

93953

ОБЪЕДИНЕННЫЙ ИНСТИТУТ ЯДЕРНЫХ ИССЛЕДОВАНИЙ

9-2008-150

И-185

На правах рукописи  
УДК 621.384.633.5

ИВАНЕНКО  
Иван Анатольевич



ВЫБОР МАГНИТНОЙ СТРУКТУРЫ И ФОРМИРОВАНИЕ  
МАГНИТНОГО ПОЛЯ ИЗОХРОННОГО ЦИКЛОТРОНА  
ТЯЖЕЛЫХ ИОНОВ ДЦ-60

Специальность: 01.04.20 — физика пучков заряженных частиц  
и ускорительная техника

Автореферат диссертации на соискание ученой степени  
кандидата технических наук

С 345 г 1

Дубна 2008

## ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ


Работа выполнена в Лаборатории ядерных реакций им. Г.Н.Флерова  
Объединенного института ядерных исследований,

- Научный руководитель: кандидат технических наук,  
старший научный сотрудник  
Гикал Борис Николаевич
- Официальные оппоненты: доктор физико-математических наук,  
профессор  
Онищенко Леонид Михайлович
- кандидат технических наук,  
старший научный сотрудник  
Рябов Герман Аркадьевич
- Ведущая организация: Научно-исследовательский институт  
электрофизической аппаратуры,  
С.-Петербург

Защита состоится " \_\_\_\_\_ " \_\_\_\_\_ 2008 г. в " \_\_\_\_\_ " на заседании  
диссертационного совета Д-720.001.02 в Объединенном институте ядерных  
исследований, г. Дубна Московской области.

С диссертацией можно ознакомиться в научной библиотеке Объединенного  
института ядерных исследований.

Автореферат разослан " 7 " 11 2008 г.

Ученый секретарь диссертационного совета  В.А. Артыухин

### Актуальность темы

В настоящее время ускорители заряженных частиц широко используются во многих странах мира. Одно из наиболее динамично развивающихся направлений в ускорительной технике – разработка и создание ускорителей циклотронного типа, позволяющих проводить исследования на высокоинтенсивных пучках тяжелых ионов в широком диапазоне атомных масс и энергий. Область использования пучков тяжелых ионов представляет большие возможности в решении фундаментальных научных проблем и важнейших прикладных задач.

Использование пучков ускоренных тяжелых ионов низких и средних энергий является одним из основных методов исследований в области ядерной физики. Ядерные реакции с тяжелыми ионами позволяют исследовать взаимодействие сложных систем, состоящих из большого числа нуклонов, в которых проявляются коллективные эффекты, связанные со свойствами ядерной материи – кулоновскими и поверхностными силами, сжимаемостью и вязкостью ядерного вещества, свойствами ядерной поверхности и плотности. Тяжелые ионы представляют также уникальные возможности для исследований в области атомной физики, квантовой электродинамики, для проверки идей о существовании сверхтяжелых атомов, сверхплотных ядер и др.

Большие перспективы связаны с использованием тяжелых ионов в целом ряде научно-технических и прикладных областей. Одним из быстро развивающихся направлений применения тяжелых ионов является получение с их помощью трековых мембран, используемых в настоящее время в различных областях науки, техники и производства. Это направление появилось в результате развития техники твердотельных детекторов, применяемых в ядерно-физических исследованиях. Трековые мембраны производятся путем облучения тяжелыми ионами полимерных пленок с последующим травлением участков полимера вдоль следов ионов. Уникальные свойства трековых мембран, а именно высокая селективность, однородная форма пор и др., позволяют использовать их в процессах ультра- и микрофильтрации при очистке газовых и жидких сред с эффективностью, не доступной для других фильтрующих материалов. Особенно перспективны трековые мембраны при разделении бактериальных и вирусных суспензий, применяемых в биомедицинских исследованиях, при очистке технологических сред, при производстве изделий микроэлектроники, при холодной пастеризации жидких продуктов, при удалении микрофлоры из питьевой воды и др.

В Лаборатории ядерных реакций ОИЯИ создан изохронный циклотрон тяжелых ионов ДЦ-60, предназначенный для проведения прикладных и научных исследований на пучках ускоренных ионов от Li до Xe до энергий от 0.35 до 1.77 МэВ/нуклон [1]. Одним из направлений использования циклотрона является производство трековых мембран. Циклотрон спроектирован и построен для междисциплинарного научно-исследовательского комплекса, г. Астана, Казахстан. Одним из составных элементов циклотрона, во многом определяющим его параметры, является электромагнит, создающий магнитное поле, ведущее и

Объединенный институт  
ядерных исследований  
БИБЛИОТЕКА

фокусирующее ускоряемый пучок ионов. Электромагнит циклотрона ДЦ-60 должен обеспечивать плавную регулировку энергии пучка за счет изменения уровня поля. Кроме того, электромагнит должен отвечать современным требованиям, предъявляемым к уровню энергопотребления, размерам магнитопровода, а также уровню сложности настройки рабочих режимов.

Диссертация является обобщением работ, выполненных в соответствии с научно-техническими планами ЛЯР ОИЯИ.

#### **Цель работы:**

- Выбор и создание магнитной структуры изохронного циклотрона тяжелых ионов ДЦ-60 для ускорения пучков тяжелых ионов от Li до Xe до энергий от 0.35 до 1.77 МэВ/нуклон. Магнитная структура циклотрона должна обеспечивать плавную регулировку энергии ускоренных пучков в пределах  $\pm 25\%$  от номинальной за счет изменения уровня среднего магнитного поля от 1.25 Тл до 1.65 Тл, обеспечивая при этом фокусировку и устойчивость ускорения пучков ионов.
- Разработка и использование технологических решений, упрощающих технологию изготовления магнита, обеспечивающих его оптимальную компоновку и энергопотребление.
- Формирование магнитного поля циклотрона ДЦ-60 на основе аналитического, численного и экспериментального методов. Проверка результатов формирования поля в ходе экспериментов по ускорению пучков заряженных частиц.

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

1. Разработана магнитная структура изохронного циклотрона тяжелых ионов ДЦ-60 для ускорения пучков тяжелых ионов от Li до Xe до энергий от 0.35 до 1.77 МэВ/нуклон. Магнитная структура создает распределение среднего поля с необходимо малым радиальным ростом при плавной регулировке уровня поля от 1.25 Тл до 1.65 Тл, что позволяет регулировать энергию ускоренных пучков в пределах  $\pm 25\%$  от номинальной.

2. Магнитная структура создана на основе нового технологического решения заключающегося в использовании плоских секторов с прямыми боковыми границами, радиально смещенных относительно центра полюса магнита, что создало структуру с изменяющейся азимутальной протяженностью секторов и обеспечило:

- 2.1 формирование изохронной формы магнитного поля на уровне 1.43 Тл только за счет выбранной формы секторов,
- 2.2 необходимо малое (в пределах 70 Гс) изменение радиального роста среднего магнитного поля по радиусу при варьировании поля от 1.25 Тл до 1.65 Тл,
- 2.3 возможность использования маломощной системы корректирующих катушек.

Предложенное решение значительно упростило технологию изготовления магнита и снизило его стоимость.

3. Разработана новая конструкция корректирующих катушек. В предложенной конструкции применены многovitковые катушки с малой плотностью и величиной (не более 15А) тока в проводнике. Это позволяет обеспечить компактную конструкцию вводов катушек с малыми потерями и использовать маломощные источники питания. В ходе экспериментов по ускорению пучков ионов показано, что при оптимизации магнитного поля корректирующими катушками, максимальная мощность, выделяемая катушками на полюс, не превышает 400Вт. Это позволило проводить эксплуатацию системы корректирующих катушек без использования водяного охлаждения, теплопередача на полюс магнита обеспечивает нормальный температурный режим корректирующих катушек.

4. Малая угловая протяженность сектора в центре циклотрона (от  $36^\circ$ ) позволила создать ускоряющую систему с увеличенной угловой протяженностью дуантов в центре, что обеспечивает эффективный темп ускорения пучков ионов на первых оборотах.

5. Разработана методика комплексной коррекции искажений магнитного поля циклотрона возникающих как вследствие неточностей производства и монтажа магнита так и при установке пассивного магнитного канала. Коррекция позволила снизить амплитуду суммарной первой гармоники до уровня 4Гс и компенсировать искажение среднего магнитного поля, возникающее при установке магнитного канала.

