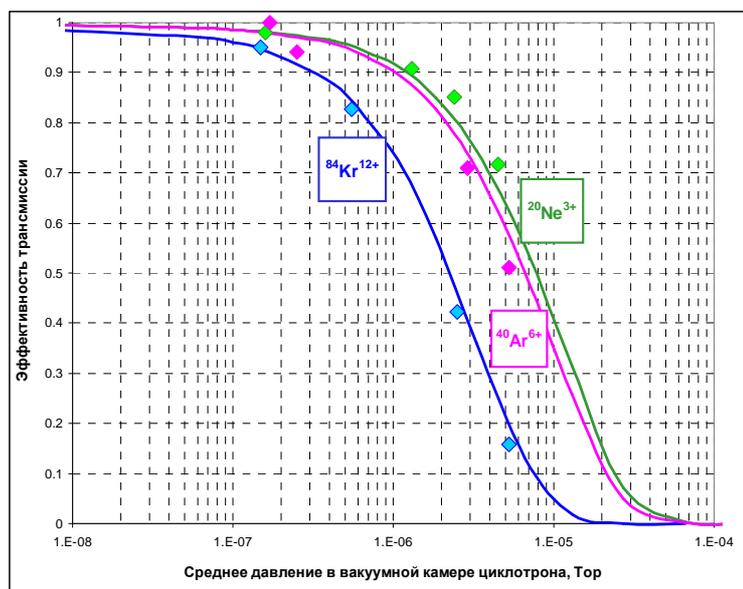


Рис. 2.78. Зависимость эффективности трансмиссии пучков  $^{20}\text{Ne}^{3+}$ ,  $^{40}\text{Ar}^{6+}$ ,  $^{84}\text{Kr}^{12+}$  от вакуума в камере циклотрона ДС-60 при ускорении от центра до конечного радиуса (сплошная линия – расчет, символы – экспериментальные данные)

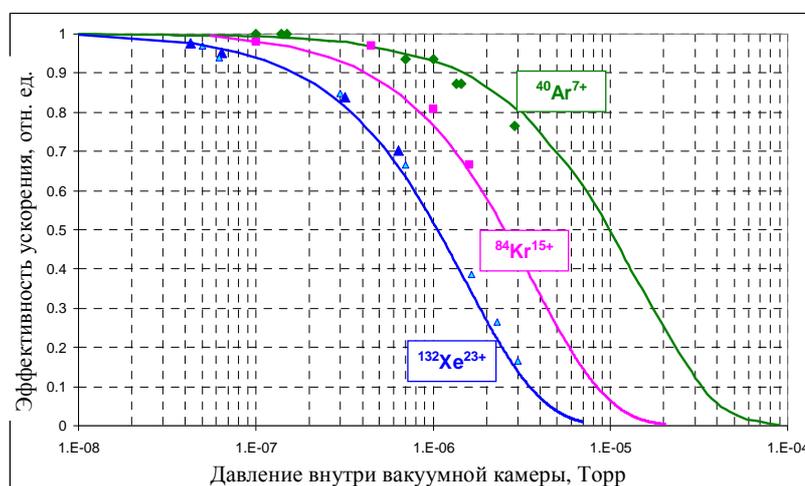


Рис.2.79. Эффективность трансмиссии ионов при ускорении в циклотроне ИЦ-100 в зависимости от давления в вакуумной камере (сплошная линия – расчет, символы – экспериментальные данные).

#### Требования к вакууму на циклотроне.

Требования к уровню вакуума на циклотроне зависят от многих параметров: типа ускоряемых частиц, энергии ионов, длины каналов инжекции и каналов транспортировки ускоренных ионов, других параметров ускорителя. Поэтому в каждом случае требуется расчет, исходя из конкретных условий на циклотроне.

Циклотроны тяжелых ионов, разработанные в ЛЯР для прикладных задач и промышленного применения, имеют диапазон ускоряемых части от углерода до ксенона. Наиболее жесткие требования к вакууму в камере ускорителя предъявляются при ускорении пучков ионов ксенона, поскольку из всего спектра ускоряемых ионов они имеют наибольшее сечение перезарядки на остаточном газе.

Исходя из расчетов, сделанных по программам GENAP и VACLOS, и на базе экспериментальных данных можно сформулировать требования к уровню вакуума на циклотронах. Приведенные в таблице 2.13 значения вакуума соответствуют (10–15)% потерям пучка Хе, вызванных перезарядкой ионов на остаточном газе.

Таблица 2.13. Расчетное необходимое давления в циклотронах ИЦ-100, ДЦ-60 и ДС110

	ИЦ-100	ДЦ-60	ДС-110
Система аксиальной инжекции пучка, Торр	$2 \cdot 10^{-7}$	$2 \cdot 10^{-7}$	$2 \cdot 10^{-7}$
Камера циклотрона, Торр	$2 \cdot 10^{-7}$	$(1-2) \cdot 10^{-7}$	$1 \cdot 10^{-7}$
Канал транспортировки пучка ускоренных ионов, Торр	$2 \cdot 10^{-5}$	$6 \cdot 10^{-6}$	$3-4 \cdot 10^{-6}$

### 2.6.2 Структура вакуумной системы циклотрона, выбор оборудования и технологий.

Вакуумный объем циклотронов ИЦ-110, ДЦ-60, ДС-110 составляет 3-5м<sup>3</sup>, состоит из:

- вакуумной камеры, изготовленной из алюминиевого сплава Д16Т; верхней и нижней крышками камеры являются два стальных полюса магнита со сборками из четырех секторов на каждом полюсе и двумя блоками корректирующих катушек, расположенным между полюсом и секторами,
- двух высокочастотных резонаторов, внутренняя поверхность резонаторов – медная, штоки и дуанты также изготовлены из меди.

На камере ускорителя установлены пробники для измерения тока пучка, дефлектор, магнитный канал и другие устройства. Вводы движения всех механизмов выполнены с использованием пластинчатых сильфонов. Кроме того, вакуумная камера ускорителя соединена с ионопроводами каналов аксиальной инжекции пучка и каналов пучков ионов низкой и высокой энергии, которые выполнены из нержавеющей труб с внутренним диаметром 100 мм. Для уплотнения фланцев вакуумной камеры использованы высоковакуумные витоновые оринги.

Основной задачей при разработке вакуумной системы циклотронов был выбор средств откачки, конструктивных материалов и технологии обработки, обеспечивающих получение вакуума:

- в камере ускорителя –  $(1-2) \cdot 10^{-7}$  Торр,
- в канале аксиальной инжекции пучка и канале ионов низкой энергии – около  $1 \cdot 10^{-7}$  Торр,
- в каналах ускоренных пучков – лучше  $2 \cdot 10^{-6}$  Торр.

#### **Выбор конструкционных материалов и технологии их обработки при изготовлении деталей и узлов ускорителя**

*Основные требования:*

- минимальная величина удельного газоотделения с поверхности;
- применение технологии очистки, травления, химической полировки поверхностей деталей и узлов;
- высокая конструкционная прочность;
- сведение до минимума процессов ионно-стимулированной десорбции газов с поверхностей вакуумной камеры, особенно в рабочем зазоре ускорителя;
- стойкость к распылению металлов под воздействием пучков ускоренных ионов;

- возможность проведения чистки и промывки конструкционных деталей и узлов, смонтированных в камере ускорителя;
- применение эластомерных уплотнений, допускающих многократный монтаж узлов и деталей камеры ускорителя с высокой степенью надежности на герметичность сборки.

*Исходными материалами для ускорителя являются:*

- сталь с высокими магнитными свойствами для изготовления полюсов и секторов магнита;
- нержавеющая сталь типа 12Х18Н10Т для изготовления боковых крышек камеры, шлюзов, выводных устройств, магнитных каналов вывода пучка, пробников и т. п.;
- медь бескислородная для изготовления высокочастотной системы;
- эластомерные уплотнения из витона для герметизации разборных элементов конструкций камеры ДЦ-60.

Выполнение этих операций по вакуумной подготовке металлических поверхностей позволяет уменьшить скорость удельного газоотделения с поверхности металлов (медь, нержавеющая сталь, алюминий) до величины  $q = 3 \cdot 10^{-9} - 2 \cdot 10^{-10}$  л·Торр·сек<sup>-1</sup>·см<sup>-2</sup>.

Крупногабаритные стальные детали магнита, находящиеся в вакууме, полюса и сектора магнита, шиммы были покрыты электролитическим способом тонким слоем хрома 50 - 100 мкм, что значительно уменьшает величину газоотделения с поверхности металла за счет закрытия микротрещин, пор, расслоения железа, возникающих при плавке, прессовании, прокате.

*Основные источники газовых потоков в вакуумную камеру циклотрона*

Общий газовый поток (натекание)  $Q$  (л·Торр/сек) представляет собой сумму газового потока  $Q_{\text{течи}}$  через неплотности уплотнений,  $Q_{\text{газоотд}}$  – газоотделения с поверхности вакуумного объема,  $Q_{\text{ЕЦР}}$  – поступление газового потока по каналу аксиальной инъекции из источника ионов, а также стимулированная десорбция с поверхности камеры за счет бомбардировки поверхности ионами в режиме ускорения.

Удельная величина газоотделения с поверхности вакуумного объема камеры циклотрона для металлической поверхности (после технологического цикла обработки и последующей вакуумной тренировки в течение 50 - 150 часов) составит в среднем  $g_m = 1 \cdot 10^{-5}$  л·Торр·с<sup>-1</sup>·м<sup>-2</sup>, для эластомерных уплотнений  $g_{\text{витон}} = 6 \cdot 10^{-4}$  л·Торр·с<sup>-1</sup>·м<sup>-2</sup>.

В качестве примера приведен расчет газового потока и необходимой скорости откачки для циклотрона ДЦ-60.

Газовый поток за счет десорбции с поверхности в камере составит  $Q_{\text{газоотд}} = g_m \cdot S_m + g_{\text{витон}} \cdot S_{\text{витон}} = 4,1 \cdot 10^{-4} + 6 \cdot 10^{-5} = 4,7 \cdot 10^{-4}$  л·Торр·с<sup>-1</sup>.

Газовый поток в камеру ДЦ-60 за счет внешних течей из-за возможной негерметичности уплотнений при сборке определяется с помощью чувствительного течеискателя и может составлять  $Q_{\text{течи}} = 5 \cdot 10^{-8}$  л·Торр·с<sup>-1</sup>.

Поступление газового истока из ЕЦР источника и стимулирование десорбционных процессов в режиме ускорения составит  $Q_{\text{ЕЦР}} = 2 \cdot 10^{-4}$  л·Торр·с<sup>-1</sup>. Таким образом, суммарная величина газового потока в ДЦ-60 в режиме работы по ускорению и выводу тяжелых ионов составит величину

$$\Sigma Q = Q_{\text{газоотд}} + Q_{\text{течи}} + Q_{\text{ЕЦР}} = 4,7 \cdot 10^{-4} + 5 \cdot 10^{-8} + 2 \cdot 10^{-4} \cong 6,7 \cdot 10^{-4} \text{ л·Торр·с}^{-1}$$

Для обеспечения рабочего вакуума в камере циклотрона на уровне  $P = (1 \div 2) \cdot 10^{-7}$  Торр необходима эффективная быстрота действия высоковакуумных средств откачки

$$S_{\text{эф}} = \Sigma Q / P = (6700 \div 3400) \text{ л/с.}$$

*Основные требования к средствам высоковакуумной откачки:*

1. Обеспечение откачки в области давлений  $5 \cdot 10^{-2} \div 10^{-7}$  Торр.
2. Обеспечение безмасляной откачки вакуума.
3. Высокое давление запуска  $P = 5 \cdot 10^{-2} \div 10^{-2}$  Торр.

4. Устойчивость к газовым нагрузкам в случае срыва вакуума.
5. Высокая скорость откачки при минимальных габаритах.
6. Обеспечение возможности поиска течей.
7. Возможность дистанционного (компьютерного) управления.

Наиболее полно вышеуказанным требованиям удовлетворяет комбинация турбонасосов и крионасосов. Использование турбонасосов обусловлено необходимостью проведения работ по поиску течей и создания предварительного вакуума в камере ускорителя  $P \leq 10^{-5}$  Торр, что обеспечивает более длительную работу крионасосов без регенерации.

### Вакуумная откачка канала транспортировки ионов и установки для облучения полимерной пленки

Главной особенностью канала транспортировки ионов к установке для облучения полимерной пленки является большой газовый поток с поверхности пленки в режиме перемотки –  $1,1 \cdot 10^{-2}$  Торр·л/с, основная компонента газового потока – пары воды. Газоотделением с поверхности ионопровода ( $1 \cdot 10^{-9}$  Торр·л·с<sup>-1</sup>·см<sup>-2</sup>) можно пренебречь.

Для достижения необходимого давления в канале транспортировки пучков  $P_{\text{среднее}} \leq 1 \cdot 10^{-5} - 5 \cdot 10^{-6}$  Торр применена схема распределенных средств откачки. Схема расстановки насосов вдоль ионопровода показана на рисунке 2.80 [84].

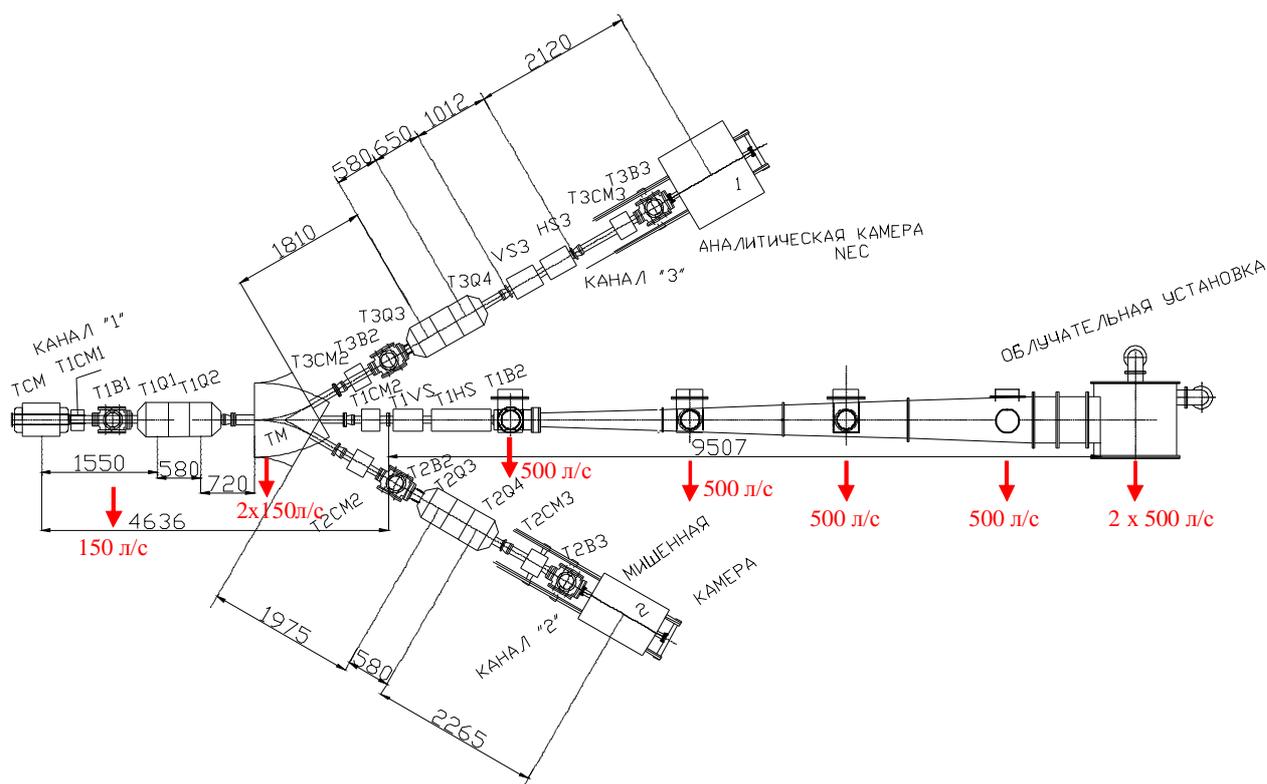


Рис. 2.80. Канал транспортировки выведенных пучков с установкой для облучения пленки (стрелками показано положение вакуумных насосов, указаны их номинальные скорости откачки)

Распределение давления в канале внешних пучков показано на рисунке 2.81, среднее давление составляет  $2,6 \cdot 10^{-6}$  Торр, в месте соединения канала с камерой циклотрона расчетное давление –  $2,2 \cdot 10^{-7}$  Торр, на насосы вакуумной камеры циклотрона приходится дополнительная нагрузка 50 л/с вследствие газового потока из ионопровода  $Q=1,2 \cdot 10^{-5}$  Торр·л/с.

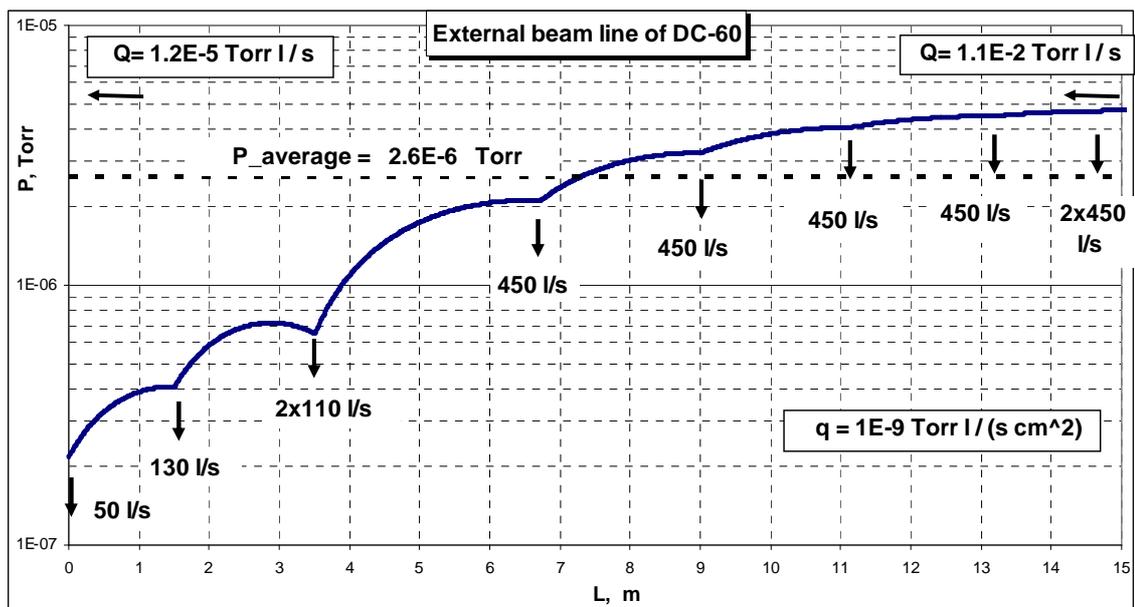


Рис. 2.81. Распределение давления в канале облучения полимерной пленки при эффективных скоростях откачки вакуумных насосов 130 л/с, 2×110 л/с, 4×450 л/с и 2×450 л/с, среднее давление в канале  $2,6 \cdot 10^{-6}$  Торр, газовый поток с мишени  $1,1 \cdot 10^{-2}$  Торр·л/с; на насос вакуумной камеры циклотрона приходится дополнительная нагрузка ~ 50 л/с вследствие газового потока из ионопровода  $Q = 1,2 \cdot 10^{-5}$  Торр·л/с.

## 2.7 Выходы нейтронов и гамма-квантов из конструкционных металлов при бомбардировке тяжелыми ионами с энергией до 2,5 МэВ/нуклон

### 2.7.1 Расчет выходов нейтронов и гамма-квантов

Для модельных расчетов использовались ионы в широком диапазоне масс: p, d,  $^{12}\text{C}$ ,  $^{20,22}\text{Ne}$ ,  $^{40}\text{Ar}$ ,  $^{84}\text{Kr}$  и  $^{132}\text{Xe}$ ; а также мишени:  $^9\text{Be}$ ,  $^{12}\text{C}$ ,  $^{27}\text{Al}$ ,  $^{56}\text{Fe}$ ,  $^{60}\text{Ni}$ ,  $^{63}\text{Cu}$ . Диапазон энергий ускоряемых ионов задан от 0,3 до 3,5 МэВ/нуклон [164].

Расчеты сечений образования ядер – остатков испарений для всех возможных комбинаций «налетающий ион – ядро мишени» были произведены с использованием программы «NRV Project» [165]. Для имеющихся экспериментальных данных, наблюдается довольно неплохая корреляция с модельными расчетами сечений (см. например, рис. 2.82, 2.83).

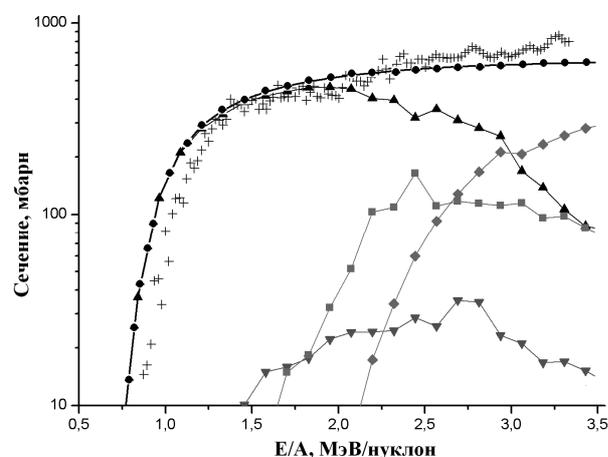


Рис. 2.82. Данные о реакции  $^{12}\text{C} + ^{12}\text{C}$ , полученные при помощи программы NRV Project. Условные обозначения: ● – полное сечение реакции; + – экспериментально полученные данные о сечении [166]; ■ – сечение 1α-канала; ▲ – сечение 1p-канала; ▼ – сечение 1n-канала; ◆ – сечение 1p1n-канала.

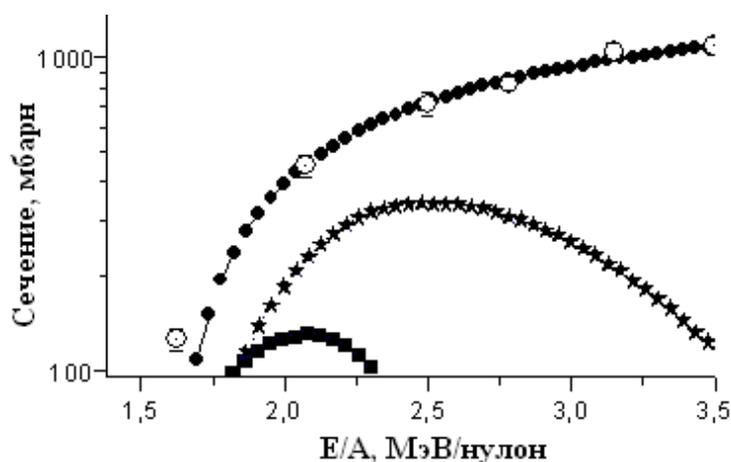


Рис. 2.83. Данные о реакции  $^{20}\text{Ne} + ^{27}\text{Al}$ , полученные при помощи программы NRV Project. Условные обозначения: ● – полное сечение реакции; ○ – экспериментально полученные данные о сечении [167]; ■ – сечение 1p1n-канала; \* – сечение 2p1n-канала.

Для определения выхода нейтронов и  $\gamma$ -квантов необходимо было, основываясь на данных о сечениях протекания различных испарительных каналов, вычислить образующееся в них же число ядер для выделенного интервала по энергии. Далее, зная число образовавшихся  $\gamma$ -радиоактивных ядер и их периоды полураспада, мы легко могли рассчитать поток  $\gamma$ -квантов через некоторое время после остановки облучения мишени. В свою очередь, для каналов с испарением нейтронов, зная общее число образующихся ядер и умножив его на число нейтронов, вылетающих из ядра при снятии возбуждения, можно было получить данные о потоках нейтронов.

Число образующихся в испарительном канале ядер вычисляли по формуле:

$$N = \frac{\sigma \cdot I \cdot N_A \cdot l}{A},$$

где  $\sigma$  – среднее сечение протекания реакции в выделенном энергетическом диапазоне;  $I$  – интенсивность пучка ионов;  $N_A$  – число Авогадро;  $l$  – толщина мишени;  $A$  – массовое число мишени.

Поскольку толщина мишени могла варьироваться в широком диапазоне, в качестве  $l$  выбирались пробеги ионов в выделенном диапазоне энергий пучка. Для вычисления пробегов ионов в материалах мишеней в заданном диапазоне энергий использовалась программа «SRIM-2011» [168]. В диапазоне энергий от 0,3 до 3,5 МэВ/нуклон для различных материалов, разброс в пробегах ионов занимал промежуток от 0,3 мкм для наиболее тяжелых до 9 мкм для наиболее легких ионов.

#### Выходы нейтронов.

Для реакций  $^{40}\text{Ar} + ^9\text{Be}$ ,  $^{40}\text{Ar} + ^{12}\text{C}$ ,  $^{40}\text{Ar} + ^{27}\text{Al}$ , расчетные выходы нейтронов сравниваются с экспериментальными данными. Видно хорошее согласие расчета с экспериментом, что позволяет сделать вывод о корректности выбора параметров, используемых в модельных расчетах. Экспериментальные результаты, полученные на циклонное ЦИТРЕК [169], описывают выход нейтронов при бомбардировании толстой мишени ионами Ar с энергией 2,4 МэВ/нуклон. Выходы нейтронов составляют:  $2,4 \cdot 10^{-5}$ ,  $5,7 \cdot 10^{-6}$ ,  $1,4 \cdot 10^{-6}$  нейтронов на ион соответственно для мишеней: Be, C, Al. После пересчета с учетом интенсивности пучка в 1 мкА/частиц ( $6,24 \cdot 10^{12}$  част./сек), получаем:  $15 \cdot 10^7$ ,  $3,55 \cdot 10^7$ ,  $0,87 \cdot 10^7$  нейтронов/сек, соответственно для мишеней: Be, C, Al. Из наших модельных расчетов получается  $19,1 \cdot 10^7$ ,  $7,67 \cdot 10^7$ ,  $3,96 \cdot 10^7$  нейтронов/сек, соответственно для мишеней: Be, C, Al. Необходимо отметить, что расчетные значения приведены для достаточно большого диапазона энергий (суммарно): 2–2,5 МэВ/нуклон, эксперимент проводился при фиксированной энергии 2,4 МэВ/нуклон. Если отбросить вклад каналов, протекающих при

других энергиях, расхождение между расчетом и экспериментом будет в пределах фактора 2–3.

Приблизительно такая же картина наблюдается и для реакций под действием налетающих ионов углерода. Экспериментальные результаты были получены в работе [170]. Для реакций:  $^{12}\text{C} + ^{27}\text{Al}$  и  $^{12}\text{C} + ^{60}\text{Ni}$ , при энергии 3,5 МэВ/нуклон, активности составили соответственно:  $26,8 \cdot 10^7$  и  $6,24 \cdot 10^7$  нейтронов/сек. Расчетные значения для реакций:  $^{12}\text{C} + ^{27}\text{Al}$  и  $^{12}\text{C} + ^{60}\text{Ni}$ , в диапазоне энергий 3 – 3,5 МэВ/нуклон, составили соответственно:  $9 \cdot 10^7$  и  $9,04 \cdot 10^7$  нейтронов/с. Таким образом, расчет совпадает с экспериментом лучше, чем фактор 3.

#### Выходы $\gamma$ -квантов.

Был оценен выход  $\gamma$ -квантов от радиоактивных нуклидов, образующихся в различных испарительных каналах реакций слияния. Общее число таких нуклидов можно было вычислить исходя из данных о сечениях протекания различных реакций. Оценка величины  $\gamma$ -фона была дана нами для времени, равном 1 часу с момента отключения пучка ускорителя.

Полученные данные расчетов для основных конструктивных материалов представлены в таблице 2.14 [164].

**ТАБЛИЦА 2.14**

Реакция  $^{12}\text{C} + ^9\text{Be} \rightarrow ^{21}\text{Ne}^*$

Энергия пучка ионов, МэВ/нуклон	Максимальное сечение, мбарн	Канал реакции	Поток $\gamma$ -квантов, $10^7$ ед./с	Поток нейтронов, $10^7$ ед./с
2 – 2,5	125	1p1n	–	10,32
	75	1a1n		
	40	1n		
	25	1p		
2,5 – 3	200	1p1n	–	26,23
	175	1a1n		
	45	1n		
	30	1p		
	20	1a		

Реакция  $^{12}\text{C} + ^{27}\text{Al} \rightarrow ^{39}\text{K}^*$

Энергия пучка ионов, МэВ/нуклон	Максимальное сечение, мбарн	Канал реакции	Поток $\gamma$ -квантов, $10^7$ ед./с	Поток нейтронов, $10^7$ ед./с
1 – 1,5	50	1a1n	–	1,86
	60	1p1n		
	90	1a		
1,5 - 2	225	1a1n	–	9,22
	160	1p1n		
	140	1a		
	45	1a1p		
2 – 2,5	30	2p	–	8,84
	325	1a1n		
	100	1p1n		
	70	1a		
	70	1a1p		
	40	2p1n		
2,5 – 3	35	2p	–	10,96
	10	2a		
	400	1a1n		
	50	1a1p1n		
	60	1p1n		
	30	1a		
	60	1a1p		
60	2p1n			
15	2p			
	25	2a		

Реакция  $^{12}\text{C} + ^{63}\text{Cu} \rightarrow ^{75}\text{Br}^*$

Энергия пучка ионов, МэВ/нуклон	Максимальное сечение, мбарн	Канал реакции	Поток $\gamma$ -квантов, $10^7$ ед./с	Поток нейтронов, $10^7$ ед./с
2 – 2,5	125	1p1n	2,77	1,54
	30	2p		
2,5 – 3	450	1p1n	10,90	6,06
	60	2p		
	20	2n		
	15	1a1p		

Реакция  $^{20}\text{Ne} + ^9\text{Be} \rightarrow ^{29}\text{Si}^*$

Энергия пучка ионов, МэВ/нуклон	Максимальное сечение, мбарн	Канал реакции	Поток $\gamma$ -квантов, $10^7$ ед./с	Поток нейтронов, $10^7$ ед./с
0,3 – 1	60	1p1n	–	0,99
1 – 1,5	10	2n	–	8,15
	15	1p		
	20	1n		
	25	1a1n		
	440	1p1n		
1,5 - 2	10	1n	–	12,05
	15	2n		
	15	1p		
	15	1a1p		
	50	1p2n		
	65	1a1n		
	585	1p1n		
2 – 2,5	10	2n	–	22,72
	40	1a1p		
	160	1a1n		
	190	1p2n		
	450	1p1n		
2,5 – 3	15	1a	–	27,95
	15	1a1p1n		
	20	2p1n		
	75	1a1p		
	225	1a1n		
	260	1p1n		
	305	1p2n		

Реакция  $^{20}\text{Ne} + ^{27}\text{Al} \rightarrow ^{47}\text{V}^*$

Энергия пучка ионов, МэВ/нуклон	Максимальное сечение, мбарн	Канал реакции	Поток $\gamma$ -квантов, $10^7$ ед./с	Поток нейтронов, $10^7$ ед./с
1,5 - 2	50	2p	5,72	2,66
	125	1p1n		
	185	2p1n		
2 – 2,5	10	1a1p	2,03	1,2
	20	1a1p1n		
	25	2p		
	35	1p2n		
	55	1p1n		
2,5 – 3	15	3p	8,84	3,31
	15	1p1n		
	25	2p2n		
	30	1a1p1n		
	35	3p1n		
	40	1p2n		
	255	2p1n		

Реакция  $^{20}\text{Ne} + ^{63}\text{Cu} \rightarrow ^{83}\text{Y}^*$

Энергия пучка ионов, МэВ/нуклон	Максимальное сечение, мбарн	Канал реакции	Поток $\gamma$ -квантов, $10^7$ ед./с	Поток нейтронов, $10^7$ ед./с
2 – 2,5	20	1p1n	0,03	0,26
	30	2p1n		
2,5 – 3	15	2n	1,68	1,22

	15	1a1n		
	20	1a1p		
	20	3p		
	30	1a1p1n		
	35	1p1n		
	40	3n		
	50	1p2n		
	210	2p1n		

Реакция  $^{40}\text{Ar} + ^9\text{Be} \rightarrow ^{49}\text{Ti}^*$

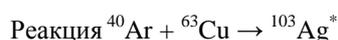
Энергия пучка ионов, МэВ/нуклон	Максимальное сечение, мбарн	Канал реакции	Поток $\gamma$ -квантов, $10^7$ ед./с	Поток нейтронов, $10^7$ ед./с
1 – 1,5	10	1p2n	0,43	2,42
	25	3n		
	40	1p1n		
	75	2n		
1,5 – 2	10	1a1n	2,15	11,01
	105	1p1n		
	130	1p2n		
	150	3n		
2 – 2,5	190	2n	3,98	19,10
	20	1a1n		
	95	1p1n		
	175	2n		
2,5 – 3	285	3n	5,66	26,09
	305	1p2n		
	15	2p1n		
	20	1a2n		
	20	1a1n		
2,5 – 3	65	1p1n	5,66	26,09
	130	2n		
	380	3n		
	440	1p2n		

Реакция  $^{40}\text{Ar} + ^{27}\text{Al} \rightarrow ^{67}\text{Ga}^*$

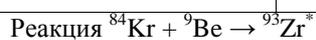
Энергия пучка ионов, МэВ/нуклон	Максимальное сечение, мбарн	Канал реакции	Поток $\gamma$ -квантов, $10^7$ ед./с	Поток нейтронов, $10^7$ ед./с
1,5 – 2	30	1p2n	–	0,23
2 – 2,5	130	1p2n	0,40	3,96
	160	2p2n		
	50	2p1n		
	75	1p3n		
	55	1a2n		
2,5 – 3	10	3n	0,60	6,67
	100	1p2n		
	225	2p2n		
	40	2p1n		
	110	1p3n		
	75	1a2n		
	10	3n		
	10	1a1p1n		
	15	1a1p2n		
35	1a3n			
80	2p3n			

Реакция  $^{40}\text{Ar} + ^{56}\text{Fe} \rightarrow ^{96}\text{Ru}^*$

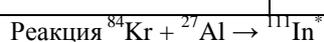
Энергия пучка ионов, МэВ/нуклон	Максимальное сечение, мбарн	Канал реакции	Поток $\gamma$ -квантов, $10^7$ ед./с	Поток нейтронов, $10^7$ ед./с
2,5 – 3	180	2p2n	0,36	1,87
	95	2p1n		
	75	1p2n		
	35	1a1p1n		
	25	3p1n		
	25	1p3n		



Энергия пучка ионов, МэВ/нуклон	Максимальное сечение, мбарн	Канал реакции	Поток $\gamma$ -квантов, $10^7$ ед./с	Поток нейтронов, $10^7$ ед./с
2,5 – 3	130	2p2n	0,91	1,31
	70	2p1n		
	55	1p2n		
	40	1p3n		
	20	3p1n		
	15	1a1p1n		
	15	1a1p2n		

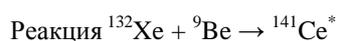


Энергия пучка ионов, МэВ/нуклон	Максимальное сечение, мбарн	Канал реакции	Поток $\gamma$ -квантов, $10^7$ ед./с	Поток нейтронов, $10^7$ ед./с
2 – 2,5	200	3n	0,17	2,91
	40	1p2n		
2,5 – 3	420	3n	0,85	10,36
	100	1p2n		
	30	4n		

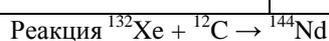


Энергия пучка ионов, МэВ/нуклон	Максимальное сечение, мбарн	Канал реакции	Поток $\gamma$ -квантов, $10^7$ ед./с	Поток нейтронов, $10^7$ ед./с
2,5 – 3	50	1p3n	0,18	1,09
	30	1p2n		
	15	4n		

Для диапазона энергий до 3МэВ/нукл., реакции:  $^{84}\text{Kr} + ^{63}\text{Cu}$ ,  $^{84}\text{Kr} + ^{56}\text{Fe}$  и  $^{84}\text{Kr} + ^{60}\text{Ni}$ , протекают ниже барьера слияния.



Энергия пучка ионов, МэВ/нуклон	Максимальное сечение, мбарн	Канал реакции	Поток $\gamma$ -квантов, $10^7$ ед./с	Поток нейтронов, $10^7$ ед./с
3 – 3,5	250	3n	0,19	3,90
	50	4n		



Энергия пучка ионов, МэВ/нуклон	Максимальное сечение, мбарн	Канал реакции	Поток $\gamma$ -квантов, $10^7$ ед./с	Поток нейтронов, $10^7$ ед./с
3 – 3,5	20	3n	0,03	0,11

Для заданного диапазона энергий реакции:  $^{132}\text{Xe} + ^{27}\text{Al}$ ,  $^{132}\text{Xe} + ^{56}\text{Fe}$ ,  $^{132}\text{Xe} + ^{60}\text{Ni}$ ,  $^{132}\text{Xe} + ^{63}\text{Cu}$  протекают ниже барьера слияния.

## 2.7.2 Экспериментальные исследования выходов нейтронов из конструкционных металлов при бомбардировке тяжелыми ионами с энергией 2,5 МэВ/нуклон

На циклотроне ДЦ-110 [45], получены интенсивные пучки (10–15 мкА) ускоренных ионов Ar, Kr и Xe с фиксированной энергией 2,5 МэВ/нуклон. Для изучения радиационной обстановки и получения более точных данных для расчета биологической защиты подобных ускорителей были выполнены измерения:

- выходов нейтронов при взаимодействии ионов с различными материалами;
- угловые распределения нейтронов относительно оси пучка.

На пучках ионов Ar, Kr и Xe с энергией 2,5 МэВ/нуклон были проведены измерения с мишенями из Be, C, Al и Cu. На пучке аргона был дополнительно исследован выход нейтронов из мишени из нержавеющей стали 12X18N10T, поскольку это наиболее распространенный конструктивный материал на ускорителях. Измерения потока нейтронов проводились под углами  $30^0$ ,  $45^0$ ,  $60^0$ ,  $90^0$ ,  $135^0$  и  $150^0$  к оси пучка [171].

### Результаты измерений

Полный выход нейтронов рассчитывался путем интегрирования угловых распределений, измеренных в доступной области углов. Как показано в работах [172, 173], угловое распределение нейтронов при бомбардировке тяжелыми ионами удовлетворительно описывается полуэмпирической формулой:

$$f(\Theta) = (4\pi \ln(1+1/\gamma) (\gamma+\sin^2\Theta/2))^{-1}, \quad (1)$$

где  $\Theta$  есть угол к оси пучка, а  $\gamma$  – параметр, который нужно определять экспериментально для каждого конкретного иона, его энергии и вещества мишени. Для описания измеренных угловых распределений с помощью формулы (1) параметр  $\gamma$  подбирался по результатам измерений под углами  $30^\circ$ ,  $45^\circ$ ,  $60^\circ$  и  $90^\circ$ . При облучении мишеней из Al и Cu описание распределений формулой (1) удовлетворительно в области всех углов. В случае же мишеней из Be и C результаты измерений удовлетворительно описываются формулой (1) в области передних углов, но в области задних углов в экспериментах наблюдается изотропное распределение, не соответствующее расчетам по формуле (1).

В таблице 2.15 приведены параметры  $\gamma$ , подобранные из эксперимента для описания угловых распределений в передние углы для всех сочетаний ионов и мишеней. С уменьшением параметра  $\gamma$  угловое распределение становится более узконаправленным. Для сравнения в скобках приведены рассчитанные по формуле (1) при данном параметре  $\gamma$  отношения потока нейтронов под  $0^\circ$  к потоку под  $90^\circ$ .

Таблица 2.15. Коэффициент  $\gamma$  в формуле углового распределения:

$$F(\Theta) = 1/(4\pi \ln(1+1/\gamma) (\gamma+\sin^2 \Theta/2)), (F(0^\circ)/ F(90^\circ))$$

Мишень/Ион пучка	$^{40}\text{Ar}^{+6}$	$^{86}\text{Kr}^{+13}$	$^{132}\text{Xe}^{+20}$
Be	0,11(5,5)	0,1(6,0)	0,3( 2,7)
C	0,14( 4,6)	0,25(3,0)	0,25( 3,0)
Al	0,3 (2,7)	0, 4 (2,2)	0,3 ( 2,7)
Cu	0,9 (1,5)	-	-

В таблице 2.16 приведены результаты измерений выходов нейтронов, полученные путем интегрирования угловых распределений. Кроме того установлено, что выход нейтронов из полимерной пленки практически таков же, как из чистого графита.

Таблица 2.16. Выходы нейтронов (нейтрон/ион) из толстой мишени.

Мишень/Ион пучка	$^{40}\text{Ar}^{+6}$	$^{86}\text{Kr}^{+13}$	$^{132}\text{Xe}^{+20}$
Be	$(9,3 \pm 3) 10^{-5}$	$(3,5 \pm 1,2) 10^{-6}$	$(2,2 \pm 0,7) 10^{-6}$
C	$(2,6 \pm 0,9) 10^{-5}$	$(1,4 \pm 0,5) 10^{-8}$	$(3,3 \pm 1,1) 10^{-8}$
Al	$(7,5 \pm 2,5) 10^{-6}$	$(7,7 \pm 0,3) 10^{-9}$	$( 2,5 \pm 0,8) 10^{-8}$
Cu	$(1,2 \pm 0,4) 10^{-6}$	$< 5 10^{-10}$	$< 5 10^{-10}$
Нерж. сталь 12X18H10T	$(2,6 \pm 0,9) 10^{-6}$	-	-

Ошибка при измерении выходов нейтронов обусловлена главным образом тем обстоятельством, что функция чувствительности используемого детектора зависит от энергии нейтронов. Общая ошибка измерения оценивается как  $\pm 30\%$ .

### Обсуждение результатов по измерению выходов нейтронов

Для возможности экстраполяции на другие энергии или другие ионы были проведены расчеты выходов нейтронов с использованием программы LISE<sup>++</sup> [24]. Это довольно

универсальная программа, в которой, в частности, имеется опция для расчета сечения образования нейтронов и других легких частиц в реакциях с ускоренными ионами.

На рисунках 2.84-2.86 приведены результаты сравнения выходов нейтронов, взятых из работы [170], с полученными расчетным путем по программе LISE<sup>++</sup>. Из данных работы [170] выходы получены за счет умножения значений, измеренных под углами 0<sup>0</sup> и 90<sup>0</sup>, на соответствующие коэффициенты, учитывающие угловое распределение, согласно формуле (1). Результаты расчета на рисунках приведены в виде линий и обозначены знаком, например, Y(Al), где в скобках отмечен материал мишени. Экспериментальные значения представлены точками с обозначением материала мишени. В левом верхнем углу рисунка указано название иона.

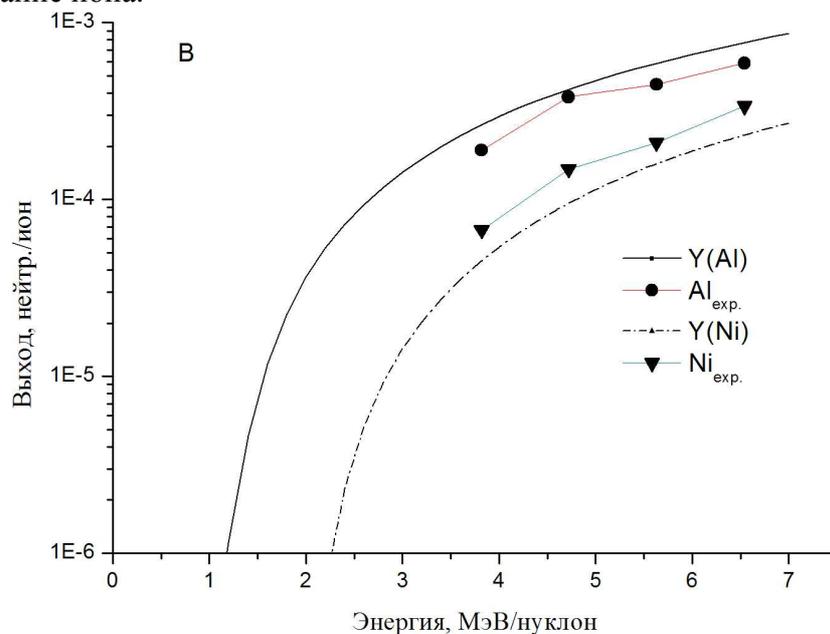


Рис. 2.84. Выходы нейтронов при бомбардировке мишеней Al и Ni ионами бора в зависимости от энергии. Y(Al) и Y(Ni) – выходы нейтронов при бомбардировке мишеней из алюминия и никеля, рассчитанные по программе LISE<sup>++</sup>, точки – экспериментальные значения из работы [170].

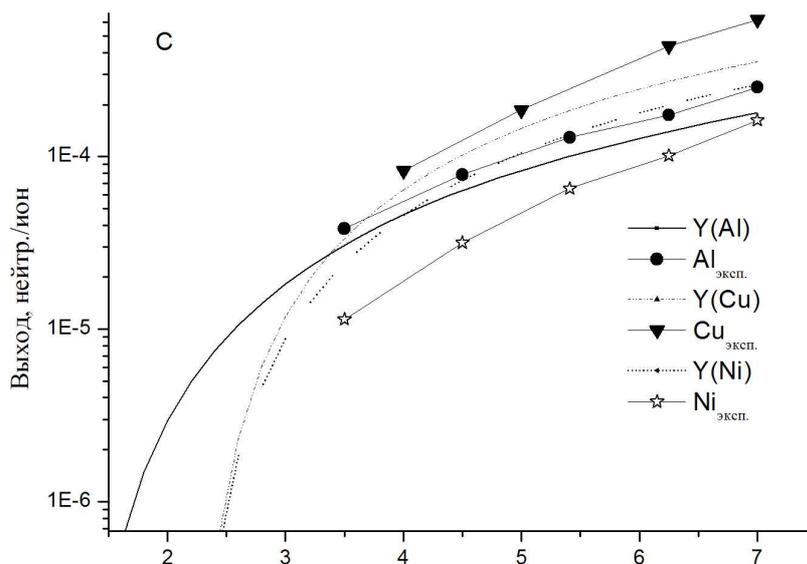


Рис. 2.85. Выходы нейтронов при бомбардировке ионами углерода в зависимости от энергии. Y(Al), Y(Cu) и Y(Ni) – выходы нейтронов при бомбардировке мишеней из алюминия, меди и никеля, рассчитанные по программе LISE<sup>++</sup>, точки – экспериментальные значения из работы [170].

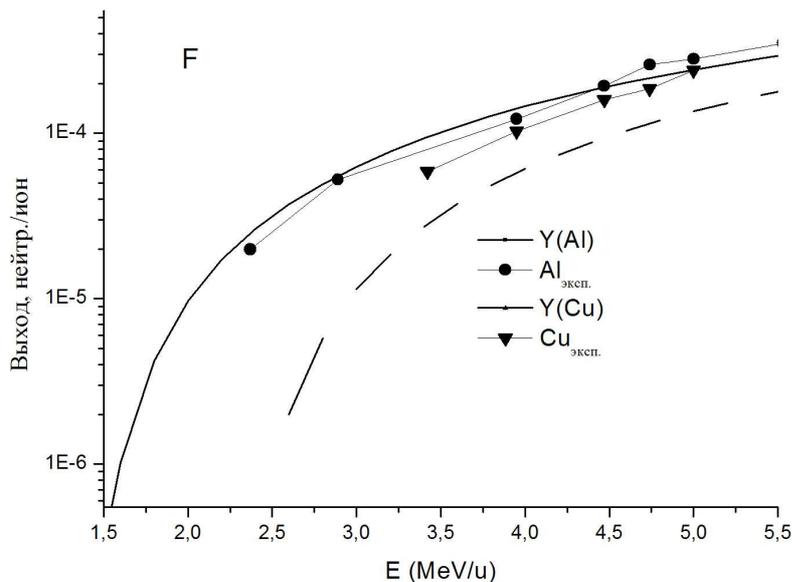


Рис. 2.86. Выходы нейтронов при бомбардировке ионами фтора в зависимости от энергии.  $Y(Al)$  и  $Y(Cu)$  – выходы нейтронов при бомбардировке мишеней из алюминия и меди, рассчитанные по программе  $LISE^{++}$ , точки – экспериментальные значения из работы [170].

Результаты этих сравнений можно рассматривать в качестве теста, демонстрирующего, насколько пригоден для сравнений или экстраполяции экспериментальных данных принятый метод расчета. На основании результатов сравнения можно сделать заключение, что совпадение результатов расчета и эксперимента находится в пределах коэффициента два. На рис. 2.87 приведены выходы нейтронов при облучении ионами аргона, полученные на ускорителе ДЦ-110, в сравнении с результатами расчетов по программе  $LISE^{++}$ .

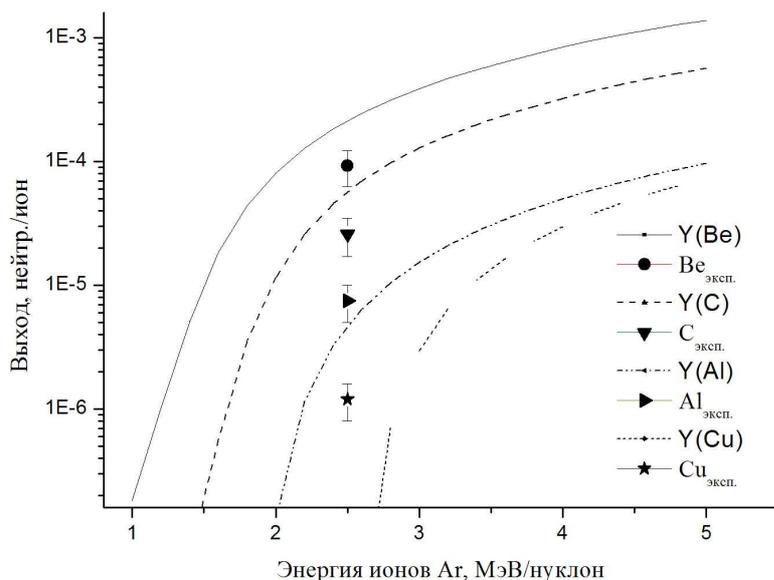


Рис. 2.87. Выходы нейтронов при бомбардировке ионами аргона в зависимости от энергии.  $Y(Be)$ ,  $Y(C)$ ,  $Y(Al)$  и  $Y(Cu)$  – выходы нейтронов при бомбардировке мишеней из бериллия, углерода, алюминия и меди, рассчитанные по программе  $LISE^{++}$ , точки – экспериментальные значения, полученные на ускорителе ДЦ-110.

На основании проведенного сравнения можно сделать вывод, что при энергии ионов выше порога реакции результаты расчета по программе LISE<sup>++</sup> дают завышенный результат в 2 раза по сравнению с экспериментом. В области самого порога результаты могут отличаться существенно, как, например, в реакции аргона с медью.

## **Выводы**

Проведенные расчеты и сравнение с измеренными выходами нейтронов при облучении ионами аргона, криптона и ксенона с энергией 2,4 и 2,5 МэВ/нуклон конструкционных металлов и полимерной пленки дают исходные данные для оптимизации биологической защиты.

Для экстраполяции полученных данных на другие ионы, их энергию и на другие мишени использована программа LISE<sup>++</sup>. Программа была протестирована на экспериментальных данных, найденных в литературе. В результате сравнения установлено, что результаты расчета совпадают с экспериментальными данными в пределах коэффициента 2.

Для снижения уровня нейтронных полей в зале циклотрона целесообразно использовать более тяжелые материалы для изготовления узлов, которые могут подвергаться облучению ионами. В частности, цилиндры Фарадея и коллиматоры должны быть изготовлены из меди. Недопустимо использовать сплавы, содержащие бериллий.

## ГЛАВА 3. МОДЕРНИЗИРОВАННЫЙ ЦИКЛИЧЕСКИЙ ИМПЛАНТАТОР ТЯЖЕЛЫХ ИОНОВ ИЦ-100

### 3.1 Описание и основные параметры циклического имплантатора ИЦ-100

Циклический имплантатор тяжелых ионов ИЦ-100 [24, 38] был разработан в 1985 г. для ускорения ионов от углерода до аргона с фиксированной энергией около 1,2 МэВ/нуклон при ускорении на 4-й гармонике высокочастотной системы и 0,6 МэВ/нуклон при ускорении на 6-й гармонике. На ускорителе использовался внутренний источник ионов типа PIG, который полностью определял массовый диапазон ускоряемых ионов.

Эксперименты в области физики твердого тела и прикладные задачи требовали использовать более тяжелые ионы с массой до ксенона. В процессе проведенной модернизации имплантатора создана система аксиальной инжекции пучка в циклотрон, установлен сверхпроводящий ЭЦР источник (рис. 3.1) [28, 74-77, 126, 127]. Фотография ИЦ-100 после модернизации приведена на рисунке 3.3.

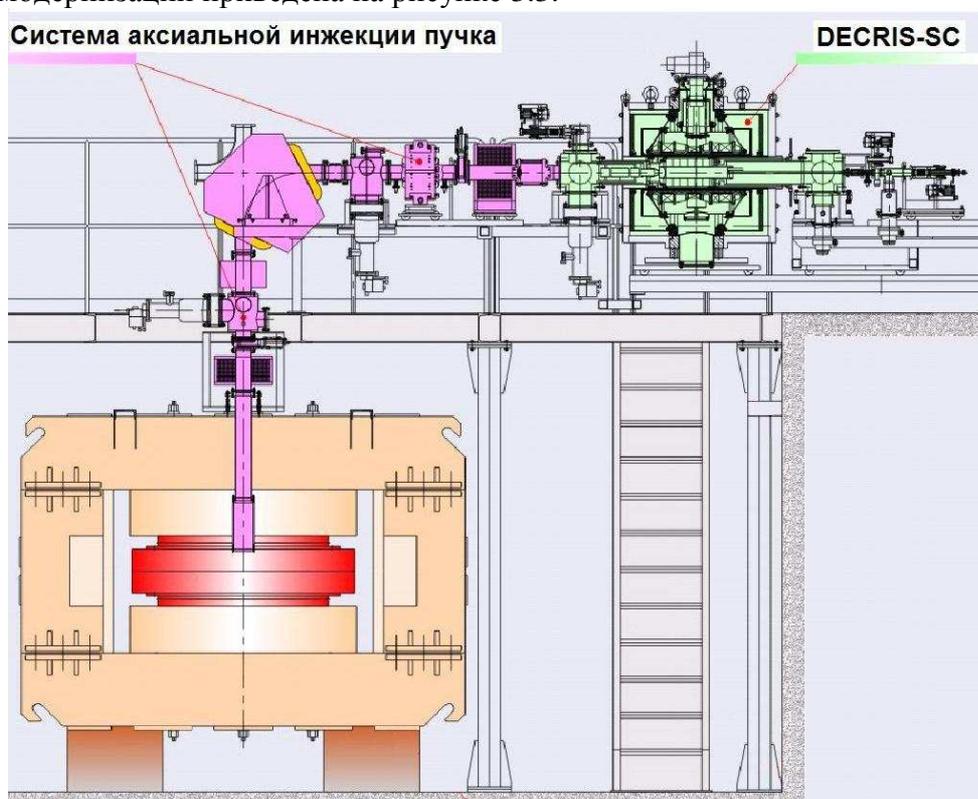


Рис. 3.1. Общий вид циклотрона ИЦ-100 и системы аксиальной инжекции.

Магнитная система ИЦ-100 [125] в ходе модернизации существенно не изменилась. Неизменным остался уровень магнитного поля. На ускорителе проведено дополнительное формирование магнитного поля в центре для достижения хорошей динамики движения пучка в этой области и обеспечения необходимых зазоров для конструктивных элементов и инфлектора.

Высокочастотная система имплантатора [28, 77, 127] состоит из двух четвертьволновых резонаторов, не связанных между собой, которые питаются от двух генераторов. Закорачивающая пластина резонаторов имеет возможность перемещения на 100 мм, что позволяет изменять частоту в небольших пределах. На резонаторах установлено по одному триммеру системы автоматической подстройки частоты, которые обеспечивают устойчивую работу всей системы.

Для вывода пучка на ИЦ-100 используется электростатический дефлектор.

Канал транспортировки выведенного пучка (рис. 3.2) имеет два места для облучения мишеней – в первом диагностическом блоке для стационарных мишеней и на конце канала, где размещается установка для обработки подвижной пленки. Во время перемотки пленки возникает большой газовый поток, в канале предусмотрена система распределенных средств откачки, что дает возможность почти полностью исключить газовый поток в камеру ускорителя.

Система сканирования пучка по мишени [174] позволяет получать однородную плотность пучка на поверхности мишени размером 300 x 600 мм.

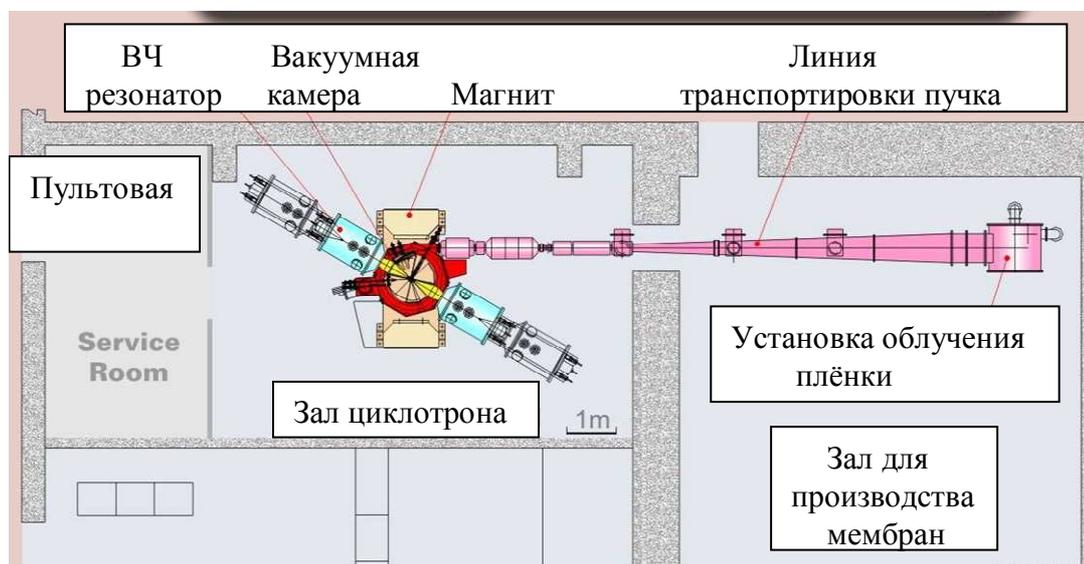


Рис. 3.2. Циклический имплантатор ИЦ-100. Показаны циклотрон, резонансные баки и канал облучения пленок для производства ядерных фильтров.

Таблица 3.1. Общие параметры ИЦ-100

1	Диапазон ускоряемых ионов (A/Z)	5,3÷6,0
2	Гармоника ускорения	4
3	Энергия ионов	1-1.25 МэВ/нуклон
4	Разброс по энергии пучка	2,8%
5	Радиальный эмиттанс пучка	50π мм·мрад
6	Вертикальный эмиттанс пучка	25π мм·мрад
7	Тип источника ионов	Сверхпроводящий ЭЦР источник
8	Система инжекции пучка	Аксиальная
9	Вывод пучка	Электростатический дефлектор
10	Количество каналов транспортировки выведенного пучка	1 (с возможностью монтажа второго канала)
11	Среднее магнитное поле	1,92 Тл (возможная вариация 18,3-20,1 Тл)
12	Частота ВЧ	20,4-20,9 МГц
13	Эффективность трансмиссии пучка по каналу аксиальной инжекции (после сепарации)	0,8
14	Эффективность захвата пучка в процесс ускорения	20% (с банчером)
15	Эффективность ускорения	0,85
16	Эффективность вывода	0,6
17	Полная эффективность трансмиссии	8%
18	Интенсивность ускоренного и выведенного пучка $^{84}\text{Kr}^{15+}$	Не менее $10^{12}$ частиц/с (2,5 мкА)

Таблица 3.2. Магнитная структура ИЦ-100

1	Среднее магнитное поле	1,92 Тл
2	Базовый электромагнит	СП57А
3	Вес магнита	43 т
4	Диаметр полюса	1,05 м
5	Количество секторов	4
6	Угловая протяженность сектора	56°
7	Минимальный зазор между секторами	20 мм
8	Зазор в долине	110 мм
9	Проводник основной обмотки	Сu
10	Количество витков основной обмотки	252
11	Количество секций	14 (7 - верхняя катушка, 7 - нижняя катушка)
12	Количество витков в секции	18
13	Число ампер-витков основной обмотки	170000
14	Ток в обмотке	675 А
15	Напряжение на обмотке	193 В
16	Напряжение на секции	13,8 В
17	Потребляемая мощность	130 кВт
18	Стабильность питающего тока	10 <sup>-4</sup>
19	Количество охлаждающей воды	50 л/мин (3 м <sup>3</sup> /час)

Таблица 3.3. Ускоряющая резонансная система ИЦ-100

1	Рабочая частота	20,4÷20,9 МГц
2	Количество дуантов	2
3	Напряжение на дуанте	50 кВ
4	Угловая протяженность дуанта	34°
5	Апертура дуанта для пучка	20 мм
6	Внешний диаметр резонансного бака	800 мм
7	Диаметр штока	100 мм
8	Длина резонансного бака	1010 мм
9	Режим генерации	Непрерывный (CW)
10	Мощность, выделяемая в резонансной системе с дуантом	5 кВт
11	Ток ВЧ через закорачивающую пластину	650 А
12	Плотность тока через внутренние контакты	21 А/см <sup>2</sup>
13	Плотность тока через внешние контакты	2,6 А/см <sup>2</sup>
14	Мощность, выделяемая в штоке с дуантом	4,2 кВт
15	Количество охлаждающей воды в штоке и дуанте	6 л/мин
16	Мощность, выделяемая во внешнем баке	0,35 кВт
17	Количество охлаждающей воды в баке	0,5 л/мин
18	Мощность, выделяемая в закоротке	0,45 кВт
19	Количество охлаждающей воды в закоротку	0,5 л/мин
20	Ход закорачивающей пластины	± 50 мм
21	Контакт закоротки со штоком Контакт закоротки с баком	Медной фольгой 0,5 мм длиной 60 мм
23	Привод закоротки	Ручной, через сильфоны
24	Возбуждение	Фазное на каждый бак
25	Волновое сопротивление фидера	50 Ом

26	Площадь возбуждающей петли	180 см <sup>2</sup>
27	Оперативная подстройка петли	Нет
28	Напряжение на изоляторе	1,5 кВ
29	Ток через петлю	10 А
30	Изолятор	Керамика (трубчатый)
31	Диаметр изолятора	~10 см
32	Охлаждения петли	0,3 л/мин
33	Триммер тонкой подстройки	емкостной
34	Установка триммера	На фланце бака
35	Угол поворота петли	> 45°
36	Площадь триммера	300 см <sup>2</sup>
39	Ввод движения	Через сильфон
40	Двигатель	РД 09 (СД-54)
41	Мощность, выделяемая в триммере	0,25 кВт
42	Количество охлаждающей воды в триммере	1 л/мин
43	Фидера из генератора	Равной длины

Таблица 3.4. Вакуумная камера

1	Площадь внутренней поверхности вакуумной камеры и резонаторов	15 м <sup>2</sup>
2	Натекание	5·10 <sup>-4</sup> Торр·л/с
3	Рабочий вакуум	5·10 <sup>-7</sup> Торр
4	Откачка вакуумной камеры	2 криогенных насоса по 3200 л/с
5	Откачка резонаторов	2 ТМН (450 л/с), (по одному на резонатор)

Таблица 3.5. Система вывода

1	Активный элемент	Дефлектор
2	Вертикальный размер пучка на входе в дефлектор	10 мм
3	Разделение орбит на конечном радиусе	6,7 мм
4	Радиальная расходимость пучка на входе в дефлектор	< 30 мрад
5	Радиус установки дефлектора	450 мм
6	Угловая протяженность	28°
7	Напряжение на дефлекторе	58 кВ
8	Радиальный зазор	10 мм
10	Высота потенциальной пластины	35 мм
11	Пассивные фокусирующие элементы	2 магнитных канала
12	Градиент магнитного поля в первом магнитном канале	12 Тл/м
13	Градиент магнитного поля во втором магнитном канале	35 Тл/м

В результате проведенной модернизации имплантационного комплекса ИЦ-100 были получены интенсивные пучки высокозарядных ионов ксенона, йода, криптона, аргона и других тяжелых элементов Периодической системы Д.И.Менделеева [28, 77, 95, 174] (табл. 3.6). Сравнение проектных и полученных параметров пучка и основных параметров систем циклотрона приведено в таблице 3.6.

Табл. 3.6. Сравнение проектных и полученных параметров ИЦ-100.

№	Параметр	Проектные значения	Получено в эксплуатации
1	Ускоряемые ионы	Ar, Kr, Xe	$^{22}\text{Ne}^{+4}$ , $^{40}\text{Ar}^{+7}$ , $^{56}\text{Fe}^{+10}$ , $^{86}\text{Kr}^{+15}$ , $^{127}\text{I}^{+22}$ $^{132}\text{Xe}^{+23}$ , $^{132}\text{Xe}^{+24}$ , $^{182}\text{W}^{+32}$ , $^{184}\text{W}^{+31}$ , $^{184}\text{W}^{+32}$
2	Диапазон ускоряемых ионов	$A/Z = 5,3 - 6,0$	$A/Z = 5,5 - 5,95$
3	Гармоника ускорения	4	4
4	Энергия ионов	1-1,25 МэВ/нукл	0,9 -1,1 МэВ/нукл
5	Среднее магнитное поле	1,88÷2,01 Тл	1,7841,93 Тл
6	Частота ВЧ	20,4÷20,9 МГц	19,8÷20,6 МГц
7	Энергия инжекции	12,5 кВ	14-15 кВ
8	Вакуум в линии инжекции	$5 \cdot 10^{-7}$ Торр	$1,5 \cdot 10^{-7}$ Торр
9	Рабочий вакуум в циклотроне	$5 \cdot 10^{-7}$ Торр	$5 \cdot 10^{-8}$ Торр
10	Напряжение на дуанте	50 кВ	45 - 55 кВ
11	Эффективность транспортировки пучка по каналу инжекции после сепарации	0,8	0,5 - 0,8
15	Эмиттанс пучка из ЭЦР источника после сепарации и коллимации в анализирующем магните	250π мм·мрад (4 RMS)	~ 250π мм·мрад (оценка) (4 RMS)
16	Акцептанс канала инжекции	225π мм·мрад	~ 220π мм·мрад (оценка)
17	Интенсивность ускоренного и выведенного пучка $^{86}\text{Kr}^{15+}$	$\sim 10^{12}$ част./с (2,5 мкА)	$1,4 \cdot 10^{12}$ частиц/с (3,5 мкА)
18	Интенсивность ускоренного и выведенного пучка $^{132}\text{Xe}^{23+}$	$2,6 \cdot 10^{11}$ част./с (1 мкА)	$\sim 10^{12}$ частиц/сек (3,7 мкА)
19	Однородность плотности пор трековых мембран	$\pm 10\%$	$\pm 10\%$
20	Долговременная стабильность тока выведенного пучка	$\pm 10\%$	$\pm 10\%$



Рис. 3.3. Фото циклотрона ИЦ-100. Вверху – линия инжекции, сверхпроводящий ЭЦР источник. Внизу – магнит циклотрона, резонансный бак №1.

Система контроля и управления комплекса ИЦ-100 была разработана и изготовлена в Лаборатории ядерных реакций и позволяет полностью автоматизировать процесс управления циклотроном, а также обеспечить оператору всю необходимую информацию (рис. 3.4). [176]. Управление циклотроном осуществляется в локальной сети лаборатории. Программное обеспечение построено на платформе операционной системы QNX с использованием SCADA FLEX CONTROL. В Лаборатории также разработаны линейка унифицированных контроллеров серии “Smartbox” и все необходимые специализированные блоки. Использование универсальных контроллеров позволило создать гибкую и простую систему с высокими операционными характеристиками. Управление циклотронным комплексом осуществляется с помощью 14 универсальных контроллеров Smartbox 4 по последовательным каналам связи. В качестве примера на рисунке 3.5 приведено окно управления ЭЦР источником на экране монитора.

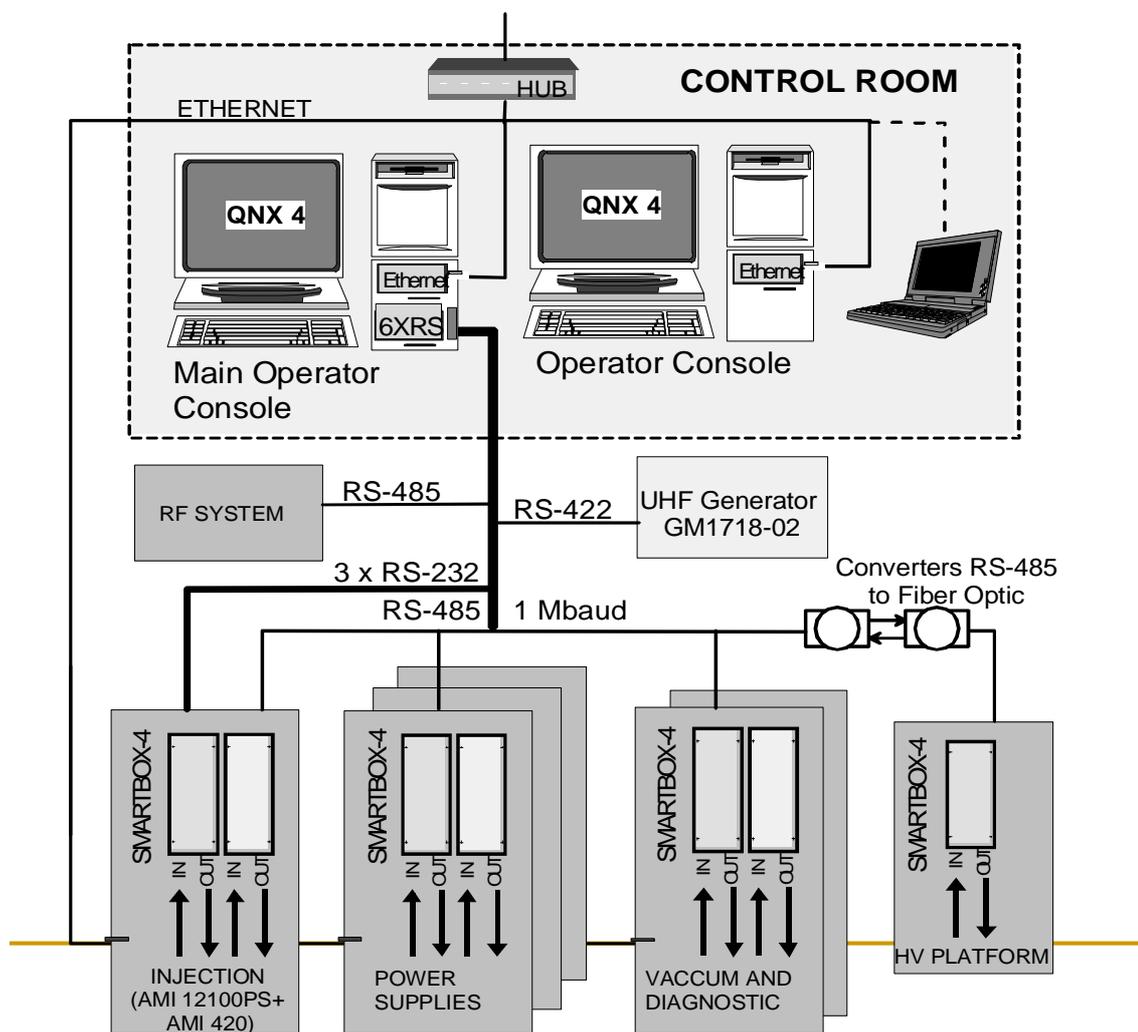


Рис. 3.4. Структурная схема системы контроля и управления ускорительным комплексом ИЦ-100.

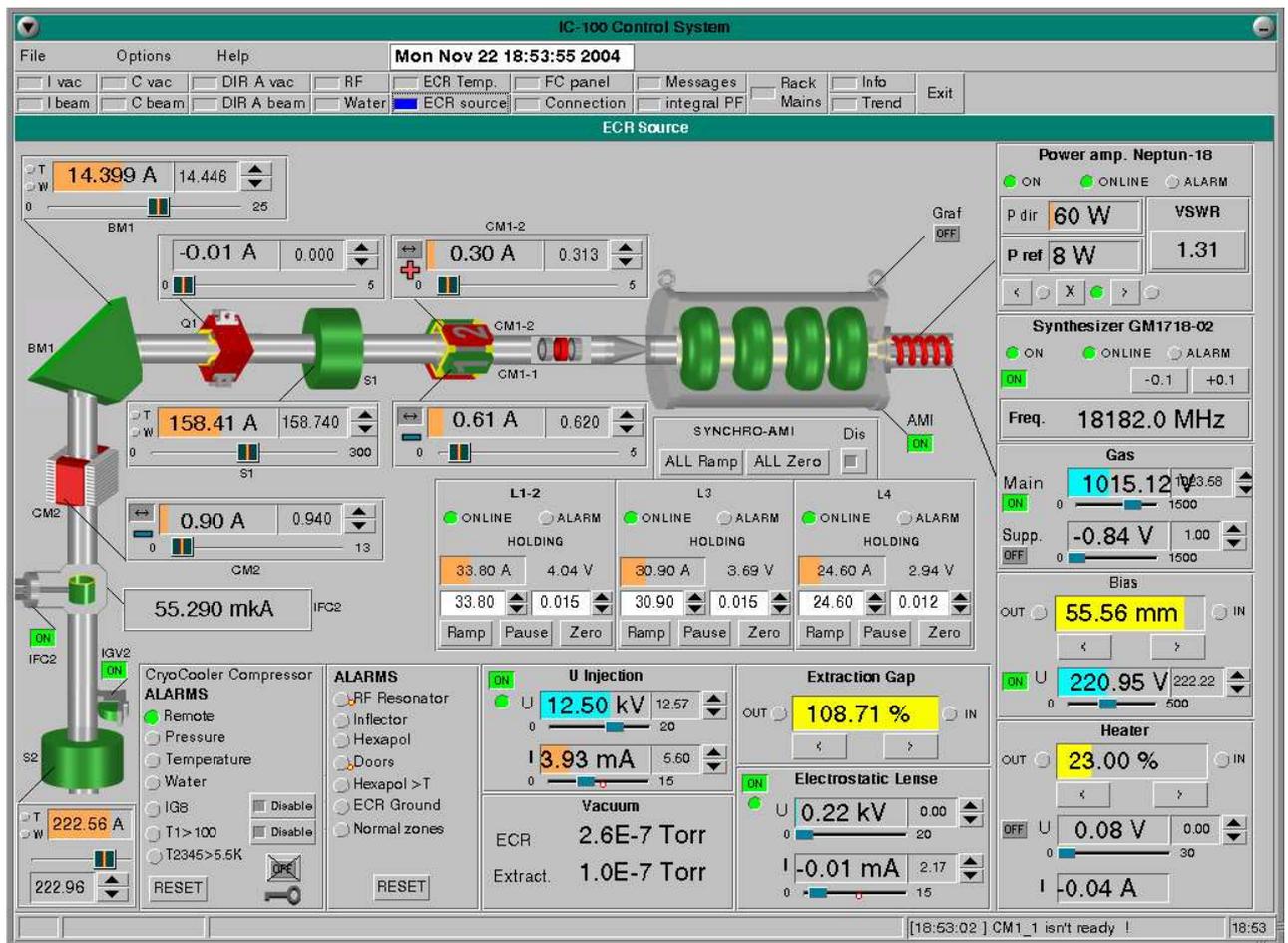


Рис. 3.5. Панель управления ЭЦР источником на мониторе компьютера.

### 3.2 Система аксиальной инжекции пучка из ЭЦР источника ионов.

#### Сверхпроводящий источник ионов DECRIS-SC

Циклотрон ИЦ-100 проектировался для ускорения многозарядных ионов в диапазоне  $A/Z = 5,3 - 6,0$ , что накладывает жесткие критерии на получение интенсивных пучков высокозарядных ионов тяжелых элементов. Для этого в ЛЯР ОИЯИ совместно с сотрудниками Лаборатории высоких энергий был разработан сверхпроводящий ЭЦР источник ионов с уровнем аксиального поля до 3 Тл и частотой СВЧ нагрева 18 ГГц [177]. Сверхпроводящий источник ионов DECRIS-SC показал себя исключительно эффективным и надежным в эксплуатации. Спектры ионов криптона и ксенона приведены на рисунках 3.6 и 3.7. Ток пучка ионов криптона и ксенона измерялся в фокальной плоскости анализирующего магнита (АМ) системы аксиальной инжекции пучка (рис.3.8). После сепарации и коллимации инжектируемого пучка на диафрагме диаметром 20 мм ток пучка ионов  $^{86}\text{Kr}^{+15}$  составлял 60–70 мкА, ток пучка ионов  $^{132}\text{Xe}^{+23}$  – 35 мкА. Это близко к проектным значениям интенсивности указанных ионов из ЭЦР источника. Ионный источник обладает значительным запасом по интенсивности инжектируемых пучков тяжелых ионов и позволяет в широких пределах регулировать ток пучка на мишени [28, 76, 95, 97].

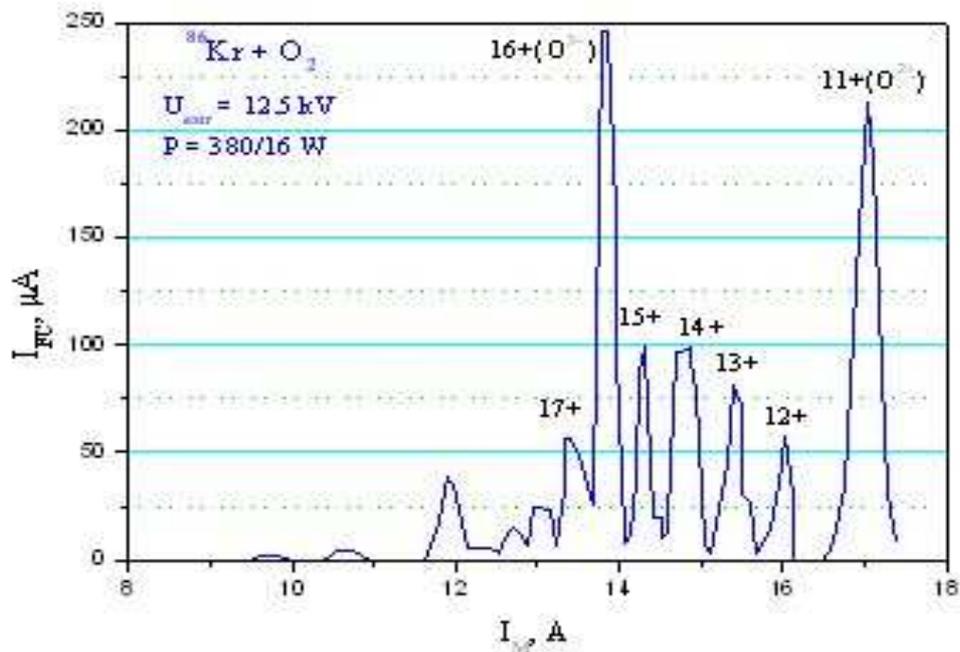


Рис. 3.6. Спектральный состав ионов криптона, полученный из ЭЦР источника DECRIS-SC. Напряжение экстракции – 12,5 кВ. СВЧ-мощность 380 Вт.

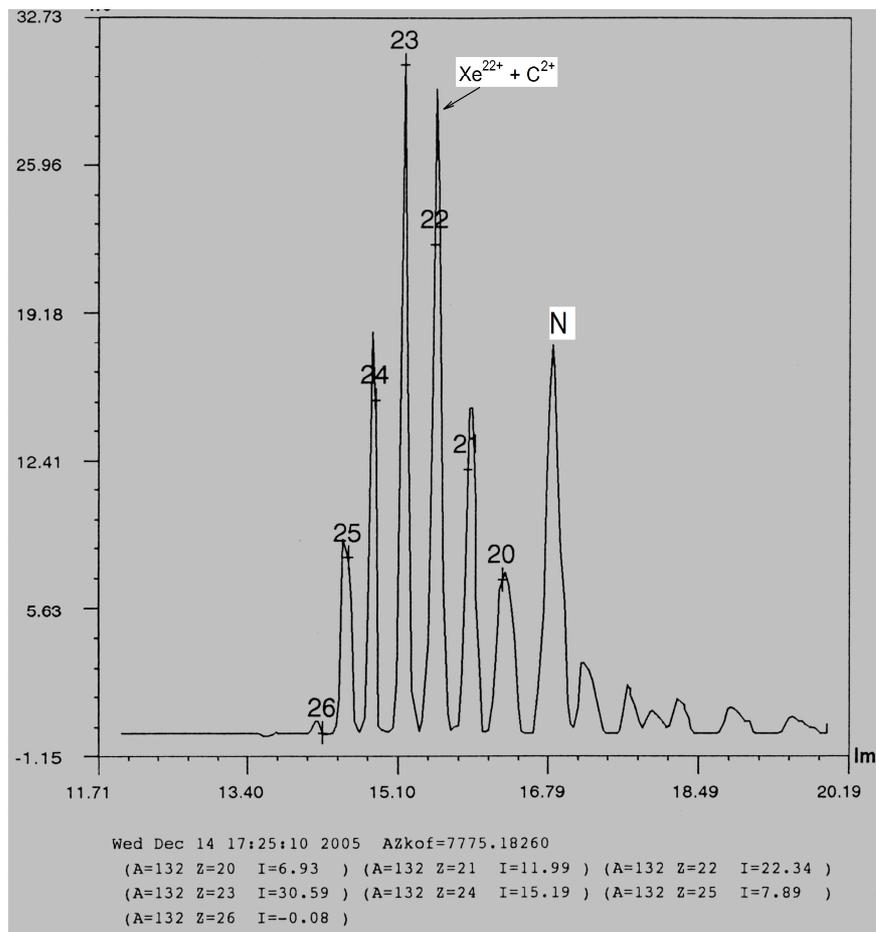


Рис. 3.7. Спектральный состав ионов ксенона, полученный из ЭЦР источника DECRIS-SC. Мощность СВЧ – 390 Вт.

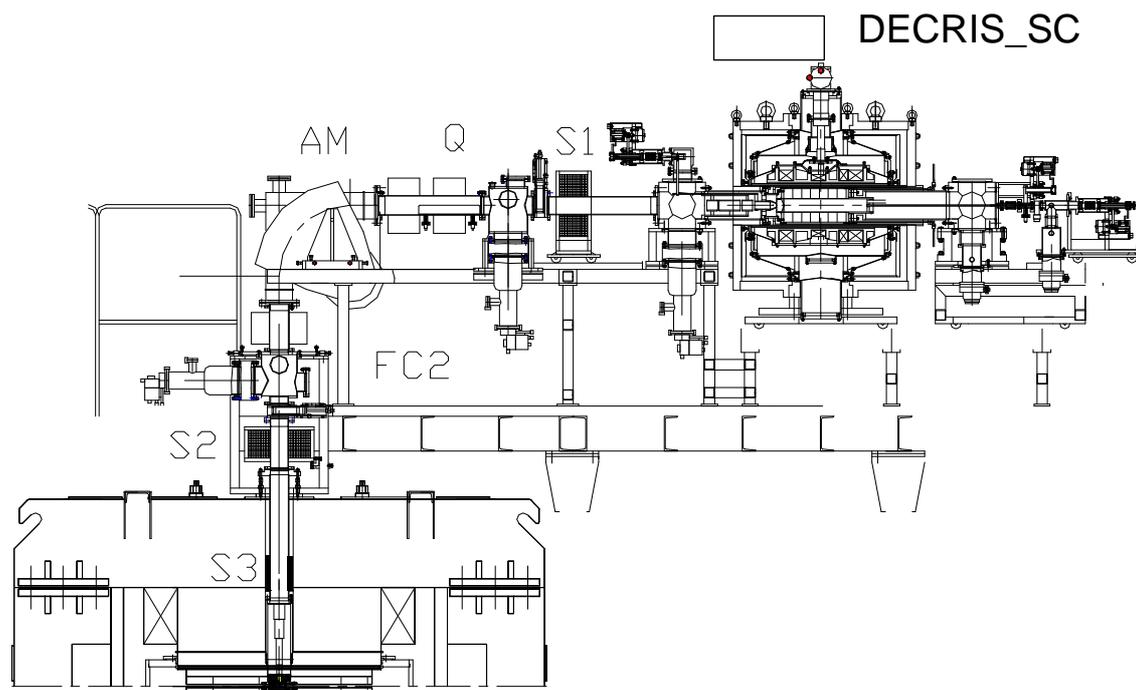


Рис. 3.8. Канал аксиальной инжекции. Общая длина канала – 5222 мм.

DECRIS-SC – сверхпроводящий ЭЦР-источник, AM – анализирующий магнит, S1, S2, S3 – фокусирующие соленоиды, Q – корректирующая квадрупольная линза, FC2 – цилиндр Фарадея. Банчер расположен внутри блока диагностики FC2.

### Канал аксиальной инжекции пучка

Схема канала аксиальной инжекции циклотрона ИЦ-100 приведена на рисунке 3.8. Основными ионно-оптическими элементами канала являются фокусирующие соленоиды, корректирующая квадрупольная линза Q, анализирующий магнит AM и корректирующие дипольные магниты. В ходе настройки ускорителя было проведено экспериментальное исследование условий прохождения пучка по каналу инжекции ИЦ-100 в зависимости от различных факторов и сравнение с результатами компьютерных расчетов (рис. 3.9). Моделирование проводилось с помощью библиотеки программ расчета динамики многокомпонентных интенсивных пучков ионов [28, 77, 96, 127]. Результаты компьютерного моделирования представлены в виде траекторий частиц и огибающих пучка вдоль линии инжекции от выхода из ЭЦР-источника до входа в инфлектор. Анализировались две схемы транспортировки с двумя фокусирующими соленоидами и с тремя соленоидами. Третий фокусирующий элемент был установлен для согласования пучка на входе в инфлектор. Из конструкторских соображений и ограниченных габаритов в центре магнита ИЦ-100 был изготовлен инфлектор с размером входного окна  $8316 \text{ мм}^2$ .

