

СООБЩЕНИЯ
ОБЪЕДИНЕННОГО
ИНСТИТУТА
ЯДЕРНЫХ
ИССЛЕДОВАНИЙ

ДУБНА



3346/2-78

14/8-78

3-328

9 - 11533

Н.Л.Заплатин, Е.В.Самсонов, А.Ф.Чеснов

МОДЕЛИРОВАНИЕ СЕКТОРНОГО
ЭЛЕКТРОМАГНИТА
СУПЕРЦИКЛОТРОНА (М 1:15)

1978

9 - 11533

Н.Л.Заплатин, Е.В.Самсонов, А.Ф.Чеснов

МОДЕЛИРОВАНИЕ СЕКТОРНОГО
ЭЛЕКТРОМАГНИТА
СУПЕРЦИКЛОТРОНА (М 1:15)

Заплатин Н.Л., Самсонов Е.В., Чеснов А.Ф.

9 - 11533

Моделирование секторного электромагнита суперциклотрона
(М 1:15)

Работа посвящена созданию магнитной системы суперциклотрона, предназначенного для ускорения протонов до 800 МэВ с интенсивностью пучка 10-100 мА. Приведены результаты экспериментальных исследований модели секторного магнита суперциклотрона в масштабе 1:15. Магнитные измерения проводились датчиком Холла с точностью 1%. Определены размеры магнитопровода и полюса магнита, исследован эффект шимм, укрепленных на боковых поверхностях полюса, оценены факторы, влияющие на фокусирующие свойства магнитной системы суперциклотрона. На основании полученных результатов разрабатывается модель магнита в масштабе 1:5.

Работа выполнена в Лаборатории ядерных проблем ОИЯИ.

Сообщение Объединенного института ядерных исследований. Дубна 1978

Zaplatin N.L., Samsonov E.V., Chesnov A.F.

9 - 11533

Modelling of Sector Magnet of Supercyclotron
(Scale 1:15)

The investigation is related to the problem of creating the magnetic system of the supercyclotron which will accelerate protons up to an energy of 800 MeV with the intensity 10-100 mA. The experimental results obtained with the model of sector magnet in a scale 1:15 are presented. The magnetic measurements were performed by the Hall probe with the accuracy of about 1 percent. The dimensions of the magnet yoke and pole were defined, the effect of shimmes placed on lateral sides of a pole is investigated. The factors effecting focusing properties of the supercyclotron magnetic system are evaluated. On the base of obtained results the magnet model in the scale 1:15 is designed.

The investigation has been performed at the Laboratory of Nuclear Problems, JINR.

Communication of the Joint Institute for Nuclear Research. Dubna 1978

ВВЕДЕНИЕ

В Лаборатории ядерных проблем ОИЯИ разрабатывается новый тип ускорителя - суперциклотрон^{1,2/}, предназначенный для ускорения протонов до энергии 800 МэВ с интенсивностью пучка 10-100 мА.

Он состоит из линейного ускорителя - инжектора на энергию протонов 50 МэВ и кольцевого изохронного циклотрона с жесткой фокусировкой. Магнитная система циклотрона содержит восемь секторных С-образных электромагнитов со спиральными полюсными наконечниками. В четырех промежутках между магнитами располагаются ВЧ-резонаторы, ширина которых в средней плоскости составляет ~ 60 см.

Высокие требования, предъявляемые к поддержанию изохронизма и фокусировки пучка, вместе с ограничениями, которые накладываются на промежутки для ускоряющей системы, вызывают необходимость последовательного моделирования магнитной системы для изучения полномасштабной конструкции ускорителя.

В данной работе приведены результаты формирования магнитного поля модели секторного электромагнита суперциклотрона с коэффициентом подобия 1:15.

Предварительные параметры магнита суперциклотрона были приведены в работах^{2,3/}, где конфигурация боковых поверхностей полюса была выбрана такой, что средняя линия описывалась дугами окружностей, а угловая протяженность удовлетворяла уравнению:

$$\Delta \phi = A r^2 + B r + D,$$

/1/

где A , B , D - постоянные коэффициенты. Дальнейшее получение необходимых характеристик поля обеспечивалось профилированием межполюсного зазора.

Представляет интерес другой подход к формированию требуемого магнитного поля с помощью секторных магнитов со следующей геометрией:

а/ боковые границы полюса описываются дугами окружностей;

б/ межполюсной зазор - плоский.

Удовлетворение этих двух требований значительно повышает технологичность изготовления полюсов магнита и облегчает получение необходимой точности формирования поля.

Кроме исследования этих возможностей, моделирование проводилось с целью:

1/ определения размеров магнитопровода и требуемого уровня возбуждения в обмотках магнита;

2/ выбора положения обмотки возбуждения;

3/ изучения возможности шиммирования поля с помощью ферромагнитных накладок на боковых поверхностях полюса.

1. ОПИСАНИЕ МОДЕЛИ

Геометрия изготовленной модели магнита показана на рис. 1. Она состоит из верхнего и нижнего ярма магнита, стойки, полюсных накладок и обмотки возбуждения.

