

P9-2006-151

Б. Н. Гикал, Г. Г. Гульбемян, 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. Пащенко, Е. В. Самсонов, О. В. Семченкова,  
С. Е. Сычевский\*, Й. Франко

**ФОРМИРОВАНИЕ МАГНИТНОГО  
ПОЛЯ ЦИКЛОТРОНА DC-60**

Направлено в журнал «Приборы и техника эксперимента»

---

\* НИИЭФА, Санкт-Петербург

## Формирование магнитного поля циклотрона DC-60

Работа посвящена результатам формирования магнитного поля изохронного циклотрона DC-60. Представленная методика включает в себя аналитический, расчетный и экспериментальный подходы. Методика позволила за короткий период времени оптимальным образом сформировать магнитную структуру циклотрона DC-60. В результате комплексного использования аналитического и расчетного подходов поле сформировано в широком диапазоне рабочих уровней от 1,25 до 1,65 Тл. Проведенные измерения на электромагните показали, что благодаря предложенной методике среднее магнитное поле в области ускорения сформировано с точностью, лучшей чем  $10^{-3}$  Тл, при остаточной амплитуде первой гармоники не более  $(2-4) \cdot 10^{-4}$  Тл.

Работа выполнена в Лаборатории ядерных реакций им. Г. Н. Флерова.

## Formation of the Magnetic Field of Cyclotron DC-60

The work is devoted to results of formation of the isochronous cyclotron DC-60 magnetic field. The method submitted in the given work includes analytical, computation and experimental approaches. The method has allowed one to generate the optimum magnetic structure of cyclotron DC-60 for a short period of time. As a result of complex use of analytical and computation approaches the field is generated in a wide range of operating levels from 1.25 up to 1.65 T. The measurements of the cyclotron DC-60 magnetic field are carried out. The results of the measurements have shown good coincidence with the results of computation. The average magnetic field in the accelerating region is generated with accuracy better than  $10^{-3}$  T with the residual amplitude of the first harmonic not more than  $(2-4) \cdot 10^{-4}$  T.

The investigation has been performed at the Flerov Laboratory of Nuclear Reactions.

Циклотрон DC-60 является базовой установкой междисциплинарного научно-исследовательского центра в Астане (Казахстан). Ускоритель разработан для решения широкого круга ядерно-физических и прикладных задач на пучках ионов от углерода до ксенона с энергией от 0,35 до 1,77 МэВ/нуклон. На циклотроне предусмотрено изменение энергии ускоренных ионов путем изменения заряда ускоряемых ионов, а также возможность плавной вариации энергии ионов за счет изменения магнитного поля в диапазоне от 1,25 до 1,65 Тл. Основой циклотрона служит Ш-образный магнит, в котором сформировано магнитное поле для ускорения пучков ионов с отношением массы к заряду от 6 до 12.

В работе представлен комплексный метод формирования магнитного поля циклотрона, сочетающий в себе предварительный анализ и выбор основных размеров магнитной структуры, проведение оптимизации и формирования магнитного поля при помощи трехмерных расчетов, проведение измерений и формирование поля на электромагните циклотрона.

## **1. РАБОЧАЯ ДИАГРАММА ЦИКЛОТРОНА DC-60**

Комплексный анализ магнитной и ускоряющей систем циклотрона позволил сформировать рабочую диаграмму (рис. 1), которая связывает среднее магнитное поле в центре циклотрона, энергию пучка на радиусе вывода, частоту обращения ионов и кратность ускоряющего ВЧ-поля.

Рабочая диаграмма определяет условия формирования магнитного поля циклотрона. На диаграмме пронумерованные линии показывают условия изохронизма для ускорения ионов с соответствующим отношением массы к заряду. Линиями, обозначенными как  $dV(B)$ , показана величина необходимого роста среднего магнитного поля от центра циклотрона до конечного радиуса для выполнения условия изохронизма ускорения ионов. Кружками на диаграмме обозначены точки на границе рабочей области циклотрона.

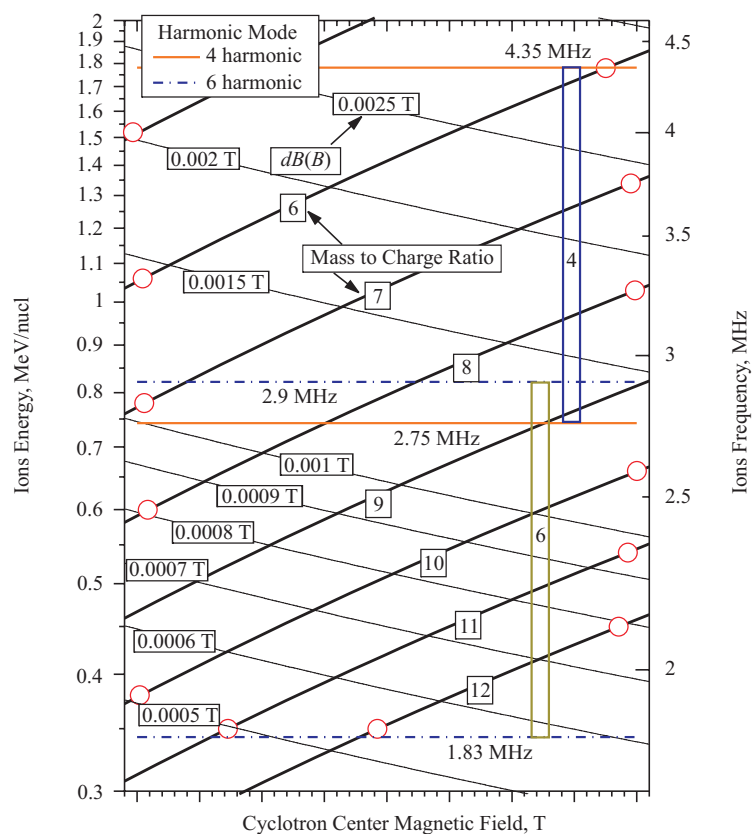


Рис. 1. Рабочая диаграмма циклотрона DC-60

## 2. МЕТОДИКА ФОРМИРОВАНИЯ МАГНИТНОГО ПОЛЯ ЦИКЛОТРОНА DC-60

Методы расчета магнитных структур и технология их изготовления постоянно совершенствуются. В процессе работы над проектом циклотрона DC-60 применена методика, сочетающая аналитический, численный и экспериментальный подходы к моделированию и формированию магнитной структуры изохронного циклотрона. Предложенная методика базируется прежде всего на анализе большого количества расчетных и экспериментальных данных, накопленных в ЛЯР ОИЯИ, а также на широком использовании возможностей современных вычислительных комплексов и программного обеспечения.

На первом этапе проводится комплексная компоновка и оптимизация основных узлов циклотрона. Оптимизация осуществляется на основе законо-

мерностей, полученных расчетным и экспериментальным путем при работе с модельными электромагнитами и при создании циклотронов, таких как У-200, У-400, МС-400, ИС-100, ДС-72 [2–5]. Аналитическая часть метода позволяет оценить размеры магнитопровода, параметры обмотки возбуждения и корректирующих обмоток, конфигурацию элементов рабочего зазора. Полученные данные являются исходными параметрами магнитной структуры для последующего моделирования на основе компьютерных расчетов.

Современные компьютерные программы, такие как TOSCA, КОМПОТ, MERMAID, позволяют проводить расчеты магнитных полей с высокой точностью. Моделирование магнитной структуры сопровождается расчетами динамики движения пучков в нескольких рабочих режимах. Многоитерационная задача моделирования состоит из двух основных этапов: оптимизация формы магнитопровода и оптимизация элементов рабочей области электромагнита для создания изохронных условий ускорения. На первом этапе подбираются оптимальные геометрические размеры электромагнита с точки зрения эффективности магнитопровода. Второй этап включает в себя формирование изохронного распределения поля в основной области ускорения, формирование поля в центре и в области вывода пучка из циклотрона.