6. Сформировано магнитное поле изохронного циклотрона ДЦ-60 с необходимой точностью. В ходе пуско – наладочных работ на циклотроне ДЦ-60 осуществлено ускорение пучков ионов азота, неона, аргона, криптона. Получен коэффициент транспортировки пучка от центра до конечного радиуса до 95% ( $^{14}\text{N}^{+2}$ ,  $V=1.43\text{Тл}$ ).

#### **Апробация работы**

Основные результаты диссертации докладывались на семинарах ЛЯР ОИЯИ, Дубна и были представлены на международных конференциях:

- "The 8<sup>th</sup> European Particle Accelerator Conference"(Paris, France 2002);
- "The 19<sup>th</sup> Russian Particle Accelerator Conference " (Dubna, Russia 2004);
- "The 17<sup>th</sup> International Conference on Cyclotrons and Their Applications" (Tokyo, Japan, 2004); "The 11<sup>th</sup> International Conference on Charged Particle Accelerators Applied in Medicine and Industry" (St.-Petersburg, Russia, 2004);
- "The 38<sup>th</sup> PNPI Winter Schools on Nuclear and Particle Physics, (St.-Petersburg, Russia 2004);
- "The 40<sup>th</sup> PNPI Winter Schools on Nuclear and Particle Physics, (St.-Petersburg, Russia 2006);
- "The 18<sup>th</sup> International Conference on Cyclotrons and Their Applications" (Catania, Italy, 2007);

#### **Публикации**

Основное содержание диссертации и результаты испытаний опубликованы в 10 работах.

### Объем и структура диссертации

Диссертация состоит из введения, четырех глав, заключения и списка литературы. Список литературы содержит 57 наименований. Диссертация представлена на 111 страницах машинописного текста, включая 104 рисунка и 16 таблиц.

### СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении показана актуальность использования изохронных циклотронов в области фундаментальных научных исследований и научно-технических областях. Рассмотрены перспективы применения циклотронов в прикладных областях, в частности в производстве трековых мембран.

В первой главе представлен комплексный метод формирования магнитного поля, примененный при создании изохронного циклотрона ДЦ-60 [2]. Комплексный метод включает в себя предварительный анализ и выбор основных размеров магнитной структуры, проведение оптимизации и формирования магнитного поля при помощи трехмерных расчетов и измерений, расчет и анализ динамики пучка в процессе ускорения в сформированном магнитном поле.

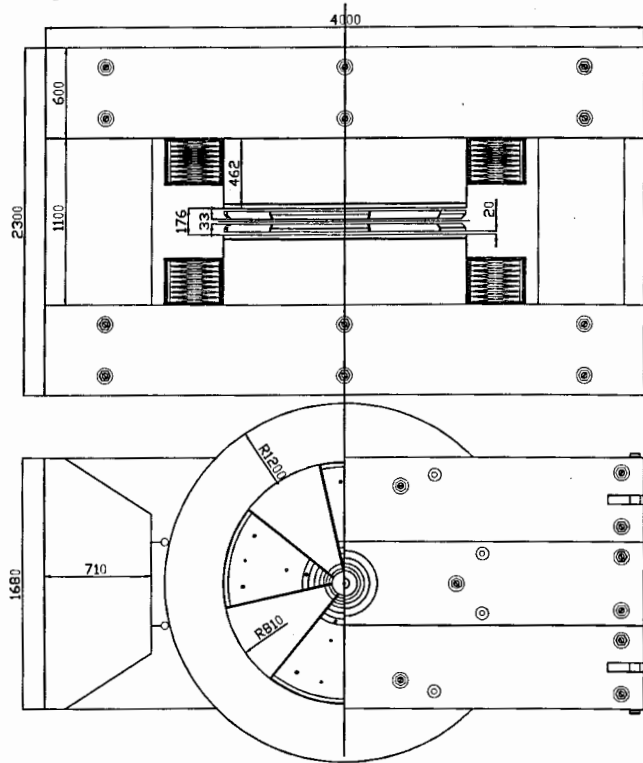


Рис. 1 Общий вид и основные размеры электромагнита циклотрона ДЦ-60

На первом этапе проведена комплексная компоновка и оптимизация основных узлов циклотрона ДЦ-60, определены их характеристики, размеры и конструктивные особенности. Оптимизация осуществлялась на основе закономерностей магнитных структур циклотронов компактного типа, полученных расчетным и экспериментальным путем при работе с модельными электромагнитами и при создании электромагнитов циклотронов, таких как У200, У400, МЦ400, ИЦ100, ДЦ-72, У400Р. Аналитическая форма закономерностей позволяет простыми расчетными средствами на начальном этапе формирования магнитной структуры циклотрона достаточно точно определить и оптимизировать ее основные характеристики. Полученные в ходе компоновки и оптимизации данные явились исходными параметрами магнитной структуры циклотрона ДЦ-60 для последующего моделирования на основе трехмерных компьютерных расчетов.

Таблица 1 Основные параметры электромагнита циклотрона ДЦ-60

Тип ярма	Ш-образный магнит
Габаритные размеры магнитопровода	4,0×1,68×2,3 м
Диапазон рабочего магнитного поля	1,25 – 1,65 Тл
Диаметр полюса	1620 мм
Число секторов на полюсе	4
Межполюсное пространство	176 мм
Межсекторное пространство	33 мм
Вес магнита	≈ 100 т
Максимальная мощность основной обмотки	≈ 45 кВт
Максимальная мощность корректирующих катушек	≈ 1.5 кВт

Современные компьютерные программы, такие как TOSCA, КОМПОТ, MERMAID позволяют проводить трехмерные расчеты магнитных полей с высокой точностью. Компьютерное моделирование магнитной структуры сопровождается расчетами динамики пучков при ускорении в нескольких характерных рабочих режимах. Итерационная 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 проводится 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 отметить задачу по компенсации влияния пассивного магнитного канала, использующегося 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 ДЦ-60 были внесены данные измерений магнитных свойств стали -  $\mu(B)$ , применяемой в производстве элементов магнитопровода, что значительно повысило точность расчетов [5]. В ходе компьютерного моделирования проведен анализ и учтена деформация элементов магнитопровода под действием магнитного поля [4].

В ходе экспериментальной части комплексного метода проведены измерения распределения магнитного поля циклотрона, осуществлена коррекция ошибок, связанных с производством и монтажом электромагнита.

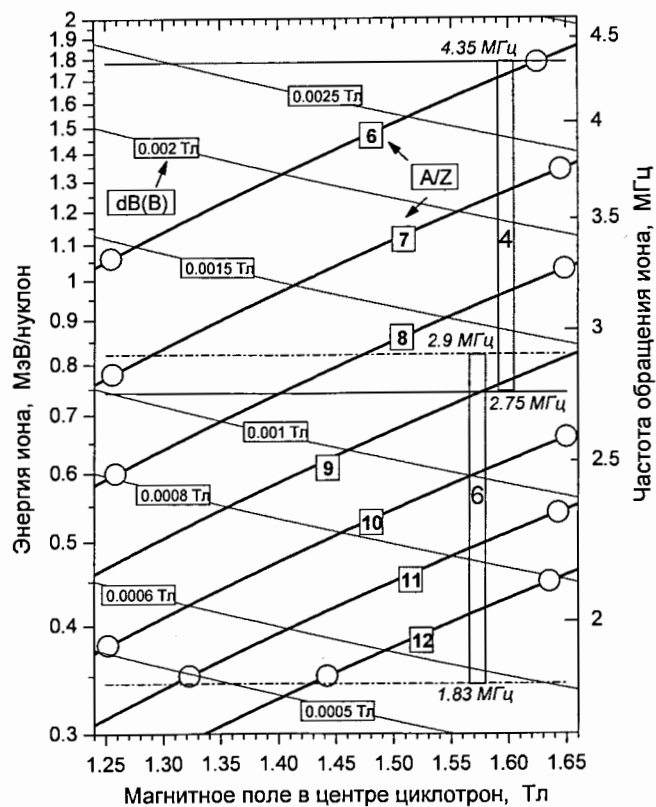


Рис.2. Рабочая диаграмма циклотрона ДЦ-60

Изохронный циклотрон ДЦ-60 предназначен для ускорения пучков тяжелых ионов с отношением массы к заряду  $A/Z$  в диапазоне  $6 \div 12$  до энергий от 0.35 до 1.77 МэВ/нуклон. Магнитная структура циклотрона позволяет осуществлять плавную регулировку энергии ускоренных пучков в пределах  $\pm 25\%$  от номинальной. Это достигается за счет изменения уровня среднего магнитного поля от 1.25Тл до 1.65Тл, без нарушения фокусировки и эффективности ускорения пучков ионов.