Ярма магнита набраны из листовой стали толщиной 0,78 см. Боковые стороны полюсных накладок выполнены по дугам окружностей. Магнитные характеристики материала моделей магнита должны учитываться при изготовлении полномасштабного магнита ускорителя. С этой целью были измерены зависимости $B(H)$ и $\mu(H)$ для стали модели магнита, которые показаны на рис. 2. На рис. 3 приведены графики зависимостей угловой протяженности и угла спиральности для конфигураций полюса, найденных в [2,3], и для описываемой модели магнита. Видно, что максимальная разность угловых протяженностей двух вариантов полюса не превышает

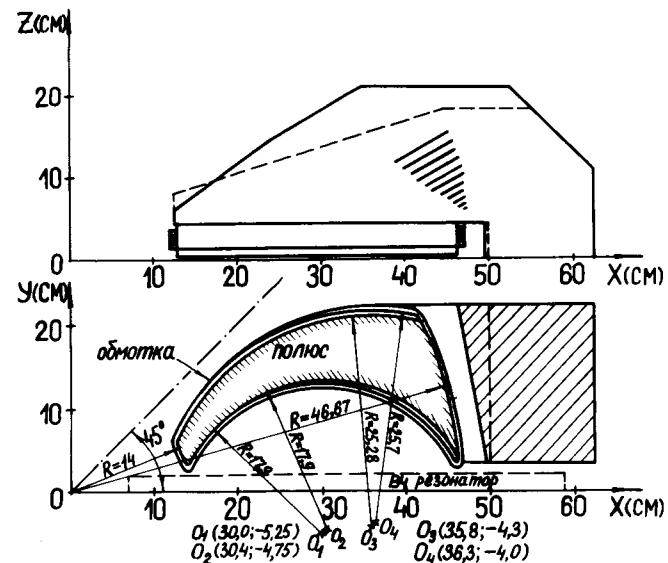


Рис. 1. Модель секторного магнита суперциклотрона. --- первоначальная геометрия ярма, — выбранная геометрия ярма.

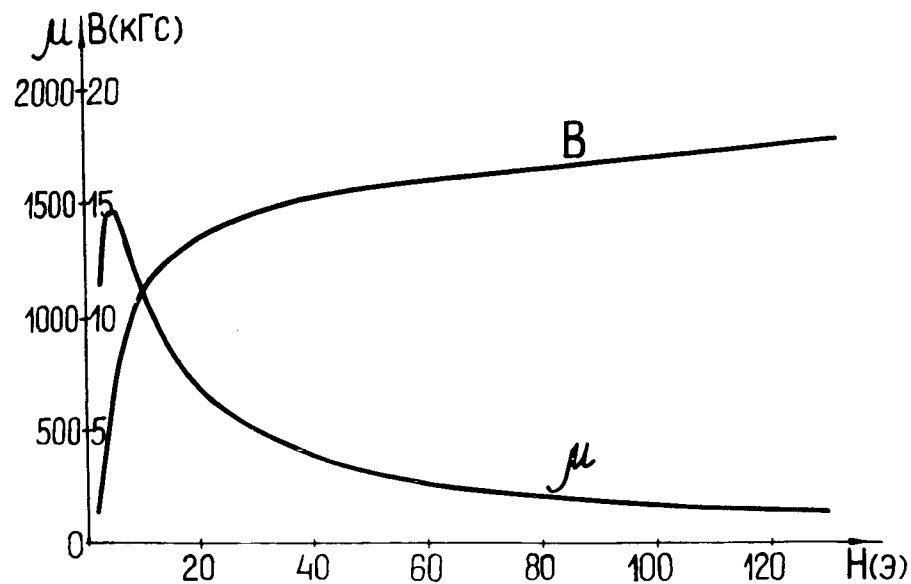


Рис. 2. Измеренные магнитные характеристики стали модели магнита.

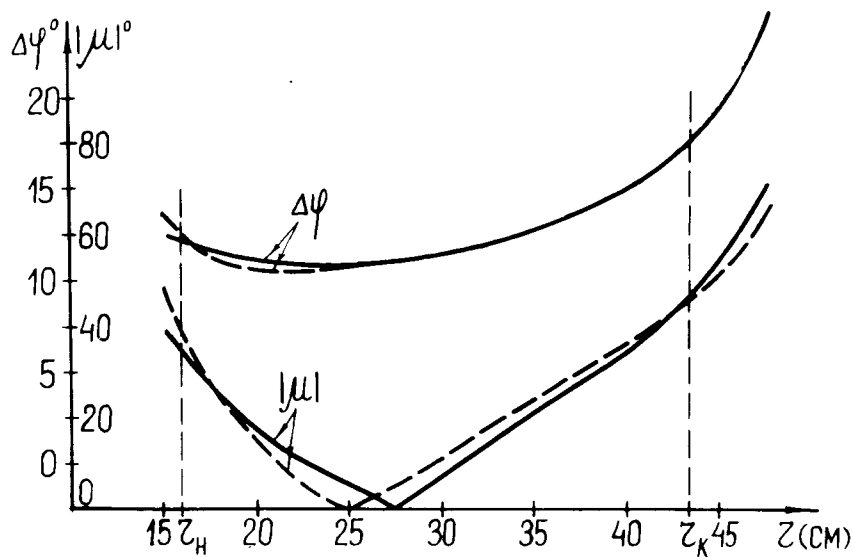


Рис. 3. Зависимость угловой протяженности $\Delta\varphi$ и угла спиральности μ . — для описываемой модели, — найденные в [3].

$0,5^\circ$ в диапазоне радиусов $/16,3-43,4/$ см. Максимальное отличие углов спиральностей составляет $\sim 5^\circ$.

Обмотка возбуждения электромагнита состоит из двух независимо охлаждаемых витков, соединенных последовательно по току, и набрана из медных трубок квадратного сечения $0,85 \times 0,85$ см с отверстием для охлаждения $\varnothing 0,5$ см. Максимально допустимый ток, по условиям охлаждения, равен 11 кА /плотность тока по меди $j_M = 70$ А/мм²/. Питание обмотки возбуждения осуществляется от стандартного выпрямителя типа ВАК-12500-12-4 / $I_{II} = 12,5$ кА; $U_{II} = 12$ В/.