С целью повышения эффективности транспортировки пучка, для согласования пучка и уменьшения потерь в вертикальной секции канала инжекции ИЦ-100 было принято решение установить дополнительный ионно-оптический элемент – короткофокусный соленоид S3. Было проведено сравнение эффективности транспортировки пучка для геометрии с двумя соленоидами и варианта с тремя соленоидами (рис.3.9). В последнем случае пучок проходит наиболее узкую часть канала инжекции практически без потерь. Соленоид S3, расположенный внутри ярма магнита на расстоянии 575 мм от медианной плоскости, позволяет увеличить аксептанс канала до  $A \sim 250\pi \text{ мм}\cdot\text{мрад}$ , а также сфокусировать пучок в пятно диаметром 8 мм на входе в инфлектор.

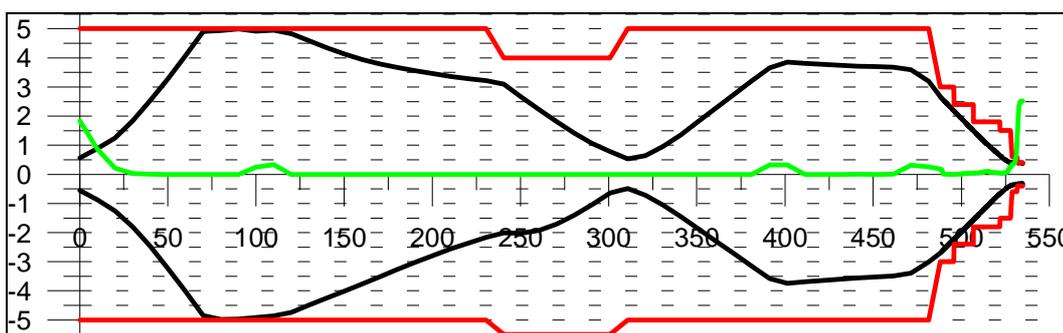
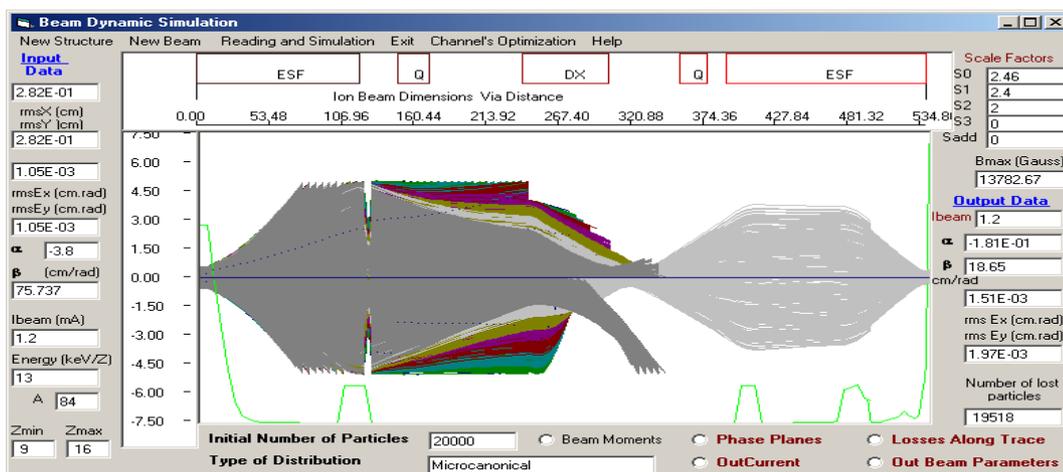


Рис. 3.9. Канал системы аксиальной инжекции пучка инжекции циклотрона ИЦ-100 с тремя соленоидами. Траектории частиц и огибающие пучка в канале.

### Инфлектор

Инжектируемый пучок ионов из аксиального канала поворачивается в медианную плоскость циклотрона с помощью спирального инфлектора (рис. 3.10). Входное окно инфлектора имеет прямоугольную форму с апертурой  $8 \times 16$  мм. Электрический радиус инфлектора составляет 15 мм, что примерно равно высоте от входа в инфлектор до медианной плоскости, магнитный радиус инфлектора равен 18 мм. Параметры инфлектора определялись доступным свободным местом в центре магнита ИЦ-100 и возможностью размещения деталей корпуса инфлектора. Напряжение инжекции 12,5 кВ было выбрано, исходя из расчетов, а также технических возможностей [28, 95].

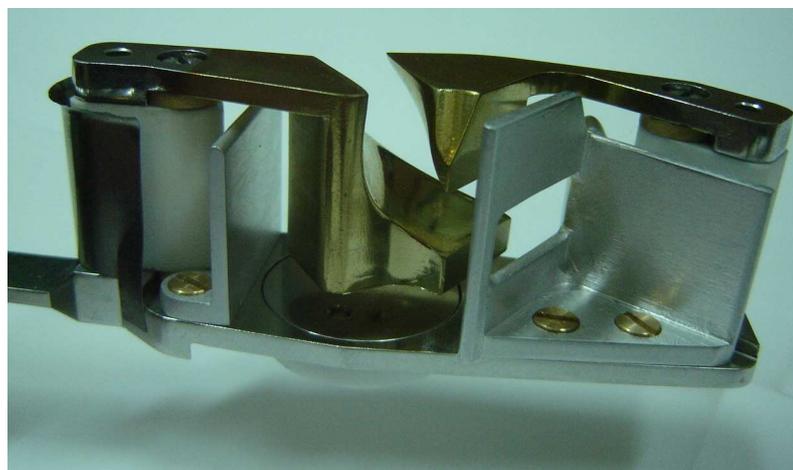


Рис. 3.10. Спиральный инфлектор ИЦ-110. Показаны верхний и нижний электроды и механизм крепления. Зазор между электродами инфлектора – 8 мм. Справа на снимке видно выходное окно размером  $1638 \text{ мм}^2$ .

В процессе экспериментальной оптимизации системы аксиальной инжекции и ЭЦР источника напряжение инжекции было повышено до 14 кВ. На нижнем электроде инфлектора виден след от пучка шириной около 8 мм. Пучок полностью занимает пространство между электродами. Для измерения интенсивности и профиля пучка после прохождения инфлектора в медианной плоскости циклотрона перед первым ускоряющим зазором был установлен съемный пробник размером 20×15 мм<sup>2</sup>. На пробнике был зафиксирован след пучка, имеющий форму узкой полосы шириной менее 3 мм, вытянутой с небольшим наклоном в вертикальном направлении на 12 мм. Коэффициент трансмиссии пучка от входа в инфлектор до первого ускоряющего зазора варьируется в зависимости от настройки канала инжекции и составляет 40-60%.

Потери пучка в инфлекторе и пролетном промежутке между инфлектором и первым ускорительным зазором вызваны несколькими факторами: малая апертура инфлектора, большая угловая расходимость пучка в вертикальном направлении на выходе из инфлектора (что было зафиксировано по следу от пучка), малый вертикальный зазор между секторами циклотрона ~20 мм и отсутствие аксиальной фокусировки до попадания в первый ускоряющий зазор. Вытягивание пучка в вертикальном направлении вызвано краевыми электрическими полями, а также неоднородностью электрического поля между электродами инфлектора. Были проведены работы по максимально возможному согласованию всех перечисленных факторов.

В конструкции спирального инфлектора (рис.3.10) изоляторы экранированы от прямого попадания пучка и распыленного материала. Геометрия центральной области циклотрона и траектория движения пучка показаны на рисунке 3.11.

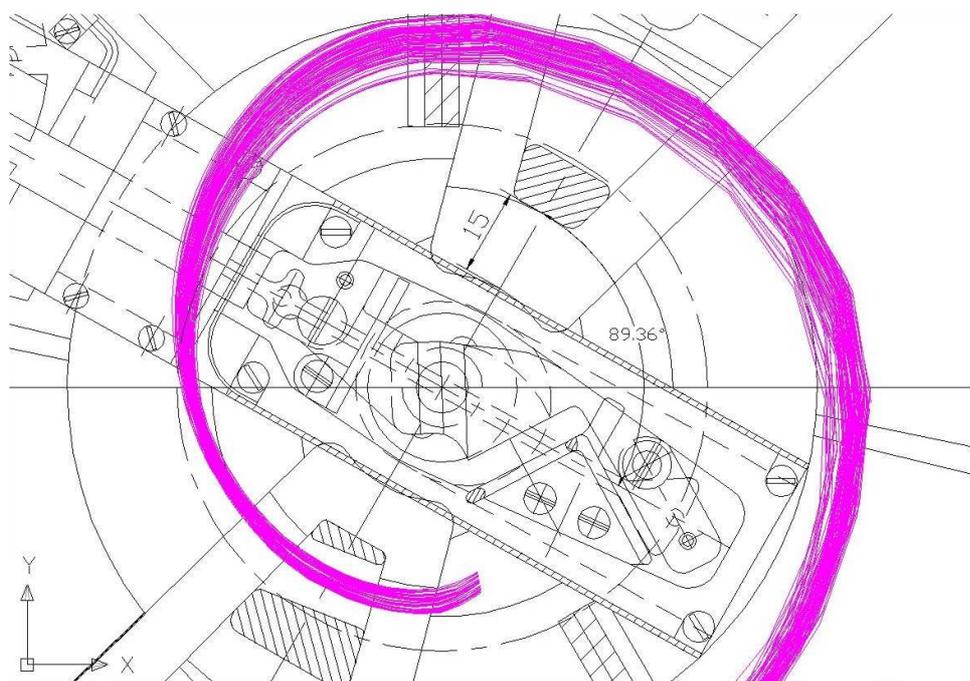


Рис. 3.11. Модифицированная центральная область циклотрона ИЦ-100. Показаны механизм подачи, корпус и электроды инфлектора, а также дуанты и центральные траектории ионов.

### Система группирования пучка

Фазовый аксептанс циклотрона ИЦ-100 составляет 30-40° ВЧ, что соответствует 10% захвату в режим ускорения несбанчиваемого пучка. Система банчирующей с использованием синусоидального банчера на первой гармонике высокочастотной ускоряющей системы позволяет увеличить плотность частиц в диапазоне фаз, ускоряемых в циклотроне, и тем самым повысить эффективность захвата примерно в три раза. По конструктивным соображениям банчер размещен в блоке диагностики канала аксиальной инжекции пучка на расстоянии 1800 мм от медианной плоскости. На циклотроне ИЦ-100

установлен одноззорный банчер, состоящий из двух сеток, на которые подается противофазное синусоидальное напряжение.

Была выполнена серия расчетов по определению эффективности банчировки ионов  $^{86}\text{Kr}^{+15}$  в линии инжекции ИЦ-100 в зависимости от различных факторов, в том числе – от геометрических параметров банчера и напряжения между электродами. Варьировались зазор между сетками и расстояние между проволочками.

Конструкция банчера была оптимизирована для достижения необходимой однородности электрического поля между электродами, расстояние между проволочками было выбрано 4 мм, а зазор между электродами – 3 мм. В этой конструкции пролетное время ионов  $^{86}\text{Kr}^{+15}$  с энергией 2,5 кэВ/А составляет не более  $25^\circ$  ВЧ при частоте ВЧ резонатора 20,2 МГц. Система банчировки позволила существенно увеличить интенсивность ускоренного пучка. Коэффициент банчировки зависит от тока инжектируемого пучка. Были проведены измерения зависимости интенсивности ускоренного пучка ионов  $^{86}\text{Kr}^{+15}$  при включенном и выключенном банчере от тока инжекции (рис. 3.12). Ток инжектируемого пучка измерялся с пластины положительного электрода инфлектора. Коэффициент банчировки ионов  $^{86}\text{Kr}^{15+}$  в зависимости от тока инжектируемого пучка приведен на рис. 3.13. Коэффициент банчировки определялся как отношение тока выведенного пучка с включенным банчером к току выведенного пучка при выключенном банчере. Эффективность банчировки уменьшается с ростом тока инжектируемого пучка, что вызвано влиянием пространственного заряда в продольном направлении [28, 95].

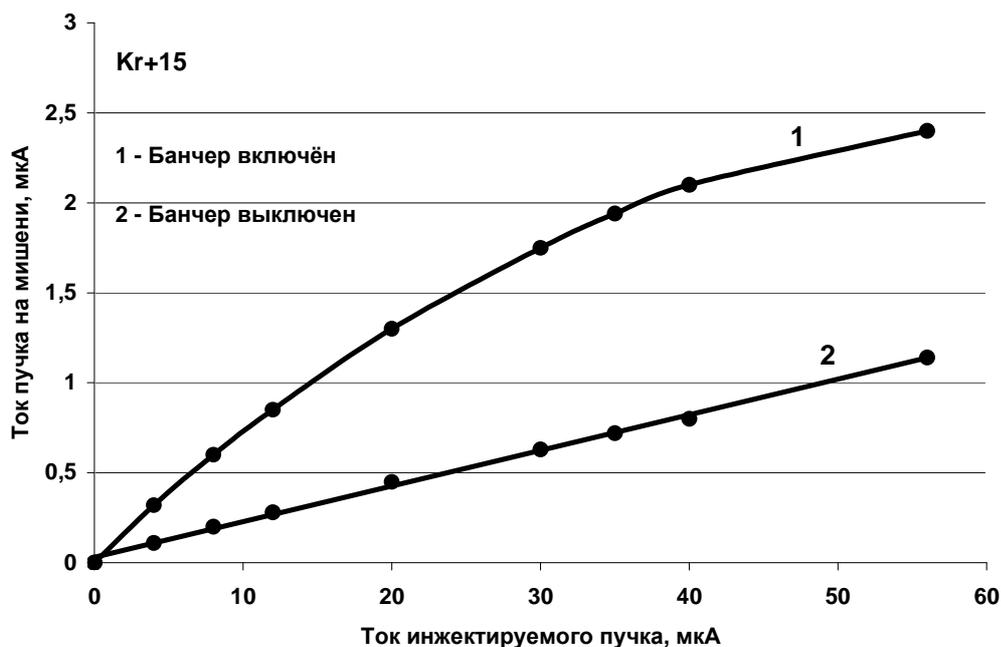


Рис. 3.12. Ток ускоренного пучка ионов  $^{86}\text{Kr}^{15+}$  в зависимости от интенсивности инжектируемого пучка при включенном и выключенном банчере.

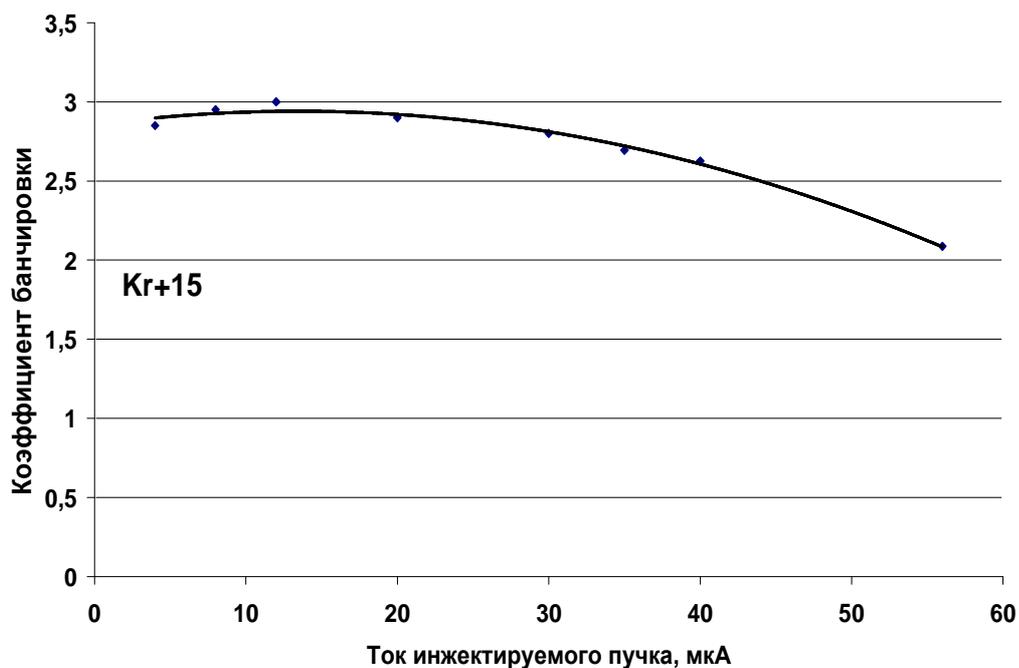


Рис. 3.13. Коэффициент банчировки ионов  $^{86}\text{Kr}^{15+}$  в зависимости от тока инжектируемого пучка.

### 3.3 Ускорение пучка ионов в циклотроне

Циклотрон ИЦ-100 работает на высоких уровнях магнитного поля около 1,9 Тл. Зависимость среднего магнитного поля от тока основной обмотки магнита в рабочем диапазоне показана на рисунке 3.14. На рисунке 3.15 представлена фотография внутренней части циклотрона со стороны долины, где размещается дефлектор. Вертикальный зазор между секторами составляет 20 мм. В глубине видны центральная пробка магнита и корпус инфлектора.

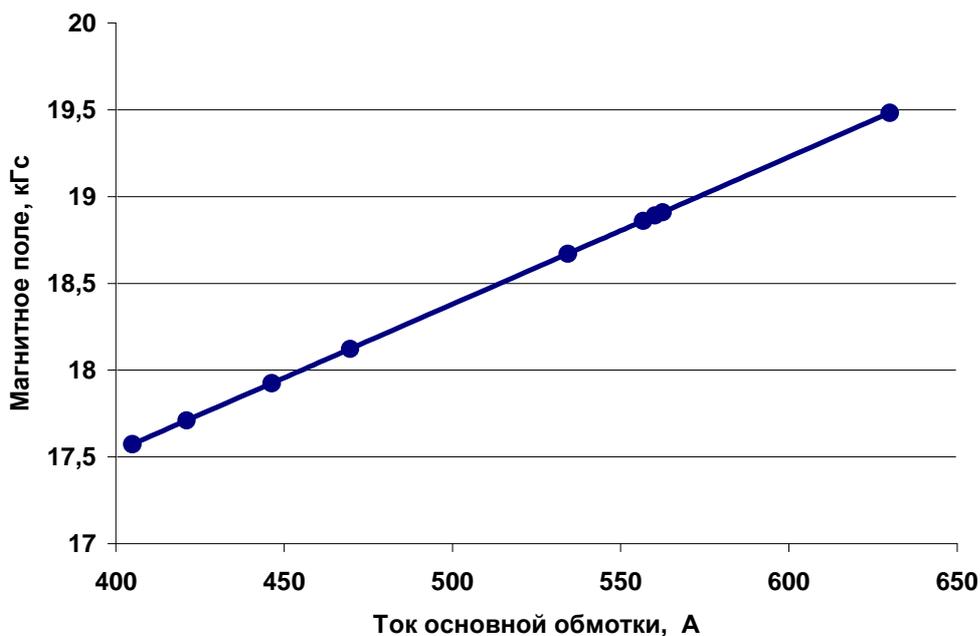


Рис. 3.14. Зависимость среднего магнитного поля от тока основной обмотки циклотрона ИЦ-100 в рабочей области.

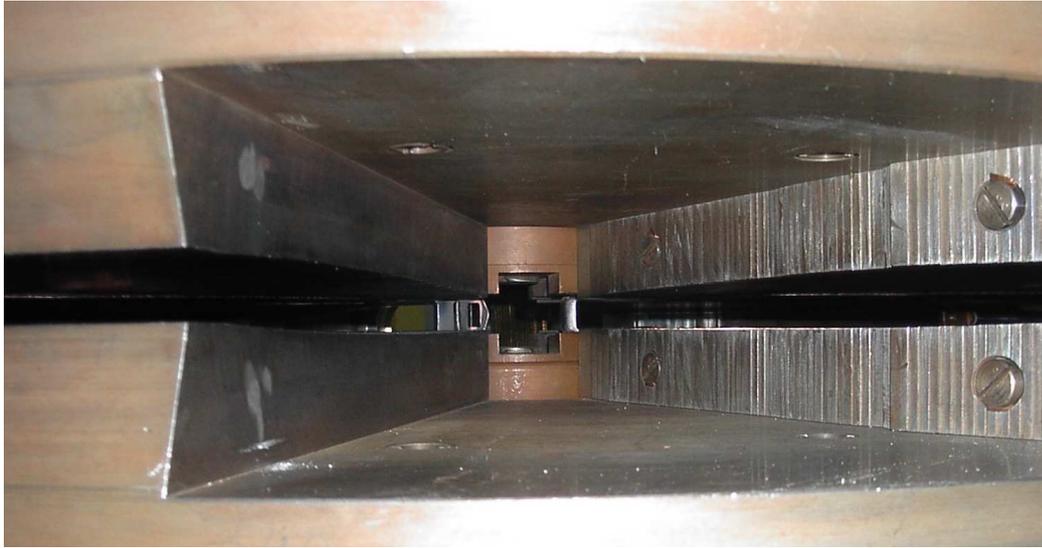


Рис. 3.15. Рабочий зазор магнита ИЦ-100 со стороны долины. Вертикальный зазор в долине – 110 мм, между секторами – 20 мм.

В ходе запуска и наладки циклотрона ИЦ-100 были выполнены расчетно-экспериментальные исследования по оптимизации положения и размеров элементов конструкции на первых оборотах в центре циклотрона. Зазоры между дуантами и формирующими рамками, находящимися под потенциалом земли, были уменьшены на первом обороте пучка до 7 мм. При этом обеспечивается наилучшее фазовое движение частиц и фокусировка пучка. На последующих оборотах горизонтальный зазор между дуантами и плакировками составляет 10 мм. В результате получена близкая к расчетной эффективность захвата пучка в режим ускорения. При выключенном банчере около 10% от тока инжектируемого пучка было захвачено в процесс ускорения, что соответствует фазовому акцептансу циклотрона около 30-40°.

В процессе настройки ускорителя проводились измерения различных параметров пучка. В частности была определена зависимость тока ускоренного пучка от амплитуды ускоряющего напряжения на дуантах – “пусковая характеристика” (рис. 3.16). Интенсивность ионов  $^{132}\text{Xe}^{23+}$  измерялась на радиусе вывода. Оптимальная амплитуда ВЧ напряжения на дуантах составляет около 50 кВ, что совпадает с расчетным значением.

Циклотрон ИЦ-100 используется в основном для облучения ядерных мембран тяжелыми ионами типа Ar, Kr, Xe. Изохронное поле в циклотроне ИЦ-100 сформировано путем подбора формы секторов и дополнительных накладок на боковую поверхность сектора, без использования корректирующих обмоток.

Для проверки качества формирования магнитного поля были сняты резонансные кривые – зависимость тока укоренного пучка от уровня магнитного поля на разных радиусах (рис. 3.17). Симметричное положение резонансных кривых на различных радиусах свидетельствует о хорошем качестве формирования поля [28, 95].

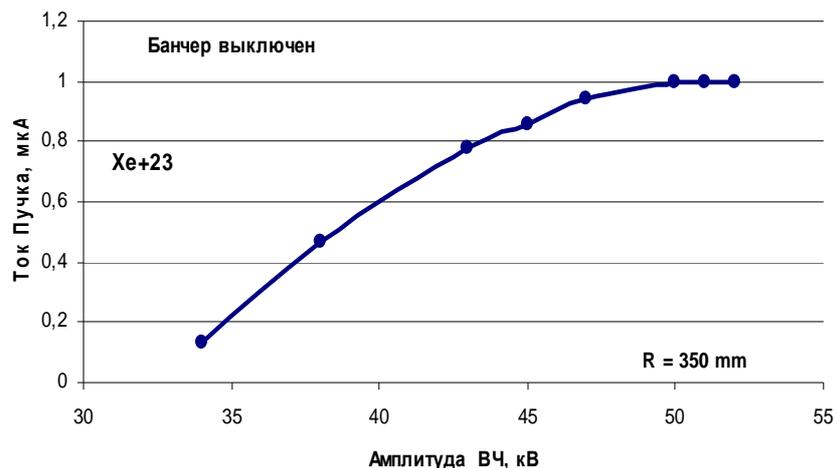


Рис. 3.16. Пусковая характеристика ИЦ-100. Ток выведенного пучка ионов ксенона  $^{132}\text{Xe}^{23+}$  в зависимости от амплитуды ускоряющего напряжения на дуантах.

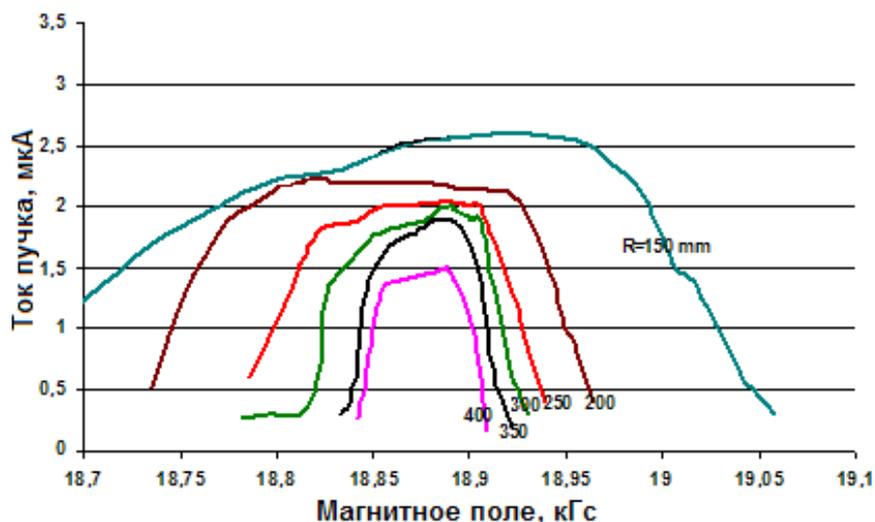


Рис. 3.17. Резонансные кривые циклотрона ИЦ-100. Ускорение ионов  $^{86}\text{Kr}^{15+}$ . R=150 мм, 200 мм, 250 мм, 300 мм, 350 мм, 400 мм – радиусы, при которых измерялись зависимости.

Неоднократно измерялось распределение интенсивности различных ионов по радиусу. Наиболее характерные кривые для ионов  $^{40}\text{Ar}^{7+}$ ,  $^{86}\text{Kr}^{15+}$  и  $^{132}\text{Xe}^{23+}$  приведены на рисунке 3.18. В центральной области циклотрона между первым ускоряющим зазором и вплоть до радиуса ~150 мм происходит фазовая сепарация пучка. В основной зоне ускорения вплоть до входа пучка в дефлектор наблюдается падение интенсивности пучка, вызванное вертикальными аппертурными потерями (зазор для пучка – 20 мм). Эффективность прохождения основной области ускорения в циклотроне ИЦ-100 составляет около 60–70%. Характер наклона кривых распределения интенсивности от радиуса практически одинаков для ионов различной зарядности:  $^{40}\text{Ar}^{7+}$ ,  $^{86}\text{Kr}^{15+}$  и  $^{132}\text{Xe}^{23+}$ , – что свидетельствует об отсутствии заметных вакуумных потерь ионов из-за перезарядки на остаточном газе.

На циклотроне ИЦ-100 был ускорен пучок ионов вольфрама  $^{184}\text{W}^{+32}$ . После сепарации в линии инжекции интенсивность пучка ионов вольфрама с зарядом +32 составила около 200 нА. Ток ускоренного пучка на удаленной мишени достигал 17 нА, что соответствует потоку  $3 \cdot 10^9$  частиц·с<sup>-1</sup>. Для получения ионов металла использовался композитный порошок гексакарбонил вольфрама  $\text{W}(\text{CO})_6$  [178]. Оптимальная мощность СВЧ нагрева плазмы в ионном источнике составляла 3004400 Вт.

Для получения ионов железа в разрядную камеру ЭЦР источника подавались пары металлоцена  $\text{Fe}(\text{C}_5\text{H}_5)_2$ . Выход ионов железа после сепарации в линии инжекции составляет около 3-5 мкА для зарядов +9, +10, +11. Ускоренный и выведенный в канал транспортировки ток пучка ионов  $^{56}\text{Fe}^{+10}$  был на уровне 0,5 мкА ( $3 \cdot 10^{11}$  частиц  $\cdot \text{c}^{-1}$ ).

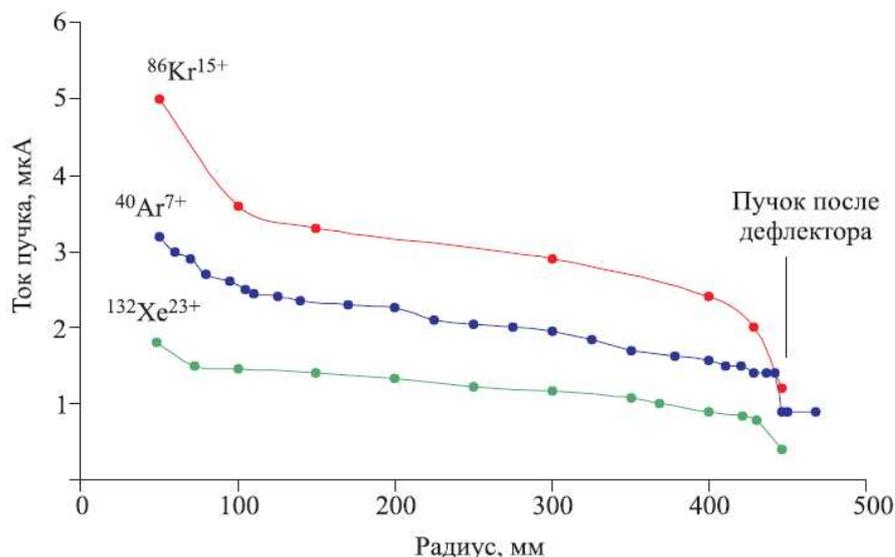


Рис. 3.18. Распределение тока пучка по радиусу при ускорении различных ионов в циклотроне ИЦ-100. Спад интенсивности в центре циклотрона определяется фазовой селекцией на первых оборотах.

### Вакуумные потери

Была выполнена серия экспериментов по исследованию влияния вакуума в камере циклотрона на потери пучка тяжелых ионов в процессе ускорения. Измерялась трансмиссия пучка в процессе ускорения различных ионов как соотношение тока пучка в центре машины к току пучка на радиусе вывода при различных значениях вакуума внутри циклотрона. Измерения были выполнены для ионов  $^{40}\text{Ar}^{7+}$ ,  $^{86}\text{Kr}^{15+}$  и  $^{132}\text{Xe}^{23+}$ .

Экспериментально измеренные зависимости интенсивности ускоренного пучка различных ионов на выводном радиусе как функция давления в вакуумной камере циклотрона в сравнении с расчетом приведены на рисунке 3.19 [28]. На рисунке сплошные линии – результаты расчетов, а знаки – данные измерений.

При длительной работе с пучком рабочее давление внутри вакуумной камеры циклотрона ИЦ-100 составляет около  $\sim 5 \cdot 10^{-8}$  Торр, и каких-либо существенных потерь многозарядных ионов на остаточном газе не наблюдается.

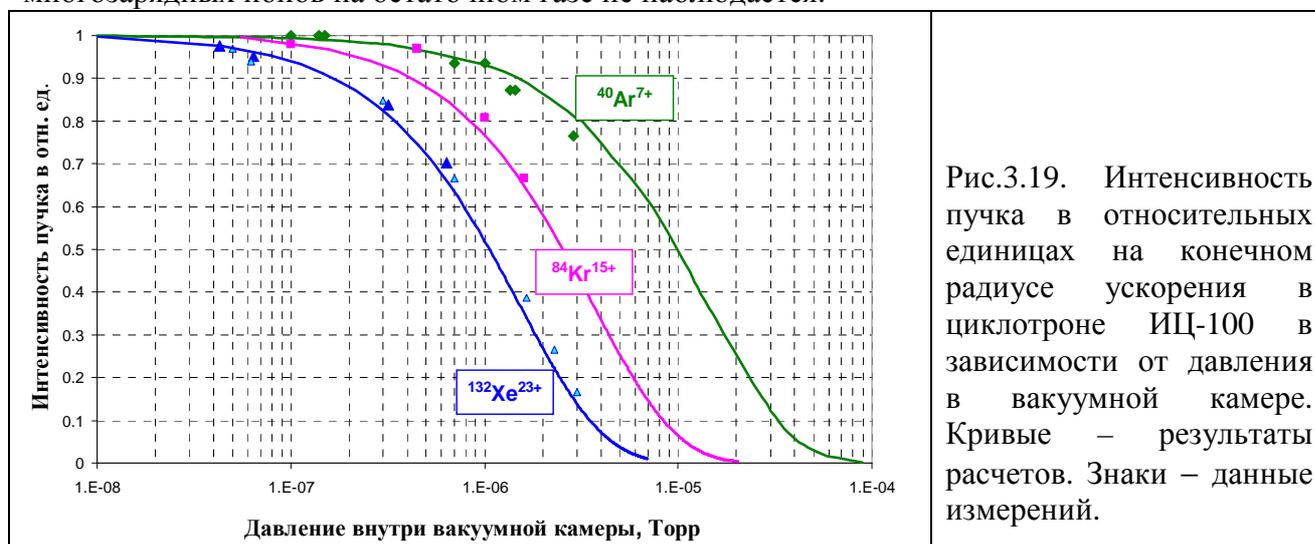


Рис.3.19. Интенсивность пучка в относительных единицах на конечном радиусе ускорения в циклотроне ИЦ-100 в зависимости от давления в вакуумной камере. Кривые – результаты расчетов. Знаки – данные измерений.

### 3.4 Система вывода пучка ионов из циклотрона ИЦ-100

Система вывода ИЦ-100 состоит из электростатического дефлектора и двух пассивных фокусирующих магнитных каналов [28, 77, 95, 127]. Численное моделирование системы вывода пучка проводилось с учетом измеренной карты магнитного поля и существующей конструкции циклотрона (рис.3.20). Электростатический дефлектор (ESD) располагался в долине на азимутах  $\Theta=39^\circ-67^\circ$  ( $\Delta\Theta=28^\circ$ ). Для вывода пучка с энергией 1,2 МэВ/нуклон в выбранном направлении требуется напряженность электрического поля  $\approx 58$  кВ/см.

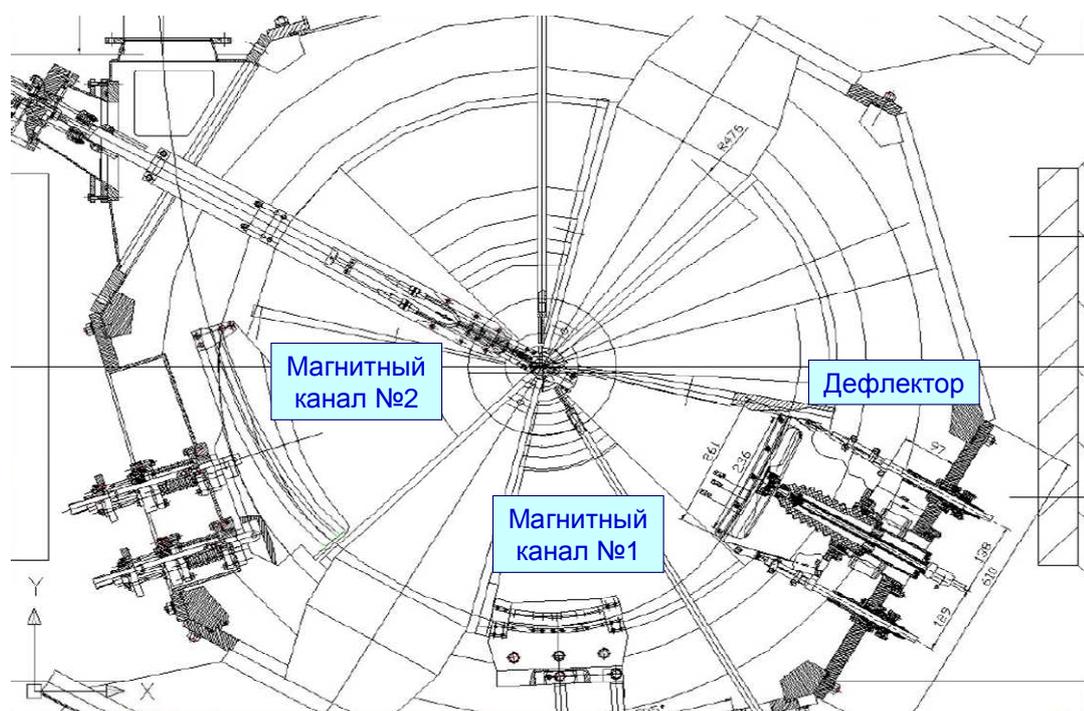


Рис. 3.20. Система вывода пучка из циклотрона ИЦ-100. Показаны элементы вывода – электростатический дефлектор, два пассивных магнитных канала и траектория пучка.

Для моделирования поведения пучка использовался набор частиц, распределенных случайным образом внутри радиального и аксиального эмиттансов ( $\epsilon_r = 25\pi$  мм·мрад;  $\epsilon_z = 25\pi$  мм·мрад) и с разбросом по энергии  $\delta W = \pm 1\%$ . Магнитное поле циклотрона ИЦ-100 характеризуется большими радиальными градиентами вблизи края сектора ( $\sim 50$  Тл/м), что вызывает сильную радиальную дефокусировку выводимого пучка. Для формирования выводимого пучка необходимо использовать фокусирующие магнитные каналы. Первый канал (МС1) расположен на азимуте  $\Theta = 100^\circ-120^\circ$ , а второй (МС2) – на  $\Theta = 160^\circ-210^\circ$ . Данное расположение каналов определяется как требованиями к формированию пучка, так и конструктивными возможностями. На рисунке 3.21 показаны огибающие пучка при выбранных магнитных каналах, параметры которых приведены в таблице 3.7. Второй канал расположен в сильно спадающем магнитном поле, он состоит из 5 секций, каждая из которых имеет свои геометрические размеры в сечении. Распределение магнитного поля в канале было рассчитано и измерено. На рис 3.22 и 3.23 показано сечение канала и измененное магнитное поле в канале в зоне прохождения пучка.

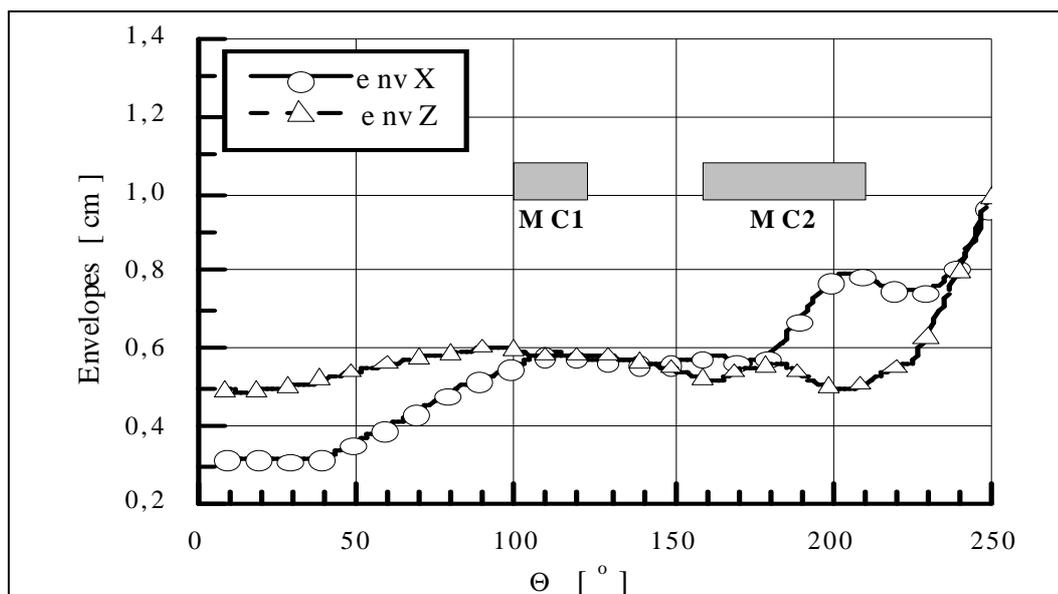


Рис. 3.21. Огибающие пучка ионов  $^{84}\text{Kr}^{15+}$  в системе вывода от дефлектора до входа в канал транспортировки.

Таблица 3.7. Параметры магнитных каналов системы вывода циклотрона ИЦ-100 (азимутальное и радиальное положение каналов, апертура, фокусирующий градиент, сброс магнитного поля, расстояние до предпоследней орбиты)

Дефлектор	$\Theta_{in}/\Theta_{out}$ [°]	$R_{in} / R_{out}$ [см]	$\Delta X/\Delta Z$ [мм]		Напряж. эл.поля	$\Delta R$ [мм]
ESD	39 ÷ 67	44,30 / 45,35	10 / 10	-	58 кВ/см	-
Канал	$\Theta_{in}/\Theta_{out}$ [°]	$R_{in} / R_{out}$ [см]	$\Delta X/\Delta Z$ [мм]	$G$ [Тл/м]	$\Delta B$ [Т]	$\Delta R$ [мм]
MC1	100 ÷ 110	49,15 / 49,30	15 / 15	12,03	-0,075	30 / 34
	110 ÷ 120	49,30 / 49,00	15 / 15	12,03	-0,075	34 / 38
MC2	160 ÷ 170	49,55 / 50,55	20 / 15	35,10	-0,077	49 / 51
	170 ÷ 180	50,55 / 51,55	20 / 15	35,10	-0,077	51 / 56
	180 ÷ 190	51,55 / 52,90	20 / 15	30,06	-0,233	56 / 68
	190 ÷ 200	52,90 / 55,20	20 / 15	24,95	-0,267	68 / 87
	200 ÷ 210	55,20 / 58,90	20 / 15	15,09	-0,034	87 / 135

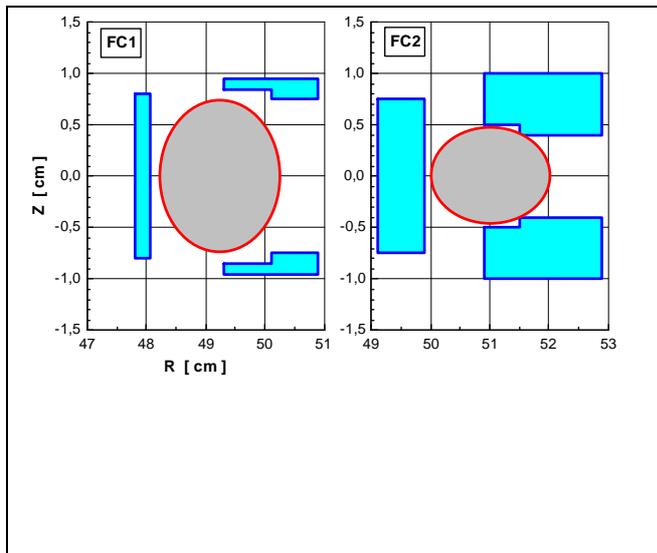


Рис. 3.22. Поперечное сечение магнитных каналов МС1 и МС2. Овалом выделена область, которую может занимать пучок.

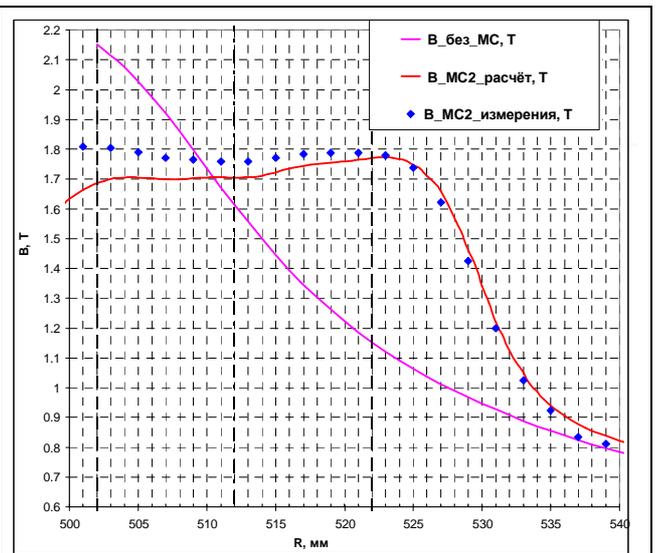


Рис. 3.23. Распределение магнитного поля по радиусу в апертуре магнитного канала МС2. Показаны: спадающее поле без магнитного канала и пологий профиль поля с каналом (кривая – расчёт, точки – измерение).

Магнитное поле ИЦ-100 сформировано с помощью железных масс без использования токовых корректирующих катушек. Для компенсации искажений магнитного поля, вызванных установкой двух фокусирующих каналов, были использованы дополнительные шиммы. Удачным решением было размещение шимм между первым и вторым каналами – в долине первого дуанта под плакировками. На рис.3.24 представлен профиль дополнительных шимм. Распределение среднего магнитного поля по радиусу до шиммирования и после, а также вклад от корректирующих шимм в среднее поле на орбите показаны на рис. 3.25. Правильность подбора массы и размеров шимм были проверены путём измерения эффективности прохождения пучка по радиусу и методом снятия резонансных кривых на различных радиусах (рис.3.17). Форма и размер пучка по траектории вывода контролировались по изображению на сцинтилляционных пластинах, а также измерялись на профилометрах.

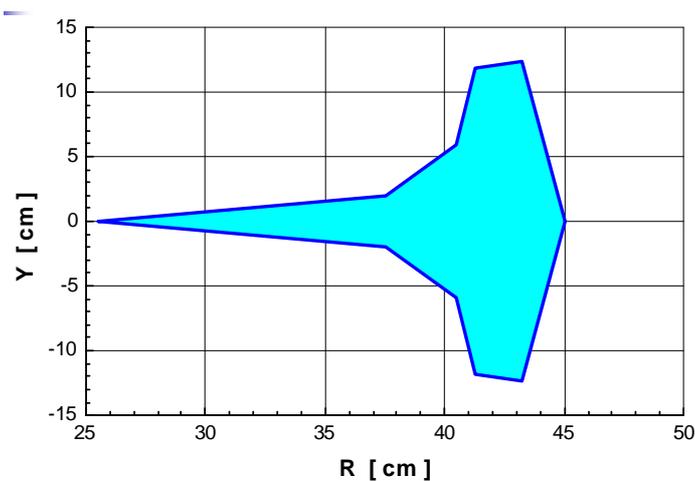


Рис. 3.24. Геометрия шимм для компенсации влияния магнитного канала.

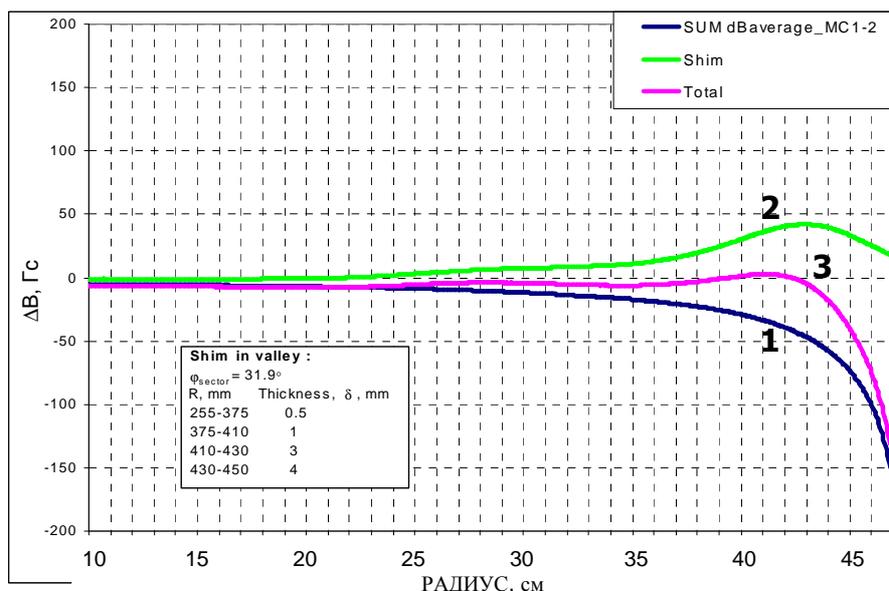


Рис. 3.25. Компенсация среднего магнитного поля циклотрона при установке магнитных каналов на выводе из ИЦ-100. По оси X– радиус от центра магнита, по оси Y– уровень магнитного поля. 1 – отклонение среднего магнитного поля циклотрона при установке магнитных каналов, 2 – вклад в среднее магнитное поле от шиммирующих пластин, 3 – отклонение среднего магнитного поля циклотрона после установки магнитных каналов и корректирующих шимм.

После соответствующей настройки положения элементов вывода эффективность прохождения ионов через дефлектор составила около 70%, через магнитные каналы – около 70%, что близко к расчетным значениям. Зазор между потенциальной и заземленной пластинами равен 10мм, дефлектор стабильно работает при напряжении 55кВ.

Был сфотографирован пучок ионов  $^{86}\text{Kr}^{+15}$  с кварцевой пластины, установленной после первого магнитного канала (рис.3.26). На пластине проведены 6 реперных отметок с расстоянием по 5 мм между вертикальными линиями. Ближайшая к центру линия находится на радиусе 49,5 см. Размер выведенного пучка на кварцевой пластине не превышает 5мм по горизонтали и 4 мм по вертикали.

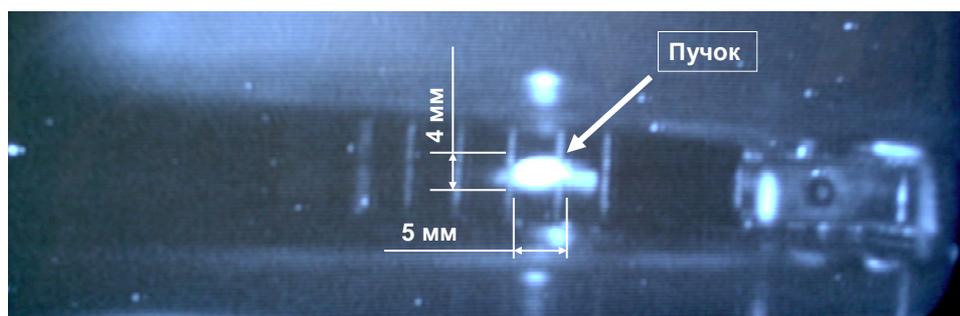


Рис. 3.26. Фото пучка ионов  $^{86}\text{Kr}^{+15}$  после прохождения элементов вывода циклотрона ИЦ-100. Расстояние между вертикальными проволочками 5 мм. Размер пучка в области вывода составляет  $534 \text{ мм}^2$ .

### 3.5 Канал транспортировки пучка и установка для облучения полимерной пленки.

Основные параметры пучка в начальной точке, необходимые для расчета канала, следующие: энергия ионов криптона – 1,2 МэВ/нуклон; заряд ионов  $Z = +15$ ; массовое

число ионов  $A = 84$  ( $A/Z=5,6$ ); ток ионов криптона – 5 мкА; эмиттанс пучка по оси  $X$   $\epsilon_x = 25\pi$  мм·мрад; эмиттанс пучка по оси  $Y$   $\epsilon_y = 25\pi$  мм·мрад; начальный среднеквадратичный (RMS) размер пучка по оси  $X$   $\sigma_x \approx 0,4$  см; начальный среднеквадратичный размер пучка по оси  $Y$   $\sigma_y \approx 0,4$  см.

Рассчитанный вариант режима транспортировки ионов криптона от точки вывода до облучаемой мишени показан на рис. 3.27. Здесь верхняя кривая – полуразмер по оси  $Y$ , нижняя кривая – полуразмер по оси  $X$ .

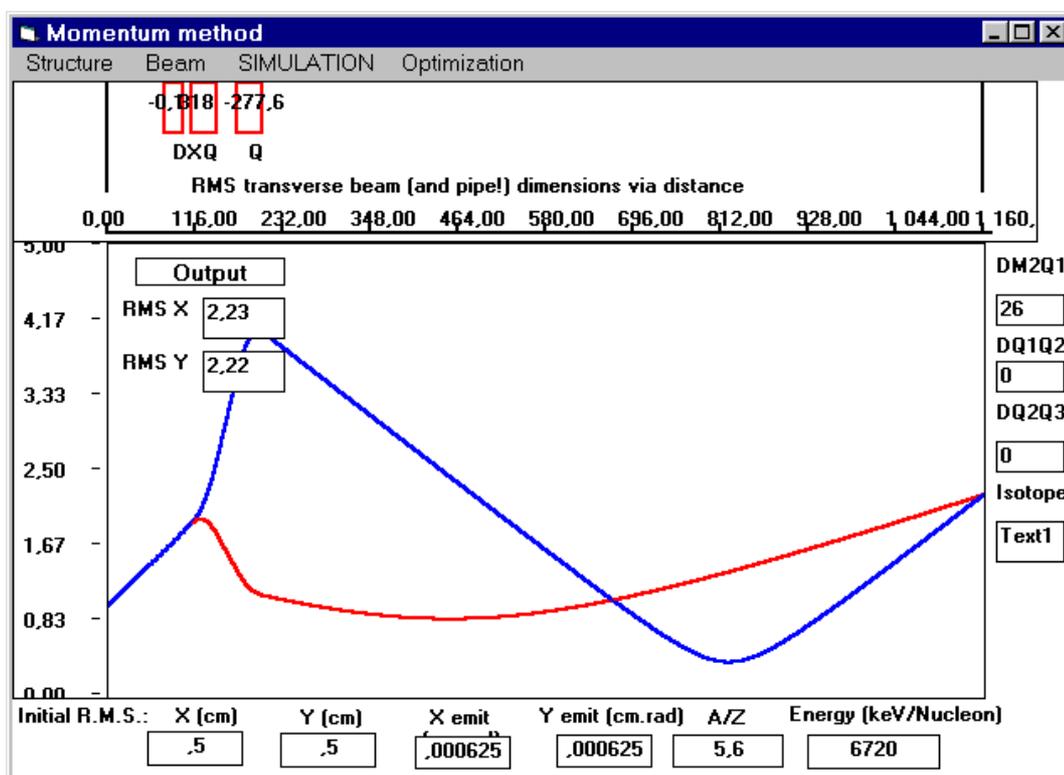


Рис. 3.27. Огибающие пучка в канале транспортировки пучка ионов криптона от точки вывода до мишени. Здесь верхняя кривая – полуразмер по оси  $Y$ , нижняя кривая – полуразмер по оси  $X$ .

Транспортировка ионов осуществляется с помощью двух квадруполь марки 11К30-600, имеющих следующие стандартные параметры: диаметр апертуры – 11 см; длина каждого квадруполь – 30 см (эффективная длина 39,5 см); расстояние между квадрупольями – 28 см; максимальный градиент – 600 Гс/см. Расстояние между начальной точкой канала и первым квадрупольем было выбрано равным 90 см.

Общая схема канала транспортировки ионов [28, 77, 95, 127] из циклотрона до мишени представлена на рисунке 3.28.

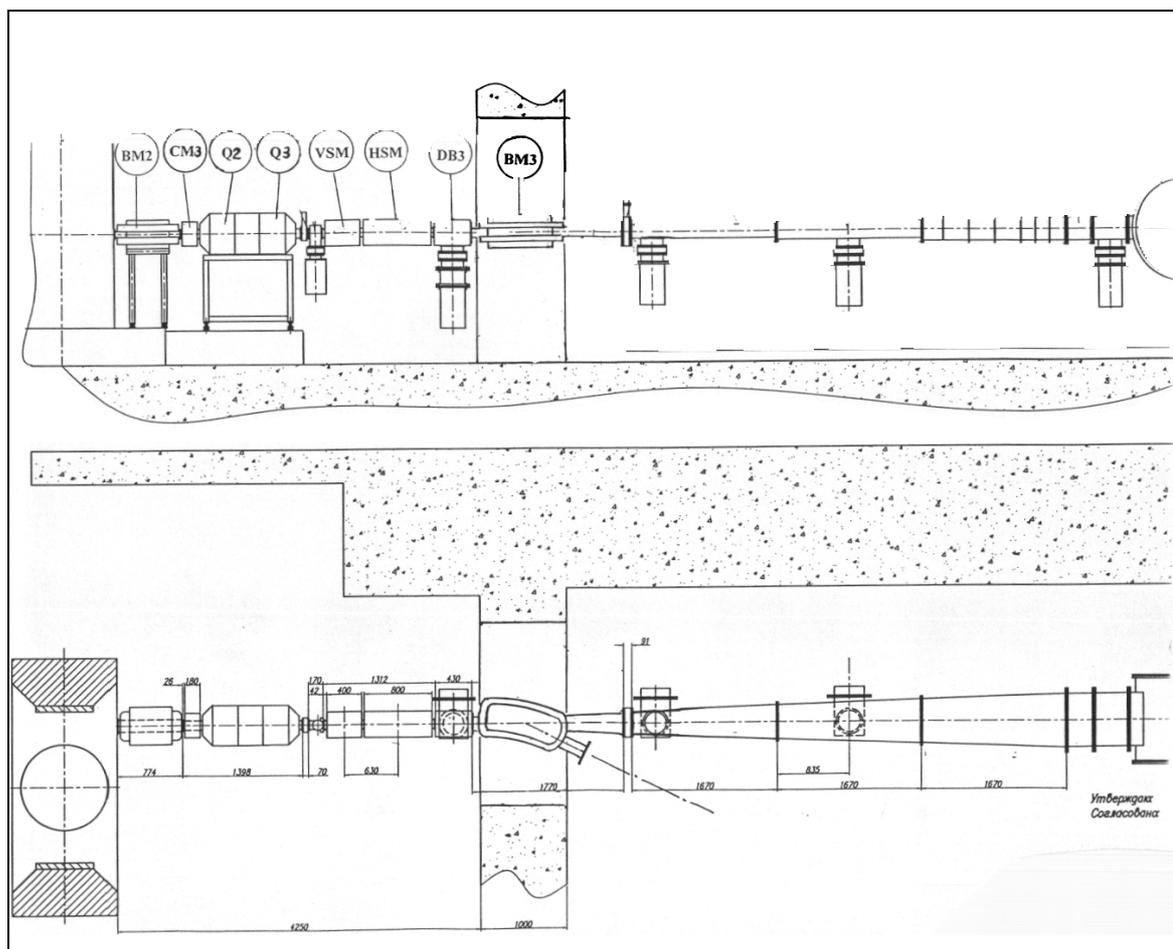


Рис. 3.28. Канал транспортировки выведенного пучка циклотрона ИЦ-100. BM2 – поворотный магнит, CM3 – корректирующий магнит, Q<sub>2</sub> и Q<sub>3</sub> – квадруполи, VSM – вертикальный сканирующий магнит, HSM – горизонтальный сканирующий магнит, DB3 – блок диагностики, BM3 – поворотный магнит

Система дифференциальной вакуумной откачки установлена вдоль канала транспортировки пучка (рис.3.29), что позволяет полностью разделить вакуумный объем циклотрона от устройства перемотки пленки. Дифференциальная система состоит из 4 турбонасосов и двух форвакуумных линий. Одна линия предназначена для первичной откачки системы после напуска атмосферы. Вторая линия используется для форвакуумной откачки турбонасосов. В конце линии транспортировки установлен вакуумная камера с механизмом для облучения пленки (рис.3.30, 3.31). Механизм перемотки пленки и система вакуумной откачки камеры, состоящая из трех турбонасосов, схематически изображены на рисунке 3.32.

В процессе перемотки пленки внутри барабана происходит сильное газоотделение. Для эффективной откачки водяных паров была разработана система криогенных панелей, состоящая из компрессора и развитой поверхности трубок глубокого охлаждения. Криозмеевик установлен на задней стенке камеры облучения (рис.3.32), что совместно с компрессором PFC550HC позволяет увеличить производительность откачки по парам воды до 50000 л/сек и тем самым на порядок улучшить вакуум внутри камеры облучения пленки.

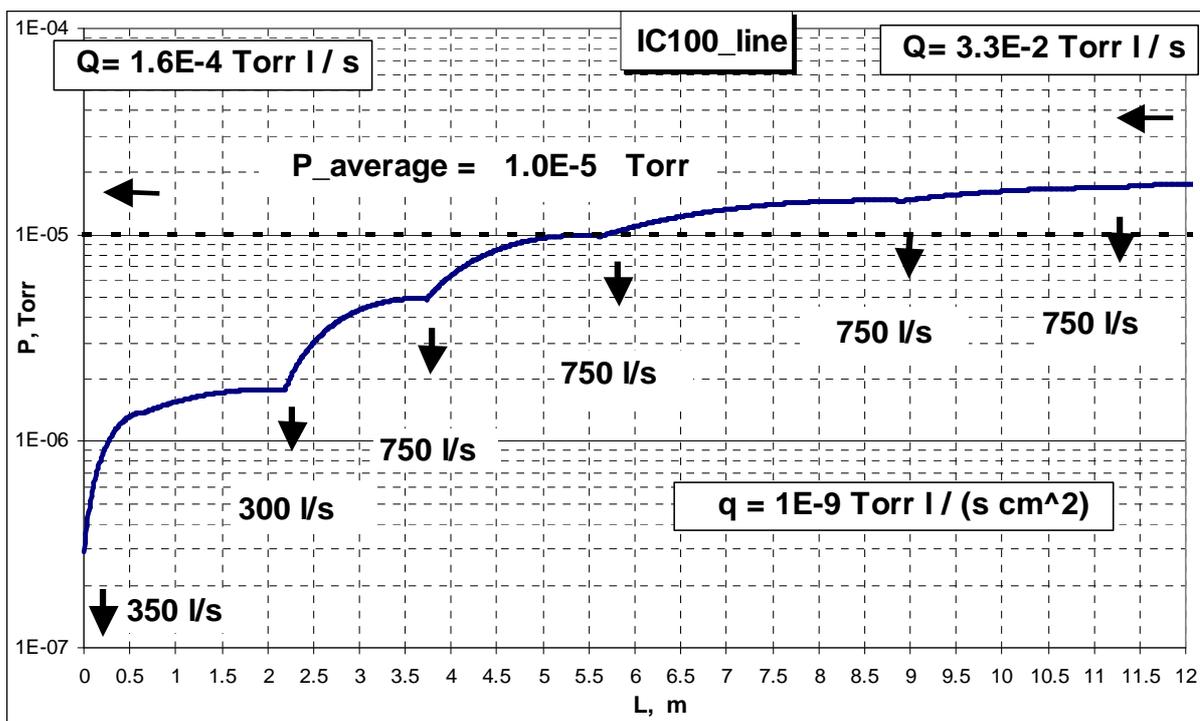


Рис.2.29. Распределение давления в канале при эффективных скоростях откачки вакуумных насосов 300 л/с и 4x750 л/с (среднее давление  $10^{-5}$  Торр); на насос вакуумной камеры циклотрона приходится дополнительная нагрузка 350 л/с вследствие газового потока из ионопровода  $Q=1,6 \cdot 10^{-4}$  Торр·л/с



Рис. 3.30. Канал транспортировки пучка к установке для облучения полимерных пленок.



Рис.3.31. Установка для облучения полимерной пленки.

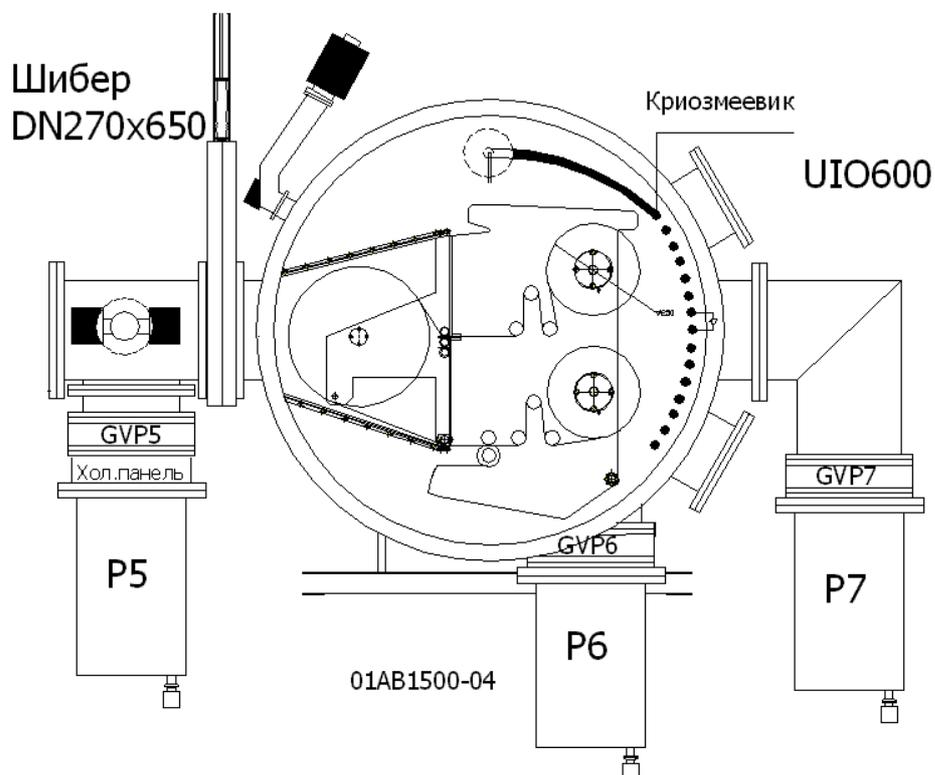


Рис.3.32. Камера для облучения полимерной пленки. Показаны механизм перемотки пленки, криозмеевик, а также высоковакуумные турбонасосы P5, P6, P7.

## Система сканирования

Ускоренные в циклическом имплантаторе ИЦ-100 ионы криптона планируется использовать для обработки поверхности пленки. Одним из основных требований к системе развертки пучка в данном режиме облучения является получение однородной плотности распределения пучка ионов на мишени.

Система сканирования пучка ионов криптона  $^{84}\text{Kr}^{15+}$ , выведенного из циклотрона ИЦ-100, состоит из двух отклоняющих устройств, создающих горизонтальное и вертикальное магнитные поля величиной  $\sim 350$  Гс, питающихся от генераторов пилообразного тока со строго фиксированными частотами  $f_x = 100$  Гц и  $f_y = 210$  Гц. В результате одновременной работы обоих генераторов центр масс пучка ионов «рисует» на мишени ( $300 \times 600$  мм) сетку, размеры ячейки которой определяются соотношением частот генераторов [174, 175].

Условия облучения мишени в выводном канале циклотрона ИЦ-100 следующие:

- ширина мишени  $a$  60 см;
- высота мишени  $b$  30 см;
- расстояние от отклоняющих устройств до мишени  $\sim 800$  см;
- а) мишень может быть неподвижной;
- б) мишень может двигаться со скоростью  $U$   $2 \div 100$  см/с;
- неоднородность засветки по всей площади мишени не должна превышать уровня  $\pm 10\%$ ;
- допустимые потери пучка до 10% (хорошо)  
до 50% (предельно допустимые)

Кроме того, в циклотроне в результате возможных электрических пробоев дуантов выведенный пучок ионов может прерываться на время до 0,3 секунды. При этом требуется, чтобы система развертки выведенного пучка обеспечила за время пробоя провал в распределении плотности пучка на мишени не более 50%.

Для решения этой задачи предлагается схема, состоящая из двух сканирующих магнитов, один из которых разворачивает пучок по линейному закону по горизонтали с частотой  $f_x$ , а другой по вертикали с частотой  $f_y$ .

## Расчет распределения плотности частиц на неподвижной мишени в зависимости от шага сетки

При одновременной работе вертикального и горизонтального отклоняющих магнитов центр пучка будет рисовать фигуры Лиссажу на плоскости мишени [174]. В результате, при линейной развертке по обеим координатам поверхность мишени окажется покрытой сетью прямоугольников с шагом  $h$  ( $h$  – диагональ прямоугольника). Характер изменения поля в магните для горизонтального отклонения пучка проиллюстрирован на рисунке 3.33. На рисунке 3.34 показаны фигуры Лиссажу на плоскости мишени, рассчитанные для  $f_x = 100$  Гц и  $f_y = 210$  Гц. Получились ячейки с шагом  $h_x \approx h_y = h = 3$  см. Время полного однократного облучения мишени  $\tau = 0,1$  секунды.

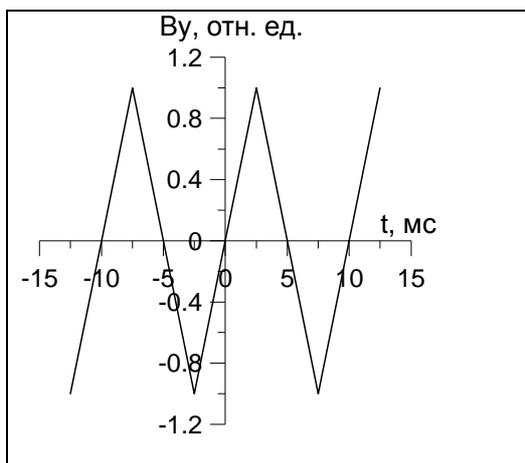


Рис. 3.33. Зависимость магнитного поля в сканирующем магните от времени.

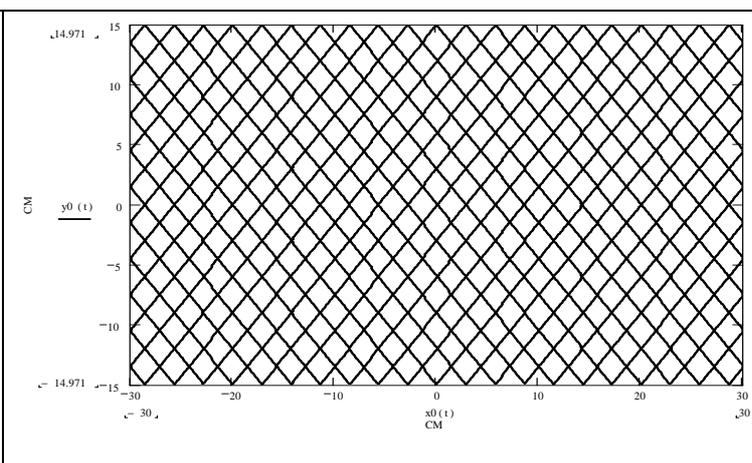


Рис. 3.34. Сетка облучения плоскости мишени при пилообразной форме магнитного поля в сканирующих магнитах,  $f_x = 100$  Гц и  $f_y = 210$  Гц.

### Облучение движущейся мишени

На рисунке 3.35 показан внешний вид системы сканирования пучка на канале облучения полимерной пленки [175]. На рисунке 3.36 показана осциллограмма тока в обмотке сканирующего магнита. Форма тока отличается от идеальной пилообразной формы.



Рис. 3.35. Система сканирования пучка циклотрона ИЦ-100

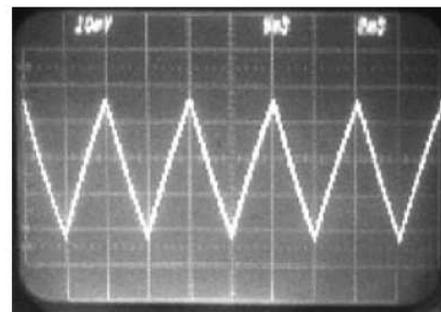


Рис.3.36. Осциллограмма тока сканирующего магнита.

Имеющаяся нелинейность токов в обмотках сканирующего магнита приводит к искажению сетки облучения, что заметно сказывается на степени однородности облучения ионами неподвижной мишени. В случае генератора ИЦ-110 максимальное отклонение производной по времени реального тока в обмотке от идеальной формы составляет  $\sim 12,4\%$ . на рисунке 3.37 приведен вид сетки облучения, получающейся с учетом нелинейности токов в обмотках сканирующих магнитов. Уменьшить неоднородность облучения до величины  $\pm 5\%$  можно, увеличив размер пучка до 80 мм в диаметре. В случае движущейся мишени неоднородность тока в обмотках магнитных сканеров сказывается гораздо меньше. Так, расчетная неоднородность плотности облучения при скорости 20 см/с составляет  $\pm 1,5\%$ .

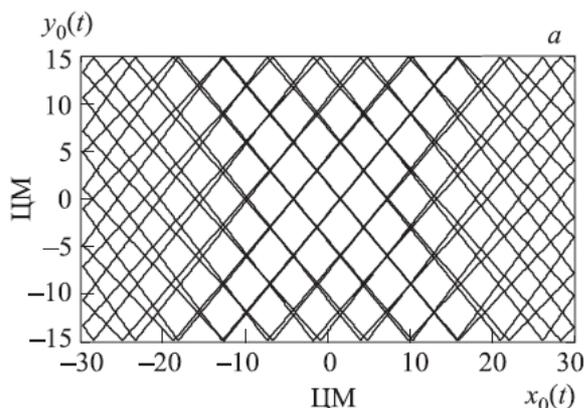


Рис. 3. 37. Сетка облучения, получающаяся с учетом нелинейности токов в обмотках сканирующих магнитов.

Расчеты также показали, что для различных скоростей движения мишени необходимо подбирать оптимальное соотношение между частотами  $f_x$  и  $f_y$ , при котором достигается необходимый уровень однородности облучения. /175/.

Для усиления эффекта сканирования в канале может быть применена дополнительная линза после сканирующего магнита (рис. 3.38) с квадрупольной составляющей магнитного поля в горизонтальном направлении /179/. Линза должна иметь большую апертуру. Схема такой линзы, примененной в канале ИЦ-100, и распределение магнитного поля в рабочей зоне линзы показаны на рисунке 3.39.

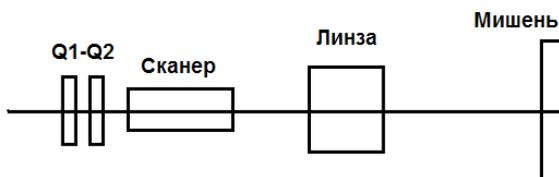


Рис. 3. 38. Схема канала с дополнительной линзой для усиления эффекта сканирования.

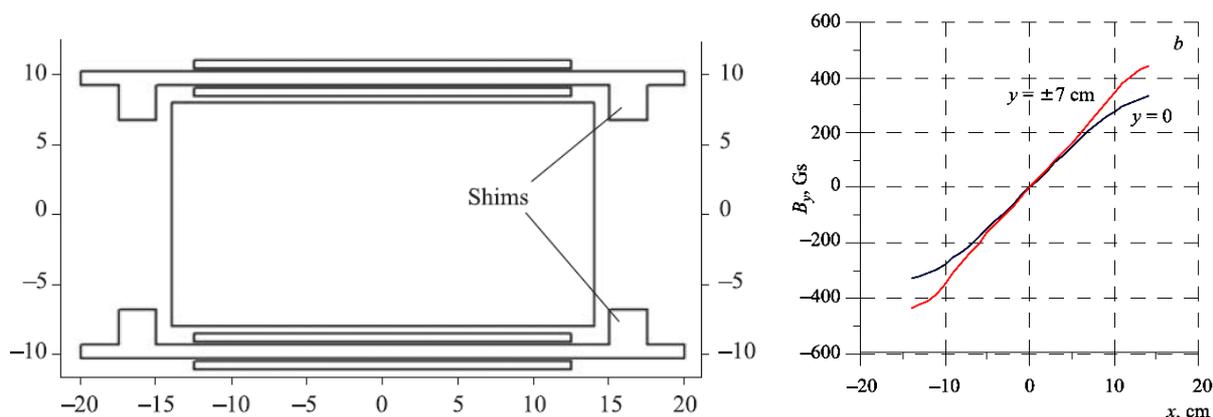


Рис. 3.39. Схема широкоапертурной линзы, примененной в канале ИЦ-100, и распределение магнитного поля в рабочей зоне линзы на оси и в плоскостях, смещенных на 7 см вверх и вниз.

### Стабильность пучка

В процессе облучения ядерных фильтров общий ток ионов контролируется датчиком тока пучка, установленным на выходе из циклотрона, с прозрачностью 90%. При однократном прохождении пленки обеспечивается проектная однородность отверстий порядка 10–20% как в поперечном, так и в продольном направлении. Если требуется

избежать влияния пробоев с дуантов или дефлектора для достижения более высокой однородности облучения, то производится многократное облучение пленки.

На рисунке 3.40 показана долговременная стабильность тока пучка на мишени в процессе облучения пленки при работающей системе сканирования [28, 95]. Для контроля интенсивности пучка в месте расположения мишени использовались два измерительных устройства, расположенных по бокам (справа и слева) от окна облучения. Каждое из измерительных устройств состоит из набора пяти боковых цилиндров Фарадея, вытянутых в вертикальную линейку. Эти устройства измеряют ток пучка, выходящего за зону окна облучения в результате сканирования. Особое внимание было уделено симметрии пучка и ликвидации перекосов тока. В частности в процессе облучения проводились измерения разности токов между правым и левым измерительными устройствами. Сигнал рассогласования использовался для подстройки элементов линии транспортировки

Сигналы с прозрачного датчика тока, установленного на выходе пучка из циклотрона, а также с боковых электродов, расположенных слева и справа от поля облучения, используются в системе обратной связи. Стабилизация тока пучка осуществляется путем варьирования тока соленоида S1 в линии инжекции. В течение цикла облучения (порядка 2–4 часов при вращении рулона пленки со скоростью 5–10 см/сек) неоднородность плотности отверстий в пленке составляет не более чем  $\pm 5\%$  [29].

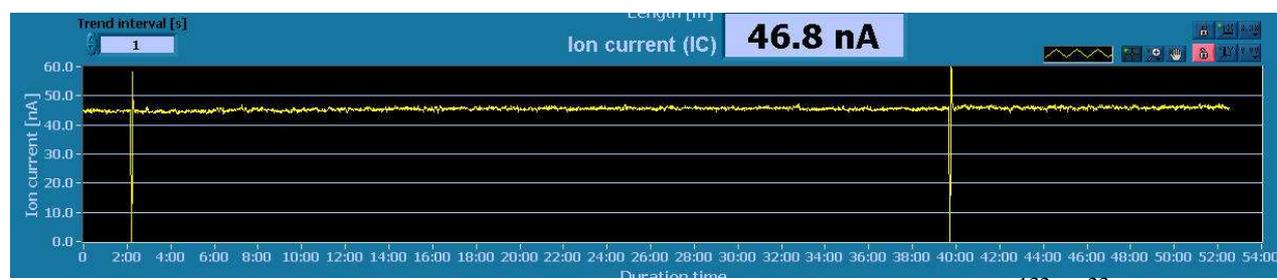


Рис. 3.40. Долговременная стабильность интенсивности пучка  $^{132}\text{Xe}^{23+}$ . Ток пучка измерялся на мишени, время облучения – 1 час.

В некоторых случаях требуется проводить облучение пучком низкой интенсивности. Для этой цели был создан монитор контроля плотности потока ускоренных частиц при облучении пленочных полимерных материалов тяжелыми ионами с плотностью треков от  $10^3$  до  $5 \cdot 10^7$  частиц/см<sup>2</sup>, основанный на регистрации протонов отдачи. Монитор предназначен для контроля облучения пленки шириной до 650 мм и состоит из пяти кремниевых PIN-диодов, перед каждым из которых размещается сменная водородосодержащая мишень. Средний ресурс монитора составляет  $10^8$  секунд непрерывной работы. Чувствительность монитора с полиэтиленовой мишенью к плотности пучка ионов ксенона линейна и составляет  $(4 \pm 0,5) \cdot 10^{-3}$  имп/(ион/см<sup>2</sup>). Монитор пригоден для контроля плотности потока ионов ниже  $10^6$  частиц/см<sup>2</sup>, когда токовые методы регистрации перестают работать. Монитор можно использовать на установке для определения плотности треков в готовом изделии, минуя стадию контроля на электронном микроскопе. Сигналы с монитора могут быть использованы для создания обратной связи в системе автоматической настройки пучка для улучшения качества облучения пленки [180].

## Заключение

Целью проекта глубокой модернизации циклотронного комплекса ИЦ-100 было расширение диапазона ускоряемых ионов в сторону более тяжелых масс, повышение интенсивности ускоренных пучков.

В ходе реконструкции на циклотроне ИЦ-100 созданы и установлены:

- внешний сверхпроводящий источник ионов,
- высокоэффективная система аксиальной инжекции пучка,
- электростатическая система вывода,

- специализированный канал и установка для облучения полимерной пленки,
- система вакуумной откачки на основе турбомолекулярных и криогенных насосов,
- новая система управления на базе микропроцессорной техники с подсистемами автоматического контроля и поддержания оптимального режима облучения.

На циклотронном комплексе ИЦ-100 после проведенной модернизации были получены интенсивные пучки тяжелых ионов Ne, Ar, Fe, Kr, Xe, I, W с энергией около 1–1,2 МэВ/нуклон.

Проведен ряд научных исследований по изучению свойств облученных кристаллов, проведено облучение различных полимерных пленок, изготовлены трековые мембраны в широком диапазоне изменения плотности отверстий – от  $5 \cdot 10^5$  до  $3 \cdot 10^8$  см<sup>-2</sup>. Циклотронный комплекс способен также решать и другие научно-прикладные задачи [10]. В оптимальных режимах настройки ускорителя была получена эффективность трансмиссии пучка, близкой к расчетной (табл.3.8). Параметры полученных пучков ионов от Ne до W приведены в таблице 3.9.

Табл. 3.8. Распределение интенсивности и эффективность транспортировки ионов при прохождении отдельных участков ИЦ-100.

Ток пучка (Коэффициент прохождения)	<sup>40</sup> Ar <sup>7+</sup> мкА (%)	<sup>86</sup> Kr <sup>15+</sup> мкА (%)	<sup>132</sup> Xe <sup>23+</sup> мкА (%)	Проектная эффектив- ность, %
Ток после анализирующего магнита (IFC2-диафрагма 20 мм)	78 (100%)	69 (100%)	25 (100%)	100%
Ток на входе в инфлектор (Эффективность транспортировки от анализирующего магнита до инфлектора)	48 (61%)	56 (81%)	20 (80%)	85%
Ток после инфлектора – перед входом в дуант. (Эффективность прохождения инфлектора)	22 (45%)	25 (45%)	15 (75%)	80%
Ток пучка на R=150 мм. (Фазовый захват без банчера)	(10%)	(9%)	~1,5 (10%)	10%
Ток пучка на R=150 мм. (Фазовый захват с банчером)	4,4 (20%)	3,9 (16%)	3,7 (25%)	30%
Ток пучка на R=400 мм. (Эффективность ускорения)	2,7 (61%)	2,6 (67%)	2,7 (72%)	70%
Ток после дефлектора. (Эффективность прохождения дефлектора).	1,9 (64%)	1,95 (73%)	2,1 (78%)	70%
Ток после магнитных каналов (Эффективность прохождения магнитных каналов).	1,2 (67%)	1,6 (72%)	1,841,9 (~80%)	80%
Ток в первом блоке диагностики канала транспортировки пучка. (Трансмиссия начального канала транспортировки пучка).	1,2 (99%)	1,6 (99%)	1,9 (99%)	99%
Ток пучка в установке для облучения пленки (Трансмиссия канала для облучения пленки)		1,5* (~90%)	1,8* (~95%)	99%
Суммарная эффективность транспортировки пучка от ионного источника до мишени.	~3%	~4%	7%	8%

\* - максимальный ток пучка, полученный на мишени, превышает 3 мкА

Табл. 3.9. Интенсивности пучков ионов, ускоренных и выведенных на циклотроне ИЦ-100

Элемент	Ион	A/Z	F <sub>Вч</sub> МГц	Ток пучка на мишени в проведенных экспериментах	Максимальный полученный ток пучка
Неон	$^{22}\text{Ne}^{+4}$	5,5	20.160	0,7 мкА	
Аргон	$^{40}\text{Ar}^{+7}$	5,714	20.200	2,5 мкА	
Железо	$^{56}\text{Fe}^{+10}$	5,6	20.240	0,5 мкА	
Криптон	$^{86}\text{Kr}^{+15}$	5,733	20.200	3,5 мкА	3,5 мкА
Йод	$^{127}\text{I}^{+22}$	5,773	20.200	0,25 мкА	
Ксенон	$^{132}\text{Xe}^{+23}$	5,739	20.180	3,7 мкА	3,7 мкА
Ксенон	$^{132}\text{Xe}^{+24}$	5,5	20.180	0,6 мкА	
Вольфрам	$^{182}\text{W}^{+32}$	5,6875	20.142	0,015 мкА	0,015 мкА
Вольфрам	$^{184}\text{W}^{+31}$	5,9355	20.142	0,035 мкА	0,035 мкА
Вольфрам	$^{184}\text{W}^{+32}$	5,75	20.142	0,017 мкА	0,017 мкА

## ГЛАВА 4. ЦИКЛОТРОН ТЯЖЕЛЫХ ИОНОВ ДЦ-60

В Лаборатории ядерных реакций ОИЯИ разработан и создан специализированный ускорительный комплекс на базе циклотрона ДЦ-60 для проведения научно-прикладных исследований и производства ядерных мембран. Комплекс был спроектирован и построен для междисциплинарного научно-исследовательского центра при Евразийском национальном университете им. Л.Н.Гумилева (г. Астана, Казахстан) [181, 182]. Важным направлением использования циклотрона стало также обучение студентов и аспирантов, непосредственно участвующих в экспериментах на физических установках.

### 4.1 Общее описание и компоновка циклотрона ДЦ-60

Циклотрон ДЦ-60 предназначен для получения пучков ускоренных ионов в широком диапазоне изменения масс от Li до Xe с энергиями (0,4–1,7 МэВ/нуклон). На ускорителе предусмотрена возможность проведения экспериментов в канале пучков тяжелых ионов низкой энергии, получаемых из ЭЦР источника с напряжением экстракции до 25 кВ (рис.4.1). Фотография циклотрона ДЦ-60 с каналами транспортировки пучков приведена на рисунке 4.2.