Особо стоит отметить задачу по компенсации влияния пассивного магнитного канала, использующегося для фокусировки пучка в системе вывода. 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 ДС-60 были внесены данные измерений магнитных свойств стали  $\mu(B)$ , применяемой в производстве элементов магнитопровода, что значительно повысило точность расчетов.

В ходе компьютерного моделирования проведен анализ и учтена деформация элементов магнитной структуры, вызванная действием объемной ponderomotorной силы [6].

В ходе экспериментальной части методики проведены финальное тестирование узлов и систем электромагнита, измерения распределения магнитного поля циклотрона, коррекция ошибок, связанных с производством и монтажом электромагнита.

### **3. ОСНОВНЫЕ ПАРАМЕТРЫ ЭЛЕКТРОМАГНИТА ЦИКЛОТРОНА ДС-60**

Геометрия магнитопровода, полученная в ходе компьютерного моделирования, легла в основу рабочего проекта Ш-образного магнита ДС-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 аксиальная обработка боковых секторных шимм позволяет вносить необходимую коррекцию в распределение магнитного поля в процессе окончательного формирования изохронных условий ускорения.

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.

Основные параметры электромагнита циклотрона DC-60 сведены в табл. 1.

**Таблица 1. Параметры электромагнита циклотрона DC-60**

|  |                  |
|--|------------------|
| Размер магнитопровода, д×ш×в, мм               | 4000×1680×2300   |
| Диаметр полюса, мм                             | 1620             |
| Межполюсный 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            |

Особенностью электромагнита является поворот осей полюсныхборок относительно ярма на угол 13° (рис. 2). Такое конструктивное решение применено для удобства размещения резонаторов ВЧ-системы. Электромагнит спроектирован таким образом, что его составные элементы имеют массу не более 10 т. Это позволило доставить его автотранспортом с наименьшими затратами и снизило требования к конструкции здания.

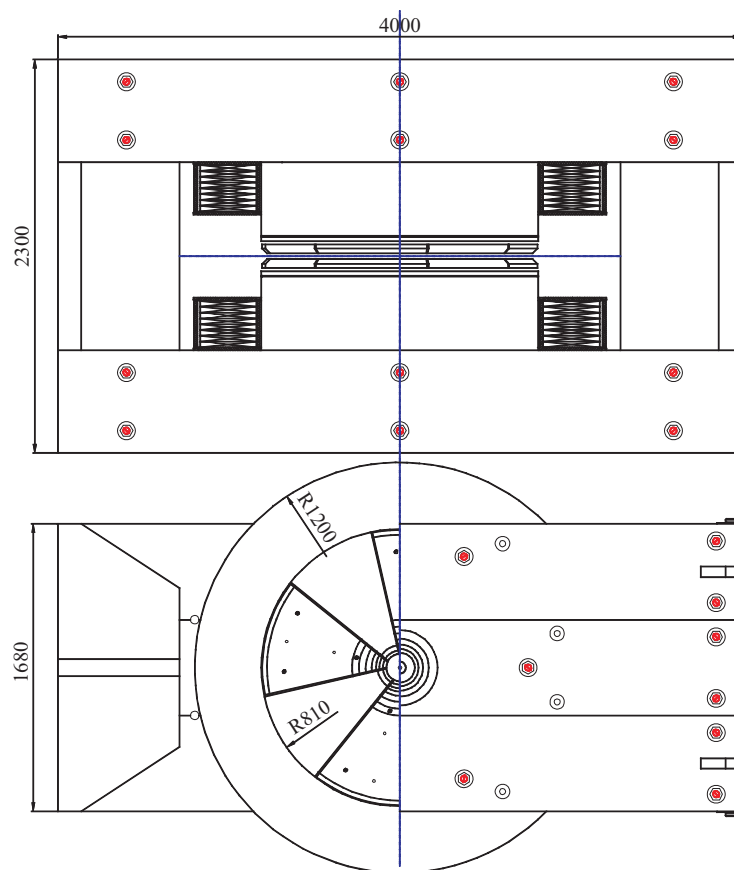


Рис. 2. Вид электромагнита циклотрона DC-60

#### 4. ИЗГОТОВЛЕНИЕ ЭЛЕКТРОМАГНИТА ЦИКЛОТРОНА DC-60

Электромагнит циклотрона DC-60 изготовлен в ЭФО НИИЭФА им. Д. В. Ефремова по техническому заданию и чертежам, разработанным в ЛЯР ОИЯИ.

Сталь, из которой сделаны элементы магнита, была выплавлена по специальному заказу на Новокраматорском машиностроительном заводе. Из каждой плавки были взяты образцы металла и измерены их магнитные свойства.

На рис. 3 и в табл. 2 представлены магнитные свойства и химический состав образцов материала, использованного для изготовления составных частей магнитопровода циклотрона.

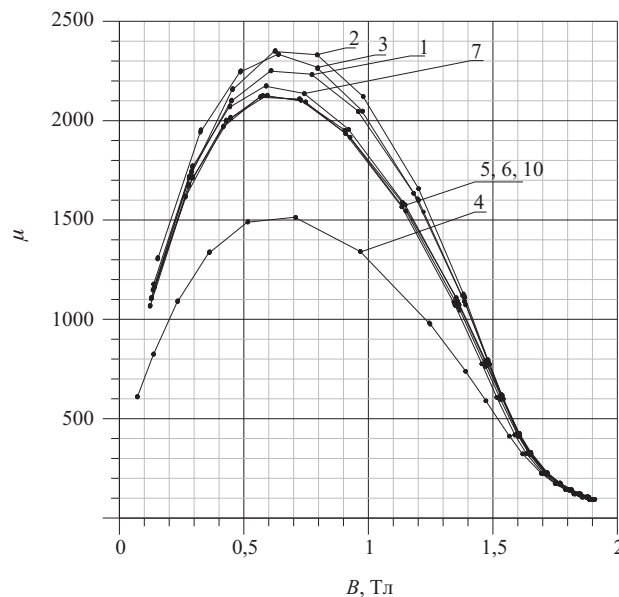


Рис. 3. Зависимости магнитной проницаемости  $\mu(B)$  для различных образцов (см. табл. 2) в диапазоне индукции магнитного поля 0–2 Тл

**Таблица 2. Химический состав образцов материала**

| № зависимости на рис. 3 | 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 в ходе формирования заданного распределения магнитного поля. Во избежание искажения магнитного поля все симметричные детали магнита относительно медианной плоскости выполнены из металла одной плавки.



Требования к точности формирования магнитного поля определялись исходя из расчетных условий ускорения пучков ионов в циклотроне. 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  $(3-4) \cdot 10^{-4}$  Тл. 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 коррекции поля с помощью корректирующих катушек и технические возможности производства. Особое внимание уделялось точности изготовления и сборки магнитопровода, определяющей трудоемкость последующего этапа измерений и формирования магнитного поля. В табл. 3 приведены требования к наиболее значимым геометрическим размерам в рабочей области магнита. В таблице также приводятся замеры указанных размеров, сделанных после сборки магнитопровода.

**Таблица 3. Наиболее важные геометрические размеры в рабочей области циклотрона DC-60**

| Позиция замера   | Требование чертежа | Измеренное значение |
|--|--------------------|---------------------|
| 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       | $\leq 0,1$         | $0 \div 0,1$        |

Проведены замеры углового и радиального положения секторов на полюсных сборках, соосность установки полюсов при монтаже магнитопровода, а также 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. Полученная величина схождения полюсов находится в хорошем соответствии с предварительно проведенными расчетами деформации магнитопровода под действием электромагнитных сил [6]. Таким образом, при включенном магнитном поле расстояние между верхними и нижними секторами соответствует требованиям чертежа.

## **5. ВЫБОР НОМИНАЛЬНОЙ РАБОЧЕЙ ТОЧКИ, ПАРАМЕТРЫ КОРРЕКТИРУЮЩИХ КАТУШЕК**

Для плавной регулировки энергии ускоренных ионов на циклотроне DC-60 предусмотрена вариация среднего магнитного поля в диапазоне от 1,25 до 1,65 Тл.