2. СИСТЕМА ИЗМЕРЕНИЯ И ОБРАБОТКИ ДАННЫХ

Измерения магнитного поля проводились холловским магнитометром в средней плоскости зазора с помощью датчика, установленного на штангу, которая перемеща-

лась в азимутальном угле 55° с шагом $0,5^\circ$. Радиальный шаг изменялся от $0,5$ до 2 см, в зависимости от области измерений поля.

Полная топография магнитного поля сектора обычно измерялась в ~ 3000 точках. При этом информация автоматически пробивалась на перфокарты, а затем обрабатывалась на ЭВМ.

Ввиду того, что угловая протяженность поля магнита значительно превышала /вместе с полями рассеяния/ максимально возможный угол перемещения штанги, при обработке карты поля на ЭВМ проводилась линейная аппроксимация полей рассеяния. Для этого к измеренному азимутальному распределению поля с двух сторон добавлялись линейно спадающие до нуля поля рассеяния с угловой протяженностью, равной 60° .

При получении характеристик магнитного поля на ЭВМ проводилась также расчетная суперпозиция полей 8 секторов магнитной системы. Все магниты при этом считались независимыми друг от друга. Оценки показывают, что точность моделирования /по среднему полю/ составляла $\sim 3-5\%$ и определялась точностью холловского магнитометра $\sim 1\%$ и способами аппроксимации полей рассеяния и суперпозиции полей секторных магнитов. Такая относительно низкая точность моделирования, по сравнению с требуемой точностью формирования изохронного поля $/10^{-2}\%$ /, позволяет, тем не менее, достичь целей моделирования, которые были отмечены выше, и дать информацию для конструирования следующих, более крупных моделей магнита.

3. ПОЛУЧЕННЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ

а/ Ядро магнита

В верхней части рис. 1 штриховой линией показана первоначальная геометрия ядра магнита. Вертикальные размеры ядра в этой конфигурации определялись геометрией модели магнита моноэнергетического цикло-

трона /МЦ/ ^{4/}, из деталей которой была изготовлена описываемая модель магнита суперциклотрона.

Последующая оптимизация конфигурации магнитопровода была проведена после измерения нескольких карт поля при постепенном наращивании ярма магнита и при разных токах возбуждения. Необходимые изменения геометрии ярма определялись с помощью численных расчетов на ЭВМ по программе TRIMD ^{5/} и измерений распределения магнитных потоков, с целью выявления областей насыщения железа магнитопровода.

Суммарный поток вдоль магнитной цепи был измерен в режиме включения и выключения тока в обмотке возбуждения с помощью милливеберметра М19 и измерительных катушек, расположенных так, как показано на рис. 4.

Полный поток, измеряемый прибором, равен:

$$\Phi = \frac{k}{w_k} \int u(t) dt, \quad /2/$$

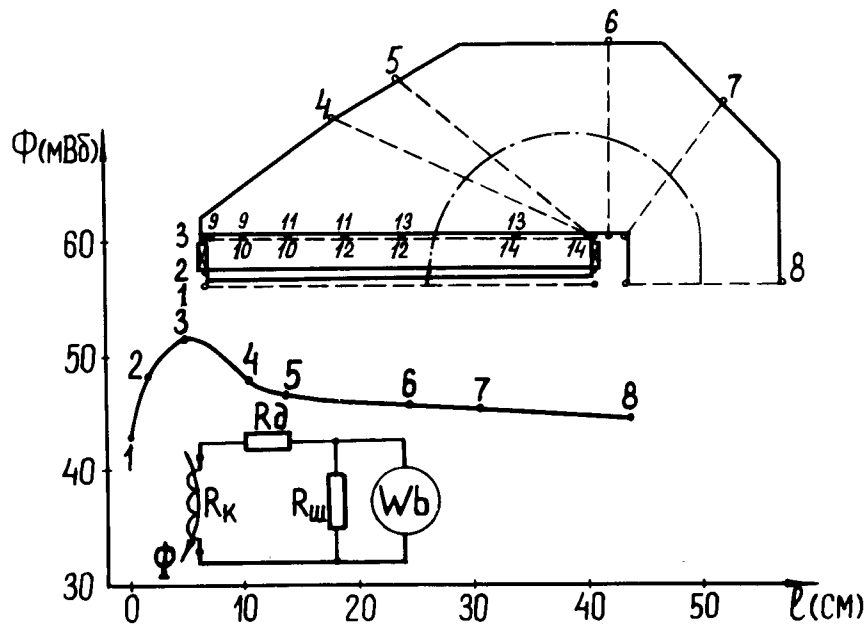


Рис. 4. Распределение потока вдоль магнитной цепи магнитопровода.

где

$$k = \frac{R_k + R_d + R_{ш}}{R_{ш}},$$

R_d - добавочное сопротивление, R_k - сопротивление измерительной катушки, $R_{ш}$ - сопротивление шунта, w_k - напряжение, снимаемое с шунта, $u(t)$ - число витков измерительной катушки.

Измерения кривой намагничивания и магнитных потоков в магните с ярмом, отмеченным на рис. 1 штриховой линией, показали, что магнитопровод обладает относительно большим магнитным сопротивлением. При токе возбуждения $I_B = 7500$ А сопротивление магнитопровода составляло 50-60% от общего сопротивления магнитной цепи. Потоки рассеяния вокруг обмотки составляли ~20% от полезного потока, проходящего через среднюю плоскость магнита. При увеличении тока возбуждения от $I_B = 7000$ до $I_B = 9000$ А наблюдалось уменьшение среднего поля $B(r)$ на радиусах, меньших 21 см, и рост флаттера во всем диапазоне радиусов, что объясняется наличием локальных областей насыщения и относительным увеличением полей рассеяния.