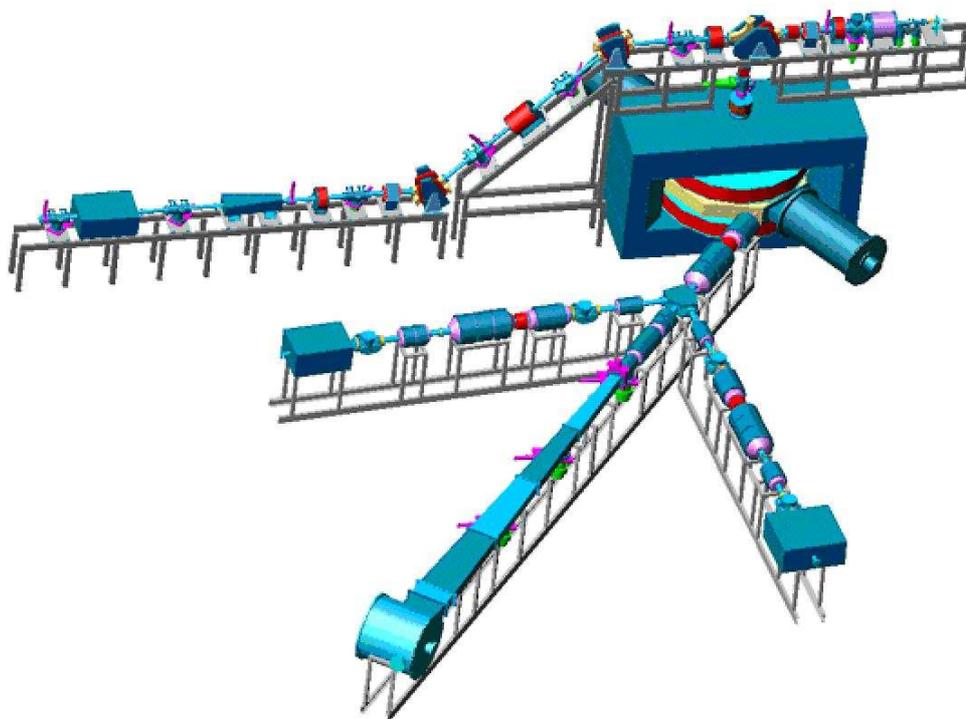


Рис. 4.1. Общий вид циклотрона и каналов инжекции и транспортировки пучков.

В состав ускорителя входят:

- магнит циклотрона,
- высокочастотная резонансная система и ВЧ генератор,
- вакуумная камера и система высоковакуумной откачки,
- ионный источник ЭЦР типа и система инжекции пучка,
- система диагностики и коррекции пучка,
- элементы вывода пучка,
- канал транспортировки пучка низких энергий,
- три канала транспортировки пучка ускоренных ионов,
- камеры для физических экспериментов, специализированная установка для облучения полимерной пленки,
- система водоохлаждения,
- система контроля и управления, электропитания.



Рис. 4.2. Циклотрон ДЦ-60. Вверху – линия инжекции, ЭЦР источник. Внизу – линии разводки пучков и канал трековых мембран. Вверху слева – канал низких энергий.

Основные параметры циклотрона ДЦ-60 приведены в таблице 4.1. На циклотроне используется внешняя инжекция пучка из ЭЦР источника. Магнитное поле циклотрона формируется четырьмя секторами с прямыми границами. Высокочастотная ускоряющая система состоит из двух  $\lambda/4$  резонаторов. Настройка частоты ВЧ системы осуществляется путем перемещения закорачивающих пластин внутри резонансных баков. Два дуанта угловой протяженностью около  $36^\circ$  расположены в долинах магнита и соединены друг с другом перемычкой. Питание ВЧ системы осуществляется от одного ВЧ генератора. Вывод пучка осуществляется электростатическим дефлектором и фокусирующим магнитным каналом. Энергия ускоренных частиц варьируется от 0,35 до 0,8 МэВ/нуклон при ускорении на 6-й гармонике и от 0,75 до 1,77 МэВ/нуклон при ускорении на 4-й гармонике [27, 32, 181, 182].

Табл. 4.1. Основные параметры циклотрона ДЦ-60.

<b>Ускоряемые ионы</b>	от Li до Xe
Диапазон ускоряемых ионов	$A/Z = 6-12$
Энергия ионов, МэВ/нуклон	0,35–0,8 (n=6); 0,75–1,77 (n=4)
Вариация энергии пучка в широком диапазоне	Изменение заряда ионов
Плавная вариация энергии пучка ( $\pm 25\%$ )	Изменение уровня поля
<b>Магнит</b>	
Диаметр полюса, мм	1620
Вес магнита, тонн	103,5
Магнитное поле, Тл	1,25 – 1,65
Количество секторов	4
Угловая протяженность сектора (спиральность)	$36^\circ - 50^\circ$ ( $0^\circ$ )
Поле между секторами, Тл	1,92
Поле в долине, Тл	1
Зазор между секторами, мм	33

Зазор между сектором и полюсом, мм	20
Зазор между полюсами, мм	176
Частота радиальных колебаний, $\nu_r$	1,04
Частота вертикальных колебаний $\nu_z$	0,45
Ток основной обмотки, А	330
Число ампер-витков	167 000
Мощность системы питания магнита, кВт	45
Стабильность тока основной обмотки	$4 \cdot 10^{-5}$
Корректирующие обмотки	6 пар
Вклад в поле от обмоток, Гс	70–100
Максимальный ток, А	15
Азимутальные обмотки	2 секции по 2 пары
<b>ВЧ система</b>	
Диапазон частот ВЧ, МГц	11÷17.4
Гармоники ускорения, n	4, 6
Количество дуантов, Угловая протяженность	2 (перемкнуты) 36°
Амплитуда напряжения, кВ	65
Мощность ВЧ системы, кВт	20 кВт
Стабильность частоты ВЧ	$10^{-6}$
Стабильность амплитуды ВЧ	$10^{-3}$
<b>ЭЦР источник</b>	
Частота СВЧ нагрева, ГГц	14.3
Мощность СВЧ нагрева, Вт	1000
Напряжение инъекции, кВ	11 - 25
Поле на оси, Тл	1,3 – 0,45 – 1,1
Материал гексаполя (hex)	NdFeB
Внешний диаметр hex, см	18
Внутренний диаметр hex, см	7
Длина hex, см	20
Магнитное поле (R=3,2см), Тл	~1,1
Диаметр плазменной камеры	6,4 см
Длина плазменной камеры	22 см
Количество катушек	2 (по 5 секций)
Номинальный ток, А	1000
Номинальная мощность, кВт	70
Число ампер-витков	100 000
Ток ионов из источника, мкА	20 – 100
Эмиттанс пучка после сепарации в АМ, мм·мрад	120 – 140 $\pi$ (RMS)
<b>Канал инъекции</b>	
Магнит АМ-90: - магнитное поле, кГс - межполюсный зазор, мм	1,4 100
Соленоид IS1, магнитное поле, кГс	4.4
Квадруполь IQ1, градиент магнитного поля, Гс/см	-4,0
Соленоид IS2, магнитное поле, кГс	1,9
Соленоид IS3, магнитное поле, кГс	2,1
Акцептанс канала, мм·мрад	160 $\pi$
<b>Спиральный инфлектор</b>	
Магнитный радиус - вариант «А», мм - вариант «В», мм	29 (A/Z = 6 - 12) 35 (A/Z = 8–12)

Электрический радиус, мм	25
Зазор между электродами, мм	10
Напряжение на электродах, кВ	$\pm 7,5$ (вариант А) / $\pm 5$ (вариант В)
<b>Банчер</b>	одноззорный
Амплитуда напряжения, В	240
Зазор между сетками, мм	8
Расстояние до медианной плоскости, см	200
<b>Электростатический дефлектор</b>	
Макс.напряжение, кВ	60 кВ
Зазор/высота пластины, мм	10/50 мм
Азимутальная протяженность дефлектора	$34^\circ$
Толщина септума, мм	0,3 мм
<b>Магнитный канал</b>	пассивный
Азимутальная протяженность МК	$28^\circ$
Градиент, кГс/см	3,5 - 4
Апертура для пучка, мм	25×15
Эмиттанс выведенного пучка, $\epsilon_r / \epsilon_z$ , мм·мрад	$15\pi / 18\pi$
<b>Вакуум</b>	
Тип насосов	криогенные и турбомолекулярные
Суммарная скорость откачки, л·с <sup>-1</sup>	12300
Рабочий вакуум в камере циклотрона, Торр	$8 \cdot 10^{-8}$
<b>Начальный участок канала транспортировки ускоренного пучка</b>	TSM+Q1+Q2
Длина линии, м	3,4
Угол коррекции магнита вывода	$\pm 2,5^\circ$
Макс. магнитное поле магнита вывода, кГс	1,1
Градиент линз Q1,2, Гс/см	600
Эффективная длина Q1,2, мм	300
Коммутирующий магнит	0, $\pm 30^\circ$
Поле в коммутирующем магните, кГс	8,6
Зазор в коммутирующем магните, мм	80
<b>Канал 1 для получения полимерной пленки</b>	
Длина канала, м	14,4
Длина сканирующих магнитов (гориз./верт.), мм	800 /400
Частота сканирования (гориз./верт.), Гц	80–150 / 160-250
Площадь облучения, мм <sup>2</sup>	600×220
Амплитуда поля в магните сканирования, Гс	400
Однородность, %	$\pm 5$
<b>Канал 2</b>	Стационарная мишень
Длина канала, м	4
Градиент линз (Т2Q3,4), Гс/см	600
Эффективная длина линз (Т2Q3,4), мм	300
<b>Канал 3</b>	Стационарная мишень
Длина канала, м	5
Длина сканирующих магнитов (гориз./верт.), мм	400 /400
Частота сканирования, Гц	90/100
Площадь облучения, мм <sup>2</sup>	50×50
Амплитуда поля в сканере, Гс	500
Однородность, %	$\pm 5$
Градиент линз (Т3Q3,4), Гс/см	600

Эффективная длина линз (ТЗQ3,4), мм	300
<b>Канал низкой энергии</b>	
Длина канала, м	9,6
Система анализирующих магнитов (АМ)	2 магнита по 45°
Поле АМ, кГс	2,7
Поле соленоида АS2, кГс	3,3
Эффективная длина АS2, мм	204
Поле соленоида АS3, кГс	5
Эффективная длина АS3, мм	513
Поле соленоида АS4, кГс	5
Эффективная длина АS4, мм	134
Длина сканирующих магнитов (гориз./верт.), мм	200 /200
Частота сканирования (горизонт./верт.), Гц	90 /100
Площадь облучения, мм <sup>2</sup>	80×80
Амплитуда поля в сканирующем магните, Гс	300
Однородность, %	±10

Запуск и отладка ускорителя проводились на пучках ионов  $^{14}\text{N}^{2+}$  и  $^{84}\text{Kr}^{12+}$ . Контрольное облучение пленки для последующего изготовления трековых мембран было проведено ионами криптона.

## 4.2 ЭЦР источник

Циклотрон ДЦ-60 оснащен системой внешней аксиальной инжекции пучка и ЭЦР источником тяжелых ионов, позволяющим получать интенсивные пучки многозарядных ионов большинства элементов Периодической таблицы Д.И.Менделеева.

В ЛЯР ОИЯИ был разработан и создан ЭЦР источник ионов DECRIS-3 с уровнем аксиального поля до 1,3 Тл и частотой СВЧ нагрева 14,3 ГГц [97, 101]. Общий вид источника показан на рисунках 4.3, 4.4. Источник ионов DECRIS-3 показал себя эффективным и надежным в эксплуатации.

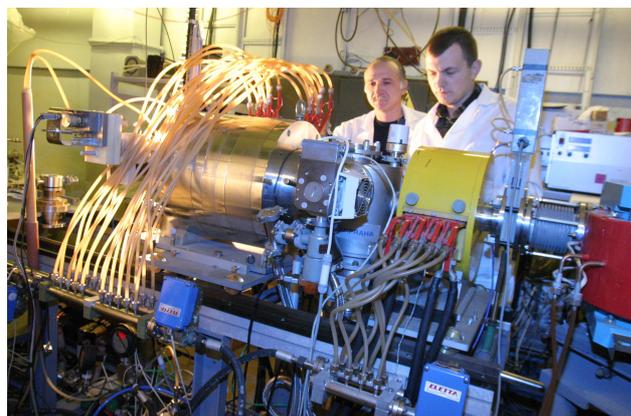


Рис. 4.3. Внешний вид ЭЦР источника DECRIS-3.

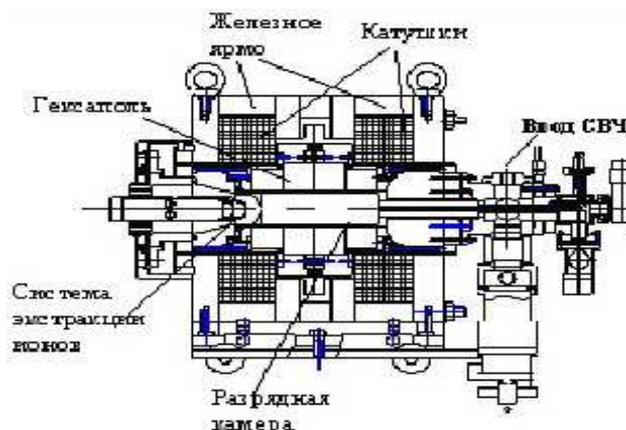


Рис. 4.4. Схема ЭЦР источника ионов DECRIS-3.

Аксиальная компонента магнитного поля создается медными охлаждаемыми катушками с током до 1000 А, помещенными в железное ярмо специальной конфигурации. Радиальная компонента магнитного поля создается гексаполем из постоянных магнитов (материал NdFeB). Конструкция гексаполя была оптимизирована, чтобы повысить радиальную компоненту поля в районе стенки разрядной камеры до 1 Тл. Ввод СВЧ мощности – через высоковольтный изолятор и вакуумное окно. Подача газообразных и твердых веществ производится по оси разрядной камеры, находящейся под потенциалом до 25 кВ. Система экстракции пучка из источника состоит из плазменного электрода,

расположенного на выходе из ионизационной камеры, перемещающегося пулера и заземленного электрода.

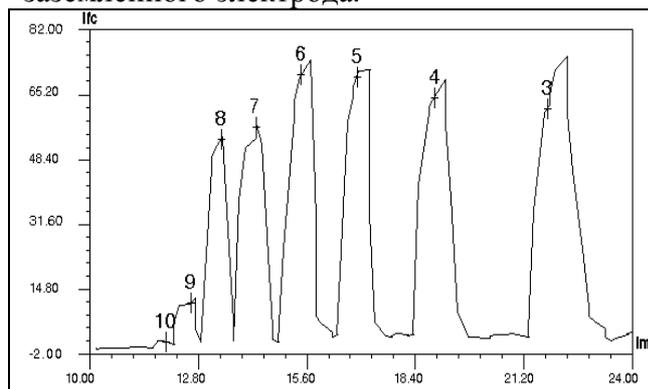


Рис.4.5. Спектр ионов Ar из ЭЦР источника DECRIS-3. Напряжение экстракции 11,3 кВ. СВЧ мощность 260 Вт

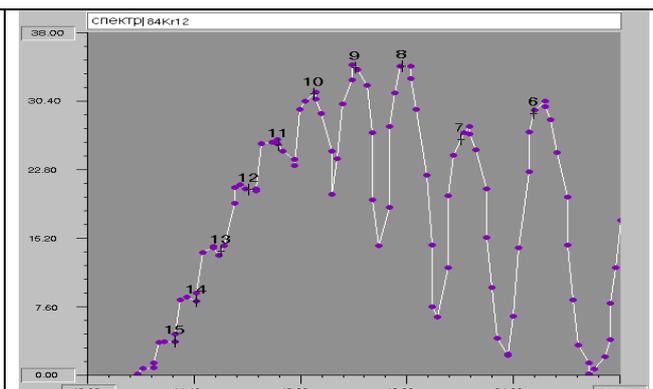


Рис. 4.6. Спектр ионов Kr из ЭЦР источника DECRIS-3. Напряжение экстракции 12,1 кВ. СВЧ мощность 300 Вт

В процессе запуска циклотрона ДЦ-60 были измерены спектры ионов аргона (рис. 4.5) и криптона (рис. 4.6) в канале аксиальной инжекции (рис. 4.7) после анализирующего магнита IM90. После сепарации и коллимации инжектируемого пучка ток ионов  $^{40}\text{Ar}^{+7}$  составил 48 мкА, ток пучка ионов  $^{84}\text{Kr}^{+12}$  – 18 мкА. Это близко к проектным значениям интенсивности указанных ионов из ЭЦР источника. Ионный источник обладает значительным запасом по интенсивности инжектируемых пучков тяжелых ионов и позволяет в широких пределах регулировать ток пучка на мишени. Управление ЭЦР источником осуществляется с панели управления циклотрона ИЦ-100.

### 4.3 Система аксиальной инжекции пучка

Канал аксиальной инжекции пучка циклотрона ДЦ-60 предназначен для транспортировки ионов из ЭЦР источника до входа в спиральный инфлектор. Линия позволяет инжектировать ионы большинства элементов от Li до Xe [27, 32, 181, 182].

Основными ионно-оптическими элементами канала являются фокусирующие соленоиды IS1-IS2-IS3, корректирующая квадрупольная линза IQ1, анализирующий магнит IM-90 и корректирующие дипольные магниты ICM1-ICM2 (рис.4.7). Ионно-оптическая система обеспечивает транспортировку пучков с минимальными потерями и согласование параметров инжектируемых пучков с аксептансом инфлектора. Моделирование канала было выполнено методом крупных частиц с помощью библиотеки программ MCIB04 [105]. В расчетах учитывалось собственное поле пучка ионов.

На рисунке 4.8 показаны огибающие пучка ионов криптона  $^{84}\text{Kr}^{12+}$  вдоль канала инжекции от выхода из ЭЦР источника до входа в инфлектор. Эффективность транспортировки близка к 100%. На стенде ЭЦР источников ЛЯР ОИЯИ были измерены параметры пучков из источника DECRIS-3. Среднеквадратичный эмиттанс (RMS) ионов  $^{40}\text{Ar}^{+7}$ ,  $^{84}\text{Kr}^{12+}$  после сепарации в анализирующем магните составил  $\epsilon \sim 120 \div 140 \pi$  мм·мрад ( $\epsilon_{\text{норм}} \sim 0,25 \pi$  мм·мрад), что не превышает пропускную способность линии внешней инжекции ДЦ-60. Аксептанс канала составляет около  $A \sim 160 \pi$  мм·мрад ( $A_{\text{норм}} \sim 0,3 \pi$  мм·мрад).

Максимальные величины индукции поля в магните IM90, поля  $B_{\text{max}}$  в соленоидах IS1-3 и градиента  $G$  в квадрупольной линзе IQ1 при транспортировке ионов различных элементов приведены в таблице 4.1.

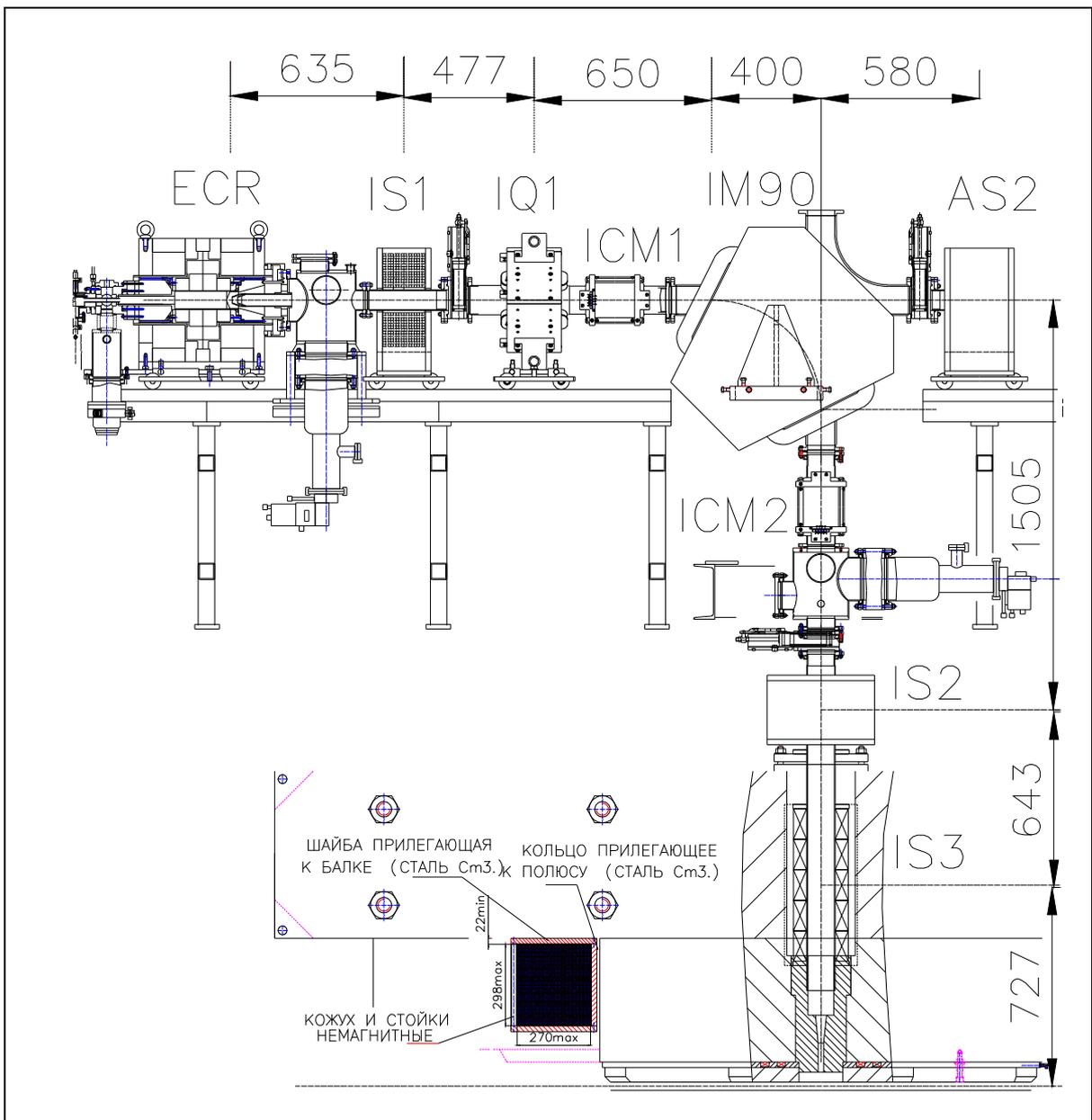


Рис. 4.7. Схема канала. ECR источник, IS1-3 – фокусирующие соленоиды, IQ1-квадрупольная линза, IM90 –анализирующий магнит, ICM1,2 –корректирующие магниты.

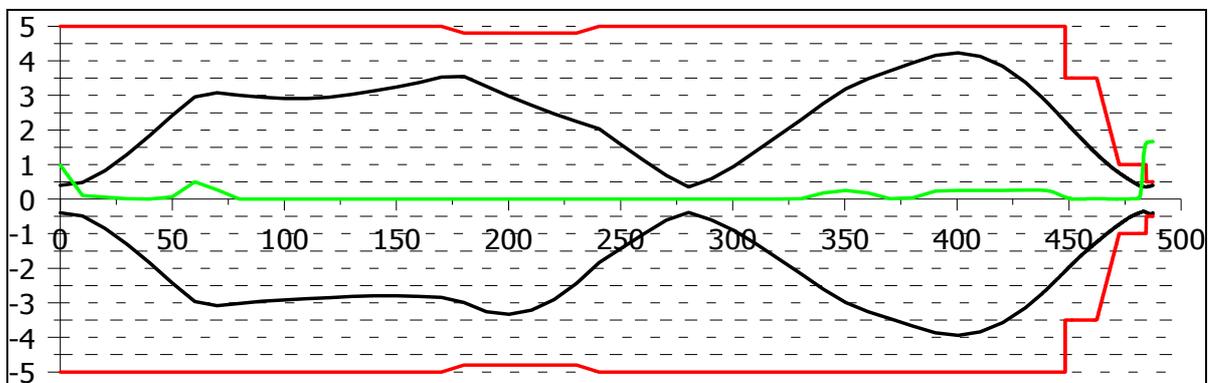


Рис.4.8. Огибающие пучка ионов  $^{84}\text{Kr}^{12+}$  в канале инжекции. Размеры даны в сантиметрах.

### *Инфлектор*

Инжектируемый пучок ионов поворачивается из аксиального канала в медианную плоскость циклотрона с помощью спирального инфлектора. Входное окно инфлектора циклотрона ДЦ-60 имеет прямоугольную форму с апертурой 10×20 мм. Для обеспечения оптимальных условий инжекции пучка в широком диапазоне изменения  $A/Z$  в циклотроне ДЦ-60 используются два варианта инфлектора с магнитными радиусами  $\rho_m=29$  мм и  $\rho_m=35$  мм. Электрический радиус инфлектора в обоих вариантах равен 25 мм.

На этапе исследования параметров циклотрона ДЦ-60 не было зафиксировано каких-либо заметных потерь интенсивности пучка при прохождении инфлектора. При облучении пленок необходимо обеспечить долговременную стабильность тока пучка на мишени. В частности, необходимо было минимизировать пробой напряжения на таких высоковольтных элементах ускорителя, как инфлектор и дефлектор. В конструкции спирального инфлектора циклотрона ДЦ-60 [78, 79] изоляторы экранированы от прямого попадания пучка и распыленного материала (рис.4.9). Таким образом, в несколько раз была увеличена продолжительность цикла эксплуатации инфлектора между регламентными работами.

### *Система группирования пучка*

Согласно расчетам фазовый акцептанс циклотрона ДЦ-60 составляет  $\sim 30^\circ$  ВЧ напряжения. Расчетная интенсивность ускоренных ионов без включения системы группирования пучка не превышает 8% от тока инжектируемого пучка. Система банчировки с использованием синусоидального банчера на первой гармонике высокочастотной ускоряющей системы позволяет увеличить плотность частиц в диапазоне фаз, ускоряемых в циклотроне, и тем самым увеличить эффективность захвата примерно в три раза. В блоке диагностики канала аксиальной инжекции установлен одноззорный банчер, состоящий из двух параллельных сеток, натянутых на прямоугольные рамки размером 80×80 мм, с зазором между сетками 8 мм (рис.4.10) [27]. На сетки подается противофазное синусоидальное напряжение. Амплитудное значение напряжения в зазоре не превышает 240 В. Частота ВЧ поля в банчере совпадает с частотой резонансной системы циклотрона и может перестраиваться от 11 до 17,4 МГц. Импульсный разброс в пучке после банчера не превышает 1,5%.

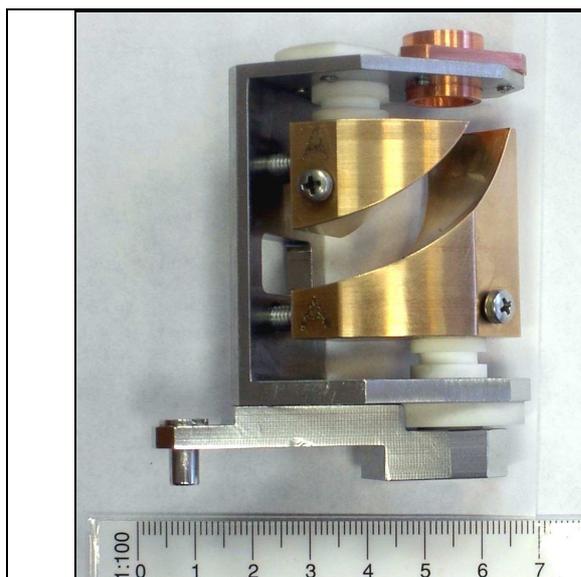


Рис.4.9. Спиральный инфлектор циклотрона ДЦ-60.



Рис.4.10. Одноззорный банчер циклотрона ДЦ-60.

В процессе запуска циклотрона была исследована работа системы банчировки. Эффективность захвата ионов  $^{84}\text{Kr}^{12+}$  в режим ускорения увеличивается с 5,5% для не-сгруппированного пучка до 15% для сгруппированного пучка, то есть в 2,7 раза, что близко к расчетным значениям.

В тестовом режиме были проведены измерения зависимости интенсивности ускоренного пучка ионов  $^{14}\text{N}^{2+}$  при включенном банчере от тока инжекции (рис.4.11). Ток инжектируемого пучка измерялся на цилиндре Фарадея, установленном в блоке диагностики линии инжекции ДЦ-60. Ток ускоренного пучка измерялся пробником, расположенным на радиусе вывода. Эффективность банчировки ионов  $^{14}\text{N}^{2+}$  в зависимости от тока инжектируемого пучка приведена на (рис.4.12). Коэффициент группирования определялся по отношению тока ускоренного пучка с включенным банчером к току ускоренного пучка при выключенном банчере. Эффективность группирования уменьшается с 3,2 до 2,6 с ростом тока инжектируемого пучка ионов азота от 40 до 100 мкА, что вызвано влиянием пространственного заряда в продольном направлении [32, 42, 41, 78, 79].

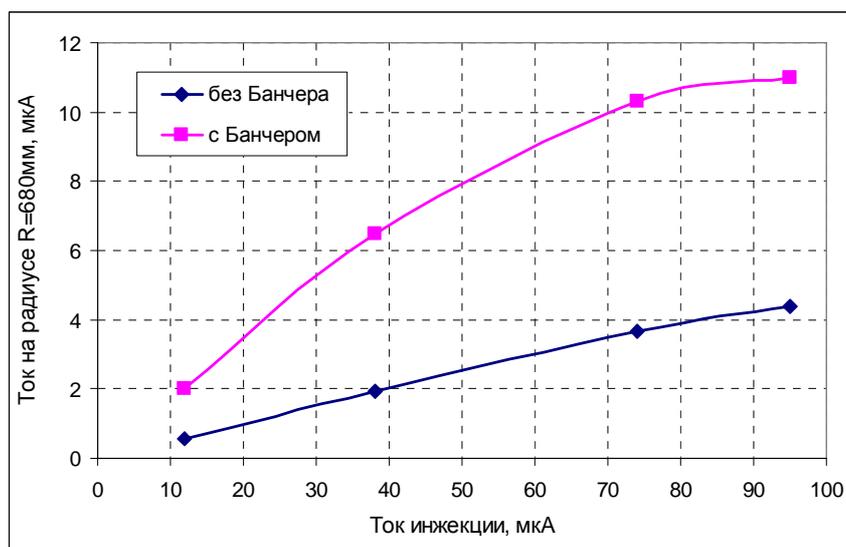


Рис. 4.11. Ток ускоренного пучка ионов  $^{14}\text{N}^{2+}$  в зависимости от интенсивности инжектируемого пучка.

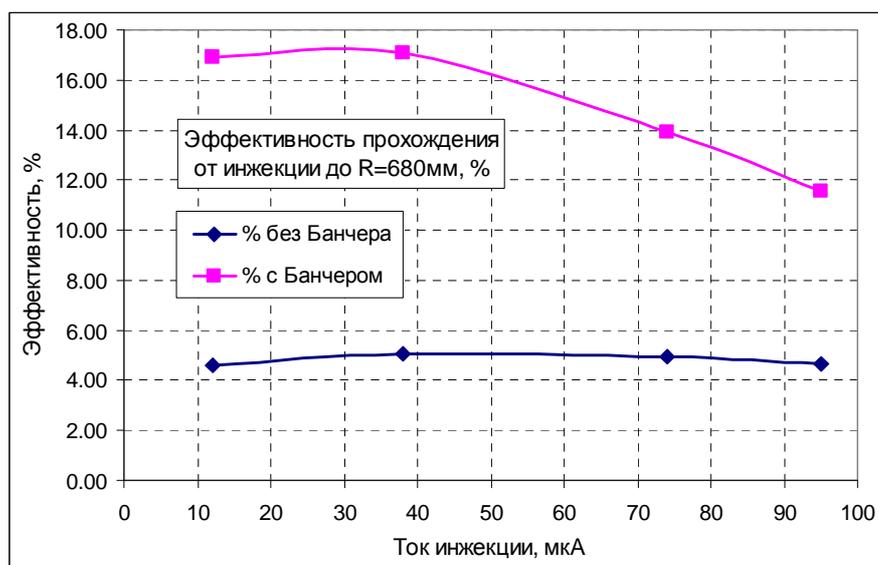


Рис. 4.12. Эффективность ускорения ионов  $^{14}\text{N}^{2+}$  с выключенным и включенным банчером в зависимости от тока инжектируемого пучка.

#### 4.4 Магнитная структура

Циклотрон ДЦ-60 разработан для ускорения пучков ионов от углерода до ксенона с энергией от 0,35 до 1,77 МэВ/нуклон. На циклотроне предусмотрено дискретное изменение энергии ускоренных ионов путем изменения заряда ускоряемых ионов, а также возможность плавной вариация энергии ионов за счет изменения магнитного поля в диапазоне от 1,25 до 1,65 Тл. Основой циклотрона служит Ш-образный магнит (рис.4.13), в котором сформировано магнитное поле для ускорения пучков ионов с отношением массы к заряду от 6 до 12 [108, 112, 113, 133, 136].

##### *Основные параметры электромагнита циклотрона ДЦ-60*

Геометрия магнитопровода, полученная в ходе компьютерного моделирования, легла в основу рабочего проекта магнита ДЦ-60. В ходе проектирования была проведена компоновка циклотрона и согласование всех его систем и узлов.

В рабочем зазоре магнита размещены четыре пары секторов без спиральности. Каждый сектор оснащен боковыми съемными шиммами, которые являются частью секторной сборки. Азимутальная или вертикальная обработка боковых секторных шимм позволяет вносить необходимую коррекцию в распределение магнитного поля в процессе окончательного формирования изохронных условий ускорения. В циклотроне между секторами и полюсом расположены две сборки азимутальных корректирующих катушек и шесть пар радиальных, позволяющих при изменении режима ускорения циклотрона оперативно подстраивать магнитное поле. Основные параметры магнита циклотрона ДЦ-60 сведены в таблицу 4.2.

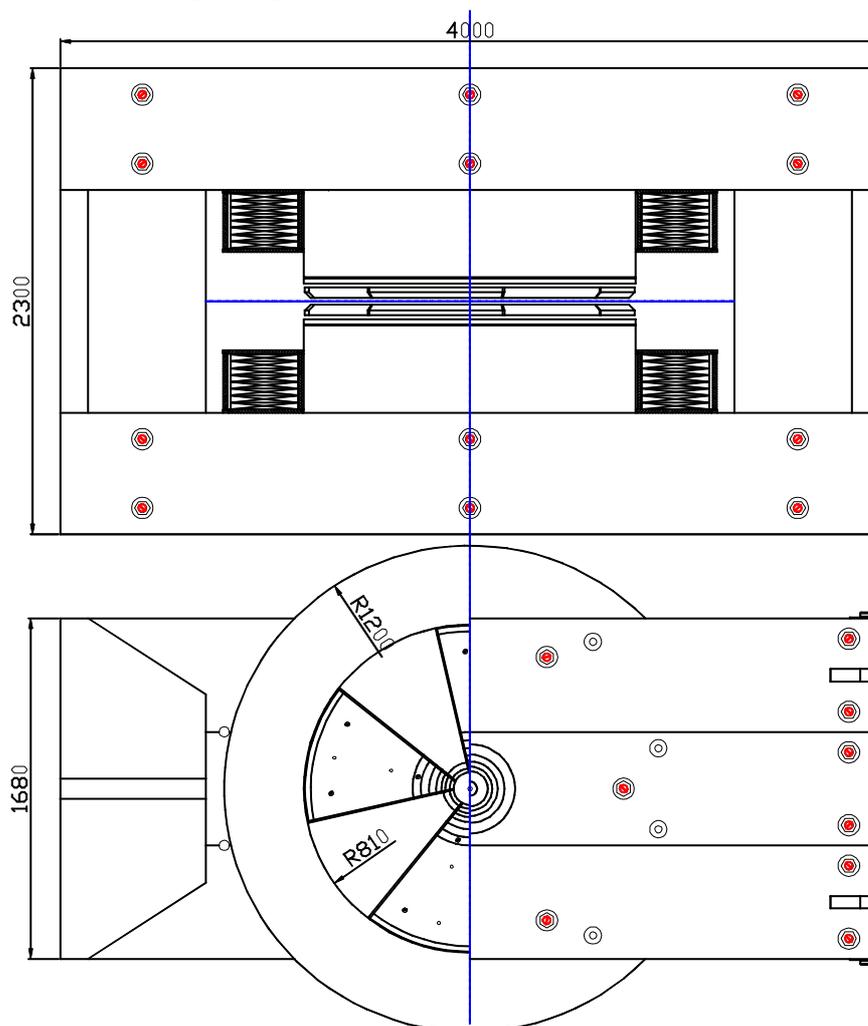


Рис. 4.13. Вид электромагнита циклотрона ДЦ-60.

Таблица 4.2. Параметры электромагнита циклотрона ДЦ-60.

Размер магнитопровода, Д×Ш×В, мм	4000×1680×2300
Диаметр полюса, мм	1620
Межполюсной зазор, мм	176
Количество пар секторов	4
Угловая протяженность сектора (спиральность)	52° ( 0° )
Высота сектора, мм	51.5
Зазор между секторами, мм	33
Зазор между сектором и полюсом, мм	20
Зазор между центральными пробками, мм	88 (минимальный)
Количество радиальных корректирующих катушек	6
Количество азимутальных корректирующих катушек	2
Масса электромагнита, [т]	103,5

#### 4.4.1 Расчет и моделирование магнитной структуры.

##### Рабочая диаграмма циклотрона ДЦ-60

Рабочая диаграмма, представленная на рис. 4.14, связывает среднее магнитное поле в центре циклотрона, энергию пучка на радиусе вывода, частоту обращения ионов и кратность ускоряющего ВЧ поля [78, 133, 136]. На диаграмме линиями dB(B) показана величина необходимого роста среднего магнитного поля от центра циклотрона до конечного радиуса для выполнения условия синхронизма ускорения ионов. Кружками на диаграмме обозначены точки на границе рабочей области циклотрона.

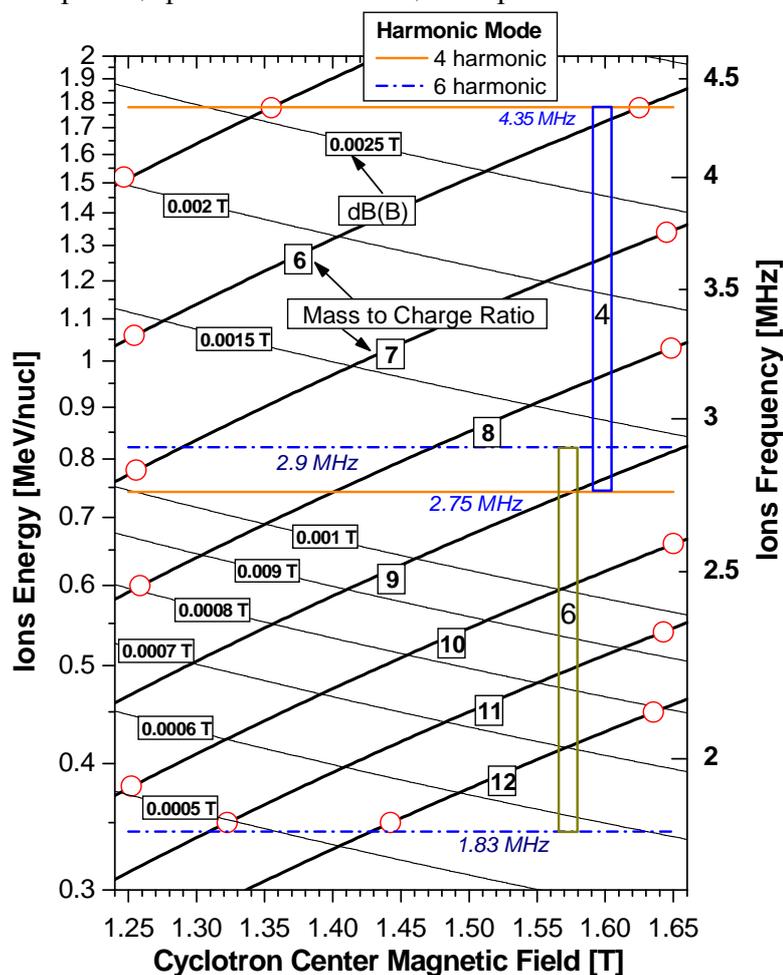


Рис. 4.14. Рабочая диаграмма циклотрона ДЦ-60.

В середине диапазона регулирования выбрана номинальная рабочая точка с магнитным полем 1,43 Тл. Изохронное поле сформировано только за счет железных масс для ускорения частиц с отношением массы к заряду  $A/Z=7$ . В остальных режимах предполагается использование радиальных корректирующих катушек для достижения изохронного режима ускорения. В электромагните циклотрона ДЦ-60 используются шесть радиальных корректирующих катушек. Каждая катушка состоит из двух частей, расположенных на верхнем и нижнем полюсах. На полюсе корректирующие катушки большего радиуса расположены более плотно по отношению к катушкам, установленным в центре циклотрона (рис. 4.15) (радиальное расположение катушек по квадратичному закону), что обеспечивает оптимальные условия формирования изохронного распределения магнитного поля по радиусу. Вторая и шестая катушки имеют независимые источники питания верхней и нижней части и могут выполнять функцию коррекции магнитной медианной плоскости при их асимметричном включении. Для оперативной коррекции первой гармоники магнитного поля используются две сборки азимутальных корректирующих катушек, расположенных в долинах.

Радиальные и азимутальные катушки на каждом полюсе конструктивно объединены в блоки, представляющие собой алюминиевые диски, размещенные в пространстве между полюсом и секторами. Максимальный рабочий ток корректирующих обмоток 15 А, стабильность источника тока  $10^{-4}$ . При этом выделяемая суммарная мощность на каждый блок составляет примерно 650 Вт. Выделяемое тепло с каждого алюминиевого диска отводится посредством размещенных по поверхности диска трубок – каналов водяного охлаждения. На рисунке 4.15 представлено расположение корректирующих катушек в диске.

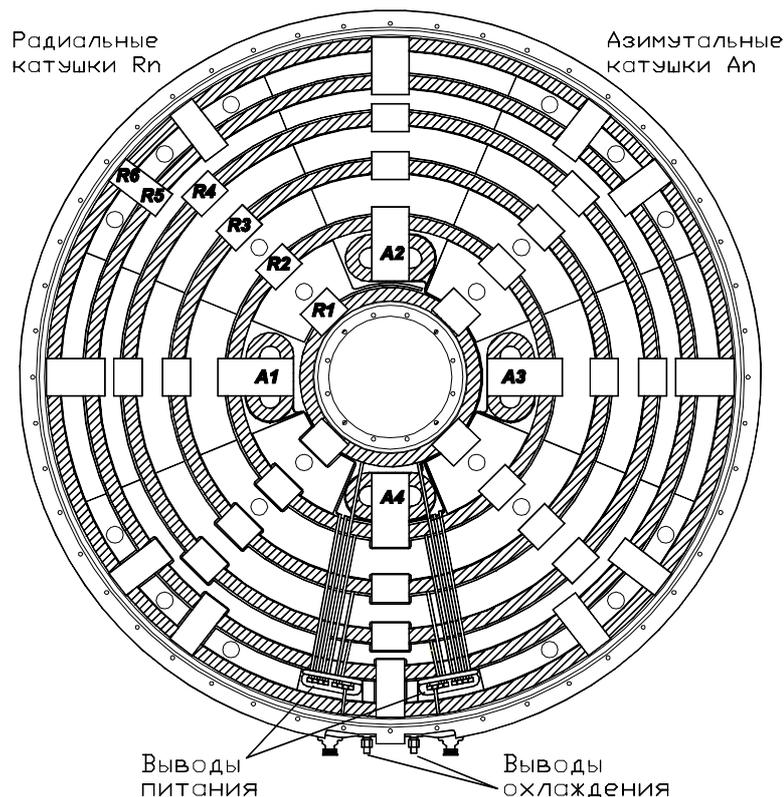


Рис. 4.15. Расположение корректирующих катушек в полюсном диске.

Таблица 4.3. Основные параметры радиальных корректирующих обмоток.

Номер обмотки	1	2в	2н	3	4	5	6в	6н
Кол-во витков в обмотке	2×40	40	40	2×40	2×40	2×40	40	40
Средний радиус, мм	179	335	335	455	558	637	718	718
Максимальный ток, А	15	15	15	15	15	15	15	15
Мощность на полюс, Вт	38	71	71	97	118	135	152	152

## Использование расчетов для формирования магнитного поля циклотрона ДЦ-60

Предварительное формирование магнитного поля циклотрона осуществлялось посредством аналитического анализа и численных расчетов. Аналитический анализ, основанный на опыте ЛЯР ОИЯИ в разработке циклотронов [114], позволил в первом приближении получить основные характеристики и размеры проектируемого электромагнита. Результаты анализа были использованы для компьютерного моделирования, проведения конструкторской проработки и согласования основных элементов магнитопровода.

Численные расчеты и моделирование проведены в тесном сотрудничестве с расчетной группой НИИЭФА на базе программного комплекса КОМПОТ [64-66], позволяющего получать трехмерное распределение магнитного поля.

На рисунке 4.16 приведен пример расчета распределения магнитного поля в элементах магнитопровода при максимальном уровне поля в рабочем зазоре. Представлена четверть вертикального сечения магнитопровода.

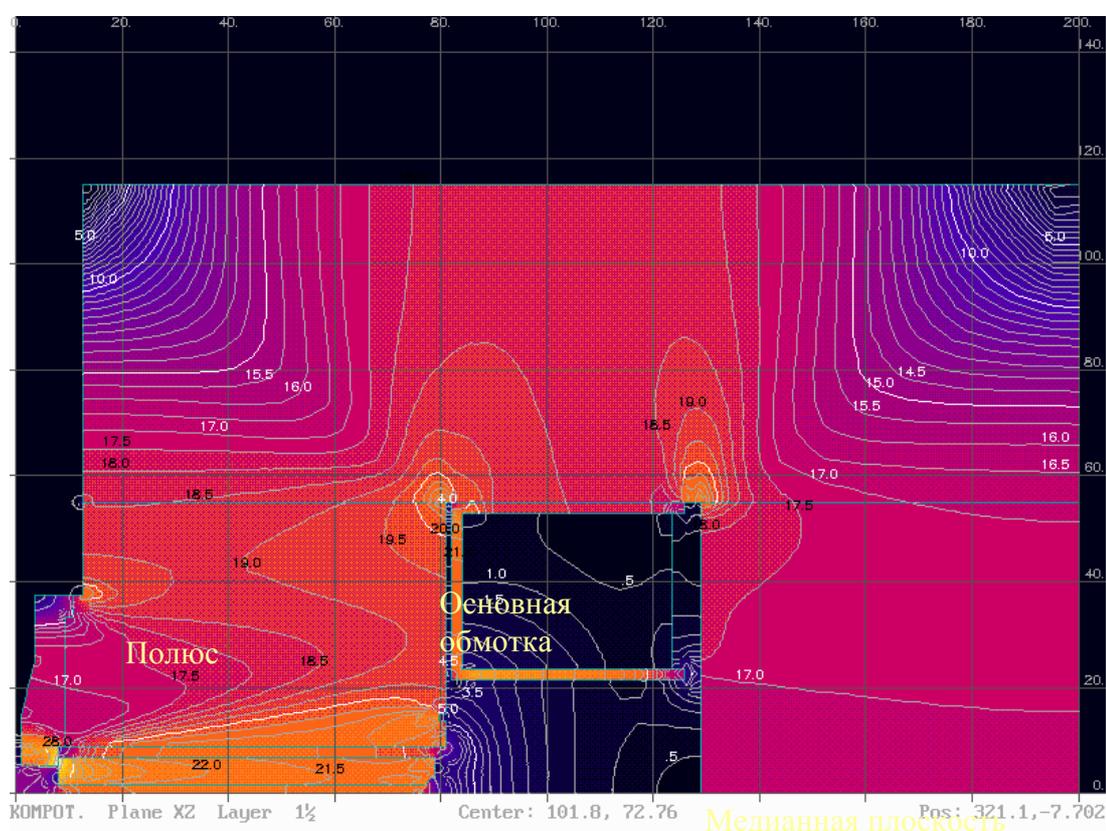


Рис. 4.16. Распределение магнитного поля в четверти вертикального сечения электромагнита циклотрона ДЦ-60 при максимальном токе возбуждения, соответствующем уровню среднего поля в рабочем зазоре 1,65 Тл.

На рисунке 4.17 представлены результаты финальных расчетов радиального распределения среднего магнитного поля в номинальной рабочей точке 1,43 Тл, на верхнем 1,65 Тл и нижнем 1,25 Тл уровнях. Распределение магнитного поля при  $B_0=1,43$  Тл соответствует изохронному ускорению частиц с  $A/Z=7$ . Для остальных рабочих режимов требуется оперативная коррекция при помощи радиальных корректирующих катушек. На рисунке 4.18 показана разность среднего поля на верхнем и нижнем уровнях  $\Delta B(R)$ . Этот график дает представление о нелинейности поведения поля в области центральной пробки и носовой части секторов при изменении уровня основного поля.

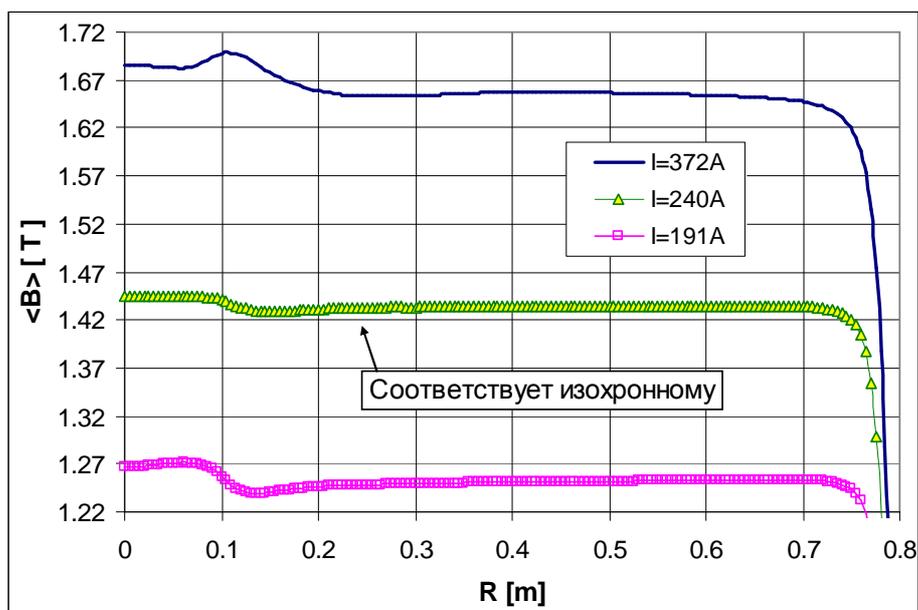


Рис. 4.17. Расчеты радиального распределения среднего магнитного поля при среднем, верхнем и нижнем уровнях магнитного поля.

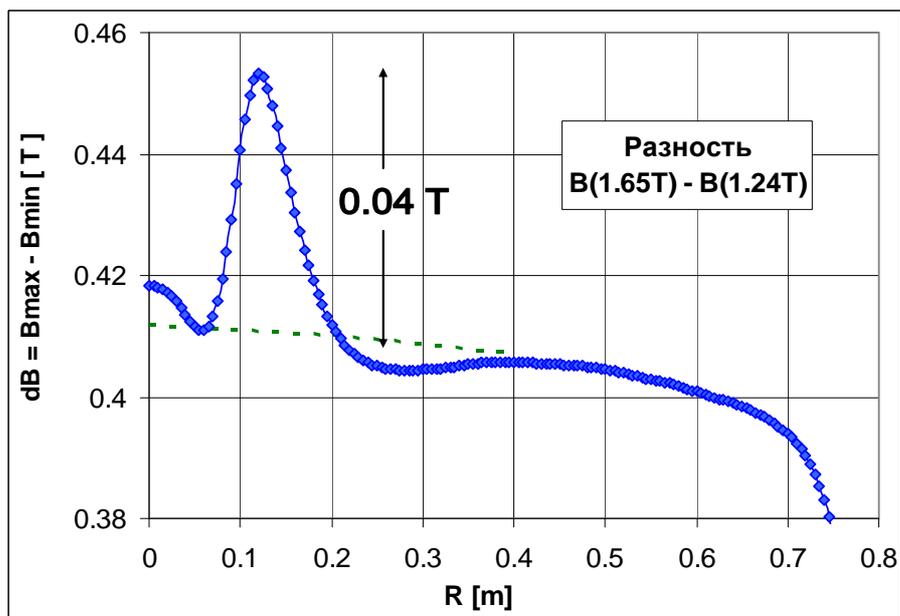


Рис. 4.18. Разность среднего поля на верхнем и нижнем уровнях  $dB(R)$ .

Составной частью системы вывода циклотрона ДЦ-60 является фокусирующий магнитный канал [135, 136, 183, 184]. Конструктивно канал расположен в непосредственной близости от края секторов (рис. 4.19), что оказывает заметное влияние на магнитное поле в рабочей области. На рисунке 4.20 показано возмущение, вносимое каналом в распределение магнитного поля в вертикальной плоскости в среднем сечении канала.

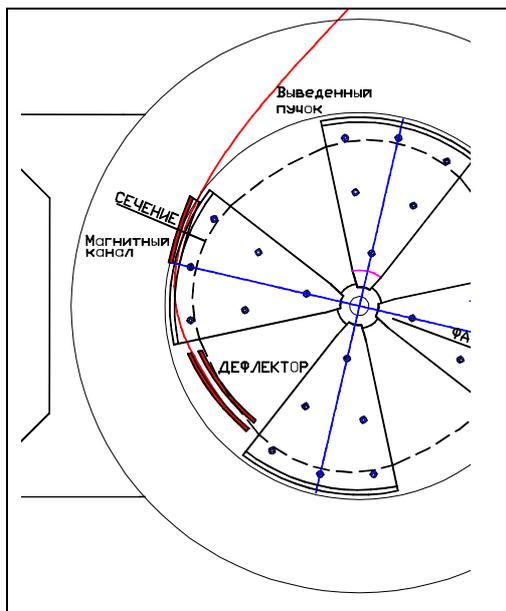


Рис.4.19. Положение магнитного канала медианной плоскости циклотрона.

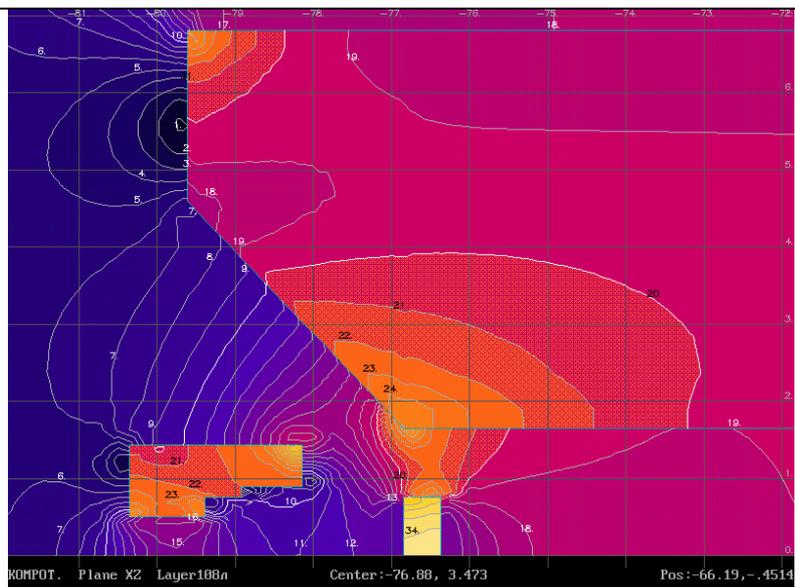


Рис. 4.20. Положение и форма магнитного канала в вертикальном сечении. Распределение магнитного поля (кГс) в среднем сечении канала.

На рисунках 4.21 и 4.22 показано влияние магнитного канала на распределение среднего магнитного поля и амплитуду первой гармоники. При установке магнитного канала среднее поле опускается от 0 Гс в центре до 15 Гс к максимальному радиусу области ускорения. Одновременно амплитуда первой гармоники магнитного поля вырастает до 45 Гс на конечном радиусе с фазовым направлением встрою противоположную сторону от места размещения канала.

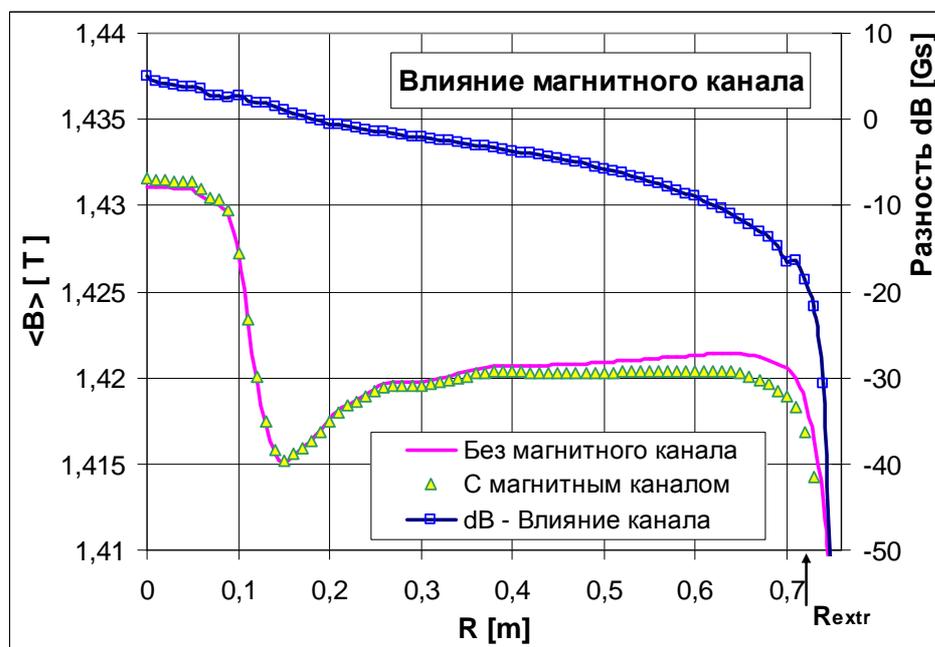


Рис. 4.21. Влияние магнитного канала на распределение среднего магнитного поля по радиусу. По правой оси представлена разность средних полей без магнитного канала и при его установке.

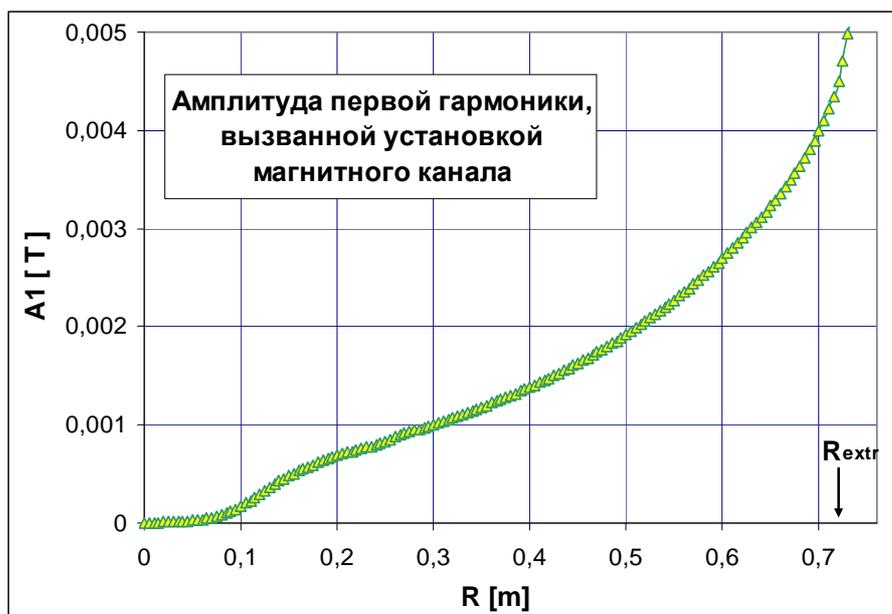


Рис. 4.22. Амплитуда первой гармоники магнитного поля, вызванная размещением магнитного канала.

Для компенсации влияния магнитного канала использованы боковые секторные шиммы. Для компенсации первой гармоники, возникшей при установке магнитного канала, были использованы три дополнительных шиммы. Векторный анализ и расчетные функции влияния позволили получить необходимую форму указанных шимм (рис.4.23).

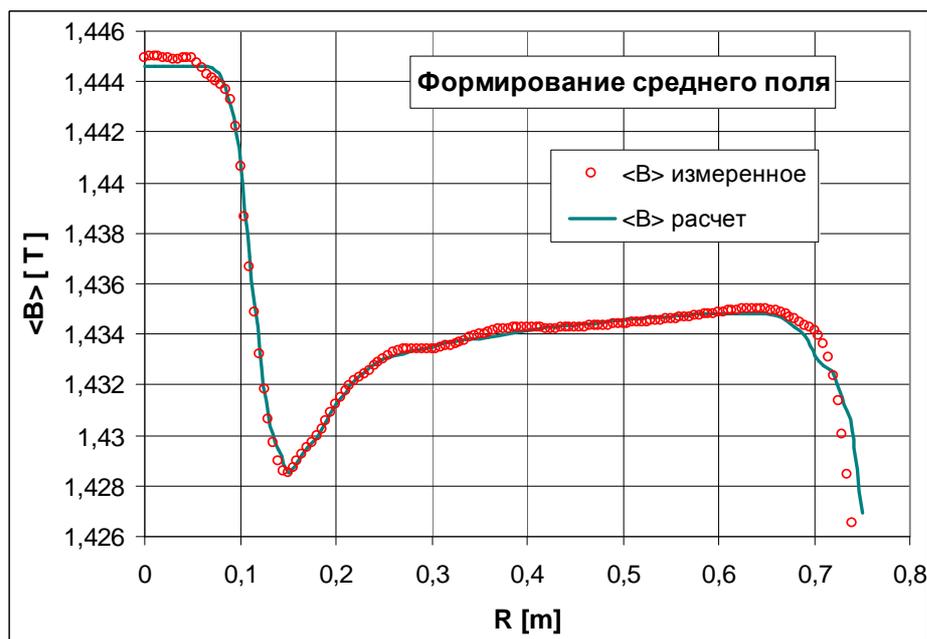


Рис. 4.23. Сравнение изохронного и сформированного в расчетах среднего магнитного поля.

#### 4.4.2 Измерение и формирование магнитного поля циклотрона ДЦ-60

##### Изготовление электромагнита циклотрона ДЦ-60.

На конечном этапе в расчетах были учтены магнитные свойства и химический состав образцов материала, использованного для изготовления составных частей магнитопровода циклотрона (рис. 4.24 и в табл. 4.4), это позволило увеличить точность полученных результатов [136, 138-140].

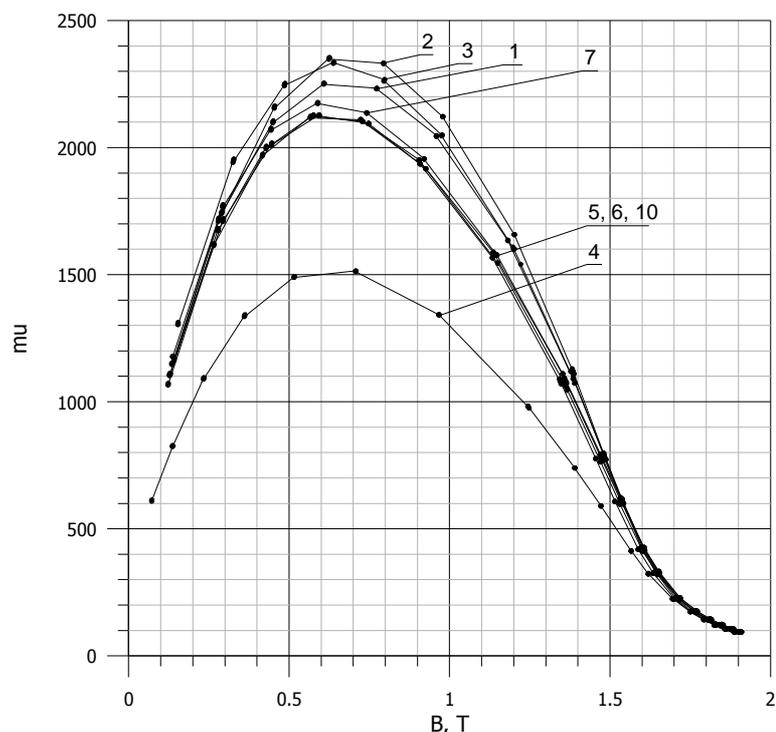


Рис.4.24. Зависимости магнитной проницаемости  $\mu(B)$  для различных образцов (см. табл. 4.4), в диапазоне индукции магнитного поля 0–2Тл.

Таблица 4.4. Химический состав образцов материала.

№ зависимости на рисунке 4.24	1, 4, 10	5	6	2, 3, 7
Составные элементы	Балки, полюс	Балки, сектора	Стойки	Балки
Материал	Сталь 10	Сталь 10	Сталь 10	Сталь 10
C	0,08	0,08	0,06	0,08
Mn	0,40	0,53	0,40	0,38
Si	0,29	0,28	0,26	0,26
S	0,014	0,018	0,013	0,009
P	0,007	0,008	0,008	0,006
Cr	0,18	0,22	0,16	0,19
Ni	0,25	0,34	0,30	0,30
Cu	0,13	0,13	0,12	0,12

Магнитная проницаемость стали использовалась на финальной стадии расчетов формы секторов при формировании заданного распределения магнитного поля. Во избежание искажения магнитного поля все симметричные детали магнита относительно медианной плоскости выполнены из металла одной плавки

Особое внимание уделялось точности изготовления и сборки магнитопровода, определяющей трудоемкость последующего этапа измерений и формирования магнитного поля. В таблице 4.5 приведены требования к наиболее значимым геометрическим размерам в рабочей области магнита, в таблице также приводятся замеры указанных размеров, сделанных после сборки магнитопровода.

Таблица 4.5. Наиболее важные геометрические размеры в рабочей области магнита циклотрона ДЦ-60.

Позиция замера	Требование чертежа	Измеренное значение после сборки магнита
Расстояние между полюсами, замер в центре каждой из 4 долин (между секторами), мм	$176 \pm 0,1$	176,1
Расстояние между центральными пробками, мм	88*	87,95
Расстояние между секторами, для 4 пар секторов в случае включенного магнитного поля, мм	$33 \pm 0.10$	$0 \div - 0,05$
Отклонение боковых поверхностей верхних и нижних секторов, для 4 пар секторов, мм	$\leq 0,1$	$0 \div 0,1$

\* - свободный размер при установке съемных шимм на торцы центральных пробок

Кроме того, были проведены замеры углового и радиального положения секторов на полюсных сборках, соосность установки полюсов, а также измерена деформация балок магнитопровода при включенном магнитном поле на уровне 1,6 Тл. В случае включенного магнитного поля расстояние между секторами уменьшается равномерно на 0,3 мм, что находится в хорошем соответствии с расчетами деформации магнитопровода под действием электромагнитных сил [140].

Для окончательного формирования магнитного поля электромагнит циклотрона ДЦ-60 с магнитометром был установлен на испытательном стенде ОИЯИ (рис. 4.25).



Рис. 4.25. Электромагнит циклотрона ДЦ-60 на испытательном стенде ОИЯИ.

На рисунке 4.26 представлена кривая возбуждения магнита – зависимость уровня среднего поля от тока в основной обмотке магнита. Потребляемая мощность магнита при вариации магнитного поля от 1,25 до 1,65 Тл меняется в пределах 12 - 45 кВт.

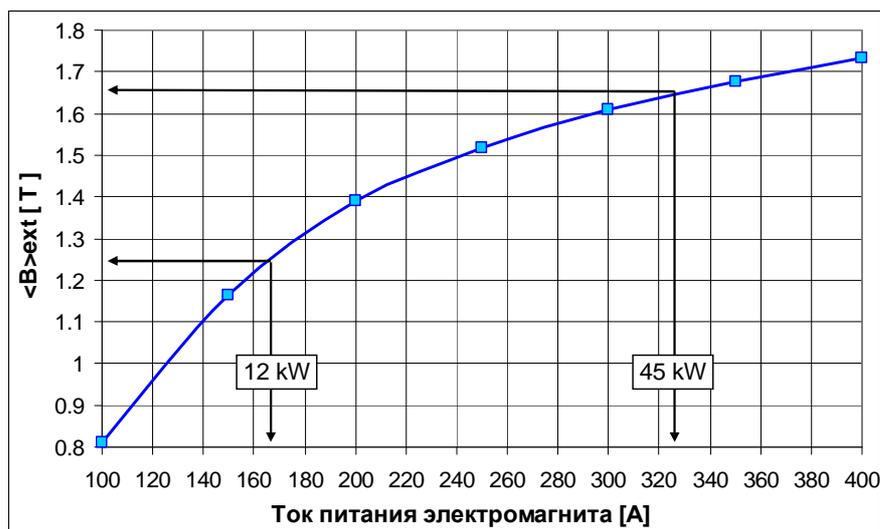


Рис. 4.26. Зависимость уровня среднего поля от тока питания основной обмотки электромагнита циклотрона ДЦ-60.

На рисунке 4.27 представлен вид сектора с расположенными по бокам шиммами. Секторные боковые шиммы предназначены для окончательного формирования среднего поля и коррекции первой гармоники. Кроме того, на торцах центральных пробок установлены съемные диски для формирования поля в центральной области (рис. 4.28).

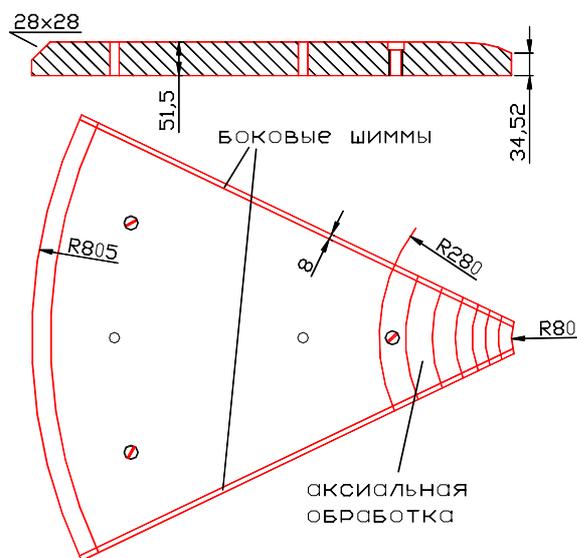


Рис. 4.27. Форма и основные размеры сектора циклотрона ДЦ-60.

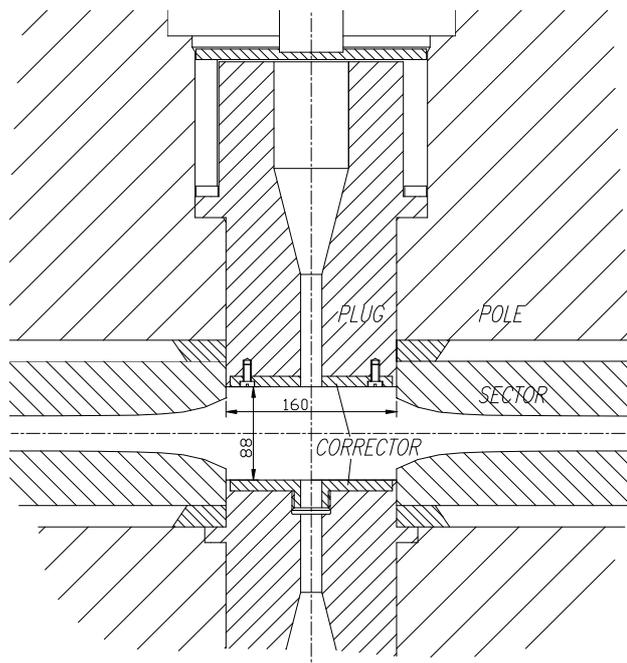


Рис. 4.28. Вертикальное сечение центральной области циклотрона ДЦ-60.

На первом этапе магнитные измерения проводились без установки магнитного канала и соответствующих дополнительных шимм для его компенсации. Проведенные измерения магнитного поля на электромагните показали хорошее совпадение результатов измерения и расчетов. Коррекция среднего магнитного поля при помощи секторных боковых шимм не потребовалась. Незначительная доработка торцов центральных пробок позволила приблизить полученную форму поля в центральной области к расчетной (рис.4.29). Разность

в радиальном распределении сформированного среднего поля на уровне 1,43 Тл от расчетного не превышает 10 Гаусс в основной области ускорения и 105 Гаусс в центральной части (рис. 4.30). Указанные отклонения корректируются радиальными катушками в процессе настройки ускорителя.

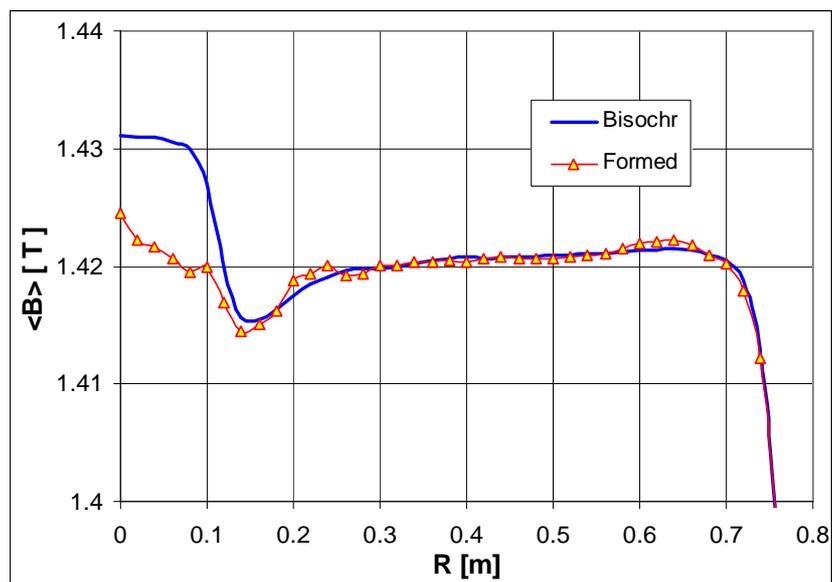


Рис. 4.29. Сравнение расчетного изохронного и сформированного в ходе измерений средних магнитных полей циклотрона ДЦ-60.

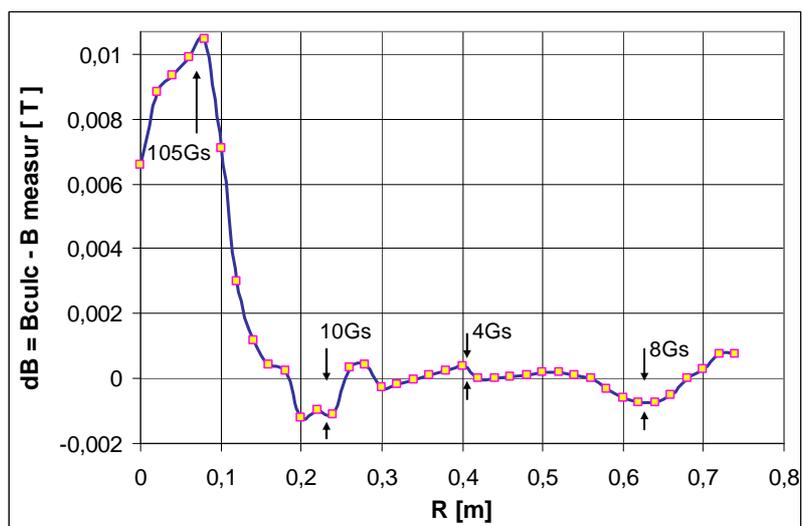


Рис. 4.30. Разность между расчетным и измеренным сформированным средними полями в выбранной рабочей точке.

Подбор режима корректирующих катушек осуществлялся компьютерным способом с использованием полученных в ходе измерений данных о вкладах радиальных корректирующих катушек. На рисунках 4.31 и 4.32 представлено сравнение расчетных и измеренных вкладов радиальных корректирующих катушек на верхнем, 1,65 Тл, и нижнем, 1,25 Тл уровнях. В качестве критерия подбора взято условие отклонения фазы пучка в процессе ускорения не более чем  $\Delta\varphi = \pm 10^\circ$ .

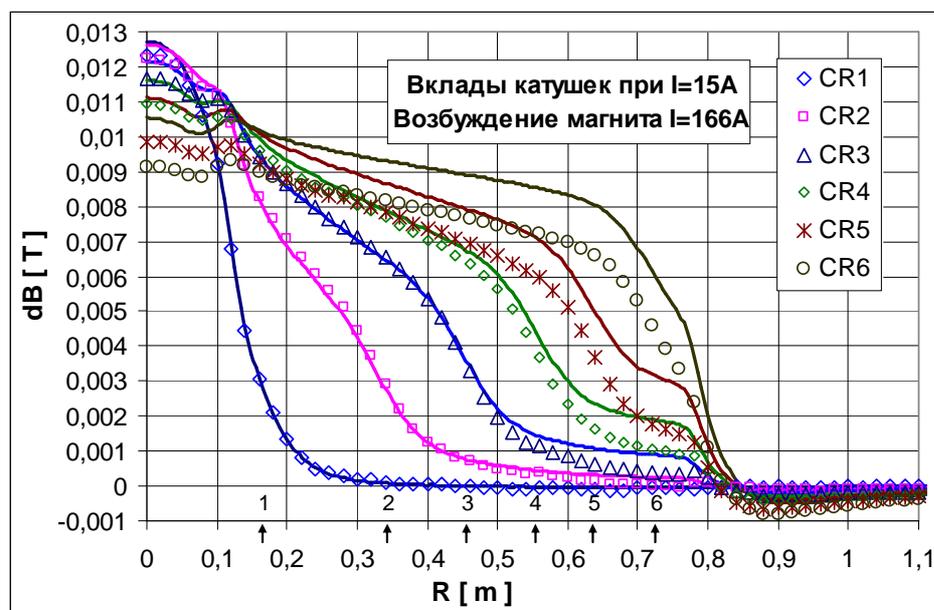


Рис. 4.31. Сравнение расчетных и измеренных вкладов в магнитное поле радиальных корректирующих катушек на минимальном уровне поля. Стрелками обозначены положения катушек.

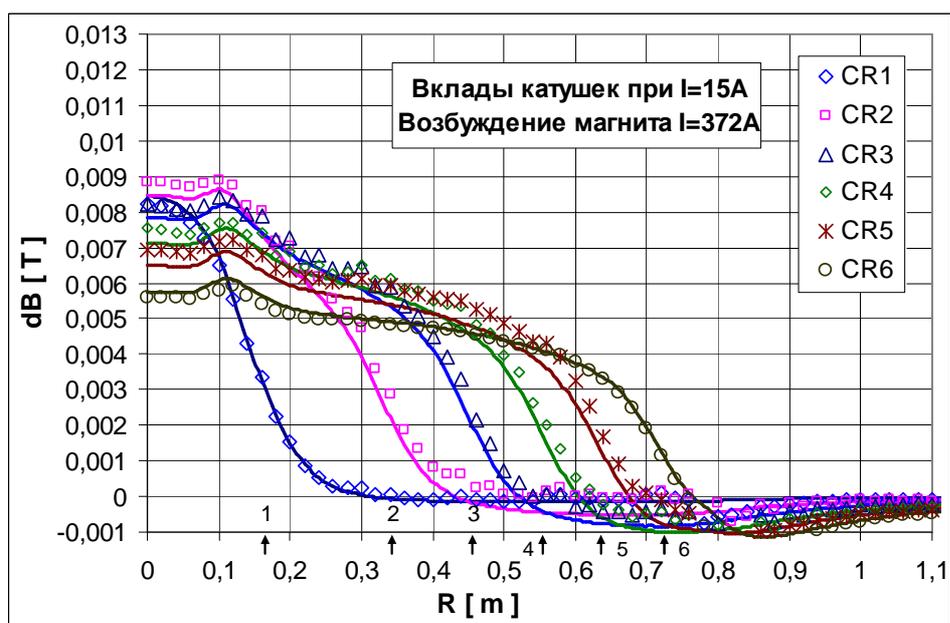


Рис. 4.32. Сравнение расчетных и измеренных вкладов в магнитное поле радиальных корректирующих катушек на максимальном уровне поля. Стрелками обозначены положения катушек.

На рисунке 4.33 представлен сводный график поведения первой гармоники магнитного поля вдоль радиуса циклотрона. График отображает как амплитуду, так и фазу первой гармоники. В данном случае измерения проводились без магнитного канала, поэтому на графике представлена первая гармоника, возникающая вследствие неточности производства и сборки магнитопровода.

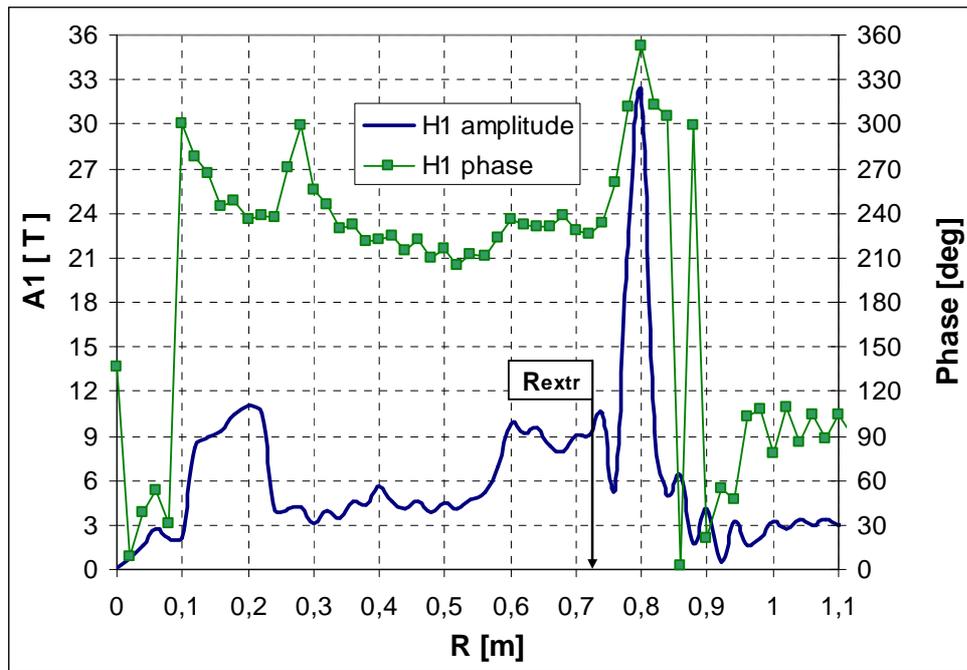


Рис. 4.33. Амплитуда и фаза первой гармоники до коррекции. Магнитный канал не установлен. Рассматриваемый диапазон радиусов от  $R_o = 0$  мм до  $R_{extr} = 713$  мм.

При установке магнитного канала, помимо основной первой гармоники, возникает дополнительная первая гармоника с амплитудой, представленной на рисунке 4.22. Под основной понимается первая гармоника, возникающая вследствие неточности производства и сборки магнитопровода, без магнитного канала. Положение фазы как дополнительной, так и основной первых гармоник в привязке к геометрии магнитопровода представлены на рисунке 4.34.

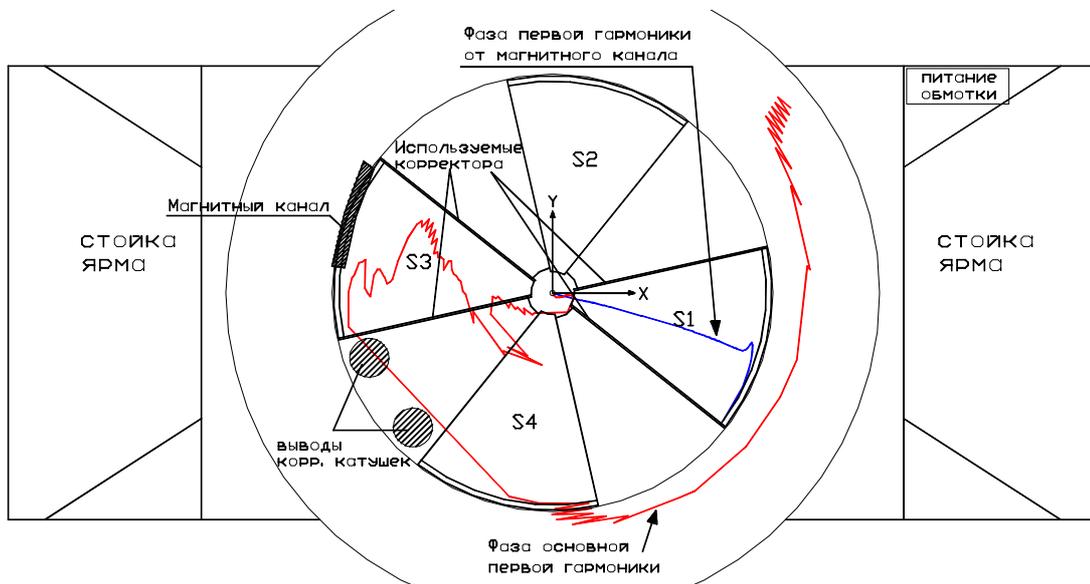


Рис. 4.34. Положение фазы дополнительной и основной первой гармоники в привязке к геометрии магнитопровода.

Указанные фазы в целом противоположны по азимуту, при векторном сложении гармоник происходит их частичная компенсация. Полученная суммарная первая гармоника компенсируется посредством боковых секторных шимм. Установлены четыре дополнительные пары шимм по бокам верхних и нижних секторов, расположенных вдоль направления фаз рассматриваемых гармоник. При помощи указанных корректоров

одновременно решаются две задачи. Во-первых, осуществляется компенсация суммарной первой гармоники и, во-вторых, проводится частичная коррекция радиального снижения среднего поля, вызванного установкой магнитного канала (рис. 4.35). Расчеты показали, что разность между полученной и изохронной формами среднего поля не превышает 4 Гс, что может быть скомпенсировано радиальными корректирующими катушками для достижения изохронного режима ускорения.

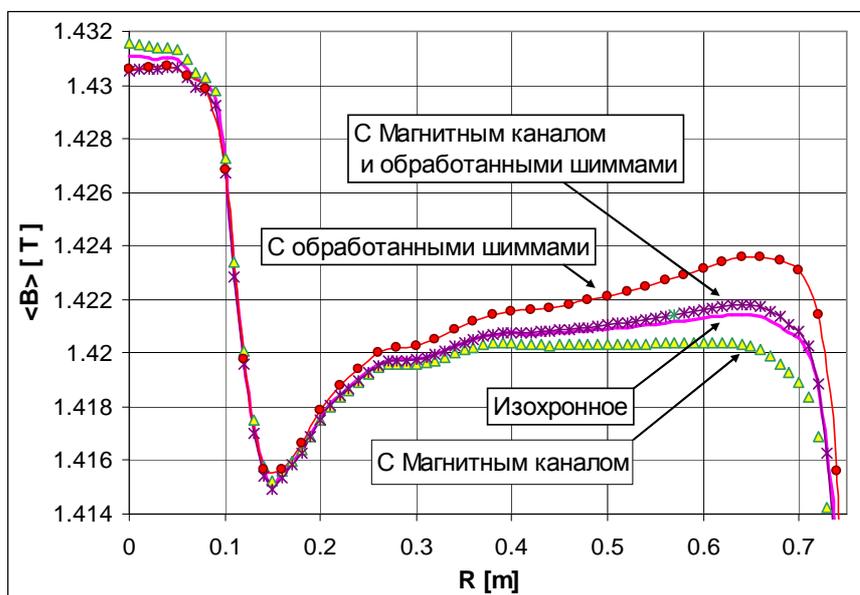


Рис. 4.35. Расчет средних полей в номинальной рабочей точке 1,43Тл для изохронной формы: с установленным магнитным каналом, с установленными шиммами предложенной формы, в случае установки магнитного канала и шимм одновременно.