На рисунке 2 представлена рабочая диаграмма циклотрона ДЦ-60, которая связывает среднее магнитное поле в центре циклотрона, энергию пучка на радиусе вывода  $R=0.7$ м, частоту обращения ионов и кратность ускоряющего ВЧ поля. Условия изохронизма при ускорении ионов с  $A/Z = 6 \div 12$  в диапазоне уровней магнитного поля 1.25Тл  $\div$  1.65Тл обеспечиваются формированием радиально растущего на  $5 \div 30$ Гс среднего магнитного поля.

На диаграмме линии, обозначенные цифрами  $6 \div 12$ , показывают соотношение между уровнем магнитного поля в центре циклотрона, энергией ускорения пучков до радиуса вывода из циклотрона  $R_{ext} = 0.7$ м и частотой обращения ускоряемого иона с соответствующим отношением массы к заряду  $A/Z$  от 6 до 12. Линиями, обозначенными как 0.0005Тл  $\div$  0.0025Тл, показана величина роста среднего магнитного поля от центра циклотрона до конечного радиуса, необходимого для выполнения изохронных условий ускорения пучков заряженных частиц. По вертикали рабочая диаграмма разбита на две области, соответствующие режимам ускорения на 4 или 6 гармониках ускоряющего ВЧ поля. Граничные значения рабочей области циклотрона на диаграмме обозначены кружками для каждого типа ионов с соответствующими значениями  $A/Z$ .

Фокусирующие свойства магнитного поля обеспечиваются 4х - секторной магнитной структурой рабочей области циклотрона, создающей необходимый уровень вариации магнитного поля. Частоты свободных колебаний иона в основной области ускорения (0.2м - 0.7м) лежат в диапазоне  $1.01 < Q_z < 1.02$  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.

Для удобства численного моделирования и формирования магнитного поля выбрана номинальная рабочая точка, соответствующая уровню магнитного поля  $B_0 = 1.43$ Тл. В этой точке изохронное поле, предназначенное для ускорения частиц с отношением массы к заряду  $A/Z=7$ , формируется только за счет железных масс.

Работа циклотрона в широком диапазоне вариации основного магнитного поля предполагает наличие оперативной подстройки режима ускорения при помощи корректирующих катушек. Для этих целей в электромагните циклотрона ДЦ-60 используются шесть радиальных и четыре азимутальных корректирующих катушек, таблица 2. Максимальный ток питания корректирующих катушек 15А, обеспечиваются источниками тока с коэффициентом стабилизации  $10^{-4}$ . Радиальные корректирующие катушки № 2 и 6 имеют независимые источники питания для верхней и нижней обмоток. Противоположное включение обмоток

этих катушек обеспечивает коррекцию магнитной медианной плоскости циклотрона. Наибольший вклад радиальные, корректирующие катушки призваны вносить при работе на верхнем, 1.65Тл, и нижнем, 1.25Тл, уровнях магнитного поля, где форма поля наиболее отличается от изохронной.

Для оперативной подстройки положения центров орбит пучка при ускорении используются две сборки азимутальных корректирующих катушек. Каждая сборка состоит из двух катушек, расположенных симметрично относительно центра циклотрона в долинах на радиусах 195мм - 275мм.

Таблица 2. Основные параметры радиальных и азимутальных корректирующих катушек циклотрона ДЦ-60

№ катушки	Азимутальные	1	2в	2н	3	4	5	6в	6н
Кол-во витков в катушке	2×28	2×40	40	40	2×40	2×40	2×40	40	40
Средний радиус, мм	195 - 275	179	335	335	455	558	637	718	718
Мощность на полюс, Вт	25	38	71	71	97	118	135	152	152

Численные расчеты и моделирование магнитной структуры циклотрона ДЦ-60 проведены в тесном сотрудничестве расчетных групп ЛЯР и НИИЭФА на базе программного комплекса КОПРОТ [3,6,7,8]. Компьютерное формирование магнитного поля циклотрона ДЦ-60, включает в себя создание компьютерной модели электромагнита, проведение расчетов трехмерного распределения магнитного поля, оптимизацию геометрии элементов магнитопровода.

Первым этапом расчетов явилась оптимизация размеров магнитопровода, в ходе которой окончательно выбраны размеры стоек и балок, обеспечивающие оптимальное соотношение массы и уровня насыщения стали при максимальном токе возбуждения.

На втором этапе расчетов осуществлялось формирование изохронного распределения магнитного поля в номинальной рабочей точке, соответствующей изохронным условиям ускорения частицы с  $A/Z=7$  в магнитном поле на уровне  $B_0=1.43$ Тл. Необходимая форма изохронного распределения поля получена из анализа динамических характеристик расчетного магнитного поля, рисунки 3 и 4.

Аналитический расчет и численное моделирование магнитной структуры рабочей области циклотрона в целом можно свести к трем основным шагам:

- формирование магнитного поля на внешних радиусах в области вывода пучков из циклотрона
- формирование магнитного поля в центральной области циклотрона
- формирование изохронного распределения магнитного поля в основной области ускорения

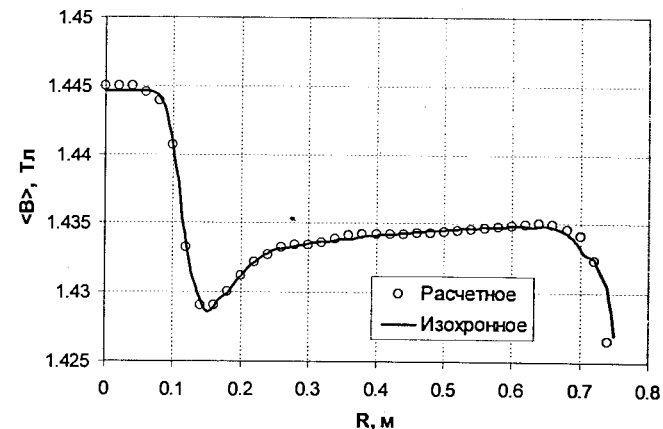


Рис.3. Сравнение изохронного и сформированного расчетным путем среднего магнитного поля для номинальной рабочей точки ( $A/Z=7$ ,  $B_0=1.43$ Тл).

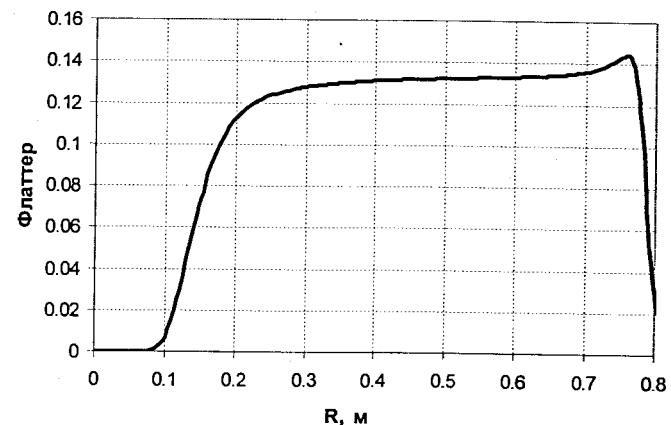


Рис. 4 Флаттер сформированного магнитного поля на уровне 1.43Тл.

Формирование поля на внешних радиусах циклотрона ДЦ-60 осуществлено путем подбора формы фаски внешней стороны сектора. Использование такой фаски дает возможность продлить радиальный рост поля, и увеличить рабочую область ускорения. Вместе с тем, наличие фаски приводит к росту флаттера в районе последних оборотов и может привести к нежелательным резонансам. Расчетным путем были подобраны оптимальные угол  $45^\circ$  и глубина фаски 28x28мм, позволившие максимально приблизиться к изохронной форме среднего поля и не допустить резонансных значений свободных колебаний ионов вплоть до предельного радиуса орбиты 713мм.

