

**СООБЩЕНИЯ  
ОБЪЕДИНЕННОГО  
ИНСТИТУТА  
ЯДЕРНЫХ  
ИССЛЕДОВАНИЙ  
ДУБНА**

A-484

9-88-62

**Ю.Г.Аленицкий, В.В.Леонов\*, Е.М.Ходаков\*,  
С.И.Чеснова, В.Х.Шлейфман\***

**РАСЧЕТНОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ  
МАГНИТНОЙ СТРУКТУРЫ  
СВЕРХПРОВОДЯЩЕГО ЦИКЛОТРОНА**

---

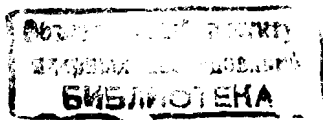
\*Институт атомной энергии им.И.В.Курчатова, Москва

**1988**

В Циклотронной лаборатории Института атомной энергии им.И.В.Курчатова разрабатывается проект реконструкции имеющегося изохронного циклотрона, который предполагает установку сверхпроводящих обмоток электромагнита с одновременной модернизацией основных систем циклотрона<sup>/1/</sup>.

Цель работы состоит в том, чтобы определить геометрию магнитной структуры, которая создавала бы среднюю магнитную индукцию, близкую к изохронной для режима ускорения ионов с  $A/Z = 2$  до энергии 30 МэВ/нуклон, и обеспечивала бы необходимую для этого режима фокусировку пучка ускоряемых ионов. Решение этой задачи осуществлялось методами расчетного моделирования с использованием программ ANALYS, POISSON<sup>/2/</sup> и FERRYМ<sup>/3/</sup>.

Комплекс программ для решения магнитоэстетической задачи ANALYS, созданной в ИАЭ, основан на методах магнитных зарядов и токовых петель в предположении равномерной намагниченности железа. (В данном случае уровень поля высокий, и поэтому это предположение правомерно). Этот комплекс программ предназначен для расчета трехмерной магнитной системы сверхпроводящего циклотрона и позволяет рассчитывать карту Z-компоненты магнитной индукции в medianной плоскости и определять среднюю по азимуту зависимость магнитной индукции от радиуса, вклад любого элемента магнитной системы, а также амплитуду и фазу азимутальных гармоник поля. Анализ этой геометрии занимает ~10 мин машинного времени БЭСМ-6. Две другие программы, используемые в процессе расчетного моделирования, FERRYМ и POISSON, учитывают нелинейные магнитные свойства ферромагнитных элементов системы, что требует больших затрат машинного времени, и, поскольку программы являются двумерными, они не дают информации об азимутальном распределении магнитного поля. Основной объем расчетных работ проводился с использованием программы ANALYS, на каждом этапе результаты уточнялись по программе POISSON или FERRYМ. Для исследования вопроса о достоверности получаемой информации было проведено расчетное моделирование существующей геометрии изохронного циклотрона ИАЭ при ампервитках обмотки 0,83 МА. Относительные отклонения радиальных зависимостей средних полей циклотрона, рассчитанных по программам POISSON и FERRYМ, от экспериментальных показаны на рис.1. Видно, что экспериментальная структура отражается расчетной моделью с точностью 2% для программы FERRYМ и меньше 1% для программы POISSON, причем относительное отклонение поля носит значительно более ровный характер. В этой программе для расчета секторной маг-



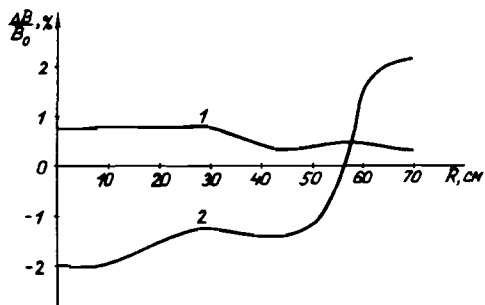


Рис.1. Отклонение расчетного среднего магнитного поля от экспериментального. 1 – программа POISSON, 2 – программа FERRYМ.

нитной структуры циклотрона введены коэффициенты заполнения при расчете неосесимметричных элементов. В программе FERRYМ такие элементы пред-

ставляются в виде осесимметричных систем.