При установке магнитного канала на магнитопровод измерительная штанга магнитометра может передвигаться в азимутальном направлении только на  $90^\circ$ . Канал и элементы его крепления перекрывают межсекторное пространство, препятствуя движению штанги на полный оборот в  $360^\circ$ .

Поэтому для компенсации влияния канала на магнитное поле циклотрона был применен комбинированный метод, сочетающий проведение расчетов и измерений первой гармоники, возникающей при установке компенсирующих шимм без магнитного канала. В этом случае измеренная первая гармоника должна иметь амплитуду, соответствующую по форме расчетной амплитуде суммарной первой гармоники. Для получения эффекта компенсации фазы рассматриваемых гармоник должны быть противонаправлены. Предварительно проведена расчетная подготовка, моделирующая условия измерения поля с установленными шиммами. По данным расчетов соответствующие шиммы обработаны для получения необходимой формы. Результаты измерений при установленных шиммах представлены на рисунке 4.46 в форме сравнения измеренной и расчетной амплитуд первой гармоники. Из рисунка видно, что в области ускорения разность между расчетной и полученной при измерениях амплитудами не превышает 2 - 4 Гс. Таким образом, при установке магнитного канала и компенсирующих шимм величина этой разности будет соответствовать амплитуде остаточной первой гармоники.

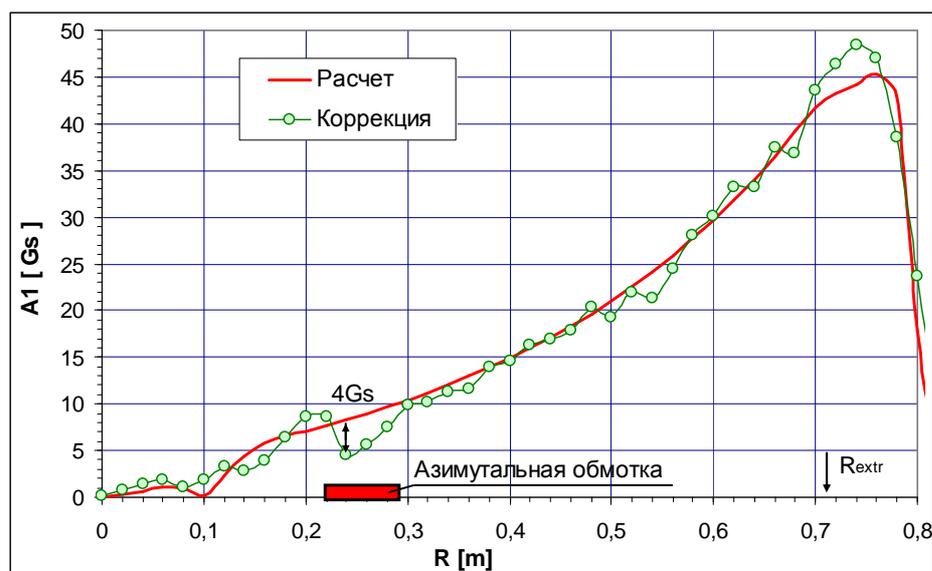


Рис. 4.36. Расчетная и полученная в ходе измерений амплитуда первой гармоники при установленных корректорах в случае косвенного метода компенсации. Представлено радиальное положение азимутальной корректирующей обмотки.

Представленная методика комплексного использования аналитического и расчетного методов формирования магнитного поля позволила получить распределение среднего поля в основной области ускорения с точностью лучше 10 Гс. Вклады корректирующих катушек, полученные в ходе расчетов и измерений, дают возможность сформировать изохронные условия ускорения для всего диапазона полей от 1,25 до 1,65 Тл.

Проведена коррекция первой гармоники магнитного поля, возникающей как следствие неточностей производства и монтажа магнитопровода, так и в результате установки магнитного канала системы вывода пучков. Суммарная амплитуда первой гармоники уменьшена до приемлемого уровня 2 - 4 Гс.

#### 4.5 Динамика пучка в процессе ускорения в изохронном циклотроне ДЦ-60

В ходе численного формирования магнитной структура циклотрона проведены исследования динамических характеристик магнитного поля на основе траекторного анализа [108, 136]. Целью анализа являлась оптимизация условий ускорения в центральной области циклотрона, в основной области ускорения и в области вывода пучков из циклотрона. Анализ проводился для трех режимов ускорения на верхнем (1,65 Тл), среднем (1,43 Тл) и нижнем (1,25 Тл) уровнях магнитного поля. Основные параметры режимов ускорения приведены на таблице 4.6. Зависимости флаттера магнитного поля на трех уровнях среднего поля показаны на рис. 4.37.

Таблица 4.6. Параметры тестовых режимов ускорения.

№ режима	A/Z	Во, Тл	Частота генератора, МГц	Гармоника ускорения	Напряжение на дуантах, кВ	Напряжение инжекции, кВ
1	7	1,43	12,67	4	50	12,1
2	10	1,25	11,616	6	50	9,23
3	6	1,65	17	4	50	18,4

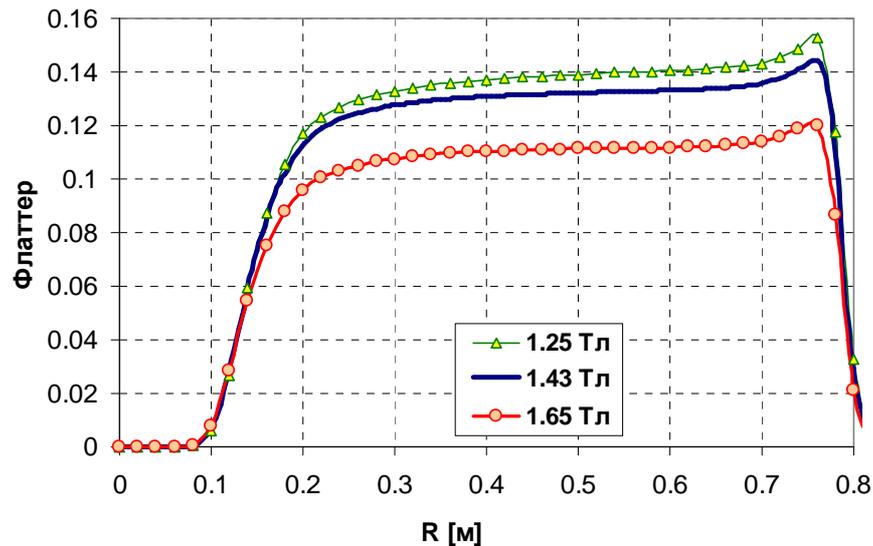


Рис. 4.37. Радиальное распределение флаттера сформированного магнитного поля для трех уровней среднего поля 1,25 Тл, 1,43 Тл и 1,65 Тл.

### 1. Режим ускорения пучка ионов с $A/Z=7$ в магнитном поле на уровне 1,43 Тл.

Магнитное поле на уровне 1,43 Тл в режиме ускорения иона с  $A/Z=7$  сформировано только за счет железных масс. Как видно из рисунков 2 и 4, сформированное магнитное поле находится в хорошем соответствии с изохронным распределением. Точность численного формирования лучше, чем  $10^{-3}$ . В связи с этим оптимизации магнитного поля при помощи концентрических корректирующих катушек не требуется. Проведенный расчет динамики рассматриваемых ионов показал, что дрейф фазы, вызванный отличием сформированного магнитного поля от изохронного распределения (рис. 4.38), находится в пределах  $\pm 2^\circ$  ВЧ, что может рассматриваться как очень хороший результат [136].

Фокусирующие свойства магнитного поля в основной области ускорения обеспечиваются азимутальной вариацией поля, при которой частоты радиальных и вертикальных свободных колебаний иона имеют значения  $1,015 < Q_r < 1,02$  и  $0,3 < Q_z < 0,4$  и расположены далеко от резонансов  $Q_z=0,5$  и  $2Q_z=Q_r$ , рисунок 4.39. При апертуре рабочей области 33 мм, фокусировка обеспечивает вертикальный размер пучка не более 12 мм при ускорении до радиуса вывода  $R=0,7$ м.

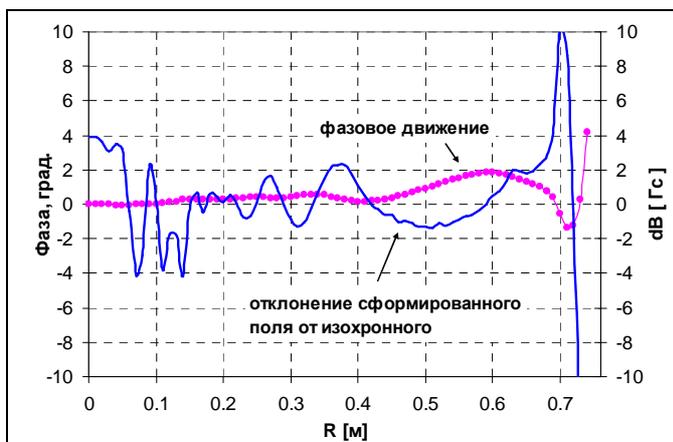


Рис. 4.38. Отклонение сформированного магнитного поля от изохронного и равновесная фаза ускоряемого иона с  $A/Z=7$  в магнитном поле при  $V_0=1,43$ Тл.

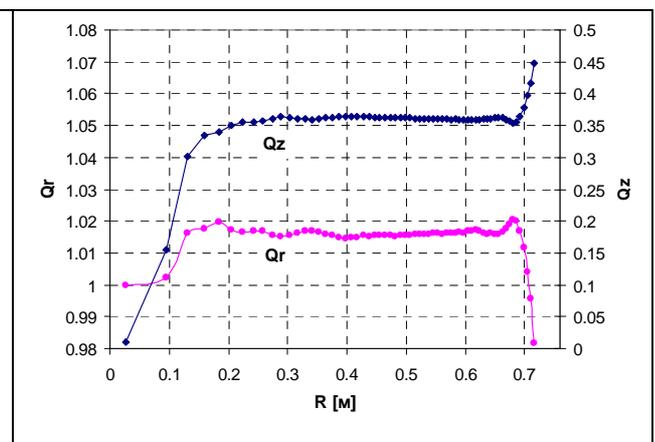


Рис.4.39. Частоты радиальных и вертикальных свободных колебаний иона с отношением массы к заряду  $A/Z = 7$  в сформированном магнитном поле 1,43Тл.

Сформированное магнитное поле на уровне 1,43 Тл позволяет осуществлять эффективный захват в ускорение и создает оптимальные условия движения пучка ионов с отношением массы к заряду  $A/Z=7$  в центральной области циклотрона [108]. Радиальный и вертикальный эмиттансы пучка в начале ускорения не превышают 200 п·мм·мрад. Магнитное поле в области центральной пробки не имеет вариации, поэтому необходимая вертикальная фокусировка пучка на первых оборотах обеспечивается отрицательным радиальным градиентом среднего магнитного поля и фокусирующим действием ВЧ электрического поля в ускоряющих зазорах. На рисунке 4.40 представлено горизонтальное и вертикальное движение рассматриваемого пучка ионов. Темп ускорения и влияние фокусирующих сил позволяют пучку беспрепятственно обойти элементы центральной области, оставаясь в пределах вертикальной апертуры в 33 мм.

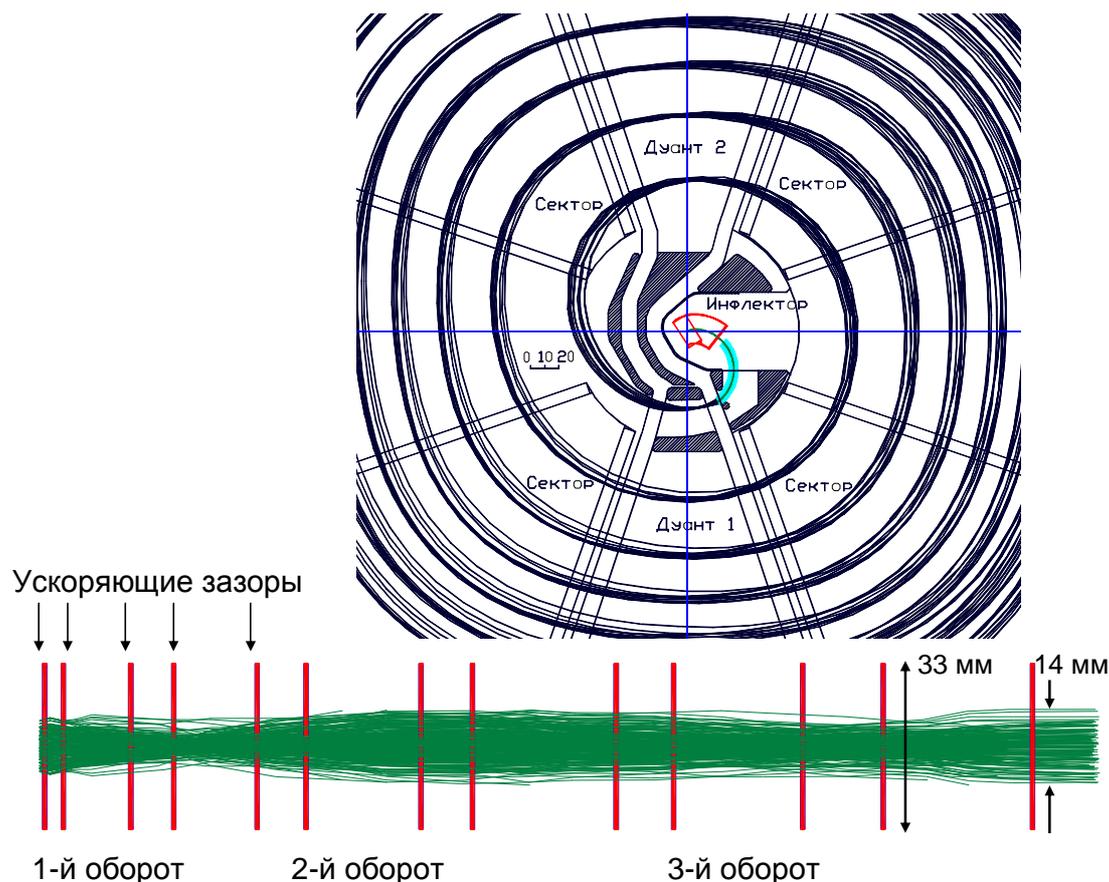


Рис. 4.40. Горизонтальное (вверху) и вертикальное (внизу) движение пучка ионов с  $A/Z = 7$  в центре циклотрона при ускорении в сформированном магнитном поле на уровне 1,43 Тл. В расчете использован диапазон стартовых фаз  $\pm 10^\circ$ .

## 2. Режим ускорения пучка ионов с $A/Z=10$ в магнитном поле на уровне 1,25 Тл.

На нижнем уровне магнитного поля  $B=1,25$  Тл рассмотрен тестовый режим ускорения пучка ионов с отношением массы к заряду  $A/Z=10$ . Магнитное поле в рассмотренном режиме требует оптимизации при помощи концентрических корректирующих катушек. Результат оптимизации магнитного поля путем расчетного подбора вкладов корректирующих катушек представлен на рисунках 4.41.

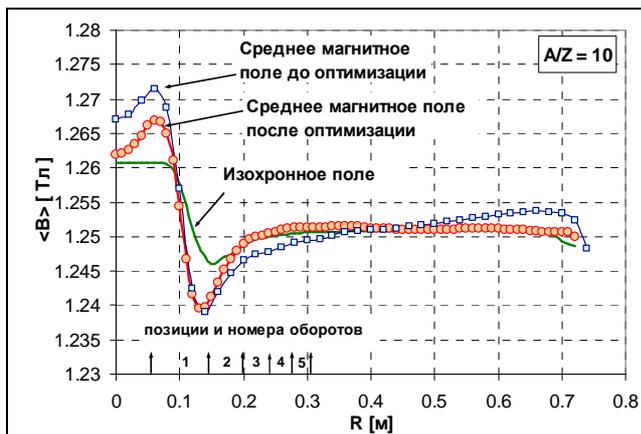


Рис. 4.41. Сравнение изохронного и среднего магнитного поля в режиме ускорения пучка ионов с  $A/Z = 10$ . Стрелками представлены радиальные положения первых орбит ускоряемого пучка.

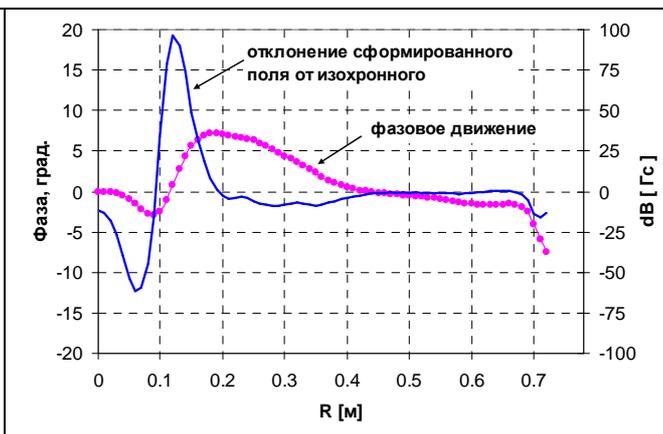


Рис. 4.42. Фазовое движение ускоряемого иона с отношением массы к заряду  $A/Z = 10$  в сформированном магнитном поле на уровне 1,25 Тл и отклонение сформированного магнитного поля от изохронного поля.

Проведенный расчет динамики пучка ионов с отношением массы к заряду  $A/Z = 10$  при ускорении в оптимизированном магнитном поле на уровне 1,25 Тл показал, что дрейф фазы ускоряемого иона, вызванный отличием сформированного магнитного поля от изохронного, не превышает  $7^\circ$ , что обеспечивает эффективное ускорение. Радиальная зависимость фазового движения ускоряемого иона в сформированном магнитном поле представлена на рисунке 4.42. Сформированное магнитное поле на уровне 1,25 Тл позволяет осуществлять эффективный захват в ускорение и оптимальные условия движения пучка ионов в центральной области циклотрона. На рисунке 4.43 представлена траектория рассматриваемого пучка ионов при движении в области захвата в ускорение и на первых оборотах.

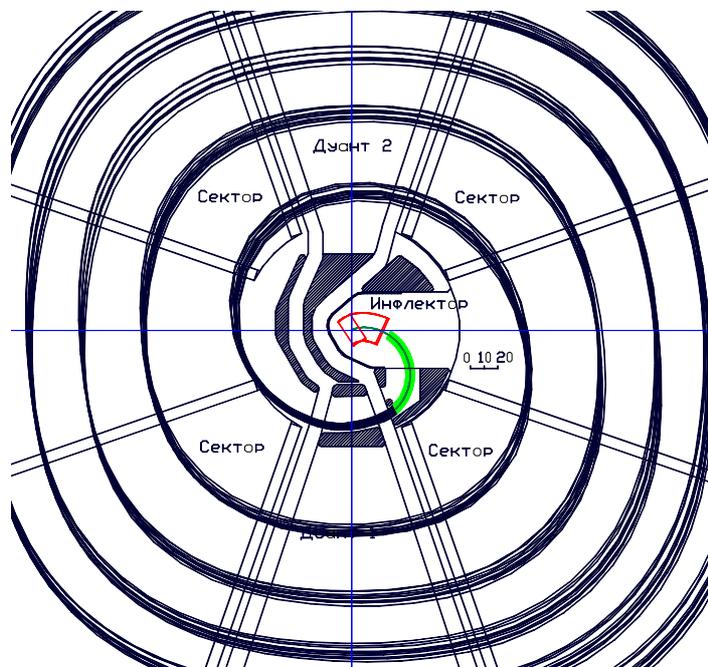


Рис. 4.43 Захват в ускорение и первые обороты пучка ионов с  $A/Z = 10$  при ускорении в сформированном магнитном поле на уровне  $B=1,25$ Тл.

### 3. Режим ускорения пучка ионов с $A/Z=6$ в магнитном поле на уровне 1,65 Тл

На верхнем уровне магнитного поля  $B=1,65$  Тл рассмотрен режим ускорения пучка ионов с отношением массы к заряду  $A/Z=6$ . Сформированное железными массами магнитное поле на верхнем уровне магнитного поля  $B=1,65$  Тл отличается от изохронной формы, поэтому для формирования резонансных условий ускорения используется оптимизация магнитного поля при помощи шести concentрических корректирующих катушек. Оптимальные вклады катушек подобраны расчетным путем. Результат оптимизации магнитного поля путем подбора токов в корректирующих катушках представлен на рисунке 4.44.

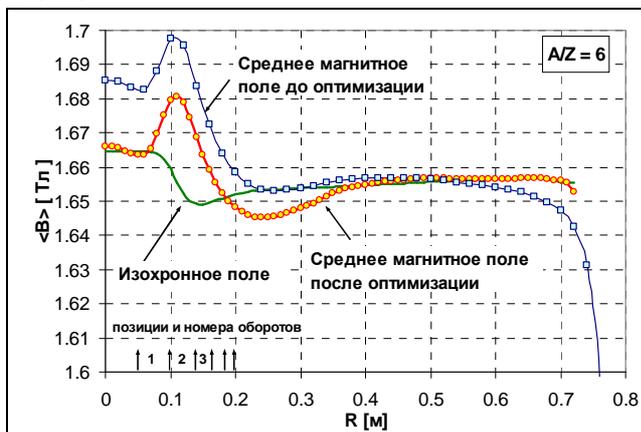


Рис. 4.44. Сравнение изохронного и среднего магнитного поля в режиме ускорения пучка ионов с отношением массы к заряду  $A/Z = 6$ . Стрелками представлены радиальные положения первых орбит ускоряемого пучка.

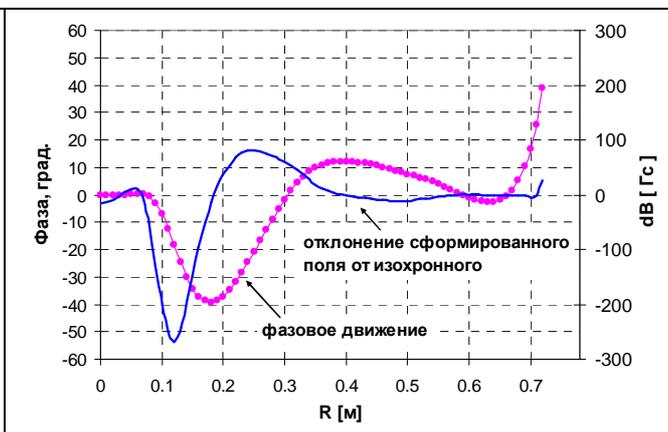


Рис. 4.45. Отклонение оптимизированного магнитного поля с помощью корректирующих катушек от изохронного на уровне 1,65 Тл в зависимости от радиуса и фазовое движение ускоряемого иона с  $A/Z = 6$ .

Проведенный расчет динамики пучка ионов с отношением массы к заряду  $A/Z = 6$  при ускорении в оптимизированном магнитном поле на уровне 1,65 Тл показал, что дрейф фазы ускоряемого иона, вызванный отличием оптимизированного магнитного поля от изохронного, достигает до  $-40^\circ$  в районе радиусов 0,12 м – 0,25 м. В остальном диапазоне радиусов дрейф фазы не превышает  $12^\circ$ . Отклонение фазы пучка на внутренних радиусах становится значительным и ограничивает допустимую фазовую протяженность банча. Магнитное поле обеспечивает устойчивое ускорение пучка ионов с фазовой протяженностью до  $50^\circ$  ВЧ. Радиальная зависимость фазового движения ускоряемого иона в сформированном магнитном поле представлена на рисунке 4.45. В сформированном магнитном поле частоты радиальных и вертикальных свободных колебаний принимают значения в основной области ускорения  $Q_r$  около 1,015 и  $Q_z$  около 0,35, что обеспечивает необходимую фокусировку.

На рисунке 4.46 представлена траектория рассматриваемого пучка ионов при движении в области захвата в ускорение и на первых оборотах.

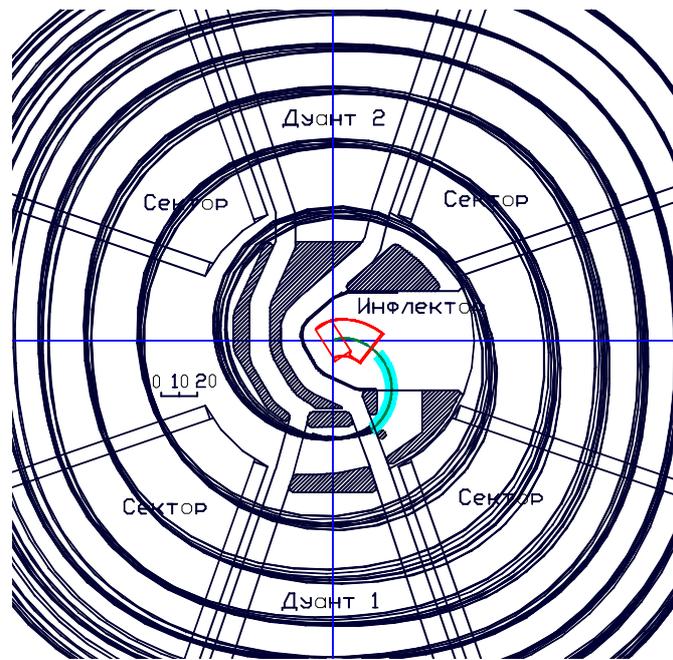


Рис. 4.46 Захват в ускорение и первые обороты иона с  $A/Z = 6$  при ускорении в сформированном магнитном поле  $B=1,65$  Тл.

### Заклучение

Анализ динамических характеристик сформированного магнитного поля циклотрона ДЦ-60 проведен для трех режимов ускорения на верхнем (1,65 Тл), среднем (1,43 Тл) и нижнем (1,25 Тл) уровнях магнитного поля. Сформированное магнитное поле на среднем уровне 1,43 Тл с хорошей точностью, лучше чем  $10^{-3}$ , соответствует изохронному распределению, что обеспечивает фазовое движение пучка в пределах  $\pm 2^\circ$ . Изохронность магнитного поля на верхнем – 1,65 Тл, и нижнем – 1,25 Тл уровнях достигается при помощи корректирующих катушек. Сформированное магнитное поле обеспечивает допустимое фазовое движение и поперечную фокусировку ускоряемых пучков ионов.

## 4.6 Система вывода пучка

### *Конструкция и параметры элементов системы вывода циклотрона ДЦ-60*

Система вывода позволяет отклонить пучок из зоны ускорения и направить в ионопровод. При этом необходимо обеспечить хорошее качество пучка на выходе из ускорителя для эффективной транспортировки к физическим установкам [78, 32, 181, 182, 184, 185].

После анализа отклоненных траекторий для различных ионов был выбран вывод пучка в направлении  $\approx 26^\circ$  по отношению к оси сектора. На рисунке 4.47 приведена схема циклотрона и выводные траектории для тестовых ионов.

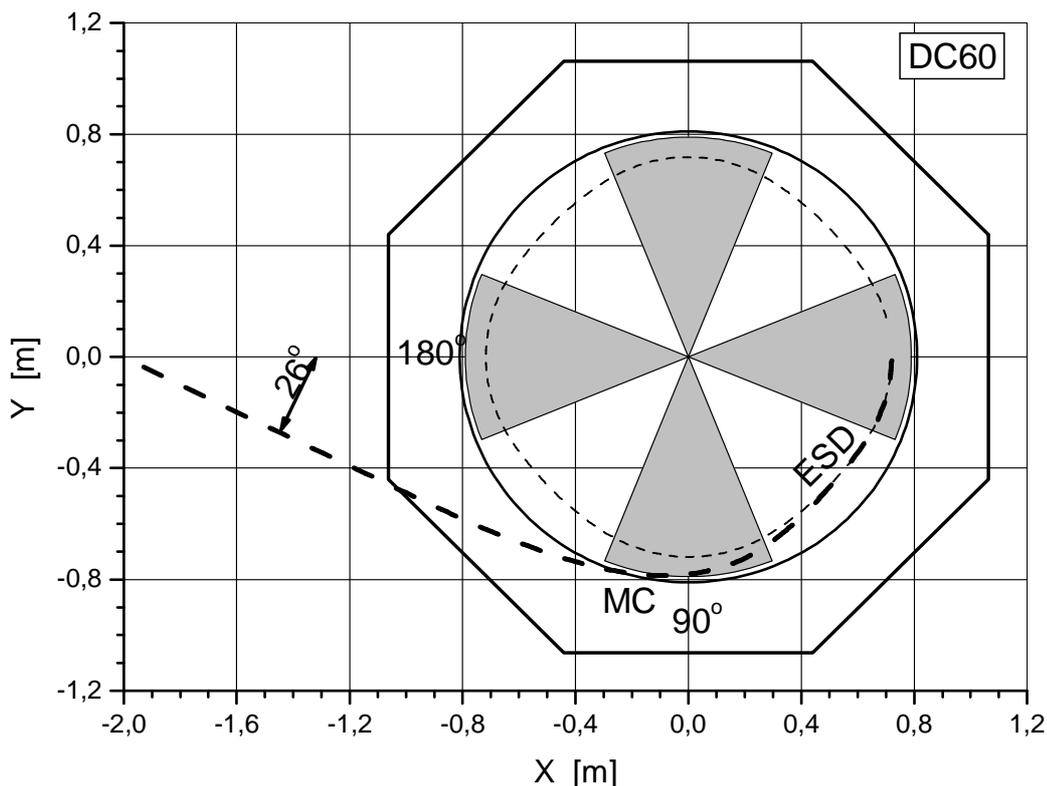


Рис. 4.47. Схема ускорителя с расположением секторов и выбранным направлением выводной траектории. Азимут траектории отсчитывается по часовой стрелке.

Система вывода состоит из следующих устройств:

- **Электростатический дефлектор (ESD)**, отклоняющий пучок из камеры циклотрона;
- **Фокусирующий магнитный канал (MC)**, формирующий выводимый пучок при его движении до входа в систему транспортировки;
- Диагностические элементы:
  - ✓ **пробник вывода**, расположенный между дефлектором и магнитным каналом (PE1) и позволяющий оптимизировать положение дефлектора и магнитного канала;
  - ✓ **профиломер (PME2) и люминофор**, расположенные в выводном патрубке на выходе из вакуумной камеры и позволяющие определять форму и интенсивность выведенного пучка.

### Численное моделирование вывода пучка

Для определения параметров элементов системы вывода было проведено численное моделирование для нескольких тестовых ионов, выбранных из рабочей диаграммы циклотрона. В таблице 4.7 приведено расчетное напряжение на дефлекторе при разных уровнях магнитного поля в циклотроне для 5 тестовых ионов с отношением массы к заряду от 6 до 12.

Таблица 4.7. Требуемое напряжение на дефлекторе для 5 тестовых ионов при разных энергиях и уровнях магнитного поля.

N	Отношение массы к ядру иона, A/Z	Энергия ионов, W [МэВ/нукл.]	Напряжение на дефлекторе, [кВ]	Магнитное поле B <sub>0</sub> [Тл]
1	6	1,07	30,8	1,25
2	10	0,38	18,6	
3	8	0,79	29,4	1,45
4	6	1,80	51,9	1,65
5	12	0,46	25,6	

В расчетах динамики использовались как расчетные, так и измеренные карты магнитного поля. Анализ динамики пучка в данных магнитных полях показал, что максимальный средний радиус ускоренной орбиты составляет  $\approx 70$  см. На рисунке 4.48 приведена в качестве примера статическая равновесная орбита для иона с  $A/Z=8$  и энергией  $W=0,85$  МэВ/нукл. на максимальном радиусе. Можно отметить, что орбита достигает радиуса  $\approx 72$  см на азимуте середины сектора и проходит на радиусе  $\approx 68$  см в середине долины.

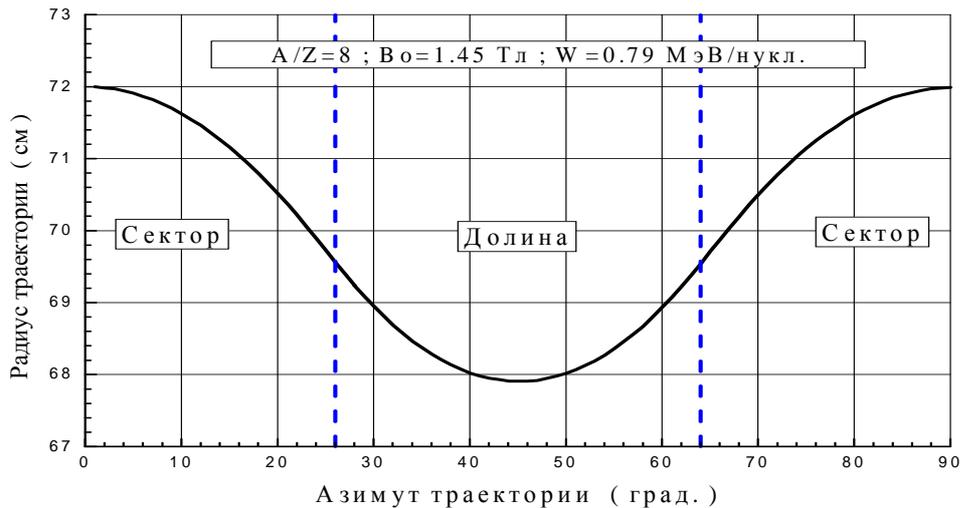


Рис. 4.48. Пример статической равновесной орбиты для максимального радиуса (ион с  $A/Z=8$  и энергией  $W=0,85$  МэВ/нукл.)

Были проведены расчеты динамики пучка для определения горизонтального и вертикального эмиттансов пучка на входе в электростатический дефлектор. На рисунке 4.49 приведены горизонтальный и вертикальный эмиттансы пучка на входе в электростатический дефлектор для одной из тестовых частиц с  $A/Z=7$  при  $B_0=1,45$  Тл. В расчетах использовалось 500 макрочастиц. Аналогичные расчеты проводились для всех тестовых ионов и использовались в дальнейшем для расчетов системы вывода.

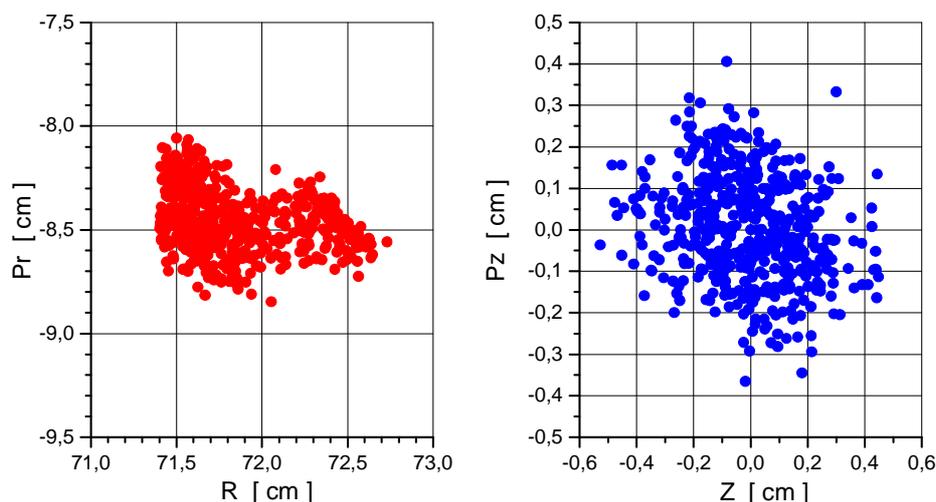


Рис. 4.49. Горизонтальный и вертикальный эмиттансы пучка ионов с  $A/Z=7$  на входе в электростатический дефлектор при среднем магнитном поле  $B_0=1,45$  Т.

### Электростатический дефлектор

Электростатический дефлектор располагается в свободной долине циклотрона и имеет азимутальную длину  $\Delta\Theta \approx 34^\circ$ . Для обеспечения вывода в выбранном направлении необходима максимальная напряженность электрического поля между пластинами дефлектора  $\approx 60$  кВ/см.

Радиус входа в дефлектор  $\approx 700$  мм, а радиус выхода  $\approx 720$  мм. Радиус кривизны пластин дефлектора выбран 1800 мм, что наилучшим образом соответствует радиусам кривизны выводных траекторий различных ионов. При этом обеспечиваются минимальные потери пучка в процессе вывода. Расстояние между пластинами 10 мм.

Основные потери пучка происходят на начальной части «септумной» пластины, поэтому в качестве материала для нее использован молибден. Держатель септума охлаждается водой. В качестве материала для «потенциального» электрода использован титан.

Конструкция дефлектора предусматривает возможность независимого перемещения входа и выхода дефлектора для настройки на «ядро» пучка и согласования выводной траектории с положением дефлекторных пластин. Основные параметры дефлектора приведены в таблице 4.8.

Таблица 4.8. Параметры электростатического дефлектора

Азимутальное положение магнитного канала, град.	84 - 112
Макс. напряжение на потенциальной пластине, кВ	65
Длина потенциальной пластины, мм	400
Длина септумной пластины, мм	440
Толщина септумной пластины, мм	0,3 - 1,0
Радиус кривизны пластин, мм	1800
Высота пластин, мм	50
Зазор между пластинами, мм	10
Перемещение входа и выхода дефлектора от номинального положения, мм	$\pm 15$
Точность установки дефлектора, мм	$\pm 1$
Материал потенциальной пластины	Ti
Материал септумной пластины	Mo

## Магнитный фокусирующий канал

Выводная траектория проходит через область больших радиальных градиентов магнитного поля, вызывающих дефокусировку пучка в горизонтальном направлении. Максимальные градиенты краевого магнитного поля (30-35 Тл/м) соответствуют радиусам 78 - 81 см при выходе траектории за край сектора. Для согласования эмиттанса выводимого пучка с акцептансом канала транспортировки необходимо использовать фокусирующий магнитный канал (FMC). Магнитный канал должен обеспечивать в горизонтальном направлении фокусирующий градиент магнитного поля  $G \approx 5$  Тл/м в рабочей апертуре 25 мм по горизонтали и 10 мм по вертикали. Магнитный канал устанавливается на азимутах  $84^\circ \div 112^\circ$ . Длина канала  $\Delta\Theta = 28^\circ$  ( $\approx 400$  мм). Кривизна магнитного канала соответствует выводной траектории. Радиус кривизны FMC  $\approx 860$  мм.

Проводились двухмерные и трехмерные расчеты геометрии магнитного канала, обеспечивающего требуемые градиенты магнитного поля. После ряда расчетов был выбран вариант с изменяющимся поперечным сечением вдоль длины канала. Начальная часть канала ( $1/4$  длины) представлена на рисунке 4.50, а последующая ( $3/4$  длины) на рисунке 4.51. В таблице 4.9 приведены основные параметры магнитного канала.

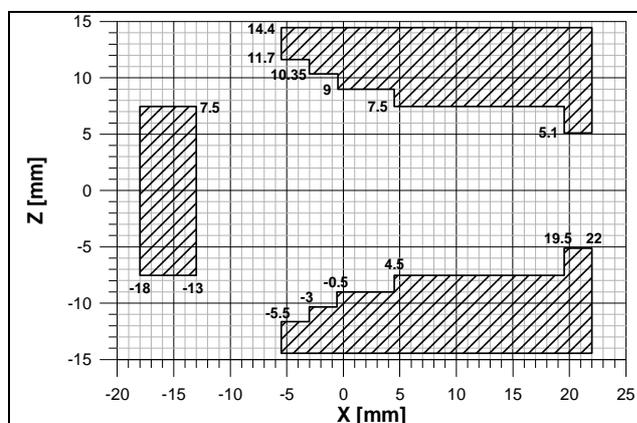


Рис. 4.50. Профиль канала в первой четверти длины (от  $84^\circ$  до  $91^\circ$ ). В верхней части рисунка цифрами показаны координаты Z, в нижней — координаты X.

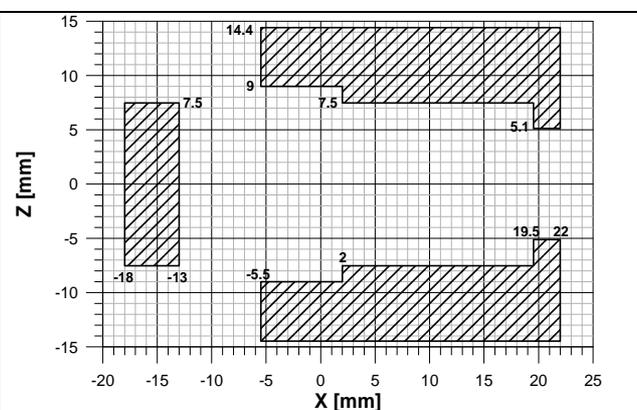


Рис. 4.51. Профиль канала в последних трех четвертях длины (от  $91^\circ$  до  $112^\circ$ ). В верхней части рисунка цифрами показаны координаты Z, в нижней — X.

Таблица 4.9. Основные параметры магнитного канала

Азимутальное положение канала, град.	84÷112	
Длина канала, мм	$\approx 400$	
Радиус кривизны, мм	$\approx 860$	
Рабочая апертура	горизонтальная, мм	25
	вертикальная, мм	15
Независимое перемещение входа и выхода канала, мм		$\pm 15$
Точность установки канала, мм		$\pm 1$
Градиент магнитного поля, создаваемый магнитными элементами канала, Тл/м		35 - 40
Суммарный градиент магнитного поля в апертуре канала, Тл/м		$\approx 5$

Для согласования положения канала и выводной траектории предусмотрена возможность независимого радиального перемещения входа и выхода магнитного канала. На рисунке 4.52 показано измеренное радиальное распределение магнитного поля в рабочей апертуре фокусирующего канала для 4 азимутов при уровне магнитного поля  $B_0 = 1,45$  Тл [135]. Величина радиального градиента магнитного поля меняется по длине магнитного канала, но интегральный градиент соответствует требуемой величине.

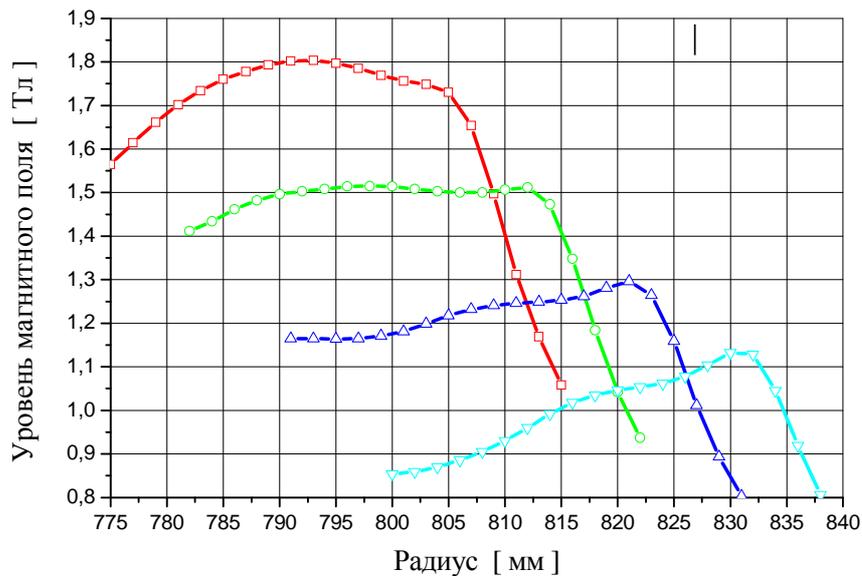


Рис. 4.52. Измеренное радиальное распределение магнитного поля в апертуре фокусирующего магнитного канала для 4 азимутов при уровне  $B_0=1,45$  Тл.

При моделировании огибающих пучка в процессе вывода использовались следующие параметры пучка (полученные из численных расчетов динамики пучка в процессе ускорения): горизонтальный и вертикальный эмиттансы на входе в электростатический дефлектор:  $\epsilon_x=10-15 \pi$  мм·мрад;  $\epsilon_z=18 \pi$  мм·мрад; максимальный разброс энергии  $\delta W=\pm 2\%$ . На рисунке 4.53 показан пример огибающих пучка ионов с  $A/Z=6$  и  $W=1,8$  МэВ/нуклон с магнитным каналом и без него. Фокусирующий магнитный канал позволяет получить выведенный пучок на выходе из вакуумной камеры циклотрона с горизонтальным размером  $\Delta X \approx 30$  мм и вертикальным размером  $\Delta Z \approx 20$  мм. На рисунке 4.54 приведены горизонтальный и вертикальный эмиттансы пучка на входе в канал транспортировки. Данные эмиттансы использовались в дальнейшем для расчетов параметров элементов системы транспортировки [135].

Для настройки системы вывода пучка используются диагностические элементы: пробник вывода, профилометр и люминофор.

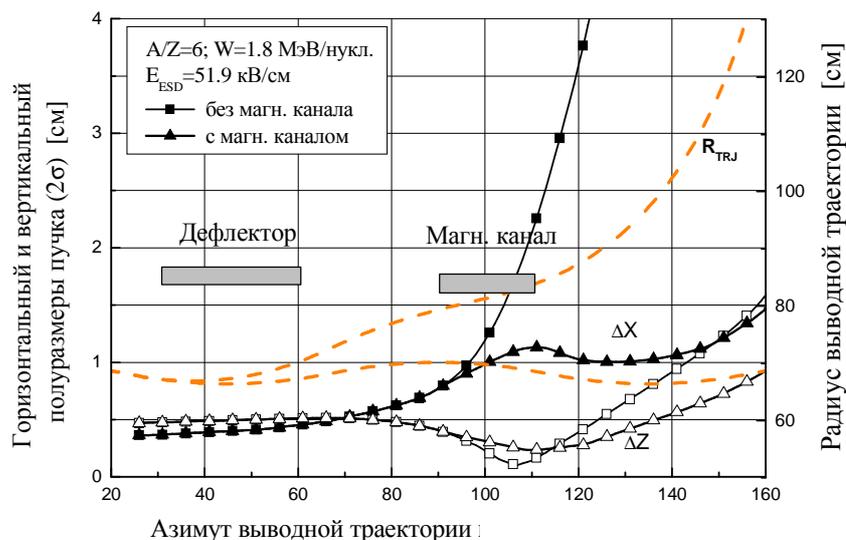


Рис. 4.53 Горизонтальная ( $\Delta X$ ) и вертикальная ( $\Delta Z$ ) огибающие пучка (полуразмер) с фокусирующим магнитным каналом и без него. Пунктирной линией показаны радиусы равновесной орбиты и выводной траектории

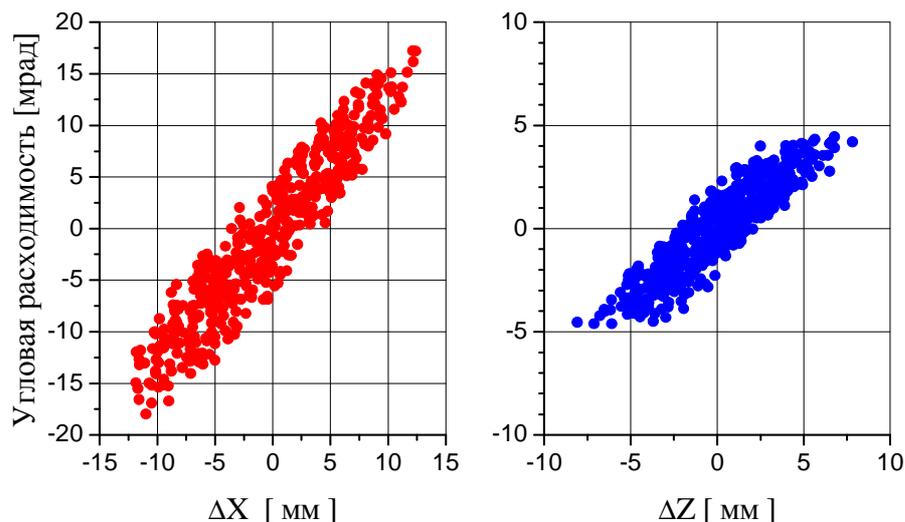


Рис.4.54. Горизонтальный и вертикальный эмиттансы пучка на входе в систему транспортировки для иона с массой к заряду  $A/Z=6$  и энергией  $W=1.8$  МэВ/нуклон.

Пробник вывода располагается между дефлектором и магнитным каналом. Он предназначен для определения размера и положения выводимого пучка перед входом в магнитный канал, а также измерения интенсивности. В рабочем положении пробник полностью перекрывает пучок ионов по траектории движения между дефлектором и магнитным каналом. Измерительная головка состоит из 10 изолированных ламелей шириной 5 мм. Измерение тока пучка с каждой ламели дает информацию о положении и размерах пучка в радиальном направлении. Для отвода мощности пучка ламели пробника имеют косвенное охлаждение за счет прижима через изолятор к корпусу, охлаждаемому дистиллированной водой. Профилومتر и люминофор располагаются в выводном патрубке, соединяющем вакуумную камеру и канал транспортировки. Профилومتر состоит из 15 вертикальных и 15 горизонтальных ламелей, изготовленных из вольфрамовой проволоки диаметром 1,6 мм. Шаг установки вертикальных и горизонтальных ламелей 5 мм. Профилومتر позволяет определить положение пучка и его горизонтальный и вертикальный размеры. Люминофор предназначен для качественного определения формы выводимого пучка. В качестве люминофора используется кварцевая пластина с размерами: 120 мм по горизонтали и 80 мм по вертикали. Пластина люминофора располагается под углом  $45^\circ$  к пучку относительно вертикальной оси. Вывод визуального профиля пучка осуществляется через видеокамеру на пульт управления. Ввод люминофора осуществляется ручным приводом с нижнего фланца выводного патрубка.

На рисунках 4.55-4.58 показаны фотографии электростатического дефлектора, фокусирующего магнитного канала, пробника вывода и выводного патрубка с профилометром и люминофором.

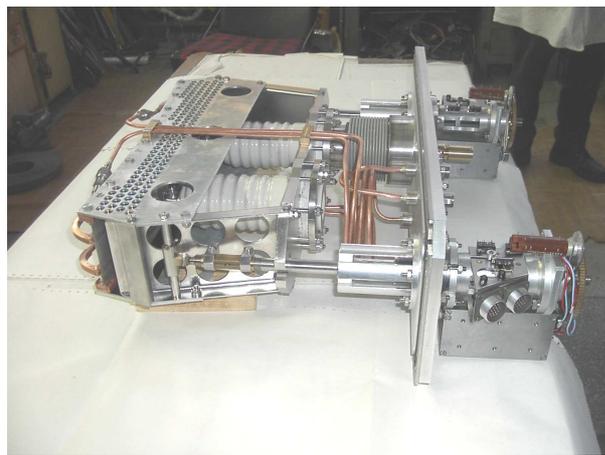


Рис. 4.55. Внешний вид электростатического дефлектора



Рис. 4.56. Внешний вид фокусирующего магнитного канала



Рис. 4.57. Измерительная часть пробника вывода.

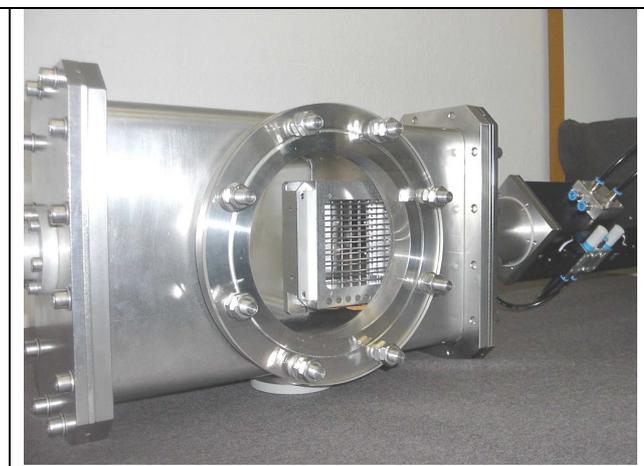


Рис. 4.58. Выводной патрубков с профилометром и люминофором.

### Экспериментальные результаты по эффективности системы вывода пучка

Настройка системы вывода проведена на пучках ионов  $^{14}\text{Ne}^{2+}$  и  $^{84}\text{Kr}^{12+}$ . После оптимизации положения элементов и режима ускорителя получена эффективность вывода 60–70% [41, 42, 78, 80]. Результаты экспериментов приведены в таблице 4.10. Выведенный пучок из циклотрона был адаптирован ионно-оптическими элементами канала транспортировки и с эффективностью, близкой к 100%, проведен по трем каналам пучков ионов высокой энергии.

Таблица 1.10. Параметры выведенных пучков

Ион	$^{84}\text{Kr}^{+12}$	$^{14}\text{N}^{2+}$
A/Z	7	7
Магнитное поле (Bo), Тл	1,42	1,64
Частота ВЧ системы, МГц	12,67	14,42
Гармоника ускорения	4	4
Банчер	Да	Нет
Ток ускоренного пучка, мкА	2,5	1,46
Ток выведенного пучка, мкА	1,65	0,9
Коэффициент вывода, %	66	61,6

## 4.7 Система транспортировки пучков ионов

### 4.7.1. Каналы транспортировки ионных пучков ускоренных ионов

Система транспортировки пучков ускоренных ионов циклотрона ДЦ-60 состоит из трех каналов (рис.4.59), оснащенных физическими и технологическими установками, позволяющими проводить как фундаментальные, так и прикладные исследования [78, 182].

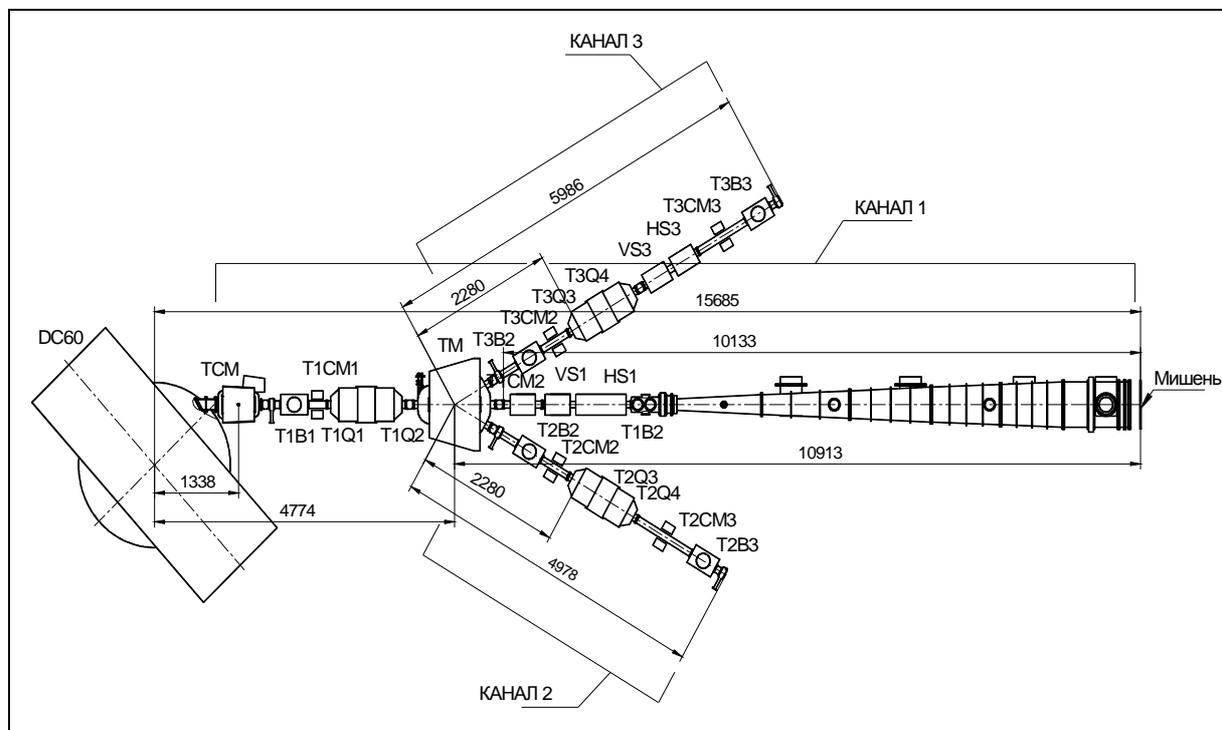


Рис. 4.59. Схема каналов транспортировки пучка циклотрона ДЦ-60. ТСМ и ТМ – выводной и поворотный магниты, Т1В1÷Т3В3 – блоки диагностики, Т1СМ1÷Т3СМ3 – корректирующие магниты, Т1Q1÷Т3Q4 – квадруполи, VS1 и VS3 – вертикальные магнитные сканеры, HS1 и HS3 – горизонтальные магнитные сканеры.

### Расчет каналов транспортировки тяжелых ионов

Система транспортировки выведенных ионных пучков, представленная на рисунке 4.59, состоит из трех каналов. В качестве начальной точки выбрана середина выводного магнита ТСМ. На общем участке для всех каналов с помощью дублета квадрупольных линз Т1Q1, Т1Q2 проводится фокусировка пучка на вход коммутирующего магнита ТМ. Канал 1 имеет длину 14,4 м от начала канала до мишени и работает при отключенном магните ТМ. Этот канал предназначен для облучения полимерных пленок различными ионами. В канале 1 фокусировка выведенного пучка ионов осуществляется с помощью двух квадруполей Т1Q1 и Т1Q2, расположенных перед магнитом ТМ. Система сканирования пучка (вертикальный VS1 и горизонтальный HS1 магнитные сканеры) располагается после коммутирующего магнита ТМ. В канале 1 располагаются также блоки диагностики Т1В1 и Т1В2 и корректирующие магниты Т1СМ1 и Т1СМ2.

Каналы 2 и 3 работают при включенном поворотном магните ТМ. Магнит ТМ осуществляет поворот пучка на угол  $\pm 30^\circ$ . В канале 2 магнитное поле поворотного магнита имеет такое же направление, как и магнитное поле в циклотроне, а в канале 3 – противоположное ему. Фокусировка в канале 2 осуществляется дублетом квадруполей Т2Q3 и Т2Q4. Предусмотрены блоки диагностики Т2В2 и Т2В3 и корректирующие магниты Т2СМ2 и Т2СМ3. В канале 3 установлены квадруполи Т3Q3 и Т3Q4, осуществляющие

фокусировку пучка, блоки диагностики ТЗВ2, ТЗВ3 и корректирующие магниты ТЗСМ2, ТЗСМ3.

Каналы 2 и 3 предназначены для проведения экспериментов в области ядерной физики. В канале 2 требуется, чтобы диаметр пучка на облучаемой мишени был ~10 мм. Для выполнения этого требования находились градиенты в дублетах Т1Q1,2, Т2Q3,4 и определялась длина канала. В канале 3 после второго дублета квадруполь располагаются вертикальный VS3 и горизонтальный HS3 магнитные сканеры, обеспечивающие равномерную засветку пучком мишени размером 50×50 мм. При этом требуется, чтобы диаметр пучка составлял 20 мм. Градиенты линз в дублете Т3Q3,4 определялись исходя из этого условия.

Как показали проведенные расчеты, в канале 1 транспортируются ионы во всех выбранных точках рабочей диаграммы циклотрона. На рисунке 4.60 приведен пример рассчитанных зависимостей от продольной координаты Z вертикальной (нижняя кривая, V) и горизонтальной (верхняя кривая, H) огибающих пучка для пучка ионов с отношением массы к заряду  $A/Z = 6$  и энергией 1,835 МэВ/нуклон.

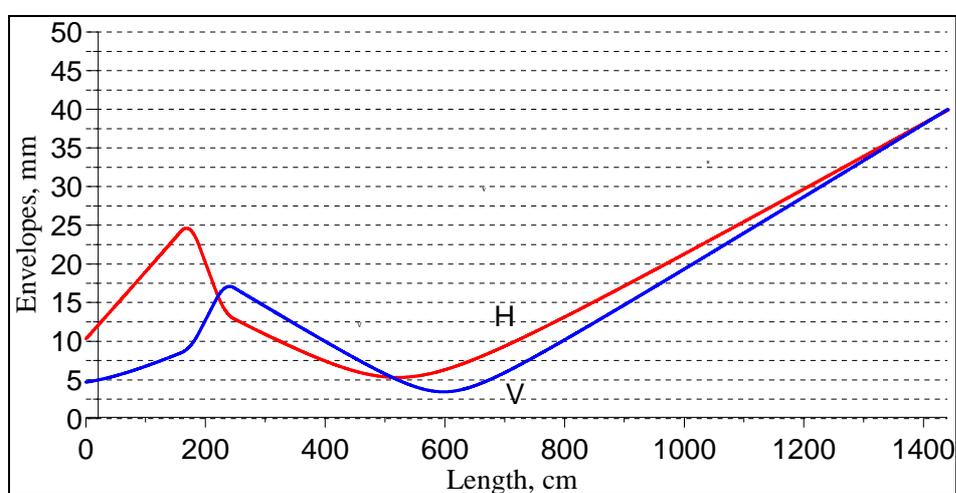


Рис. 4.60. Горизонтальная (H) и вертикальная (V) огибающие пучка в канале 1.  $A/Z = 6$ ,  $E = 1,835$  МэВ/нуклон

Из рисунка 4.60 можно видеть, что диаметр пучка при его пролете через коммутирующий магнит ТМ (~2,8 м – 3,6 м) не превышает 35 мм. При пролете пучка через сканирующие магниты (~4,9 м – 6 м) горизонтальный размер пучка не превышает 25 мм, а его вертикальный размер не превышает 20 мм. Это обеспечивает 100% прохождение пучка по тракту канала.

На рис. 4.61 показаны рассчитанные варианты транспортировки пучков в канале 2 для пучка ионов с отношением массы к заряду  $A/Z = 6$  и кинетической энергией  $E = 1,835$  МэВ/нуклон. Диаметр пучка при его пролете через коммутирующий магнит ТМ (~2,8 м – 3,6 м) не превышает 65 мм.

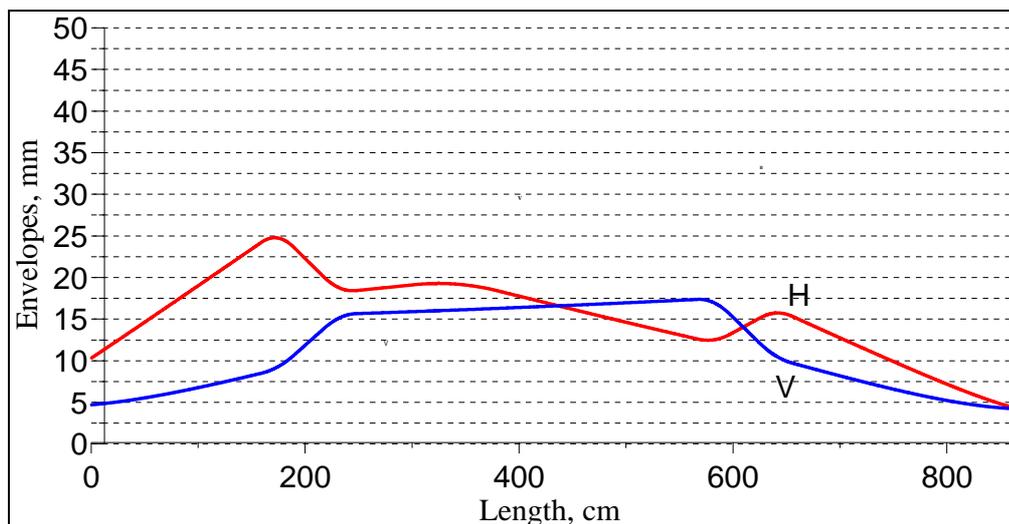


Рис. 4.61. Горизонтальная (H) и вертикальная (V) огибающие пучка в канале 2.  $A/Z = 6$ ,  $E = 1,835$  МэВ/нуклон.

На рисунке 4.62 показаны рассчитанные варианты транспортировки пучков в канале 3 для тех же параметров пучка. Как видно из рисунка, диаметр пучка при его прохождении через поворотный магнит ТМ (~2,8 м – 3,6 м) не превышает 40 мм. При прохождении пучка через сканирующие магниты (~6,5 м – 7,5 м) горизонтальный размер пучка не превышает 45 мм, а его вертикальный размер – 20 мм. Общая длина канала 3 составляет 983 см.

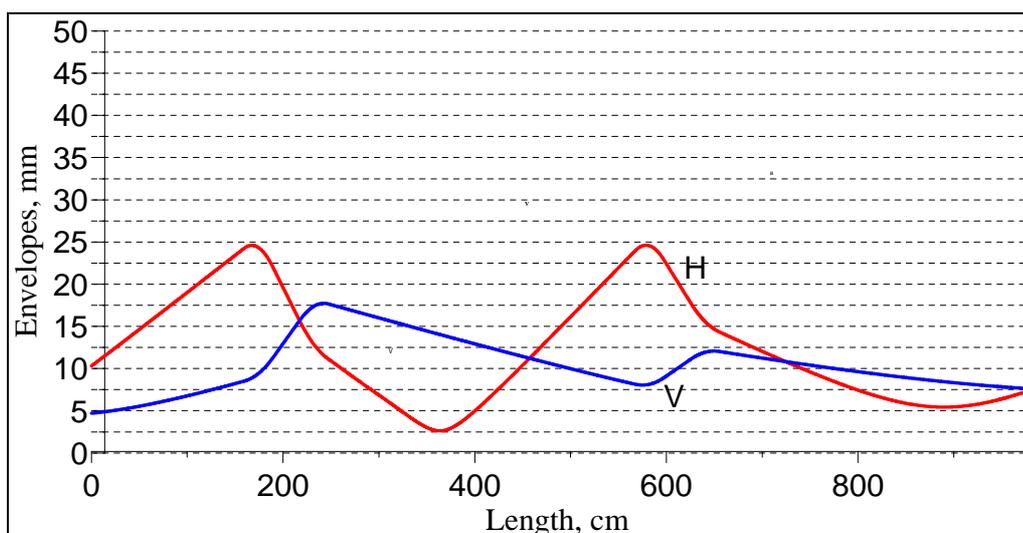


Рис. 4.62. Горизонтальная (H) и вертикальная (V) огибающие пучка в канале 3.  $A/Z = 6$ ,  $E = 1,835$  МэВ/нуклон.

В точке сопряжения системы вывода пучка из циклотрона и канала транспортировки выбрана середина выводного магнита ТСМ, предназначенного для согласования направления выводных траекторий пучков ионов с осью выводного канала. Угол коррекции пучка может варьироваться в выводном магните в пределах  $\pm 2,5^\circ$ .

Канал №1 для облучения трековых мембран имеет длину 14 м и работает при отключенном коммутирующем магните. Для транспортировки ионов в каналы №2 и №3 пучок поворачивается коммутирующим магнитом на угол  $\pm 30^\circ$ . Фокусировка пучка в каждом из каналов осуществляется дублетом линз, а коррекция положения пучка – парой корректирующих магнитов.

Система сканирования ионного пучка в канале №1 (рис.4.63) обеспечивает облучение стационарной мишени размерами  $600 \times 220$  мм<sup>2</sup> с однородностью распределения частиц по облучаемой площади не хуже  $\pm 5\%$  и с краевыми потерями пучка не более 20%.

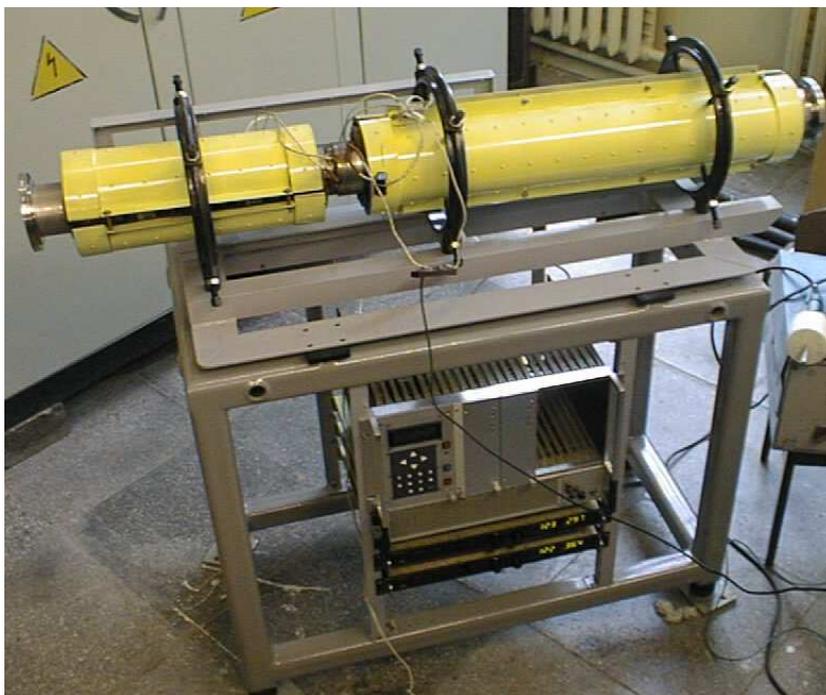


Рис. 4.63. Сканирующая система канала №1.

Небольшая система сканирования, установленная в канале №3, позволяет производить облучение стационарной мишени размерами  $50 \times 50$  мм с однородностью распределения частиц по облучаемой площади не хуже  $\pm 5\%$ .

В процессе запуска ускорителя были выполнены эксперименты по облучению пленки в канале №1 с последующим контролем основных технологических параметров трековых мембран. Было сформировано поле облучения высотой 100 мм и шириной 400 мм, что вполне достаточно для облучения полимерной пленки шириной 320 мм. Контроль формы пучка на мишени и величины развертки осуществлялся при помощи системы цилиндров Фарадея с независимым считыванием сигнала с каждого цилиндра.

Для облучения использовалась лавсановая пленка толщиной 12 мкм. Скорость перемотки пленки под пучком составляла  $5 \text{ см} \cdot \text{с}^{-1}$ . Облучение производилось при токе пучка ионов  $^{84}\text{Kr}^{12+}$  равном 50 нА, что обеспечивает плотность латентных треков в облученном материале около  $6 \cdot 10^8 \text{ см}^{-2}$ . Регулировка интенсивности ионов и поддержание стабильности тока пучка на мишени производились с помощью варьирования тока в первом фокусирующем соленоиде системы аксиальной инжекции. Вакуум в технологической установке при перемотке пленки со скоростью  $5 \text{ см} \cdot \text{с}^{-1}$  составил  $3 \cdot 10^{-4}$  Торр.

#### 4.7.2 Канал для прикладных исследований на пучках ионов низких энергий

Для проведения фундаментальных и прикладных исследований на пучках тяжелых ионов низких энергий с кинетической энергией  $\sim 25 \text{ Z/A кэВ/нуклон}$  в циклотроне ДЦ-60 создан специализированный канал [183]. Пучки ионов транспортируются от ECR источника до мишени без ускорения в циклотроне (рис.4.64). Начальный участок канала для прикладных исследований (от ECR источника до поворотного магнита IM90) совпадает с горизонтальным участком линии инжекции в циклотрон. Канал для прикладных исследований на пучках ионов низких энергий работает при выключенном квадруполе IQ1 и анализирующем магните IM90.

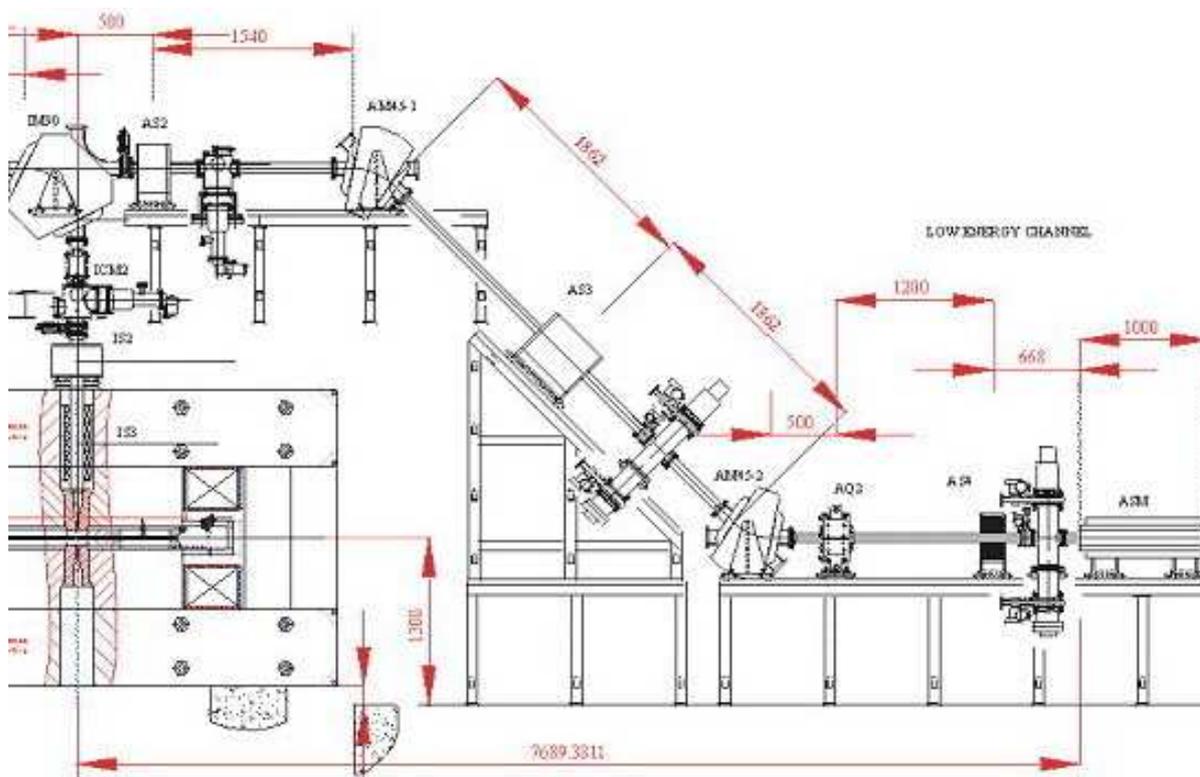


Рис.4.64. Канал для транспортировки пучков низких энергий.

## 4.8 Вакуумная система циклотронного комплекса тяжелых ионов ДЦ-60

Ускорительный комплекс на базе циклотрона ДЦ-60 можно подразделить на четыре основные системы с соответствующими требованиями к вакуумной системе:

- ECR источник с каналом аксиальной инжекции,
- канал низких энергий,
- вакуумная камера циклотрона,
- каналы транспортировки пучков ускоренных ионов, включая физические установки.

### 4.8.1 Численное моделирование процесса перезарядки ионов на остаточном газе

Для получения исходных данных для разработки проекта и оптимизации вакуумной системы циклотрона ДЦ-60 проведено численное моделирование процессов потерь пучка из-за перезарядки ионов на остаточном газе в камере ускорителя, канале аксиальной инжекции и каналах транспортировки пучков от циклотрона к физическим мишеням.

Расчет вакуумных потерь ионов в процессе ускорения в циклотроне ДЦ-60 сделан с помощью компьютерной программы VACLOS [157, 158, 162]. Программа учитывает изменение энергии ионов и соответствующих сечений перезарядки ионов при ускорении их от центра до конечного радиуса циклотрона. Оценка вакуумных потерь ионов в канале аксиальной инжекции, канале пучков низкой энергии и каналах ускоренных пучков выполнена по программам GENAP [163] и VACLOS.

В расчетах в первую очередь рассматривались наиболее высокозарядные и тяжелые ионы из рабочего диапазона ускоряемых частиц, а также ионы с минимальной энергией, которые имеют наибольшие потери в остаточном газе и определяют основные требования к вакуумной системе.

## Расчет потерь пучка ионов на остаточном газе в вакуумной камере циклотрона

Наиболее жесткие требования к вакууму в камере ускорителя предъявляются при ускорении пучков ионов ксенона, поскольку из всего спектра ускоряемых ионов на ДЦ-60 они имеют наибольшее сечение перезарядки на остаточном газе [42, 78, 82, 83, 182].

На рисунке 4.65 представлены расчетные зависимости коэффициентов трансмиссии пучка ионов  $^{132}\text{Xe}^{11+}$  при его ускорении в циклотроне до энергии 0,35 МэВ/нуклон и пучка ионов  $^{132}\text{Xe}^{18+}$  при ускорении до энергий 0,72 и 1,24 МэВ/нуклон от среднего давления в вакуумной камере циклотрона. Из графиков видно: чтобы потери из-за перезарядки на остаточном газе ускоряемых ионов не превышали 10÷15%, необходимо обеспечить средствами вакуумной откачки среднее давление не хуже  $(1\div 2)\cdot 10^{-7}$  Торр.

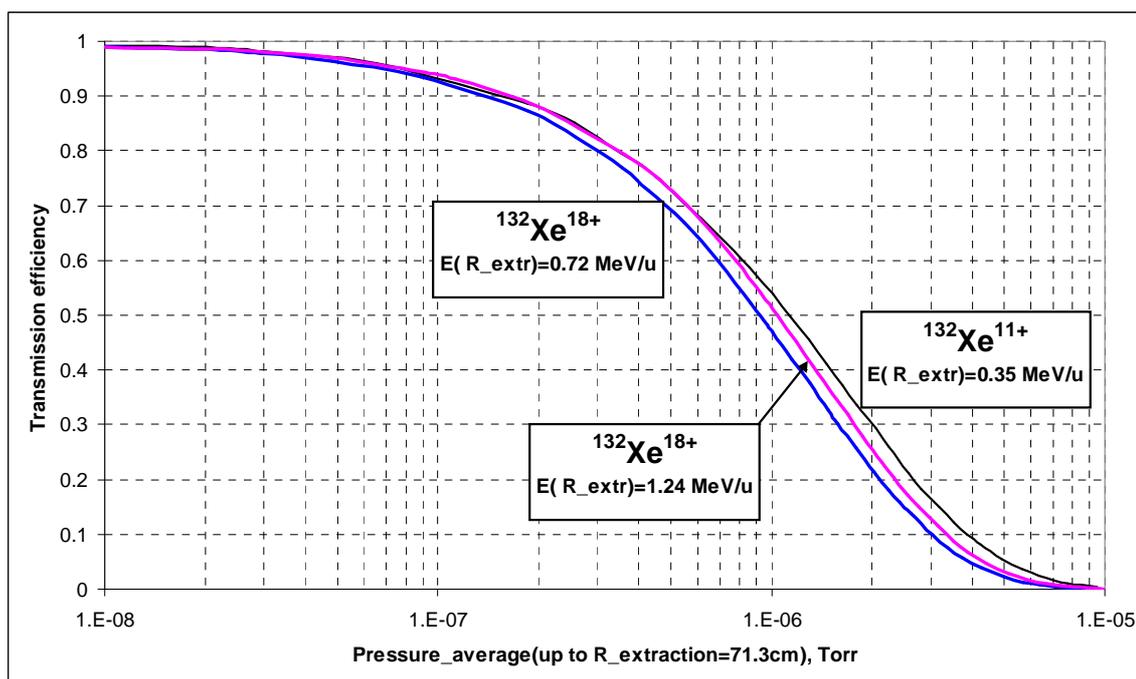


Рис. 4.65. Коэффициент трансмиссии пучка ионов  $^{132}\text{Xe}^{11+}$  и  $^{132}\text{Xe}^{18+}$  при ускорении в циклотроне от центра до конечного радиуса  $R_{\text{extr}} = 71,3$  см

## Расчет вакуумных потерь пучка при транспортировке по каналу аксиальной инжекции и каналу пучков ионов низкой энергии

Протяженность линии аксиальной инжекции и канала пучков низкой энергии 5 и 15 м соответственно. Результаты расчетов представлены на рисунках 4.66 и 4.67 [83]. Из графиков зависимости эффективности транспортировки пучка от вакуума видно, что при давлении  $1\cdot 10^{-7}$  Торр потери пучка в канале аксиальной инжекции не будут превышать 10% для всего диапазона ускоряемых ионов, включая 18-зарядный ксенон. В канале пучков низкой энергии, поскольку длина в три раза больше, при таком же давлении потери ионов  $^{132}\text{Xe}^{18}$  будут составлять 12%, ионов  $^{84}\text{Kr}^{12+}$  – 8%, более легких ядер – несколько процентов. Такие потери могут быть признаны разумно допустимыми, и давление  $1\cdot 10^{-7}$  Торр в канале аксиальной инжекции пучка и канале пучков ионов низкой энергии было принято как требование к вакуумной системе.

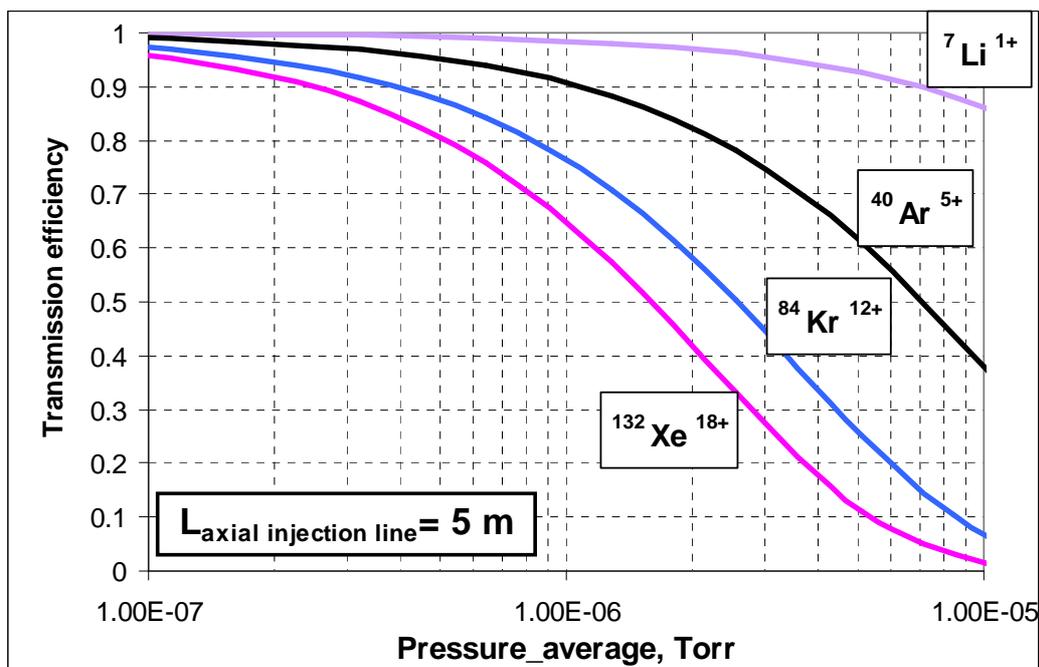


Рис. 4.66. Коэффициент трансмиссии пучков ионов  ${}^7\text{Li}^{1+}$ ,  ${}^{40}\text{Ar}^{5+}$ ,  ${}^{84}\text{Kr}^{12+}$ ,  ${}^{132}\text{Xe}^{18+}$  в линии аксиальной инжекции длиной 5 м.

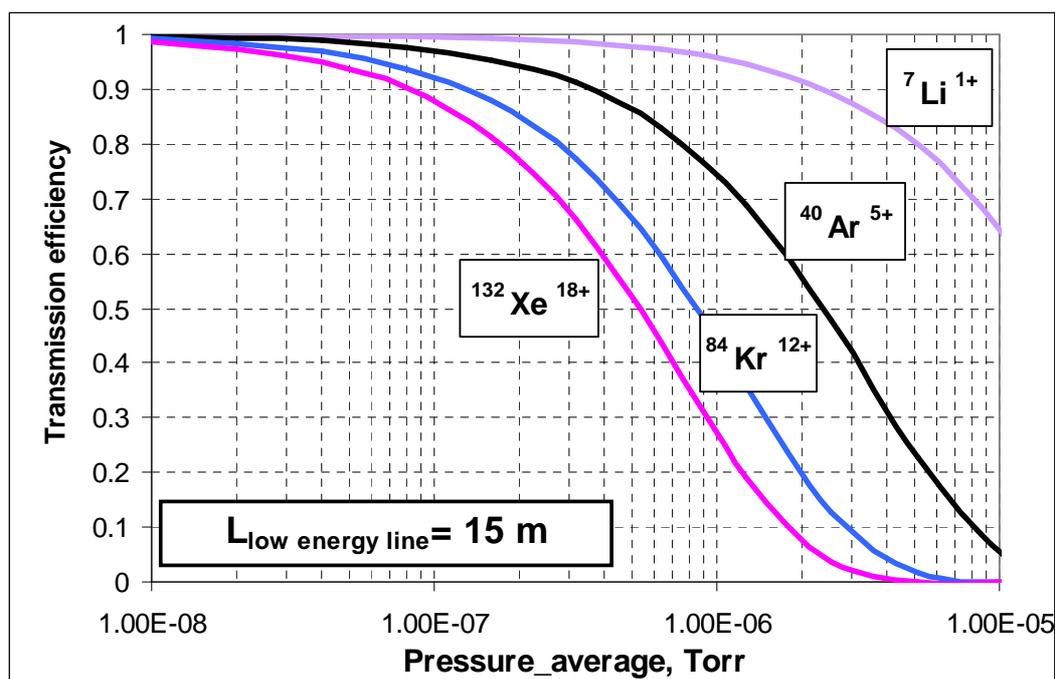


Рис. 4.67. Коэффициент трансмиссии пучков ионов  ${}^7\text{Li}^{1+}$ ,  ${}^{40}\text{Ar}^{5+}$ ,  ${}^{84}\text{Kr}^{12+}$ ,  ${}^{132}\text{Xe}^{18+}$  в канале пучков низкой энергии длиной 15 м.

### Эффективность транспортировки ионов в канале ускоренных пучков

Для оценки необходимого давления в каналах пучков ионов высокой энергии был выполнен расчет перезарядки ионов на остаточном газе в канале №1, как наиболее длинном канале циклотрона ДЦ-60 [78, 83]. Протяженность канала составляет 15 м, его схема приведена на рисунке 4.68.