Каждому рабочему режиму циклотрона соответствует уровень поля в центре  $B_0$  в пределах указанного диапазона и значение радиального роста среднего магнитного поля  $dB$ , полученное из условия изохронизма. На рис. 4 треугольниками очерчена область зависимости  $dB(B_0)_{wd}$  для режимов работы циклотрона, определяемых условиями рабочей диаграммы. Магнитная структура циклотрона задает уникальную зависимость радиального роста среднего магнитного поля от уровня поля  $dB(B_0)_{magnet}$ , определяемую параметрами элементов рабочей области магнитопровода. На рис. 4 эта зависимость представлена линией с кружками. Номинальная рабочая точка выбрана на линии

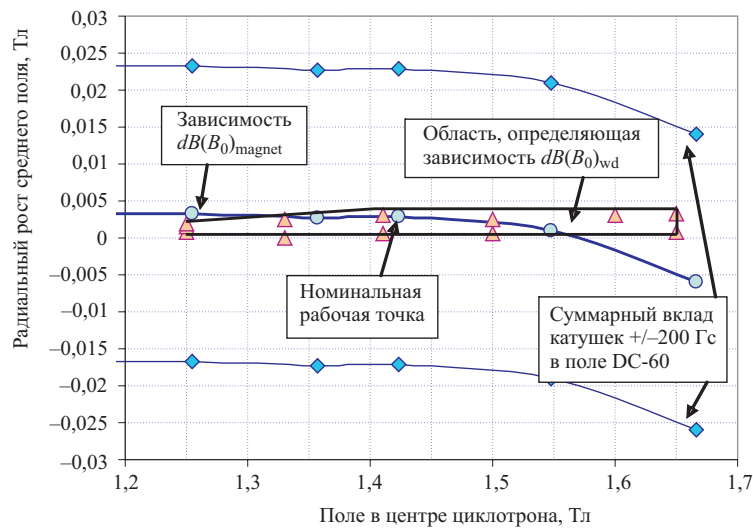


Рис. 4. Область зависимости радиального роста среднего магнитного поля от уровня поля  $dB(B_0)_{wd}$  для режимов работы циклотрона, определяемых условиями рабочей диаграммы. Зависимость  $dB(B_0)_{magnet}$ , определяемая параметрами элементов рабочей области магнитопровода

$dB(B_0)_{magnet}$  с уровнем магнитного поля  $B_0 = 1,43$  Тл. В этой точке изохронное поле, предназначенное для ускорения частиц с отношением массы к заряду  $A/Z = 7$ , сформировано только за счет железных масс. Использование радиальных корректирующих катушек с максимальным суммарным вкладом до 0,02 Тл позволяет получить остальные рабочие режимы и провести оперативную тонкую коррекцию магнитного поля в процессе эксплуатации циклотрона.

В электромагните циклотрона DC-60 используются шесть радиальных корректирующих катушек. Каждая катушка состоит из двух частей, расположенных на верхнем и нижнем полюсах. 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 на радиусах 195–275 мм. Максимальный рабочий ток корректирующих обмоток 15 А, стабильность источника тока  $10^{-4}$ .

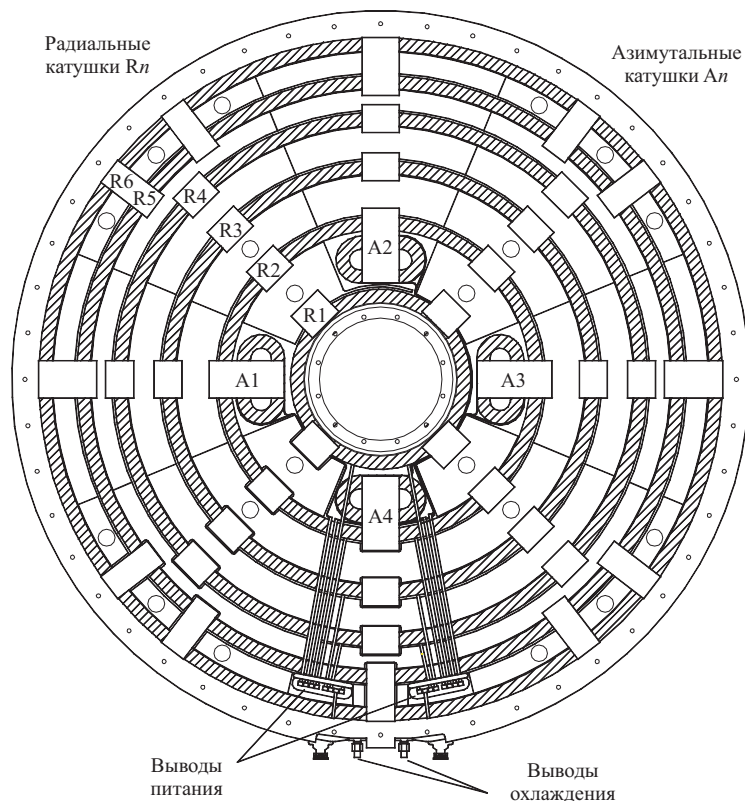


Таблица 4. Основные параметры радиальных корректирующих обмоток

| 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 |

## 6. ИСПОЛЬЗОВАНИЕ РАСЧЕТОВ ДЛЯ ФОРМИРОВАНИЯ МАГНИТНОГО ПОЛЯ ЦИКЛОТРОНА DC-60

Предварительное формирование магнитного поля циклотрона осуществлялось посредством аналитического и численных расчетов. Аналитический расчет, основанный на опыте ЛЯР ОИЯИ в разработке циклотронов [8], 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 КОМРОТ [9], позволяющего получать трехмерное распределение магнитного поля.

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 осуществлялось формирование магнитного поля в рабочей области циклотрона. Необходимая форма изохронного распределения поля в номинальной рабочей точке получена из анализа предварительных расчетов магнитного поля по методике, представленной в [10].

Аналитический расчет и численное моделирование магнитной структуры рабочей области в целом можно свести к трем основным шагам. Во-первых, это формирование изохронного поля в области ускорения, во-вторых, формирование поля в центральной области и, в-третьих, формирование поля на внешних радиусах в области вывода пучков из циклотрона.

Формирование поля на внешних радиусах в области вывода циклотрона DC-60 осуществлялось путем подбора формы фаски внешней стороны сектора. Использование такой фаски дает возможность продлить радиальный рост поля и тем самым 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 угол и оптимальная глубина фаски. На рис. 6 и 7 представлено поведение среднего поля и флаттера на внешних радиусах рабочей области в зависимости от глубины фаски. Выбранный угол в  $45^\circ$  и глубина  $28 \times 28$  мм позволяют максимально приблизиться к изохронной форме среднего поля и не допустить резонансных значений свободных колебаний ионов вплоть до предельного радиуса орбиты 713 мм.

Наиболее сложной задачей при формировании магнитного поля является выбор оптимальной геометрии элементов центральной области электромагнита. Центр характеризуется наличием сильных градиентов магнитного поля и участков магнитной цепи, находящихся в сильном насыщении.