Результаты расчетов магнитной системы, проведенных по программам ANALYS и FERRYМ, показаны на рис.2. Конфигурация полюса и расположение катушки приведены на рисунке, суммарные ампер-витки составляют  $I = 2$  МА. Видно, что на уровне поля 2,8 Тл максимальное расхождение кривых не превышает 2%. При снижении уровня поля до 2 Тл, при котором предполагается работа магнитной системы, отличие возрастает до 4-5%, что объясняется уменьшением модуля вектора намагниченности и постепенным выходом системы из насыщения.

Расчетное моделирование магнитной системы сверхпроводящего циклотрона проводилось в два этапа. Результатом первого этапа явился вариант геометрии магнитной системы с радиусом полюса и секторной структуры, равным  $R_k = 875$  мм (рис.3). Этот вариант разрабатывался с учетом имевшейся конструкции сверхпроводящей обмотки. Зазор между обмотками составлял 700 мм, а система крепления обмоток использовала конусную часть полюсных наконечников, что ограничило радиус  $R_k$ . По сравнению с существующей геометрией магнитной

системы изохронного циклотрона в этом промежуточном варианте предполагалось: 1) уменьшить высоту конусной части до 90 мм, 2) ввести кольцевую шимму высотой 125 мм для формирования необходимого радиального роста поля, 3) увеличить высоту секторов до 200 мм с одновременным

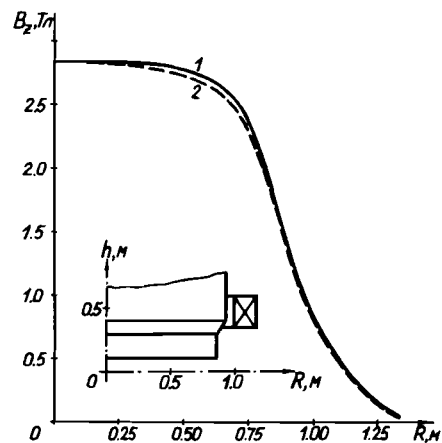


Рис.2. Расчет радиального распределения среднего магнитного поля по программам ANALYS (1) и FERRYМ (2), показана также расчетная геометрия.

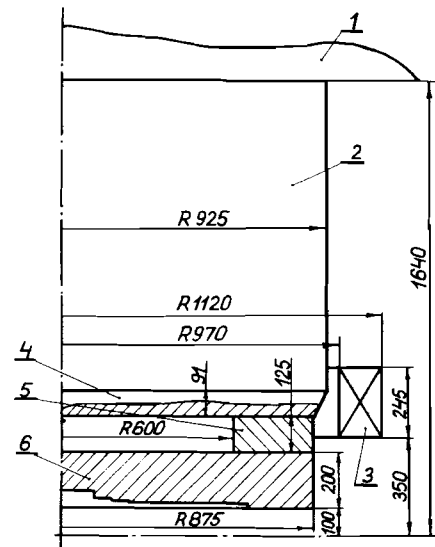


Рис.3. Конфигурация элементов магнитной системы с радиусом полюса  $R_k = 875$  мм: 1 – ярмо, 2 – полюс, 3 – сверхпроводящая обмотка, 4 – корпус полюса, 5 – кольцевая шимма, 6 – секторная шимма.

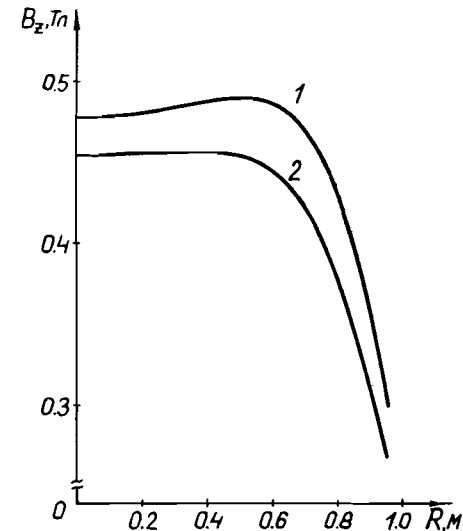


Рис.4. Радиальные зависимости Z-компонент и магнитного поля от сверхпроводящих обмоток при различных зазорах между ними: 1 –  $h_k = 600$  мм, 2 –  $h_k = 700$  мм.