Из рабочего диапазона ускоряемых ионов в первую очередь рассмотрены высокозарядные ионы ксенона:  $^{132}\text{Xe}^{18+}$  с энергией 0,72 и 1,24 МэВ/нуклон,  $^{132}\text{Xe}^{20+}$  с энергией 0,89 МэВ/нуклон и  $^{132}\text{Xe}^{11+}$  с энергией 0,35 МэВ/нуклон, как имеющие наибольшие потери и определяющие требования к вакуумной системе.

Графики эффективности транспортировки ускоренных ионов  $^{132}\text{Xe}^{11+}$ ,  $^{132}\text{Xe}^{18+}$  и  $^{132}\text{Xe}^{20+}$  по каналу № 1 в зависимости от вакуума представлены на рисунке 4.69. Из них видно, что при необходимости обеспечения эффективности трансмиссии выше 85-90% для любых ускоренных ионов, включая ионы с минимальной энергией  $^{132}\text{Xe}^{11+}$  (0,35 МэВ/нуклон), среднее давление в канале транспортировки должно поддерживаться на уровне  $P_{\text{среднее}} \leq (2-3) \cdot 10^{-6}$  Торр. Такой вакуум, согласно расчетам, обеспечивает схема откачки четырьмя высоковакуумными насосами с эффективной скоростью откачки по азоту 450 л/с (с номинальной производительностью по 500 л/с), распределенными по длине канала, и двумя такими же насосами, расположенными непосредственно на установке для облучения полимерной пленки, а также тремя насосами в «нулевой», общей для трех каналов, секции с номинальной производительностью каждого насоса по 150 л/с (см. рис. 4.70). В расчетах газовый поток с мишени в условиях перемотки пленки принят  $1,1 \cdot 10^{-2}$  Торр·л/с, газоотделение с поверхности ионопровода –  $1 \cdot 10^{-9}$  Торр·л·с<sup>-1</sup>·см<sup>-2</sup>.

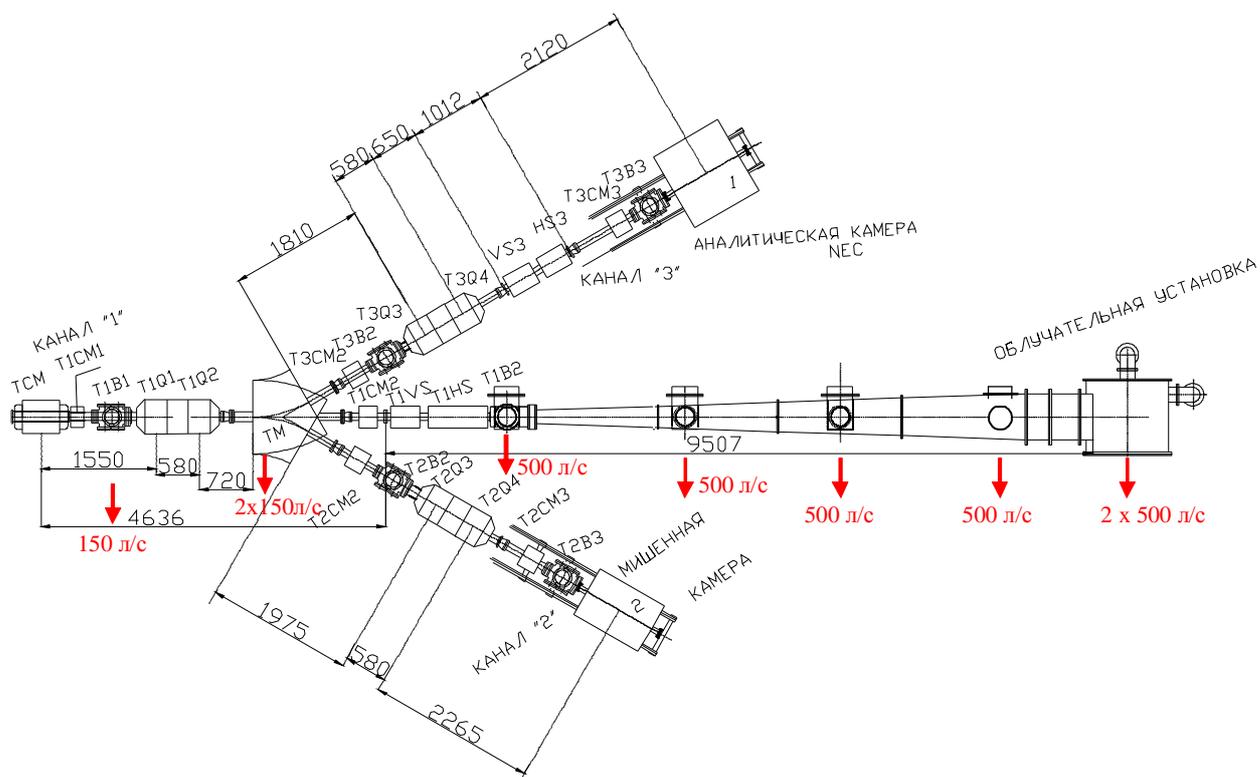


Рис. 4.68. Канал №1 ускоренных пучков с установкой для облучения пленки (стрелками показано положение вакуумных насосов, указаны их номинальные скорости откачки)

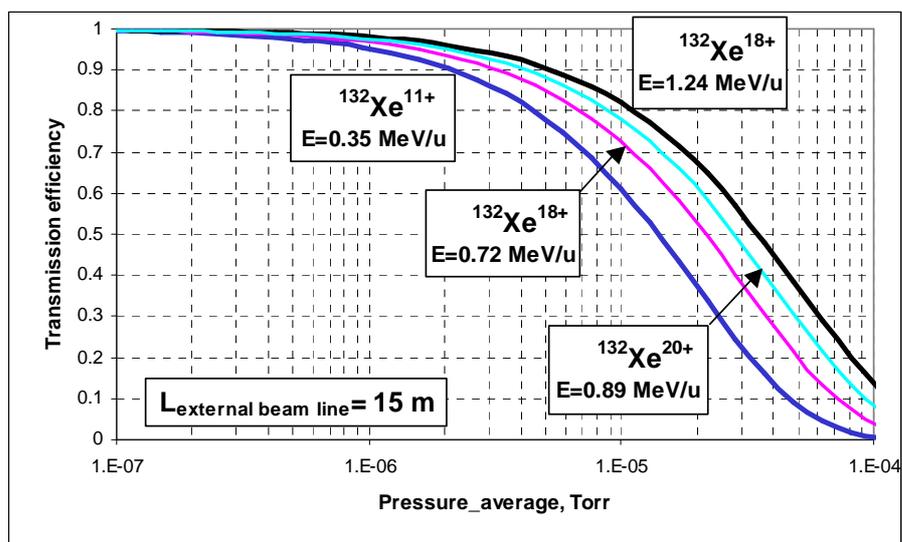


Рис. 4.69. Эффективность трансмиссии пучков ускоренных ионов  $^{132}\text{Xe}^{11+}$  (0,35 МэВ/нуклон),  $^{132}\text{Xe}^{18+}$  (0,72 и 1,24 МэВ/нуклон) и  $^{132}\text{Xe}^{20+}$  (0,89 МэВ/нуклон) в канале №1 протяженностью 15 м.

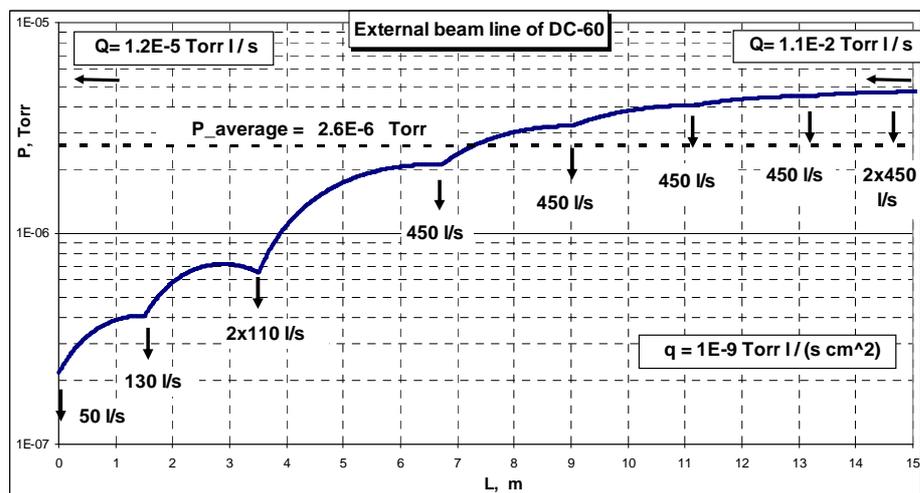


Рис. 4.70. Распределение давления в канале №1 облучения полимерной пленки при эффективных скоростях откачки вакуумных насосов 130 л/с, 2×110 л/с, 4×450 л/с и 2×450 л/с, среднее давление в канале  $2,6 \cdot 10^{-6}$  Торр, газовый поток с мишени  $1,1 \cdot 10^{-2}$  Торр·л/с; на насос вакуумной камеры циклотрона приходится дополнительная нагрузка  $\sim 50$  л/с вследствие газового потока из ионопровода  $Q = 1,2 \cdot 10^{-5}$  Торр·л/с.

#### 4.8.2 Система вакуумной откачки циклотронного комплекса

##### Система откачки вакуумной камеры циклотрона

Вакуумный объем ускорителя ДЦ-60 составляет  $\sim 3,5 \text{ м}^3$  и состоит из:

- вакуумной камеры, изготовленной из алюминиевого сплава Д16Т диаметром примерно 2,2 м; верхней и нижней крышками камеры являются два стальных полюса магнита со сборками из четырех секторов на каждом полюсе и двумя блоками корректирующих катушек, расположенным между полюсом и секторами,
- двух высокочастотных резонаторов диаметром  $\sim 0,8$  м и длиной около 2,4 м; внутренняя поверхность резонаторов – медная, штоки и дуанты также изготовлены из меди.

На камере ускорителя установлены пробники для измерения тока пучка, дефлектор, магнитный канал и другие устройства. Вводы движения всех механизмов выполнены с

использованием пластинчатых сильфонов. Кроме того, вакуумная камера ускорителя соединена с ионопроводами каналов аксиальной инъекции пучка, каналов пучков ионов низкой и высокой энергии, которые выполнены из нержавеющей труб с внутренним диаметром 100 мм [78, 83, 181, 182].

Для уплотнения фланцев вакуумной камеры использованы высоковакуумные витонные оринги.

Основной задачей при разработке вакуумной системы циклотрона ДЦ-60 был выбор средств откачки, конструктивных материалов и технологии обработки, обеспечивающих получение вакуума:

- в камере ускорителя –  $(1-2) \cdot 10^{-7}$  Торр,
- в канале аксиальной инъекции пучка и канале ионов низкой энергии – около  $1 \cdot 10^{-7}$  Торр,
- в каналах ускоренных пучков – лучше  $2 \cdot 10^{-6}$  Торр.

Конструктивные материалы, которые используются для изготовления вакуумных объемов ДЦ-60:

- магнитная сталь для изготовления полюсов и секторов магнита;
- нержавеющая сталь типа 12Х18Н10Т для изготовления боковых крышек камеры, шлюзов, выводных устройств, магнитных каналов вывода пучка, пробников и т. п.;
- медь бескислородная для изготовления высокочастотной системы;
- эластомерные уплотнения из витона для герметизации разборных элементов конструкций камеры ДЦ-60.

Выполнение операций по вакуумной подготовке металлических поверхностей позволяет уменьшить скорость удельного газоотделения с поверхности металлов (медь, нержавеющая сталь, алюминий) до величины  $q = 3 \cdot 10^{-9} \div 2 \cdot 10^{-10}$  л·Торр·сек<sup>-1</sup>·см<sup>-2</sup>.

Крупногабаритные детали магнита, находящиеся в вакууме, полюса и сектора магнита, шиммы были покрыты электролитическим способом тонким слоем хрома 50-100 мкм, что значительно уменьшает величину газоотделения с поверхности металла.

### Расчет газовых потоков в вакуумную камеру ДЦ-60

Общий газовый поток (натекание)  $Q$  (л·Торр/сек) представляет собой сумму газового потока  $Q_{\text{течи}}$  через неплотности уплотнений,  $Q_{\text{газоотд}}$  – газоотделения с поверхности вакуумного объема,  $Q_{\text{ЕЦР}}$  – поступление газового потока по каналу аксиальной инъекции из источника ионов, а также стимулированная десорбция с поверхности камеры за счет бомбардировки поверхности ионами в режиме ускорения.

$$\Sigma Q = Q_{\text{газоотд}} + Q_{\text{течи}} + Q_{\text{ЕЦР}}$$

Поверхность вакуумного объема ускорителя формируется из:

– магнитная сталь (полюса, сектора, шиммы)	– 10 м <sup>2</sup>
– нержавеющая сталь (боковые фланцы камеры, выходные камеры для вывода пучка, шлюзы для пробников)	– 6 м <sup>2</sup>
– медь (высокочастотные резонаторы, дуанты)	– 17 м <sup>2</sup>
– алюминиевый сплав (корпус корректирующих катушек, стенки вакуумной камеры циклотрона)	– 8 м <sup>2</sup>
– эластомерные уплотнения (витон)	– 0,1 м <sup>2</sup>
<b>Итого:</b>	<b>41,1 м<sup>2</sup></b>

Удельная величина газоотделения с поверхности вакуумного объема камеры циклотрона ДЦ-60 для металлической поверхности (после технологического цикла обработки и последующей вакуумной тренировки в течение 50 - 150 часов) составит в среднем  $g_m = 1 \cdot 10^{-5}$  л·Торр·с<sup>-1</sup>·м<sup>-2</sup>, для эластомерных уплотнений  $g_{\text{витон}} = 6 \cdot 10^{-4}$  л·Торр·с<sup>-1</sup>·м<sup>-2</sup>.

Газовый поток за счет десорбции с поверхности в камере ДЦ-60 составит  $Q_{\text{газоотд}} = g_{\text{м}} \cdot S_{\text{м}} + g_{\text{витон}} \cdot S_{\text{витон}} = 4,1 \cdot 10^{-4} + 6 \cdot 10^{-5} = 4,7 \cdot 10^{-4} \text{ л} \cdot \text{Торр} \cdot \text{с}^{-1}$ .

Газовый поток в камеру ДЦ-60 за счет внешних течей из-за возможной негерметичности уплотнений при сборке определяется с помощью чувствительного течеискателя и может составлять  $Q_{\text{течи}} = 5 \cdot 10^{-8} \text{ л} \cdot \text{Торр} \cdot \text{с}^{-1}$ .

Поступление газового потока из ЕЦР источника и стимулирование десорбционных процессов в режиме ускорения составит  $Q_{\text{ЕЦР}} = 2 \cdot 10^{-4} \text{ л} \cdot \text{Торр} \cdot \text{с}^{-1}$

Таким образом, суммарная величина газового потока в ДЦ-60 в режиме работы по ускорению и выводу тяжелых ионов составит величину  $\Sigma Q = Q_{\text{газоотд}} + Q_{\text{течи}} + Q_{\text{ЕЦР}} = 4,7 \cdot 10^{-4} + 5 \cdot 10^{-8} + 2 \cdot 10^{-4} \cong 6,7 \cdot 10^{-4} \text{ л} \cdot \text{Торр} \cdot \text{с}^{-1}$

Для обеспечения рабочего вакуума в камере циклотрона на уровне  $P = (1 \div 2) \cdot 10^{-7} \text{ Торр}$  необходима эффективная быстрота действия высоковакуумных средств откачки

$$S_{\text{эф}} = \Sigma Q / P = (6700 \div 3400) \text{ л/с.}$$

### Средства высоковакуумной откачки

Для вакуумной откачки циклотрона наиболее оптимальна комбинация турбонасосов и крионасосов. Использование турбонасосов обусловлено необходимостью проведения работ по поиску течей и создания предварительного вакуума в камере ускорителя  $P \leq 10^{-5} \text{ Торр}$ , что обеспечивает более длительную работу крионасосов без регенерации.

Для измерения давления в вакуумной системе ДЦ-60 использованы датчики:

TPR281 (Pirani) – диапазон:  $1000 \div 5 \cdot 10^{-4} \text{ Торр}$ ,

PKR251 (Penning) – диапазон:  $760 \div 5 \cdot 10^{-9} \text{ Торр}$ .

В качестве вакуумметра для этих датчиков использован TPG262A DualGauge, имеющий 2 канала измерения вакуума, и TPG256 MaxiGauge, имеющий 6 каналов измерения вакуума [83].

### Схема вакуумной откачки камеры ускорителя

Для высоковакуумной откачки камеры циклотрона установлено два турбонасоса серии ВВ-150 (Россия), четыре турбонасоса серии ВВ-500 (Россия) и два крионасоса НВК320-5,0 (Россия). Два турбонасоса ВВ-500 и два крионасоса НВК320-5,0 устанавливаются на двух специальных патрубках камеры ускорителя. По два турбонасоса ВВ-150 и ВВ-500 расположены на резонаторных баках. Насосы ВВ-150 установлены за закорачивающей пластиной для увеличения эффективности откачки закрытого объема. Турбонасосы производят предварительную откачку камеры ускорителя до давления  $P \leq 10^{-5} \text{ Торр}$  и позволяют в случае необходимости осуществить поиск течей. На время работы ускорителя турбонасосы на патрубках камеры ускорителя выключаются, т.к. расположены в зоне сильного магнитного поля. Турбонасосы, установленные на резонаторных баках, из-за удаленности от основного магнита во время работы ускорителя не выключаются, что позволяет эффективно откачивать газовый поток из объемов высокочастотных резонаторов.

Таблица 4.11. Характеристики высоковакуумных насосов.

Характеристика	ВВ500	ВВ150	НВК 320-5,0
Присоединительный фланец	DN200 ISO-K	DN100 ISO-K	DN320 ISO-K
Скорость откачки, л/с			
Гелий	500	150	
Азот	500	150	5000
Вода			10500
Время выхода на режим	20 мин	3 мин	90 мин

Вакуумная система имеет две форвакуумные линии:

- Линия фороткачки ускорителя в диапазоне  $760 \div 5 \cdot 10^{-2}$  Торр., которая также используется для регенерации крионасосов, фороткачки корректирующих катушек, шлюзов пробников и инфлектора.
- Линия фороткачки турбонасосов. Для обеспечения безаварийной работы ускорителя на эту форлинию установлены два насоса с возможностью их коммутации.

Таблица 4.12. Характеристики форвакуумных насосов

Характеристики	DUO120	DUO 065
Присоединительный фланец	63 ISO	DN40 ISO
Скорость откачки, л/с	~ 33	~ 18
Предельный вакуум, Торр	$3 \cdot 10^{-3}$	$3 \cdot 10^{-3}$
Вес, кг	215	65

Схема вакуумной откачки камеры циклотрона приведена на рис. 4.71, где:

CFP1, CFP2 – форвакуумные насосы;

СТ1, СТ2 – цеолитовые ловушки;

CP3 ÷ CP8 – турбонасосы;

CP1, CP2 – крионасосы;

CGV1 – шибер вывода пучка;

CGVinf – шибер инфлектора;

CGVP1, CGVP2 – шиберы крионасосов;

CGVP3 ÷ CGVP6 – шиберы турбонасосов;

CFV1 – клапан фороткачки камеры ускорителя;

CFVinf – клапан фороткачки шлюза инфлектора;

CFVC1 – клапан откачки корректирующих катушек;

CVP3 ÷ CVP8 – клапаны фороткачки турбонасосов;

CVP1, CVP2 – клапаны регенерации крионасосов;

CLV1, CLV2 – клапаны для подсоединения течеискателя;

CVV1, CVVinf – ручные клапаны напуска атмосферы;

CG1 – датчик давления «черновой» форлинии (фороткачка камеры, инфлектора и регенерация крионасосов);

CG2 – датчик давления «чистой» форлинии турбонасосов;

CG3, CG4 – датчики давления в камере циклотрона.

Откачка камеры ускорителя осуществляется в 5 этапов:

1-й: Форвакуумная откачка корректирующих катушек насосом CFP1 до давления  $P \leq 10^{-1}$  Торр.

2-й: Форвакуумная откачка камеры насосом CFP1 до давления  $P \leq 5 \cdot 10^{-2}$  Торр.

3-й: Откачка камеры ускорителя турбонасосами CP3 ÷ CP8. Параллельно осуществляется регенерация крионасосов CP1, CP2 и их запуск. К моменту выхода крионасосов на рабочий режим ( $T = 16 - 18^\circ\text{K}$ ) давление в камере составит  $P \leq 10^{-5}$  Торр.

4-й: Откачка камеры ускорителя, турбонасосами CP3 ÷ CP8 и крионасосами CP1, CP2.

5-й: При включении магнитного поля откачка камеры ускорителя, турбонасосами CP5 ÷ CP8 и крионасосами CP1, CP2.

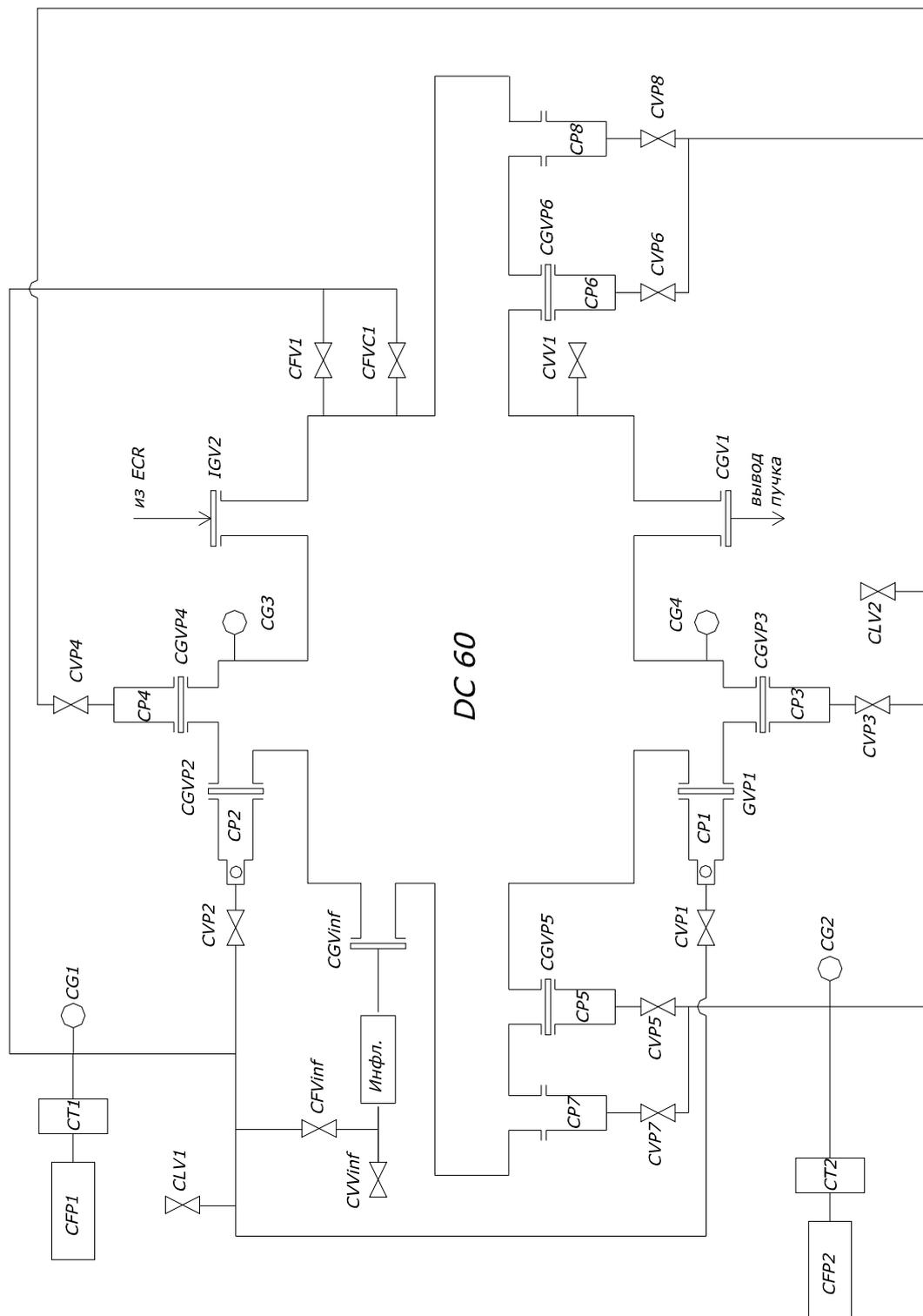


Рис. 4.71. Схема вакуумной откачки камеры циклотрона ДЦ-60.

## Вакуумная система канала аксиальной инжекции и канала пучков низкой энергии

Вакуумная система комплекса аксиальной инжекции и канала пучков низкой энергии должна обеспечить давление в ионопроводе около  $1 \cdot 10^{-7}$  Торр.

Одним из наиболее важных факторов, определяющих выбор высоковакуумного оборудования и место расположения средств откачки, является проводимость ионопровода. Проводимость участка подключения вакуумного насоса к ионопроводу должна быть выше номинальной скорости откачки насоса, чтобы эффективная производительность насоса существенно не уступала его номинальной производительности.

На циклотронном комплексе ДЦ-60, как для канала аксиальной инжекции, так и для каналов пучков ионов низкой и высокой энергий, применяется ионопровод с внутренним диаметром 100 мм.

Учитывая натекание газа в ионопровод из ионного источника и газоотделение с поверхности, выбрана комбинация откачных средств (см. табл. 4): крионасосы НВК160-0.8 и турбонасосы ВВ-150 (производство Россия).

Для обеспечения работы высоковакуумных средств откачки канала аксиальной инжекции пучка и канала пучков низкой энергии созданы следующие форвакуумные линии:

- Линия фороткачки секций в диапазоне  $760 \div 5 \cdot 10^{-2}$  Торр. Эта форлиния используется также для регенерации крионасосов и фороткачки газовой системы ECR источника.
- Линия фороткачки турбонасосов.

На рис. 10 приведена схема вакуумной откачки канала аксиальной инжекции пучка и канала пучков низких энергий, где:

- IFP1, IFP2 – форвакуумные насосы;
- IT1, IT2 – ловушки;
- IP1 ÷ IP3, IP6, AP1, AP4, AP5 – турбонасосы;
- IP4, IP5, AP2, AP3 – крионасосы;
- IGV0 ÷ IGV3, AGV1 – разделительные шиберы;
- IGVP4, IGVP5, AGVP2, AGVP3 – шиберы насосов;
- IFV0 ÷ IFV2, AFV1 – клапаны фороткачки секций;
- IVP1 ÷ IVP3, IVP6, AVP1, AVP4, AVP5 – клапаны фороткачки турбонасосов;
- IVP4, IVP5, AVP2, AVP3 – клапаны регенерации крионасосов;
- ILV1, ILV2 – клапаны для подсоединения течеискателя;
- IVV0 ÷ IVV2, AVV1 – клапаны напуска атмосферы в секции;
- IG1 – датчик давления «черновой» линии;
- IG2 – датчик давления форлинии турбонасосов;
- IG3 – датчик давления секции 0 (шлюз подачи твердого вещества в ЭЦР);
- IG4 – датчик давления секции 1 в области инжекции рабочих веществ в ЭЦР;
- IG5 – датчик давления секции 1 в области экстракции ионов из ЭЦР;
- IG6 – датчик давления секции 2 (секция транспортировки ионов из ЭЦР);
- AG1, AG2 – датчики давления секции 3.

Подготовка аксиальной инжекции осуществляется в 3 этапа :

- 1-й: форвакуумная откачка секций 0 ÷ 3 до давления  $P \leq 5 \cdot 10^{-2}$  Торр.
- 2-й: откачка турбонасосами до давления в секциях составляет  $P \leq 10^{-5}$  Торр.
- 3-й: откачка турбонасосами и крионасосами.

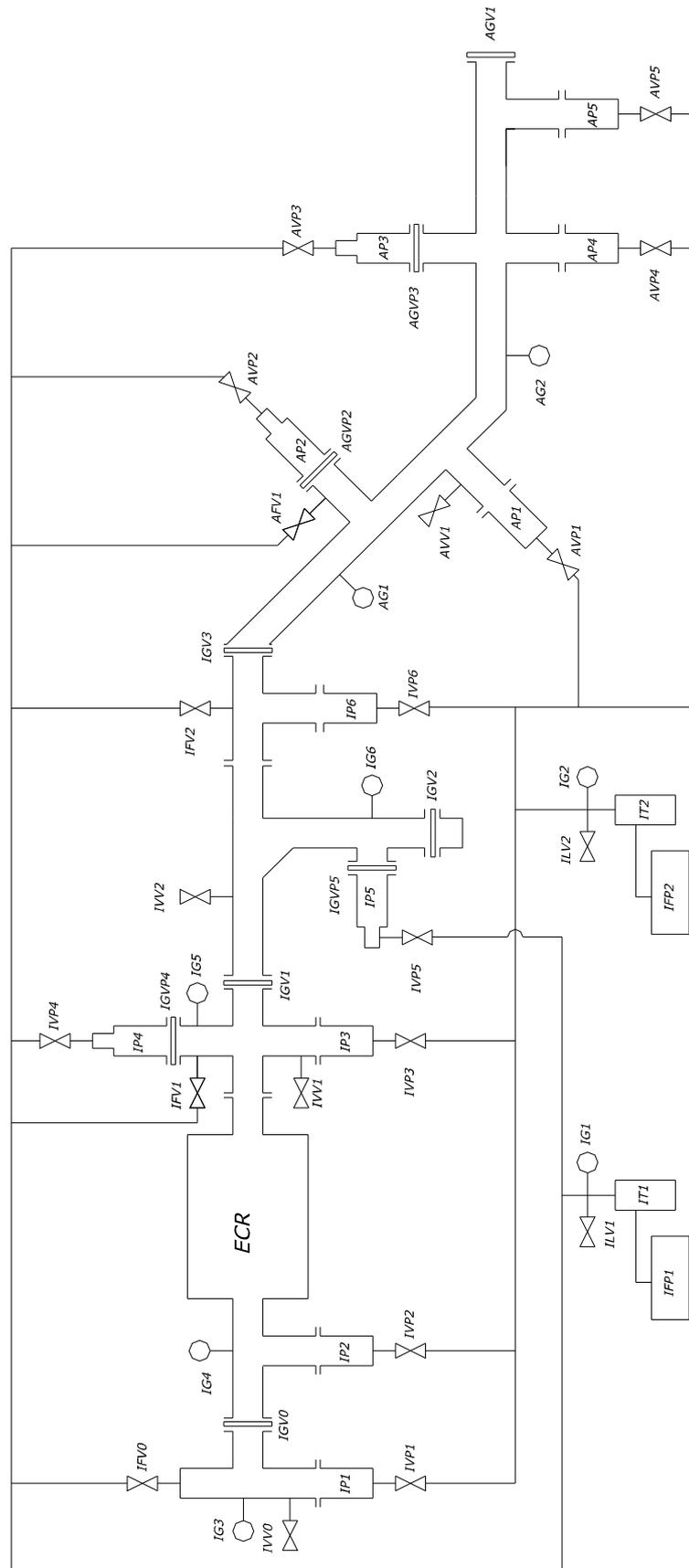


Рис. 4. 72. Схема вакуумной откачки канала аксиальной инжекции пучка и канала пучков низких энергий.

## Вакуумная система каналов вывода пучков высокой энергии

Каналы транспортировки выведенных пучков высокой энергии состоят из блоков диагностики и ионопровода – нержавеющей трубы диаметром 100 мм. Вакуумная система каналов должна обеспечить вакуум, согласно расчету, не хуже  $(2 - 3) \cdot 10^{-6}$  Торр.

Каналы транспортировки выведенных пучков состоят из четырех вакуумных секций:

Канала «Т0» (общий участок ионопровода)

Канала «Т2»,

Канала «Т3»,

Канала «Т1» (специализированный канал для облучения полимерной пленки).

Схема вакуумной откачки каналов пучков высоких энергий приведена на рисунке 4.73, где:

TFP1, TFP2 – форвакуумные насосы;

TT1, TT2 – ловушки;

TLV1, TLV2 – клапаны для подключения течеискателя;

CGV1 – шибер выходы пучка из ускорителя;

T1GV2, T2GV2, T3GV2, T2GV3, T3GV3 – разделительные шиберы;

T0FV1, T2FV1, T3FV1 – клапаны фороткачки;

T0V1, T2V1, T3V1 – клапаны напуска атмосферы;

T0P1 ÷ T0P3, T2P1, T2P2, T3P1, T3P2 – турбонасосы;

T0VP1 ÷ T0VP3, T2VP1, T2VP2, T3VP1, T3VP2 – клапаны турбонасосов;

TG1 – ф/В в линии насоса FP1;

TG2 – ф/В в линии насоса FP2;

TG3 – ф/В+В/В канала вывода;

TG4 – Ф/В+В/В канала «2»;

TG5 – Ф/В+В/В канала «3».

Подготовка каналов осуществляется в 2 этапа :

1-й: Форвакуумная откачка каналов до давления  $P \leq 5 \cdot 10^{-2}$  Торр.

2-й: Высоковакуумная откачка каналов производится турбонасосами.

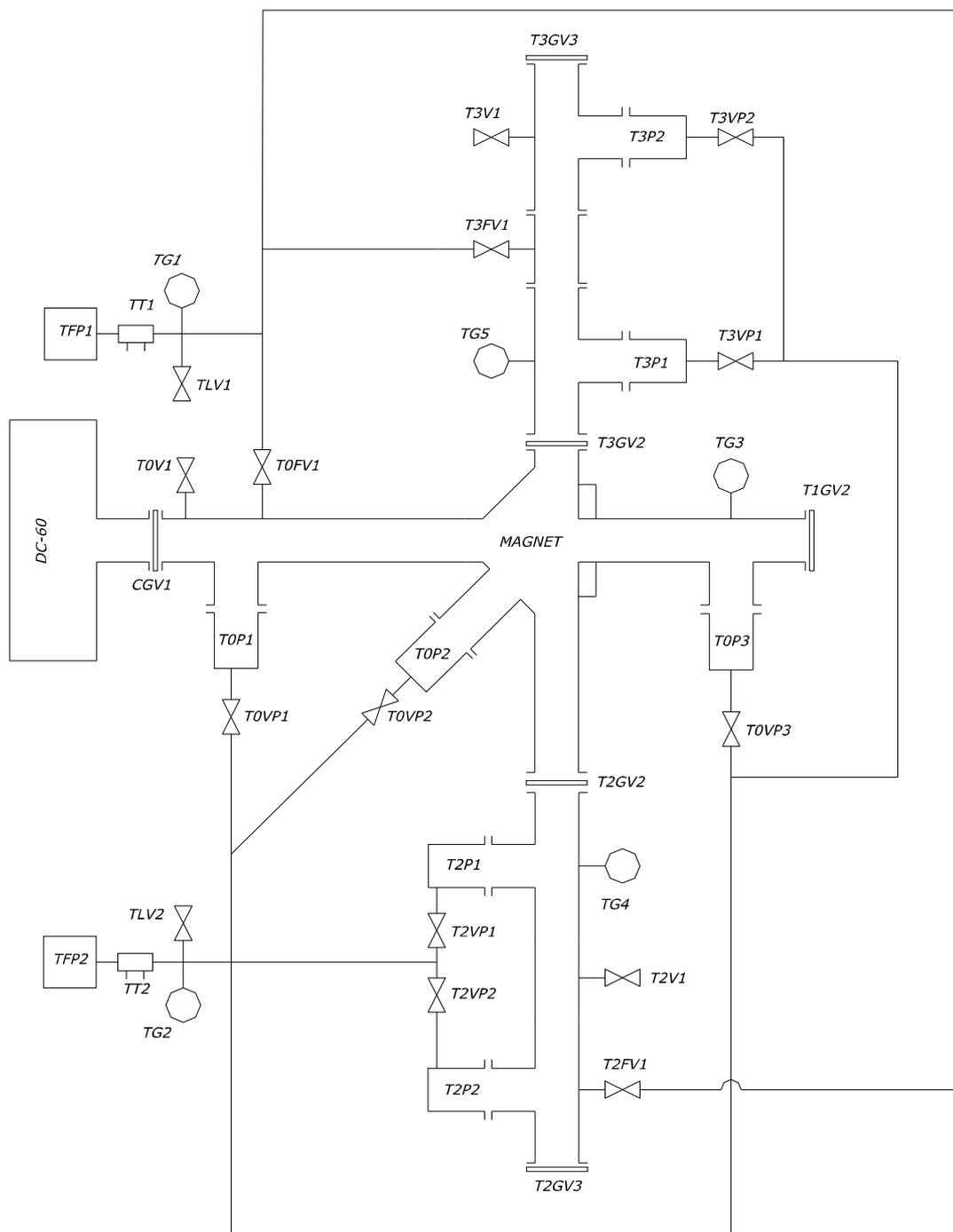


Рис. 4.73. Схема вакуумной откачки каналов пучков высоких энергий

### Канал облучения полимерной пленки «Т1»

На циклотроне ДЦ-60 один из каналов пучков высокой энергии, «Т1», создан специально для облучения полимерной пленки тяжелыми ионами. Это первый этап в технологии производства трековых мембран. Вакуумные условия канала «Т1» отличаются высокой газовой нагрузкой, которая возникает за счет высокого газоотделения с поверхности полимерной пленки в процессе перемотки пленки в установке для ее облучения. Газовый поток со стороны установки зависит от подготовки рулонов пленки, для

оценки его можно принять  $Q \sim 10^{-2}$  л·Торр/с. Сечение ионопровода канала увеличивается от  $\varnothing 100$  мм (на выходе из циклотрона) до  $300 \times 600$  мм (в зоне облучения пленки). Такая конструкция ионопровода позволяет эффективно использовать распределенные средства откачки, которые снижают поток газа в камеру циклотрона до величины, не влияющей на давление в камере.

В связи с тем, что в режиме облучения пленки газовая нагрузка в облучательной установке высока ( $Q \sim 10^{-2}$  л·Торр/с), высоковакуумная откачка осуществляется турбонасосами ВВ-500 со скоростью откачки 500 л/с.

Схема вакуумной откачки канала облучения пленки «Т1» приведена на рисунке 4.74, где:

TFP1, TFP2 – форвакуумные насосы;  
ТТ1, ТТ2 – ловушки;  
TLV1, TLV2 – клапаны для подключения течейскаателя;  
T1GV2 – разделительный шибер;  
T1FV1, T1FV2 – клапаны фороткачки;  
T1V1, T1V2 – клапаны напуска атмосферы;  
T1P1 ÷ T1P6 – турбонасосы;  
T1VP1 ÷ T1VP6 – клапаны турбонасосов;  
T1GVP1 ÷ T1GVP6 – шиберы турбонасосов;  
TG1 – датчик давления в линии насоса FP1;  
TG2 – датчик давления в линии насоса FP2;  
TG6 – датчик давления секции транспортировки;  
TG7, TG8 – датчики давления физической установки.

Подготовка каналов осуществляется в 2 этапа :

- 1-й: Форвакуумная откачка канала «Т1» до давления  $P \leq 5 \cdot 10^{-2}$  Торр.
- 2-й: Высоковакуумная откачка канала «Т0» турбонасосами.

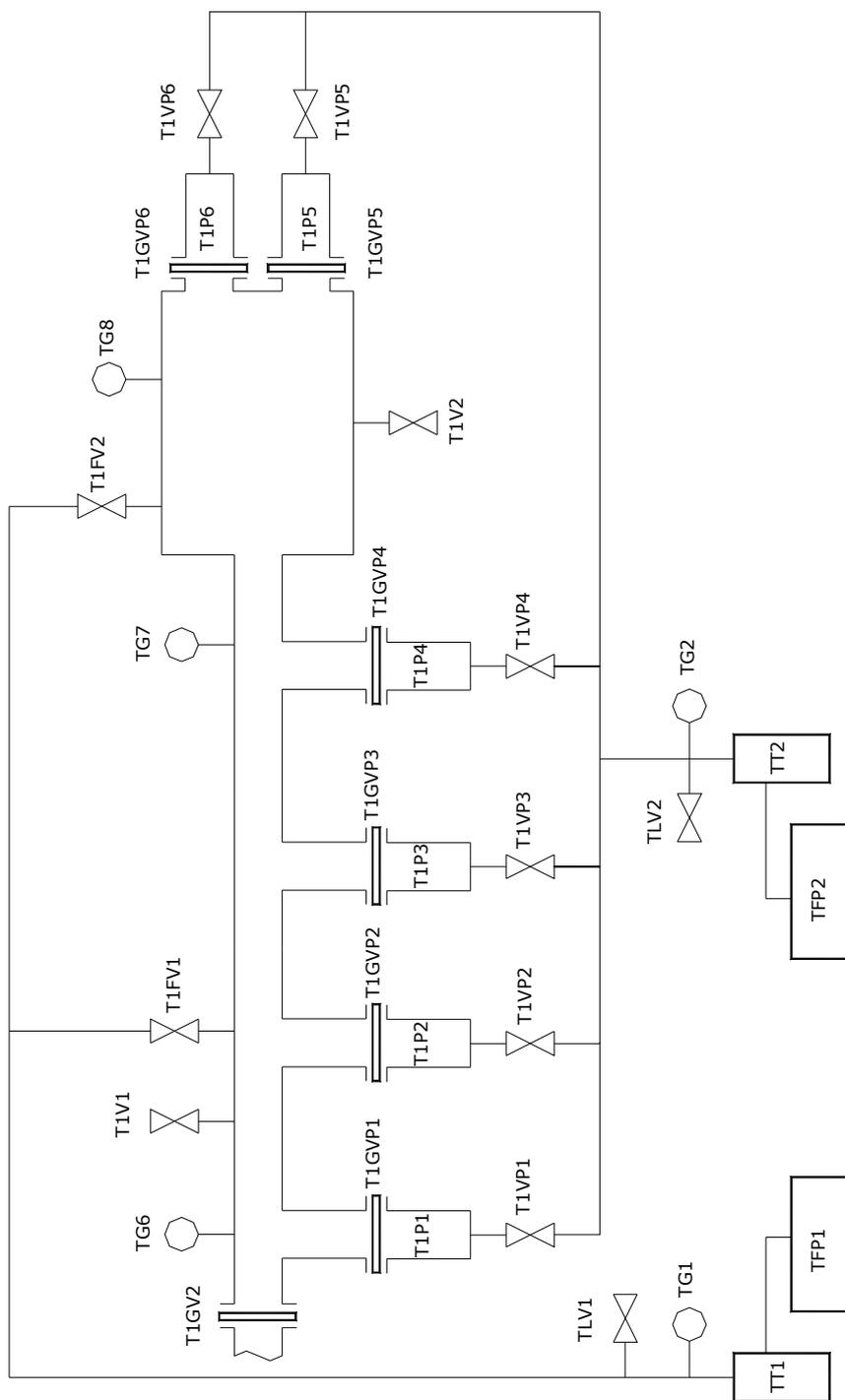


Рис. 4.74. Схема вакуумной откачки канала «Т1» для облучения полимерной пленки.

### 4.8.3 Параметры вакуумной системы, полученные после завершения пусковых работ

Вакуумная система циклотрона ДЦ-60 была создана в соответствии с изложенным описанием. Все вводы движения в вакуумную камеру ускорителя выполнены с использованием сильфонов. Для уплотнения фланцев съемных деталей применены высоковакуумные витоновые уплотнения. Все узлы прошли вакуумную обработку и перед монтажом на ускорителе были испытаны на вакуумных стендах. Использование такой

технологии позволило в течение недели получить проектные параметры вакуумной системы [32, 41, 42, 78, 82, 83]. В таблице 4.13 приведены проектные и полученные значения рабочего вакуума в циклотроне. График, показывающий зависимость величины давления в вакуумной камере циклотрона от времени в процессе откачки до рабочего вакуума приведен на рисунке 4.75.

Таблица 4.13. Проектные и полученные значения рабочего вакуума.

Секция вакуумной системы	Проектное давление	Полученное давление
Канал инжекции	$1 \cdot 10^{-7}$ Торр	$(6-9) \cdot 10^{-8}$ Торр
Канал ионов низкой энергии	$1 \cdot 10^{-7}$ Торр	$(6-9) \cdot 10^{-8}$ Торр
Камера циклотрона	$(1-2) \cdot 10^{-7}$ Торр	$8 \cdot 10^{-8}$ Торр
Канал ионов высокой энергии	$5 \cdot 10^{-6}$ Торр	$5 \cdot 10^{-7}$ Торр

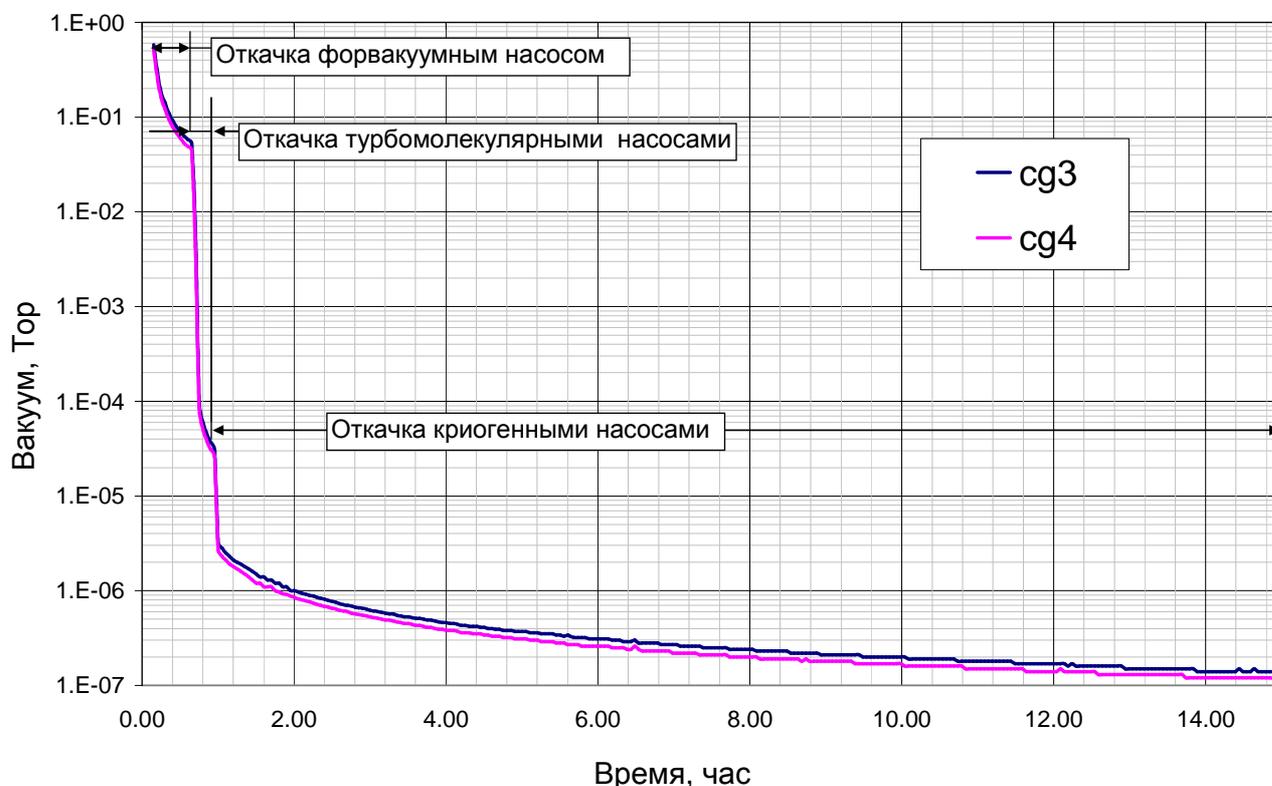


Рис. 4.75. Зависимость давления от времени в процессе откачки вакуумной камеры циклотрона от атмосферы до рабочего вакуума.

На ускорителе были ускорены пучки тяжелых ионов [41, 42, 78, 79]. Проведены исследования зависимости коэффициента трансмиссии пучка в процессе ускорения от давления в вакуумной камере циклотрона. Полученные значения хорошо согласуются с исходными расчетными данными, которые легли в основу создания проекта вакуумной системы. На рисунке 4.76 показаны расчетные и измеренные коэффициенты трансмиссии для ионов криптона, аргона и неона с энергией около 1 МэВ/нуклон на конечном радиусе.

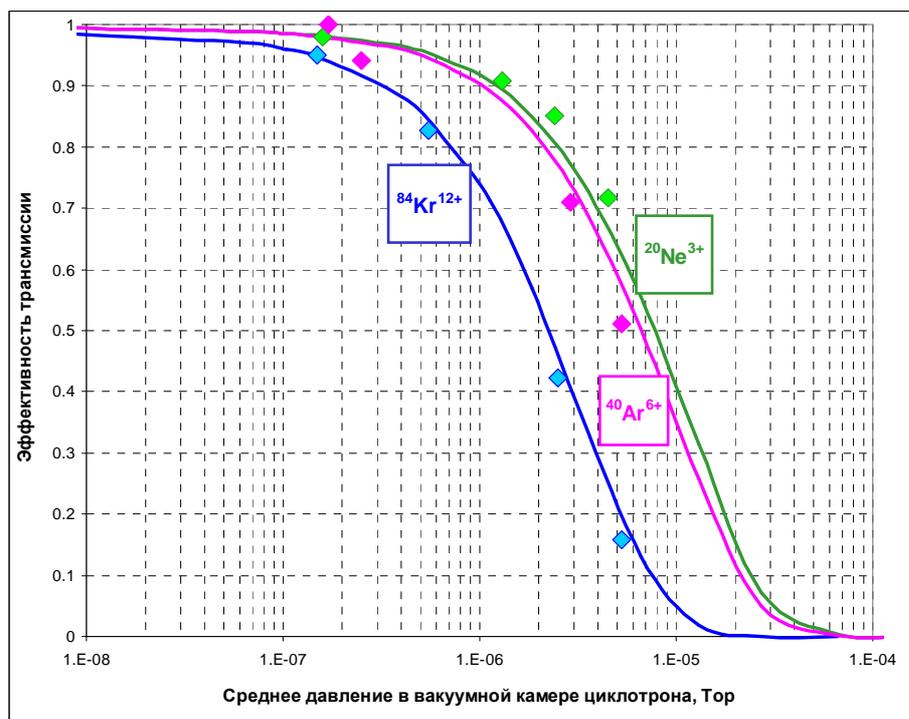


Рис. 4.76. Зависимость эффективности трансмиссии пучков  $^{20}\text{Ne}^{3+}$ ,  $^{40}\text{Ar}^{6+}$ ,  $^{84}\text{Kr}^{12+}$  от вакуума в камере циклотрона при ускорении от центра до конечного радиуса (сплошная линия – расчет, символы – экспериментальные данные)

### Заключение

Созданная вакуумная система циклотрона ДЦ-60 позволила получить необходимое давление во всех вакуумных объемах ускорительного комплекса, что обеспечило высокий коэффициент транспортировки пучка по каналу аксиальной инъекции, низкие вакуумные потери пучка в процессе ускорения и эффективную транспортировку по каналам выведенных пучков.

Полученные параметры вакуумной системы полностью согласуются с расчетами, которые легли в основу проекта.

## 4.9 Система контроля и управления

Система дистанционного контроля и управления циклотрона ДЦ-60 была разработана и изготовлена в Лаборатории ядерных реакций и позволяет полностью автоматизировать процесс управления циклотроном, а также обеспечить оператору всю необходимую информацию. Система управления выполняет следующие функции:

- сбор, обработку и выдачу технологическому персоналу оперативной информации о режиме работы ускорителя;
- обеспечение безаварийной работы всех систем ускорителя, автоматическое отключение систем в аварийной ситуации;
- автоматическое включение и выключение отдельных систем ускорителя;
- протоколирование и архивирование режимов работы ускорителя;
- автоматическое задание режимов работы систем ускорителя, исходя из архивных значений режимов ускорений;
- выдачу информации во внешнюю информационную сеть.

Конструктивно АСУ ДЦ-60 располагается в 19 шкафах, из которых 11 шкафов отведены под системы управления источниками питания циклотрона (рис. 4.77). Управление всех шкафов осуществляется при помощи унифицированных контроллеров SmartBox-5, разработанных в ЛЯР ОИЯИ. 29 контроллеров объединены в единую сеть по линии RS-485

(1 мбод). Все шкафы управления и источники питания размещены в непосредственной близости от контролируемого оборудования. Модули управления и измерения параметров были разработаны и изготовлены специалистами ЛЯР в конструктиве ЕВРОМЕХАНИКА. Источники питания были изготовлены на предприятии EVPU (Словакия) в соответствии с техническими заданиями, разработанными в ЛЯР. Источники унифицированы по схемным решениям и конструктиву и имеют унифицированный с контроллером SmartBox протокол.

На пульте управления циклотроном установлены три компьютера. Базовый компьютер осуществляет связь с периферийным оборудованием и обеспечивает все необходимые функции по поддержке и хранению базы данных. Второй и третий компьютеры обрабатывают данные от первого компьютера в параллельном режиме. Два оператора могут одновременно производить контроль нескольких систем ускорителя. Третий компьютер скомпонован на базе переносного компьютера “ноутбук” и обеспечивает функцию локального пульта управления при выполнении профилактических и ремонтных работ на ускорителе.

Программные средства АСУ состоят из прикладных программ пользователя и программ разработки проекта. Программное обеспечение создано на платформе QNX и системы разработки АСУ ТП SCADA FlexControl. Для работы с QNX в графическом режиме используется графический оконный интерфейс Photon.

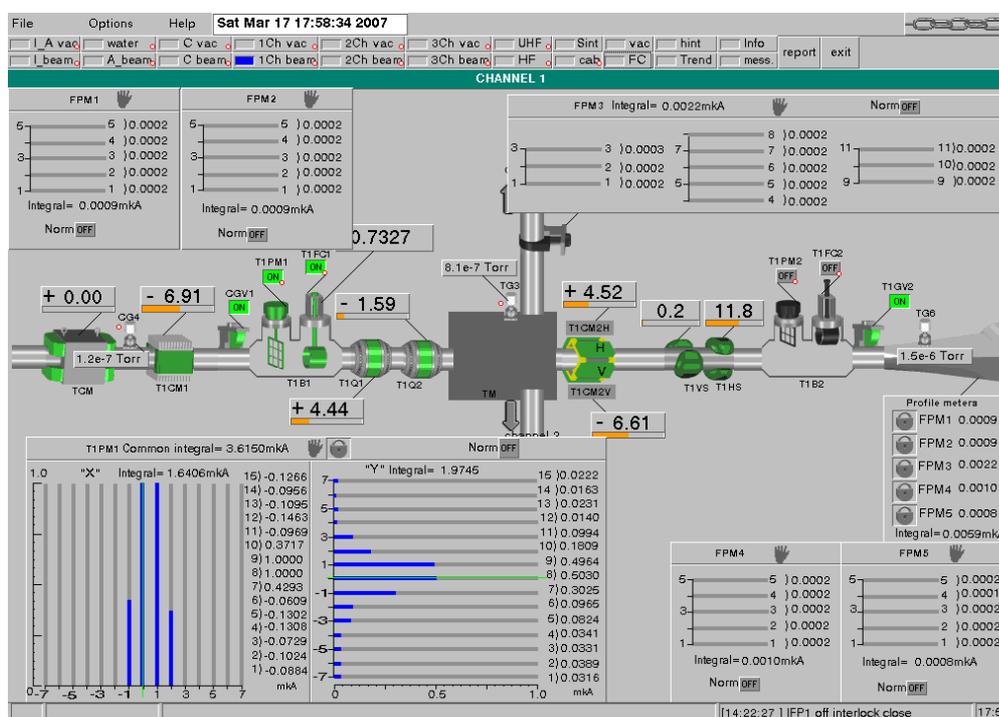


Рис. 4.77. Мнемосхема канала вывода пучка и его профиль на выходе из ускорителя в первом блоке диагностики ионопровода. Полный размер пучка, измеренный сеточным профилометром,  $\approx 20$  мм по горизонтали и  $\approx 30$  мм по вертикали.

#### 4.10 Исследование режимов ускоренных пучков

Работы по сборке ускорительного комплекса завершены в сентябре 2006 года, в декабре 2006 года успешно ускорен и выведен из циклотрона первый пучок заряженных частиц [32, 42, 41, 78, 79, 135, 185].

В ходе пусконаладочных работ проведены эксперименты по ускорению пучков ионов азота, аргона, криптона ( $^{14}\text{N}^{2+}$ ,  $^{40}\text{Ar}^{4+}$ ,  $^{40}\text{Ar}^{5+}$ ,  $^{40}\text{Ar}^{7+}$ ,  $^{84}\text{Kr}^{12+}$ ) на различных уровнях магнитного поля 1,25–1,65 Тл. Проведено исследование и оптимизация процесса ускорения ионов на четвертой и шестой гармониках ускоряющего ВЧ напряжения, получены

проектные параметры ускоренных пучков. Циклотрон ДЦ-60 в процессе пусконаладочных работ тестировался в нескольких рабочих точках [42]. Основные параметры тестовых режимов представлены в таблице 4.14. На рисунке 4.78 представлена рабочая диаграмма циклотрона ДЦ-60, на которой пронумерованными кружочками отмечены рассматриваемые тестовые рабочие режимы.

Таблица 4.14. Параметры тестовых режимов работы циклотрона ДЦ-60

Тест №	1	2	3	4	5	6
Ион	$^{84}\text{Kr}^{+12}$	$^{14}\text{N}^{2+}$	$^{14}\text{N}^{2+}$	$^{40}\text{Ar}^{5+}$	$^{40}\text{Ar}^{7+}$	$^{40}\text{Ar}^{4+}$
A/Z	7	7	7	8	5,7	10
Во, Тл	1,42	1,42	1,64	1,25	1,25	1,64
ВЧ, МГц	12,67	12,67	14,42	14,42	13,6	15,2
Кратность ВЧ	4	4	4	6	4	6
Напряжение инжекции, кВ	12,1	12,1	15,5	11,5	11,3	11
Энергия, МэВ/нуклон	1	1	1,32	0,58	1,14	0,65

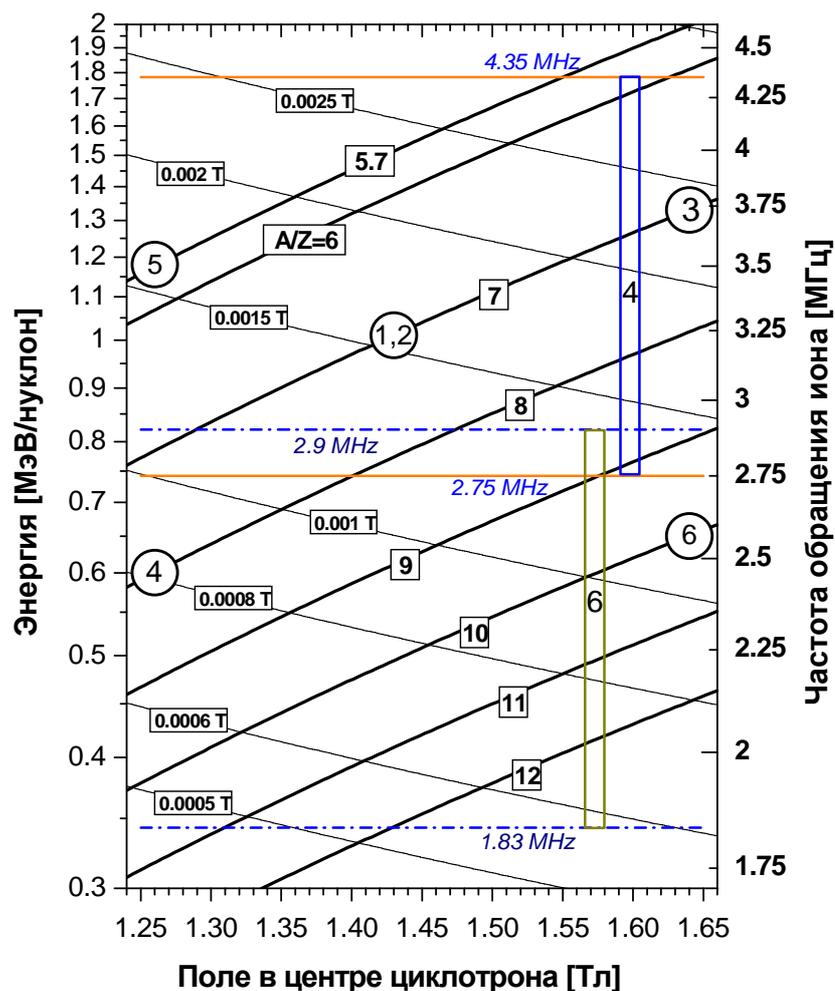


Рис. 4.78. Рабочая диаграмма циклотрона ДЦ-60 с отмеченными тестовыми режимами.

В выбранных тестовых рабочих режимах проведены исследования, в ходе которых были измерены зависимости тока ускоряемого пучка от уровня магнитного поля на нескольких радиусах (резонансные кривые), распределение тока пучка по радиусу, влияние подстройки магнитного поля при помощи корректирующих катушек.

Предварительный подбор токов радиальных корректирующих катушек проведен при помощи программы, оптимизирующей распределение среднего магнитного поля по радиусу на основе базы данных измерений основного магнитного поля циклотрона и вкладов радиальных корректирующих катушек.

Сформированное магнитное поле [65] позволило осуществить ускорение пучков ионов во всем рабочем диапазоне с эффективностью до 96% от внутреннего радиуса ( $R=110\text{мм}$ ) до конечного радиуса циклотрона ( $R=680\text{ мм}$ ) [27, 42, 78, 79].

#### 4.10.1 Ускорение ионов криптона $^{84}\text{Kr}^{+12}$ до энергии 1 МэВ/нуклон.

Проведено ускорение пучка ионов криптона  $^{84}\text{Kr}^{+12}$  ( $A/Z=7$ ) до энергии 1 МэВ/нуклон. Ускорение производилось на четвертой гармонике ВЧ поля при среднем магнитном поле 1,42 Тл, токе основной обмотки магнита циклотрона 215,8 А и частоте ускоряющего напряжения 12,61 МГц (табл. 4.14). После оптимизации режима работы канала аксиальной инжекции ток пучка ионов криптона после анализирующего магнита составлял 20 мкА. Следует учесть, что анализирующий магнит канала аксиальной инжекции не позволяет разделять изотопы криптона, а доля  $^{84}\text{Kr}$  в естественной смеси – 56,9%. Таким образом, величина полезной составляющей в токе инжектируемого пучка 11,4 мкА.

Ток пучка ионов  $^{84}\text{Kr}^{+12}$  на внутреннем радиусе циклотрона  $R=110\text{ мм}$  равен 2,48 мкА, что соответствует коэффициенту захвата в ускорение в центре циклотрона  $\approx 22\%$ . Результат получен с использованием системы банчирования пучка.

В таблице 4.15 и на рисунках 4.79 и 4.80 представлены результаты исследования ускорения пучка ионов  $^{84}\text{Kr}^{+12}$  внутри циклотрона от внутреннего радиуса,  $R=110\text{ мм}$ , до конечного радиуса циклотрона,  $R=680\text{ мм}$ . В данном режиме работы коррекция магнитного поля радиальными катушками не использовалась. Получена эффективность ускорения в циклотроне 91,2%, что свидетельствует о хорошем качестве формирования магнитного поля. Осуществлен вывод ускоренных ионов  $^{84}\text{Kr}^{+12}$  из циклотрона ДЦ-60 при помощи электростатического дефлектора и пассивного магнитного канала. Ток выведенного пучка составил 1,65 мкА, что соответствует коэффициенту вывода пучка из циклотрона 66%.

Таблица 4.15. Ток и коэффициенты прохождения пучка при ускорении ионов  $^{84}\text{Kr}^{+12}$

Ток пучка на внутреннем радиусе, $R=110\text{ мм}$	Ток пучка на радиусе вывода, $R=680\text{ мм}$	Эффективность ускорения пучка в циклотроне
2,72 мкА	2,48 мкА	91,2 %

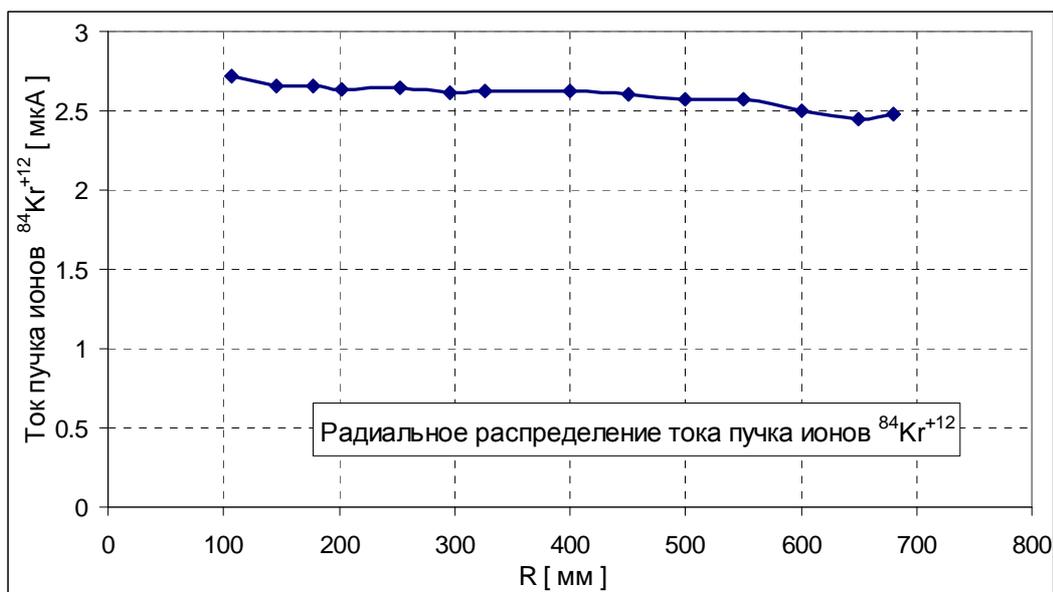


Рис. 4.79. Радиальная зависимость тока пучка ионов  $^{84}\text{Kr}^{+12}$  при ускорении в магнитном поле 1,42 Тл. Коррекция магнитного роля радиальными катушками не применялась.

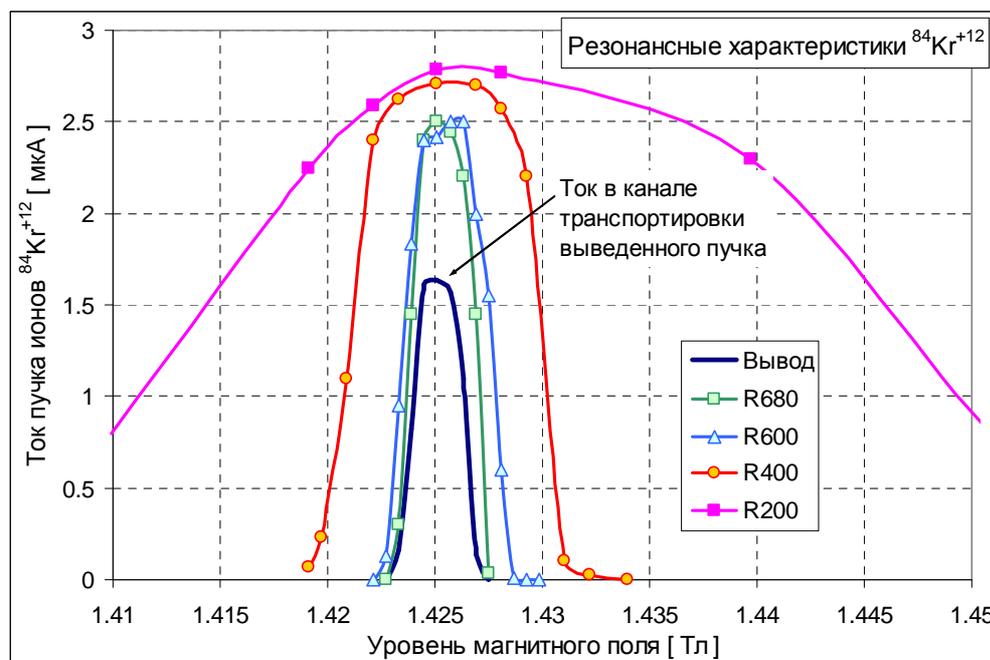


Рис. 4.80. Зависимость тока пучка ионов  $^{84}\text{Kr}^{+12}$  от уровня магнитного поля циклотрона.

#### 4.10.2 Ускорение ионов азота $^{14}\text{N}^{+2}$ до энергии 1 МэВ/нуклон.

Проведено ускорение пучка ионов азота  $^{14}\text{N}^{+2}$ ,  $A/Z=7$ , до энергии 1 МэВ/нуклон. Ускорение производилось на четвертой гармонике ускоряющего ВЧ поля при среднем магнитном поле 1,42 Тл, токе основной обмотки магнита циклотрона 215,8 А и частоте ускоряющего напряжения 12.61 МГц (табл. 4.14). Исследованы режимы работы с использованием и без использования системы банчиrowания пучка. В таблице 4.16 и на рисунках 4.81 и 4.82 представлены результаты исследования ускорения пучка ионов  $^{14}\text{N}^{+2}$ .

Рассмотренный режим ускорения соответствует номинальной рабочей точке, в которой магнитное поле сформировано только за счет железных масс. Эффективность ускорения пучка в циклотроне составила ~95%. В процессе настройки режима ускорения

оперативная подстройка магнитного поля радиальными корректирующими катушками не привела к заметному увеличению интенсивности пучка, что говорит о хорошем качестве формирования магнитного поля.

Таблица 4.16. Ток и коэффициенты прохождения при ускорении пучка ионов азота  $^{14}\text{N}^{+2}$

Режим	Ток пучка в канале инъекции после анализирующего магнита	Коэффициент захвата пучка в ускорение в центре	Ток пучка на внутреннем радиусе R=120 мм	Ток пучка на радиусе вывода R=680 мм	Эффективность ускорения пучка в циклотроне
Без банчера	74 мкА	5,3 %	3,9 мкА	3,75 мкА	96 %
С банчером	74 мкА	14,3 %	10,5 мкА	10 мкА	95 %

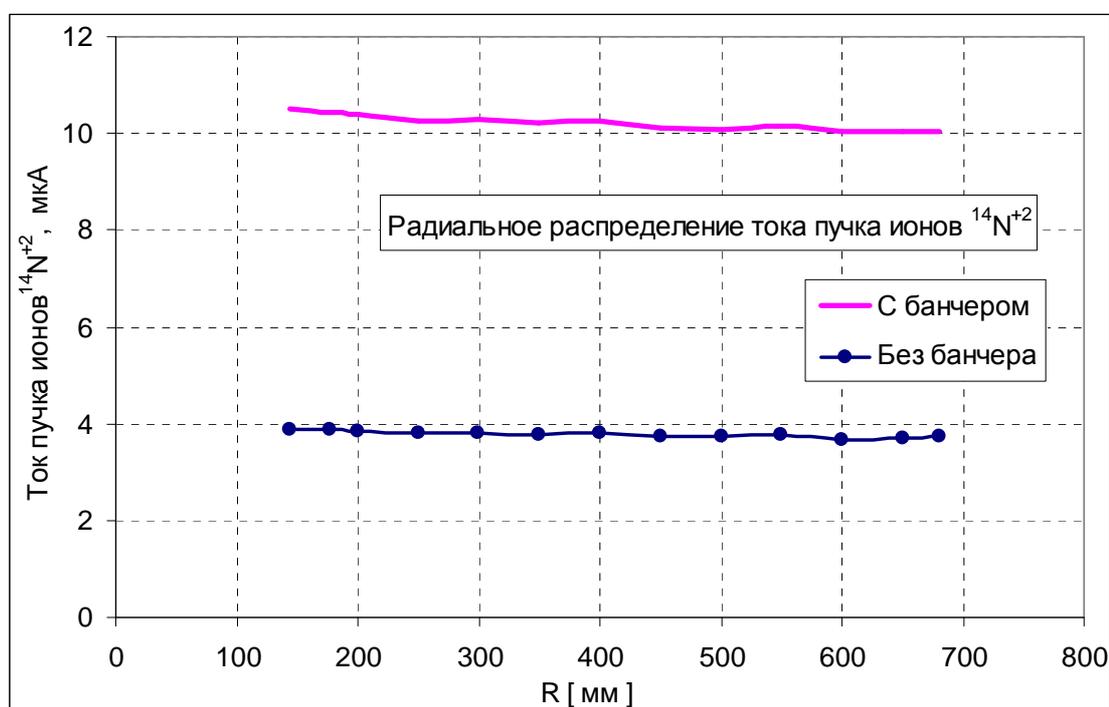


Рис. 4.81. Радиальная зависимость тока пучка ионов  $^{14}\text{N}^{+2}$  при ускорении в магнитном поле 1,42 Тл без использования системы банчировки пучка и в случае использования системы банчировки пучка.

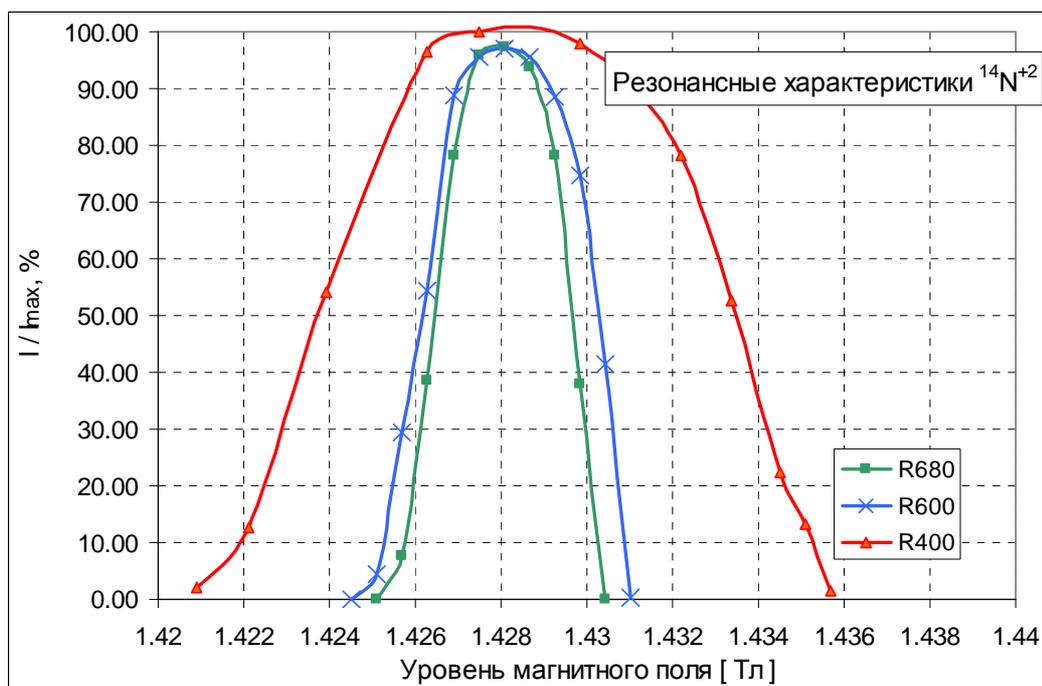


Рис. 4.82. Зависимость интенсивности пучка ионов  $^{14}\text{N}^{+2}$  в относительных единицах от уровня магнитного поля циклотрона на радиусах 400 мм, 600 мм и 680 мм.

#### 4.10.3 Ускорение ионов азота $^{14}\text{N}^{+2}$ до энергии 1,32 МэВ/нуклон

Проведено ускорение пучка ионов азота  $^{14}\text{N}^{+2}$ ,  $A/Z=7$ , до энергии 1,32 МэВ/нуклон. Ускорение производилось на четвертой гармонике ВЧ поля при среднем магнитном поле 1,62 Тл, токе основной обмотки магнита циклотрона 309А и частоте ускоряющего напряжения 14,42 МГц.

После оптимизации режима работы канала аксиальной инжекции ток пучка ионов азота  $^{14}\text{N}^{+2}$  после анализирующего магнита составлял 31 мкА. Ток пучка на внутреннем радиусе циклотрона  $R=120$  мм, полученный без использования системы банчирования пучка, был равен 1,62 мкА, что соответствует коэффициенту захвата пучка в ускорение в центре циклотрона  $\approx 5,2\%$ .

В режиме работы с отключенными корректирующими катушками ток ускоренного пучка на радиусе вывода  $R=680$  мм был равен 1,2 мкА. При этом коэффициент прохождения пучка в циклотроне составил 74,5%. Оптимизация магнитного поля радиальными корректирующими катушками позволила увеличить ток ускоренного пучка на радиусе вывода до 1,46 мкА, а коэффициент прохождения пучка в циклотроне до 90% (табл. 4.17).

Таблица 4.17. Ток и коэффициенты прохождения при ускорении пучка ионов  $^{14}\text{N}^{+2}$

Режим	Ток пучка на внутреннем радиусе $R=120$ мм	Ток пучка на радиусе вывода $R=680$ мм	Эффективность ускорения пучка в циклотроне
Корректирующие катушки выключены	1,61 мкА	1,2 мкА	74,5 %
Магнитное поле оптимизировано корректирующими катушками	1,62 мкА	1,46 мкА	90 %

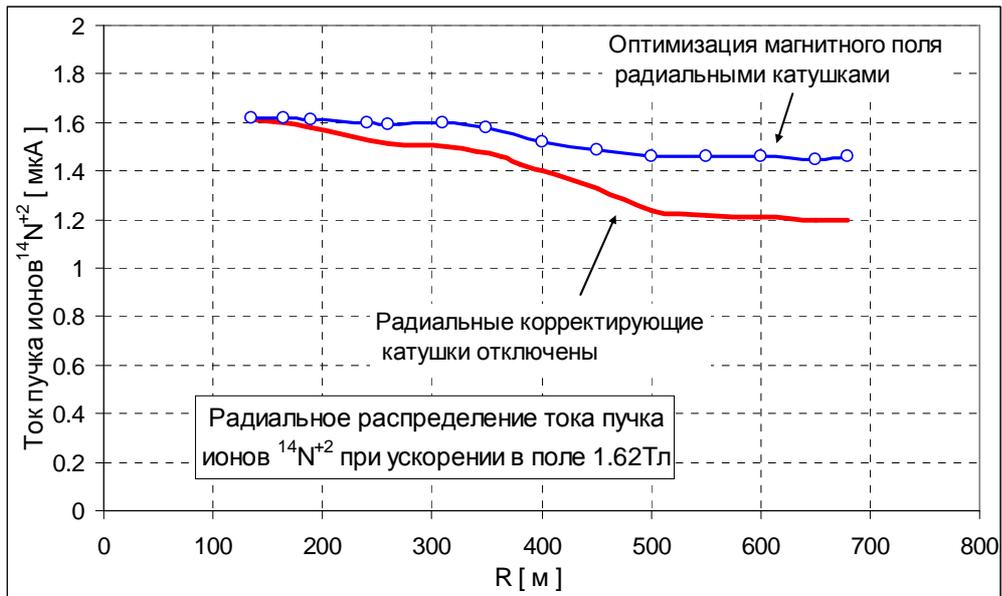


Рис. 4.83. Радиальная зависимость тока пучка ионов  $^{14}\text{N}^{+2}$  без использования радиальных корректирующих катушек и в случае их использования.

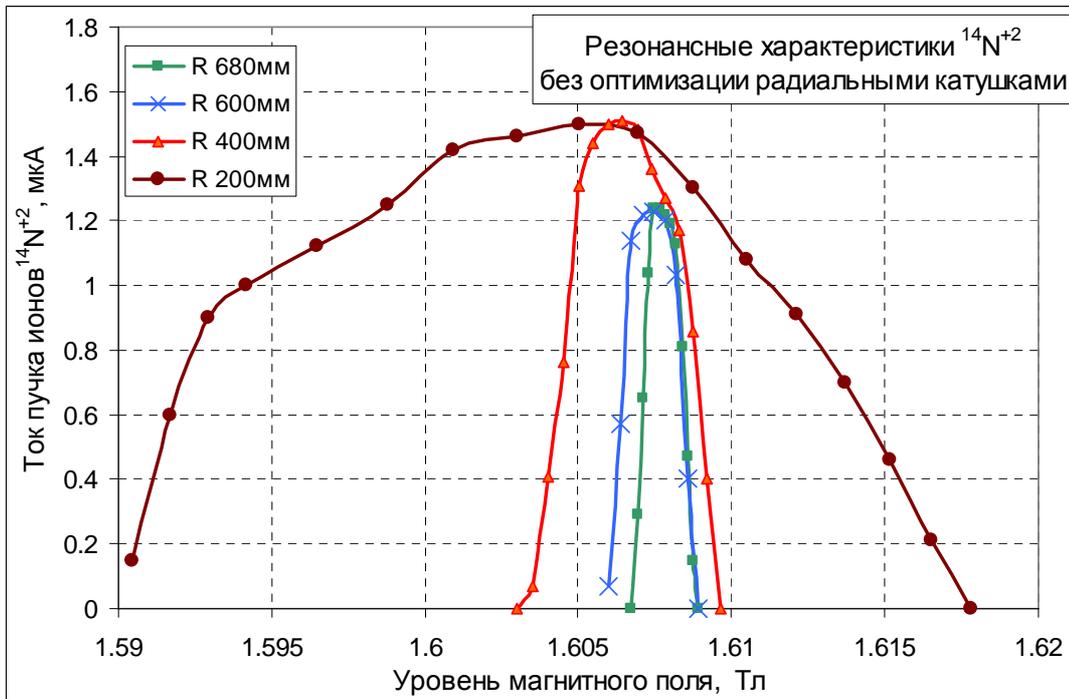


Рис. 4.84. Зависимость тока пучка ионов  $^{14}\text{N}^{+2}$  от уровня магнитного поля циклотрона без коррекции радиальными корректирующими катушками. Зависимость получена для четырех значений радиуса 200 мм, 400 мм, 600 мм и 680 мм.

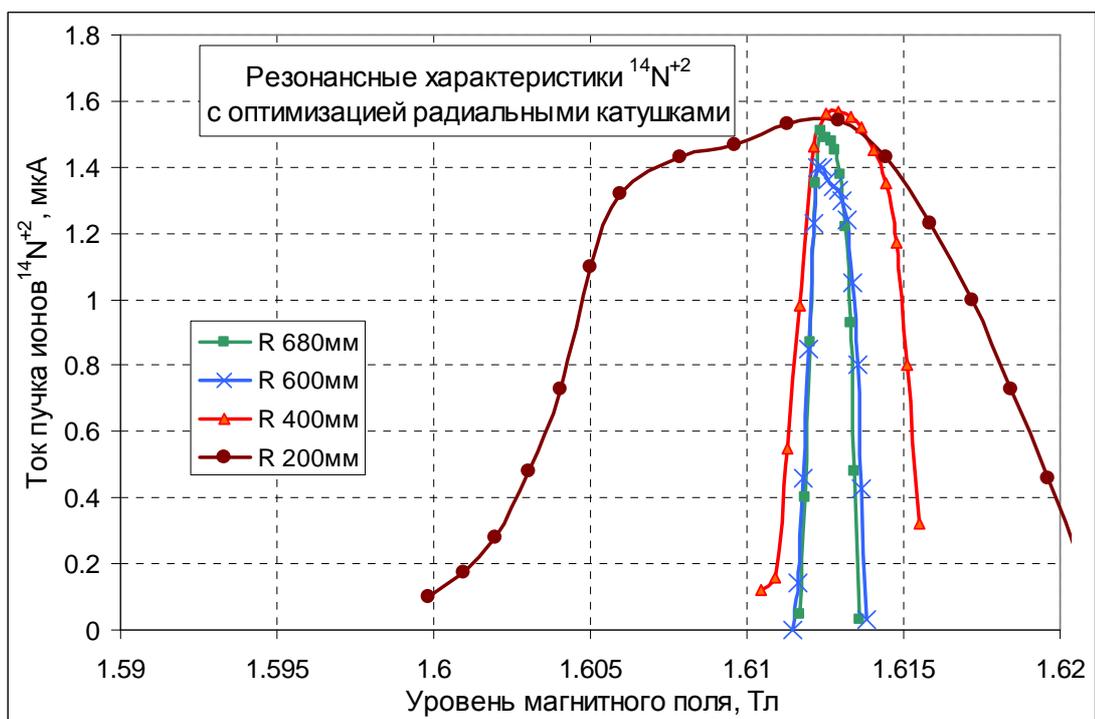


Рис. 4.85. Зависимость тока пучка ионов  $^{14}\text{N}^{+2}$  от уровня магнитного поля циклотрона при использовании радиальных корректирующих катушек. Зависимость получена для четырех значений радиуса 200 мм, 400 мм, 600 мм и 680 мм.

Оптимизация магнитного поля радиальными корректирующими катушками осуществлялась при помощи программы расчета рабочего режима циклотрона ДЦ-60. На рисунке 4.86 представлено окно программы, отображающее параметры выбранного рабочего режима, токи радиальных корректирующих катушек, графики изохронного и среднего магнитного поля до и после коррекции радиальными катушками.

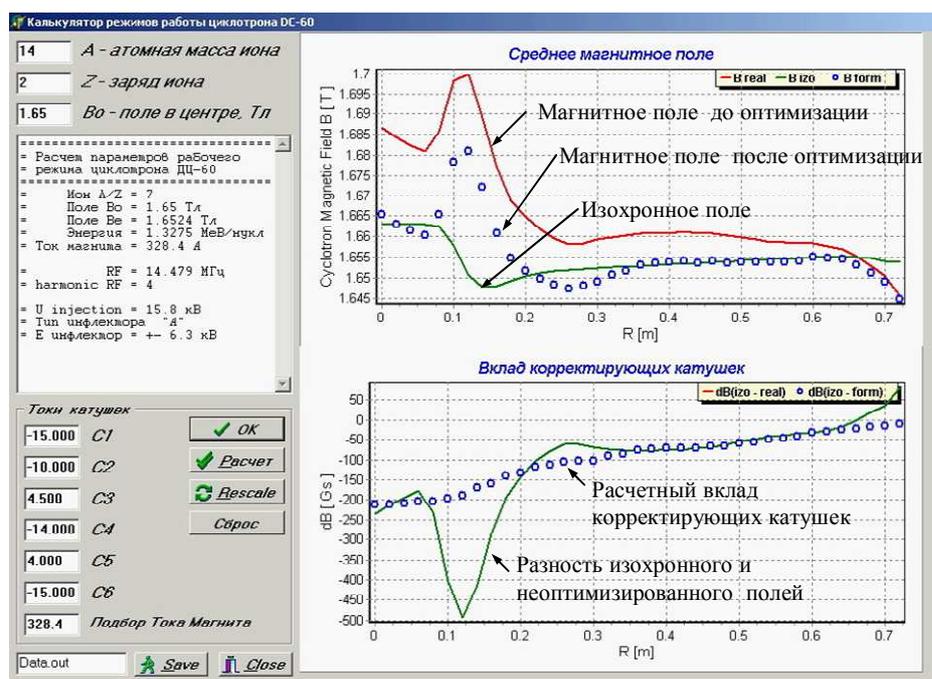


Рис. 4.86. Окно программы выбора режима работы системы корректирующих катушек при ускорении пучка ионов  $^{14}\text{N}^{+2}$ .