Наиболее сложной задачей при формировании магнитного поля является оптимизация геометрии центральной области электромагнита. Центральная область характеризуется наличием сильных градиентов магнитного поля и участков магнитной цепи, находящихся в сильном насыщении. В связи с этим возникают две взаимозависимые задачи:

- Формирование изохронного распределения поля в центральной области для номинальной рабочей точки.
- Обеспечение соответствия темпа изменения магнитного поля в центре с темпом изменением магнитного поля в основной области ускорения при варьировании уровня поля от 1.25Тл до 1.65Тл.

Комплексный, итерационный подход при формировании поля в центральной области циклотрона ДЦ-60 позволил найти приемлемое решение обеих задач. Магнитное поле в центральной области сформировано за счет подбора торцевого профиля центральных пробок и формы центральных колец.

Формирование изохронного распределения магнитного поля в номинальной рабочей точке проведено за счет подбора геометрии секторных сборок и элементов центральной области. Точность формирования поля лучше, чем  $10^{-3}$ . Окончательная форма секторных сборок имеет плоскую поверхность и прямые боковые границы, рисунок 5. Для формирования магнитного поля в центральной области секторная сборка имеет небольшое изменение высоты (аксиальная обработка со стороны медианной плоскости).

Результаты расчетов и измерений распределения магнитного поля в рабочей области циклотрона ДЦ-60 легли в основу подробного анализа динамики пучков ионов в процессе ускорения. Анализ показал, что фокусирующие свойства сформированного магнитного поля являются достаточными для ускорения пучков ионов без потерь. Анализ динамики пучков проводился для нескольких характерных режимов ускорения параллельно этапам формирования магнитного поля. Исследование динамики пучка ионов с  $A/Z = 7$  при ускорении в сформированном магнитном поле 1.43Тл (номинальная рабочая точка, рисунок 3) показало, что дрейф фазы, вызванный отличием сформированного магнитного поля от изохронного распределения, находится в пределах  $\pm 2^\circ$ , что может рассматриваться как очень хороший результат. Для остальных режимов ускорения, прежде всего на нижнем (1.25Тл) и верхнем (1.65Тл) уровнях магнитного поля, форма среднего магнитного поля оптимизируется при помощи концентрических катушек для обеспечения устойчивого ускорения пучков ионов.

Составной частью системы вывода циклотрона ДЦ-60 является фокусирующий магнитный канал. Конструктивно канал расположен в непосредственной близости от края секторов, 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. В случае циклотрона ДЦ-60 при установке магнитного канала среднее магнитное поле изменяется от  $\approx +5Гс$  в центре циклотрона до  $\approx -18Гс$  к максимальному радиусу области ускорения. Значение амплитуды первой гармоники магнитного поля вырастает от 0Гс в центре циклотрона до 45Гс на

конечном радиусе. Направление фазы первой гармоники строго в противоположную сторону от места размещения канала. Компенсация влияния магнитного канала осуществляется посредством установки боковых шимм на сектора, в области которых расположен магнитный канал.

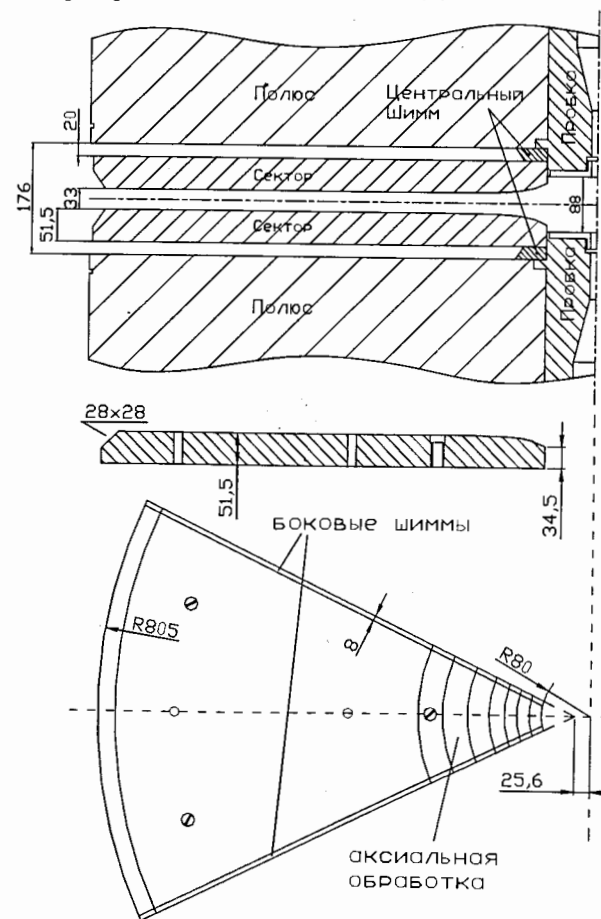


Рис.5 Размеры межполюсного зазора. Форма и основные размеры секторной сборки

Во второй главе представлены основные технические характеристики электромагнита циклотрона ДЦ-60. Рассмотрены конструктивные особенности электромагнита и его составных элементов. Электромагнит имеет «Ш» - образную форму и состоит из ярма, полюсных сборок, обмотки возбуждения и корректирующих катушек. Габаритные размеры электромагнита 4000×1680×2300мм при общей массе 103.5Т. Изохронное распределение

магнитного поля в рабочем зазоре в 176мм создается при помощи четырех пар прямолинейных секторов высотой 51.5мм. Сектора имеют угловую протяженность относительно центра электромагнита от  $36^\circ$  на внутреннем радиусе сектора  $R=80\text{мм}$  до  $50^\circ$  на внешнем радиусе сектора  $R=805\text{мм}$ . Аксиальный профиль секторов – плоский с фасками на внутреннем и внешнем радиусах. Зазор между секторами 33мм. Каждый сектор оснащен боковыми съемными шиммами, которые являются частью секторной сборки. Секторные шиммы представляют собой пластины, шириной 8мм, повторяющие аксиальный профиль сектора. Шиммы устанавливаются по бокам сектора на штифтах и крепятся винтами. Азимутальная или аксиальная обработка боковых секторных шимм позволяет вносить необходимую коррекцию в распределение магнитного поля в процессе окончательного формирования изохронных условий ускорения.

Обмотка возбуждения состоит из 2 катушек. В каждой катушке размещено по 320 витков, разбитых на 8 секций, по 40 витков в каждой секции. В качестве проводника используется медная труба квадратного сечения  $15 \times 15 \text{ мм}^2$  с отверстием для охлаждающей воды диаметром 8 мм. Каждая из 16 секций обмотки образует отдельную ветвь в системе охлаждения электромагнита.

В рабочем зазоре электромагнита циклотрона между секторами и полюсом расположены две сборки азимутальных корректирующих катушек и шесть пар радиальных корректирующих катушек, позволяющих при изменении режима ускорения циклотрона оперативно подстраивать магнитное поле. Катушки намотаны медным проводником прямоугольного сечения  $1,99 \times 5,94 \text{ мм}^2$ , по 64 витка в каждой катушке. Конструктивно корректирующие катушки на каждом полюсе размещены в алюминиевом блоке, расположенном в пространстве в 20мм между полюсом и секторами. Теплоотвод с корректирующих катушек осуществляется за счет трубок водяного охлаждения, расположенных на поверхности блока.

Особенностью электромагнита является поворот осей полюсныхборок относительно ярма на угол  $13^\circ$ . Такое конструктивное решение применено для удобства размещения резонаторов ВЧ системы. Электромагнит спроектирован таким образом, что его составные элементы имеют массу не более 10 тонн. Это позволило провести транспортировку электромагнита при помощи автотранспорта в г.Дубна, для формирования поля на испытательном стенде ОИЯИ и в г.Астана, Казахстан, для окончательной сборки.

Представлены магнитные свойства и химический состав образцов стали, использованной для изготовления составных частей магнитопровода циклотрона ДЦ-60. Измеренные зависимости магнитных свойств стали, используемой в производстве магнитопровода циклотрона ДЦ-60 были применены на финальной расчетной стадии формирования магнитного поля. 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.