Оценочные расчеты, проведенные по программе TRIMD для двумерной конфигурации, показали, что в области ярма, обозначенной штриховкой на рис. 1, имеет место насыщение железа магнита / $B = 20-23$ кГс, $\mu = 60-15$ /. Геометрические размеры ярма магнита были определены после выполнения двух требований:

- 1/ достижение необходимого уровня среднего поля во всем диапазоне радиусов при приемлемом токе возбуждения / $I_B = 7500$ А/;
- 2/ значение средней индукции в сечениях ярма не должно превышать величины 16-17 кГс.

Выбранная конфигурация магнитопровода показана на рис. 1 сплошной линией. В табл. 1 приведены значения магнитных потоков в 14 сечениях и соответствующие им средние индукции.

Из таблицы видно, что для выбранной конфигурации ярма, несмотря на относительно низкий уровень поля в зазоре /14-18/ кГс, полюса магнита находятся в со-

Таблица 1

 $I_{в} = 7500 \text{ А}$

Номер измерительной катушки	$I_{в} = 7500 \text{ А}$							
	1	2	3	4	5	6	7	8
Средняя индукция ν (кГс)	16,7	19,0	18,7	17,1	18,2	14,3	17,0	16,4
Магнитный поток Φ (мВб)	42,7	48,3	51,5	47,8	46,7	45,8	45,2	44,0
Номер измерительной катушки	9	10	11	12	13	14		
Средняя индукция ν (кГс)	21,9	25,6	19,2	19,1	17,9	18,2		
Магнитный поток Φ (мВб)	1,4	3,6	4,0	5,5	16,0	21,0		

стоянии, близком к насыщению /сеч. 9-14/, что является следствием значительных потоков рассеяния.

На рис. 5 приведены кривые намагничивания для начального /штриховые линии/ и выбранного /сплошные линии/ вариантов ярма магнитопровода. Из графиков видно, что при токе возбуждения $I_{в} = 7500 \text{ А}$ добавка железа привела к уменьшению сопротивления магнитопровода на 5-10%, при общем подъеме поля в зазоре на 20%.

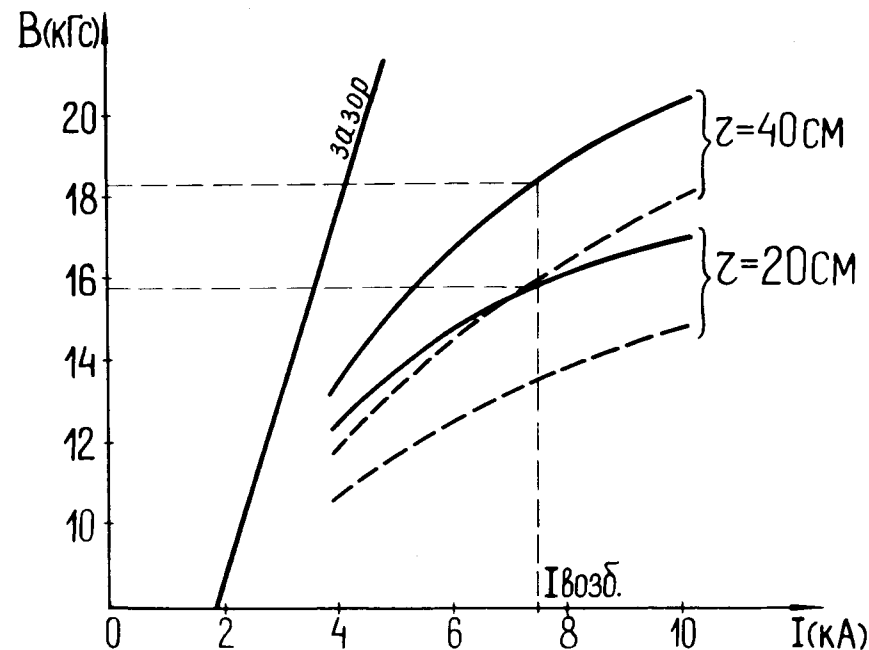


Рис. 5. Кривые намагничивания для начального и выбранного вариантов ярма магнитопровода; — — — — — для выбранного, — — — — — для начального.

б/ Среднее поле и частоты свободных колебаний

Азимутальное распределение магнитного поля, измеренное в плоскости $z = 0$ для выбранных параметров секторного магнита показано на рис. 6. На рис. 7

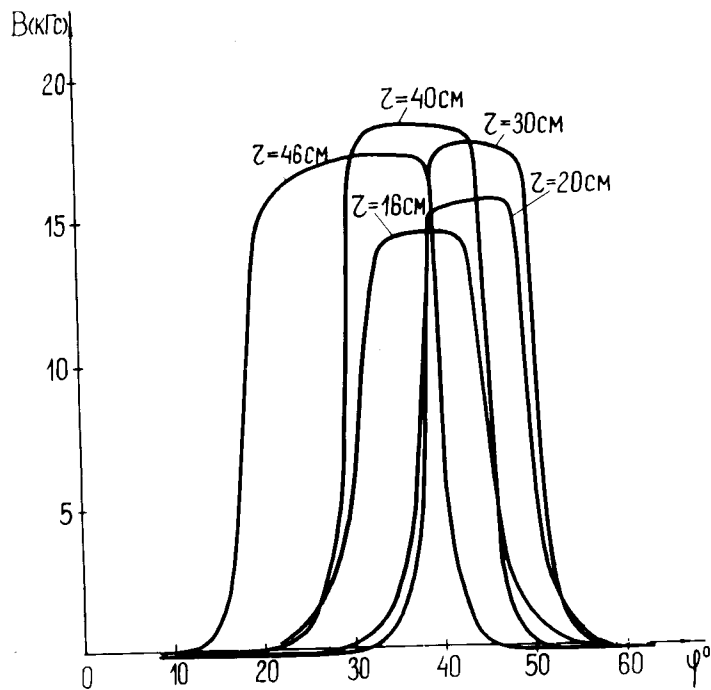


Рис. 6. Азимутальное распределение поля в медианной плоскости.