#### 4.10.4. Ускорение ионов аргона $^{40}\text{Ar}^{+5}$ до энергии 0,58 МэВ/нуклон

Проведено ускорение пучка ионов аргона  $^{40}\text{Ar}^{+5}$  до энергии 0,58 МэВ/нуклон. Ускорение производилось на 6-й гармонике ВЧ поля при среднем магнитном поле 1,25 Тл, токе основной обмотки магнита циклотрона 164 А и частоте ускоряющего напряжения 14,42 МГц. После оптимизации режима работы канала аксиальной инъекции ток пучка ионов аргона  $^{40}\text{Ar}^{+5}$  после анализирующего магнита составлял 24 мкА.

Ток инжектированного пучка на внутреннем радиусе  $R=120$  мм, полученный без использования системы банчирования пучка, был равен 1,02 мкА. Это соответствует коэффициенту инъекции пучка в циклотрон  $\approx 4,3\%$ .

Проведено исследование ускорения пучка ионов  $^{40}\text{Ar}^{+5}$  в циклотроне от внутреннего радиуса  $R=120$  мм до конечного радиуса циклотрона  $R=680$  мм. Рассмотрены два режима работы с оптимизацией и без оптимизации магнитного поля при помощи радиальных корректирующих катушек. Результаты исследования приведены в таблице 4.18 и на рисунках 4.87–4.90. В режиме работы с отключенными корректирующими катушками ток ускоренного пучка на радиусе вывода  $R=680$  мм был равен 0,134 мкА. При этом коэффициент прохождения пучка в циклотроне от внутреннего до конечного радиуса составил 13%. Оптимизация магнитного поля радиальными корректирующими катушками позволила увеличить ток ускоренного пучка на радиусе вывода до 0,64 мкА, что соответствует коэффициенту прохождения пучка в циклотроне более 66%.

Таблица 4.18. Ток и коэффициенты прохождения при ускорении пучка ионов  $^{40}\text{Ar}^{+5}$

Режим	Ток пучка на внутреннем радиусе $R=120$ мм	Ток пучка на радиусе вывода $R=680$ мм	Эффективность ускорения пучка в циклотроне
Корректирующие катушки выключены	1,02 мкА	0,134 мкА	13,4 %
Магнитное поле оптимизировано корректирующими катушками	0,98 мкА	0,644 мкА	66 %

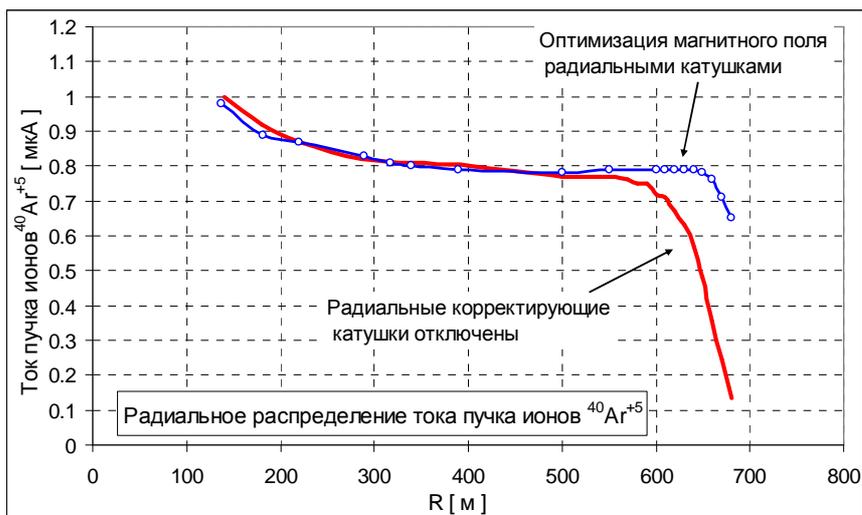


Рис. 4.87. Радиальная зависимость тока пучка ионов аргона  $^{40}\text{Ar}^{+5}$  при ускорении в магнитном поле 1,25 Тл без использования радиальных корректирующих катушек и в случае их использования.

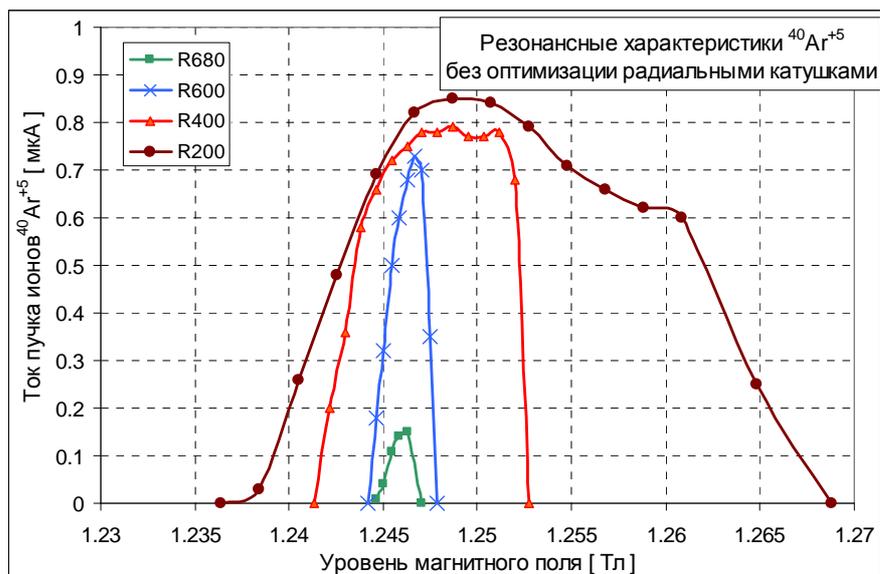


Рис. 4.88. Зависимость тока пучка ионов аргона  $^{40}\text{Ar}^{+5}$  от уровня основного поля без коррекции радиальными корректирующими катушками. Зависимость получена для четырех значений радиуса 200 мм, 400 мм, 600 мм и 680 мм.

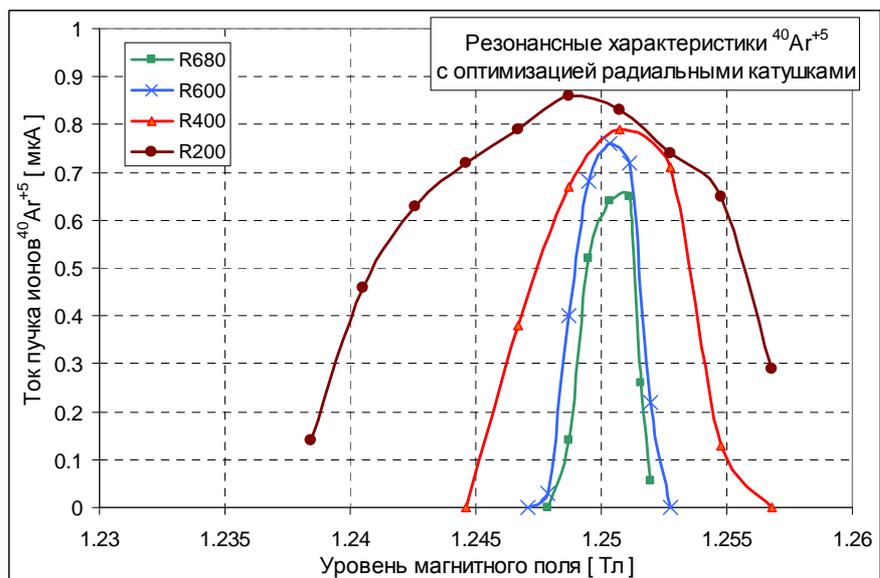


Рис. 4.89. Зависимость тока пучка ионов аргона  $^{40}\text{Ar}^{+5}$  от уровня основного поля при использовании радиальных корректирующих катушек. Зависимость получена для четырех значений радиуса 200 мм, 400 мм, 600 мм и 680 мм.

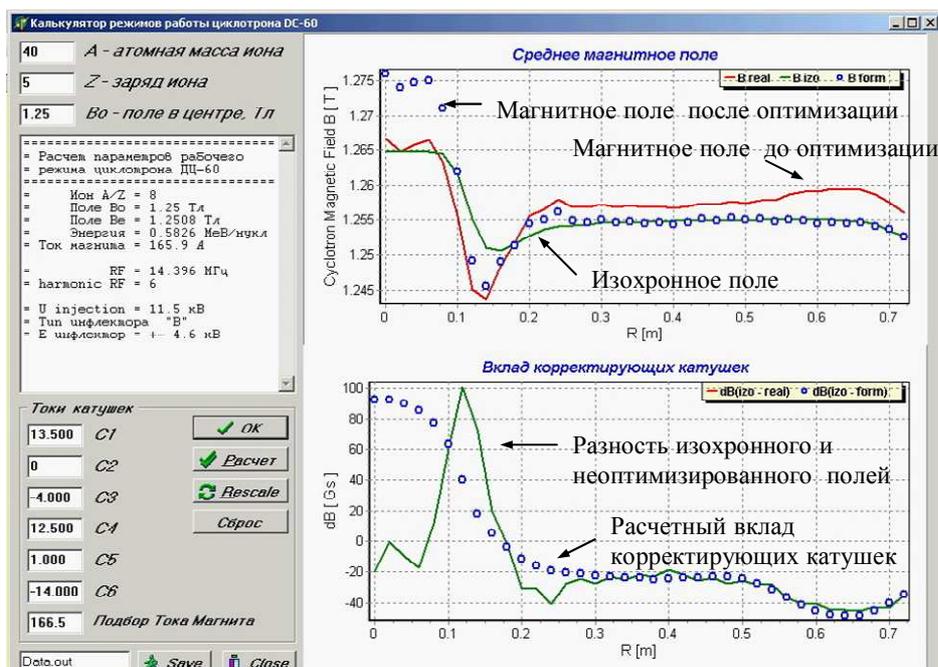


Рис. 4.90. Окно программы выбора режима работы системы корректирующих катушек при ускорении пучка ионов  $^{40}\text{Ar}^{+5}$ .

#### 4.10.5. Ускорение ионов азота $^{40}\text{Ar}^{+7}$ до энергии 1,14 МэВ/нуклон

Проведено ускорение пучка ионов аргона  $^{40}\text{Ar}^{+7}$  до энергии 1,14 МэВ/нуклон. Ускорение производилось на 4-й гармонике ВЧ поля при среднем магнитном поле 1,25 Тл, токе основной обмотки магнита циклотрона 166 А и частоте ускоряющего напряжения 13,6 МГц. В данном режиме работы система банчирувания пучка не использовалась.

Таблица 4.19. Ток и коэффициенты прохождения при ускорении пучка ионов  $^{40}\text{Ar}^{+7}$

Режим	Ток пучка на внутреннем радиусе R=120 мм	Ток пучка на радиусе вывода R=680 мм	Эффективность ускорения пучка в циклотроне
Корректирующие катушки выключены	1,76 мкА	1,35 мкА	77 %
Магнитное поле оптимизировано корректирующими катушками	1,92 мкА	1,83 мкА	95 %

После оптимизации режима работы канала аксиальной инжекции ток пучка в канале инжекции после анализирующего магнита составлял 42 мкА. Ток пучка в центре циклотрона на радиусе 120 мм был равен 1,92 мкА. Это соответствует коэффициенту инжекции пучка в циклотрон  $\approx 4,6\%$ .

Исследован процесс ускорения пучка ионов  $^{40}\text{Ar}^{+7}$  внутри циклотрона от внутреннего радиуса (R=120 мм) до конечного радиуса циклотрона (R=680 мм). Ускорение проводилось с оптимизацией и без оптимизации магнитного поля при помощи радиальных корректирующих катушек. Результаты исследования приведены в таблице 4.19 и на рисунках 4.91-4.94. В режиме работы с отключенными корректирующими катушками ток ускоренного пучка на радиусе вывода R=680мм был равен 1,35 мкА. При этом коэффициент прохождения пучка в циклотроне составил 77%. Оптимизация магнитного поля радиальными корректирующими катушками позволила увеличить ток ускоренного пучка на

радиусе вывода до 1,83 мкА, что соответствует коэффициенту прохождения пучка в циклотроне более 95%.

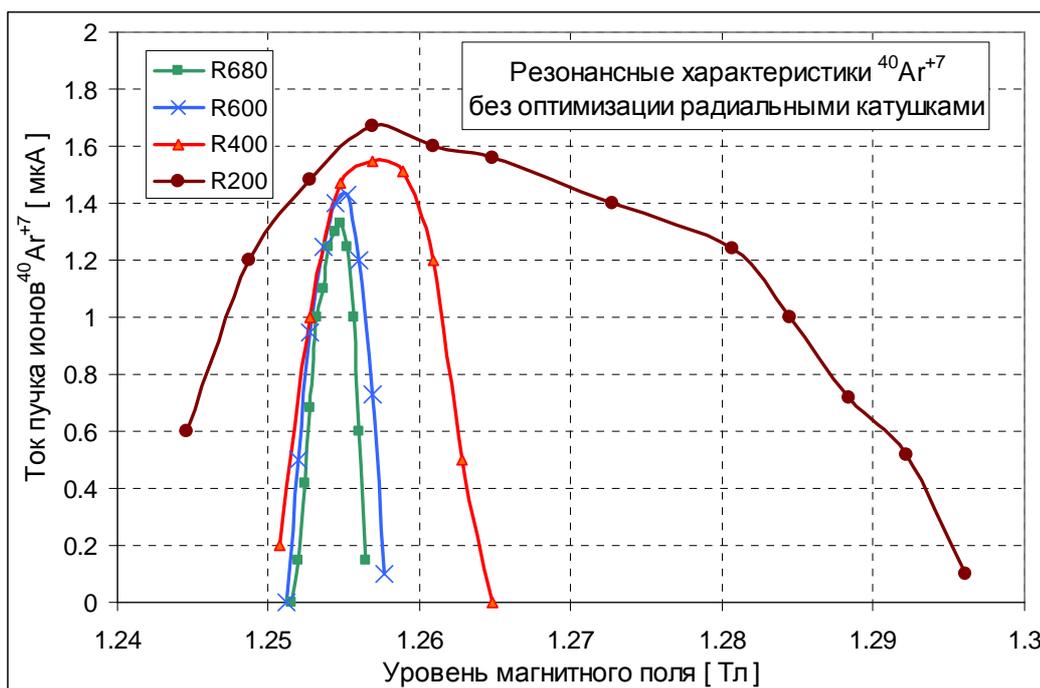


Рис. 4.91. Зависимость тока пучка ионов аргона  $^{40}\text{Ar}^{+7}$  от уровня основного поля без коррекции радиальными корректирующими катушками. Зависимость получена для четырех значений радиуса 200 мм, 400 мм, 600 мм и 680 мм.

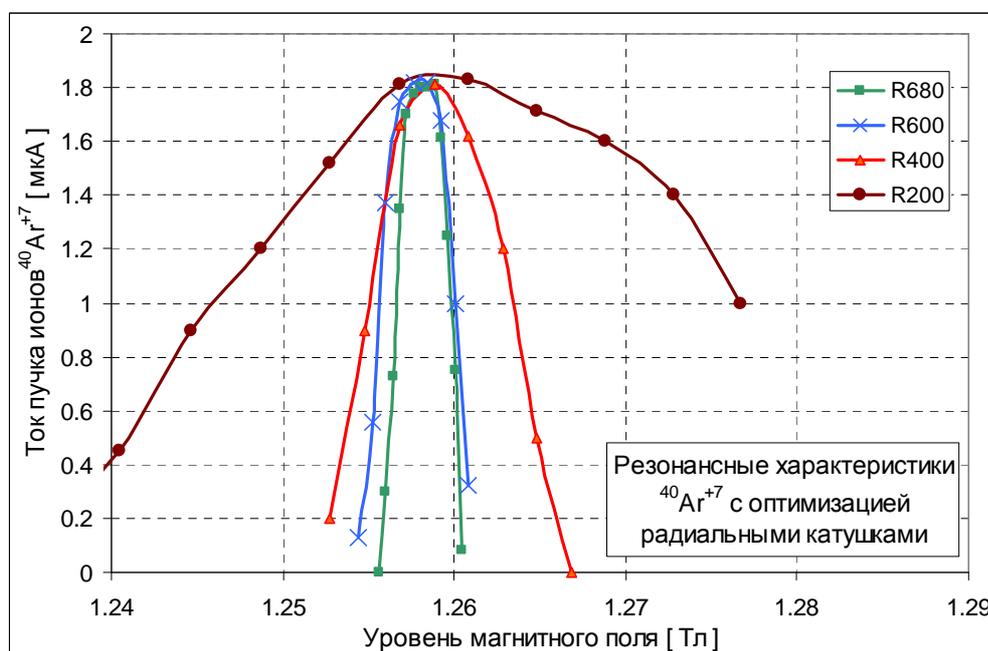


Рис. 4.92. Зависимость тока пучка ионов аргона  $^{40}\text{Ar}^{+7}$  от уровня основного поля при использовании радиальных корректирующих катушек. Зависимость получена для четырех значений радиуса 200 мм, 400 мм, 600 мм и 680 мм.

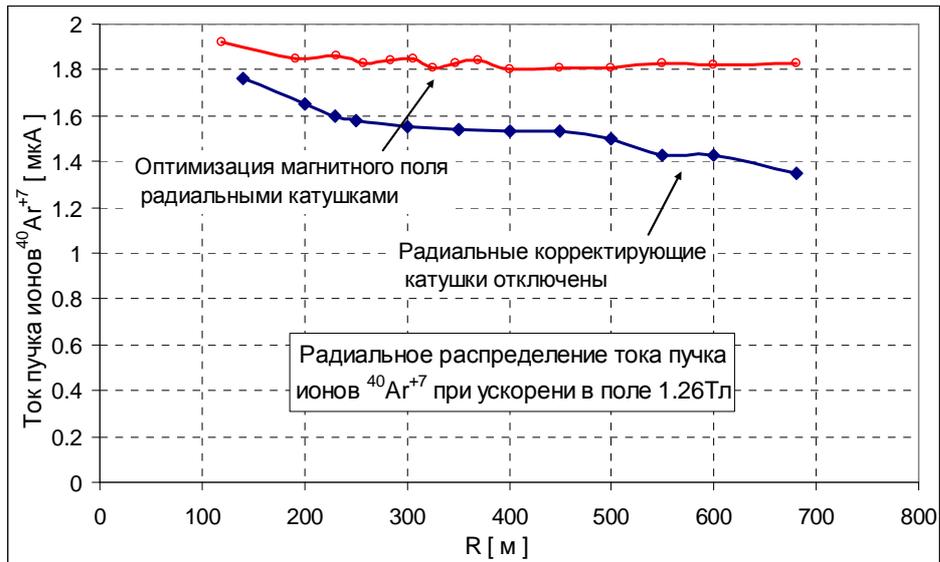


Рис. 4.93. Радиальная зависимость тока пучка ионов аргона  $^{40}\text{Ar}^{+7}$  без использования радиальных корректирующих катушек и в случае их использования.

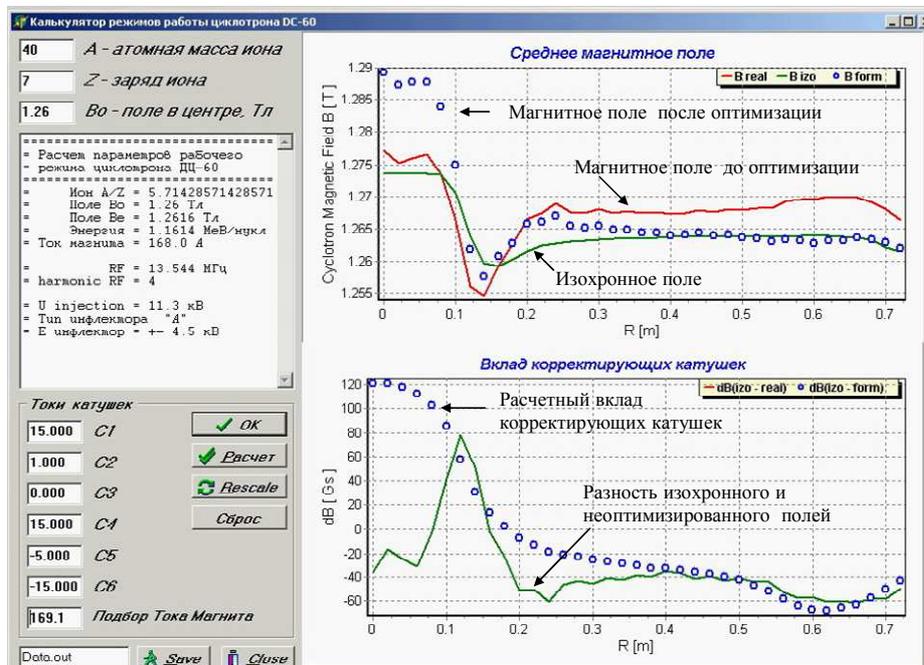


Рис. 4.94. Окно программы выбора режима работы системы корректирующих катушек при ускорении пучка ионов аргона  $^{40}\text{Ar}^{+7}$ .

#### 4.10.6 Ускорение ионов азота $^{40}\text{Ar}^{+4}$ до энергии 0,65 МэВ/нуклон

Исследован процесс ускорения пучка ионов аргона  $^{40}\text{Ar}^{+4}$  до энергии 0,65 МэВ/нуклон. Ускорение производилось на 6-й гармонике ВЧ поля при среднем магнитном поле 1,64 Тл, токе основной обмотки магнита циклотрона 311 А и частоте ускоряющего напряжения 15,2 МГц. В данном режиме работы система банчирувания пучка не использовалась.

Ускорение проводилось с оптимизацией и без оптимизации магнитного поля при помощи радиальных корректирующих катушек. Результаты исследования приведены в таблице 4.20 и на рисунках 4.95-4.98.

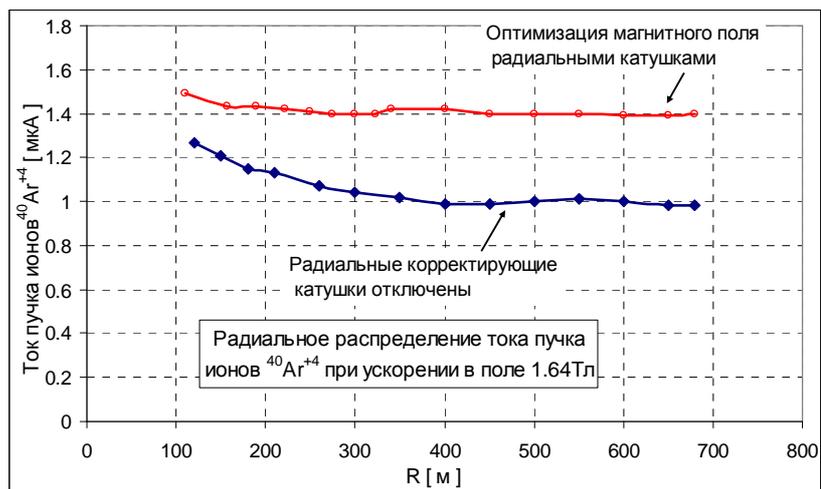


Рис. 4.95. Радиальная зависимость тока пучка ионов аргона  $^{40}\text{Ar}^{+4}$  без использования радиальных корректирующих катушек и в случае их использования.

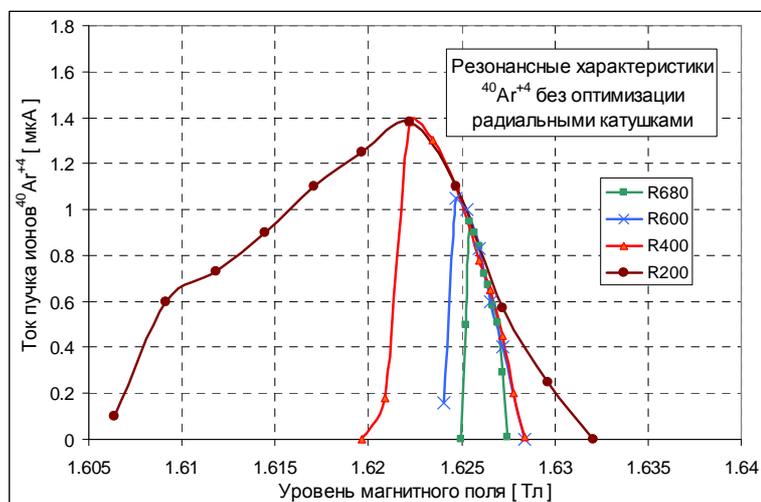


Рис. 4.96. Зависимость тока пучка ионов аргона  $^{40}\text{Ar}^{+4}$  от уровня основного поля без оптимизации радиальными корректирующими катушками. Зависимость получена для четырех значений радиуса 200 мм, 400 мм, 600 мм и 680 мм.

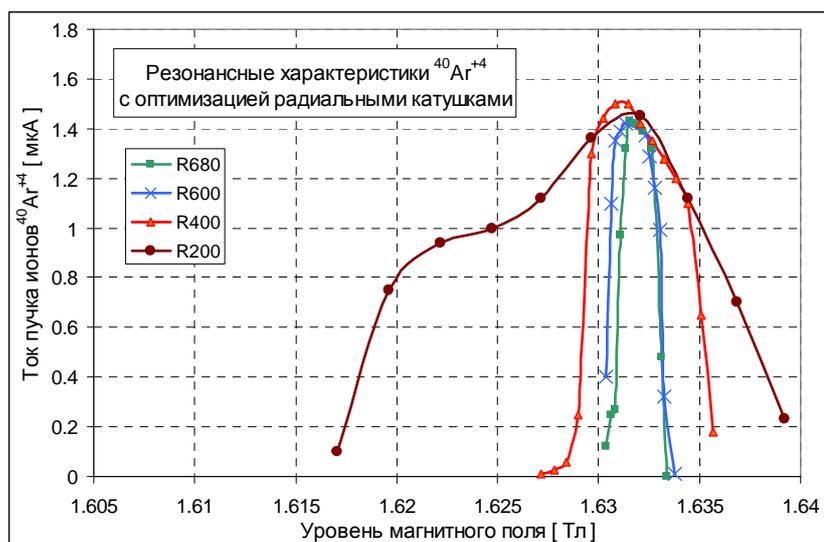


Рис. 4.97. Зависимость тока пучка ионов аргона  $^{40}\text{Ar}^{+4}$  от уровня основного поля при использовании радиальных корректирующих катушек. Зависимость получена для четырех значений радиуса 200 мм, 400 мм, 600 мм и 680 мм.

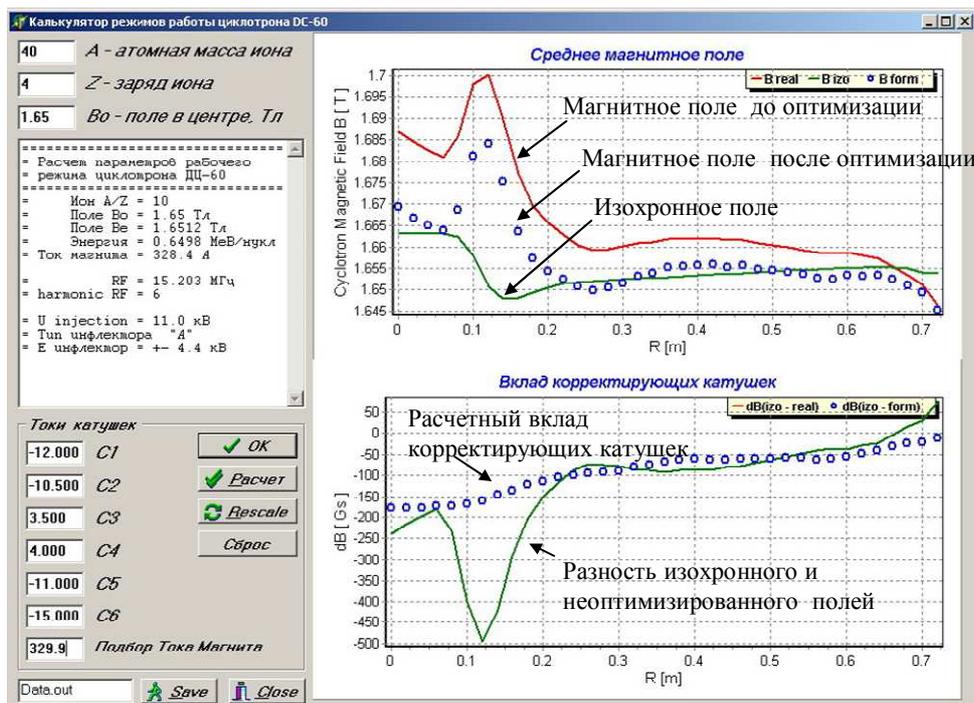


Рис. 4.98. Окно программы выбора режима работы системы корректирующих катушек при ускорении пучка ионов аргона  $^{40}\text{Ar}^{+4}$ .

Таблица 4.20. Ток и коэффициенты прохождения при ускорении пучка ионов  $^{40}\text{Ar}^{+4}$

Режим	Ток пучка на внутреннем радиусе R=120 мм	Ток пучка на радиусе вывода R=680 мм	Эффективность ускорения пучка в циклотроне
Корректирующие катушки выключены	1,27 мкА	0,98 мкА	77 %
Магнитное поле оптимизировано корректирующими катушками	1,5 мкА	1,4 мкА	93 %

## Заключение

В процессе пуско-наладочных работ на циклотроне ДЦ-60 проведены эксперименты по ускорению пучков ионов азота, аргона, криптона ( $^{14}\text{N}^{2+}$ ,  $^{40}\text{Ar}^{4+}$ ,  $^{40}\text{Ar}^{5+}$ ,  $^{40}\text{Ar}^{7+}$ ,  $^{84}\text{Kr}^{12+}$ ) на различных уровнях магнитного поля 1,25 Тл – 1,65 Тл в режимах работы на четвертой и шестой гармониках частоты ускоряющей системы. В ходе экспериментов проведены исследования зависимости тока ускоряемого пучка от уровня магнитного поля (резонансные кривые), распределение тока пучка по радиусу, влияние подстройки магнитного поля при помощи радиальных корректирующих катушек. После оптимизации режима работы систем циклотрона получены проектные параметры ускорения и вывода пучков ионов в соответствии с рабочей диаграммой. Сформированное магнитное поле позволило осуществить ускорение пучков ионов с эффективностью до 96% от внутреннего радиуса (R=110 мм) до конечного радиуса циклотрона (R=680 мм).

## 5. ЦИКЛОТРОННЫЙ КОМПЛЕКС ТЯЖЕЛЫХ ИОНОВ ДЦ-110

### ВВЕДЕНИЕ

Развиваемое в ЛЯР направление по созданию специализированных ускорителей (ИЦ-100, ДЦ-60), получило свое продолжение в проекте нового циклотрона ДЦ-110 [44, 45], разработанного для научно-промышленного комплекса «БЕТА», предназначенного для крупномасштабного производства плазмаферезаторов крови на основе трековых мембран [188]. В основу проекта ДЦ-110 легли научные и инженерные решения, разработанные в ходе эксплуатации циклотронов У-400, У-400М, ИЦ-100, ДЦ-60, а также новые разработки, значительно расширяющие возможности циклотрона для прикладных задач, к которым нужно отнести не только параметры пучков, но и высокую надежность и простоту обслуживания [28, 78, 86, 95, 101, 117].

В состав ускорительного комплекса входят:

- циклотрон ДЦ-110,
- ЭЦР источник ионов и система аксиальной инжекции пучка,
- канал транспортировки ускоренного пучка, оснащенный установкой и технологическим оборудованием для облучения полимерной пленки,
- вакуумная система,
- система электропитания и управления,
- система охлаждения.

На циклотроне ДЦ-110 не предусматриваются вариация энергии ионов и изменение отношения массы к заряду ускоряемых частиц. Такая концепция имеет повышенную надежность и простоту управления комплексом.

Ускорительный комплекс комплектуется одним каналом облучения полимерной пленки. Предусмотрена возможность установки коммутирующего магнита и монтажа второго канала для увеличения производительности оборудования за счет одновременного облучения пленки на одном канале и подготовки установки на другом.

Для получения пучков ионов с энергией 2,5 МэВ/нуклон выбран магнит циклотрона с диаметром полюса 2,0 м. В качестве ускоряемых ионов приняты  $^{40}\text{Ar}^{6+}$ ,  $^{86}\text{Kr}^{13+}$  и  $^{132}\text{Xe}^{20+}$ , которые имеют близкие отношения массы к заряду 6,667, 6,615 и 6,600, что позволяет реализовать режим ускорения практически на фиксированной частоте ускоряющей системы и фиксированном магнитном поле с подстройкой  $B_0$  или  $F_{\text{вч}}$  в небольшом диапазоне. Рассматривались два режима ускорения ионов на 2 и 4 гармониках частоты обращения ионов. Из анализа динамики движения пучка выбран вариант высокочастотной системы, работающей на 2-й гармонике, поскольку эффективность работы системы банчеров в этом случае выше.

На циклотронном комплексе для получения необходимой интенсивности пучков  $^{84}\text{Kr}^{13+}$  и  $^{132}\text{Xe}^{20+}$  используется источник ионов электронно-циклотронного резонанса, работающий на частоте 18 ГГц в «теплом» варианте магнитной системы с медными обмотками.

### 5.1 Источник ионов

Ионный источник DECRIS-5 на частоту 18 ГГц разработан на базе созданных в ЛЯР ОИЯИ источников серии DECRIS-4 (14 ГГц) с медными обмотками [45, 97, 101] путем усиления магнитной структуры и перехода на новый тип СВЧ генератора. Источник ионов DECRIS-5, созданный для промышленного применения, имеет повышенную надежность.

Номинальная интенсивность пучков ионов аргона, криптона и ксенона, которая требуется для ускорения на циклотроне ДЦ-110, приведена в таблице 5.1. Основные параметры источника DECRIS-5 перечислены в таблице 5.2.

Таблица 5.1. Параметры пучков ЭЦР источника 18 ГГц циклотрона ДЦ-110 в режиме промышленного облучения

Ион	A/Z	Необходимая интенсивность пучка
$^{40}\text{Ar}^{6+}$	6,667	85 мкА
$^{86}\text{Kr}^{13+}$	6,615	150 мкА
$^{132}\text{Xe}^{20+}$	6,6	150 мкА

Таблица 5.2. Основные параметры источника DECRIS-5.

Частота СВЧ	18 ГГц
Мощность СВЧ генератора	1000 Вт
Количество обмоток магнитной системы аксиального поля	3 обмотки
Магнитное поле со стороны инжекции	2,2 Тл
Магнитное поле со стороны экстракции	1,35 Тл
Радиальное магнитное поле	1,15 Тл
Структура гексаполя (NdFeB)	36 секторов
Внутренний диаметр плазменной камеры	80 мм
Длина плазменной камеры	300 мм
Максимальное напряжение экстракции	25 кВ
Рабочее напряжение экстракции	20 кВ
Максимальное потребление мощности	160 кВт

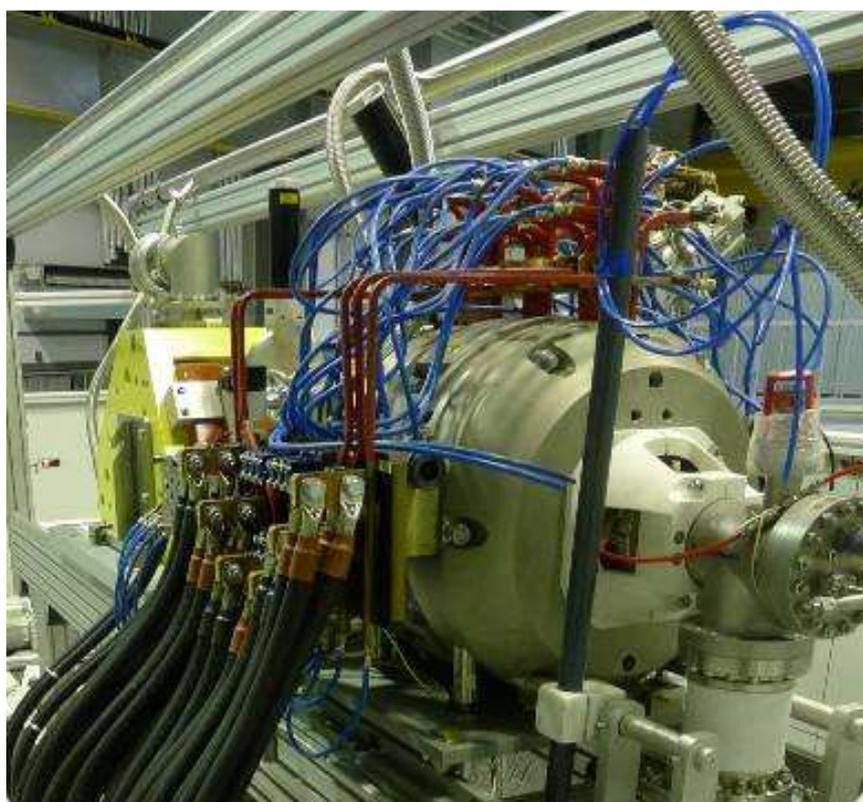
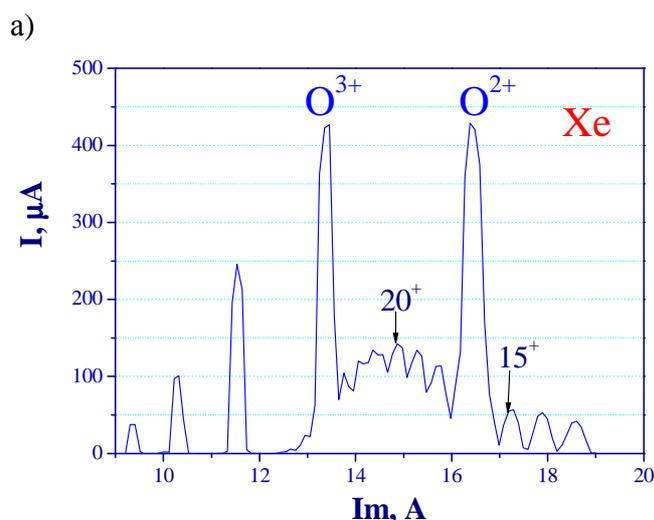
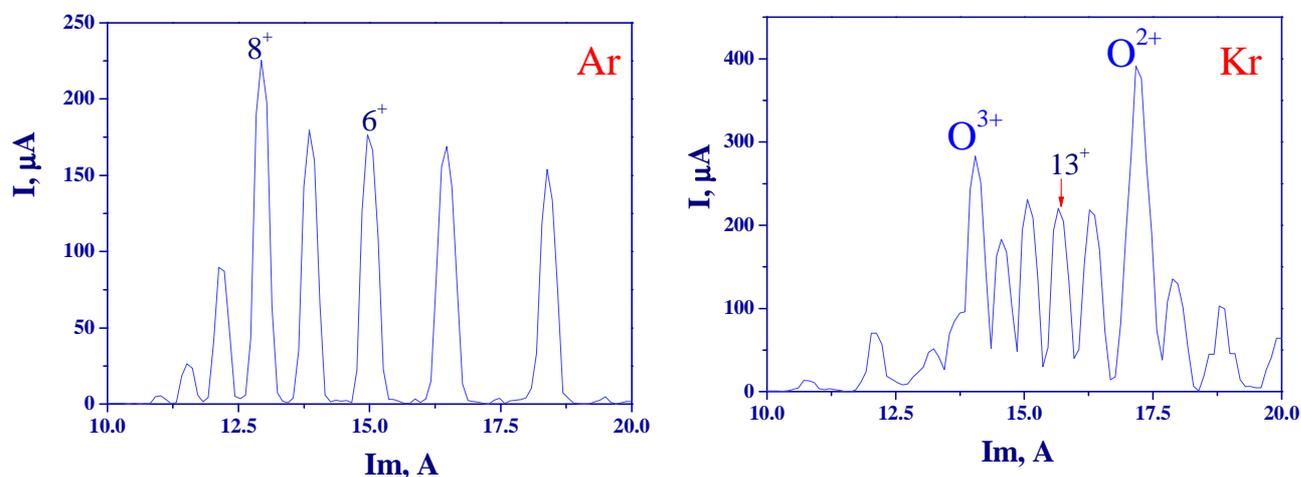


Рис. 5.1. Ионный источник DECRIS-5 на циклотроне ДЦ-110.

После монтажа ЭЦР источника и системы аксиальной инжекции (рис.5.1) была проведена комплексная наладка всех систем источника и канала аксиальной инжекции. Вакуумная система обеспечивала уровень вакуума  $2 \cdot 10^{-8}$  Торр в блоке экстракции и в диагностическом блоке.

Из источника были получены пучки ионов Ar, Kr и Xe. На рисунке 5.2 показаны спектры ионов после анализирующего магнита. Исследована возможность получения максимальной интенсивности пучков ионов Ar, Kr, Xe, результаты приведены в таблице 5.3.



б)

в)

Рис. 5.2. Спектр ионов Ar, Kr, Xe, полученный из источника DECRIS-5 циклотрона ДЦ-110.

I – ток пучка ионов, Im – ток обмотки анализирующего магнита.

Таблица 5.3. Максимальные интенсивности пучков ионов, полученные из источника DECRIS-5 в мкА (Z – заряд ионов).

Z	8+	9+	11+	15+	18+	19+	20+
Ar	1200	750	300				
Kr				325	182	120	70
Xe							220

## 5.2 Система аксиальной инжекции пучка

Для транспортирования пучка ионов ЭЦР источника в центр циклотрона используется система аксиальной инжекции пучка (рис. 5.3) [44, 45, 84], в состав которой входят:

- фокусирующие элементы IS1, IS2, IS3,
- корректирующие элементы, ICM1, ICM2
- анализирующий магнит IM90,
- диагностические элементы для измерения параметров инжектируемого пучка,
- линейный банчер, расположенный в 2450 мм от медианной плоскости (IBN1),
- синусоидальный банчер, расположенный в 800 мм от медианной плоскости (IBN2),
- вакуумные средства откачки на базе турбомолекулярных и криогенных насосов,
- электростатический инфлектор, расположенный в центре циклотрона для поворота инжектируемого пучка из вертикального канала в медианную плоскость циклотрона.

Напряжение инжекции 20 кВ выбрано исходя из оптимальных условий динамики движения пучка в центре циклотрона. Схема аксиальной инжекции пучка приведена на рис. 5.3. Параметры элементов аксиальной инжекции пучка указаны в таблице 5.4.

В горизонтальной части канала транспортируются пучки ионов разных зарядов, поэтому ее целесообразно делать небольшой длины, чтобы сократить время влияния пространственного заряда пучка. После анализирующего магнита пучок должен иметь фокус, чтобы улучшить разрешающие свойства магнита IM-90. В этом месте удобно расположить цилиндр Фарадея для измерения тока пучка и коллиматоры. Огибающая пучка в системе аксиальной инжекции пучка ДЦ-110 показана на рис. 5.4. Расчетное распределение ионов  $^{86}\text{Kr}^{13+}$  на входе в инфлектор в плоскостях  $(x,y)$ ,  $(x,x')$ ,  $(y,y')$  показаны на рисунке 5.5.

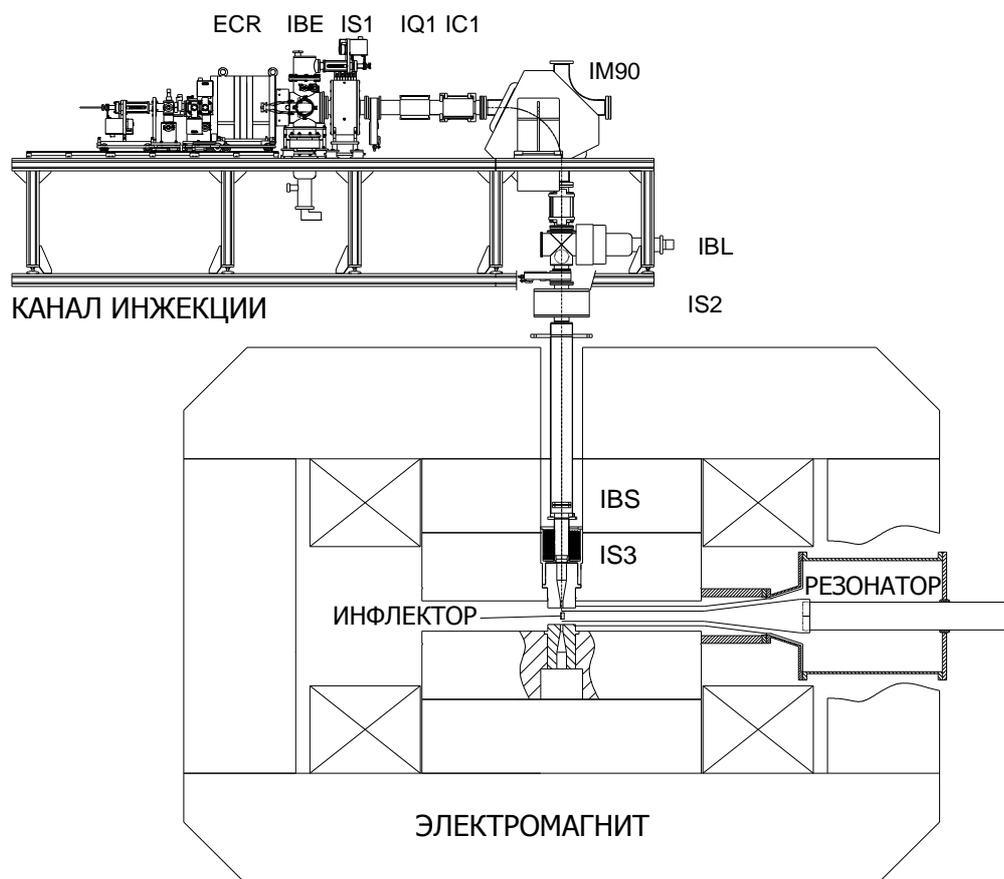


Рис 5.3. Схема циклотрона ДЦ-100 с системой аксиальной инжекции пучка из ЭЦР источника.

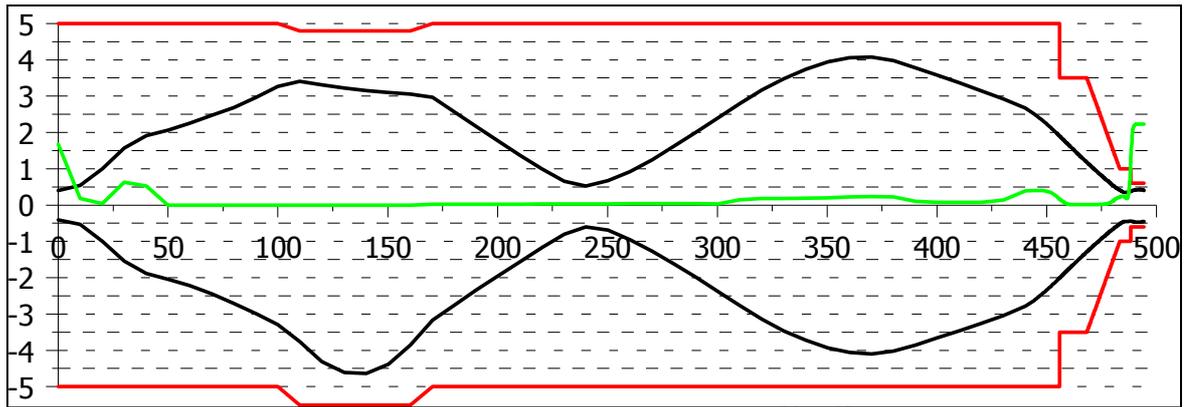
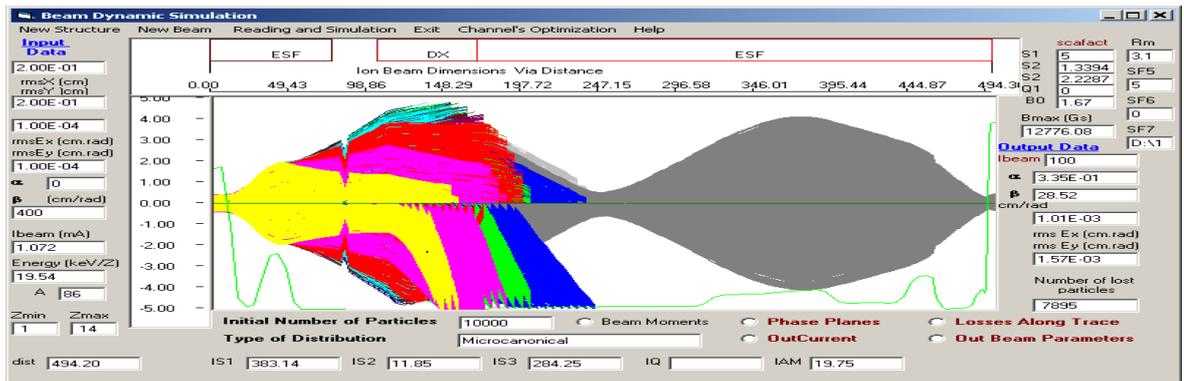


Рис.5.4. Огибающие пучка ионов  $^{86}\text{Kr}^{13+}$ .

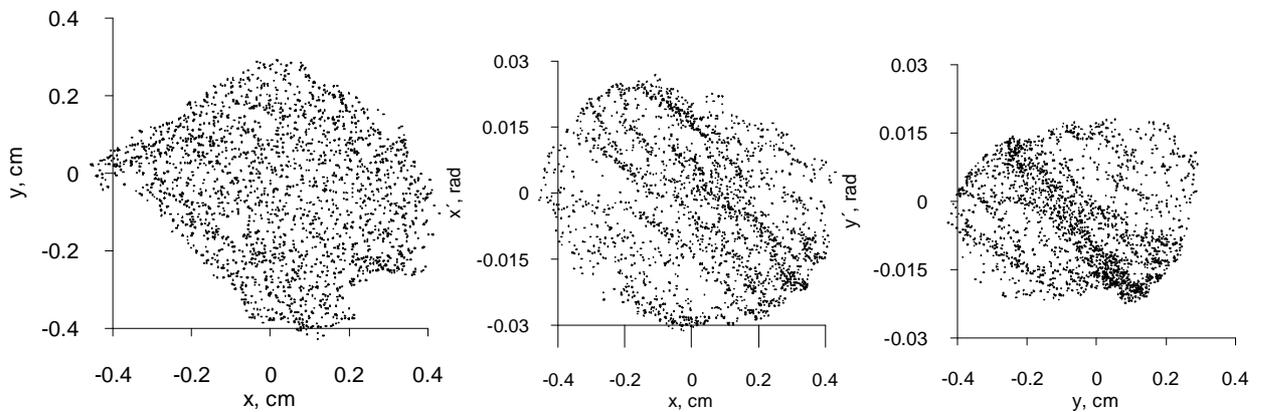


Рис. 5.5. Расчетное распределение ионов  $^{86}\text{Kr}^{13+}$  на входе в инфлектор в плоскостях (x,y), (x,x'), (y,y').

Таблица 5.4. Параметры элементов аксиальной инжекции пучка.

Обозначение	Тип элемента	Максимальное поле, кГс
IS1	соленоид	6,0
IM90	анализирующий магнит	1,9
IS2	соленоид	2,0
IS3	соленоид	5,0

Фазовый аксептанс циклотрона ДЦ-110 составляет примерно  $30^\circ$ , для увеличения эффективности захвата в ускорение инжектируемого пучка используется система банчировки. В системе аксиальной инжекции пучка циклотрона ДЦ-110 установлены два банчера – линейный, расположенный в 2450 мм от медианной плоскости, и синусоидальный, расположенный в 800 мм от медианной плоскости (табл. 5.5).

Таблица. 5.5. Параметры банчеров ДЦ-110.

Обозначение	Тип элемента	Расчетная рабочая амплитуда напряжения
IBL	Линейный банчер (2450 мм от медианной плоскости)	700-750 В
IBS	Синусоидальный банчер (800 мм от медианной плоскости)	300-350 В

### Линейный банчер (IBL)

Линейный банчер IBL (рис.5.6) представляет собой две параллельные сетки на прямоугольных рамках. Внешний размер рамки  $90 \times 90$  мм, внутренний размер –  $80 \times 80$  мм (расчетный диаметр пучка на банчере составляет  $\sim 30$  мм). Сетки натянуты на рамки с внутренней стороны. Расстояние между верхней и нижней сетками – 8 мм. Каждая сетка состоит из 8 позолоченных вольфрамовых проволочек толщиной 0,1 мм, натянутых параллельно с шагом  $h = 8$  мм. Проволочки верхней и нижней сетки взаимно перпендикулярны.

В зазоре между сетками создается группирующее электрическое поле. Временная зависимость напряженности этого поля – пилообразная (линейное нарастание и максимально резкий спад).

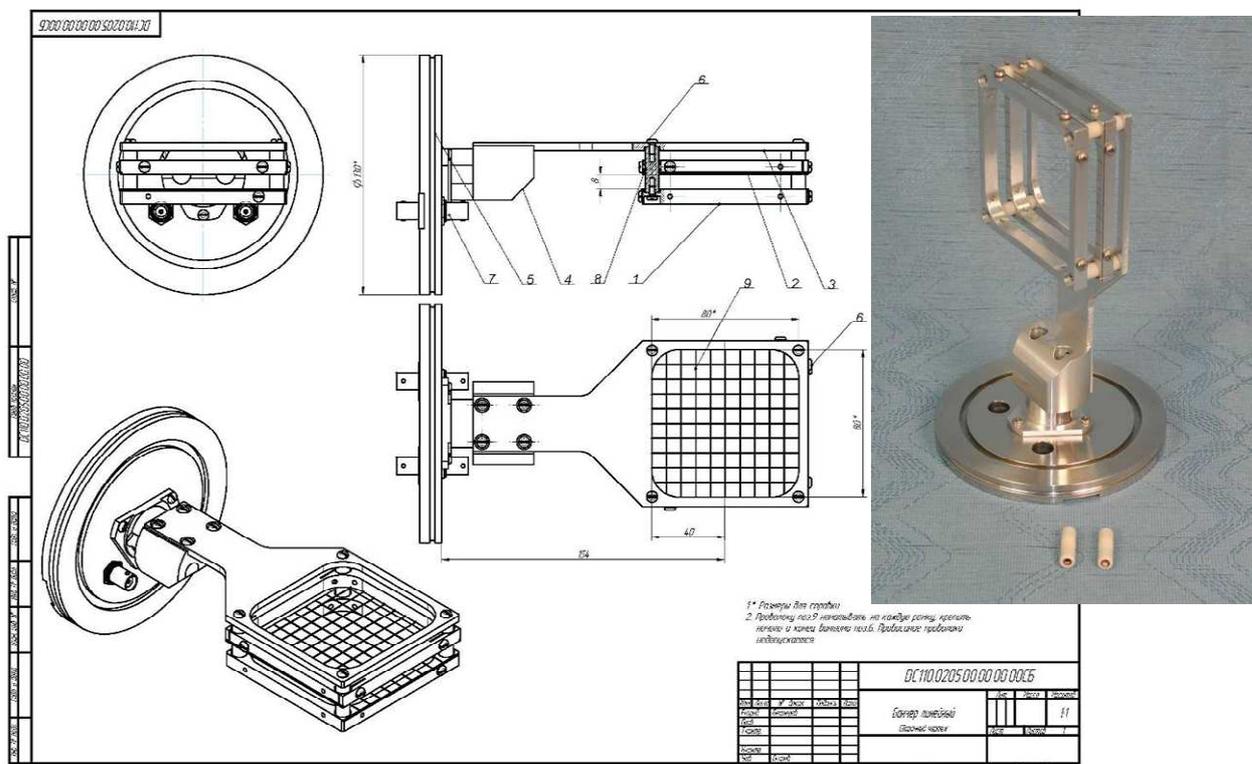


Рис. 5.6. Чертеж и фотография линейного банчера.

## Синусоидальный банчер

Синусоидальный банчер IBS (рис. 5.7) представляет собой две параллельные сетки, натянутые на кольцевых рамках. В зазоре между сетками создается группирующее электрическое поле. Временная зависимость напряженности этого поля – синусоидальная.

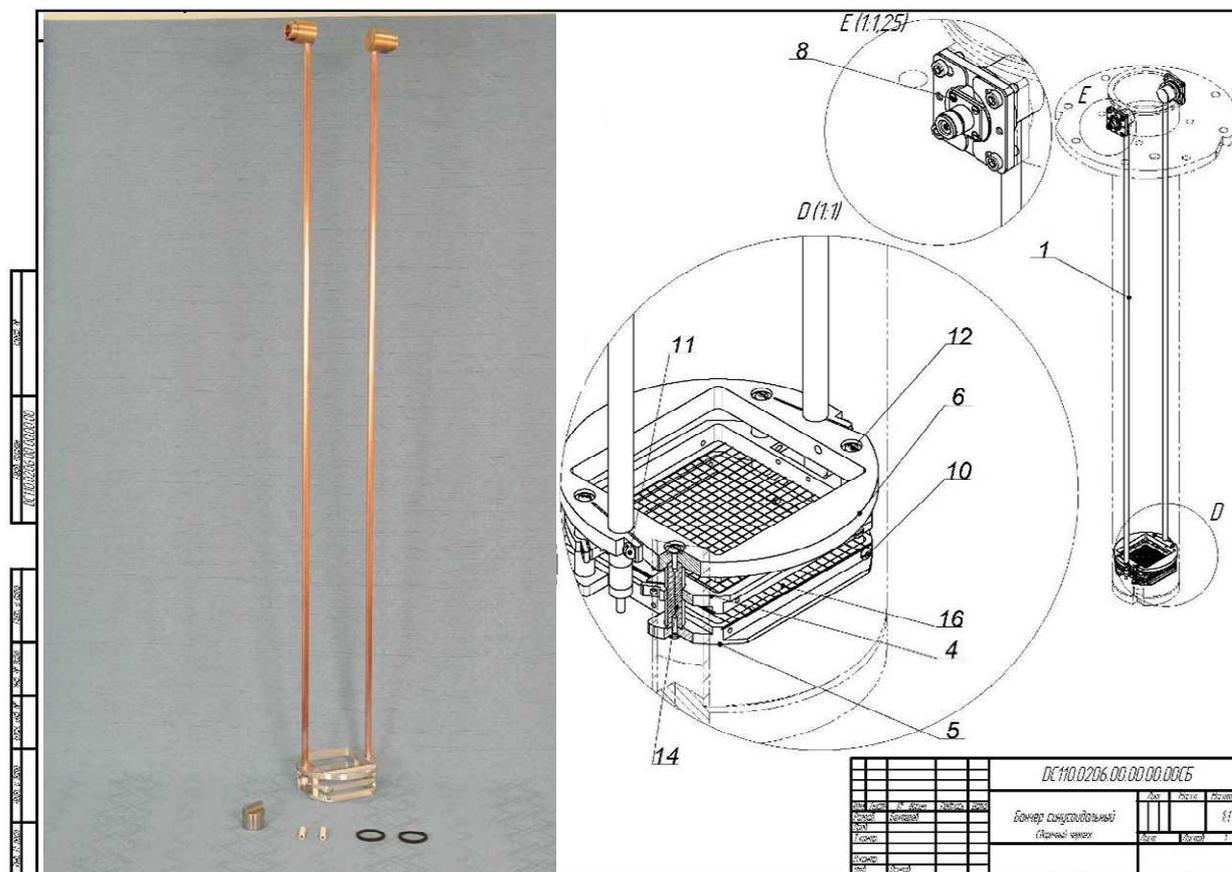


Рис. 5.7. Чертеж и фотография синусоидального банчера.

Банчер стационарно располагается на расстоянии 800 мм выше медианной плоскости циклотрона. Внутренний диаметр сеток банчера 80 мм (расчетный диаметр пучка на банчере составляет ~70 мм). Сетки натянуты на кольцевые рамки наружным диаметром 90 мм, с внутренней стороны. Расстояние между верхней и нижней сетками 8 мм. Каждая сетка состоит из позолоченных вольфрамовых проволочек толщиной 0,1 мм, натянутых параллельно с шагом  $h = 5$  мм. Проволочки верхней и нижней сетки взаимно перпендикулярны. Банчер крепится на двух резонаторах, закрепленных на вакуумном фланце, расположенном под шибером IGV2. Резонаторы идут вдоль вакуумной трубы канала (рис. 5.7).

Платформа системы аксиальной инжекции пучка на циклотроне ДЦ-10 имеет снизу и по периметру защиту от рассеянного магнитного поля – листы из стали 3 толщиной 10–20 мм. Такое ограждение служит также биологической защитой от рентгеновского излучения ионного источника (рис. 5.8.)

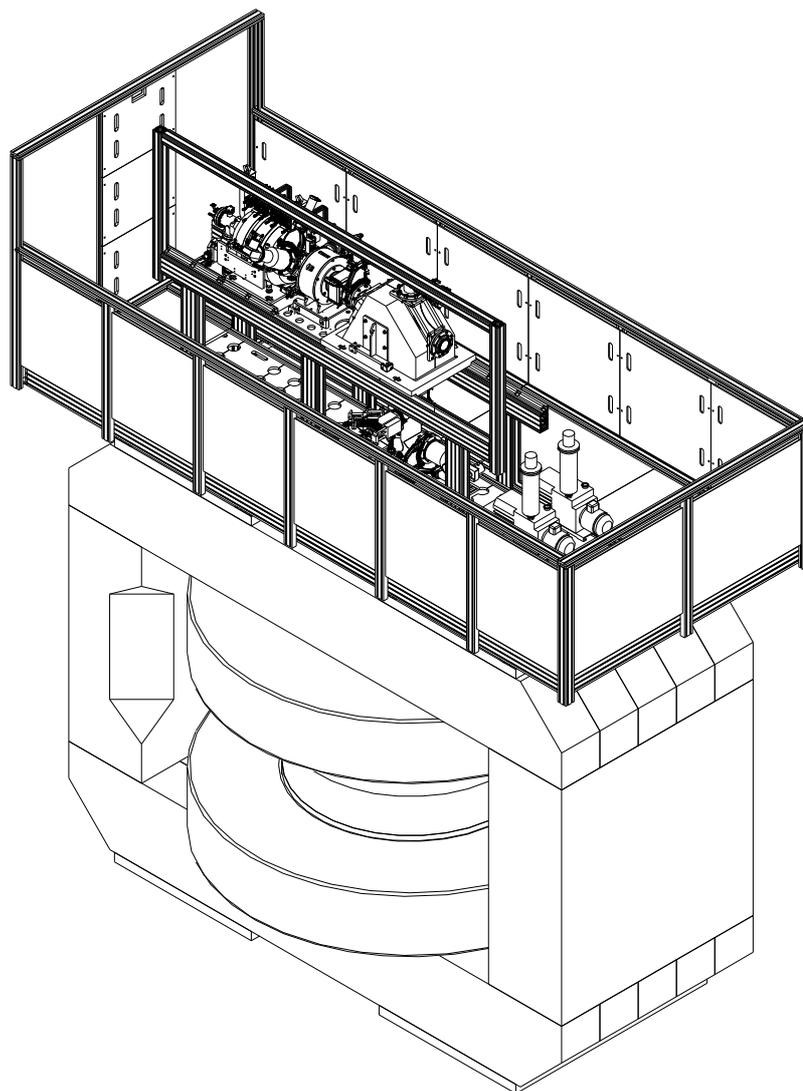


Рис. 5.8. Платформа системы аксиальной инъекции пучка на магните циклотрона ДЦ-110.

### 5.3. Магнитная структура циклотрона

#### 5.3.1 Магнит циклотрона

Магнитная структура ДЦ-110 создана на базе электромагнита с диаметром полюса 2м [44, 45, 84, 137]. В циклотроне ДЦ-110 не предусматривается использование радиальных корректирующих катушек, магнитное поле сформировано с помощью железных масс. Для коррекции первой гармоники в долинах устанавливаются азимутальные корректирующие.

В рабочем зазоре магнита размещены четыре пары секторов с прямыми границами, закрепленные на полюсе магнита. Каждый сектор оснащен боковыми съемными шиммами. Азимутальная или вертикальная обработка боковых секторных шимм использовалась для коррекции магнитного поля при формировании изохронных условий ускорения, а также для компенсации влияния магнитного канала, входящего в состав системы вывода пучка из циклотрона. Для подавления нечетных гармоник магнитного поля в циклотроне центрально симметрично фокусирующему магнитному каналу установлен компенсирующий канал, по конструкции идентичный основному (рис. 5.9). Его влияние на магнитное поле циклотрона также учтено [137]. Основные параметры электромагнита циклотрона ДЦ-110 приведены в таблице 5.6 /44, 45/.

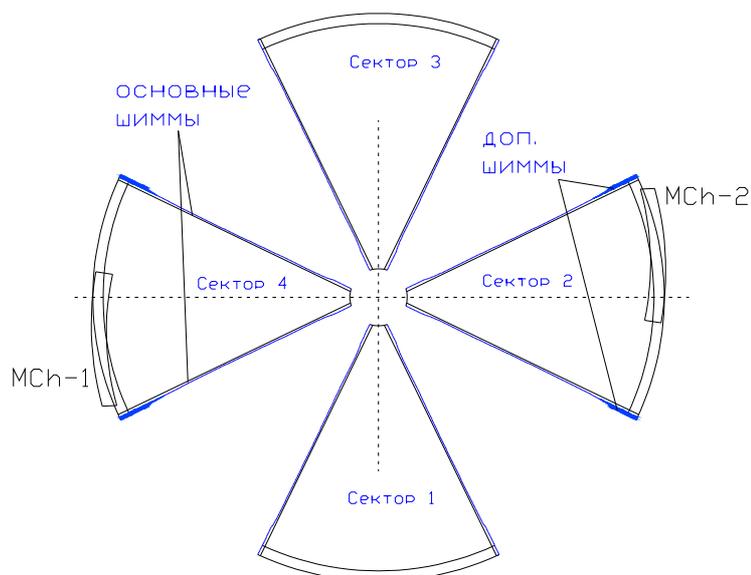


Рис. 5.9. Схема расположения основного фокусирующего (Mch1) и компенсирующего (Mch2) каналов и фотография полюса магнита.

Таблица 5.6. Основные параметры электромагнита циклотрона ДЦ-110.

Размер магнитопровода, Д×Ш×В, мм	4940×2075×2840
Диаметр полюса, мм	2000
Межполюсной зазор, мм	218
Количество пар секторов	4
Угловая протяженность сектора (спиральность)	52° ( 0° )
Высота сектора, мм	65,5
Зазор между секторами, мм	42
Зазор между сектором и полюсом, мм	24.5
Зазор между центральными пробками, мм	112
Количество радиальных корректирующих катушек	0
Количество сборок азимутальных корректирующих катушек	2
Масса электромагнита, тонн	250
Магнитное поле в центре, Тл	1,67
Флаттер	0,117
Частота бетатронных колебаний - $\nu_r$	0,34
- $\nu_z$	1,015

### 5.3.2 Магнитное поле циклотрона

В рабочем зазоре магнита размещены четыре пары секторов без спиральности. Каждый сектор оснащен боковыми съемными шиммами, которые позволяют внести необходимую коррекцию поля при окончательном формировании изохронных условий ускорения.

Сравнение результата измерения среднего магнитного поля и его изохронного значения показано на рисунке 5.10. Флуктуация поля в пределах до 25 Гс до радиуса 25 см не оказывает существенного влияния на фазовое движение, рассчитанное аналитически (рис. 5.11), в силу того, что ионы быстро покидают центральную область. Максимальный дрейф иона не превышает  $3^\circ$ . Значения частот свободных бетатронных колебаний для измеренного поля (рис. 5.12) находятся вдали от опасных резонансных значений [45, 137].

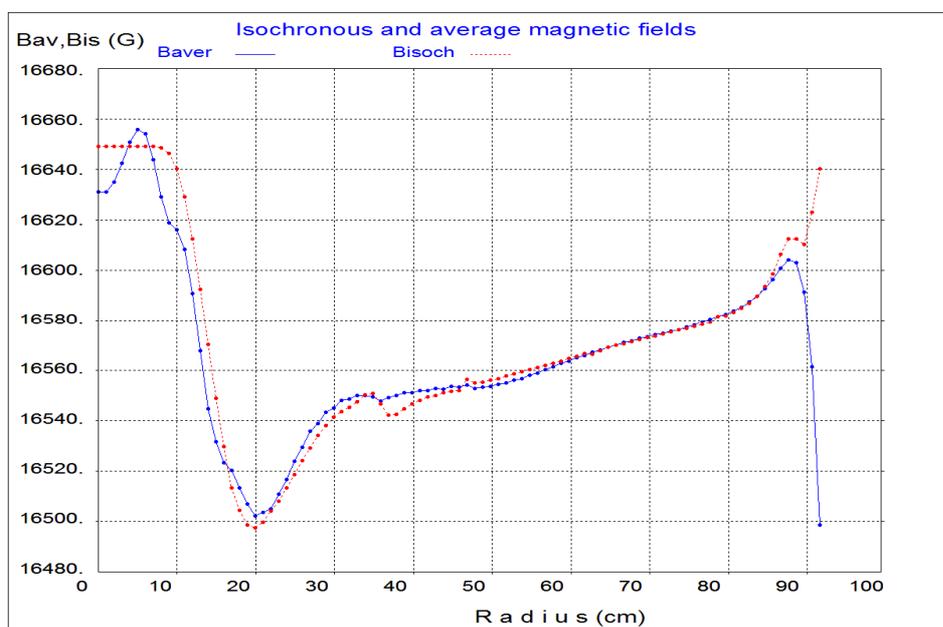


Рис. 5.10. Сравнение измеренного среднего поля  $B_{av}$  и изохронного поля  $B_{is}$ .

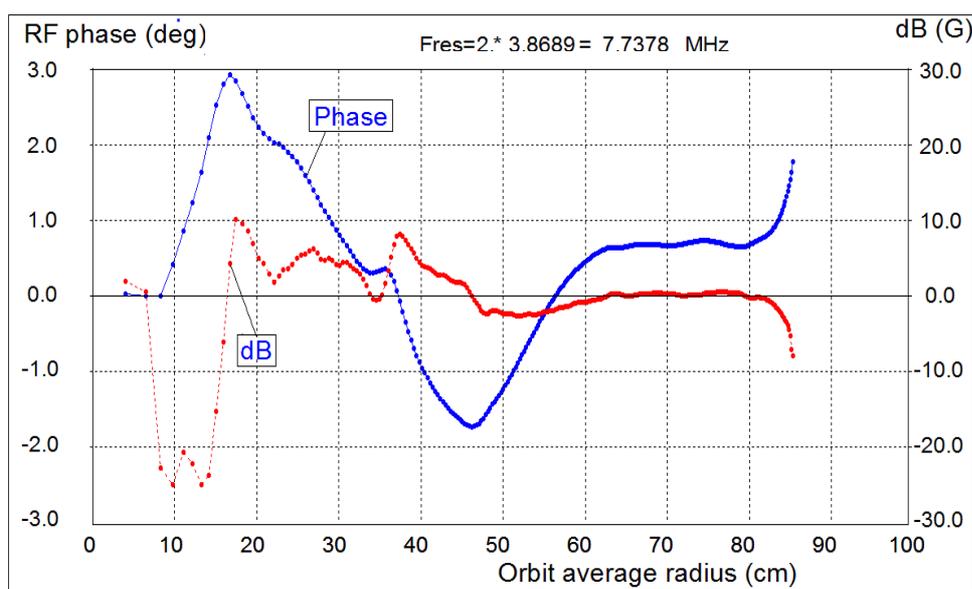


Рис. 5.11. Разность между сформированным и изохронным полем (dB), а также фазовое движение (Phase) центрального иона

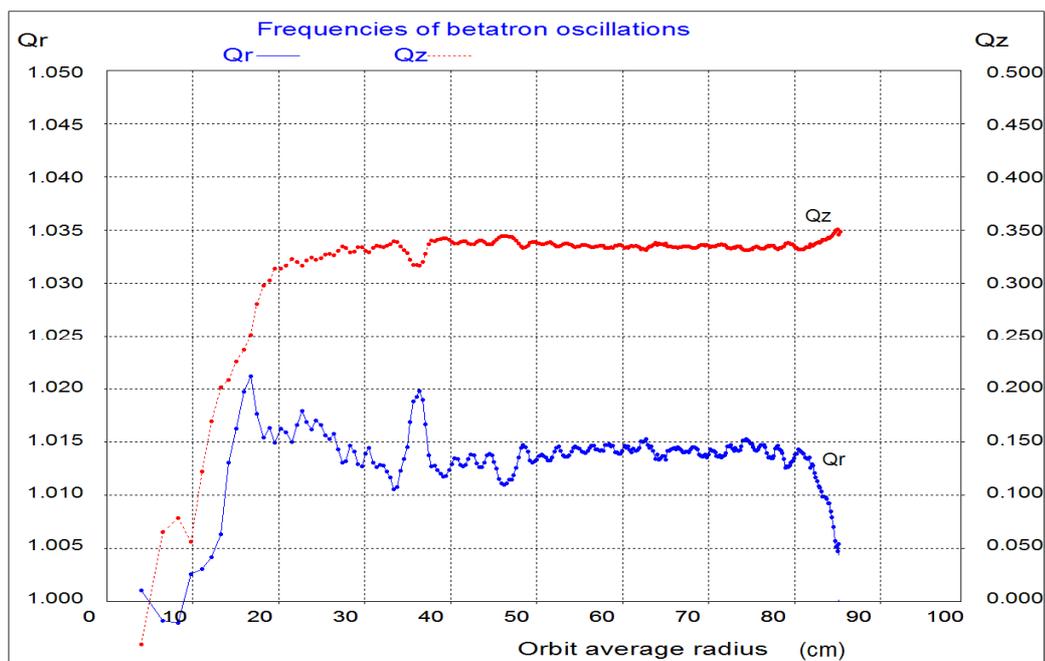


Рис. 5.12. Частоты свободных колебаний  $Q_r$  и  $Q_z$  в зависимости от среднего радиуса орбит.

В системе вывода ионов присутствует пассивный магнитный канал, который приводит к искажению магнитного поля. Гармонические возмущения поля в области ускорения пучка, достигающих нескольких десятков гаусс. Наиболее опасны нечетные гармоники 1, 3, 5, 7, приводящие к сильному искажению ускоренных орбит.

Если коррекцию возмущений проводить за счет бокового шиммирования секторов, то можно получить необходимое распределение среднего поля по радиусу и скомпенсировать первую гармонику магнитного поля, при этом другие гармоники будут иметь достаточно большую амплитуду (рис.5.13).

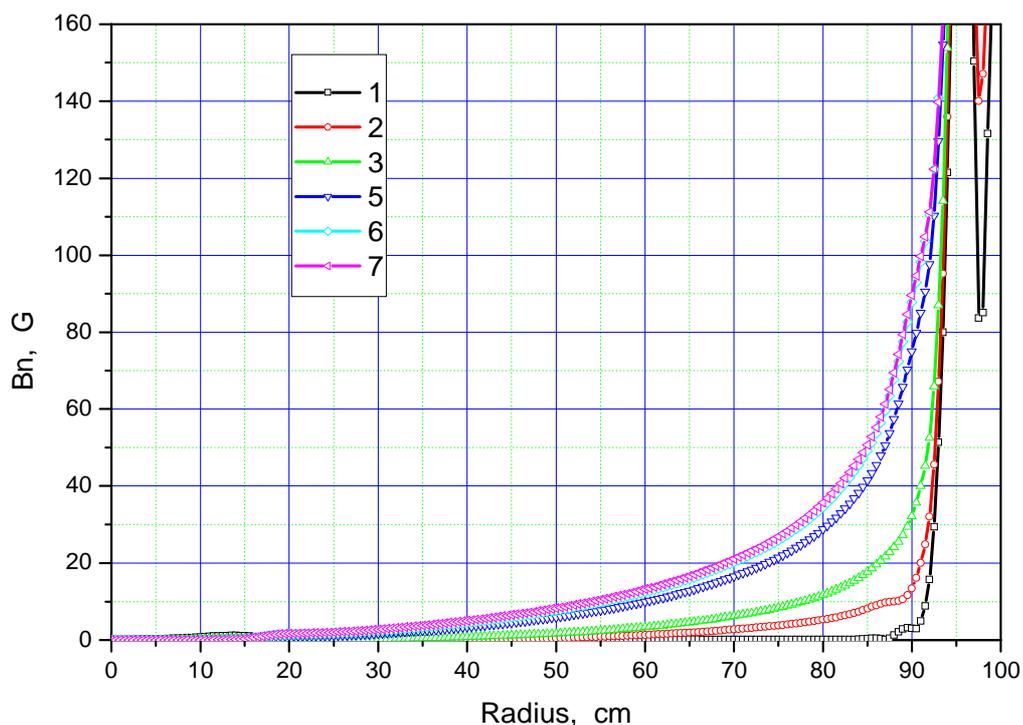


Рис.5.13. Амплитуды гармоник возмущения в расчетном поле без установки фальш-канала.

Для подавления нечетных гармоник было предложено установить фальш-канал, который представляет собой копию фокусирующего канала. Каналы располагаются центрально-симметрично по отношению друг к другу. Такой метод позволяет подавить полностью нечетные гармоники, но ведет к увеличению амплитуды второй гармоники в 2 раза. Как будет показано ниже, это не оказывает существенного негативного влияния на пучок.

Амплитуда ведущей 4-й гармоники измеренного магнитного поля, а также основные гармоники возмущений при установленном фальш-канале изображены на рисунке 5.14. Амплитуда 1-й гармоники во всем диапазоне радиусов не превышает 5 Гс, в то время как амплитуда 2-й плавно растет до 100 Гс к радиусу вывода. Ниже будет показано влияние этих возмущений магнитного поля на динамику пучка.

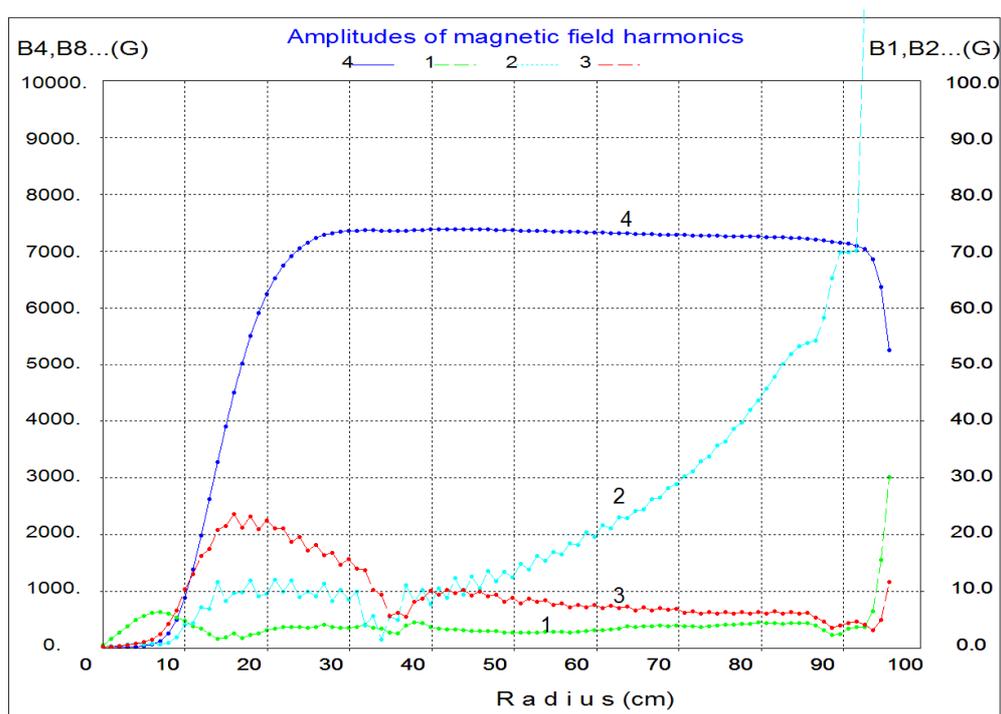


Рис. 5.14. Измеренные амплитуды гармоник магнитного поля.

### 5.3.3 Динамика движения пучка в процессе ускорения

Поворот пучка с энергией 3 кэВ/нуклон из линии аксиальной инжекции в медианную плоскость циклотрона обеспечивается электростатическим инфлектором, параметры которого приведены в таблице 5.7, а первые 2 оборота ионов показаны на рисунке 5.15.

Таблица 5.7. Параметры спирального инфлектора для режима ускорения  $^{86}\text{Kr}^{13+}$

A/Z		6,61
Магнитное поле ( $B_0$ )	Тл	1,67
Напряжение инжекции	кВ	20
Напряжение на электродах	кВ	$\pm 6,9$
Магнитный радиус	см	3,13
Электрический радиус	см	3,5
Зазор между потенциальными пластинами	см	1,2
Ширина электродов	см	2,4

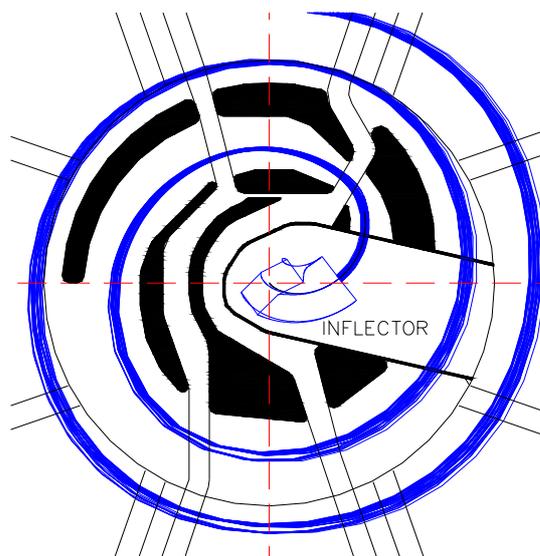


Рис. 5.15. Эскизный чертеж центральной области ДЦ-110 и траектории ионов  $^{86}\text{Kr}^{13+}$  на первых двух оборотах.

Для расчетов ускорения были взяты 2500 ионов  $^{86}\text{Kr}^{13+}$ . Фазовая протяженность банча была равна  $30^\circ$  ВЧ, поперечные эмиттансы пучка  $\sim 100 \pi$  мм·мрад. Для описания ВЧ ускоряющего поля использовалось его аналитическое представление [189], учитывающее геометрические размеры ускоряющих щелей. Амплитуда ВЧ напряжения полагалась равной 50 кВ. Интегрировались полные уравнения движения ионов в электромагнитном поле циклотрона.

На рисунке 5.16 можно увидеть сравнение финальных орбит центральных ионов банча в магнитном поле с фальш-каналом и без него [137]. Если фальш-канал отсутствует, то максимальный радиус орбиты на азимуте входа в дефлектор  $118^\circ$  равен 84,0 см, при этом энергия иона равна 2,28 МэВ/нуклон. При дальнейшем ускорении пучка возникают потери ионов из-за больших радиальных колебаний. При использовании фальш-канала ускоряемый пучок ионов достигает проектного радиуса вывода 88 см на входе в дефлектор и энергия ионов близка к проектной 2,5 МэВ/нуклон.

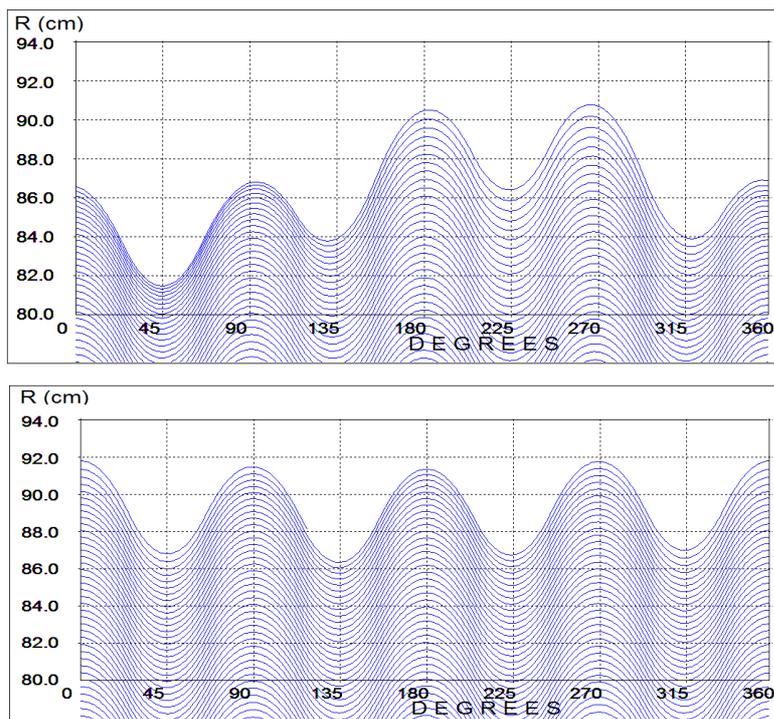


Рис. 5.16. Сравнение финальных траекторий центрального иона. Сверху – в магнитной системе нет фальш-канала, снизу – магнитная система с фальш-каналом.

На радиальное движение пучка в ДЦ-110 существенное влияние оказывают 1-я и 2-я гармоники возмущений магнитного поля. Амплитуда 1-й гармоники определяется неточностями изготовления и сборки магнита циклотрона. Амплитуда 2-й гармоники почти полностью зависит от наличия фальш-канала в магнитной системе. Характер действия этих гармоник на динамику пучка различен.

Амплитуда 1-й гармоники заметно влияет на когерентные радиальные колебания пучка, так как частота свободных колебаний  $Q_r$  во всей области ускорения близка к 1.