Определение допусков на изготовление электромагнита циклотрона сформировано на основании аналитических оценок и численных расчетов влияния искажений магнитного поля на динамику пучков. С другой стороны,

определяющим фактором в формировании допусков являются промышленные квалитеты 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  $3 \div 4 \text{ Гс}$ . 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.

Проведены замеры основных геометрических размеров магнитопровода при сборке электромагнита на испытательном стенде ОИЯИ. По результатам замеров все тестовые размеры лежат в рамках требований на точность сборки электромагнита. Полученные данные замеров легли в основу требований на сборку электромагнита в г. Астана, республика Казахстан.

Приведены результаты расчета деформации элементов магнитопровода под действием магнитного поля. Основное влияние на магнитное поле оказывает эффект схождения полюсныхборок под действием магнитного поля. При максимальном уровне среднего магнитного поля 1.65Тл в зависимости от усилий затяга соединительных болтов и шпилек расчетная величина схождения составляет 0.2мм – 0.3мм. По результатам расчетов определено, что при схождении полюсныхборок электромагнита ДЦ-60 на 0.2мм уровень среднего магнитного поля возрастает на 12 – 15Гс, что легко компенсируется радиальными корректирующими катушками. Влияние изменения формы магнитного поля при таком схождении полюсныхборок на динамику пучка несущественно.

В ходе стендовых испытаний электромагнита проведены замеры изменения расстояния между полюснымиборками при включенном магнитном поле на уровне 1.65Тл. В силу того, что в собранном состоянии электромагнита поверхность полюса закрыта блоком корректирующих катушек, изменение межполюсного зазора определялось по замерам расстояния между секторами. Замеры проводились по внешним краям секторов при помощи специального калибра и немагнитных щупов. Результаты замеров показали, что при включении магнитного поля до уровня 1.65Тл расстояние между секторами уменьшается на 0.3 – 0.35мм. Разброс в 0.05мм не оказывает существенного влияния на распределение магнитного поля.

**Третья глава посвящена** этапу измерений и формирования магнитного поля изохронного циклотрона ДЦ-60. Для окончательного формирования магнитного поля электромагнит циклотрона, система электропитания и охлаждения были установлены на испытательном стенде ОИЯИ. Проведение измерений магнитного поля осуществлялось посредством специально разработанной автоматической системы магнитных измерений.

Система магнитных измерений состоит из магнитометра, компьютера и управляющей программы, блока с пневмораспределителями и компрессора.



Магнитометр представляет собой штангу из немагнитного материала длиной 2240мм, с размещенными на ней восемью датчиками Холла. Датчики Холла обеспечивают относительную точность измерения магнитного поля не хуже  $\pm 10^{-4}$ . Штанга закреплена на зубчатом колесе, опирающемся на нижний полюс. Центровка штанги осуществляется посредством оси, установленной на центральной пробке нижнего полюса. Измерения проходят в цилиндрической системе координат с центром, соответствующим центру электромагнита. Штанга последовательно перемещается в азимутальном и радиальном направлениях, останавливаясь в фиксированных позициях для измерения тока с датчиков Холла. Азимутальное и радиальное движения осуществляются посредством пневматических двигателей. Каждое перемещение контролируется при помощи концевиков – оптопар. Азимутальный диапазон перемещения штанги системы магнитных измерений может принимать одно из значений  $90^\circ$  или  $360^\circ$ , шаг азимутального перемещения -  $1^\circ$  или  $2^\circ$ . Радиальный диапазон составляет от 0мм до 1120мм с шагом 10мм или 20мм.



Рис. 6 Размещение системы магнитных измерений в рабочей области электромагнита.

Механическая часть магнитометра обеспечивает погрешность позиционирования по азимуту не хуже  $0.03^\circ$ . Для радиального движения погрешность позиционирования не хуже 0.3мм. Время, затрачиваемое на прохождение одного цикла измерений, составляет от 45 минут до 6 часов в зависимости от параметров азимутального и радиального перемещений. Цикл измерений проходит в автоматическом режиме под управлением специально

созданной компьютерной программы. Магнитометр оборудован дополнительным, мониторинг датчиком Холла. Датчик стационарно установлен в области рабочего зазора и обеспечивает мониторинг магнитного поля во времени. Кроме того, мониторинг датчик используется для повторной установки требуемого уровня поля.

В ходе подготовки к магнитным измерениям при помощи численных методов определены функции влияния как боковых секторных так и центральных торцевых шимм. Математическая обработка данных измерений с использованием функций влияния позволила получить необходимую форму обработки шимм для коррекции отклонений измеренного магнитного поля от расчетов.

Проведенные измерения магнитного поля на электромагните циклотрона ДЦ60 показали хорошее совпадение результатов измерения и расчетов, рисунок 7. В связи с этим коррекция среднего магнитного поля при помощи секторных боковых шимм не потребовалась. В случае номинальной рабочей точки, 1.43 Тл, отклонение в радиальном распределении измеренного среднего магнитного поля от расчетного не превышает 10Гс в основной области ускорения и 105Гс в центральной части, рисунок 7. Полученные отклонения не оказывают существенного влияния на динамику пучка при ускорении и корректируются радиальными катушками в процессе настройки ускорителя.

Для оперативной настройки рабочего режима циклотрона разработана программа, проводящая подбор токов радиальных корректирующих катушек для достижения формы радиального распределения среднего магнитного поля, близкой к изохронной. В программу включена база данных измерений магнитного поля и вкладов корректирующих катушек циклотрона ДЦ-60. Для создания базы данных проведены измерения вкладов радиальных корректирующих катушек на нескольких уровнях магнитного поля.

Одной из основных задач проводимых измерений магнитного поля является исследование и компенсация первой гармоники магнитного поля. Первая гармоника магнитного поля является одной из основных причин потерь пучка в процессе ускорения. В случае циклотрона ДЦ-60 существуют две причины появления первой гармоники магнитного поля:

- Наличие геометрических неточностей, возникающих при изготовлении и сборке электромагнита циклотрона.
- Установка на электромагнит циклотрона магнитного канала системы вывода пучка.

Для исследования первой гармоники, возникающей вследствие только геометрических ошибок магнитопровода, проведены измерения магнитного поля без установленного на циклотрон магнитного канала. В ходе измерений штанга магнитометра последовательно проходит полный цикл измерений в  $360^\circ$  в азимутальном направлении. Измерения и коррекция первой гармоники проводились в номинальной рабочей точке на уровне среднего магнитного поля 1.43Тл. Для подтверждения корректности проводимых измерений первой гармоники проведена проверка зависимости результатов измерений от точности установки и перемещения магнитометра. Для этого штанга магнитометра была переустановлена путем ее разворота относительно зубчатого колеса на  $180^\circ$

градусов. При этом по результатам измерений должны быть выявлены ошибки, связанные с неточностью изготовления и установки механической части магнитометра.

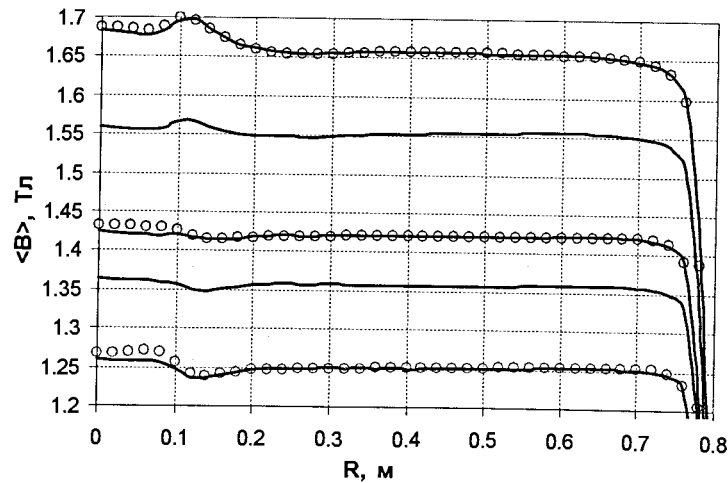


Рис.7. Среднее магнитное поле циклотрона ДЦ-60 по данным измерений на пяти уровнях возбуждения электромагнита, прямые линии. Данные финальных расчетов на графике представлены кружками.

