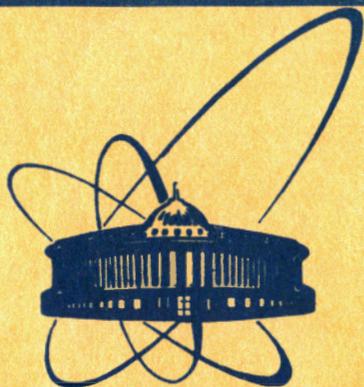


84-322



сообщения
объединенного
института
ядерных
исследований
дубна

С 345г

9-84-322

3530/84

А.М.Андрянов, Г.Г.Гульбемян, Б.А.Кленин,
С.И.Козлов, В.Н.Мельников

МОДЕЛИРОВАНИЕ НЕКОТОРЫХ ПАРАМЕТРОВ
МАГНИТНОЙ СИСТЕМЫ
ЧЕТЫРЕХМЕТРОВОГО
ИЗОХРОННОГО ЦИКЛОТРОНА У-400М

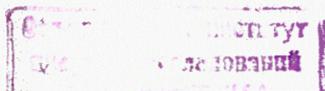
1984

В Лаборатории ядерных реакций ОИЯИ разрабатывается циклотронный комплекс для ускорения ионов почти всех элементов таблицы Д.И.Менделеева до энергии $20 \div 120$ МэВ/нукл.^{/1/}. Инжектором этой установки является действующий изохронный циклотрон У-400^{/2/}, а в качестве постускорителя будет использован изохронный циклотрон с диаметром полюсов четыре метра /У-400М/, создающийся на основе электромагнита классического циклотрона У-300.

Одной из основных задач при создании циклотрона У-400М является формирование его магнитного поля, обеспечивающего пространственную и временную устойчивость движения ускоряемых ионов. На первом этапе разработки ускорителя проведено численное моделирование магнитного поля на ЭВМ^{/3/} с целью выбора параметров магнитной структуры. Одной из проблем являлось получение величины напряженности среднего магнитного поля до 20 кЭ. Расчеты показали, что для этого необходимо увеличение /на 10%/ сечения магнитопровода электромагнита, увеличение числа витков обмотки возбуждения с 448 до 504 /за счет установки 2 дополнительных секций/ и повышение тока с 1900 до 2300 А.

Для циклотрона У-400М выбрана магнитная структура с четырьмя слабоспиральными секторами / $\xi_k = 40^\circ$ /, радиальные границы которых выполняются в виде дуг окружностей. Для фокусировки ускоряемых ионов всего диапазона энергий значение флаттера магнитного поля должно составлять $0,1 \div 0,15$, что обеспечивается выбором зазора в "холме", равным $h_x = 10$ см, а в "долине" - $h_d = 50$ см^{/3/}. Изохронная форма среднего магнитного поля формируется растущей по радиусу циклотрона толщиной секторов. В отличие от циклотронов У-200 и У-400, где дополнительная коррекция распределения среднего магнитного поля по радиусу осуществляется системой кольцевых токовых катушек, расположенных под секторами, для ускорителя У-400М разрабатывается токовая система секторных катушек коррекции поля, как это принято для циклотронов с разделенными секторами. В нашем случае такой способ коррекции поля является более эффективным по сравнению с системой кольцевых катушек, поскольку последние из-за большого расстояния до медианной плоскости ускорителя и экранирующего действия секторов дают меньший вклад в среднее магнитное поле.