приведены результаты расчета среднего поля $\bar{B}(r)$, флаттера

$$F = \frac{\overline{B^2} - \bar{B}^2}{\bar{B}^2}, \quad /3/$$

частот свободных колебаний

$$Q_r^2 \approx 1 + n, \quad /4/$$

$$Q_z^2 \approx -n + \frac{N^2}{N^2 - 1} F (1 + 2 \operatorname{tg}^2 \mu) \quad /5/$$

и изохронного магнитного поля

$$\bar{B}_{из}(r) = \frac{B_0 \sigma}{\Lambda \sqrt{1 - \left(\frac{r \sigma}{r_\infty}\right)^2}}, \quad /6/$$

где $B_0 = 4019,2$ Гс; $\Lambda = 1,0425$; $\sigma = 1,0085$; $r_\infty = 51,95$ см. В выражениях /4/, /5/ угол спиральности μ и показатель поля n вычислялись по формулам

$$\mu = \phi_8 - \operatorname{arctg} \left(\frac{\sin \phi_8 + r \frac{\partial \phi_8}{\partial r} \cos \phi_8}{\cos \phi_8 - r \frac{\partial \phi_8}{\partial r} \sin \phi_8} \right), \quad /7/$$

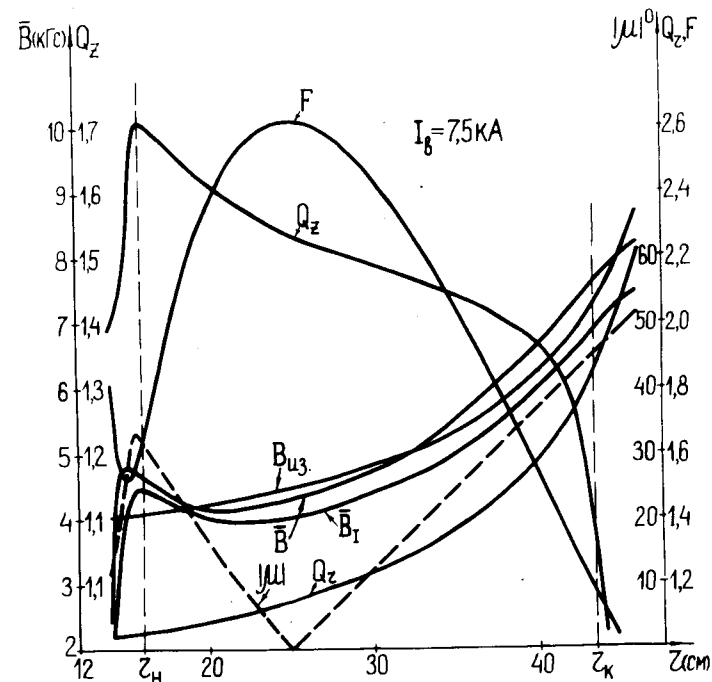


Рис. 7. Характеристики магнитного поля модели магнита с выбранной геометрией ярма. B_1 - среднее поле для первоначальной геометрии ярма.

$$n = \frac{r}{B_{из}(r)} \frac{dB_{из}(r)}{dr}, \quad /8/$$

где ϕ_8 - фаза восьмой гармоники поля.

Как видно из рисунка, полученное среднее поле \bar{B} для диапазона радиусов $r = 18-46$ см отличается от изохронного на ± 350 Гс, а на начальных радиусах величина отклонения достигает ~ 750 Гс. Частота свободных аксиальных колебаний при условии, что значение n определялось из /8/, находится в пределах $1,07 \leq Q_z \leq 1,71$ /требуемое значение $Q_z = 1,4 \pm 0,05$ /.

Для анализа возможных способов изменения среднего поля \bar{B} и частоты аксиальных колебаний Q_z на начальных и конечных радиусах была проведена серия экспериментов, в которых исследовалось влияние пазов со стороны h_2 полюсного наконечника, боковых шиммирующих пластин, положения обмотки возбуждения и изменения угла спиральности μ . При этом сохранялось требование плоского зазора между полюсами и ограничения боковых поверхностей полюса дугами окружностей.

Результаты формирования среднего поля показаны на рис. 8. При выбранной геометрии пазов сформированное среднее поле для всего диапазона рабочих радиусов отличается от изохронного на величину не более ± 65 Гс, что находится в пределах точности моделирования. Дальнейшая коррекция отклонения среднего магнитного поля от изохронного может быть осуществлена с помощью уточнения формы пазов, боковых шиммирующих пластин и полюсных обмоток, аналогичных [7].

Эксперименты на модели с боковыми шиммирующими пластинами показали, что с их помощью можно компенсировать значительные возмущения /до нескольких десятков Гс/ среднего поля. На рис. 8 /штриховой линией/ приведено распределение поля от боковых шимм, которые располагались в интервале по $r = /20-36/$ см.