Градиент роста амплитуды 2-й гармоники  $dV_2/dr$  является ведущим членом параметрического резонанса  $2Q_r=2$ . В принципе, этот резонанс может привести к росту свободных радиальных колебаний ионов и эмиттанса пучка. Сила действия резонанса зависит от конкретных условий: величины градиента, продолжительности его действия. Амплитуда 2-й гармоники после установки фальш-канала в области конечных радиусов ускорения достигает 100 Гс, а ее градиент – 50 Гс/см. Для исследования влияния этих возмущений на динамику пучка были сделаны расчеты ускорения 200 ионов при варьировании состава возмущений:

- 1 – нет возмущений магнитного поля;
- 2 – есть 1-я гармоника;
- 3 – есть 2-я гармоника;
- 4 – есть 1-я и 2-я гармоники;
- 5 – есть 1-я и 2-я гармоники и включены гармонические обмотки;

Для увеличения энергии выведенного пучка необходимо изменить характер его когерентного движения при подходе к дефлектору, уменьшить амплитуду колебаний. Для этой цели было проведено варьирование амплитуды и фазы 1-й гармоники, создаваемой гармоническими обмотками. Использовалось расчетное радиальное распределение амплитуды гармоники, полученное при трехмерном моделировании, показанное на рисунке 5.17. При расчетах ускорения это радиальное распределение умножалось на коэффициент в пределах 0,1–0,3, а фаза гармоники, создаваемой обмотками, вращалась в диапазоне 0–360° с шагом 45°.

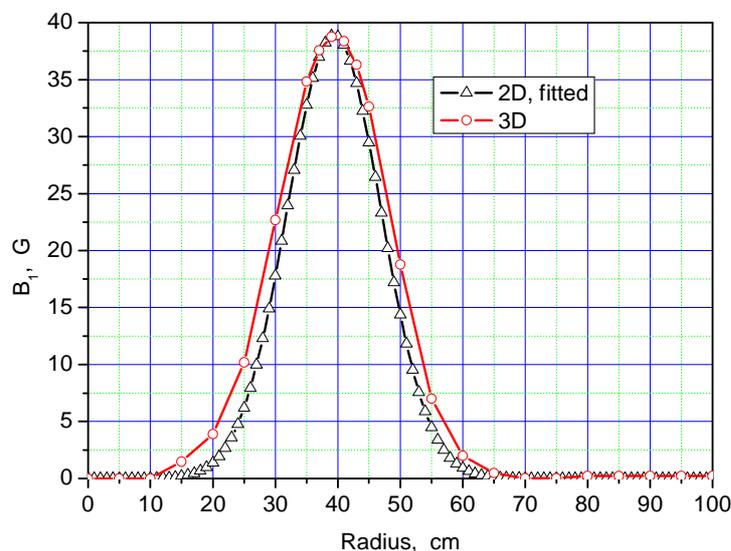


Рис. 5.17. Расчетные кривые амплитуды 1-й гармоники от гармонических обмоток при максимальном токе, полученные при 2D и 3D моделировании.

В результате серии расчетов было найдено, что оптимальное значение коэффициента равно 0,15 (амплитуда гармоники в максимуме на радиусе 40 см равна 5,7 Гс), а фаза гармоники, создаваемой обмотками, должна быть равна 90°.

Результаты расчетов амплитуд колебаний представлены на рисунке 5.18, из которого следует, что:

- в отсутствие возмущений амплитуда радиальных колебаний не больше 8 мм;
- 1-я гармоника приводит к когерентной амплитуде 10 мм в конце ускорения;

- 2-я гармоника вызывает рост некогерентных колебаний с 8 до 14 мм в конце ускорения;
- использование гармонических обмоток может обеспечить уменьшение максимальной амплитуды радиальных колебаний в конце ускорения с 22 до 10 мм.

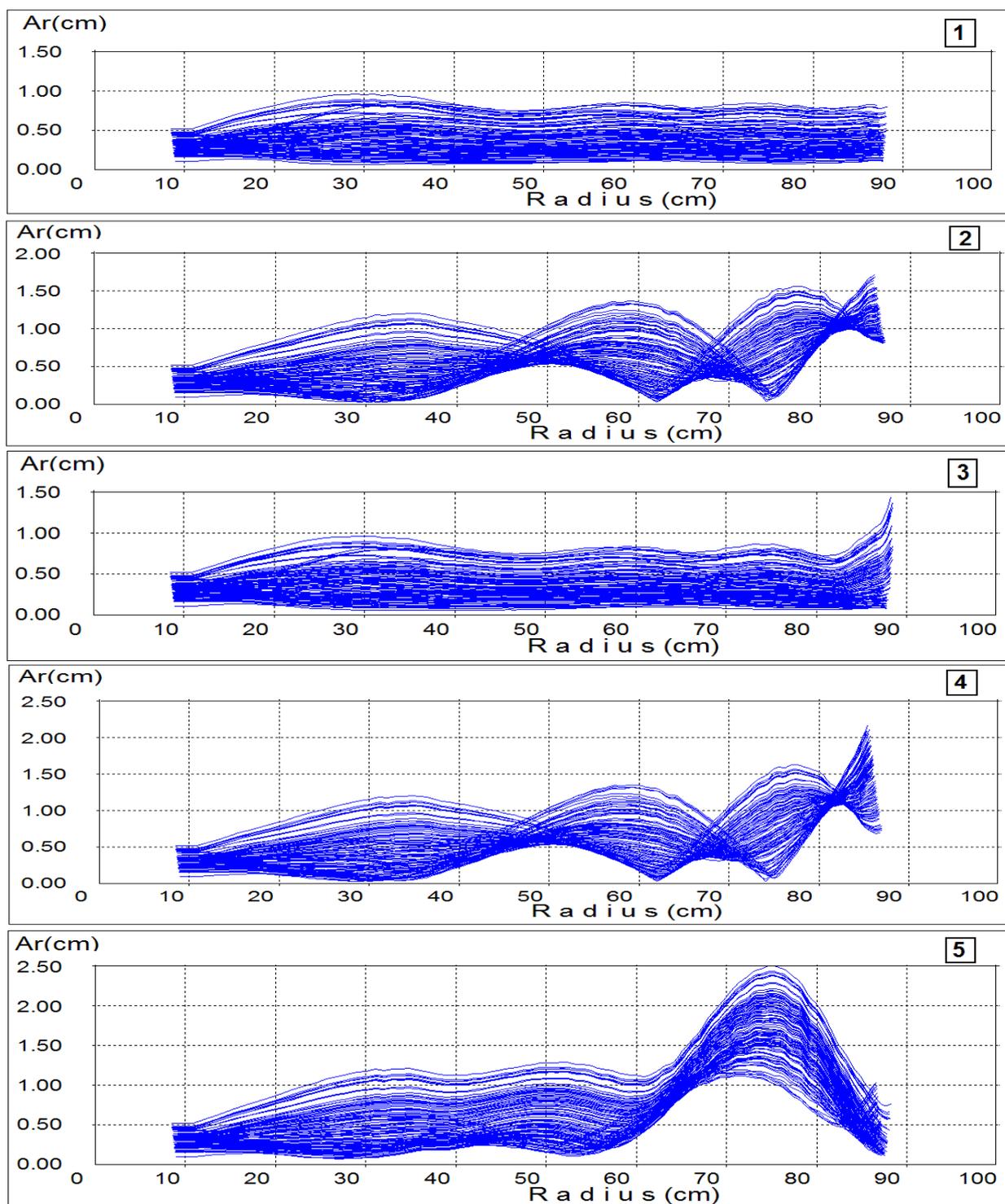


Рис. 5.18. Амплитуды радиальных колебаний 200 ионов в зависимости от среднего радиуса орбит. 1 – нет возмущений магнитного поля, 2 – учтена 1-я гармоника, 3 – учтена 2-я гармоника, 4 – учтены 1-я и 2-я гармоники, 5 – учтены 1-я и 2-я гармоники, а также включены гармонические обмотки в их оптимальном режиме.

## 5.4 Система вывода пучка

Схема системы вывода пучка, состоящей из электростатического дефлектора и магнитного канала, показана на рисунке 5.19 [44, 45, 84]. Пучок выводится в центр корректирующего направление пучка магнита вывода с координатами  $R=184\text{см}$ ,  $\varphi=261^\circ$ . Электростатический дефлектор с напряженностью электрического поля  $\sim 60\text{ кВ/см}$  расположен в долине магнита и имеет азимутальную протяженность  $34^\circ$  ( $\sim 520\text{ мм}$ ). Две плоских пластины дефлектора (септумная и потенциальная) имеют радиус кривизны  $\sim 1945\text{ мм}$ . Проектный радиус установки септума дефлектора равен  $88\text{ см}$ . Расстояние между пластинами  $7\text{--}10\text{ мм}$ .

Магнитный канал, фокусирующий пучок в горизонтальной плоскости, располагается в секторе, следующем за дефлектором, и имеет азимутальную протяженность  $27^\circ$  ( $\sim 470\text{ мм}$ ). Внутри рабочей апертуры канала  $\Delta x=20\text{ мм}$  создается градиент магнитного поля  $27\text{--}28\text{ Тл/м}$ . Радиус входа в канал (середина апертуры)  $955\text{ мм}$ , радиус выхода  $1010\text{ мм}$ .

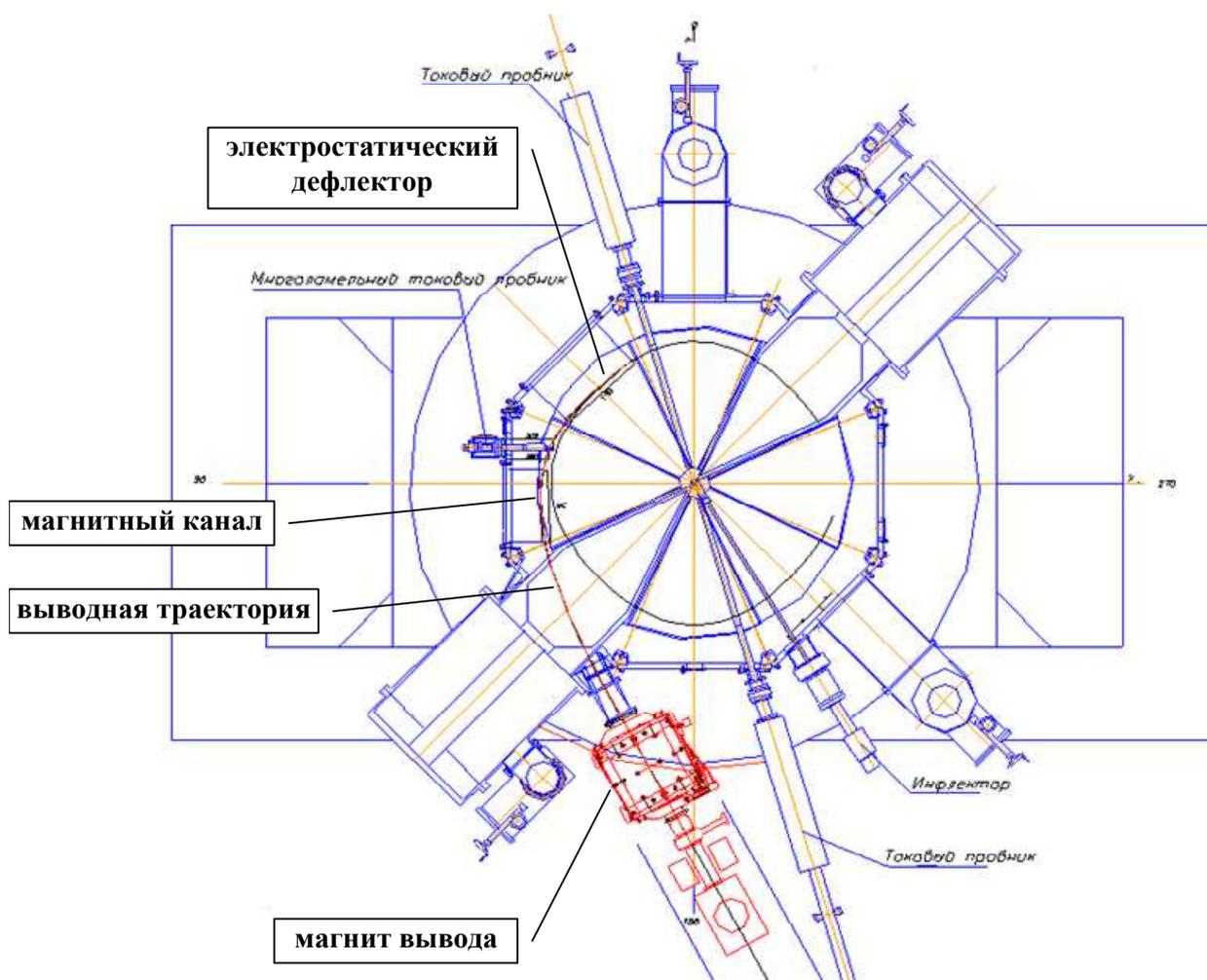


Рис. 5.19. Схема расположения элементов циклотрона.

Для расчетов на входе в дефлектор взят пучок со среднеквадратичным значением эмиттансов пучка  $\epsilon_x=7\pi\text{ мм}\cdot\text{мрад}$ ,  $\epsilon_z=23\pi\text{ мм}\cdot\text{мрад}$ , энергетическим разбросом  $\pm 2\%$ .

При расчетах транспортировки пучка в системе вывода анализировались потери на внутренней стороне септума. Они оказались в пределах  $13\%$ . На высоковольтной пластине потери были пренебрежимо малы, а в магнитном канале отсутствовали. Траектории ионов в дефлекторе и магнитном канале показаны на рисунке 5.20 [137].

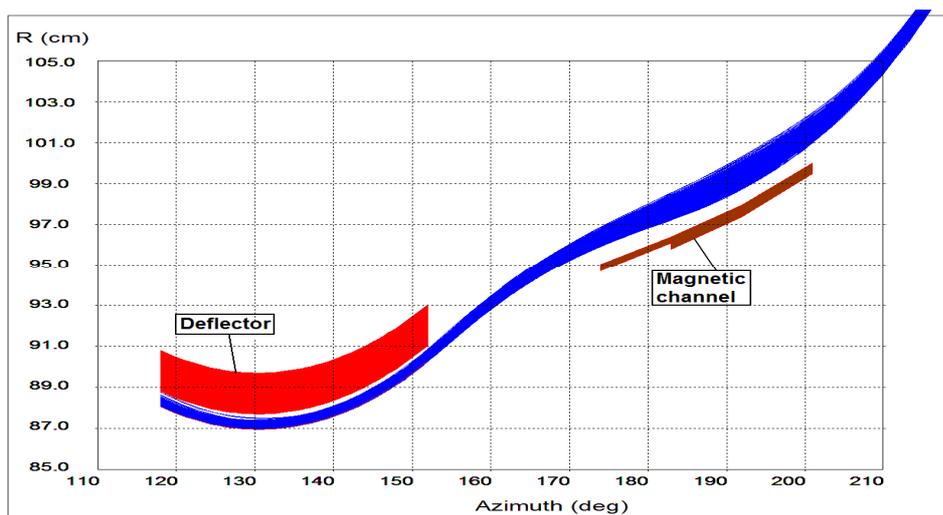


Рис. 5.20. Траектории выведенных ионов в дефлекторе и магнитном канале.

Для попадания пучка в точку сопряжения с каналом транспортировки потребовалось перемещение входа магнитного канала наружу на 9,2 мм по сравнению с его проектным положением. Выход канала был зафиксирован в проектном положении. Полученная точность попадания центрального иона пучка в реперную точку оказалась лучше 1 мм. Угол вылета пучка в реперную точку совпадает с проектным значением с точностью 0,5°. Основные результаты расчетов по выводу представлены в таблице 5.8, и дополнительно проиллюстрированы на рисунках 5.21-5.23.

Таблица 5.8. Характеристики системы вывода

Потери на торце септума (%)	Потери на внешней стороне септума, (%)	Потери на внутренней стороне септума, (%)	Суммарные потери (%)	Коэффициент вывода (%)	Напряжение на дефлекторе при зазоре 7мм (кВ)	Сдвиг входа канала (мм)	Сдвиг выхода канала (мм)
11,7	0,5	12,9	25,1	74,9	35,6	9,2	0,0

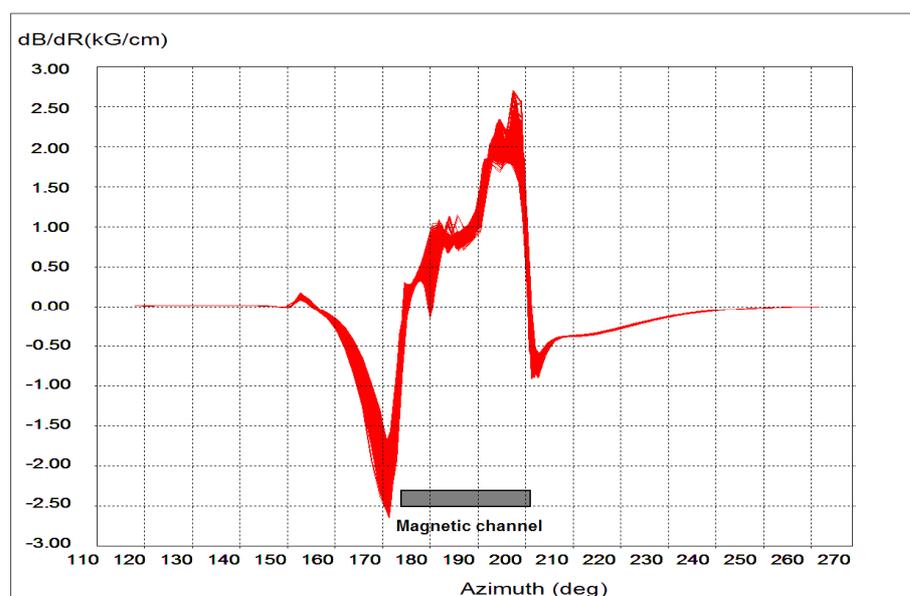


Рис. 5.21. Радиальный градиент магнитного поля на траекториях ионов в процессе вывода. Горизонтально дефокусирующий градиент краевого поля на азимутах (155–175)° сменяется фокусирующим в апертуре магнитного канала (175–200)°.

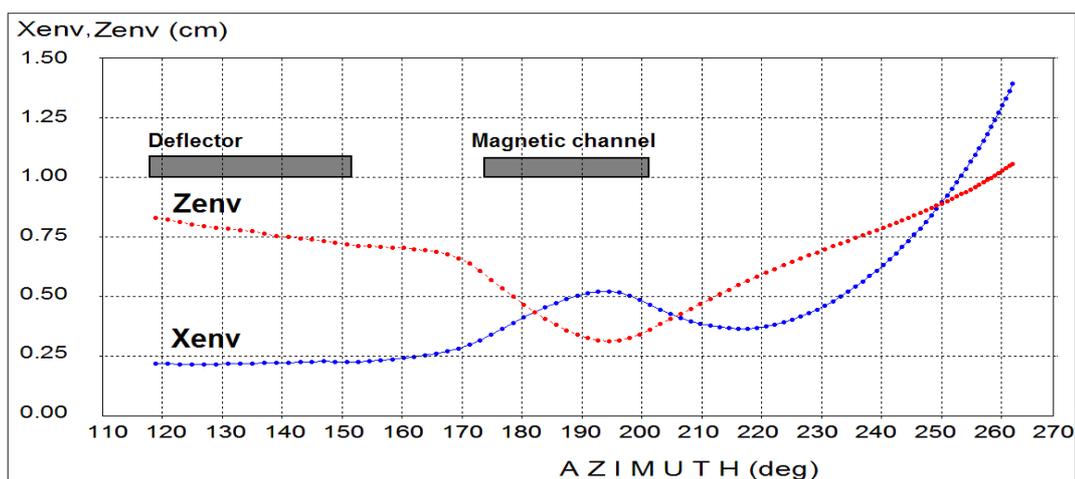


Рис. 5.22. Среднеквадратичные значения ( $2\sigma$ ) горизонтальной ( $X_{env}$ ) и вертикальной ( $Z_{env}$ ) огибающих пучка при прохождении дефлектора, магнитного канала и участка дрейфа до первой фокусирующей линзы канала транспортировки.

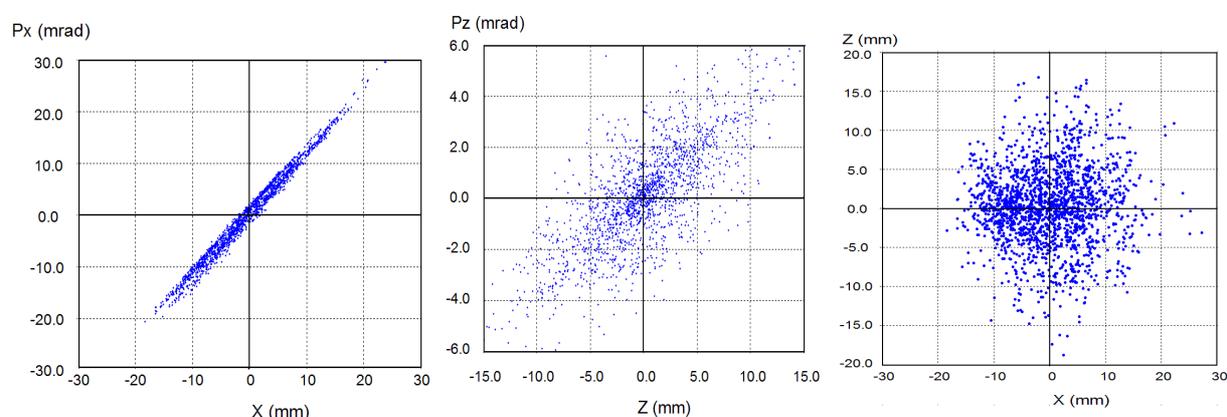


Рис. 5.23. Параметры выведенного пучка на разных плоскостях в точке сопряжения с каналом транспортировки пучка.

## Заключение

Сформированное магнитное поле ДЦ-110 обеспечивает ускорение ионов с фазовым дрейфом в пределах  $\pm 3^\circ$  ВЧ.

Использование фальш-канала в структуре магнитной системы позволяет достичь проектной энергии выведенного пучка 2,5 МэВ/нуклон.

Эффективность вывода ионов составляет 75%, практически все потери ионов происходят на септуме дефлектора.

## 5.5. Высокочастотная система циклотрона

В изохронном циклотроне ДЦ-110 для получения ускоряющего напряжения на дуантах применяется резонансная система, состоящая из следующих узлов [44, 45, 84]:

- два диаметрально противоположно расположенных четвертьволновых коаксиальных резонатора – стальные баки, плакированные внутри медью,
- два медных  $40^\circ$  дуанта,
- две сборки антидуантов, расположенных в долинах циклотрона,
- петля связи, передающая высокочастотную энергию от генератора в резонансную систему,
- ручной механизм перемещения закорачивающей пластины,
- триммер автоматической подстройки резонансной частоты.

Схема резонатора ДЦ-110 приведена на рисунке 5.24. Основные характеристики высокочастотной системы показаны в таблице 5.9.

Таблица 5.9. Общие характеристики ВЧ системы.

Резонансная частота резонаторов в холодном режиме	7,494 – 7,806 МГц
Гармоника ускорения	2
Номинальное положение закоротки от центра циклотрона	3760 мм
Нагруженная добротность резонатора	2000
Напряжение на дуанте	55 кВ
Расчетная ВЧ мощность возбуждения одного резонатора	4,3 кВт
Максимальная плотность тока на штоке	32 А/см
Диапазон подстройки частоты триммером АПЧ	100 кГц (0,1%)
Максимальна мощность ВЧ генератора	20 кВт

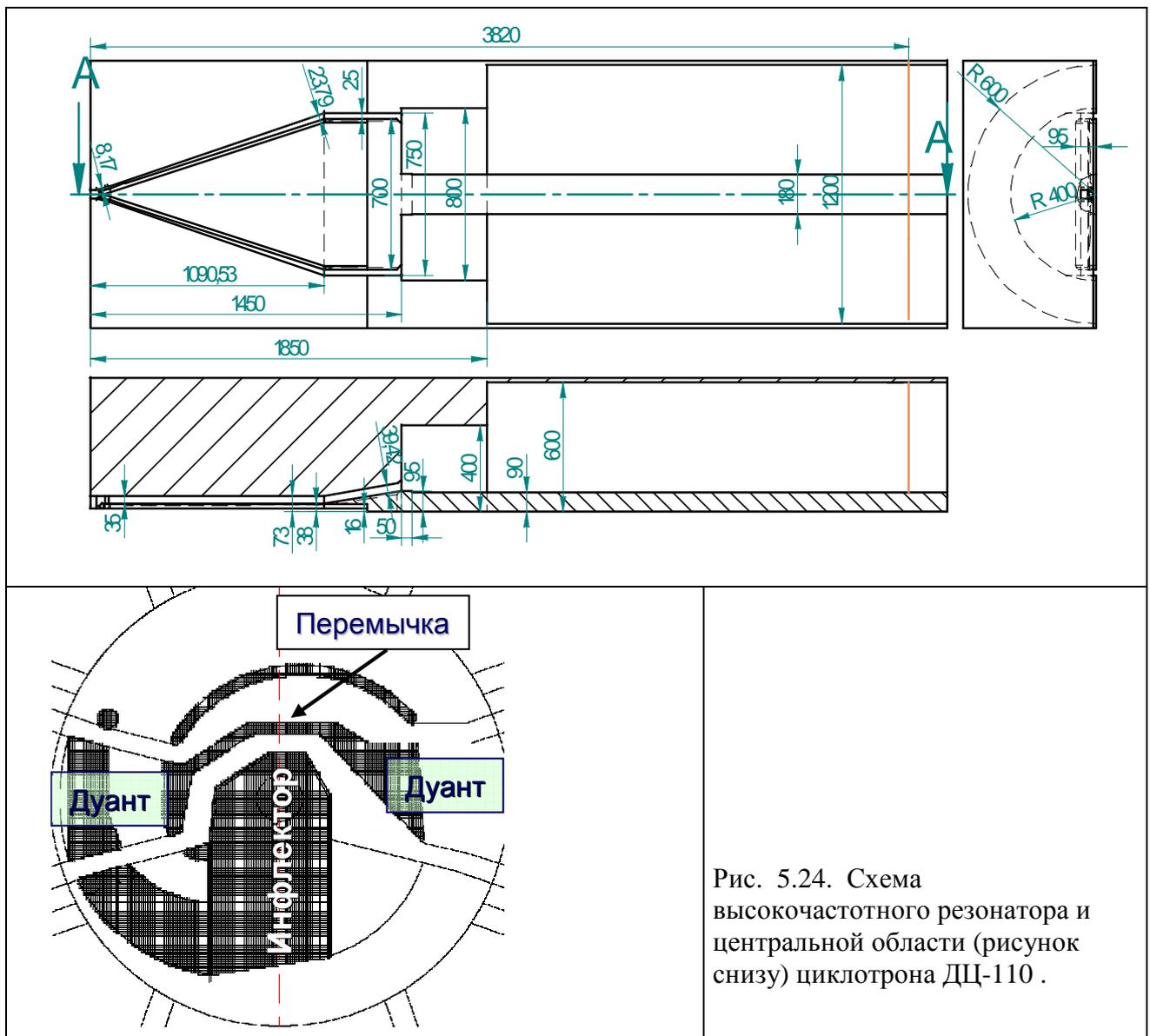


Рис. 5.24. Схема высокочастотного резонатора и центральной области (рисунок снизу) циклотрона ДЦ-110 .

В период настройки ВЧ системы было произведено измерение диапазона перестройки частоты резонатора закорачивающей пластиной в разных режимах: при включении магнита циклотрона и включении откачки вакуумной камеры. Результаты приведены в таблице 5.10. Смещение частоты составляет 20 кГц при включенном магните и откачанной вакуумной системе.

Таблица 5.10. Диапазон перестройки частоты резонатора закорачивающей пластиной в разных режимах циклотрона.

Частота, МГц	7.620	7.630	7.640	7.650	7.660	7.670	7.680	7.690	7.700	7.710	7.720	7.730
				<b>№1</b> ток ЭМЦ = 0А; атмосфера								
			<b>№2</b> ток ЭМЦ = 980А; атмосфера									
		<b>№3</b> $3,0 \times 10^{-7}$ ; ток ЭМЦ = 0А										
		<b>№4</b> $3,0 \times 10^{-7}$ ; ток ЭМЦ = 980А;										

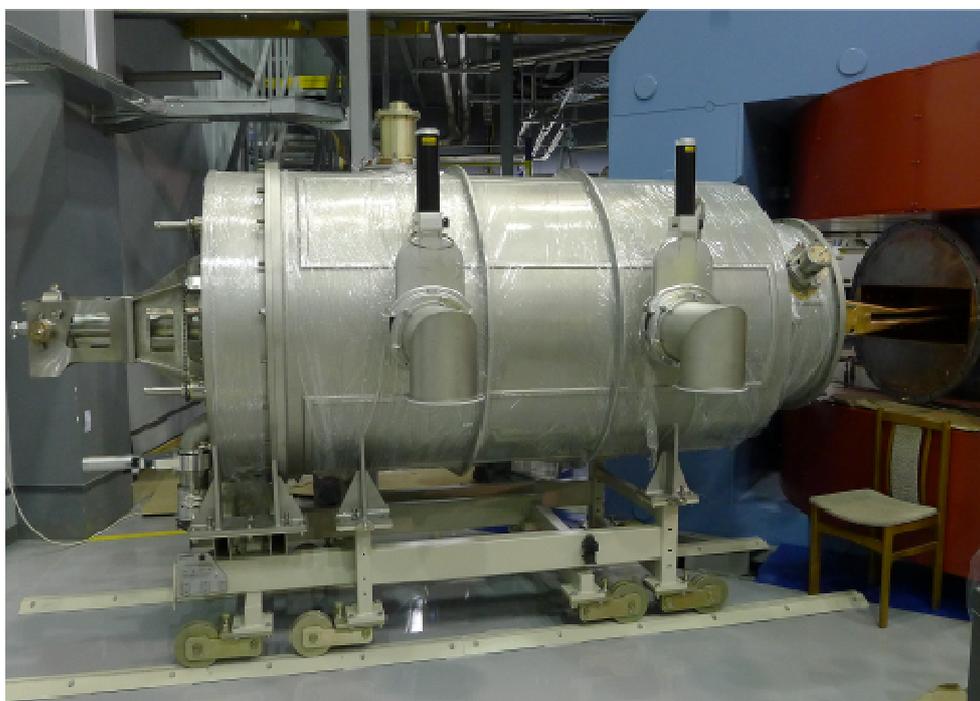


Рис. 5.25. Высокочастотный резонатор ДЦ-110.

## 5.6. Каналы пучков и установка для облучения полимерной пленки

Циклотронный комплекс ДЦ-110 комплектуется одним каналом для транспортировки пучков ускоренных ионов (рис.5.26), с возможностью установки коммутирующего магнита и монтажа второго канала. Элементы канала обеспечивают равномерное облучение тяжелыми ионами поверхности движущейся пленки шириной до 600 мм [44, 45, 84, 187].

В состав канала транспортировки пучка входят:

- начальный участок ионпровода,
- специализированный канал, укомплектованный соответствующим оборудованием для облучения полимерных пленок,
- установка для облучения полимерных пленок.

Ионопровод состоит из начального участка с апертурой  $\varnothing$  100 мм и ионопровода специализированного канала, выполненного в виде расширяющегося конуса до размера 300×700 мм.

Ионно-оптическая система канала облучения полимерных материалов состоит из трех квадрупольных линз, трех корректирующих магнитов и системы сканирования [187].

Горизонтальная система сканирования пучков тяжелых ионов создана на базе магнита, питающегося пилообразным током, вертикальное сканирование осуществляется электростатическим дефлектором с пилообразным напряжением. Мишень в канале облучения полимерных материалов находится на расстоянии около 10 м от системы сканирования, размер максимальной области облучения в позиции мишени составляет 300×700 мм. Расчетный размер пучка ионов на мишени при выключенной системе сканирования составляет около  $\varnothing$ 80 мм.

Рабочие частоты генераторов развертки:

- горизонтальная частота сканирования с использованием магнита  $f_x \approx 100$  Гц,
- вертикальная частота сканирования с использованием электростатики  $f_y \approx 2000$  Гц.

Управление амплитудой сканирования, блокировкой системы сканирования и контроль параметров осуществляются с пульта управления ускорителем.

Для контроля параметров пучка в блоках диагностики установлены цилиндры Фарадея (ЦФ) и профилометры, измеряющие интенсивность выведенного пучка ионов и пространственное положение пучка в сечении ионопровода.



Рис.5.26. Циклотрон ДЦ-110 и канал транспортировки пучка ускоренных ионов.

Канал циклотрона ДЦ-110 комплектуется специализированной установкой (рис.5.27), предназначенной для однородного облучения тяжелыми ионами полимерной пленки, перемещающейся в зоне облучения со скоростью от 0,05 до 1,0 м/с. Полимерные пленки могут быть полиэтилентерефталатные, поликарбонатные, полиимидные или другие аналогичные по механическим свойствам пленочные материалы, имеющие модуль упругости 2-5 ГПа и прочность на разрыв не ниже 100 МПа. Плотность полимеров находится в пределах от 900 до 1500 кг/м<sup>3</sup>. Ширина пленок может варьироваться в пределах от 200 до 600 мм, толщина от 10 до 30 мкм.

Установка для облучения полимерной пленки комплектуется секцией диагностики ионного пучка для контроля интенсивности и пространственного распределения сканируемого ионного пучка по сечению ионопровода в процессе облучения [44, 45, 187]. Система сканирования обеспечивает:

- облучение стационарной мишени размерами 600×200 мм с однородностью распределения частиц по облучаемой площади не хуже  $\pm 10\%$ ,
- облучение движущейся пленки шириной до 600 мм со скоростью от 0,05 до 1 м/сек. Однородность распределения частиц по ширине зоны облучения не хуже  $\pm 10\%$ .



Рис. 5.27. Канал транспортировки пучка и установка для облучения полимерной пленки.

## 5.7 Вакуумная система ускорительного комплекса

Вакуумная система циклотронного комплекса [44, 45, 84] состоит из:

- системы откачки камеры циклотрона и двух высокочастотных резонаторов общим объемом ~3500 литров, средства откачки: 2 криогенных и 8 турбомолекулярных насосов с суммарной скоростью откачки 13300 литров в секунду,
- системы откачки канала аксиальной инъекции пучка и ионного источника: 2 криогенных и 3 турбомолекулярных насоса с суммарной скоростью откачки 6450 литров в секунду,
- системы откачки канала транспортировки пучка: 9 турбомолекулярных насосов с суммарной скоростью откачки 4150 л/сек,
- системы откачки установки облучения пленки: 2 турбомолекулярных насоса с суммарной скоростью откачки 1000 л/сек и 2 криогенные панели Policold с суммарной скоростью откачки 70 000 л/сек по водяным парам

Требования к вакуумной системе определяются главным образом потерями ионов из-за перезарядки на остаточном газе.

## 5.7.1 Расчет требований и основных параметров вакуумной системы циклотрона ДЦ-110

### Расчет вакуумных потерь ионов в процессе ускорения

Для циклотрона ДЦ-110 был выполнен расчет потерь ионов  $^{40}\text{Ar}^{6+}$ ,  $^{86}\text{Kr}^{13+}$  и  $^{132}\text{Xe}^{20+}$  из-за перезарядки на остаточном газе для выработки основных требований к вакуумной системе циклотрона [44, 84].

Ионы  $^{132}\text{Xe}^{20+}$  имеют наиболее высокое сечение перезарядки на молекулах остаточного газа. Потери ионов ксенона являются главным критерием при формулировке требований к вакуумной системе ДЦ-110. Потери ионов  $^{86}\text{Kr}^{13+}$  и  $^{40}\text{Ar}^{6+}$  в несколько раз меньше. На рисунке 5.28 показана оценка эффективности прохождения пучков ионов  $^{40}\text{Ar}^{6+}$ ,  $^{86}\text{Kr}^{13+}$  и  $^{132}\text{Xe}^{20+}$  при ускорении в зависимости от среднего давления в камере циклотрона.

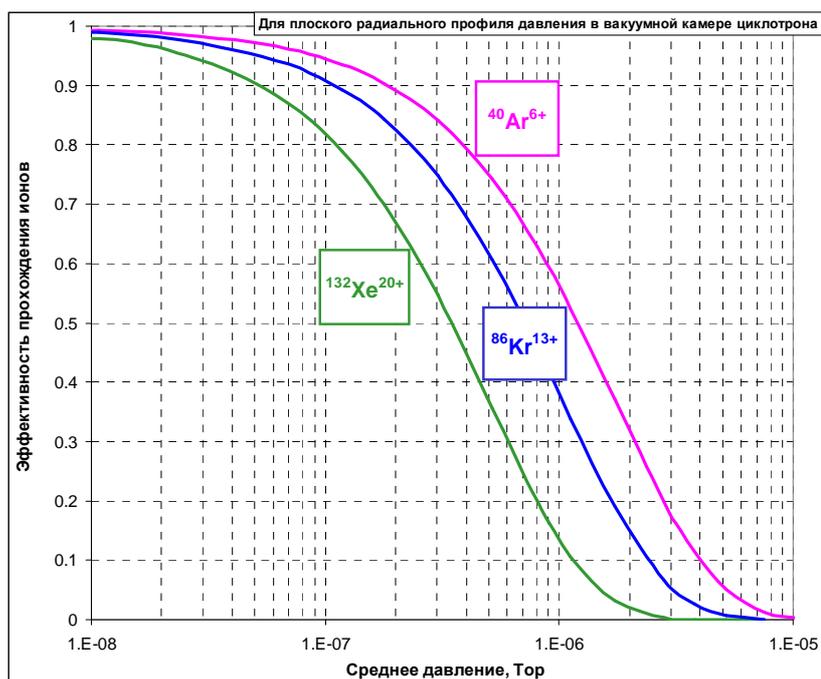


Рис. 5.28. Эффективности прохождения ускоряемых пучков ионов  $^{40}\text{Ar}^{6+}$ ,  $^{86}\text{Kr}^{13+}$  и  $^{132}\text{Xe}^{20+}$  (до энергии 2,5 МэВ/нуклон) в зависимости от среднего давления остаточного газа в камере циклотрона (для равномерного распределения давления).

### Расчет основных параметров вакуумной системы канала аксиальной инжекции циклотрона ДЦ-110

Схема канала аксиальной инжекции показана на рисунке 5.29 (стрелками показано положение криогенных и турбомолекулярных насосов, указаны номинальные скорости откачки насосов).

Основные расчетные параметры:

Длина траектории ионов от ECR-источника до центра циклотрона	4,9 м
Удельная скорость газоотделения с поверхности, $q$	$(1-3) \cdot 10^{-9}$ Торр·л/(с·см <sup>2</sup> )
Газовый поток из ECR источника, $Q_{\text{ECR}}$	$(3-10) \cdot 10^{-5}$ Торр·л/с
Газовый поток стимулированной десорбции $Q_{\text{десорбции}}$	$(1-3) \cdot 10^{-5}$ Торр·л/с

Результаты расчетов эффективности прохождения пучков ионов  $^{40}\text{Ar}^{6+}$ ,  $^{86}\text{Kr}^{13+}$  и  $^{132}\text{Xe}^{20+}$  в канале аксиальной инжекции (с протяженностью траектории ионов 4,9 м) в зависимости от среднего давления остаточного газа в канале аксиальной инжекции представлены на рисунке 5.30.

Требования к уровню рабочего вакуума в канале аксиальной инжекции определяют, прежде всего, потери ионов  $^{132}\text{Xe}^{20+}$ . Допустимые на уровне  $\sim 7\%$  потери ионов  $^{132}\text{Xe}^{20+}$  вызывают необходимость обеспечить среднее давление в канале инжекции на уровне  $\sim 1,5 \cdot 10^{-7}$  Торр.

Расчеты распределения давления вдоль канала инжекции показывают (рис. 5.31), что такой рабочий вакуум (для предельных уровней газовых нагрузок: при газовом потоке из ECR источника  $Q_{\text{ECR}} \sim 1 \cdot 10^{-4}$  Торр-л/с, стимулированной десорбции  $Q_{\text{десорбции}} \sim 3 \cdot 10^{-5}$  Торр-л/с и удельной скорости газоотделения с поверхности  $q \sim 3 \cdot 10^{-9}$  Торр-л-с $^{-1}$ -см $^{-2}$ ) обеспечивают следующие средства высоковакуумной откачки (см. рис. 2.1):

- на посту откачки в блоке диагностики IBE – криогенный насос НВК 160-0,8 (с номинальной скоростью откачки по азоту и воде, соответственно, 800 и 1700 л/с) и турбомолекулярный насос ВВ-150 (со скоростью откачки по азоту или воде 150 л/с);
- на камере анализирующего магнита IM90 – турбонасос ВВ-150;
- на посту откачки в блоке диагностики IB1 – криогенный насос НВК 160-0,8.

На насосы, откачивающие вакуумную камеру циклотрона, придется незначительная дополнительная нагрузка – менее 15 л/с по азоту при потоке газа из канала инжекции в циклотрон  $Q_{\text{в циклотрон}} \sim 2 \cdot 10^{-6}$  Торр л/с.

Таким образом, среднее давление в канале аксиальной инжекции составит около  $1,5 \cdot 10^{-7}$  Торр. Эффективности прохождения ионов, обусловленные перезарядкой ионов на остаточном газе, при этом будут вполне приемлемы:  $\sim 93\%$  для ксенона  $^{132}\text{Xe}^{20+}$ ,  $\sim 96\%$  для криптона  $^{86}\text{Kr}^{13+}$  и  $\sim 98\%$  для аргона  $^{40}\text{Ar}^{6+}$ .

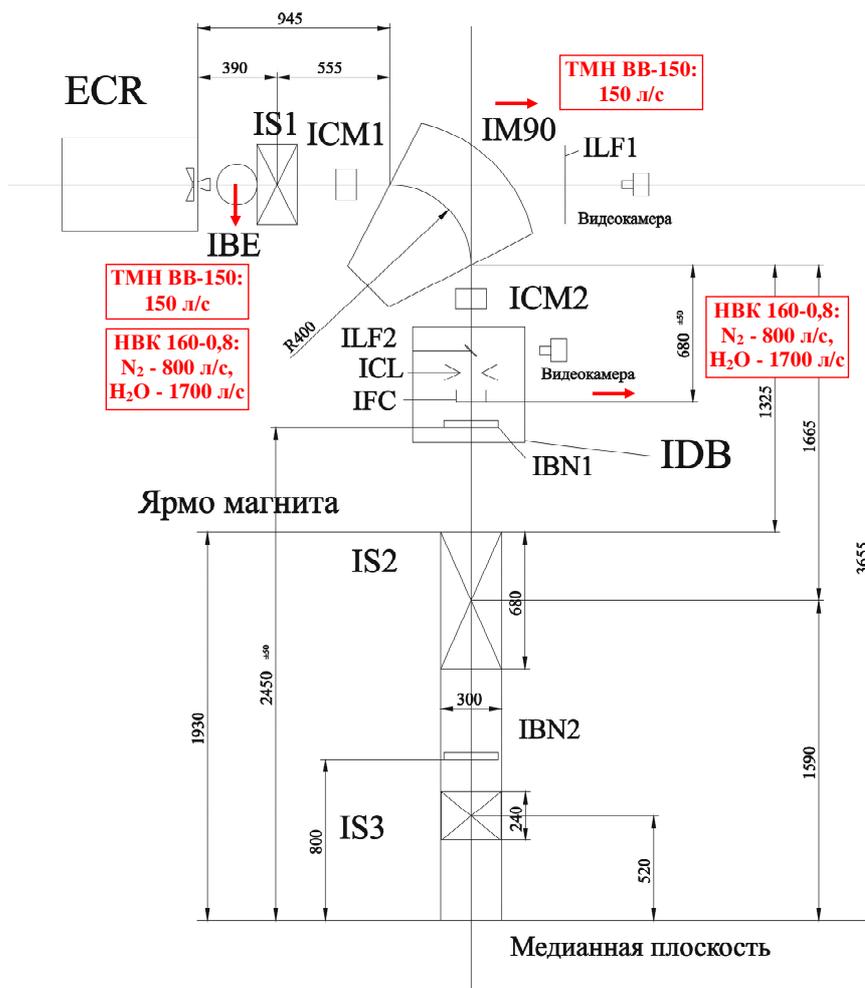


Рис. 5.29. Схема канала аксиальной инжекции циклотрона ДЦ-110 (стрелками показано положение криогенных и турбомолекулярных насосов и скорости их откачки).

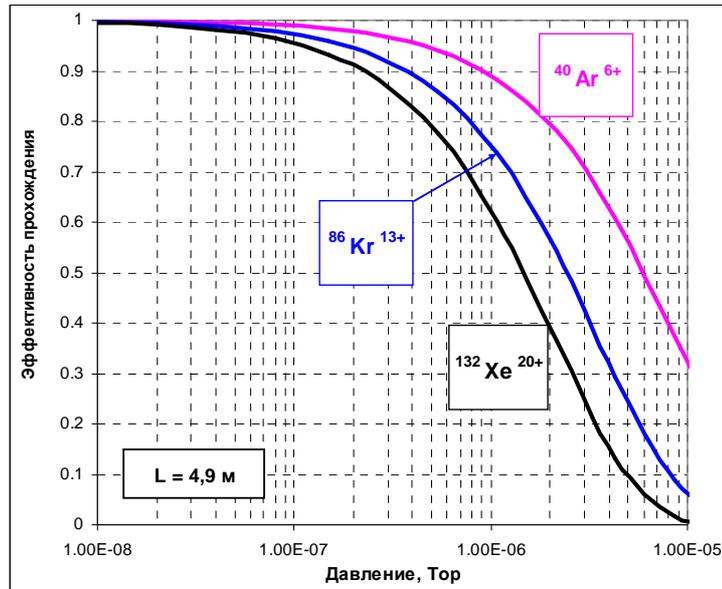


Рис. 5.30. Эффективности прохождения пучка ионов  $^{40}\text{Ar}^{6+}$ ,  $^{86}\text{Kr}^{13+}$  и  $^{132}\text{Xe}^{20+}$  в канале аксиальной инжекции (длина траектории ионов 4,9 м) в зависимости от среднего давления в ионопроводе.

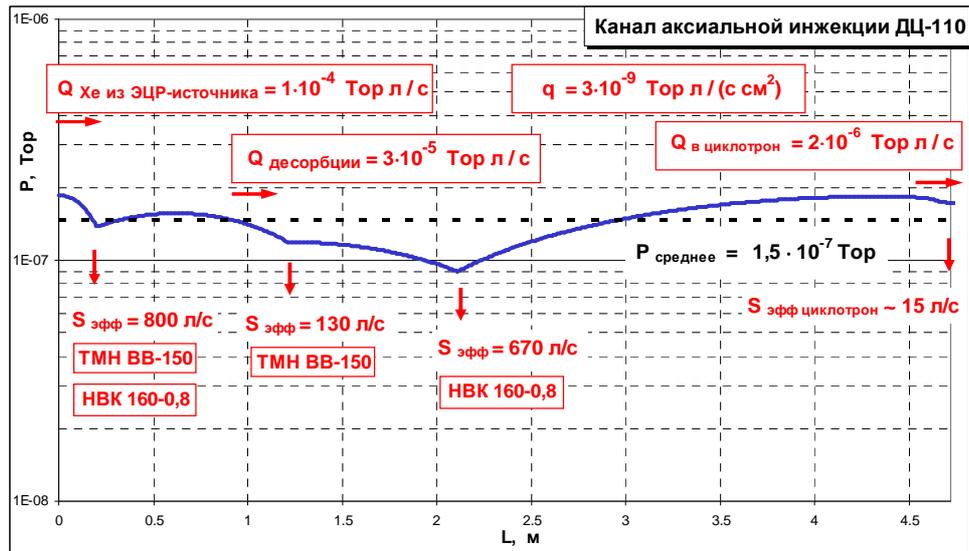


Рис. 5.31. Распределение давления в канале аксиальной инжекции, эффективные скорости откачки насосов по азоту 800 л/с, 130 л/с и 670 л/с. На насосы, откачивающие вакуумную камеру циклотрона, приходится дополнительная нагрузка около 15 л/с (при потоке в циклотрон  $Q_{\text{в циклотрон}} \sim 2 \cdot 10^{-6}$  Торр л / с), среднее давление в канале  $P_{\text{сред}} \sim 1,5 \cdot 10^{-7}$  Торр.

### Расчет основных параметров вакуумной системы канала транспортировки ускоренных пучков

Основную газовую нагрузку в канале облучения полимерной пленки создает поток газа с поверхности пленки при перематке, который составляет примерно 0,5-1,0 Торр·л/с. Канал транспортировки пучков к установке облучения пленки имеет длину 21 м.

Из расчетов вакуумных потерь при транспортировке ионов видно, что в ионопроводе необходимо поддерживать среднее давление на уровне  $(3-7) \cdot 10^{-6}$  Торр (рис. 5.32.).

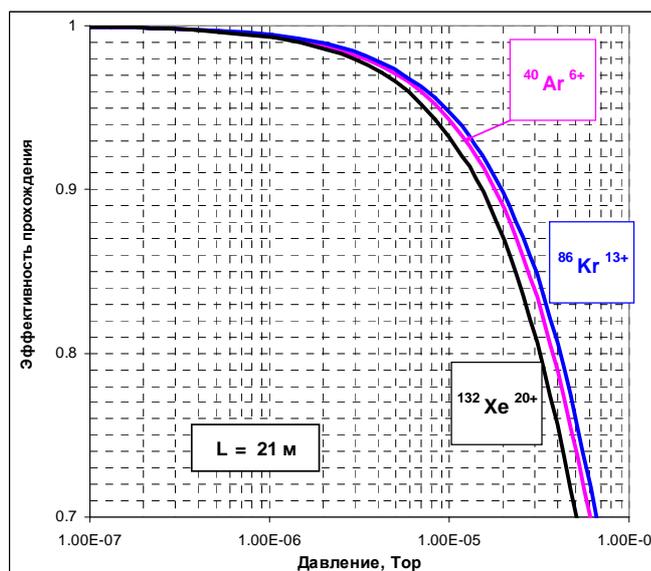


Рис. 5.32. Эффективности прохождения ионов  $^{40}\text{Ar}^{6+}$ ,  $^{86}\text{Kr}^{13+}$  и  $^{132}\text{Xe}^{20+}$  с энергией 2,5 МэВ/нуклон в канале ускоренных пучков протяженностью 21 м в зависимости от среднего давления в ионопроводе.

Для получения необходимого вакуума в канале транспортировки применена схема с распределенными средствами откачки (рис.5.33.) Расчет распределения давления в канале ускоренных пучков для облучения пленки показывает, что такой вакуум ( $P_{\text{сред.}} \sim 3,4 \cdot 10^{-6}$  Торр) обеспечивают следующие криогенные и турбомолекулярные насосы (рис. 5.34): криогенные модули POLICOLD с суммарной скоростью откачки 70000 л/с, а также ТМН серии ВВ-150 с номинальной скоростью откачки 150 л/с и десять ТМ насосов серии ВВ-500 (500 л/с). На рисунке указаны эффективные скорости откачки насосов и их местоположение. На насосы, откачивающие вакуумную камеру циклотрона, приходится дополнительная нагрузка около  $S_{\text{эфф}} = 15$  л/с (вследствие потока газа в камеру циклотрона из ионопровода  $\sim 3 \cdot 10^{-6}$  Торр·л/с).

Таким образом, среднее давление в канале ускоренных пучков может поддерживаться на уровне  $\sim 3,4 \cdot 10^{-6}$  Торр. Вакуумные потери ионов  $^{40}\text{Ar}^{6+}$ ,  $^{86}\text{Kr}^{13+}$  и  $^{132}\text{Xe}^{20+}$  при данном вакууме в канале не будут превышать 3%.

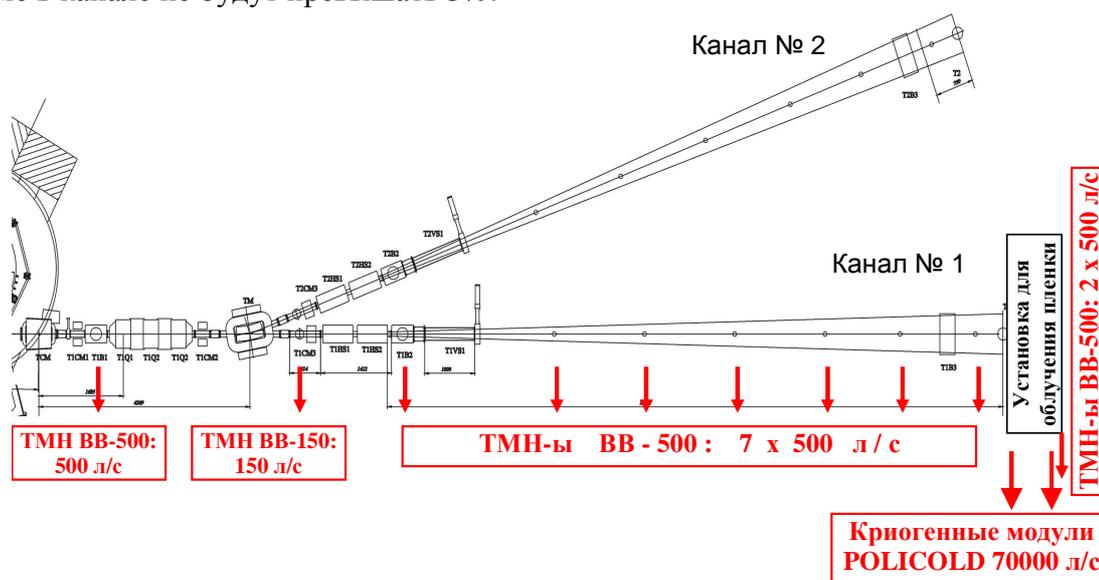


Рис. 5.33. Схема каналов транспортировки ускоренных пучков на установки для облучения полимерной пленки (стрелками показано положение криогенных и турбомолекулярных насосов, указаны номинальные скорости откачки насосов).

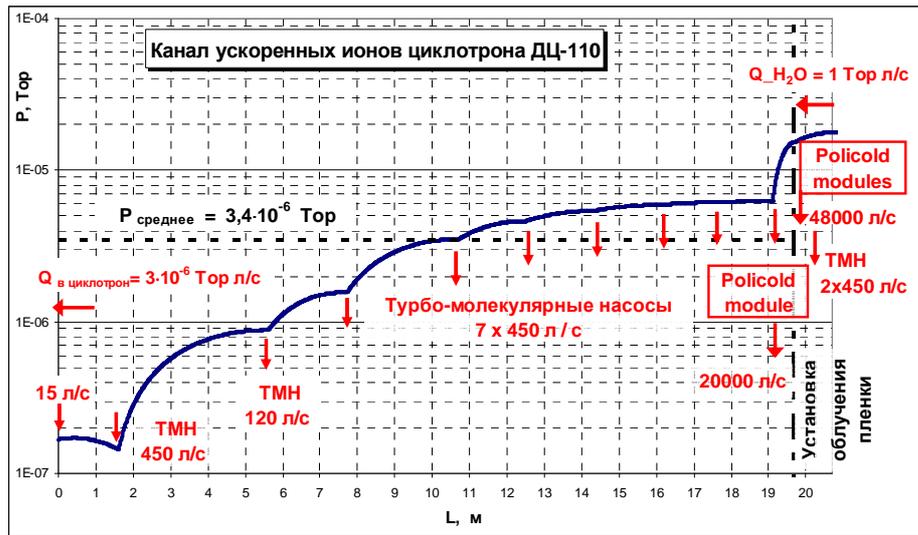


Рис. 5.34. Распределение давления в канале облучения полимерной пленки при указанных эффективных скоростях откачки вакуумных насосов, среднее давление в канале  $\sim 3,4 \cdot 10^{-6}$  Торр, газовый поток паров воды с мишени  $\sim 1$  Торр-л/с; на насосы вакуумной камеры циклотрона приходится дополнительная нагрузка  $\sim 15$  л/с вследствие газового потока из ионопровода  $Q \sim 3 \cdot 10^{-6}$  Торр-л/с.

### 5.7.2 Экспериментальные параметры вакуумной системы.

На мониторе пульта управления циклотрона показывается состояние вакуумной системы циклотрона в виде мнемосхем по подсистемам, на которых видны положение вакуумных насосов, а также положение и показания датчиков давления, а также отражены параметры систем вакуумной откачки камеры циклотрона. На рисунке 5.35 в качестве примера показана мнемосхема подсистемы вакуумной камеры циклотрона ДЦ-110. В таблице 5.11 показан проектный и полученный вакуум в камере циклотрона ДЦ-110 в ходе пуска наладочных работ. График выхода на рабочий режим приведен на рис. 5.36.

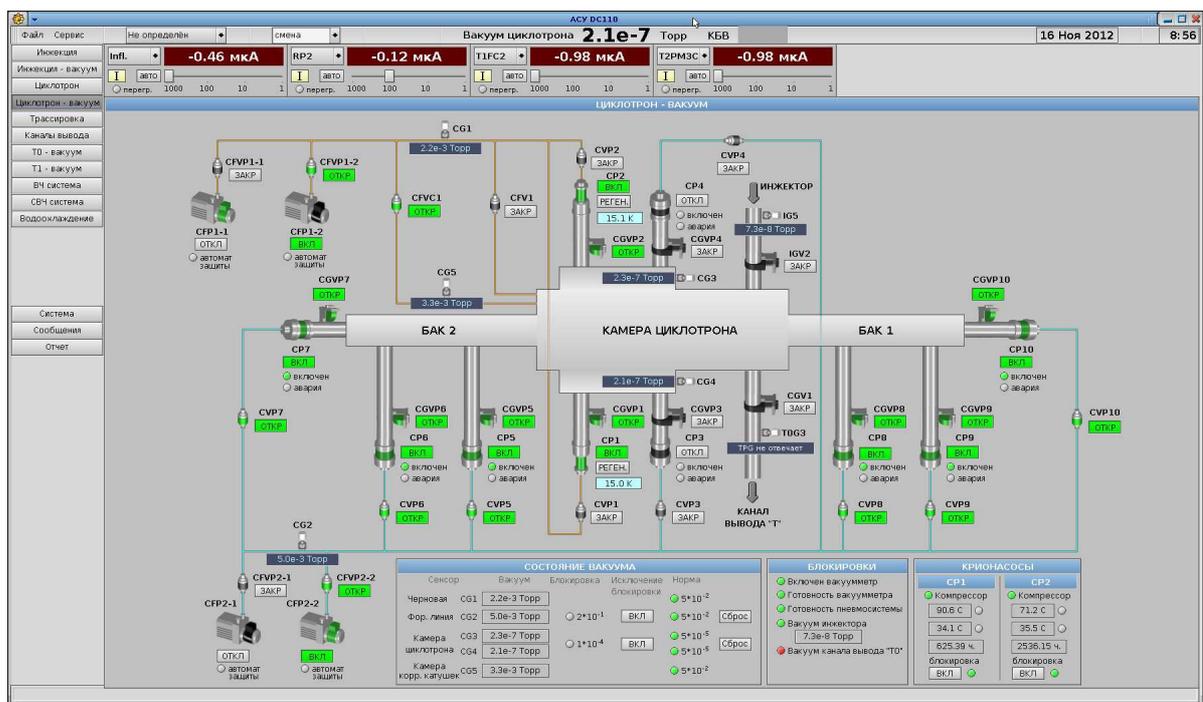


Рис. 5.35. Схема откачки вакуумной камеры циклотрона ДЦ-110. Указаны места расположения насосов (СР1-СР10), положения и показания датчиков давления (СГ1-СГ5).



Рис. 5.36. Зависимость давления от времени при откачке вакуумной камеры циклотрона от атмосферы до рабочего вакуума.

Таблица 5.11. Проектный и полученный вакуум в циклотроне ДЦ-110.

	Требуемый	Полученный
Канал инжекции	$1 \cdot 10^{-7}$ Торр	$1,1 \cdot 10^{-7}$ Торр
Камера циклотрона	$(1-2) \cdot 10^{-7}$ Торр	$1,7 \cdot 10^{-7}$ Торр (в статическом режиме) $2,7 \cdot 10^{-7}$ Торр (в рабочем режиме, с пучком)
Канал ионов высокой энергии	$5 \cdot 10^{-6}$ Торр	$2 \cdot 10^{-7}$ Торр (в статическом режиме)

## 5.8 Режимы работы циклотрона и ускоренные ионы

### 5.8.1 Коррекция вертикального положения пучка в системе вывода из циклотрона

На начальном этапе наладки ускорителя было обнаружено вертикальное смещение пучка на конечном радиусе ускорения и в процессе вывода. Основной причиной такого смещения явилась радиальная компонента магнитного поля в средней плоскости магнита, возникшая из-за асимметрии магнитопровода.

Коррекция вертикального смещения пучка проведена за счет несимметричного включения катушек основной обмотки электромагнита ДЦ-110 [186].

### Экспериментальное исследование положения и размеров пучка в проектном варианте (при симметричном включении обмотки магнита циклотрона.).

Исследования положения и размеров пучка в процессе вывода выполнены на пучке  $^{136}\text{Xe}^{20+}$  интенсивностью 2,5 мкА.

Рисунок 5.37 показывает смещение орбиты пучка на входе в дефлектор вверх от медианной плоскости. Величина смещения равна 3 мм. На выходе из магнитного канала смещение достигает 5 мм, из-за дефокусирующего действия градиента магнитного поля канала, увеличивающего отклонение пучка по вертикали. На люминофоре, установленном на начальном участке ионопровода, зарегистрировано отклонение пучка вверх на 16 мм (рис.5.38). Горизонтальный размер пучка на люминофоре приблизительно равен 25 мм, вертикальный – 20 мм.

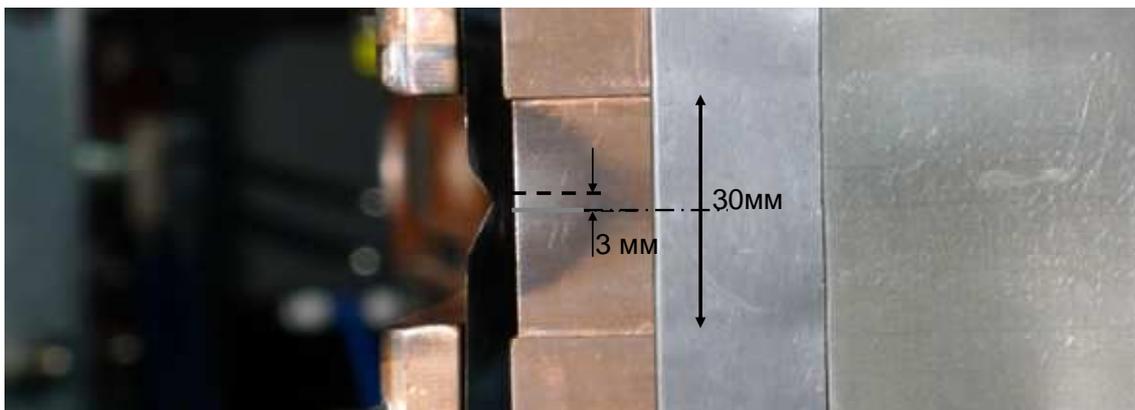


Рис. 5.37. Положение пучка на входе в дефлектор, R=894мм.

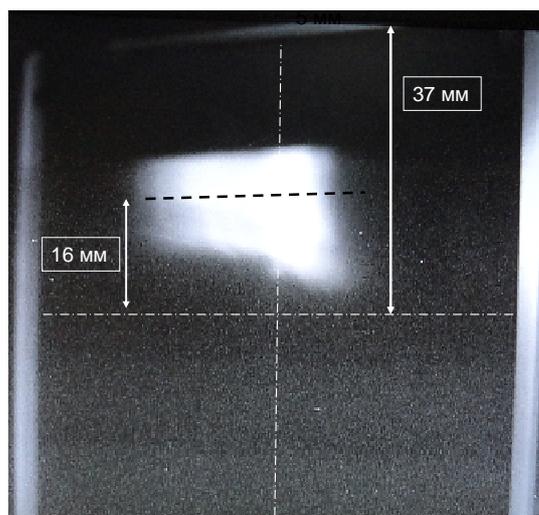


Рис. 5.38. Фотография пучка на люминофоре в выводном патрубке без коррекции положения пучка.

Вертикальное смещение пучка приводит к апертурным потерям, которые наблюдаются на выходе из дуанта, где вертикальная апертура составляет 34 мм. Вертикальная апертура выводного патрубка – 40 мм, на прохождение пучка не влияет. Измеренное вертикальное смещение пучка по траектории вывода из циклотрона показано в таблице 5.12.

Таблица 5.12. Смещение пучка от средней плоскости магнита циклотрона (эксперимент).

Вход в дефлектор R=894мм.	Выход из магнитного канала	Люминофор в начале канала транспортировки
3 мм вверх	5 мм вверх	16 мм вверх

### Численное моделирование влияния асимметрии магнита на движение пучка в зоне вывода из циклотрона.

Для оценки влияния асимметрии аксиального канала на магнитное поле построена электронная 3D модель циклотрона ДЦ-110. Модель, показанная на рис. 3, представляет ¼ часть магнита циклотрона ДЦ-110 с асимметричным аксиальным каналом. Расчеты магнитного поля проводились при помощи программы TOSCA.

Элементом асимметрии магнита ДЦ-110 является аксиальный канал в балках и полюсах магнита. На рисунке 5.39 показано, что аксиальный канал в нижнем полюсе магнита заполнен железом, в то время как верхний канал свободен для установки системы аксиальной инжекции.



Рис. 5.39. Модель ¼ части магнита циклотрона ДЦ-110 с асимметричным аксиальным каналом (асимметричная часть выделена темным цветом).

Результаты проведенных расчетов показали, что аксиальная асимметрия магнита циклотрона ДЦ-110 приводит к появлению радиальной компоненты магнитного поля  $B_r$  в средней плоскости магнита. Так как магнит циклотрона ДЦ-110 имеет четырехсекторную структуру, то помимо среднего значения радиальной компоненты  $\langle B_r \rangle$  появляются ее четные гармоники, и прежде всего четвертая  $B_{r4}$ , (рис.5.40). Основное вертикальное смещение пучка вызывает радиальная компонента магнитного поля ( $\langle B_r \rangle = 7,7 \text{ Гс}$ ) на радиусе вывода  $R_{\text{ext}} = 0,89 \text{ м}$ .

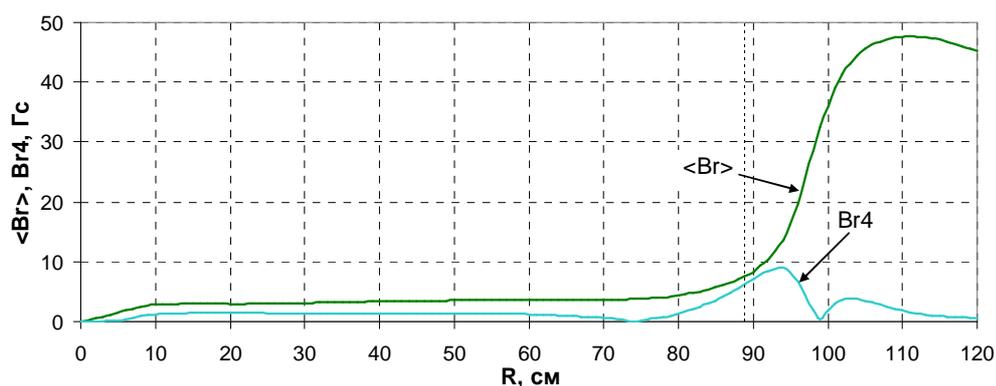


Рис. 5.40. Среднее значение  $\langle B_r \rangle$  и четвертая гармоника  $B_{r4}$  радиальной компоненты магнитного поля в медианной плоскости магнита.

По расчету отклонение пучка от средней плоскости циклотрона составляет  $\Delta Z \approx 2,8 \text{ мм}$ . В дальнейшем это смещение усиливается в магнитном канале, что приводит к апертурным потерям выведенного пучка в канале транспортировки. Оценку воздействия градиента магнитного поля на вертикальное смещение пучка можно сделать по формуле:

$$\Delta Z' = \frac{GL}{B\rho} \Delta Z_0 \quad (4)$$

Экспериментальное и расчетное смещение пучка от средней плоскости магнита циклотрона в проектном варианте приведено в таблице 5.13.

Таблица 5.13. Смещение пучка от средней плоскости в проектном варианте.

	Вход в дефлектор R=894 мм.	Люминофор в начале канала транспортировки
Эксперимент	3 мм вверх	16 мм вверх
Оценочный расчет	2,8 мм вверх	17 мм вверх

### **Компенсация вертикального смещения пучка путем шунтирования одной из секций катушки электромагнита.**

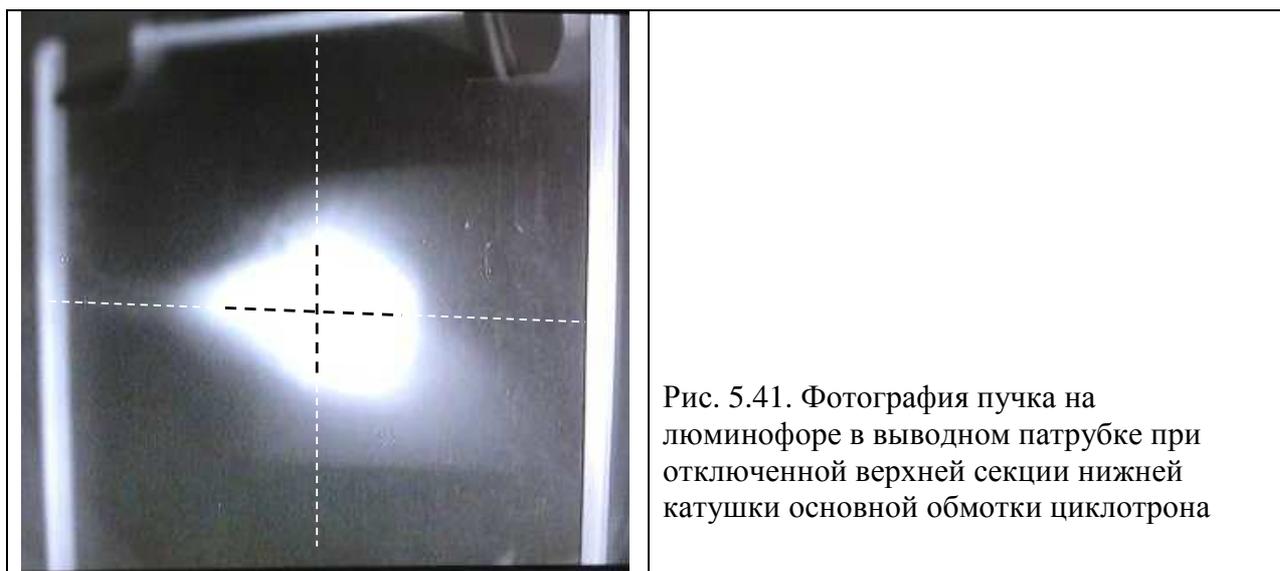
Коррекция вертикального смещения пучка проведена за счет несимметричного включения катушек основной обмотки электромагнита ДЦ-110.

#### *Параметры основной обмотки циклотрона ДЦ-110*

Основная обмотка циклотрона ДЦ-110 состоит из верхней и нижней катушек. Расстояние между катушками 990 мм. Поперечные размеры катушек 730х600 мм. В каждой катушке 180 витков. Проводник - алюминиевая труба квадратного сечения 46х46 мм с отверстием для охлаждающей воды  $\varnothing 20$  мм. Каждая катушка состоит из 6 отдельных секций по 30 витков в каждой. В экспериментах по коррекции вертикального смещения пучка использовалась возможность шунтирования или полного отключения отдельно взятой секции.

На аксиально-симметричной модели магнита циклотрона расчетным путем было проведено исследование радиальной компоненты магнитного поля, возникающей при полном или частичном (путем шунтирования) отключении секции нижней катушки основной обмотки электромагнита.

Вариант коррекции вертикального положения пучка на выводе из циклотрона ДЦ-110 с помощью полного отключения верхней секции нижней катушки основной обмотки принят как рабочий. В этом случае пучок идет по оси ионопровода без вертикального угла отклонения. Это видно по люминофору в патрубке вывода (рис. 5.41), и профилометру, расположенному в первом блоке диагностики.



### **Заключение.**

Для размещения системы аксиальной инжекции в верхней балке и полюсе магнита циклотрона ДЦ-110 сделано аксиальное отверстие диаметром 270 мм. Нижний полюс магнита такого канала не имеет. Такая асимметрия вызвала появление радиальной компоненты магнитного поля  $B_r$ , что привело к вертикальному смещению пучка на конечном радиусе ускорения на 3 мм. Магнитный канал системы вывода усиливает смещение пучка, в результате на люминофоре в начальной части канала транспортировки смещение достигает 16 мм вверх относительно оси ионопровода.

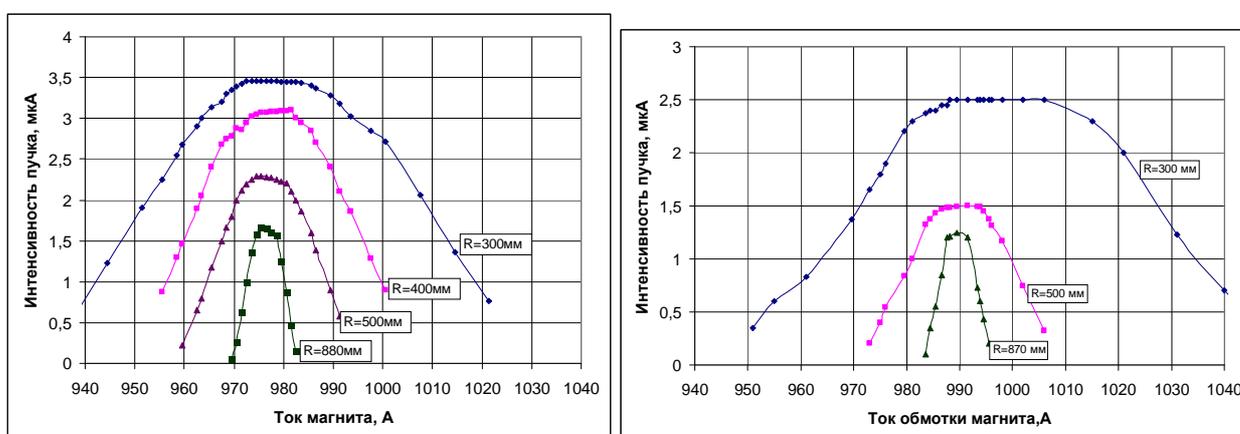
Для компенсации смещения пучка в зоне вывода использован эффект смещения медианной плоскости за счет несимметричного включения верхней и нижней катушек основной обмотки циклотрона. Найден оптимальный вариант компенсации вертикального смещения пучка путем отключения верхней секции нижней катушки. В результате

траектория выведенного пучка совпала с осью ионопровода. Для сохранения рабочего уровня магнитного поля при отключении одной секции ток обмотки был увеличен с 975А до 1087 А.

### 5.8.2. Экспериментальные исследования и оптимизация режима ускорения

На начальном этапе пуско-наладочных работ были изучены резонансные характеристики для того, чтобы найти оптимальный уровень магнитного поля, при котором достигаются минимальные фазовые потери при ускорении пучка ионов [45].

Исследования были проведены на разных частотах ускоряющей системы. В оптимальном режиме резонансные кривые находятся симметрично относительно друг друга. На рисунке 5.42 показана зависимость интенсивности ускоренного пучка ионов  $^{132}\text{Xe}^{20+}$  на разных радиусах при изменении магнитного поля в оптимальном режиме и при изменении частоты ускоряющего поля на 18 кГц.



а) б)

Рис. 5.42. Резонансные зависимости интенсивности ускоренного пучка ионов  $^{132}\text{Xe}^{20+}$  на разных радиусах поля в оптимальном режиме при  $F_{\text{ВЧ}} = 7,730$  МГц (а) и при увеличении частоты на 18 кГц (б).

Изменение частоты на 18 кГц и соответственно резонансного уровня магнитного поля приводит к несимметричному положению резонансных кривых друг относительно друга. В принципе, это не приводит к потере интенсивности на конечном радиусе. Тем не менее, для ускорения ионов  $^{40}\text{Ar}^{6+}$ ,  $^{86}\text{Kr}^{13+}$  и  $^{132}\text{Xe}^{20+}$ , которые имеют небольшое отличие в отношении массы к заряду (6,667, 6,615 и 6,6), было принято решение использовать режим ускорения при фиксированном магнитном поле. Для этого частота ускоряющей системы должна изменяться в соответствии с таблицей 5.14.

Таблица 5.14. Оптимальные значения частоты ВЧ системы и магнитного поля при ускорении ионов  $^{40}\text{Ar}^{6+}$ ,  $^{86}\text{Kr}^{13+}$  и  $^{132}\text{Xe}^{20+}$ .

Ион	(A/Z)	Магнитное поле, Тл	Оптимальная частота ВЧ системы ( $F_{\text{ВЧ}}$ ), МГц	Отличие частоты $\Delta F$ , кГц
$^{40}\text{Ar}^{6+}$	6,6667	1,6612	7,653	23
$^{86}\text{Kr}^{13+}$	6,6154	1,6612	7,712	-18
$^{132}\text{Xe}^{20+}$	6,6	1,6612	7,730	0

Режим ускорения, указанный в таблице 5.14, не требует перестройки каких-либо параметров систем ускорителя при изменении типа ускоряемых ионов, за исключением изменения частоты резонансной системы.

Для пучка ионов аргона, криптона и ксенона измерено падение интенсивности пучка от радиуса ускорения в циклотроне (рис. 5.43). Падение интенсивности пучка при  $R$  больше 890 мм связано с частичным выводом пучка и потерями на септуме дефлектора.

Были измерены зависимости интенсивности пучков на конечном радиусе циклотрона от давления в камере ускорителя (рис. 5.44). Из анализа данных установлено, что потери пучка в процессе ускорения вследствие перезарядки на остаточном газе при давлении  $\sim 2 \cdot 10^{-7}$  Торр составляют для  $^{40}\text{Ar}^{6+}$  - 18%, для  $^{86}\text{Kr}^{13+}$  - 27%, для  $^{132}\text{Xe}^{20+}$  - 44%. Фазовые и апертурные потери оцениваются на уровне 10 % [45].

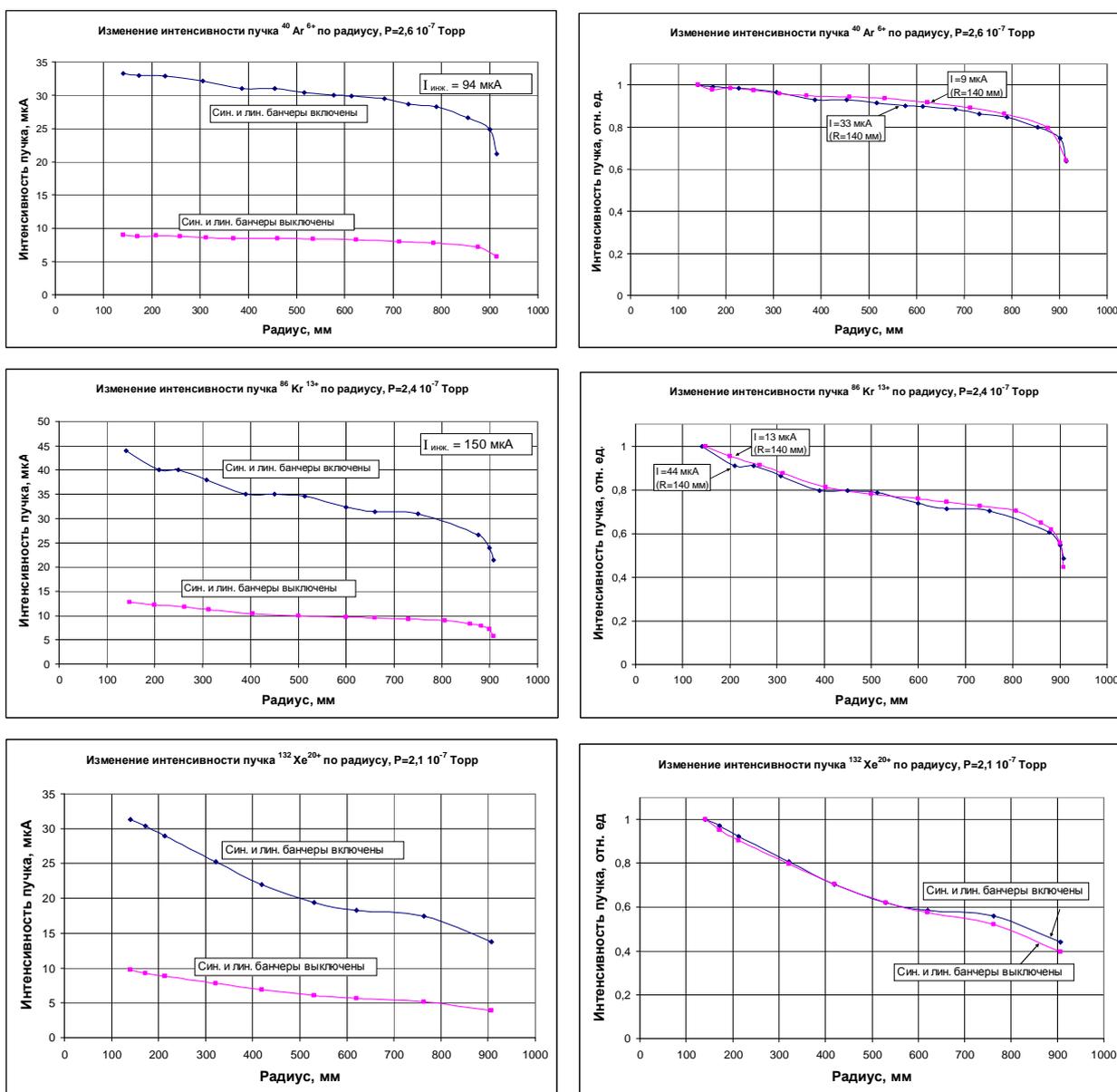


Рис. 5.43. Изменение интенсивности пучков ионов  $^{40}\text{Ar}^{6+}$ ,  $^{86}\text{Kr}^{13+}$  и  $^{132}\text{Xe}^{20+}$  по радиусу в абсолютных (мкА) и относительных единицах при ускорении в циклотроне ДЦ-110.  $P$  – давление в камере ускорителя.

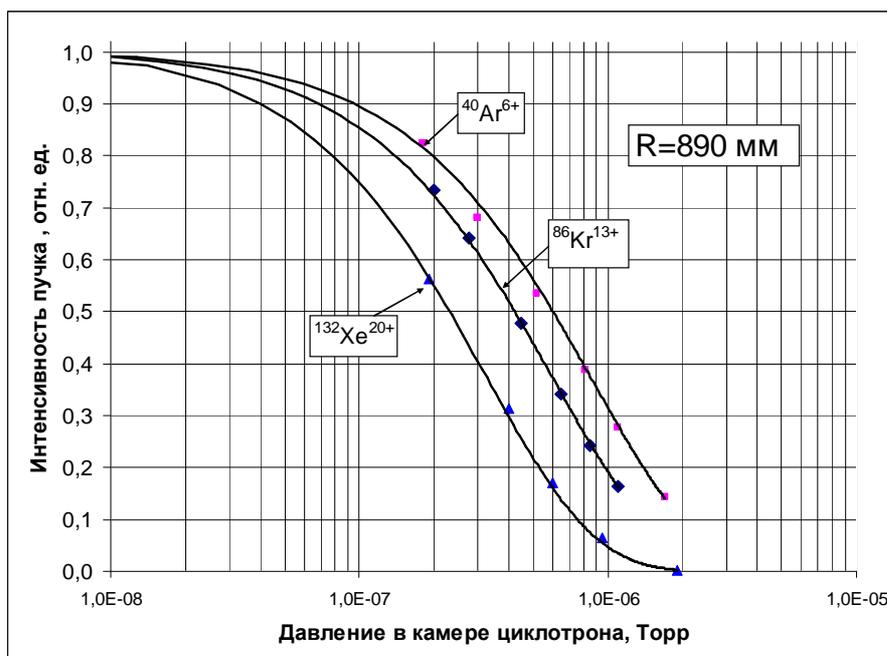


Рис. 5.44. Зависимость прохождения пучка ионов  $^{40}\text{Ar}^{6+}$ ,  $^{86}\text{Kr}^{13+}$  и  $^{132}\text{Xe}^{20+}$  от давления в камере циклотрона ДЦ-110 при ускорении от центра до конечного радиуса – 890 мм.

Фазовый аксептанс циклотрона ДЦ-110 составляет примерно  $30^\circ$ , для увеличения эффективности захвата в ускорение инжектируемого пучка используется система банчировки пучка. В системе аксиальной инжекции пучка циклотрона ДЦ-110 установлены два банчера – линейный, расположенный в 2450 мм от медианной плоскости, и синусоидальный, расположенный в 800 мм от медианной плоскости. Эффективность созданной системы банчировки была экспериментально изучена при разной интенсивности инжектируемого пучка. На рис. 5.45 представлена зависимость интенсивности ускоренного пучка в центре циклотрона на радиусе 200 мм от интенсивности инжектируемого пучка в оптимальных режимах при разной комбинации включения банчеров. Эффективность захвата пучка в ускорение и коэффициент увеличения интенсивности пучка по сравнению с небанчируемым пучком представлены в таблице 5.15 и на рисунке 5.45.

Исследования показали, что эффективность системы банчировки слабо зависит от интенсивности пучка до 100 мкА инжектируемого пучка (34–38% захвата) [45]. Увеличение коэффициента захвата до 48% при токе инжектированного пучка 6 мкА связано не только со снижением влияния пространственного заряда в пучке, но и, главным образом, с уменьшением эмиттанса пучка при низкой интенсивности из ионного источника, поскольку снижение интенсивности осуществлялось за счет уменьшения СВЧ мощности, подаваемой в разрядную камеру источника.

Таблица 5.15. Коэффициент захвата инжектированного пучка в ускорение при разной комбинации включения банчеров.