В данной работе приведены результаты измерений и шиммирования магнитного поля на модели электромагнита циклотрона У-400М, выполненной в масштабе 1:20 /рис.1/. Измерение поля производилось с помощью датчика Холла из антимонода индия^{/4/}, прокалиброванного на стенде магнитных измерений по датчику ЯМР. Датчик закреплялся на измерительной штанге, позволяющей осуществлять



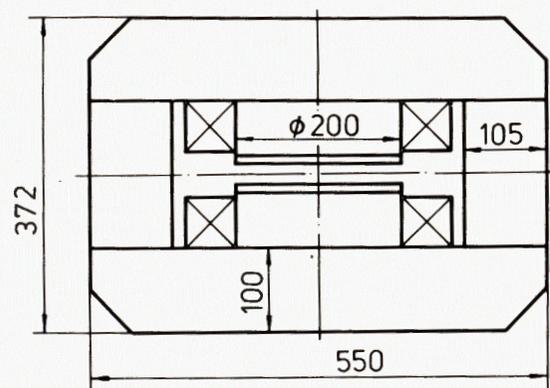


Рис.1. Схема модели /M1:20/ электромагнита циклотрона У-400М.

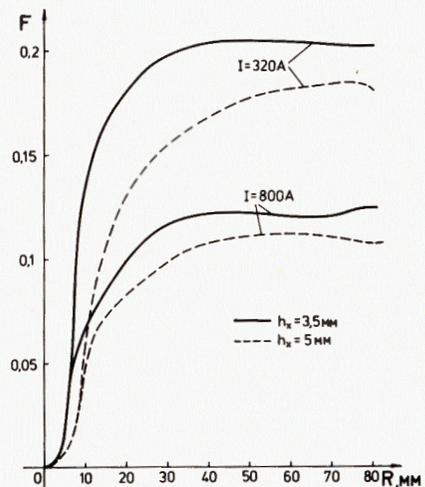


Рис.2. Зависимость флаттера магнитного поля от радиуса для плоских секторов разной толщины.

его перемещение по радиусу с шагом $5 \pm 0,5$ мм, а по азимуту $-/4,5 \pm 0,2/\sigma$. Магнитное поле модели измерялось на элементе периодичности при разных токах возбуждения электромагнита для ряда вариантов центральной магнитной структуры. Так, для определения вклада в среднее магнитное поле ступенчатого шимма на секторах проведены измерения как с плоскими, так и с профилированными секторами, форма

которых рассчитывалась на ЭВМ^{/3/}. Толщина секторов согласно результатам численного моделирования выбрана равной $10 \text{ мм} / h_x = 5 \text{ мм}$, но были выполнены измерения и с секторами толщиной $10,75 \text{ мм} / h_x = 3,5 \text{ мм}$. В последнем случае, как показали измерения, вариация магнитного поля увеличивается на $10 \pm 20\%$ /рис.2/, а среднее поле - на 3%. Однако уменьшение акцептанса ускорителя, по-видимому, может вызывать в дальнейшем ряд проблем, связанных как с инъекцией тяжелых ионов в циклотрон У-400М, так и с их выводом. Поэтому в качестве рабочего был принят вариант геометрии модели центральной структуры циклотрона У-400М с $h_x = 5 \text{ мм}$ и $h_d = 25 \text{ мм}$. Характерной особенностью распределений средних магнитных полей (\bar{H}) по радиусу /рис.3/, имеющей место и для циклотронов ЛЯР У-200 и У-400, является то, что при изменении уровня магнитного поля наклон кривых $\bar{H}(R)$ изменяется так, что имеется возможность подобрать зависимости $\bar{H} = \bar{H}(R)$ для изохрон-

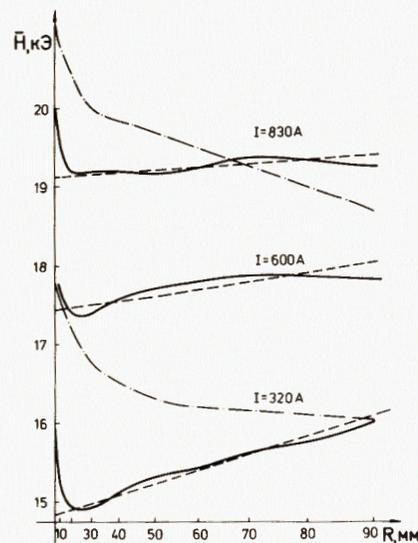


Рис.3. Распределение средних магнитных полей по радиусу: --- - плоские сектора; — - профилированные сектора; - - - - - изохронное поле.