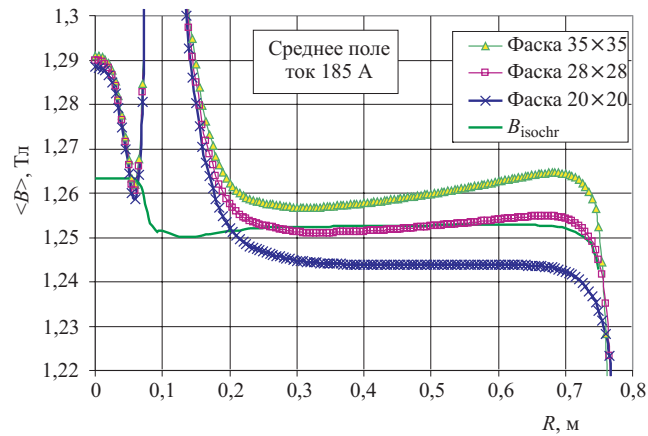


Рис. 6. Данные расчетов средних полей в зависимости от формы фаски. Поля представлены до коррекции центральной области

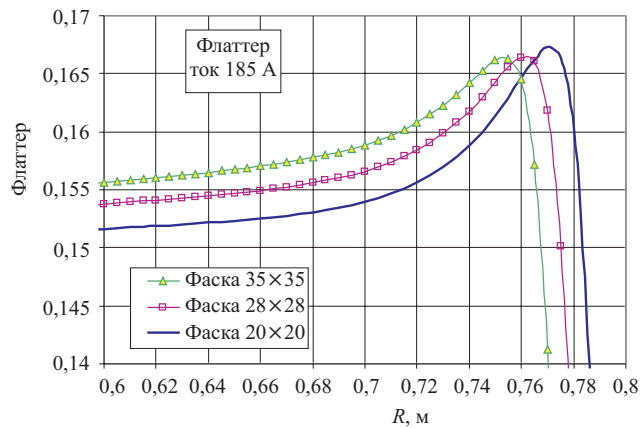


Рис. 7. Радиальная зависимость флаттера на внешних радиусах рабочей области для разных глубин фаски

Возникают две взаимозависимые задачи, первая из которых — формирование изохронного распределения поля в центральной области. Вторая задача — минимизация опережения или запаздывания изменения уровня поля в центре относительно изменения основного уровня поля.

Комплексный, многоитерационный подход позволил найти приемлемое решение обеих задач. На рис. 8 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.

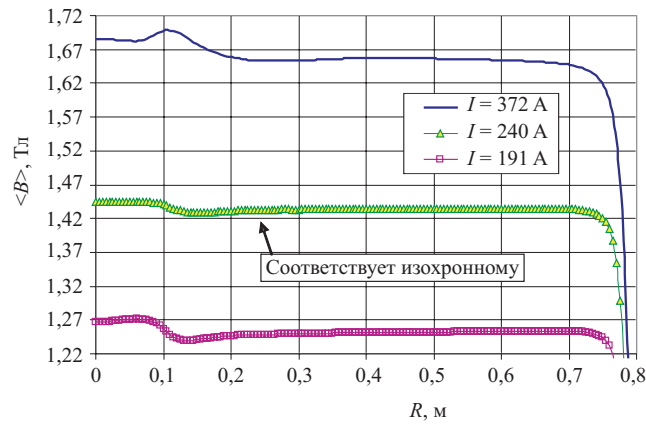


Рис. 8. Результаты финальных расчетов радиального распределения среднего магнитного поля в рабочей точке, на верхнем и нижнем уровнях

В номинальной рабочей точке 1,43 Тл полученное поле соответствует изохронному распределению магнитного поля для ускорения частиц с  $A/Z = 7$ . Для остальных рабочих режимов требуется оперативная коррекция при помощи радиальных корректирующих катушек. На рис. 9 представлено поведение разности среднего поля на верхнем и нижнем уровнях  $dB(R)$ . Этот график дает представление о нелинейности поведения поля в области центральной пробки и носовой части секторов при изменении уровня основ-

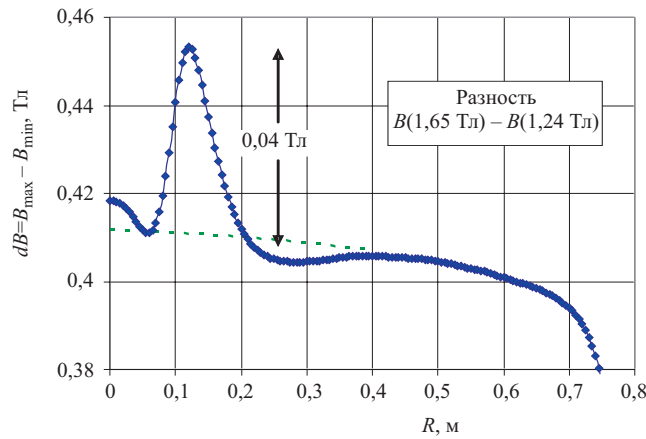


Рис. 9. Поведение разности среднего поля на верхнем и нижнем уровнях  $dB(R)$

ного поля. Оптимальное поведение указанной разности представлено пунктирной линией. В нашем случае амплитуда возмущений в центре, вызванных переходами между находящимися в сильном насыщении элементами магнитной структуры, достигает 0,04 Тл. Коррекция среднего поля осуществляется оперативно за счет использования радиальных корректирующих катушек.

Формирование изохронного распределения магнитного поля по радиусу в номинальной рабочей точке  $B_0 = 1,43$  Тл (рис. 10) осуществлялось за счет подбора формы секторныхборок и элементов центральной области. При этом не потребовалось менять азимутальную протяженность секторов.

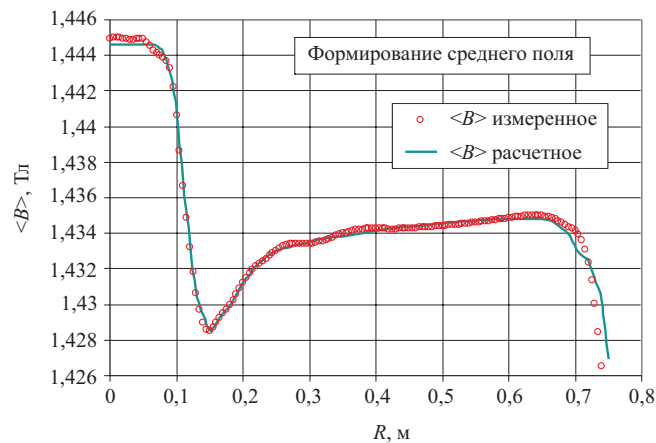


Рис. 10. Сравнение изохронного и сформированного в расчетах среднего магнитного поля

Сектора остались плоскими с прямыми границами и небольшим изменением высоты на внутренних радиусах (рис. 11). Это значительно упростило их изготовление.

Составной частью системы вывода циклотрона DC-60 является фокусирующий магнитный канал. Конструктивно канал расположен в непосредственной близости от края секторов (рис. 12), что оказывает заметное влияние на магнитное поле в рабочей области. Это выражается в изменении формы среднего магнитного поля и в появлении первой гармоники азимутального распределения поля.

На рис. 13 и 14 представлено влияние магнитного канала на распределение среднего магнитного поля и амплитуду первой гармоники. При установке магнитного канала среднее поле опускается от 0 в центре до  $1,5 \cdot 10^{-3}$  Тл к максимальному радиусу области ускорения. Одновременно амплитуда первой гармоники магнитного поля вырастает до  $4,5 \cdot 10^{-3}$  Тл на конечном радиусе с