Для коррекции аксиальной частоты Q_z необходимо иметь возможность внесения изменений в структуру магнитного поля, которые обеспечивают:

1/ смещение кривой частоты Q_z как одного целого во всем диапазоне рабочих радиусов;

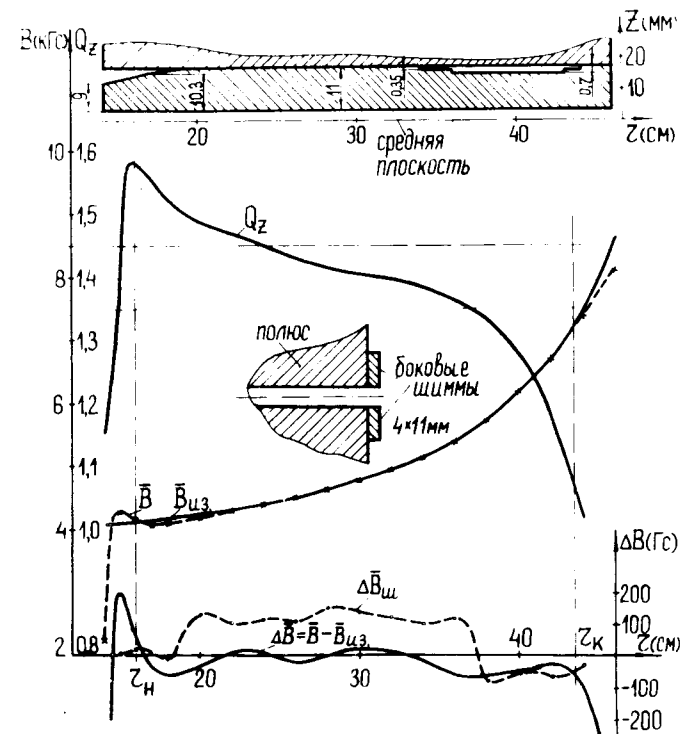


Рис. 8. Результаты экспериментов по формированию среднего магнитного поля с помощью пазов со стороны h_2 полюсного наконечника и коррекции среднего поля боковыми шиммирующими пластинами. \bar{B} и $\Delta \bar{B}$ - среднее поле и его отклонение от изохронного при конфигурации пазов, показанной на рисунке. $\Delta \bar{B}_{ш}$ - вклад боковых шимм в среднее поле.

2/ внесение локальных изменений в форму кривой частоты Q_z

Для случая 1/ было найдено, что существует возможность изменения уровня частоты Q_z с помощью вертикального перемещения обмотки возбуждения магнита. На рис. 9 приведены кривые, характеризующие изменения флаттера F и частоты Q_z при увеличении расстояния обмотки до медианной плоскости. Из графиков видно, что подъем обмотки на 0,4 см приводит к уменьшению Q_z на величину $\sim 0,05$ во всем диапазоне радиу-

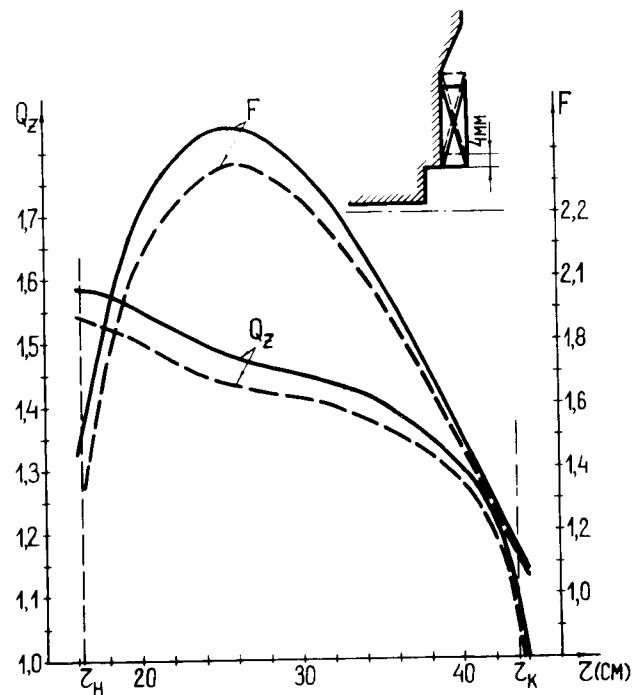


Рис. 9. Зависимость флаттера F и частоты Q_z от радиуса для двух положений обмотки возбуждения.

сов. Наблюдавшееся при этом изменение среднего поля составляло $\sim 1\%$.

В последующих экспериментах была рассмотрена возможность получения требуемой величины частоты аксиальных колебаний за счет локальных изменений угла спиральности μ . Для этого расчетным способом на ЭВМ были найдены новые контуры границ полюса. Нахождение новых центров и радиусов окружностей, которые описывают боковые границы полюса, проводилось при условии сохранения угловой протяженности полюса и изменения угла спиральности таким образом, чтобы частота аксиальных колебаний лежала в пределах 1,35-1,45. Результаты расчетов представлены на рис. 10, из которого видно, что новым границам полюса соответствует частота Q_z в диапазоне 1,52-1,42. Уменьшения

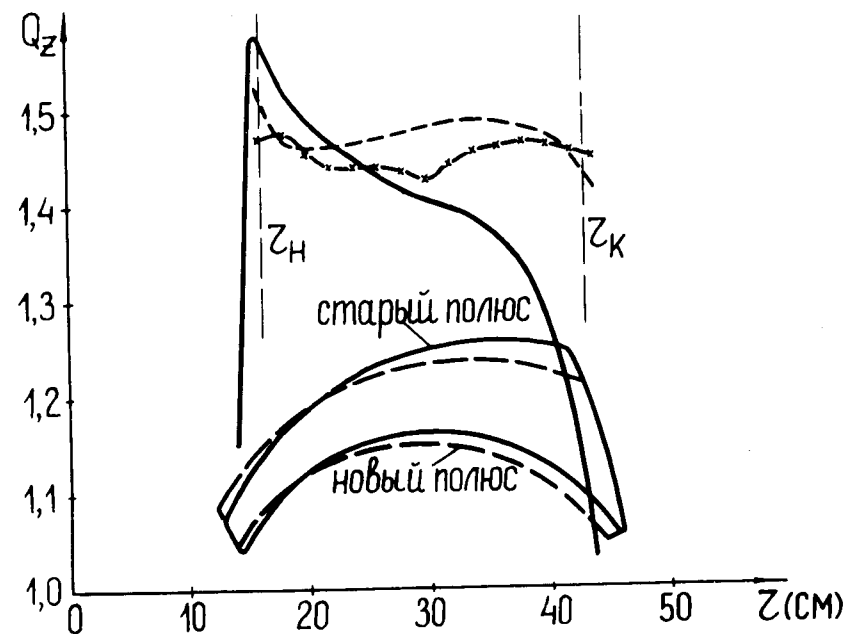


Рис. 10. Зависимость частоты Q_z от радиуса для двух конфигураций полюса. — — — — — старый полюс /эксперимент/, - - - - - новый полюс /расчет/, x-x-x-x-x - новый полюс /эксперимент/.