уменьшением их угловой ширины на  $15^\circ$  с целью увеличения флаттера. Проведенные расчеты показали, что такая система способна обеспечить ускорение ионов с  $A/Z = 2$  до 30 МэВ/нуклон на уровне поля  $\sim 2,2$  Тл ( $IW = 1,8$  МА).

Второй этап разработки магнитной структуры определился после дополнительной проработки конструкции сверхпроводящей обмотки, когда появилась возможность уменьшить зазор между обмотками до 600 мм и отказаться от конусной части полюсных наконечников, что позволило увеличить конечный радиус секторной структуры до  $R_k = 925$  мм.

Уменьшение зазора между сверхпроводящими обмотками ( $h_k$ ) позволяет сделать вклад в общее поле магнитной системы более оптимальным. Это отражено на рис.4, где показаны радиальные зависимости Z-компоненты магнитной индукции, создаваемой в медианной плоскости сверхпроводящими обмотками при  $h_k = 700$  и  $h_k = 600$  мм при суммарных ампер-витках 1 МА.

С другой стороны, увеличение конечного радиуса позволяет увеличить флаттер, а следовательно, и фокусирующий член за счет того,

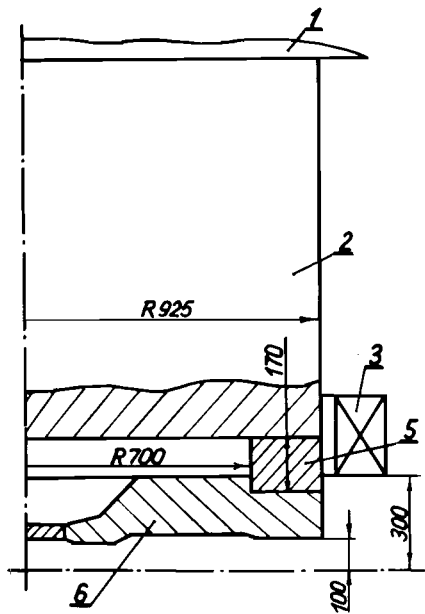
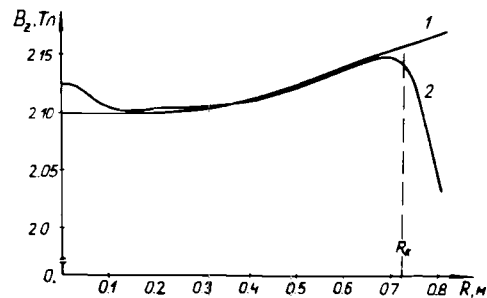


Рис.5. Конфигурация элементов магнитной системы с радиусом полюса  $R_k=925$  мм (обозначения и аналогичные размеры см. на рис.3).

Рис.6. Зависимость средней магнитной индукции от радиуса (2) для магнитной системы, показанной на рис.5, и требуемое поле (1).



что ускорение до тех же энергий будет проводиться при меньших уровнях поля (а, кроме того, это дает возможность ослабить требования к параметрам выводной системы). Таким образом, после расчетов второго этапа была определена геометрия магнитной системы с  $R_k=925$  мм (рис.5). На рис.6 показана зависимость средней магнитной индукции от радиуса, создаваемая системой при  $I_w = 1,65$  МА. Здесь же показана требуемая зависимость поля для изохронного ускорения ионов с  $A/Z = 2$  до 30 МэВ/нуклон. Конечный радиус ускорения при  $\bar{V} \sim 2,1$  Тл составляет  $\sim 750$  мм. "Бамп" поля в области радиусов  $\leq 150$  мм, величина которого составляет  $\sim 1,5\%$  от значения индукции в центре, необходим для обеспечения вертикальной фокусировки ускоряемых ионов на первых оборотах. Фазовый сдвиг при этом не будет превышать  $\sim 30^\circ$ .