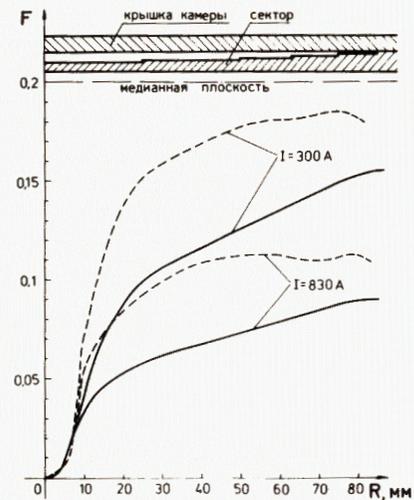


Рис.4. Зависимость флаттера магнитного поля от радиуса для плоских /---/ и профилированных секторов. - - - - - изохронное поле.

ного ускорения ионов с различными отношениями A/Z до различных энергий при относительно небольшой мощности питающих катушек. При уровне магнитного поля $H_0 \approx 19 \text{ кЭ}$ изменение $H_{и\gamma}/H_0 = \gamma / \gamma_0 = W/W_0$, W - полная энергия ионов, W_0 - энергия покоя/по радиусу минимально /рис.3/, поэтому ионы с отношениями $A/Z = 4 \div 5$ ускоряются до относительно небольшой энергии $15 \div 20 \text{ МэВ/нукл.}$, а при уменьшении уровня поля до $15 \div 16 \text{ кЭ}$ рост поля с радиусом увеличивается и ионы с $A/Z = 2 \div 3$ могут быть ускорены до энергий $80 \div 120 \text{ МэВ/нукл.}$ Следует отметить, что и флаттер магнитного поля при варьировании тока в основной обмотке возбуждения изменяется согласно требованиям увеличения фокусировки ускоряемых ионов при увеличении их энергии - с уменьшением уровня магнитного поля и, соответственно, с увеличением наклона кривой $\bar{H}(R)$ значение флаттера растет, что следует из зависимостей $F(R)$, представленных на рис.4. Значения частот аксиальных (ν_z) и радиальных (ν_r) бетатронных колебаний ионов с отношениями $A/Z = 2,2$ и 6 представлены на рис.5, где цифрами на кривой отмечены энергии частиц в МэВ/нукл. Таким образом, выбранные параметры магнитной системы циклотрона У-400М позволяют получать требуемые значения вариации магнитного поля по азимуту. Из кривых возбуждения электромагнита $H(I)$, представленных на рис.6, следует, что при номинальном токе /830 А/ макси-

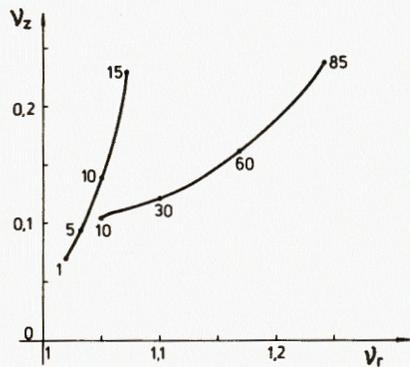


Рис.5. Зависимость частоты аксиальных ν_z и радиальных ν_r бетатронных колебаний от энергии ионов.

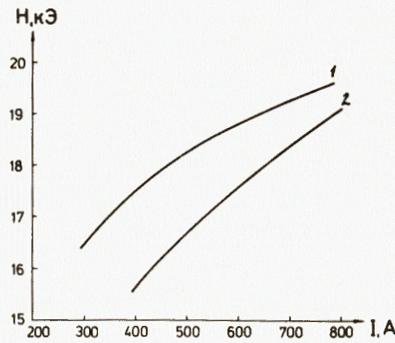


Рис.6. Кривые возбуждения электромагнита. 1 - плоские сектора, 2 - профилированные сектора.