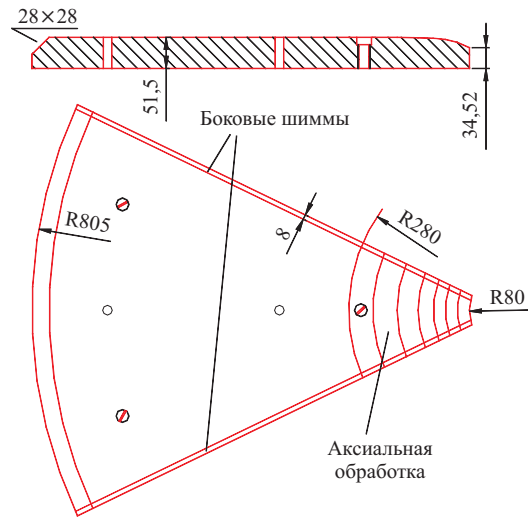


Рис. 11. Форма и основные размеры сектора циклотрона DC-60

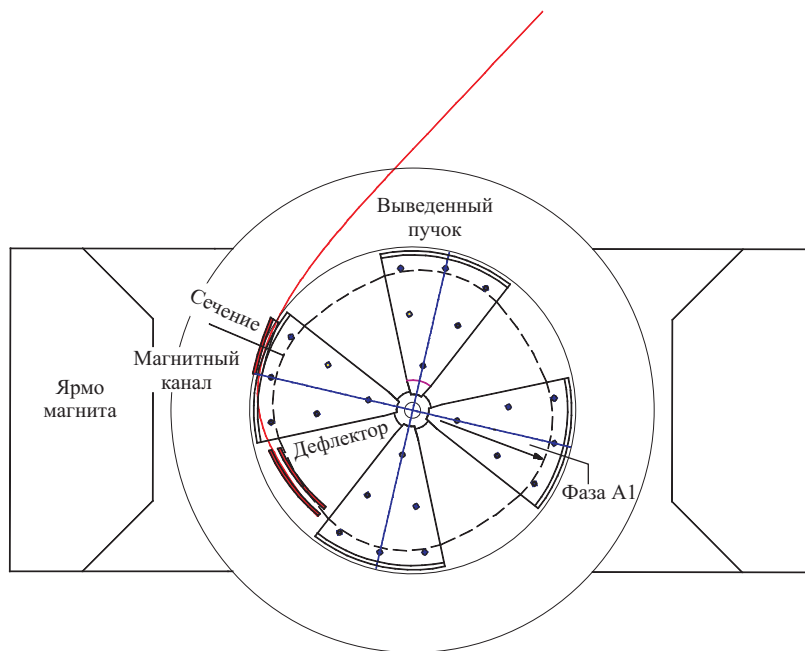


Рис. 12. Размещение магнитного канала в циклотроне



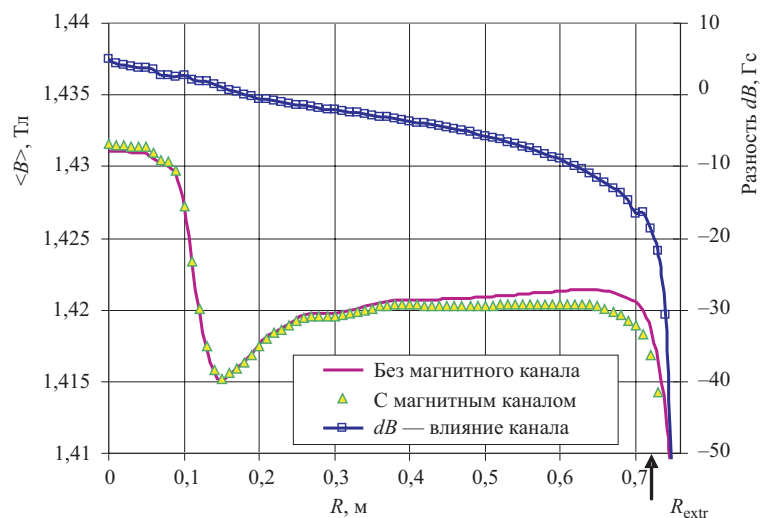


Рис. 13. Влияние магнитного канала на распределение среднего магнитного поля по радиусу. По правой оси представлена разность средних полей без магнитного канала и при его установке

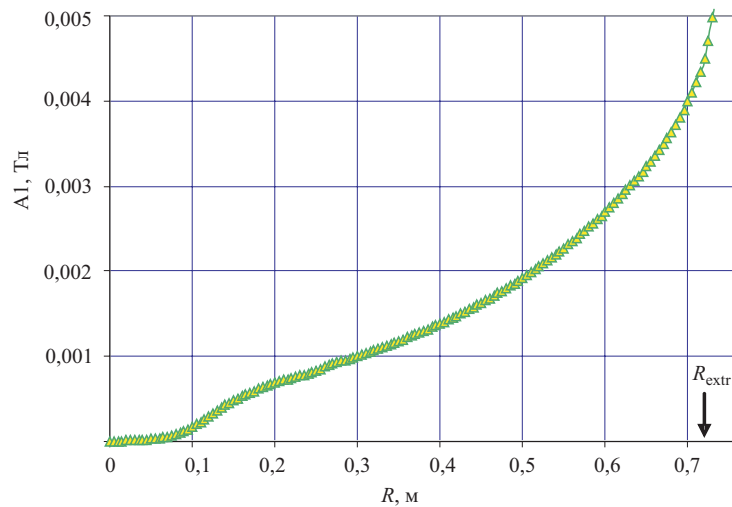


Рис. 14. Амплитуда первой гармоники магнитного поля, вызванная размещением магнитного канала

фазовым направлением строго в противоположную сторону от места размещения канала.

Для компенсации влияния магнитного канала использованы боковые секторные шиммы, представляющие собой стальные пластины, расположенные по бокам секторов (рис. 11). При помощи шимм проведена коррекция изменений среднего поля и компенсация первой гармоники, возникающих при установке магнитного канала. В силу однонаправленного расположения рассматриваемой фазы первой гармоники обработке подверглись шиммы, установленные на секторах, в области которых размещен магнитный канал. Векторный анализ и расчетные функции влияния позволили получить необходимую форму указанных шимм.

## 7. СИСТЕМА МАГНИТНЫХ ИЗМЕРЕНИЙ ЦИКЛОТРОНА DC-60

Окончательное формирование магнитного поля проводилось при помощи специально разработанной системы магнитных измерений. Измерения проводились в медианной плоскости магнита.

Магнитометр представляет собой штангу из немагнитного материала с размещенными на ней восемью датчиками Холла. 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. Как азимутальное, так и радиальное движения осуществляются посредством пневматических двигателей. Каждое перемещение контролируется при помощи концевиков — оптопар. 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.

Система магнитных измерений обеспечивает несколько режимов работы, управляемых программным способом. Азимутальный диапазон перемещения штанги магнитных измерений может принимать одно из значений 90 или 360°, шаг азимутального перемещения 1 или 2°. Радиальный диапазон измерений составляет от 0 (центр магнита) до 1120 мм с шагом 10 или 20 мм. Механическая часть магнитометра обеспечивает точность позиционирования по азимуту не хуже 0,03°. Для радиального движения точность позиционирования не хуже 0,3 мм. Время, затрачиваемое на прохождение одного цикла измерений, составляет от 45 мин до 6 ч в зависимости от параметров азимутального и радиального перемещений. На магнитометре установлены восемь



Рис. 15. Размещение системы магнитных измерений в рабочей области электромагнита

датчиков Холла. Датчики расположены на радиально перемещаемой планке,двигающейся вдоль штанги. Расстояние между датчиками 140 мм. Установка нескольких датчиков Холла требует контроля «сшиваемости» данных измерений. Для этого предусмотрен дополнительный радиальный шаг, при котором предыдущий датчик встает на позицию последующего датчика. Данные с датчиков записываются в файл установленного формата и используются для дальнейшей обработки.

## 8. ИЗМЕРЕНИЕ И ФОРМИРОВАНИЕ МАГНИТНОГО ПОЛЯ ЦИКЛОТРОНА DC-60

Для окончательного формирования магнитного поля циклотрона DC-60 электромагнит с магнитометром был установлен на испытательном стенде ОИЯИ. Задачей стендовых испытаний является измерение магнитного поля в рабочей области электромагнита, внесение необходимых изменений в форму шимм для достижения расчетной формы магнитного поля и подготовка базы данных для программ настройки и управления циклотроном. Кроме того, на стенде проводятся контрольные испытания систем электропитания и охлаждения электромагнита. На рис. 16 представлена кривая возбуждения магнита — зависимость уровня среднего поля от тока в основной обмотке магнита. В рабочем диапазоне вариации магнитного поля от 1,25 до 1,65 Тл потребляемая мощность меняется в пределах 12–45 кВт.