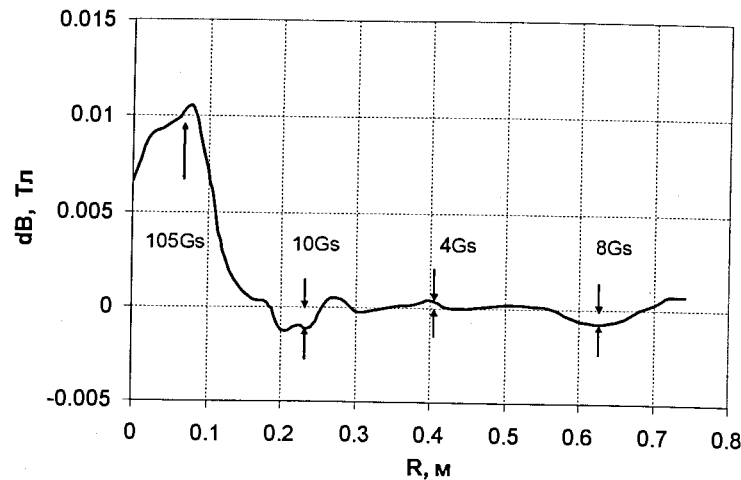


Рис.8. Разность между расчетным и измеренным средними полями в номинальной рабочей точке  $B=1.43\text{Tl}$ .

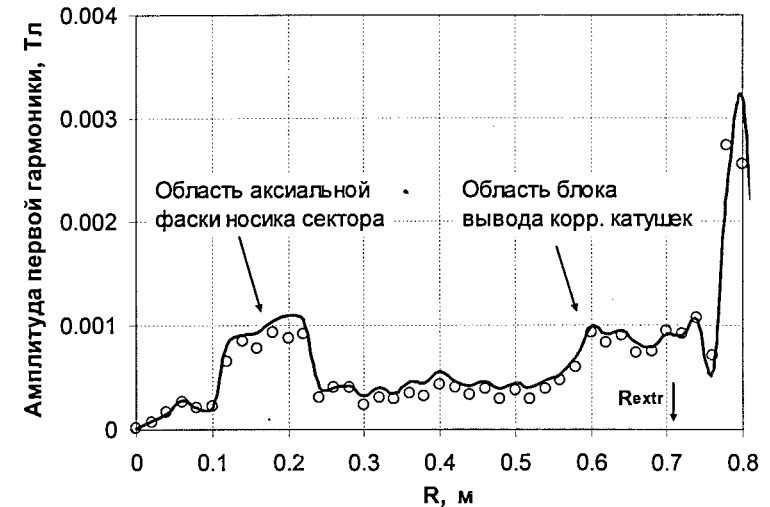


Рис.9. Амплитуда первой гармоники до коррекции. Магнитный канал не установлен. Линия – исходное положение штанги магнитометра, кружки – штанга переустановлена на 180 градусов относительно зубчатого колеса.

На рисунке 9 представлен график поведения амплитуды измеренной первой гармоники вдоль радиуса циклотрона. На графике прямой линией представлены данные измерений в исходном положении штанги магнитометра. Кружками представлены данные измерений с переустановленной на 180 градусов штангой магнитометра. Совпадение представленных зависимостей амплитуды говорит о хорошем качестве исполнения механической части магнитометра. Исследования поведения первой гармоники магнитного поля в рабочей области радиусов показали, что уровень амплитуды лежит в диапазоне 2 – 5Гс за исключением областей 0.12м – 0.22м и 0.6м – 0.75м (соответствует положению блоков выводов корректирующих катушек, рисунок 10), где уровень амплитуды достигает 10Гс.

Установка магнитного канала системы вывода пучков из циклотрона вносит возмущение в распределение магнитного поля. Это возмущение выражается в изменении формы радиального распределения среднего магнитного поля и в появлении первой гармоники, дополнительной к первой гармонике, возникающей вследствие конструктивных ошибок производства и сборки магнитопровода. Задача формирования состоит в компенсации результирующей первой гармоники, являющейся векторной суммой как основной так и дополнительной первых гармоник.

Фазы основной и дополнительной первых гармоник в целом противоположны по азимуту, рисунок 10. Это приводит к тому, что при векторном сложении гармоник происходит их частичная взаимная компенсация. Полученная суммарная первая гармоника компенсируется посредством боковых секторных шимм.

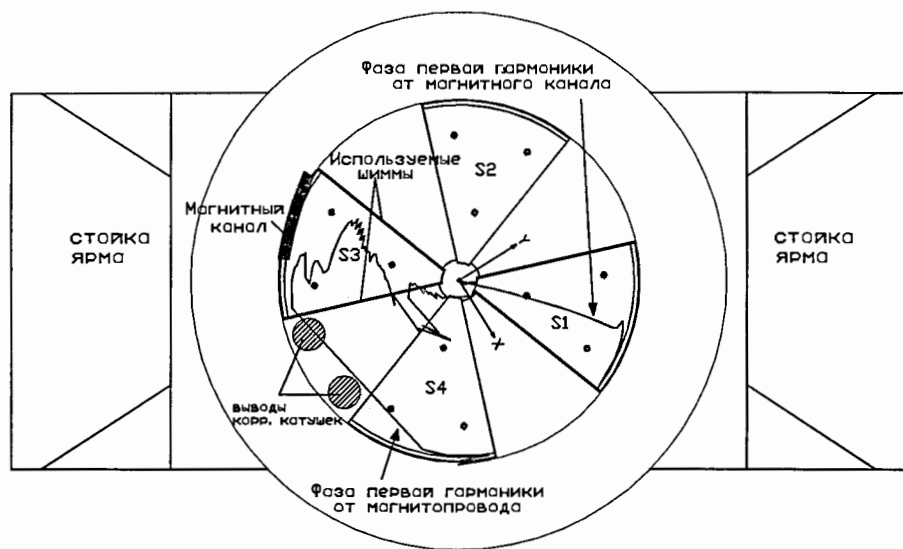


Рис. 10. Положение основной и дополнительной фаз первой гармоники в привязке к геометрии магнитопровода. Обозначение секторов S1 – S4.

Проведенный анализ суммарной первой гармоники показал, что для компенсации достаточно установить четыре дополнительные пары шимм по бокам верхних и нижних секторов, расположенных вдоль направления фаз рассматриваемых гармоник. При помощи указанных шимм одновременно решаются две задачи:

- осуществляется компенсация суммарной первой гармоники.
- проводится коррекция радиального снижения среднего магнитного поля, вызванного установкой магнитного канала.

Для определения необходимой формы боковых секторных шимм проведен векторный анализ суммарной первой гармоники. Вектор суммарной первой гармоники разложен на составляющие, соответствующие положению шимм на секторах. Используя результаты анализа и расчетные функции влияния, получены позиция и форма шимм, обеспечивающие компенсацию суммарной первой гармоники.

Магнитный канал и элементы его крепления частично размещены в межсекторном пространстве и не позволяют штанге магнитометра совершать полный оборот в  $360^\circ$ . В связи с этим, для измерения и компенсации влияния канала на магнитное поле циклотрона применен комбинированный метод. Метод заключается в последовательном проведении расчетов и измерений по программе:

- Измерения магнитного поля в отсутствие магнитного канала. Определены амплитуда и фаза первой гармоники, возникающей вследствие неточности производства и сборки магнитопровода, рисунок 9.

- Расчет магнитного поля в случае установленного магнитного канала. Определены амплитуда и фаза первой гармоники, возникающей при установке магнитного канала, рисунки 10 и 11.
- Моделирование и расчет формы боковых секторных шимм для компенсации суммарной первой гармоники (суммарное влияние как магнитного канала так и неточности производства и сборки магнитопровода).
- Измерения магнитного поля в отсутствие магнитного канала, но с установленными боковыми шиммами рассчитанной формы. Полученная в ходе измерений первая гармоника должна соответствовать по амплитуде расчетной первой гармонике от магнитного канала, но с противоположным направлением фазы. Степень полученного соответствия указанных амплитуд является критерием компенсации суммарной первой гармоники.