мальный уровень среднего магнитного поля составляет 19,3 кЭ. Измерения также показали /рис.7/, что дополнительное увеличение толщины стоек электромагнита /на 7 мм/ приводит к незначительному росту напряженности среднего магнитного поля при уровне 19 кЭ. Это показывает, что выбранное сечение магнитопровода близко к оптимальному.

Метод формирования распределения среднего магнитного поля по радиусу циклотрона У-400М с помощью профилирования секторов со стороны крышек вакуумной камеры /рис.4, рис.8/ показал возможность получения изохронных магнитных полей для ускорения ионов в диапазоне энергий 20 ÷ 120 МэВ/нукл. Число катушек, корректирующих распределение среднего магнитного поля, равное 12, выбрано из условий ограничения фазового движения ионов в процессе ускорения в пределах $\pm 10^\circ$. Для устранения возможных смещений медианной поверхности магнитного поля относительно средней геометрической плоскости циклотрона устанавливается 3 пары катушек, имеющих раздельное питание верхней и нижней частей, а для компенсации низших гармоник магнитного поля - 4 пары гармонических катушек. Расположение корректирующих катушек на секторах и сечение воздушного зазора циклотрона У-400М /размеры по ординате в мм/ показаны на рис.8. Измерение магнитного поля на небольшой модели циклотрона У-400М позволило решить ряд вопросов, связанных с выбором основных параметров магнитной структуры ускорителя, получением требуемого уровня магнитного поля и величины вариации поля по азимуту, отработкой метода шиммирования распределения среднего магнитного поля по радиусу и др. Однако проведенная работа показала, что точность моделирования магнитного поля циклотрона У-400М и измерения его характеристик недостаточна для получения распределений маг-

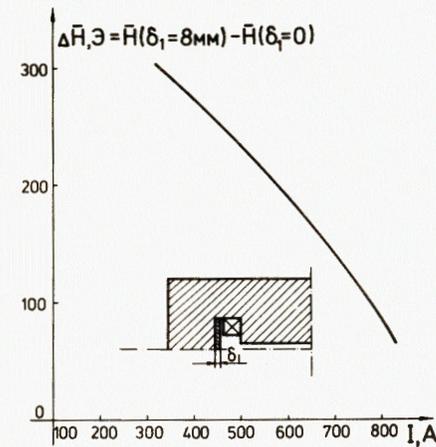


Рис.7. Вклад дополнительного увеличения сечения стойки электромагнита в среднее магнитное поле в зависимости от тока возбуждения.

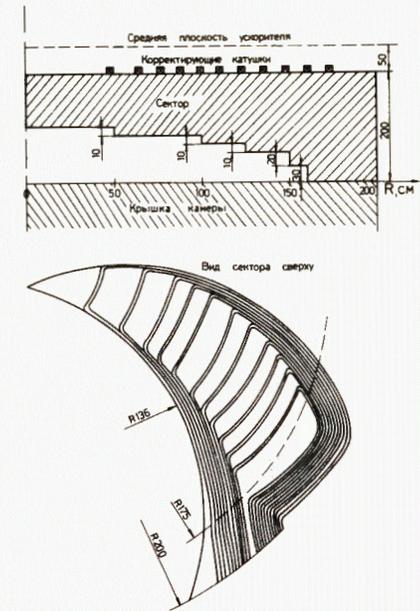


Рис.8. Сечение рабочего зазора электромагнита и схема расположения корректирующих катушек циклотрона У-400М /M1:1/.

нитного поля в полном объеме, требуемом для разработки сложных систем инъекции и вывода частиц циклотрона У-400М. Поэтому более точное моделирование магнитной системы циклотрона У-400М, включая разработку технологии изготовления токовой корректирующей системы и измерение распределения полей от катушек, будет осуществлено на его модели в масштабе 1:2,92, которая в настоящее время создается на основе электромагнита Е-2. Результаты исследований послужат основой для проектирования и сооружения электромагнита циклотрона У-400М.