Из-за неточностей, возникающих при изготовлении и сборке магнитопровода, возможно отклонение формы среднего магнитного поля от расчетных значений, а также появление низших гармоник (прежде всего первой) в азиму-

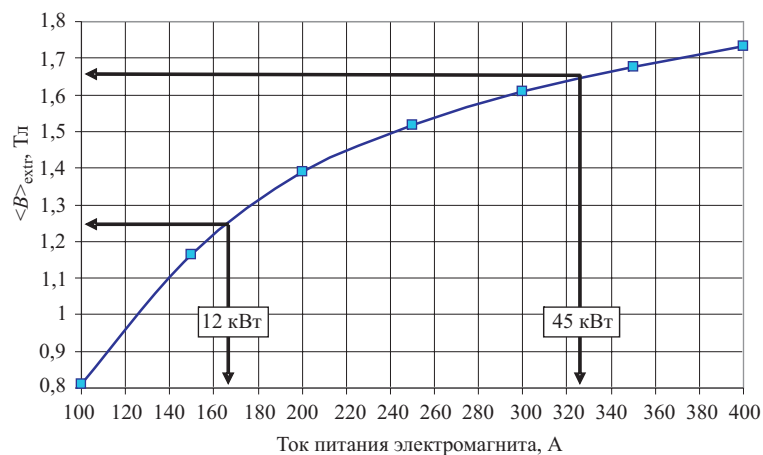


Рис. 16. Зависимость уровня среднего поля от тока питания основной обмотки электромагнита циклотрона DC-60

тальном поведении поля. Для коррекции этих отклонений в конструкции магнитопровода предусмотрены съемные шиммы. Положение и размеры шимм определены из оценки влияния возможных конструктивных отклонений на форму магнитного поля. На рис. 11 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. В ходе подготовки к магнитным измерениям при помощи численных методов определены функции влияния указанных шимм. С помощью функций влияния математическая обработка данных измерений позволяет получить необходимую форму обработки шимм для коррекции отклонений измеренного поля от расчетов.

Проведенные измерения магнитного поля на электромагните показали хорошее совпадение результатов измерений 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 (см. рис. 17–20). Разность в радиальном распределении сформированного среднего поля на уровне 1,43 Тл от расчетного не превышает  $10^{-3}$  Тл в основной области ускорения и  $1,05 \cdot 10^{-2}$  Тл в центральной части (рис. 18). Указанные отклонения корректируются радиальными катушками в процессе настройки ускорителя.

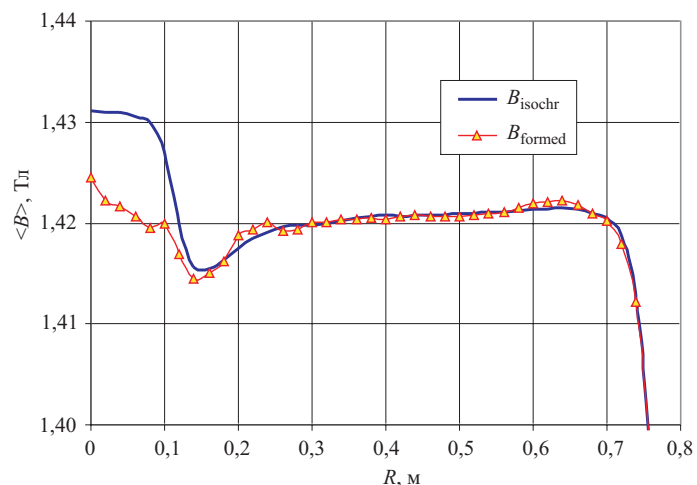


Рис. 17. Сравнение расчетного изохронного и сформированного в ходе измерений средних полей в номинальной рабочей точке

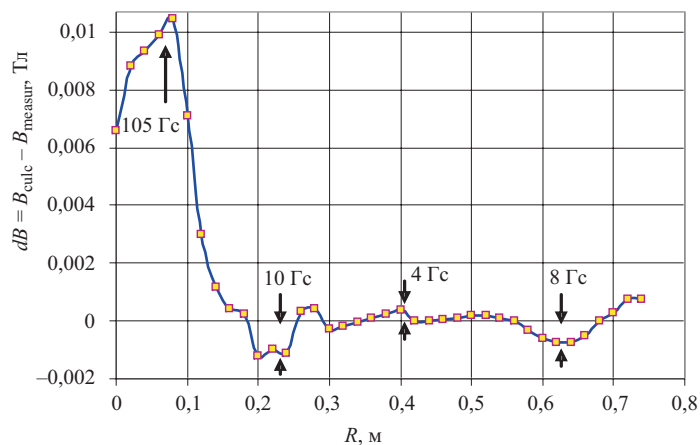


Рис. 18. Разность между расчетным и измеренным сформированным средними полями в выбранной рабочей точке

Оценка полученной формы среднего магнитного поля на трех рассматриваемых уровнях (в рабочей точке (1,43 Тл), на верхнем (1,65 Тл) и нижнем (1,25 Тл) уровнях) проводилась посредством расчета динамики пучков. На указанных уровнях подбиралась рабочая форма поля, близкая к изохронной. Подбор режима корректирующих катушек осуществлялся компьютерным способом с использованием полученных в ходе измерений данных о вкладах ра-

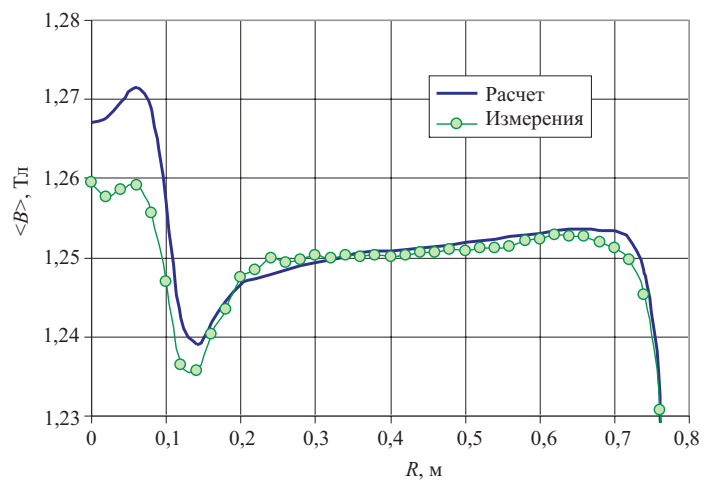


Рис. 19. Сравнение расчетного и измеренного средних полей для минимального уровня возбуждения электромагнита

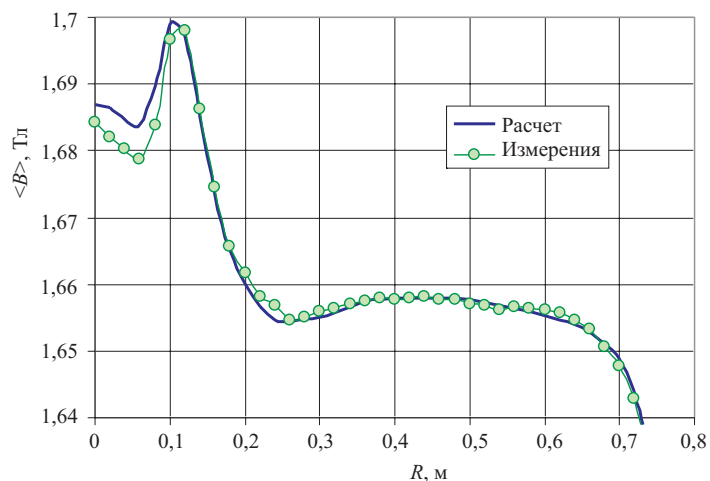


Рис. 20. Сравнение расчетного и измеренного средних полей для максимального уровня возбуждения электромагнита

диальных корректирующих катушек. На рис. 21 и 22 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 отклонение фазы пучка в процессе ускорения не более чем  $\Delta \sin \varphi = \pm 10^\circ$ .