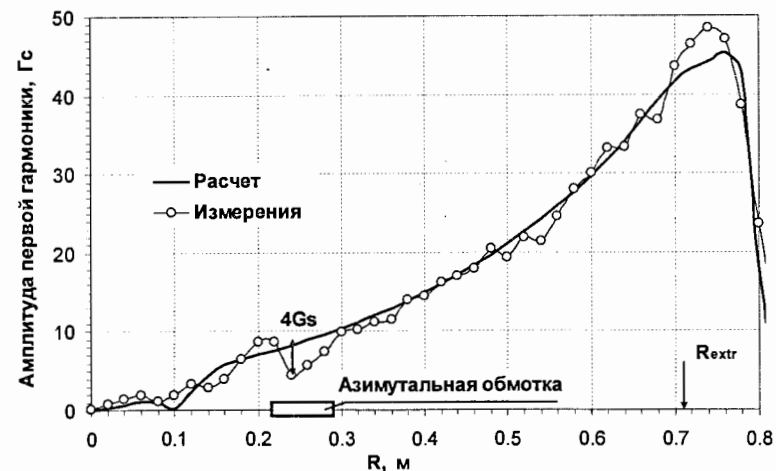


Рис. 11. Расчетная и полученная в ходе измерений амплитуды первой гармоники в случае установленных боковых шимм, без магнитного канала.

Проведена серия измерений, в ходе которых подобрана окончательная форма боковых шимм. Сравнение полученной амплитуды первой гармоники с данными расчетов представлено на рисунке 11. В результате проведенной коррекции при установке магнитного канала и компенсирующих боковых шимм амплитуда остаточной первой гармоники не превышает  $2 \div 4$  Гс, что является достаточным для нормальной работы ускорителя.

В четвертой главе представлены результаты пуско – наладочных работ, проведенные на циклотроне ДЦ-60 после его окончательной сборки в г. Астана, республика Казахстан [9]. После оптимизации режима работы ЭЦР источника, настройки ионно-оптических элементов канала аксиальной инжекции и электромагнита, на циклотроне получены проектные параметры ускоренного и выведенного пучка ионов. Проведены экспериментальные работы 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 1.25Тл – 1.65Тл в режимах работы на четвертой и шестой гармониках ускоряющего ВЧ напряжения. В качестве примера представлены результаты ускорения 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 1.43Тл и частоте ускоряющего напряжения 12.57МГц. Исследовано влияние подстройки магнитного поля радиальными корректирующими катушками. В связи с тем, что рассмотренный режим ускорения соответствует номинальной рабочей точке, в которой магнитное поле сформировано только за счет железных масс, подстройка радиальными катушками не привела к заметному увеличению интенсивности пучка. При этом коэффициент прохождения пучка внутри циклотрона от внутреннего радиуса  $R=120\text{мм}$  до радиуса вывода  $R=680\text{мм}$  составил 95%.

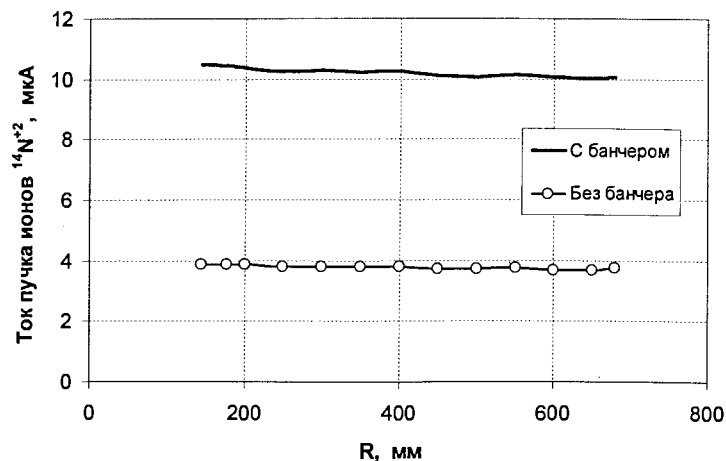


Рис. 12 Радиальная зависимость тока пучка ионов  $^{14}\text{N}^{2+}$ .

Для рабочих режимов, не соответствующих номинальной рабочей точке, прежде всего на низком 1.25Тл и высоком 1.65Тл уровнях поля, проведены исследования эффективности действия корректирующих радиальных катушек. Один из рассмотренных тестовых рабочих режимов соответствует ускорению пучка ионов азота  $^{14}\text{N}^{2+}$ ,  $A/Z=7$ , до энергии 1.35 МэВ/нуклон. Ускорение производилось на четвертой гармонике ВЧ поля при среднем магнитном поле 1.63Тл и частоте ускоряющего напряжения 14.4МГц. На рисунках 13 и 14 представлены резонансные характеристики режима ускорения в случаях использования оперативной подстройки магнитного поля радиальными корректирующими катушками и без использования катушек. В режиме работы с отключенными радиальными катушками коэффициент прохождения пучка в циклотроне составил 74.5%. Оптимизация магнитного поля радиальными корректирующими катушками позволила увеличить коэффициент прохождения пучка в циклотроне до 90%.

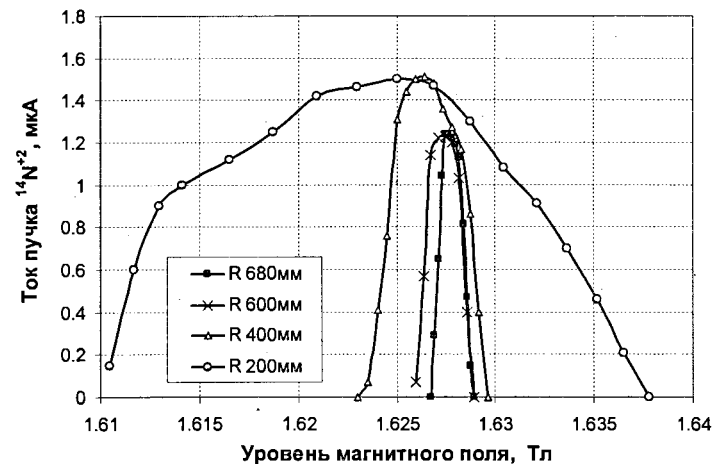


Рис. 13 Зависимость тока пучка ионов  $^{14}\text{N}^{2+}$  от уровня основного поля без оптимизации радиальными корректирующими катушками.

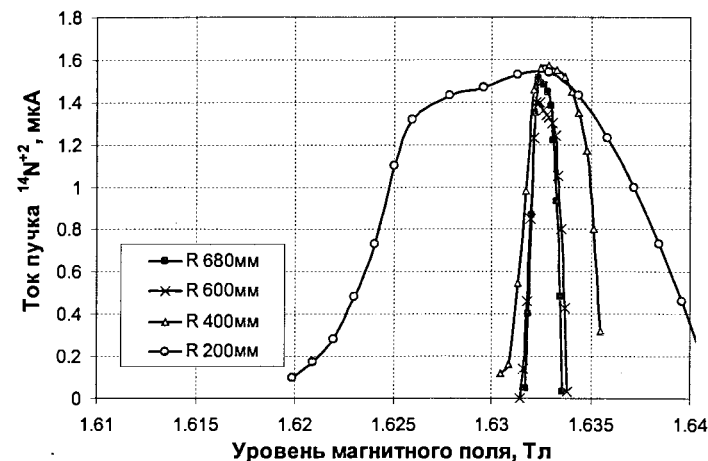


Рис. 14 Зависимость тока пучка ионов  $^{14}\text{N}^{2+}$  от уровня основного поля с оптимизацией радиальных корректирующих катушек.

Оперативная подстройка магнитного поля радиальными корректирующими катушками осуществлялась при помощи программы расчета параметров рабочего режима циклотрона ДЦ-60. На рисунке 15 представлено окно программы, отображающее параметры выбранного рабочего режима. Используя базу данных магнитных измерений, программа проводит расчет, основных параметров выбранного рабочего режима, подбирает токи радиальных корректирующих

катушек, представляет в графическом виде изохронное и среднее магнитное поле до и после коррекции радиальными катушками.