уровня частоты можно добиться, как отмечено выше, подъемом обмотки возбуждения. Для проверки расчетных предположений был проведен эксперимент с новой геометрией полюса, которая соответствовала расчетной в интервале радиусов $r = 30-46,7$ см. Результаты данного эксперимента показали, что полученная частота аксиальных свободных колебаний отличается от расчетной на максимальную величину $\sim 0,05$ и находится в требуемом диапазоне.

в/ Радиальная протяженность полюса

Для выяснения возможности уменьшения габаритов магнита с целью более свободного размещения высоко-

частотной системы и отведения места под распорные устройства, воспринимающие весовые и магнитные усилия, радиальная протяженность полюсной накладки /рис. 8/ была уменьшена на 10 мм со стороны начального и конечного радиусов. В результате этого изменения произошло перераспределение магнитного потока, позволившее уменьшить ток возбуждения с 7500 до 7000 А для создания требуемого уровня среднего поля. Основные характеристики магнитного поля, измеренные при токе 6900 А, показаны на рис. 11, из которого видно, что уменьшение радиальной протяженности полюсной накладки не привело к ухудшению аксиальной фокусировки и существенному изменению формы кривой среднего

Таблица 2

Параметры сектора магнитной системы суперциклотрона	М 1:15	М 1:1
Диаметр магнита по ярму (см)	125,0	1900
Высота магнита (см)	42	630
Вес магнита (Т)	0,165	560
Начальный радиус полюса (см)	14	210
Конечный радиус полюса (см)	46,7	700,5
Зазор (см)	0,6	9
Расстояние от центра обмотки до медианной плоскости (см)	3,1	46,5
Размеры поперечного сечения обмотки (см)	0,85x2,6	12,8x39
Ток возбуждения одного полюса (кА)	7,0	105,0
Плотность тока по меди (А/мм ²)	45	3
Мощность питания (кВт)	16,7	250

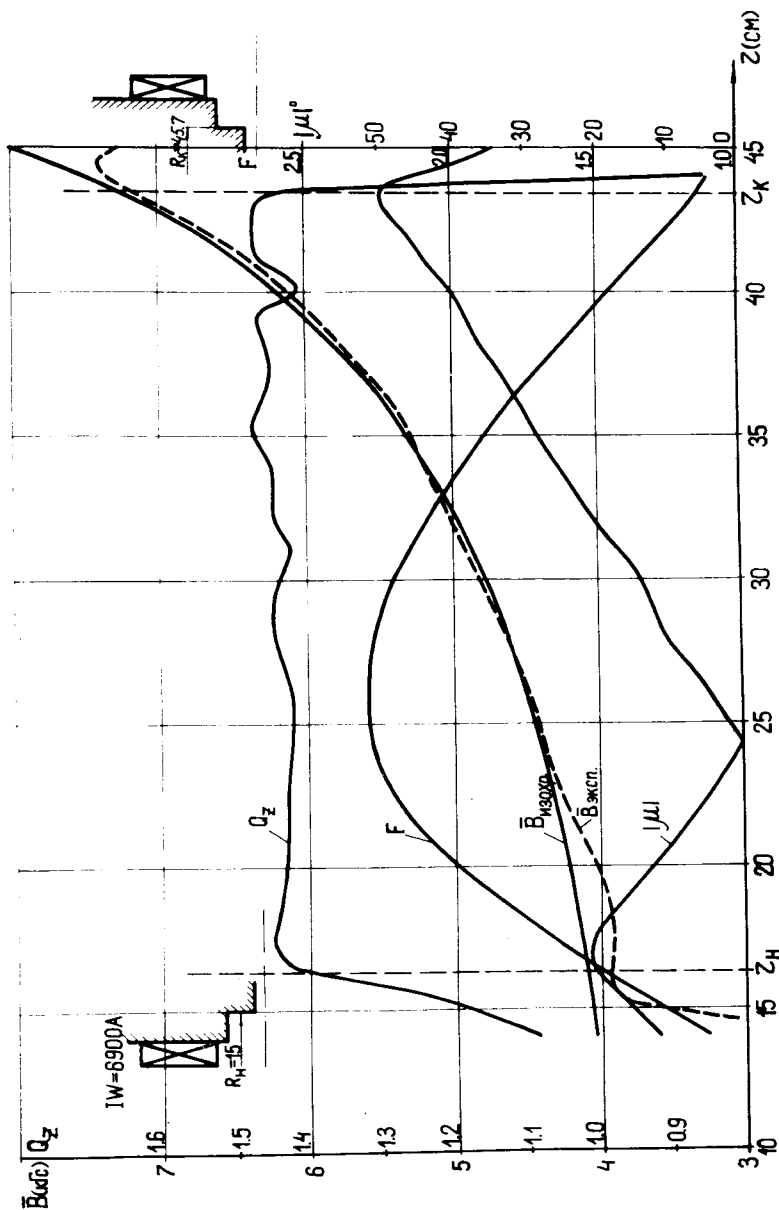


Рис. 11. Характеристики магнитного поля после уменьшения радиальной протяженности полюсного наконечника: Γ_{II} и Γ_K - начальный и конечный радиусы ускорения, F - флаттер, μ - угол спиральности, $B_{изохр}$ - изохронное магнитное поле, $B_{эксп}$ - экспериментальное среднее поле, Q_z - частота аксиальных колебаний.