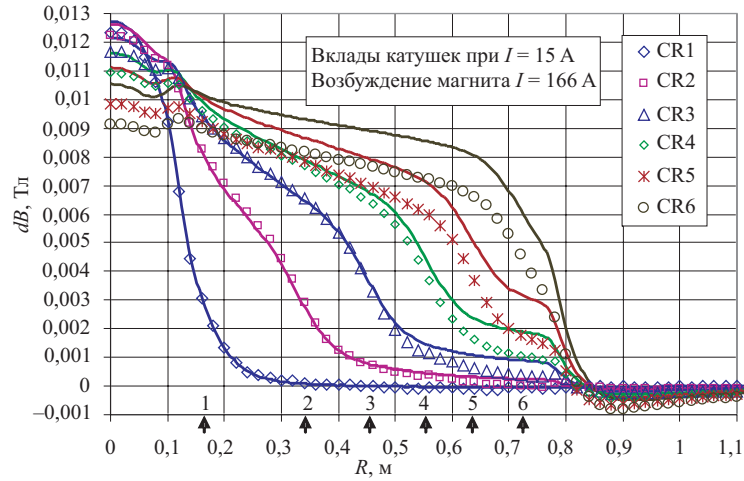


Рис. 21. Сравнение расчетных и измеренных вкладов радиальных корректирующих катушек на минимальном уровне поля. Стрелками обозначены положения катушек

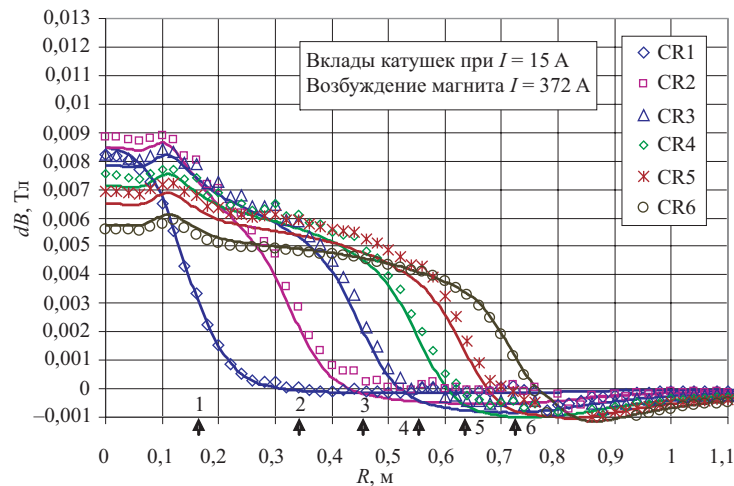


Рис. 22. Сравнение расчетных и измеренных вкладов радиальных корректирующих катушек на максимальном уровне поля. Стрелками обозначены положения катушек

На рис. 23 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.

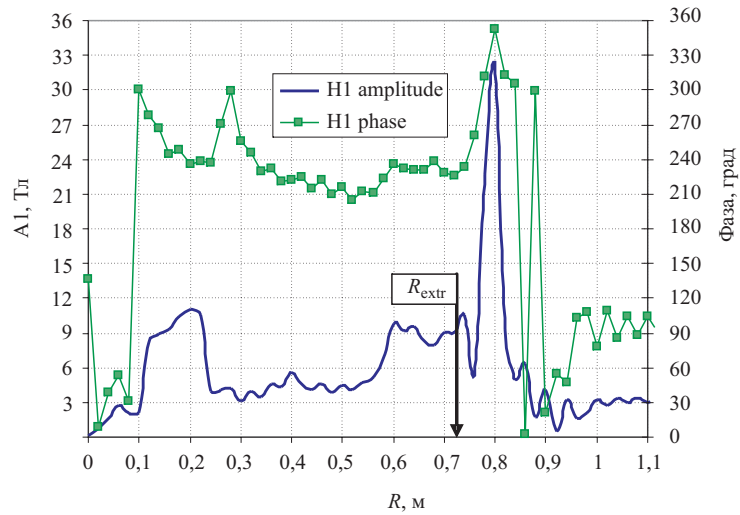


Рис. 23. Амплитуда и фаза первой гармоники до коррекции. Магнитный канал не установлен. Рассматриваемый диапазон радиусов от  $R_0 = 0$  до  $R_{\text{extr}} = 713$  мм

При установке магнитного канала помимо основной первой гармоники возникает дополнительная первая гармоника с амплитудой, представленной на рис. 14. Под основной понимается первая гармоника без магнитного канала.

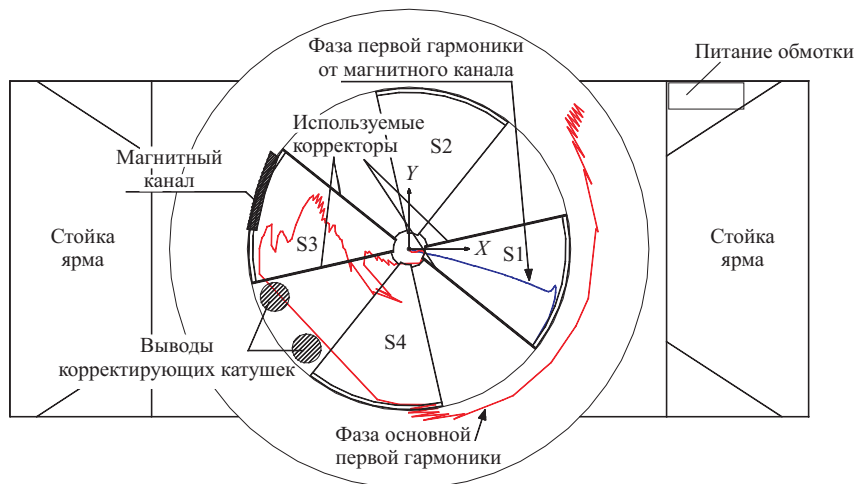


Рис. 24. Положение фазы как дополнительной, так и основной первых гармоник в привязке к геометрии магнитопровода



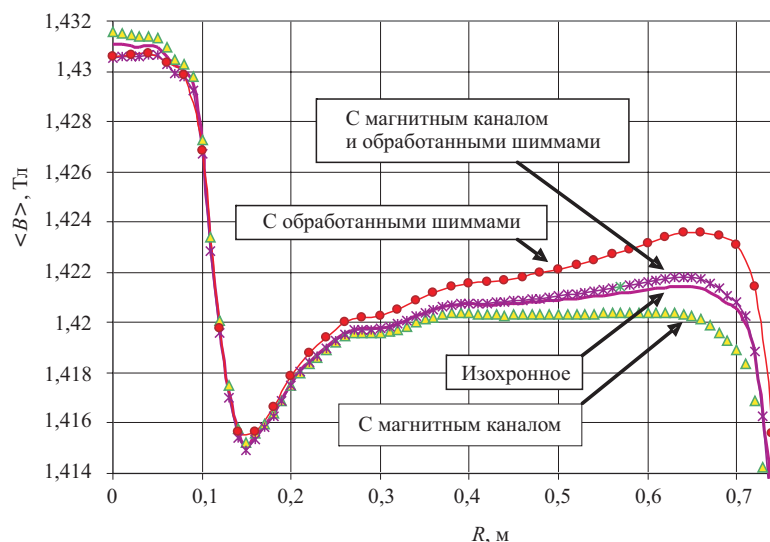


Рис. 25. Расчет средних полей в номинальной рабочей точке 1,43 Тл в следующих случаях: для изохронной формы, с установленным магнитным каналом, с установленными шиммами предложенной формы, с установленными одновременно магнитным каналом и шиммами

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. 25). Расчеты показали, что разность между полученной и изохронной формами среднего магнитного поля не превышает  $4 \cdot 10^{-4}$  Тл, которая может быть скомпенсирована радиальными корректирующими катушками для достижения изохронного режима ускорения.

Для получения необходимой формы боковых секторных шимм проведен векторный анализ суммарной первой гармоники, в результате которого вектор первой гармоники разложен на составляющие, соответствующие положению шимм. С использованием результатов анализа и расчетных функций влияния получены позиция и форма шимм, обеспечивающие искомую компенсацию.

На рис. 26 представлен вид шимм, установленных на боковой поверхности сектора.