Для обеспечения необходимого радиального роста поля размеры кольцевой шиммы должны составлять: внешний радиус  $R_n=925$  мм, внутренний  $R_v=700$  мм, высота  $h=175$  мм. Радиальные зависимости индукции для двух геометрий кольцевых шимм представлены на рис.7. Видно, что максимальный положительный градиент поля новой шиммы создается на радиусах (600-700)мм, то есть именно там, где необходимо обеспечение максимально возможного конечного изохронного радиуса, равного для рассматриваемой геометрии  $\sim 700$  мм.

Существенно изменена и геометрия секторной структуры (рис.5). Зазор в холме в области начальных радиусов уменьшен до 175 мм с целью увеличения флаттера. Зазоры в холме в области средних радиусов

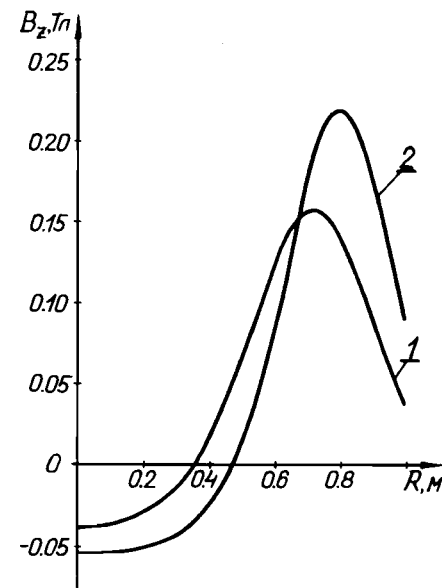


Рис.7. Радиальные зависимости индукций для двух геометрий кольцевых шимм: 1 -  $R_k=875$  мм, 2 -  $R_k=925$  мм.

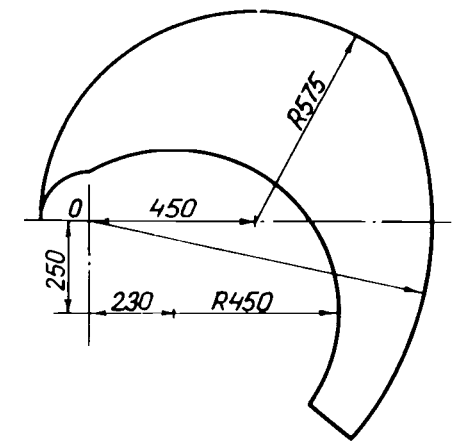


Рис.8. Выбранная конфигурация секторной шиммы.

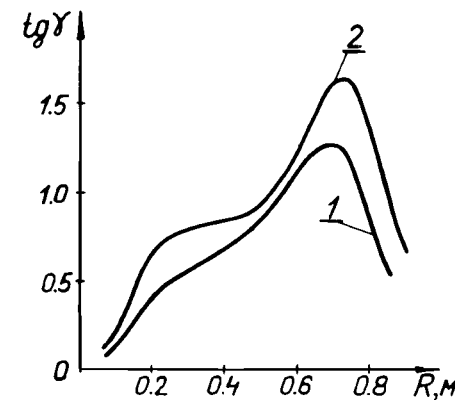


Рис.9. Радиальные зависимости тангенса угла спиральности для двух геометрий: 1 -  $R_k=875$  мм, 2 -  $R_k=925$  мм.

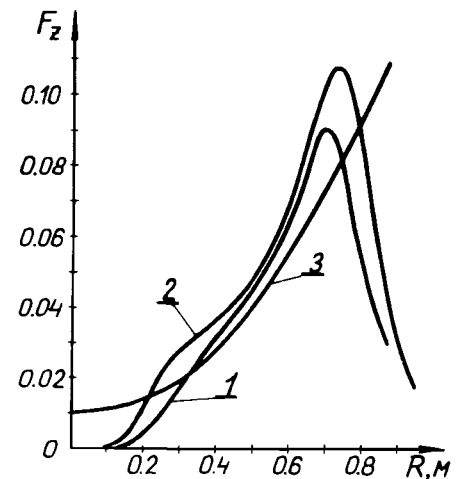


Рис.10. Радиальные зависимости фокусирующего члена для секторной структуры: 1 -  $R_k=875$  мм, 2 -  $R_k=925$  мм, 3 - требуемая зависимость.