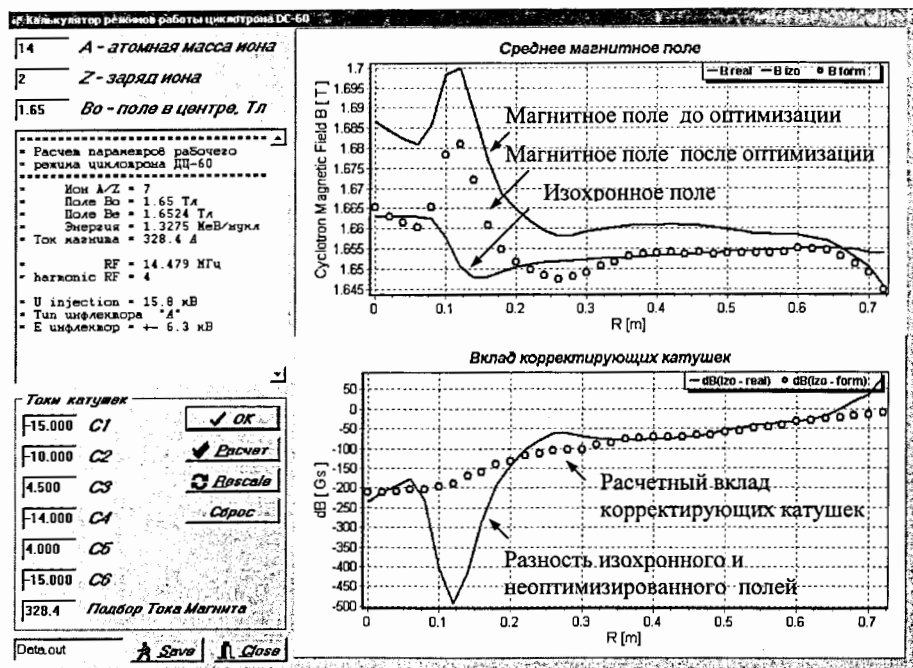


Рис. 15 Окно программы выбора параметров режима ускорения пучка ионов  $^{14}\text{N}^{2+}$ . Выбор режима включения радиальных катушек для оптимизации магнитного поля.

В заключении сформулированы основные результаты разработок и исследований:

1. Разработана и создана магнитная структура изохронного циклотрона ДЦ-60 для ускорения пучков тяжелых ионов с отношением массы к заряду  $A/Z$  6 ÷ 12 до энергий от 0.35 до 1.77 МэВ/нуклон. Магнитная структура циклотрона обеспечивает плавную регулировку энергии ускоренных пучков в пределах  $\pm 25\%$  от номинальной за счет изменения уровня среднего магнитного поля от 1.25Тл до 1.65Тл.
2. Магнитная структура циклотрона ДЦ-60 разработана с использованием плоских секторов с прямыми боковыми границами, радиально смещенных относительно центра полюса магнита, что создало структуру с изменяющейся азимутальной протяженностью секторов. Это позволило сформировать изохронную форму магнитного поля на уровне 1.43Тл только за счет

выбранной формы секторов, создать необходимо малое изменение радиального роста среднего поля по радиусу при варьировании поля от 1.25Тл до 1.65Тл и использовать маломощную систему корректирующих катушек.

3. Осуществлено численное формирование магнитного поля изохронного циклотрона ДЦ-60. Формирование изохронного распределения магнитного поля осуществлялось в номинальной рабочей точке, соответствующей режиму ускорения иона с отношением массы к заряду  $A/Z=7$  на уровне поля  $B_0=1.43\text{Тл}$ . Исследовано влияние магнитного канала системы вывода пучков из циклотрона на распределение магнитного поля. Осуществлено численное моделирование формы боковых секторных шимм, предназначенных для компенсации первой гармоники и искажения среднего магнитного поля, вызванных установкой магнитного канала.
4. В ходе численного формирования магнитного поля учтены измеренные магнитные свойства стали, использованной для производства магнита циклотрона ДЦ-60, а также влияние деформации магнитной структуры под действием магнитных сил на распределение магнитного поля. Определены допуски на изготовление составных частей и сборку электромагнита циклотрона ДЦ-60.
5. Результаты измерений магнитного поля изохронного циклотрона ДЦ-60 показали хорошее совпадение с результатами расчетов. Для номинальной рабочей точки ( $A/Z=7$ ,  $B_0=1.43\text{Тл}$ ) отклонение в радиальном распределении измеренного среднего магнитного поля от расчетного не превышает 0.001Тл в основной области ускорения и 0.0105Тл в центральной области. Проведены измерения вкладов корректирующих катушек и осуществлена подготовка базы данных измерений магнитного поля для программ настройки и управления циклотроном.
6. В ходе стендовых испытаний проведена комплексная коррекция первой гармоники магнитного поля, возникающей как вследствие неточностей производства и монтажа магнитопровода, так и в результате установки магнитного канала системы вывода пучков. Коррекция осуществлена при помощи боковых секторных шимм, чей профиль получен в ходе расчетов и моделирования. Коррекция позволила снизить амплитуду суммарной первой гармоники до уровня  $2\text{Гс} \div 4\text{Гс}$ , что является достаточным для нормальной работы ускорителя.
7. Расчеты динамических характеристик сформированного магнитного поля для трех характерных режимов ускорения ионов показали, что магнитное поле циклотрона ДЦ-60 обеспечивает фокусировку и эффективность ускорения пучков ионов.
8. В ходе пуско - наладочных работ на циклотроне ДЦ-60 осуществлено ускорение пучков ионов. Сформированное магнитное поле позволило осуществить ускорение пучков ионов внутри циклотрона от внутренних радиусов до радиуса вывода с эффективностью транспортировки пучка до 95% ( $^{14}\text{N}^{2+}$ ,  $B=1.43\text{Тл}$ ).

*По теме диссертации опубликованы следующие работы:*

1. B. N. Gikal et al., "Project of the DC-60 cyclotron with smoothly ion energy variation for research center at L.N.Gumilev EuroAsia State University in Astana (Kazakhstan)", In: Proceedings of the 17<sup>th</sup> Conference on Cyclotrons and Their Applications, 18 – 22 October 2004, Tokyo, p.p. 205-207.
2. Б.Н.Гикал и др., "Формирование магнитного поля циклотрона ДЦ-60", Р9-2006-151, ОИЯИ, Дубна, 2006.
3. B.Gikal, G.Gulbekian, I.Ivanenko, V.Belyakova, V.Kukhtin, E.Lamzin, S.Sytchevsky, "Numerical simulation for field formation in cyclotron DC60", In: Proceedings of the 11<sup>th</sup> International Conference on Charged Particle Accelerators Applied in Medicine and Industry, 10 – 14 October 2004, Russia, p.p. 257-259.
4. B.Gikal, G.Gulbekian, I.Ivanenko, A.Alexeev, V.Belyakova, V.Belyakov, V.Kukhtin, E.Lamzin, A.Malkov, F.Skornyakov, S.Sytchevsky, "Effect of deformations caused by the ponderomotive force on magnet system quality in cyclotron DC-60", In: Proceedings of the 11<sup>th</sup> International Conference on Charged Particle Accelerators Applied in Medicine and Industry, 10 – 14 October 2004, Russia, p.p. 219-223.
5. B.Gikal, G.Gulbekian, I.Ivanenko, V.Belyakova, O.Ilyasov, V.Kukhtin, E.Lamzin, M.Larionov, B.Maximov, S.Sytchevsky, "Effect of actual magnetic properties of steel on field quality in DC-60", In: Proceedings of the 11<sup>th</sup> International Conference on Charged Particle Accelerators Applied in Medicine and Industry, 10 – 14 October 2004, Russia, p.p. 224-227.
6. I.Ivanenko, G.Gulbekian, J.Franco, 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, p.p. 2349 – 2351.
7. G.Gulbekian et al., "A method of the magnetic field formation in cyclotron DC-72," NUKLEONIKA, Vol. 48, number 4 - 2003, p.p. 207-210.
8. G. Gulbekian 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.p. 147 – 149.
9. Б.Н.Гикал и др., "Результаты ускорения пучков ионов азота, аргона, криптона в ходе пуско-наладочных работ на изохронном циклотроне ДЦ-60", Р9-2007-80, ОИЯИ, Дубна, 2007.
10. Б.Н.Гикал и др., "Циклотронный комплекс ДЦ-60 для научно-прикладных исследований и промышленного применения в области нанотехнологий", Атомная Энергия, том 103, №6, 2007, стр 357-364.

Получено 31 октября 2008 г.