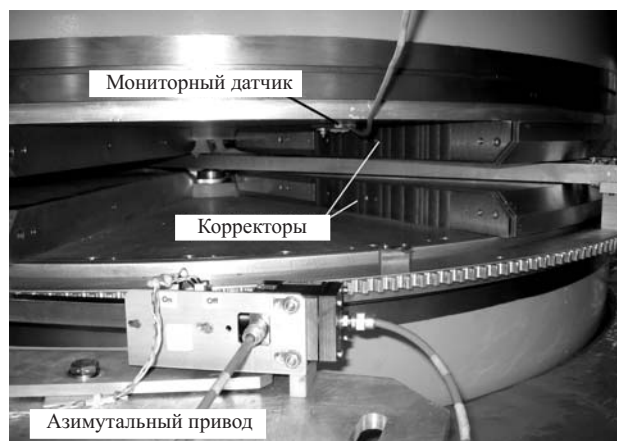


Рис. 26. Размещение корректоров на боковой поверхности сектора

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 проведение измерений магнитного поля с установленным магнитным каналом оказалось невозможным.

Для решения вопроса компенсации влияния канала на магнитное поле циклотрона применен косвенный метод. Предложенный метод заключается в проведении расчетов и измерений магнитного поля циклотрона с установленными боковыми шиммами, предназначенными для компенсации влияния магнитного канала. Магнитный канал в этом случае не устанавливается. Формирование магнитного поля проводится посредством боковых шимм в отсутствие магнитного канала для получения необходимой формы амплитуды и фазы первой гармоники.

Форма полученной амплитуды первой гармоники должна соответствовать амплитуде суммарной первой гармоники с установленным магнитным каналом.

Фаза полученной амплитуды первой гармоники должна быть противоположна фазе суммарной первой гармоники.

Таким образом, при установке боковых шимм с рассчитанным профилем происходит компенсация влияния канала на магнитное поле циклотрона.

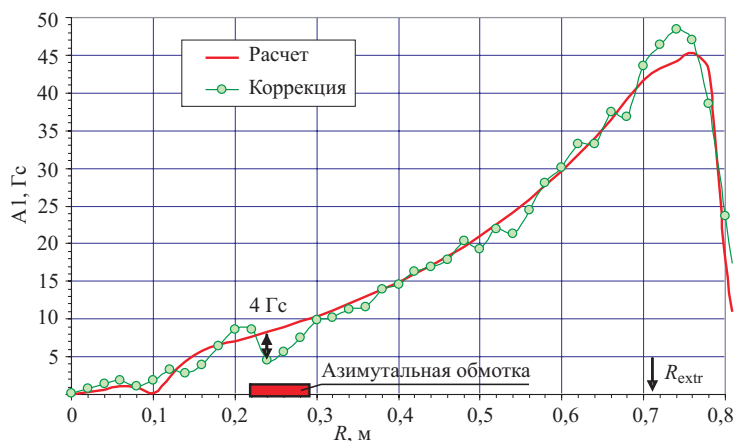


Рис. 27. Расчетная и полученная в ходе измерений амплитуды первой гармоники в случае установленных боковых шимм, без магнитного канала

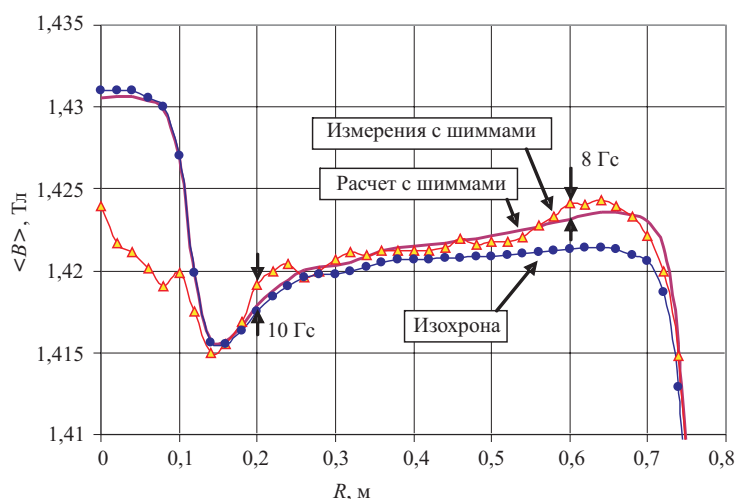


Рис. 28. Расчетная и измеренная формы средних полей в случае установленных боковых шимм, без магнитного канала

Результаты расчета и измерений при установленных шиммах представлены на рис. 7. В области ускорения разность между расчетной и полученной при измерениях амплитудами первой гармоники не превышает  $(2-4) \cdot 10^{-4}$  Тл.

На рис. 28 представлены расчетная и измеренная формы средних полей в случае установленных боковых шимм, без магнитного канала. Отклонение измеренной формы от расчетной не превышает  $(8-10) \cdot 10^{-4}$  Тл в основной

области ускорения. При установке магнитного канала и компенсирующих боковых шимм среднее поле примет форму, близкую к изохронной (рис. 25).

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Представленная в данной работе методика позволила за короткий период времени оптимальным образом сформировать магнитную структуру циклотрона DC-60. В результате комплексного использования аналитического и расчетного подходов удалось сформировать поля в широком диапазоне рабочих уровней от 1,25 до 1,65 Тл. Проведенные измерения на электромагните показали, что по предложенной методике среднее магнитное поле в основной области ускорения сформировано с точностью, лучшей чем  $10^{-3}$  Тл. Вклады корректирующих катушек, полученные в ходе расчетов и измерений, дают возможность формирования изохронных условий ускорения для любого режима, соответствующего рабочей диаграмме.

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. Необходимый для коррекции профиль секторных боковых шимм получен путем расчетов и моделирования. В ходе измерений магнитного поля при незначительном изменении расчетного профиля указанных шимм амплитуда суммарной первой гармоники уменьшена до приемлемого уровня  $(2-4) \cdot 10^{-4}$  Тл.

## ЛИТЕРАТУРА

1. *Gikal B. N. 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) // Cyclotrons and their applications. 2004. P. 205–207.
2. *Oganessian Yu. Ts. et al.* Modernization of the U400 Cyclotron at the FLNR JINR // Proc. of the 3rd Asian Part. Accelerator Conf., 22–26 March 2004, Korea. P. 79–81.
3. *Гикал Б. Н. и др.* Модернизация циклического имплантатора IC-100. Сообщение ОИЯИ Р9-2003-121. Дубна, 2003.
4. *Gulbekian G. et al.* DC-72 cyclotron magnetic field formation // Proc. of the 9th Russian Part. Accelerator Conf., 4–8 Oct. 2004, Russia. P. 147–149.
5. *Gikal B. N. et al.* Dubna Cyclotrons — status and plans // Cyclotrons and their applications. 2004. P. 100–104.

6. *Alexeev A. et al.* Effect of deformations caused by the ponderomotive force on magnet system quality in cyclotron DC-60 // Proc. of the 11th Intern. Conf. on Charged Part. Accelerators Applied in Medicine and Industry, 10–14 Oct. 2004, Russia. P. 219–223.
7. *Ivanenko I. et al.* The model of DC-72 cyclotron magnet. The research of the sector shimming methods for obtaining the working magnetic field for light and heavy ions acceleration // Proc. of the 8th European Part. Accelerator Conf., 3–7 June 2002, Paris. P. 2349–2351.
8. *Гульбекян Г. Г., Франко Й.* Алгоритм синтеза и анализа характеристик магнитных структур изохронных циклотронов с цилиндрическими полюсами. ОИЯИ, Р9-92-129. Дубна, 1992.
9. *Gulbekian G. et al.* A method of the magnetic field formation in cyclotron DC-72 // Nukleonika. 2003. V. 48, No. 4. P. 207–210.
10. *Gordon M. M.* Calculation of isochronous fields for sector-focused cyclotrons // Particle Accelerators. 1983. V. 13. P. 67.

Получено 9 ноября 2006 г.

Редактор *Е. В. Сабеева*

Подписано в печать 11.04.2007.

Формат 60 × 90/16. Бумага офсетная. Печать офсетная.

Усл. печ. л. 1,87. Уч.-изд. л. 2,27. Тираж 290 экз. Заказ № 55740.

Издательский отдел Объединенного института ядерных исследований  
141980, г. Дубна, Московская обл., ул. Жолио-Кюри, 6.

E-mail: [publish@jinr.ru](mailto:publish@jinr.ru)

[www.jinr.ru/publish/](http://www.jinr.ru/publish/)