(230 мм) и на конечных радиусах (200 мм) остались прежними. Увеличена спиральность азимутальных границ сектора, выбранный профиль сектора показан на рис.8. Радиальные зависимости тангенса угла спиральности ( $tg\gamma$ ) для двух геометрий секторов приведены на рис.9. Сильное увеличение  $tg\gamma$  в области радиусов (0,15÷0,4) м и более 0,6 м, а также повышение флаттера на начальных радиусах, привело к росту фокусирующего члена, что отражено на рис.10, где показаны радиальные зависимости фокусирующего члена для секторной структуры. Здесь же изображена зависимость фокусирующего члена, требуемого для обеспечения вертикальной фокусировки при ускорении ионов с  $A/Z$  до 2 МэВ/нуклон.

Таким образом, в результате проведенной работы для двух случаев определена геометрия магнитной системы сверхпроводящего циклотрона ИАЭ, позволяющая сформировать магнитное поле, требуемое для устойчивого ускорения ионов с  $A/Z = 2$  до энергии 30 МэВ/нуклон.

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Веников Н.И. и др. – Проектные параметры и особенности циклотрона ИАЭ им. И.В.Курчатова со сверхпроводящей обмоткой. Труды IX Всесоюзного совещания по ускорителям заряженных частиц. ОИЯИ, Дубна, 1983, с. 75.
2. CERN Computer Centre Program Library, POISCR, t.604, Chr. Iselin, 1983.
3. Дойников Н.И., Симаков А.С. Препринт НИИЭФА, Б-0273, Ленинград, 1976.

Рукопись поступила в издательский отдел  
25 января 1988 года.

#### НЕТ ЛИ ПРОБЕЛОВ В ВАШЕЙ БИБЛИОТЕКЕ?

Вы можете получить по почте перечисленные ниже книги, если они не были заказаны ранее.

Д13-84-63	Труды XI Международного симпозиума по ядерной электронике. Братислава, Чехословакия, 1983.	4 р. 50 к.
Д2-84-366	Труды 7 Международного совещания по проблемам квантовой теории поля. Алушта, 1984.	4 р. 30 к.
Д1,2-84-599	Труды VII Международного семинара по проблемам физики высоких энергий. Дубна, 1984.	5 р. 50 к.
Д17-84-850	Труды III Международного симпозиума по избранным проблемам статистической механики. Дубна, 1984. (2 тома)	7 р. 75 к.
Д11-85-791	Труды Международного совещания по аналитическим вычислениям на ЭВМ и их применению в теоретической физике. Дубна, 1985.	4 р. 00 к.
Д13-85-793	Труды XII Международного симпозиума по ядерной электронике. Дубна, 1985.	4 р. 80 к.
Д4-85-851	Труды Международной школы по структуре ядра. Алушта, 1985.	3 р. 75 к.
Д3,4,17-86-747	Труды V Международной школы по нейтронной физике Алушта, 1986.	4 р. 50 к.
—	Труды IX Всесоюзного совещания по ускорителям заряженных частиц. Дубна, 1984. (2 тома)	13 р. 50 к.
Д1,2-86-668	Труды VIII Международного семинара по проблемам физики высоких энергий. Дубна, 1986. (2 тома)	7 р. 35 к.
Д9-87-105	Труды X Всесоюзного совещания по ускорителям заряженных частиц. Дубна, 1986. (2 тома)	13 р. 45 к.
Д7-87-68	Труды Международной школы-семинара по физике тяжелых ионов. Дубна, 1986.	7 р. 10 к.
Д2-87-123	Труды Совещания "Ренормгруппа - 86". Дубна, 1986.	4 р. 45 к.
Д4-87-692	Труды Международного совещания по теории малочастичных и кварк-адронных систем. Дубна, 1987.	4 р. 30 к.
Д2-87-798	Труды VIII Международного совещания по проблемам квантовой теории поля. Алушта, 1987.	3 р. 55 к.
Д14-87-799	Труды Международного симпозиума по проблемам взаимодействия мюонов и пионов с веществом. Дубна, 1987.	4 р. 20 к.

Заказы на упомянутые книги могут быть направлены по адресу: 101000 Москва. Главпочтамт, п/я 79. Издательский отдел Объединенного института ядерных исследований.