поля. Изменение среднего поля в области начальных радиусов / $r = 14-22$ см / обусловлено тем, что здесь азимутальная протяженность полюса меньше расчетной на величину $\sim 1^\circ$.

На основании проведенных расчетных и экспериментальных исследований были выбраны параметры секторного магнита суперциклотрона, которые приведены в табл. 2.

4. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

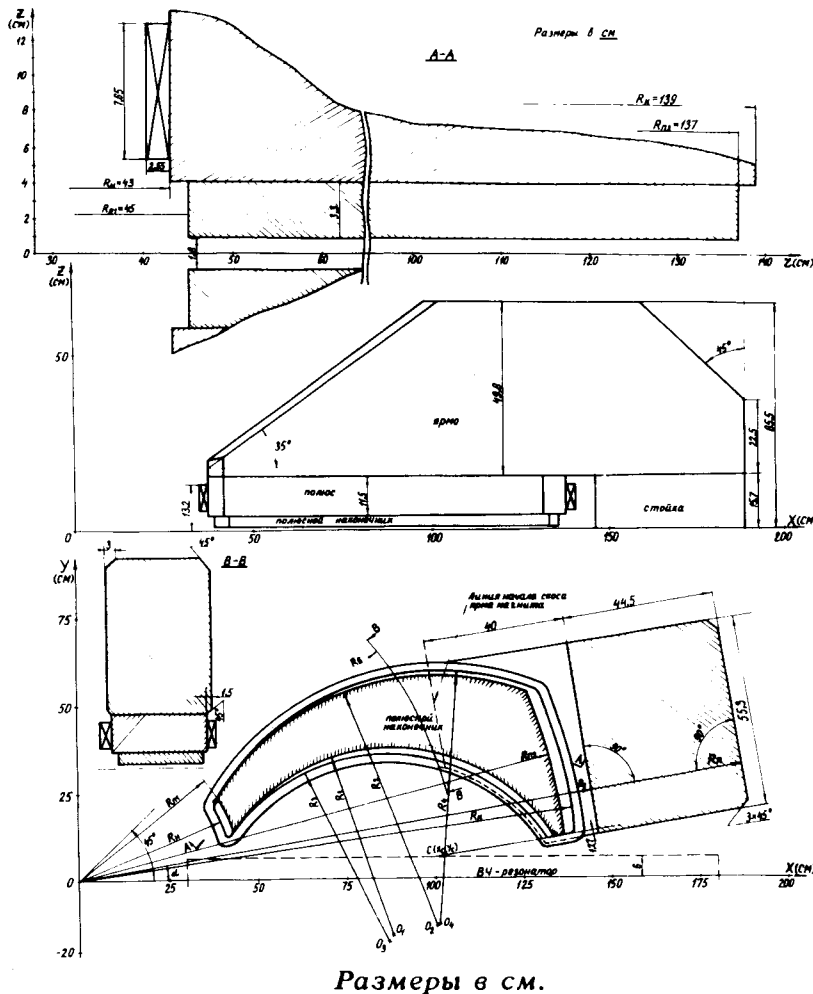
Экспериментальные исследования на модели позволили выбрать основные параметры магнита циклотрона и качественно оценить факторы, влияющие на среднее поле B и частоту аксиальных колебаний Q_z во всем диапазоне рабочих радиусов ускорения.

В настоящее время ведутся конструкторские разработки модели магнитной системы суперциклотрона в масштабе 1:5 / рис. 12/, на которой будут окончательно определены контуры полюса, зазора и выбраны параметры и конструкция элементов тонкой коррекции поля.

Авторы выражают благодарность Е.Д.Городничеву и П.П.Гавришу за создание и обеспечение работы аппаратуры, позволяющей регистрировать информацию с цифрового вольтметра на перфокарты с помощью перфоратора "Аритма-130".

ЛИТЕРАТУРА

1. Джеленов В.П. и др. Материалы Международной конференции по изохронным циклотронам. Гатлинбург, США, 1966, с. 215.
2. Джеленов В.П., Дмитриевский В.П., Кольга В.В. ОИЯИ, Р9-9066, Дубна, 1975.
3. Банчев В.Ц. и др. ОИЯИ, Р9-9848, Дубна, 1976.
4. Ворожцов С.Б., Заплатин Н.Л. ОИЯИ, Р9-5669, Дубна, 1971.



Размеры в см.

O ₁		O ₂		O ₃		O ₄		C		Обмотка	
X ₁	Y ₁	X ₂	Y ₂	X ₃	Y ₃	X ₄	Y ₄	X _c	Y _c	a	b
87,6	-16,5	100,35	-13,95	86,7	-18,0	101,4	-13,2	100,0	6,0	2,55	7,65
R _n	R _{n1}	R ₁	R ₂	R ₃	R ₄	R _K	R _{n2}	R ₆	R _c	R ₉	α°
43,0	45,0	53,7	72,0	53,7	72,6	139,0	137,0	106,0	146,3	190,8	8,5

Рис. 12. Модель магнита в масштабе 1:5 /проект/.

5. Аленицкий Ю.Г., Ворожцов С.Б., Заплатин Н.Л. ОИЯИ, 9-9034, Дубна, 1975.
6. Глазов А.А. и др. Труды V Всесоюзного совещания по ускорителям заряженных частиц. Дубна, 5-7 октября 1976 г. "Наука", М., 1977, т. I, с.123.
7. Willax H.A. Proc. of the Sixth Cyclotron Conf. Vancouver, p.114, 1972.

*Рукопись поступила в издательский отдел
24 апреля 1978 года.*