I инж, мкА	Коэффициент захвата инжектированного пучка в ускорение в %			
	без банч.	Lin- вкл.	Sin- вкл.	Sin+Lin – вкл.
6	9,3	23,2	25,8	48,2
18,4	8,7	15,6	25,0	38,0
49	9,1	15,7	25,7	36,7
103	8,7	14,1	24,8	34,0

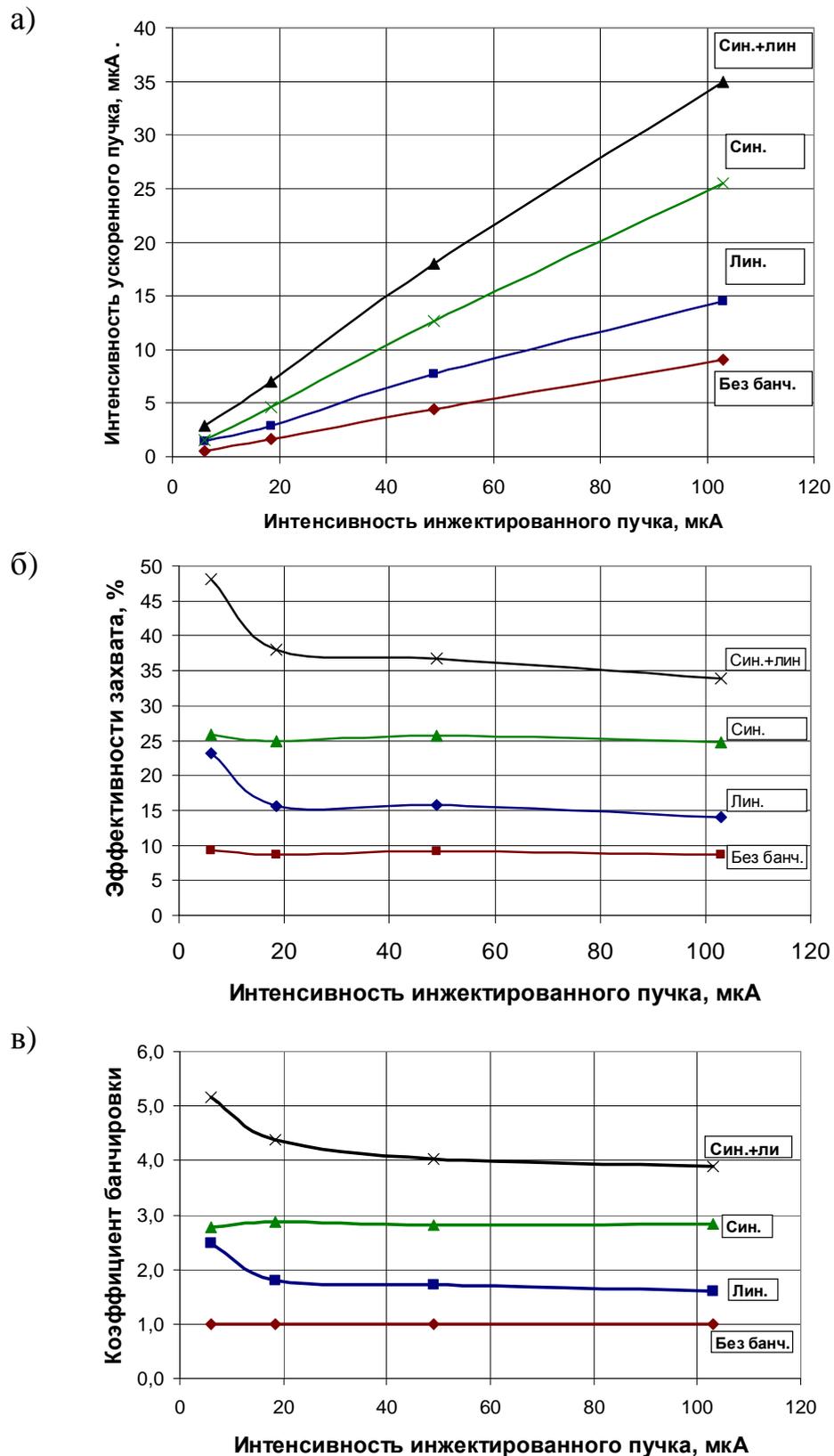


Рис. 5.45. Эффективность захвата пучка ионов в ускорение на радиусе 200 мм от интенсивности инжектированного пучка при разной комбинации включения банчеров.  
 а) зависимость интенсивности ускоренного пучка на  $R=200$ мм от интенсивности инжектированного пучка,  
 б) эффективность захвата пучка в ускорение от интенсивности инжектированного пучка,  
 в) коэффициент увеличения интенсивности пучка.

Основная настройка циклотрона ДЦ-110 с целью получения проектных параметров проводилась с использованием пучка ионов  $^{86}\text{Kr}^{13+}$ . В ходе настройки ускорителя был найден режим с высоким коэффициентом трансмиссии пучка от ионного источника до установки облучения полимерной пленки при интенсивности инжектируемого пучка, близкой к максимальному – 150 мкА.

В оптимальном режиме работы циклотрона интенсивность ускоренного и выведенного пучка ионов  $^{86}\text{Kr}^{13+}$  составила 14,5 мкА, по проекту – 13 мкА.

Настройка проводилась по максимальному току пучка на цилиндре Фарадея, расположенном в первом блоке диагностики канала транспортировки выведенного пучка. Дальнейшая транспортировка пучка по каналу до установки облучения полимерной пленки была выполнена без потери интенсивности. При выключенной системе сканирования размер сфокусированного пучка в плоскости облучения пленки составил около 100 мм по горизонтали и 80 мм по вертикали. Сканирующие магниты обеспечили размах сканирования пучка для равномерного облучения пленки шириной 600 мм.

Настройка ускорителя проводилась в двух режимах с выключенной и включенной системой банчирования пучка. В таблицах 5.16 и 5.17 приведены коэффициенты трансмиссии пучка на каждом этапе от ионного источника до мишени [45].

Таблица 5.16. Трансмиссия пучка от ионного источника до установки облучения пленки при выключенной системе банчирования.

Ион	Ток инж. пучка, мкА	Ток ускоренного пучка, мкА (при выключенной системе банчирования пучка)		Ток пучка на входе в дефлектор, мкА	Ток выведенного пучка, мкА	Ток пучка на мишени, мкА	
		R= 140 мм	R= 890 мм	R= 908 мм			
$^{84}\text{Kr}^{13+}$	150	13	8,5	5,8	3,9	3,9	
	8,7%	(8%)					
		64%					
			70%				
		45%		(75%)			
				67%		(60%)	
					100%		(90%)
				2,6%	(3,2%)		

\* - в скобках указаны проектные значения.

Таблица 5.17. Трансмиссия пучка от ионного источника до установки облучения пленки при включенных синусоидальном и линейном банчерах.

Ион	Ток инж. пучка, мкА	Ток ускоренного пучка, мкА (при включенной системе банчирования пучка)		Ток пучка на входе в дефлектор, мкА	Ток выведенного пучка, мкА	Ток пучка на мишени, мкА	
		R= 140 мм	R= 890 мм	R= 908 мм			
$^{84}\text{Kr}^{13+}$	150	44	27,7	20,7	14,5	14,5	
	29%	(30%)					
		63%					
			77%				
		47%		(75%)			
				70%		(60%)	
					100%		(90%)
				9,6%	(12%)		

\* - в скобках указаны проектные значения.

Из ионного источника после сепарации в  $90^\circ$  магните в канале аксиальной инжекции был получен ток пучка ионов  $^{86}\text{Kr}^{13+}$  150 мкА. Без использования банчеров в процесс ускорения было захвачено 8,7% инжектированного пучка. Центральная область циклотрона имеет фазовый акцептанс примерно  $30^\circ$ . Согласно расчету в случае пучка с постоянной плотностью по времени в ускорение должно захватываться около 8% инжектированного пучка. Такой режим был экспериментально получен на циклотроне. Потери пучка в канале инжекции не оказали заметного влияния на эффективность захвата.

Использование синусоидального и пилообразного банчеров позволило сгруппировать ионы в области фазового захвата и увеличить интенсивность ускоренного пучка в центре ускорителя до 44 мкА, что составляет 29% от инжектируемого пучка.

Потери ионов  $^{86}\text{Kr}^{13+}$  при ускорении от радиуса 140 мм до радиуса 890 мм составили около 37%, как в случае сгруппированного пучка, так и в случае выключенных банчеров. В процессе ускорения фазовые и апертурные потери оцениваются на уровне 10%. Вакуумные потери составляют около 30%. Снижение вакуумных потерь ожидается по мере улучшения вакуума в камере ускорителя за счет вакуумной тренировки внутренних поверхностей. Потери пучка на радиусах от 890 до 908 мм (перед входом в дефлектор) составляют (20–30)%, они вызваны фазовыми потерями на конечных радиусах и потерями на септуме дефлектора. Эффективность транспортировки пучка через элементы системы вывода, дефлектор и магнитный канал составила около 70%. Трансмиссия пучка от ионного источника до мишени – около 3% для пучка без системы банчирования и около 10% с включенными банчерами (синусоидальным и линейным).

На базе экспериментальных результатов, полученных при оптимизации режима при ускорении ионов  $^{86}\text{Kr}^{13+}$  на циклотроне ДЦ-110, были рассчитаны рабочие параметры для ускорения ионов  $^{40}\text{Ar}^{6+}$  и  $^{132}\text{Xe}^{20+}$ .

Из ионного источника DECRIS-5 интенсивность пучка  $^{40}\text{Ar}^{6+}$  может быть получена в несколько сот мкА. В проведенном эксперименте из ионного источника после сепарации в канале аксиальной инжекции была получена интенсивность пучка ионов  $^{40}\text{Ar}^{6+}$  – 94 мкА. Интенсивность выведенного пучка составила 13 мкА, по проекту – 6 мкА.

Настройка проводилась по максимальному току пучка на цилиндре Фарадея в первом блоке диагностики канала транспортировки выведенного пучка.

Коэффициенты трансмиссии пучка на всех этапах инжекции, ускорения и вывода пучка из циклотрона при включенной системе банчировки приведены в таблице 5.18.

Таблица 5.18. Трансмиссия пучка от ионного источника до установки облучения пленки при включенных банчерах (синусоидальном и линейном).

Ион	Ток инжектируемого пучка, мкА	Ток ускоренного пучка, мкА (система банчировки пучка включена)		Ток выведенного пучка, мкА
		R= 140 мм	R= 908 мм	
$^{40}\text{Ar}^{6+}$	94	33,3	20,4	13
	35%			
		61%		
			64%	
		35%		
		14%		

Из ионного источника был получен ток пучка ионов  $^{132}\text{Xe}^{20+}$  195 мкА. Однако нужно отметить, что  $90^\circ$  анализирующий магнит в системе аксиальной инжекции пучка в режиме транспортировки (без использования коллиматоров) не имеет достаточного разрешения для полного разделения ионов Хе по зарядам, поэтому измеренная величина тока пучка ионов  $^{132}\text{Xe}^{20+}$  в канале инжекции – 195 мкА – не является корректной. Она имеет примеси соседних зарядов, которые увеличивают измеряемую величину на 20–30% (рис 5.2).

Трансмиссия пучка от ионного источника до установки облучения пленки в оптимальном режиме при включенных банчерах (синусоидальном и линейном) показана в таблице 5.19.

Таблица 5.19. Трансмиссия пучка от ионного источника до установки облучения пленки при включенных синусоидальном и линейном банчерах.

Ион	Ток инжектируемого пучка, мкА	Ток ускоренного пучка, мкА (система банчировки пучка включена)		Ток выведенного пучка, мкА
		R= 140 мм	R= 908 мм	
$^{132}\text{Xe}^{20+}$	195 (*) 150 (оценка)	31	13,8	10,9
	16% (*) 20% (оценка)			
		44%		
				79%
				35%

\*- примеси соседних зарядов увеличивают измеряемую величину тока инъекции  $^{132}\text{Xe}^{20+}$ .

Потери пучка  $^{132}\text{Xe}^{20+}$  по радиусу в процессе ускорения от центра циклотрона до конечного радиуса составляют 56% , из которых примерно 45% приходится на вакуумные потери. В рабочем режиме (с пучком) давление в камере циклотрона составило  $2,1 \cdot 10^{-7}$  Торр. При выводе пучка ионов  $^{132}\text{Xe}^{20+}$  из циклотрона получен режим с высоким коэффициентом трансмиссии через дефлектор и магнитный канал – 79%.

Для тестового облучения пленки был использован пучок ионов криптона. После системы вывода на входе в ионопровод размер пучка соответствует расчетному –  $20 \times 25$  мм (верт./гориз.). Корректирующие магниты и квадрупольные линзы позволяют транспортировать пучок на установку облучения полимерной пленки без потери интенсивности.

Система сканирования [187] позволила получить однородное облучение пленки шириной 600 мм. Интенсивность пучка Kr после формирования непосредственно на пленке в проведенном эксперименте составила около 0,1 мкА, что позволило получить плотность  $1,32 \cdot 10^8$  пор/см<sup>2</sup> при скорости перемотки пленки 10 см/сек и  $6,16 \cdot 10^7$  пор/см при скорости перемотки пленки 20 см/сек. Однородность облучения по ширине пленки получена лучше  $\pm 10\%$ , по длине – менее ошибки измерения. Фотографии образцов трековых мембран представлены на рисунке 5.46.

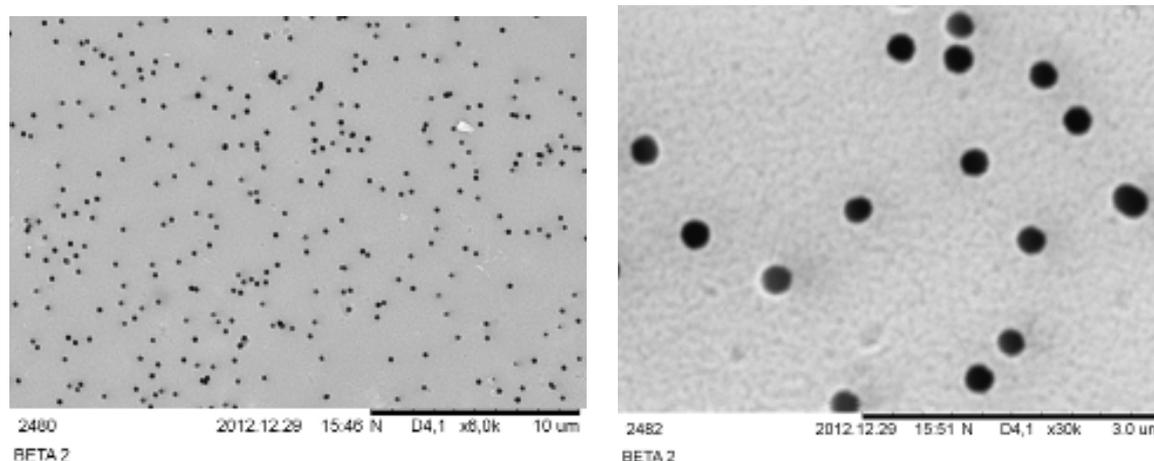


Рис. 5.46. Фотография трековой мембраны, сделанная на электронном микроскопе при разном увеличении, пленка – лавсан 12 мкм, плотность пор –  $6,16 \cdot 10^7$  пор/см<sup>2</sup>.

## Заключение

1. Работы по созданию циклотронного комплекса ДЦ-110 были начаты в августе 2009 года. В 2012 году выполнены монтаж и наладка оборудования циклотрона в здании научно-промышленного комплекса БЭТА.
2. Получены проектные параметры пучков ускоренных ионов Ar, Kr, Xe (табл. 5.20).

Таблица 5.20. Проектные и полученные параметры пучков на циклотроне ДЦ-110.

Ион	Отношение массы к заряду	Интенсивность пучка из ЭЦР источника, $\mu\text{A}$	Интенсивность ускоренного и выведенного пучка, $\mu\text{A}$		Энергия ионов, МэВ/нукл.
			<i>Проект</i>	<i>Полученный результат</i>	
$^{40}\text{Ar}^{6+}$	6,6667	94	6	13	2,5
$^{86}\text{Kr}^{13+}$	6,6154	150	13	14,5	2,5
$^{132}\text{Xe}^{20+}$	6,6	190	10	10,9	2,5

3. Проведено облучение полимерной пленки толщиной 12 мкм ионами Kr. Однородность плотности пор произведенных трековых мембран получена лучше  $\pm 10\%$ ,

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Исследования по модификации материалов тяжелыми ионами, в том числе производство трековых мембран получили широкое развитие в крупнейших ядерно-физических центрах США, Франции, Германии, Японии и других стран. Большинство работ в этой области выполнены на мощных высокоэнергетических ускорителях, нацеленных прежде всего на выполнение широкого спектра фундаментальных научных исследований.

В ходе выполнения диссертационной работы решена актуальная задача разработки и создания специализированных циклотронов тяжелых ионов нового поколения, позволяющих внедрять наукоемкие технологии путем прямого применения ускорителей в технологическом процессе.

Развитие источников электронно-циклотронного резонанса (ЭЦР) существенным образом изменило концепцию построения компактных циклотронов тяжелых ионов. Система внешней инжекции пучка из ЭЦР источника позволила значительно расширить диапазон ускоряемых ионов в сторону более тяжелых масс, уменьшить размеры и энергопотребление циклотронов.

Первая система аксиальной инжекции пучка в России и странах-участницах ОИЯИ была создана на циклотроне У-200 (ЛЯР ОИЯИ) в 1985–1986 г. Были ускорены ионы гелия и углерода. В 1995–1996 годах были установлены и запущены системы аксиальной инжекции пучка из ЭЦР источников на исследовательских циклотронах ЛЯР У-400 и У-400М.

Первый специализированный циклотрон ИЦ-100 для прикладных работ на пучках тяжелых ионов был создан по инициативе Г.Н.Флерова в 1985 году. На нем использовался внутренний источник типа PIG. В 2001 году была проведена кардинальная реконструкция циклотрона, был установлен источник электронно-циклотронного резонанса со сверхпроводящей магнитной структурой и создана система аксиальной инжекции пучка. Достигнутые при этом параметры в полной мере показали преимущества новой концепции построения циклотронов. Диапазон ускоряемых ионов по массам до реконструкции (при использовании внутреннего источника ионов) составлял C – Ar, после реконструкции - были получены пучки ионов Ne, Ar, Fe, Kr, I, Xe, W. В настоящее время циклотрон обеспечивает выполнение широкого спектра прикладных задач, включая исследование радиационной стойкости материалов, получение и изучение наноструктурированных композиционных материалов, а также нано- и микропористых мембран.

На базе опыта, полученного при создании циклотронов с внешней инжекцией пучка, в 2004–2006 гг. в Лаборатории ядерных реакций ОИЯИ создан специализированный ускорительный комплекс ДЦ-60 для проведения научно-прикладных исследований и коммерческого производства трековых мембран. Комплекс был спроектирован и построен для междисциплинарного научно-исследовательского центра при Евразийском национальном университете им. Л.Н.Гумилева (г.Астана, Казахстан). Научно-производственный комплекс ДЦ-60 уже несколько лет успешно обеспечивает выполнение программы научных исследований и инновационной деятельности, практическая работа на пучках ускорителя включена в учебный процесс студентов и аспирантов университета.

Новый специализированный циклотрон ДЦ-110, предназначенный для крупномасштабного производства трековых мембран, был разработан ЛЯР ОИЯИ для научно-промышленного комплекса «БЕТА». Ускорительный комплекс обеспечивает получение интенсивных пучков ионов Ar, Kr и Xe с фиксированной энергией 2,5 МэВ/нуклон, что позволяет производить трековые мембраны на основе полимерных пленок

толщиной до 30 мкм. Ускорительный комплекс способен обеспечить промышленное производство трековых мембран до 2 млн. кв. м. в год. Особенность данного проекта – нацеленность на получение мембран для каскадного плазмафереза, требующего высокой плотности пор и, соответственно, высокой интенсивности пучков. Циклотронный комплекс ДЦ-110, введенный в эксплуатацию в 2012 году, включает в себя весь комплекс инженерных систем, обеспечивающих законченный цикл облучения полимерной пленки – первой стадии технологии изготовления трековых мембран.

Проведенные исследования, конструкторские и технические разработки, выполненные в ходе развития ускорителей тяжелых ионов ЛЯР, позволили сформулировать основные принципы разработки циклотронов прикладного применения. Результаты, полученные при создании циклотронов ИЦ-100, ДЦ-60, ДЦ-110, показали правильность разработанного подхода.

## **Основные результаты, полученные в диссертационной работе**

1. Разработана концепция проектирования нового поколения специализированных циклотронов тяжелых ионов с системой аксиальной инжекции пучка из внешних источников ионов типа ЭЦР для промышленного применения и научно-прикладных исследований с использованием пучков ионов с энергией до 2,5 МэВ/нуклон.
2. Впервые в отечественных научных центрах и странах участницах ОИЯИ создана система аксиальной инжекции пучка ионов в циклотрон, которая стала базовым решением для проектов подобных систем на циклотронах ЛЯР.
3. Разработан и выполнен проект глубокой модернизации первого в мире специализированного циклотрона ИЦ-100 для промышленного производства трековых мембран. На ускорителе создана система внешней инжекции пучка из ЭЦР источника. Получены пучки ускоренных ионов неона, аргона, железа, криптона, йода, ксенона, вольфрама с энергией 1–1,2 МэВ/нуклон.
4. Создан специализированный циклотронный комплекс тяжелых ионов ДЦ-60 с вариацией энергии от 0,35 до 1,77 МэВ/нуклон для научно-прикладных исследований и промышленного применения в области нанотехнологий.
5. Создан специализированный высокоинтенсивный циклотрон ДЦ-110 для промышленного производства трековых мембран, ускоряющий пучки ионов Ar, Kr, Xe с энергией 2,5 МэВ/нуклон и интенсивностью свыше 10 мкА. Производительность комплекса по облучению полимерной пленки составляет более 2 миллионов квадратных метров в год.

Научные результаты, изложенные в диссертации, опубликованы в виде препринтов ОИЯИ, в журналах ЖТЭФ, «Nucl. Phys.», «Письма в ЭЧАЯ», «Атомная энергия», ПТЭ, в трудах российских и международных конференций: 10-е Всесоюзное совещание по ускорителям заряженных частиц, 11-е Международное совещание по применению ускорителей заряженных частиц в промышленности и медицине, ЕСРМ 2006, XIV научно-техническая конференция «Вакуумная наука и техника», 18<sup>th</sup> International conference on cyclotrons and their applications, RUPAC 2012, 3-я международная научная конференция «Ядерная и радиационная физика», IX и X Международные семинары по проблемам ускорителей заряженных частиц памяти В.П.Саранцева и др.

Общее число публикаций по теме диссертации 69 из них в рецензируемых журналах – 19 [27, 28, 44, 45, 78, 79, 81, 83, 86, 88, 95, 107, 137, 171, 175, 179, 180, 186, 187] в трудах российских и международных конференций – 27 [4, 9, 29, 30, 31, 32, 41, 57, 60, 62, 65, 70, 75, 76, 82, 97, 111, 126, 138, 140, 157, 158, 162, 181, 182, 184, 185], получен один патент на изобретение [145].

### **Благодарности**

Автор считает своим долгом выразить благодарность коллективу конструкторов, инженеров и физиков Лаборатории ядерных реакций ОИЯИ и другим специалистам, участвующим в проектировании и создании циклотронов.

Автор благодарит научного руководителя ЛЯР ОИЯИ академика Оганесяна Ю.Ц., директора ЛЯР профессора Дмитриева С.Н., главного инженера ЛЯР Гульбеяна Г.Г. за полезное осуждение и поддержку реализованных проектов.

Автор выражает признательность члену корреспонденту РАН Мешкову И.Н. за полезные советы и обсуждение материалов диссертации.

## ЛИТЕРАТУРА

1. Г.Н. Флеров. Синтез сверхтяжелых элементов и применение методов ядерной физики в смежных областях. // Вестник АН СССР, 1984, №4, С. 35-48.
2. R.L. Fleischer, P.B. Price, R.M. Walker, Nuclear Tracks in Solids: Principles and Applications. University of California Press, Berkeley, 1975. P. 1 and references therein.
3. P. Apel. Swift ion effects in polymers: industrial applications // Nuclear Instruments and Methods in Physics Research B 208 (2003) 11–20.
4. П.Ю.Апель, И.В.Блонская, Б.Н.Гикал, О.М.Иванов, Т.И.Мамонова, О.Л.Орелович, В.А.Скуратов, С.Н.Дмитриев. Трековые мембраны с микро- и нанопорами. Тезисы докладов Международного совещания «Микро и нанотехнологии с использованием пучков ионов, ускоренных до малых и средних энергий» // Обнинск, 16-18 октября 2007. С.13-15.
5. С.Н.Дмитриев, В.Ф.Реутов. Радиационно-ионно-трековая технология одно-, двух и трехмерных наноструктур // В кн. Ядерная физика и нанотехнологии. Дубна ОИЯИ. 2008. С. 51-72.
6. B.E. Fischer, R. Spohr. Production and use of nuclear tracks: imprinting structure on solids // Rev. Mod. Phys. 55 (1983). P. 907-948.
7. M. Danziger, W. Votius. Surface modification of polyimide to improve its adhesion to deposited copper layer. In: K.L. Mittal (Ed.), Proc. 2nd Intern. Symp. on Polyimides and other High Temperature Polymers // Newark, 2003, Vol. 2, P. 1.
8. <http://fractal-ag.de/english/fraflex.htm>.
9. С.Н.Дмитриев, П.Ю.Апель, Б.Н.Гикал, В.Ф.Реутов, В.А.Скуратов. Наноструктурная модификация материалов при помощи пучков ускоренных ионов // Rusnnanotech 08, Тезисы докладов Международного форума по нанотехнологиям, Москва, 3-5 декабря 2008. С. 52-54.
10. П.Ю.Апель, Б.Н.Гикал, С.Н.Дмитриев. Микро - и нанопористые структуры, получаемые в полимерах при помощи пучков ускоренных тяжелых ионов // В кн. Ядерная физика и нанотехнологии. Дубна ОИЯИ. 2008. С.73-86
11. С.Н.Дмитриев, В.Ф. Реутов, Способ ионного легирования твердых тел. Патент РФ № 2193080, 20.8.2002г
12. С.Н.Дмитриев, В.Ф.Реутов, А.А.Ефремов, Способ многоэлементной ионной имплантации. Патент № 2001127136/20, 2001
13. С.Н.Дмитриев, В.Ф.Реутов. Ионно-трековая нанотехнология. Препринт ОИЯИ Р18-2002-230, Дубна, 2002. 18 с.
14. В.Ф.Реутов, С.Н.Дмитриев, А.Н.Сохацкий, Способ получения металлической реплики для анализа нанометрических каналов в трековых мембранах. Патент РФ № 2115915, 23.07.96.
15. В.Ф.Реутов, С.Н.Дмитриев, Способ изготовления субмикронных трубчатых металлических реплик с трековых мембран. Патент РФ, № 2156328, 25.12.98.
16. В.Ф.Реутов, А.С.Сохацкий. Упорядоченные гелиевые поры в аморфном кремнии, индуцированном облучением низкоэнергетическими ионами гелия // ЖТФ, 73 (2003), вып.1. С. 73-78.
17. I.Y.Abdrashitov, K.V.Botvin, V.F.Reutov, et.al., Report 4-80, Institute of Nuclear Physics of Acad. Of Sciences KazSSR, Alma-Ata, 1980.
18. В.Ф.Реутов, А.С.Сохацкий. Аморфизация кристаллов Si ионами He. // Письма в ЖТФ, вып.14 (2002). С. 83-87.
19. Г.Н.Флеров, П.Ю.Апель, А.Ю.Дидык, В.И. Кузнецов, Р.Ц Оганесян. Использование ускорителей тяжелых ионов для изготовления ядерных мембран. // Атомная энергия 1989, Т.67. С.274.

20. P.Apel. Track etching technique in membrane technology // Radiat. Meas., 2001, V.34. P.559-666.
21. P.Apel, A.Schulz, R.Spohr, C.Trautmann, V.Vutsadakis. Tracks of very heavy ions in polymers // Nucl. Instrum. Meth. B131 (1997). P. 55-63.
22. Л.И.Кравец, С.Н.Дмитриев, П.Ю.Апель. Получение и свойства полипропиленовых мембран // Химия высоких энергий 31 (1997). С. 108-113.
23. А.В.Митрофанов, П.Ю.Апель, И.В.Блонская, О.Л. Орелович. Дифракционные фильтры на основе полиимидных полиэтиленнафталатных трековых мембран. // Журнал Техн. Физики, 2006, Т.76. С. 121.
24. Tarasov O.B., Bazin D. LISE++: Radioactive Beam Production with In-flight Separators // Nuclear Instruments and Methods in Physics Research, B 266 (2008), P. 4657-4664.
25. Г.Н.Флеров, А.М.Андриянов, Богомолов С.Л., В.В.Болтушкин, П.Г.Бондаренко, Буй Бинь Тхуан, Г.Г.Гульбекян, А.И.Иваненко, Э.Л.Иванов, Ю.А.Иванов, Б.А.Кленин, И.В.Колесов, В.Б.Кутнер, Е.А.Минин, А.М.Мордуев, Р.Ц.Оганесян, С.В.Пашенко, К.Хавличек, В.А.Чугреев. Создание циклического имплантатора тяжелых ионов ИЦ-100 // Труды 10 Всесоюзного совещания по ускорителям заряженных частиц, Дубна, 21-23 октября 1986 г. Дубна, ОИЯИ, Д9-87-105. 1987. С. 131-135.
26. B.Gikal, S.Bogomolov, S.Dmitriev, G.Gylbekian, M.Itkis, I.Kalagin, Yu.Oganessian, V.Sokolov. Dubna cyclotrons – status and plans // The 17<sup>th</sup> International conference on cyclotrons and their applications : Cyclotrons 2004. October 18-22, 2004 Tokyo, Japan. – P.74.
27. Гикал Б.Н., Дмитриев С.Н., Гульбекян Г.Г., Богомолов С.Л., Борисов О.Н., Бузмаков В.А. Иваненко И.А., Казаринов Н.Ю., Калагин И.В., Колесов И.В., Папаш А.И., Пашенко С.В., Тихомиров А.В., Хабаров М.В. Циклотронный комплекс ДЦ-60 для научно-прикладных исследований и промышленного применения в области нанотехнологий // Атомная энергия, 2007, т.103, вып.6. С.357-364.
28. Б.Н.Гикал, С.Н.Дмитриев, Г.Г.Гульбекян, П.Ю.Апель, В.В.Башевой, С.Л.Богомолов, О.Н.Борисов, В.А.Бузмаков, И.А.Иваненко, О.М.Иванов, Н.Ю.Казаринов, И.В.Колесов, В.И.Миронов, А.И.Папаш, С.В.Пашенко, В.А.Скуратов, А.В.Тихомиров, М.В.Хабаров, А.П.Череватенко, Н.Ю.Язвицкий. Ускорительный комплекс ИЦ-100 для проведения научно-прикладных исследований // Письма в ЭЧАЯ. 2008. Т.5. №1(143). С. 59-85.
29. Oganessian Yu. Ts., Gikal B.N., Gulbekian G.G. New possibilities on polymeric materials irradiation on U-400 heavy ion accelerator of LNR, JINR // Proceeding of the 2nd Meeting "Particle track membranes and their applications" 2 - 6th December 1991. Szczyrk, Poland. (Edited by W. Starosta, M. Buczkowski, Warsaw, 1992). С. 5-9.
30. B. N. Gikal. FLNR Heavy ion cyclotrons for investigation in the field of condensed matter physics industrial applications // Proceedings of RUPAC2012, Sant-Petersburg, Russia, 2012. P. 172-175.
31. В.С.Школьник, М.Ж.Жолдасбеков, К.К.Кадыржанов, А.Н.Сисакян, М.Г.Иткис, С.Н.Дмитриев, А.Ю.Дидык, В.Ф.Реутов, Б.Н.Гикал, С.Л.Богомолов, А.Ж.Тулешев, Ю.С.Пятилетов, А.Н.Борисенко, А.А.Арзуманов, С.Н.Лысухин, А.Д.Дуйсебаев, Н.Буртебаев, С.Б.Кислицын. Обоснование создания в Евразийском национальном университете им. Л.Н.Гумилева междисциплинарного научно-исследовательского комплекса на базе ускорителя тяжелых ионов. Алматы, 2003. Препринт №22 РГП НИЦ РК. -78 с.
32. Б.Н.Гикал, П.Ю.Апель, С.Н.Дмитриев. Циклотронный комплекс ДЦ-60 для научно-прикладных исследований и промышленного применения в области нанотехнологий. Тезисы докладов Международного совещания «Микро и нанотехнологии с использованием пучков ионов, ускоренных до малых и средних энергий» // Обнинск, 16-18 октября 2007. – с.13-15.
33. <http://www.bnl.gov/bnlweb/facilities/TVdG.html>
34. <http://www.ganil.fr/>
35. <http://www.cyc.ucl.ac.be/CYC/>

36. Klaus Ziegler. Material research with beams at cyclotron energies // Proceedings of the 13th International Conference on Cyclotrons and their Applications, Vancouver, BC, Canada 6-10 July 1992. P.149-157.
37. J. Vetter, R. Spohr. Application of ion track membranes for preparation of metallic microstructures. // Nuclear Tracks, 1980. Vol. 4. P. 101-108,
38. Г.Н.Флеров, П.Ю.Апель, А.Ю.Дидык, В.И.Кузнецов, Р.Ц.Оганесян. Использование ускорителей тяжелых ионов для изготовления трековых мембран. //Атомная Энергия 67 (1989). С. 274.
39. P.Apel. Ion-Track Membrans and Teir Use in Biological and Medical Applications // Proc. Intern. Symp. on Exotic Nuclei/ Khanty-Mansiysk, Russia, 17-22 July 2006 , McIlville, New York 2007, AIP Conference Proceedings, V. 912. P. 488-494.
40. Ю.Г. Аленицкий, Г.А. Карамышева и др. Разработка и создание облучательного комплекса «Альфа» для производства трековых мембран // Атомная энергия. 2004. Т. 97, вып. 1. С. 34–40.
41. B.N.Gikal, S.N.Dmitriev, S.L.Bogomolov, V.V.Bekhterev, O.N.Borisov, A.A.Efremov, G.G.Gylbekyan, I.A.Ivanenko, M.G.Itkis, N.Yu.Kazarinov, V.I.Kazacha, I.V.Kolesov, V.N.Melnikov, A.V.Tikhomirov, V.B.Zarubin, K.K.Katyrganov, K.A.Kuterbekov, A.N.Borisenko, S.N.Lysukhin // Commissioning of DC-60 cyclotron of scientific research centre. XXXV European Cyclotron Progress Meeting. ECPM 2006. Nice, France, November 2-4, 2006. p.23.
42. Б.Н.Гикал, Г.Г.Гульбекян, С.Л.Богомолов, О.Н.Борисов, В.А.Бузмаков, И.А.Иваненко, Н.Ю.Казаринов, В.И.Казача, И.В.Калагин, В.П.Кухтин, Е.В.Ламзин, С.В.Пашенко, В.А.Соколов, С.Е.Сычевский, А.В.Тихомиров. Результаты ускорения пучков ионов азота, аргона, криптона в ходе пусконаладочных работ на изохронном циклотроне ДЦ-60. Препринт ОИЯИ Р9-2007-80. Дубна, 2007. 19 с.
43. M.Hagiwara, // Nucl. Tracks Radiat. Meas. 19 (1991). P. 8
44. Б.Н.Гикал, Г.Г.Гульбекян, С.Н.Дмитриев, С.Л.Богомолов, О.Н.Борисов, И.А.Иваненко, Н.Ю.Казаринов, В.И.Казача, И.В.Калагин, И.В.Колесов, М.Н.Сазонов, А.В.Тихомиров, Й. Франко. Проект циклотрона тяжелых ионов DC-110 для промышленного применения и прикладных исследований в области нанотехнологий // Письма в ЭЧАЯ. 2010. Т.7. №7(163). С. 891-896.
45. Б.Н.Гикал, С.Н.Дмитриев, Г.Г.Гульбекян, П.Ю.Апель, С.Л.Богомолов, О.Н.Борисов, В.А.Бузмаков, В.А.Веревокин, А.А.Ефремов, И.А.Иваненко, Г.Н.Иванов, Н.Ю.Казаринов, В.И.Казача, И.В.Калагин, И.В.Колесов, В.М.Кононов, А.А.Королев, В.А.Костырев, А.М.Ломовцев, В.Н.Мельников, В.И.Миронов, С.В.Пашенко, В.А.Соколов, Н.Ф.Осипов, А.В.Тихомиров, А.А.Фатеев, М.В.Хабаров. Разработка, создание и запуск циклотронного комплекса тяжелых ионов ДЦ-110 для промышленного производства трековых мембран. Препринт ОИЯИ Р9-2013-120, 23 с. Письма в ЭЧАЯ. 2014. Т.11, № 2. С.233-253.
46. В.Б.Кутнер, Ю.Ц.Оганесян, А.С.Пасюк, Ю.П.Третьяков, Г.Н.Флеров. Циклотронные источники тяжелых ионов ЛЯР ОИЯИ. Препринт ОИЯИ, 37-85-362. Дубна.1985. 14.
47. Г.Н.Флеров, Ю.Ц.Оганесян, А.М.Андриянов, Б.Н.Гикал Г.Г.Гульбекян, А.И.Иваненко, Б.А.Кленин, С.И.Козлов, И.В.Колесов, В.Б.Кутнер, В.Н.Мельников, Р.Ц.Оганесян, В.А.Чугреев Разработка ускорительного комплекса У-400 и У-400М // Труды 10 Всесоюзного совещания по ускорителям заряженных частиц. Дубна, октябрь 1986 г. Дубна, 1987. Сообщение ОИЯИ Д9-87-105. С. 109-114.
48. Г.Н.Флеров, Ю.Ц.Оганесян, С.Л.Богомолов, Б.Н.Гикал Г.Г.Гульбекян, А.И.Иваненко, В.В.Каманин, Б.А.Кленин, С.И.Козлов, И.В.Колесов, В.Б.Кутнер, В.Н.Мельников, Е.А.Минин, А.М.Мордуев, Р.Ц.Оганесян, А.С.Пасюк, Ю.Э.Пенионжкевич, К.И.Семинов, Б.В.Фефилов, В.А.Чугреев. Циклотронный комплекс тяжелых ионов Лаборатории ядерных реакций ОИЯИ. Сообщение ОИЯИ 9-84-555. Дубна, 1984. 60 с.

49. Ю.Ц.Оганесян, И.В.Колесов, Б.Н.Гикал, Г.Г.Гульбекян, А.И.Иваненко, Б.А.Кленин, С.И.Козлов, В.Б.Кутнер, В.Н.Мельников, Р.Ц.Оганесян, К.И.Семина, В.А.Чугреев. Состояние работ по созданию циклотронного комплекса тяжелых ионов Лаборатории ядерных реакций ОИЯИ // Труды 9-го Всесоюзного совещания по ускорителям заряженных частиц. Дубна, ОИЯИ, 1985. Т.1. С.47-53.
50. Yu.Ts.Oganessian, G.G.Gulbeyan, B.N.Gikal, I.V.Kalagin, S.L.Bogomolov, I.V.Kolesov, G.N.Ivanov, V.V.Bekhterev, M.V.Khabarov, O.N.Borisov, I.A.Ivanenko, J.Franko, S.Kralk. Project of the U400R cyclotron at the FLNR JINR // Proceeding RUPAC-2004 4-9 October 2004, Dubna. С.129-131.
51. Г.Г.Гульбекян, Б.Н.Гикал, Б.А.Кленин, А.М.Мордуев. Четырехметровый изохронный циклотрон тяжелых ионов У-400 с пониженными уровнями средних магнитных полей. Сообщение ОИЯИ Р9-93-323. Дубна, 1993. 12 с.
52. О.Б.Ананьин, Ю.А.Быковский, Б.Н.Гикал, В.П.Гусев, Ю.П.Козырев, И.В.Колесов, В.Б.Кутнер, Ю.Ц.Оганесян, А.С.Пасюк, В.Д.Пекленков, Д.А.Узиенко. Ускорение на циклотроне ионов  $^{12}\text{C}^{3+}$  из лазерной плазмы. Препринт ОИЯИ Р9-82-317. Дубна, 1982. 6 с.
53. Б.Н.Гикал, И.В.Колесов, А.С.Пасюк, Ю.А.Быковский, В.П.Гусев, Ю.П.Козырев, В.Д.Пекленков, Д.А.Узиенко. Исследование процесса ускорения тяжелых ионов из лазерной плазмы на циклотроне У-200. – Дубна, 1983. (Препринт ОИЯИ Р9-83-416). 8с.
54. A.Chabert. Status report on GANIL // 11<sup>th</sup> Int. Conf. on Cyclotron and their Applications. Tokyo, Japan, 1986. P. 94-97.
55. M.Lieuvin. S.A.R.A. – Grenoble status report // 9<sup>th</sup> Int. Conf. on Cyclotron and their Applications. Caen, France, 1981. P. 81-88.
56. Б.Н.Гикал, Г.Г.Гульбекян, С.И.Козлов, Р.Ц.Оганесян. Опыт эксплуатации и совершенствование циклотрона У-200. Препринт ОИЯИ Р9-83-311. Дубна, 1983. 12с.
57. Ю.Б.Виноградов, Б.Н.Гикал, Г.Г.Гульбекян, А.И.Иваненко, Д.Калчев, И.В.Колесов, В.Б.Кутнер, В.Н.Мельников, Р.Ц.Оганесян, В.А.Чугреев. Система аксиальной инжекции ионов в циклотрон У-200 // Труды 10 Всесоюзное совещание по ускорителям заряженных частиц, Дубна, октябрь 1986 г. Сообщение ОИЯИ Д9-87-105. Дубна, 1987, С.143-146.
58. В.В.Бехтерев, Ю.Б.Виноградов, Б.Н.Гикал, Г.Г.Гульбекян, А.А.Ефремов, А.И.Иваненко, Д.И.Калчев, И.В.Колесов, В.Б.Кутнер, В.Н.Мельников, Р.Ц.Оганесян, Ю.П.Третьяков, В.А.Чугреев. Создание и запуск системы аксиальной инжекции ионов в циклотрон У-200. Сообщение ОИЯИ 9-87-379. Дубна, 1987. 14 с.
59. Ю.Б.Виноградов, Б.Н.Гикал, Г.Г.Гульбекян, Д.И.Калчев. Расчет системы аксиальной инжекции ионов в изохронный циклотрон У-200. Сообщение ОИЯИ Р9-87-869. Дубна, 1987. 10 с.
60. С.Л.Богомолов, Ю.Б.Виноградов, Б.Н.Гикал, Г.Г.Гульбекян, А.А.Ефремов, Д.И.Калчев, В.Б.Кутнер, И.В.Колесов, Р.Ц.Оганесян. Исследование системы аксиальной инжекции ионов в циклотрон У-200. Дубна, 1988. (Препринт ОИЯИ Р9-88-641). – 12 с.; 11 Всесоюзное совещание по ускорителям заряженных частиц. Дубна, 1988. Сборник аннотаций. (ОИЯИ, Р9-88-738). С. 36-37.
61. Б.Н.Гикал, Г.Г.Гульбекян, В.Б.Кутнер, Р.Ц.Оганесян. Возможности и пути развития ускорителей ЛЯР // Совещание по корреляционным экспериментам на пучках тяжелых ионов. Дрезден (ГДР), 1988. Сборник аннотаций, ОИЯИ, Д7-88-299. Дубна, 1988. С.7-10.
62. Ю.Б.Виноградов, Б.Н.Гикал, Г.Г.Гульбекян, А.А.Ефремов, Д.Калчев, В.Б.Кутнер. Транспортировка пучка ионов  $^4\text{He}^{1+}$  в системе аксиальной инжекции циклотрона У-200. // Всесоюзный семинар «Плазменная электроника», Харьков, ХФТИ АН УССР, 1988. Тезисы докладов. С.152. Дубна, 1988; Сообщение ОИЯИ Р9-88-20. Дубна 1988. 9 с.

63. Ламзин Е.А. Анализ, формирование и реконструкция магнитного поля в электрофизических устройствах на основе методов математического моделирования. Дис. ... доктора физико-математических наук, НИИЭФА, С-Петербург, 2013.
64. В.М.Амосков, В.А.Беляков, Т.Ф.Белякова, Б.Н.Гикал, Г.Г.Гульбекян, С.Н.Дмитриев, И.А.Иваненко, О.В.Илясов, В.А. Костырев, В.Г Кучинский, В.П.Кухтин, М.С.Ларионов, Е.А.Ламзин, Б.П.Максимов, А.Г.Семченков, О.В.Семченкова, С.Е.Сычевский, О.Г.Филатов, А.А.Фирсов, И.Франко.. Аппаратно-программный комплекс для измерения характеристик магнитных материалов в широком диапазоне индукций. Препринт ОИЯИ Р13-2004-158. Дубна, 2004. -20 с.
65. Б.Н.Гикал, Г.Г.Гульбекян, И.А.Иваненко, Т.Ф.Белякова, В.П.Кухтин, Е.А.Ламзин, С.Е.Сычевский. Формирование магнитного поля в циклотроне DC60 на основе методов математического моделирования // Сборник докладов одиннадцатого международного совещания по применению ускорителей заряженных частиц в промышленности и медицине, Санкт-Петербург, 10-14 октября, 2005. Санкт-Петербург, СПбГУ, 2005. С.257-259.
66. T.Belyakova, V.Kukhtin, E.Lamzin, S.Sytchevsky, J.Franco, I.Ivanenko, B.Gikal, G.Gulbekian, P.Bogdanov, Yu.Gavrish, A.Sidorov, A.Strokach, A.Semchenkov, I.Gornikel, Yu.Stogov. Numerical technology for design, development and measurements of magnet systems of cyclotrons // XXXV European Cyclotron Progress Meeting. ECPM 2006. Nice, France, November 2-4, 2006.
67. A.V.Tikhomirov, G.G.Gulbekian, B.N.Gikal, R.Ts.Oganessian. Numerical simulation of the beam transmission efficiency for design of vacuum system of the DC-72 cyclotron // Proceeding RUPAC-2004 4-9 October 2004, Dubna. С. 501-503.
68. S.L.Bogomolov, S.N.Dmitriev, B.N.Gikal, G.G.Gulbekyan, M.G.Itkis, V.V.Kalagin, Yu.Ts.Oganessian, V.A.Sokolov. Dubna cyclotrons – status and plans // Beam Dynamics Newsletter, No.37, August 2005. P.44-51.
69. Yu.Ts.Oganessian, V.K.Utyonkov, Yu.V.Lobanov, F.Sh.Abdullin, A.N.Polyakov, I.V.Shirokovsky, Yu.S.Tsyganov, G.G.Gulbekian, S.L.Bogomolov, B.N.Gikal, A.N.Mezentsev, S.Iliev, V.G.Subbotin, A.M.Sukhov, A.A.Voinov, G.V.Buklanov, K.Subotic, V.I.Zagrebaev, M.G.Itkis, J.B.Patin, K.J.Moody, J.F.Wild, M.A.Stoyer, N.J.Stoyer, D.A.Shaughnessy, J.M.Kenneally, P.A.Wilk, and R.W.Lougheed. New elements from Dubna // Eur. Phys. J. A 25, 589 (2005).
70. Gikal B.N. Status and future Development of FLNR Cyclotrons // Восьмая летняя школа молодых ученых и специалистов ОИЯИ, Дубна, 21-23 мая 2004 г. Дубна., 2005. С.187-252.
71. Yu.Ts.Oganessian, G.G.Gulbeyan, B.N.Gikal, S.L.Bogomolov, V.V.Bekhterev, I.V.Kalagin, N.Yu.Kazarinov, Khabarov. Modernization of the U-400 axial injection system // Proceeding RUPAC-2004 4-9 October 2004, Dubna. P. 261-162.
72. Yu.Ts.Oganessian, V.K.Utyonkov, Yu.V.Lobanov, F.Sh.Abdullin, A.N.Polyakov, I.V.Shirokovsky, Yu.S.Tsyganov, G.G.Gulbekian, S.L.Bogomolov, B.N.Gikal, A.N.Mezentsev, S.Iliev, V.G.Subbotin, A.M.Sukhov, A.A.Voinov, G.V.Buklanov, K.Subotic, M.G.Itkis, K.J.Moody, J.F.Wild, N.J.Stoyer, M.A.Stoyer, R.W.Lougheed, C.A.Laue, and J.B.Patin. Superheavy Elements – Status of Research in Dubna // Proceedings of the Fourth Tegernsee International Conference on Particle Physics Beyond the Standard Model, Beyond 2003, Castle Ringberg, Tegernsee, Germany, 9-14 June 2003, edited by H.V. Klapdor-Kleingrothaus, Springer-Verlag Berlin Heidelberg, 2004. P.1091-1103.
73. Yu.Ts.Oganessian, V.K.Utyonkov, Yu.V.Lobanov, F.Sh.Abdullin, A.N.Polyakov, R.N.Sagaidak, I.V.Shirokovsky, Yu.S.Tsyganov, A.A.Voinov, G.G.Gulbekian, S.L.Bogomolov, B.N.Gikal, A.N.Mezentsev, S.Iliev, V.G.Subbotin, A.M.Sukhov, K.Subotic, V.I.Zagrebaev, G.K.Vostokin, M.G.Itkis, K.J.Moody, J.B.Patin, D.A.Shaughnessy, M.A.Stoyer, N.J.Stoyer, P.A.Wilk, J.M.Kenneally, J.H.Landrum, J.F.Wild, and R.W.Lougheed. Synthesis of superheavy nuclei in  $^{48}\text{Ca}$ -induced reactions. // Proceedings of the International Conference on Dynamical Aspects of Nuclear Fission, Smolenice Castle, Slovak Republic, October 2-6, 2006.

74. Б.Н.Гикал, Г.Г.Гульбекян, С.Н.Дмитриев, С.Л.Богомолов, А.А.Ефремов, И.А.Иваненко, В.И.Казача, Н.Ю.Казаринов, И.В.Колесов, В.И.Миронов, В.Н.Мельников, А.В.Тихомиров. Модернизация циклического имплантатора ИЦ-100. Сообщение ОИЯИ, Р9-2003-121. Дубна, 2003. 18 с.
75. B.Gikal, V.Bashevoy, V.Bekhterev, S.Bogomolov, O.Borisov, S.Dmitriev, A.Efremov, G.Gylbekian, I.Ivanenko, V.Kazacha, N.Kazarinov, I.Kolesov, V.Melnikov, V.Mironov, R.Oganessian, A.Tikhomirov. Upgrading of the DC-40 cyclotron // The 17<sup>th</sup> International conference on cyclotrons and their applications. Cyclotrons 2004. October 18-22, 2004 Tokyo, Japan. P.138-139.
76. B. Gikal, S.Dmitriev, G.Gulbekian, P. Apel, V. Bashevoi, S. Bogomolov, O. Borisov, V. Buzmakov A. Cherevatenko, A. Efremov, I. Ivanenko, O. Ivanov, N. Kazarinov, M.Khabarov, I. Kolesov, V.Mironov, A. Papash, S. Pashchenko, V. Skuratov, A. Tikhomirov N. Jazvitsky. Cyclotron based complex IC-100 based facility for scientific and applied research // 18<sup>th</sup> International conference on cyclotrons and their applications, Giardini Naxos, Italy, 30<sup>th</sup> September – 5<sup>th</sup> October 2007. P.27-29.
77. Б.Н.Гикал, С.Н.Дмитриев, Г.Г.Гульбекян, П.Ю.Апель, В.В.Башевой, С.Л.Богомолов, О.Н.Борисов, В.А.Бузмаков, И.А.Иваненко, О.М.Иванов, Н.Ю.Казаринов, И.В.Колесов, В.И.Миронов, А.И.Папаш, С.В.Пашченко, В.А.Скуратов, А.В.Тихомиров, М.В.Хабаров, А.П.Череватенко, Н.Ю.Язвический. Ускорительный комплекс ИЦ-100 для проведения научно-прикладных исследований. Препринт ОИЯИ Р9-2007-20. Дубна, 2007. – 30 с.
78. Гикал Б.Н., Дмитриев С.Н., Гульбекян Г.Г., Богомолов С.Л., Борисов О.Н., Бузмаков В.А. Иваненко И.А., Казаринов Н.Ю., Калагин И.В., Колесов И.В., Папаш А.И., Пашченко С.В., Тихомиров А.В., Хабаров М.В. Циклотронный комплекс ДЦ-60 для научно-прикладных исследований и промышленного применения в области нанотехнологий // Атомная энергия, 2007, т.103, вып.6. С.357-364.
79. B. Gikal, S. Dmitriev, P. Apel, S. Bogomolov, O. Borisov, V. Buzmakov, G. Gulbekyan, I. Ivanenko, O. Ivanov, M. Itkis, N. Kazarinov, I. Kalagin, I. Kolesov, A. Papash, S. Paschenko, A. Tikhomirov, and M. Khabarov. DC-60 Heavy Ion Cyclotron Complex: The First Beams and Project Parameters // Письма в ЭЧАЯ. 2008. Т.5, №7(149). С.160-165
80. И.А.Иваненко. Выбор магнитной структуры и формирование магнитного поля ихохронного циклотрона тяжелых ионов ДЦ-60. Дис.... кандидата технических наук, ЛЯР ОИЯИ, Дубна 2008.
81. Б.Н.Гикал, Г.Г.Гульбекян, А.И.Иваненко. Исследование процесса перезарядки тяжелых ионов при их ускорении в циклотронах У-200, У-300 и У-400 // ЖТЭФ, 1984, т.54, вып.7, с.1288-1293; Препринт ОИЯИ Р9-83-451. Дубна, 1983. – 12 с.
82. Б.Н.Гикал, М.В.Хабаров, О.А.Чернышев, А.В.Тихомиров. Вакуумная система циклотронного комплекса DC-60 // В материалах XIV научно-технической конференции «Вакуумная наука и техника» Сочи, Россия, октябрь 2007. С.27-31.
83. Б.Н.Гикал, А.В.Тихомиров, М.В.Хабаров, О.А.Чернышов. Вакуумная система циклотронного комплекса тяжелых ионов DC-60 // Письма в ЭЧАЯ. 2008. Т.5. №4(146). С. 655-674.
84. B.N.Gikal, G.G.Gulbekyan, S.N.Dmitriev, S.L.Bogomolov, O.N.Borisov, I.A.Ivanenko, N.Yu.Kazarinov, V.I.Kazacha, I.V.Kalagin, I.V.Kolesov, M.N.Sazonov, A.V.Tikhomirov, J.Franko. Heavy ion DC-110 cyclotron for industrial application and applied research in the nanotechnologies // ISSN 1547-4771, Physics of Particles and Nuclei Letters, 2010, Vol. 7, No. 7, pp. 1-3.
85. N. Kazarinov, I.Kalagin. The comutation of the bunching system of intense ion beam by moments method // 18<sup>th</sup> International conference on cyclotrons and their applications. Giardini Naxos, Italy, 30<sup>th</sup> September – 5<sup>th</sup> October 2007. P.379-381.

86. G. Gulbekyan, B. Gikal, I. Kalagin, N. Kazarinov. Development of FLNR JINR Heavy-Ion Accelerator Complex in the Next 7 Years // Письма в ЭЧАЯ. 2010. Т.7. №7(163). С. 827-834.
87. Yu.Ts.Oganessian, V.K.Utyonkov, Yu.V.Lobanov, F.Sh.Abdullin, A.N.Polyakov, R.N.Sagaidak, I.V.Shirokovsky, Yu.S.Tsyganov, A.A.Voinov, G.G.Gulbekian, S.L.Bogomolov, B.N.Gikal, A.N.Mezentsev, S.Iliev, V.G.Subbotin, A.M.Sukhov, K.Subotic, V.I.Zagrebaev, G.K.Vostokin, M.G.Itkis, K.J.Moody, J.B.Patin, D.A.Shaughnessy, M.A.Stoyer, N.J.Stoyer, P.A.Wilk, J.M.Kenneally, J.H.Landrum, J.F.Wild, and R.W.Lougheed. Synthesis of the isotopes of elements 118 and 116 in the  $^{249}\text{Cf}$  and  $^{245}\text{Cm}+^{48}\text{Ca}$  fusion reactions // Phys. Rev. C 74, 044602 (2006).
88. Yu.Ts.Oganessian, V.K.Utyonkov, Yu.V.Lobanov, F.Sh.Abdullin, A.N.Polyakov, I.V.Shirokovsky, Yu.S.Tsyganov, G.G.Gulbekian, S.L.Bogomolov, B.N.Gikal, A.N.Mezentsev, S.Iliev, V.G.Subbotin, A.M.Sukhov, A.A.Voinov, G.V.Buklanov, K.Subotic, V.I.Zagrebaev, M.G.Itkis, J.B.Patin, K.J.Moody, J.F.Wild, M.A.Stoyer, N.J.Stoyer, D.A.Shaughnessy, J.M.Kenneally, and R.W.Lougheed. Heavy Element Research at Dubna // Nucl. Phys. A 734, 2004. P.109-123
89. Yu.Ts.Oganessian, A.V.Yeremin, A.G.Popeko, S.L.Bogomolov, G.V.Buklanov, M.L.Chelnokov, V.I. Chepigin, B.N. Gikal, V.A. Gorshkov, G.G. Gulbekian, M.G. Itkis, A.P.Kabachenko, A.Yu. Lavrentev, O.N. Malyshev, J. Rohac, R.N. Sagaidak, S. Hofmann, G.Munzenberg, S.Saro, G.Giardina, K.Morita. Synthesis of new isotopes of superheavy elements using a  $^{48}\text{Ca}$  beam at FLNR JINR // In Proc. of International Conference on Nuclear Physics "Nuclear Shells - 50 Years", April 21 - 24, 1999, Dubna, Russia. World Scientific, Singapore. P. 167-179.
90. C. Bieth, M. Van Den Bossche, D. Eusardo, E. Balanzat, P. Pierrard, I. Meslage. Industrial applications of heavy ions beams at GANIL // In. Proceedings of the 1988 European Particle Accelerator Conference (EPAC 1988), Rome, Italy, 1988. P.189-191.
91. Y.Yongen. Recent progress in electron cyclotron resonance (E.C.R.) ion source // Международная школа молодых ученых по проблемам ускорителей заряженных частиц. Дубна. 1984. ОИЯИ Д-84-817. Дубна, 1984. С.130-144.
92. R.Geller. Multiply chrged ECR ion source for particle accelerators // The 11<sup>th</sup> International conference on cyclotrons and their applications. Tokyo, Japan. 1986. P.699-706.
93. G.H.Ryckewaert for the CYCLONE group, Louvain. ECREVIS –CYCLONE status report // Proc. of 10<sup>th</sup> Int. Conf. on Cyclotron and their Applications. East Lansing, Michigan, USA. 1984. P. 126-129.
94. G.H.Ryckewaert. Axial injection system for cyclotrons // Proc. of 9<sup>th</sup> Int. Conf. on Cyclotron and their Applications. Caen, France. 1981. P. 341-248.
95. B. Gikal, S.Dmitriev, G.Gulbekian, P. Apel'V. Bashevoi, S. Bogomolov, O. Borisov, V. Buzmakov A. Cherevatenko, A. Efremov, I. Ivanenko, O. Ivanov, N. Kazarinov, M.Khabarov, I. Kolesov, V.Mironov, A. Papash, S. Pashchenko, V. Skuratov, A. Tikhomirov, N. Jazvitsky. IC-100 cyclotron based facility for production of nuclear filters as well as for scientific and applied research // Письма в ЭЧАЯ. 2008. Т.5. №7(149). С.140-147.
96. С.Н.Дмитриев, В.Ф.Реутов. Радиационно-ионно-трековая технология формирования одно-, двух, и трех мерных структур // В кн. Ядерная физика и нанотехнологии. Дубна ОИЯИ. 2008. С.51-72.
97. S.L.Bogomolov, V.B.Bekhterev, A.A.Efremov, B.N.Gikal, G.G.Gulbekyan, Yu.K.Kostyukhov, N.A.Lebedev, V.N. Loginov, Yu.Yazvitsky. Recent Development in ECR Ion Sources at FLNR JINR // Proceedings of RUPAC2012, Sant-Petersburg, Russia, 2012. P. 203-207.
98. R. Geller, F.Bourg, P.Briand, J.Debernardai, M.Delaunay, P.Ludwig, R.Pauthenet, M.Pontonnier and P. Sortais // Proc. 8th Int. Workshop on ECR Ion Sources, East Lansing. 1987. P.1.

99. D.Leiter, S.Caspi, P.Ferraci, C.V.LYneis, S.Prestemon, G.L.Sabbi, D.S.Nodd, F.Trillaud // Superconducting ECR ion source development at LBNL. HIAT 2009, Venice, Italy. P.133-137.
100. M. Leporis, V. Bekhterev, S. Bogomolov, A. Efremov, G. Gulbekian, Yu. Kostyukhov, Design and construction of the new ion source DECRIS-4 // Proc. of the 17<sup>th</sup> Int. Conf. on Cyclotrons and their Applications, Tokyo, Japan, 2004, Particle Accelerator Society of Japan, 2005. P.296-299.
101. S.Bogomolov, A.Efremov, V.Loginov, A.Lebedev, N.Yazvitsky, V.Bekhterev, Yu.Kostyukhov, G.Gulbekian, B.Gikal, V.Drobin and V.Seleznev // Present Status of FLNR (JINR) ECR Ion Sources. Beam Dynamics Newsletter No. 53, December 2010. P.109 -114.
102. Б.Н.Гикал. Система аксиальной инжекции ионов в циклотрон У-200.. Дис.... кандидата технических наук, ЛЯР ОИЯИ, Дубна 1989.
103. K.L. Brown, D.C.Carey, Ch.Iselin, F.Rothacker. TRANSPORT a computer program for designing changed particle beam transport systems CERN 73-16, revised as CERN 80-4, CERN, Geneva, Switzerland, 1980.
104. H. Grote, Ch.Iselin, The MAD program, user's reference manual CERN/SL/90-13(AP), Geneva, Switzerland, 1996.
105. V.Aleksendrov, N.Kazarinov, V.Shevtsov. Multi-component ion beam cod – MCIB04 // Proceedins of XIX-th Russian Particle Accelarator Conference. ROPAC2004, 4-9 October, Dubna, Russia. P.201-203.
106. Yu.Ts. Oganessian et al. "Axial injection system for the U-400 cyclotron with the ECR-4M ion source". JINR FLNR Scientific Report 1995 – 1996 Heavy Ion Physics. E7-97-206, Dubna 1997. P.270.
107. Г.Г.Гульбекян, С.Н.Дмитриев, Б.Н.Гикал, С.Л.Богомолов, О.Н.Борисов, В.А.Веревоцкий, А.А.Ефремов, И.А.Иваненко, О.М.Иванов, Н.Ю.Казаринов, В.И.Казача, И.В.Калагин, И.В.Колесов, С.В.Пашенко, М.Н.Сазонов, А.В.Тихомиров, Й.Франко, М.В.Хабаров, К.К.Кадыржанов, А.Ж.Тулешев. Ускорительный комплекс ДЦ-350 // Письма в ЭЧАЯ. 2010. Т.7, №4(160). С.424-445.
108. О.Н. Борисов, Б.Н.Гикал, И.А.Иваненко, Н.Ю.Казаринов, Е.В.Самсонов. Динамика пучка в процессе ускорения в изохронном циклотроне ДЦ-60, ОИЯИ Р9-2007-128. 12 с.
109. G.G.Gulbekyan, B.N.Gikal, S.L.Bogomolov, S.N.Dmitriev, M.G.Itkis, I.V.Kalagin, Yu.Ts.Oganessian, V.A.Sokolov. Dubna cyclotrons – status and plans // Proceedings of the International Symposium on Exotic Nuclei "EXON2004", Peterhof, Russia, July 5-12, 2004, World Scientific, Singapore, 2005. p.643-650.
110. A. Efremov, S. Bogomolov, N. Kazarinov, O. Kochagov, and V. Loginov Ohmic heated sheet for the Ca ion beam production // Review of Scientific Instruments 79, 02A307. 2008. P. 02A307-1 - 02A307-3.
111. Yu.Ts.Oganessian, G.Gylbekian, B.Gikal, I.Kalagin, V.B.Kutner, S.Bogomolov, I.Kolesov, V.Bekhterev, I.A.Ivanenko, O.N.Borisov, A.I.Ivanenko. Status report of the U-400 Cyclotron at the FLNR JINR // Proceedings of APAC2004, Gyeongju, Korea. 2004. P. 52-54.
112. Б.Н.Гикал, Г.Г.Гульбекян, О.Н.Борисов, А.М.Ломовцев, В.Б.Зарубин, И.А.Иваненко, Н.Ю.Казаринов, В.И.Казача, В.П.Кухтин, Е.В.Ламзин, В.Н.Мельников, С.В.Пашенко, Е.В.Самсонов, О.В.Семченкова, С.Е.Сычевский, Й.Франко. Формирование магнитного поля циклотрона ДЦ-60, Препринт ОИЯИ Р9-2006-151, ОИЯИ, Дубна, 2006. 28 с.
113. I.A.Ivanenko. Design of cyclotron DC-60 magnetic field Lectures of PNPI School Accelerator Physics and Techniques, St.Petersburg, Repino, February 15-19, 2006.
114. Г.Г.Гульбекян, Й.Франко. Алгоритм синтеза и анализа характеристик магнитных структур изохронных циклотронов с цилиндрическими полюсами. Препринт ОИЯИ Р9-92-129, ОИЯИ, Дубна, 1992. 16 с.
115. B.Gikal, S.Bogomolov, S.Dmitriev, G.Gylbekian, M.Itkis, I.Kalagin, Yu.Oganessian, V.Sokolov. Dubna cyclotrons – status and plans // The 17<sup>th</sup> International conference on cyclotrons and their applications : Cyclotrons 2004. October 18-22, 2004 Tokyo, Japan. P.100-104.

116. И.А.Шелаев, С.И.Козлов, Р.Ц.Оганесян, С.Г.Фефилова. Формирование магнитного поля двухметрового изохронного циклотрона ОИЯИ, Сообщение ОИЯИ 9-3988. Дубна, 1968.
117. G.G.Gulbekian, I.V.Kolesov, V.V.Bekhterev, S.L.Bogomolov, A.A.Efremov, M.N.El-Shazly, B.N.Gikal, F.I.Ivanenko, V.B.Kutner, V.N.Melnikov, Yu.Ts.Oganessian. Axial injection system for the U-400M cyclotron with an ECR ion source. In Heavy Ion Physics, Scientific Report 1993-1994. JINR Report No. E7-95-227, Dubna, 1995. P.227-235.
118. Б.Н.Гикал, Г.Г.Гульбекян, и др., Коррекция первой гармоники магнитного поля на четырехметровом изохронном циклотроне У-400. Сообщение ОИЯИ 9-82-917. ОИЯИ, Дубна, 1982.
119. Б.Н.Гикал, Г.Г.Гульбекян, и др., Четырехметровый изохронный циклотрон тяжелых ионов У-400 с пониженными уровнями средних магнитных полей. Препринт ОИЯИ Р9-93-323, ОИЯИ, Дубна, 1993.
120. Г.Г.Гульбекян, И.А.Иваненко, А.М.Мордуев, А.В.Тихомиров. Использование корректирующих катушек для формирования изохронного поля циклотрона У-400 при пониженном уровне среднего поля. Препринт ОИЯИ Р9-95-335, ОИЯИ, Дубна, 1995.
121. Yu. Ts. Oganessian, G. G. Gulbekyan, B. N. Gikal et al.. Modernization of the U400 Cyclotron at the FLNR JINR // In: Proceedings of the 3<sup>th</sup> Asian Particle Accelerator Conference, 22 – 26 March 2004, Korea, p.p. 79 – 81.
122. С.И.Козлов, Б.А.Кленин, Р.Ц.Оганесян. Численное моделирование магнитной системы циклотрона У400М. Сообщение ОИЯИ 9-83-125, ОИЯИ, Дубна, 1983.
123. Г.Г.Гульбекян, И.А.Иваненко и др. Коррекция первой гармоники магнитного поля циклотрона У400М, Препринт ОИЯИ Р9-97-191, ОИЯИ, Дубна, 1997.
124. G. Gulbekian, I. Ivanenko, J. Franko, et al. DC-72 cyclotron magnetic field formation // In Proceedings of the 19<sup>th</sup> Russian Particle Accelerator Conference, 4 – 8 October 2004, Russia, P. 147 – 149.
125. А.М.Андриянов, Г.Г.Гульбекян, и др. Магнитное поле циклического имплантатора. Сообщение ОИЯИ 9-85-598, ОИЯИ, Дубна, 1985.
126. Б.Н.Гикал, С.Н.Дмитриев, Г.Г.Гульбекян, П.Ю.Апель, В.В.Башевой, С.Л.Богомолов, О.Н.Борисов, В.А.Бузмаков, И.А.Иваненко, О.М.Иванов, Н.Ю.Казаринов, И.В.Колесов, В.И.Миронов, А.И.Папаш, С.В.Пашенко, В.А.Скуратов, А.В.Тихомиров, М.В.Хабаров, А.П.Череватенко, Н.Ю.Язвицкий. Ускорительный комплекс ИЦ-100 для проведения научно-прикладных исследований // XX международного семинара по ускорителям заряженных частиц, Алушта, Крым, 9-15 сентября 2007. Харьков, 2007. С.33.
127. Б.Н.Гикал, Г.Г.Гульбекян, С.Н.Дмитриев, С.Л.Богомолов, В.В.Башевой, В.В.Бехтерев, О.Н.Борисов, А.А.Ефремов, И.А.Иваненко, Н.Ю.Казаринов, В.И.Казача, И.В.Колесов, В.И.Миронов, В.Н.Мельников, А.В.Тихомиров, Модернизация циклического имплантатора ИЦ-100, Препринт ОИЯИ Р9-2003-121, Дубна, 2003. 20с.
128. <http://www.vectorfields.com>
129. S.Yu.Belyaev, N.I.Doinikov et al., The КОМПОТ program package for three dimensional precision analysis of magnetostatic fields of nonlinear magnet systems // Conf. “Optimization of Finite Element Approximations”, St. Petersburg, Russia, June 25 – 29, 1995, P. 101-102.
130. A.N.Dubrovin. User’s guide MERMAID: Magnet design in two and three dimensions. SIM Limited, Novosibirsk department, Russia, 1994.
131. Ливингуд Дж. // Принципы работы циклических ускорителей. М., Изд-во иностр. Лит., 1963.
132. I.Ivanenko, G.Gulbekian, J.Franko, A.Semchenkov. The model of DC72 cyclotron magnet. The research of the sector shimming methods for obtaining the working magnetic field for light and heavy ions acceleration // In Proceedings of the 8<sup>th</sup> European Particle Accelerator Conference, 3 – 7 June 2002, Paris. С. 2349 – 2351.

133. I.A.Ivanenko. Design of DC-72 and DC-60 cyclotrons magnetic field. Lectures of PNPI School Accelerator Physics and Techniques, St.Petersburg, Repino, March 1-5, 2004.
134. W.Joho, SIN Report TM-11-4. P.21.
135. О.Н. Борисов, Б. Н. Гикал, Г.Г. Гульбекян, И.А. Иваненко, В.Н. Мельников, В.И. Миронов, А.В. Тихомиров, Е.В. Самсонов, В.В. Селезнев, А.И. Сидоров. Система вывода пучка циклотрона ДЦ-60. Препринт ОИЯИ Р9-2007-87. Дубна, 2007. 15 с.
136. Б.Н.Гикал, Г.Г.Гульбекян, О.Н. Борисов, А.М. Ломовцев, В.Б. Зарубин, И.А.Иваненко, Н.Ю. Казаринов, В.И. Казача, В.П.Кухтин, У.А.Ламзин, В.Н. Мельников, С.В. Пашенко, Е.В. Самсонов, О.В. Семченкова, С.У.Сычевский, Й.Франко. Формирование магнитного поля циклотрона DC60. Препринт ОИЯИ Р9-2006-151. Дубна, 2006. – 27 с.
137. E.V. Samsonov, B.N. Gikal, O.N.Borisov and I.A.Ivanenko. Numerical simulation of ions acceleration and extraction in DC-110 cyclotron. JINR preprint E9-2013-121, Dubna 2013. 15 p. Письма в ЭЧАЯ. 2014. Т.11, № 2. С.264-277.
138. B.Gikal, G.Gulbekyan, I.Ivanenko, T.Belyakova, O.Plyasov, V.Kukhtin, E.Lamzin, M.Larionov, B.Maximov, S.Sytchevsky. Effect of actual magnetic properties of steel on field quality in DC-60 // Сборник докладов одиннадцатого международного совещания по применению ускорителей заряженных частиц в промышленности и медицине, Санкт-Петербург, 10-14 октября, 2005. Санкт-Петербург, СПбГУ, 2005. С.224-227.
139. Т.Ф.Белякова, О.В.Илясов, В.П.Кухтин, Е.А.Ламзин, М.С.Ларионов, Б.П.Максимов, С.Е.Сычевский, А.А.Фирсов, Измерения магнитных свойств (зависимости В-Н) образцов сталей циклотрона DC-60. Технический отчет, С.-Петербург, 2004.
140. B.Gikal, G.Gulbekyan, I.Ivanenko, A.Alexeev, T.Belyakova, V.Belyakov, V.Kukhtin, E.Lamzin, A.Malkov, F.Skornyakov, S.Sytchevsky. Effect of deformations caused by the ponderomotive force of magnet system quality in cyclotron DC-60 // Сборник докладов одиннадцатого международного совещания по применению ускорителей заряженных частиц в промышленности и медицине, Санкт-Петербург, 10-14 октября, 2005. – Санкт-Петербург, СПбГУ, 2005. С.219-223.
141. Г.Г.Гульбекян,Э.Л.Иванов. Программа расчета неоднородных резонаторов и ускоряющих систем циклотронов У-400 и ИЦ-100. Сообщение ОИЯИ 9-87-495. Дубна, 1987. 9с.
142. Kilpatrick W.D. // Review of Scientific Instruments. 1957. V.28. №10. P.824.
143. R. Holsinger and C. Iselin, CERN-POISSON Program Package (POISCR) User. Guide, Geneva, August 1984.
144. Г.Н.Вялов, Ю.Ц.Оганесян, Г.Н.Флеров. Метод вывода пучка тяжелых ионов из циклотрона с азимутальной вариацией магнитного поля. Препринт ОИЯИ 1884. Дубна, 1964.
145. Б.Н.Гикал, Ю.Г.Тетерев, А.В.Тихомиров. Способ изготовления и установки на пучок ускоренных ионов графитовой фольги. Патент на изобретение №: 2073282 , МПК: H01J H05H, 1997г.
146. Б.Н.Гикал, Г.Г.Гульбекян. Выведенные пучки циклотрона У-400. Сообщение ОИЯИ Б-9-90-453, Дубна, 1990. С.375.
147. Б.Н.Гикал, Г.Г.Гульбекян, Ю.Ц.Оганесян, А.Г.Попеко. Получение высокоинтенсивных пучков тяжелых ионов для проведения экспериментов на газонаполненном сепараторе. Сообщение ОИЯИ №1(47)-91. Дубна, 1991.- с.47
148. G.G.Gulbekian, Yu.Ts.Oganessian, I.V.Kolesov, B.N.Gikal, A.M.Morduev, O.N.Borisov, A.I.Ivanenko, V.B.Kutner, V.V.Bekhterev. New development at the JINR heavy ion cyclotrons facility JINR. FLNR Scientific Report 1991 - 1992, HEAVY Ion Physics. Dubna, 1993. P.273.

149. B.N.Gikal, G.G.Gulbekyan, A.M.Morduev. The present status of the U-400 cyclotron. JINR FLNR Scientific Report 1991 - 1992, HEAVY Ion Physics, Dubna, 1993. P.284.
150. Yu.Ts.Oganessian, A.V.Yeremin, R.N.Sagaidak, O.N.Malyshev, A.G.Popeko, A.P.Kabachenko, V.I.Chepigin, J.Rohach, V.A.Gorshkov, A.Yu.Lavrentev, M.G.Itkis, G.G.Gulbekian, B.N.Gikal, A.V.Tikhomirov, V.B.Kutner and S.L. Bogomolov. FLNR JINR experiments on synthesis of superheavy nuclei with  $^{48}\text{Ca}$  beam. // Acta Physica Polonica B { \bf 30} (1999). P. 1557 - 1563.
151. Б.Н.Гикал, Г.Г.Гульбекян, В.И.Казаха, Д.В.Каманин. Расчет времени жизни углеродных перезарядных мишеней в интенсивных потоках тяжелых ионов. Препринт ОИЯИ Р9-2005-110. Дубна, 2005. 12 с.
152. E.A.Koptelov, S.G.Lebedev, A Model of Carbon Stripper Target Failure Under Ion Bombardment // Nucl. Instr.Meth. A256(1987). P. 247-250.
153. E.A.Koptelov, S.G.Lebedev. Radiation Stability of Carbon Foil Microstructure // Nucl. Instr. Meth. B42(1989). P.239-244.
154. О.Н.Борисов, Г.Г.Гульбекян, Д.Соливайс. Анализ возможности вывода пучков ионов методом перезарядки из 4-секторных циклотронов со спиральными секторами. Сообщение ОИЯИ Р9-2005-178, Дубна, 2005. 7с.
155. Г.Г.Гульбекян, Д.Соливайс, О.Н.Борисов. Анализ возможности вывода пучков ионов методом перезарядки из циклотронов с прямыми секторами (без спиральности). Сообщение ОИЯИ Р9-2005-52. Дубна 2005. 7с.
156. G.G. Gulbekyan, O.N. Borisov, V.I. Kazacha, D. Solivaijs. Extraction by Stripping of Heavy Ion Beams from AVF Cyclotrons // Giardini Naxos, Messina, Italy, 30<sup>th</sup> September – 5<sup>th</sup> October 2007. Messina, 2007. P.39.
157. G.G. Gulbekian, M.N. El-Shazly, A.V. Tikhomirov, B.N. Gikal. Beam Loss Due to the Charge Exchange in the Residual Gas of the FLNR Heavy Ion Cyclotrons // In: Proc. XVII Particle Accelerator Conf., Vancouver, Canada, 12-16 May 1997. P.3610.
158. M.N.El-Shazly, B.N.Gikal, G.G.Gulbekian, A.V. Tikhomirov. Beam Loss Due to the Charge Exchange with the Residual Gas in the FLNR Heavy Ion Cyclotrons // In: Proc. XXXI European Cyclotron Progress Meeting, Abstracts, Groningen, Netherlands, September 18-20, 1997. P.31.
159. M.N.El-Shazly, J.Franko, G.G.Gulbekian, M.V.Khabarov, A.V.Tikhomirov, O.Szollos. Modelling of the Pressure Distribution in the Cyclotron Central Region // In Proc. XV Int. Conf. on Cyclotrons and their Applications, Caen, France, 14-19 June 1998. P.254.
160. M.N.El-Shazly, G.G.Gulbekian, A.I.Ivanenko, M.V.Khabarov, A.V.Tikhomirov. Vacuum Beam Losses in the Axial Injection Systems of the FLNR Heavy Ion Cyclotrons // In Proc. VI European Particle Accelerator Conf., Stockholm, 22-26 June 1998. P.2172.
161. A. Muller and E. Salzborn // Phys. Lett., 62A, p391, 1977.
162. M.N. El-Shazly, B.N. Gikal, G.G. Gulbekian, A.V. Tikhomirov. Beam loss due to the charge exchange with the residual gas in the FLNR heavy ion cyclotrons // Proceedings of EPAC 98, Stockholm, 1998, P.2199.
163. M.N. El-Shazly, A.V. Tikhomirov, G.G. Gulbekian, P. Kováč. GENAP - the code for a pressure distribution calculation // J. Vacuum 52 (1999), P. 401.
164. А.В.Исаев, А.А.Кузнецова, А.В.Ерёмин, Б.Н.Гикал, В.Ю.Щеголев. Расчёт выходов нейтронов и гамма-квантов при работе циклотрона ДЦ-110. Сообщение ОИЯИ Р9-2011-117, Дубна, 2011. 50 с.
165. nrv.jinr.ru
166. L.J.Satkowiak P. A. DeYoung, J. J. Kolata, and M. A. Xapsos. Gamma-ray studies of the C12+C12 system // Phys. Rev. C. 1982. V.26. P.2027-2034.
167. Nguyen Van Sen, R.Darves-Blanc, J.C.Gondrand, and F.Merchez. Fusion and deeply inelastic collisions of Ne20 with Al27. // Phys. Rev. C. 1983. V.27. P.194-206.
168. www.srim.org

169. Аленицкий Ю.Г. и др. Разработки и создание облучательного комплекса «АФЛЬФА» для производства трековых мембран. Препринт ОИЯИ, Р9-2004-5, Дубна, 2004. 13 с.
170. Sunil C., Saxena A., Choudhury R.K., Pant L.M. // Nuclear Instruments and Methods in Physics Research A 534 (2004). 518–530.
171. Б.Н. Гикал, В.И. Миронов, Ю.Г. Тетерев, В.Ю. Щеголев. Выходы нейтронов из конструкционных металлов при бомбардировке тяжелыми ионами энергией 2,5 МэВ/нуклон. Препринт ОИЯИ Р9-2013-126, 10 с.; Письма в ЭЧАЯ. 2014. Т.11, № 2. С.293-301.
172. Clapier F.B. and Zaidins C. S., Neutron Dose Equivalent Rates due to Heavy Ion Beams.// Nuclear Instruments and Methods 217 (1983). P.489-494
173. Aleinikov V.E., Cherevatenko A.P., Clapier F.B. and Tsovun V.I., Neutron Radiation Field due to 6,6 MeV/amu <sup>58</sup>Ni Ions Bombarding a Thick Cu Target // Radiation Protection Dosimetry. V.11, No.4, (1985). P.245-248.
174. Б.Н.Гикал, Е.В.Горбачев, Н.Ю.Казаринов, В.И.Казача, Г.С.Казача, Н.И.Лебедев, А.А.Макаров, В.А.Мельников, С.В.Рабцун, С.В.Степанцов, А.А.Фатеев. Анализ методов получения однородного распределения частиц на мишени при облучении ее пучком ионов криптона, выведенным из имплантатора ИЦ-100. Препринт ОИЯИ Р9-2002-240. Дубна, 2002. 14 с.
175. Б.Н.Гикал, Е.В.Горбачев, Н.Ю.Казаринов, В.И.Казача, Г.С.Казача, Н.И.Лебедев, А.А.Макаров, В.А.Мельников, В.И.Миронов, С.В.Рабцун, А.А.Фатеев. Система сканирования пучка тяжелых ионов // Письма в ЭЧАЯ. Дубна. 2005. Т.2, №3(126). С.97-101.
176. V.V.Aleinikov, P.G.Bondarevko, A.I.Kruglov, A.S.Nikiforov, S.V.Pashchenko. Control system for IC-100 Cyclotron // Proceeding RUPAC-2004, 4-9 October 2004, Dubna. С. 165-167.
177. A.Efremov, V.Bekhterev, S.Bogomolov et al. Status of the ion source DECRIS-SC // Review of Scientific Instruments 77, 03A320, 2006.
178. T.Nakagava, J.Arje et al. Production of highly charged metal ion beams from organic metal compounds at RIKEN 18 GHz ECRIS // NIM, A396 (1997) P. 9-12.
179. V.Aleksandrov, A.Fateev, B.Gikal. Lens without poles: conceptual design and possibilities of use in the channel of scanning of cyclotron beams // Письма в ЭЧАЯ. 2008. Т.5, №7(149). С.60-63.
180. Ю.Г.Тетерев, Б.Н.Гикал, О.М.Иванов, Г.А.Кононенко, В.И.Миронов. Монитор контроля плотности потока тяжелых ионов при получении пленочных полимерных материалов, основанный на регистрации протонов отдачи // ПТЭ, 2009, №2, с. 9-13.
181. B.N.Gikal, M.G.Itkis, S.N.Dmitriev, G.G.Gulbekian, J.Franko, K.K.Kadyrzhanov, A.A.Arzumanov, A.N.Borisenko, S.N.Lissukhin. The project of a specialized accelerator DC-60 designed for the interdisciplinary laboratory complex, L.N.Gumilev Euroasia state university // Proceeding 3<sup>rd</sup> International Conference Nuclear and radiation physics, 4-7 June 2001, Almaty, Kazakhstan. 2001. P.9-28.
182. Б.Н.Гикал, М.Г.Иткис, С.Н.Дмитриев, Г.Г.Гульбекян, Й.Франко, К.К.Кадыржанов, А.А.Арзуманов, А.Н.Борисенко, С.Н.Лысухин. Проект циклотрона с плавной вариацией энергии ионов ДЦ-60 для Междисциплинарного Лабораторного комплекса при Евразийском государственном университете им Л.Н.Гумилева // 4 Международная конференция по ядерной и радиационной физике, Алматы. 2003.
183. Б.Н.Гикал, Г.Г.Гульбекян, В.В.Бехтерев, А.Н.Борисенко, Н.Ю.Казаринов, В.И.Казача, И.В.Калагин, И.В.Колесов, Н.И.Лебедев, С.Н.Лысухин, В.Н.Мельников, А.А.Фатеев. Канал для прикладных исследований на пучках ионов низких энергий циклотрона ДЦ-60. Препринт ОИЯИ Р9-2006-38. Дубна, 2006. 12 с.
184. O.N.Borisov, B.N.Gikal, G.G.Gulbekyan, I.A.Ivanenko, V.N.Melnikov, V.I.Mironov, A.V.Tihomirov, E.V.Samsonov, V.V.Seleznev, A.I.Sidorov. Beam extraction system from

- DC60 cyclotron // Тезисы докладов XX международного семинара по ускорителям заряженных частиц, Алушта, Крым, 9-15 сентября 2007. Харьков, 2007. С.87.
185. O.Borisov, B.Gikal, G.Gulbekyan, I.Ivanenko, V.Melnikov, E.Samsonov, V.Seleznev, A.Sidorov, A.Tikhomirov. Beam extraction system from DC60 cyclotron // 18<sup>th</sup> International conference on cyclotrons and their applications, Giardini Naxos, Messina, Italy, 30<sup>th</sup> September – 5<sup>th</sup> October 2007. Messina, 2007. P.24-26.
186. Б.Н.Гикал, И.А.Иваненко, Н.Ю.Казаринов, В.И.Миронов, Е.В.Самсонов Коррекция вертикального смещения выведенного пучка при пусконаладочных испытаниях циклотрона ДЦ-110 // Письма в ЭЧАЯ. 2014, Т.11, № 2. С.254-263. Препринт ОИЯИ Р9-2013-125, 11 с.
187. Гикал Б.Н., Горбачев Е.В., Лебедев Н.И., Фатеев А.А. Система сканирования пучка тяжелых ионов ускорителя ДЦ-110 // Письма в ЭЧАЯ. 2010. Т.7. №7(163). С. 886-890.
188. Воинов В.А.. Эфферентная терапия. Мембранный плазмаферез. // М.: ОАО «Новости». 2010. 368с.
189. N.Hazewindus et al, The magnetic analogue method as used in the study of a cyclotron central region // NIM, 118(1974). P.125.