В заключение авторы благодарят профессора Ю.Ц.Оганесяна за поддержку данной работы и И.В.Колесова за всестороннюю помощь.

ЛИТЕРАТУРА

1. Оганесян Ю.Ц. и др. ОИЯИ, 9-82-756, Дубна, 1982.
2. Флеров Г.Н. и др. Труды VII Всесоюзного совещания по ускорителям заряженных частиц, Дубна, 1981, т.1, с. 59.

3. Козлов С.И., Кленин Б.А., Оганесян Р.Ц. ОИЯИ, 9-83-125, Дубна, 1983.
4. Погодин В.И., Юрьева Г.А. Приборы и системы управления, 1972, 7, с. 15.

Рукопись поступила в издательский отдел
11 мая 1984 года.

НЕТ ЛИ ПРОБЕЛОВ В ВАШЕЙ БИБЛИОТЕКЕ?

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

	Труды VI Всесоюзного совещания по ускорителям заряженных частиц. Дубна, 1978 /2 тома/	7 р. 40 к.
	Труды VII Всесоюзного совещания по ускорителям заряженных частиц, Дубна, 1980 /2 тома/	8 р. 00 к.
D11-80-13	Труды рабочего совещания по системам и методам аналитических вычислений на ЭВМ и их применению в теоретической физике, Дубна, 1979	3 р. 50 к.
D4-80-271	Труды Международной конференции по проблемам нескольких тел в ядерной физике. Дубна, 1979.	3 р. 00 к.
D4-80-385	Труды Международной школы по структуре ядра. Алушта, 1980.	5 р. 00 к.
D2-81-543	Труды VI Международного совещания по проблемам квантовой теории поля. Алушта, 1981	2 р. 50 к.
D10,11-81-622	Труды Международного совещания по проблемам математического моделирования в ядерно-физических исследованиях. Дубна, 1980	2 р. 50 к.
D1,2-81-728	Труды VI Международного семинара по проблемам физики высоких энергий. Дубна, 1981.	3 р. 60 к.
D17-81-758	Труды II Международного симпозиума по избранным проблемам статистической механики. Дубна, 1981.	5 р. 40 к.
D1,2-82-27	Труды Международного симпозиума по поляризационным явлениям в физике высоких энергий. Дубна, 1981.	3 р. 20 к.
P18-82-117	Труды IV совещания по использованию новых ядерно-физических методов для решения научно-технических и народнохозяйственных задач. Дубна, 1981.	3 р. 80 к.
D2-82-568	Труды совещания по исследованиям в области релятивистской ядерной физики. Дубна, 1982.	1 р. 75 к.
D9-82-664	Труды совещания по коллективным методам ускорения. Дубна, 1982.	3 р. 30 к.
D3,4-82-704	Труды IV Международной школы по нейтронной физике. Дубна, 1982.	5 р. 00 к.
D2,4-83-179	Труды XV Международной школы молодых ученых по физике высоких энергий. Дубна, 1982.	4 р. 80 к.
	Труды УШ Всесоюзного совещания по ускорителям заряженных частиц. Протвино, 1982 /2 тома/	11 р. 40 к.
D11-83-511	Труды совещания по системам и методам аналитических вычислений на ЭВМ и их применению в теоретической физике. Дубна, 1982.	2 р. 50 к.
D7-83-644	Труды Международной школы-семинара по физике тяжелых ионов. Алушта, 1983.	6 р. 55 к.
D2,13-83-689	Труды рабочего совещания по проблемам излучения и детектирования гравитационных волн. Дубна, 1983.	2 р. 00 к.

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

**ТЕМАТИЧЕСКИЕ КАТЕГОРИИ ПУБЛИКАЦИЙ
ОБЪЕДИНЕННОГО ИНСТИТУТА ЯДЕРНЫХ
ИССЛЕДОВАНИЙ**

Индекс	Тематика
1.	Экспериментальная физика высоких энергий
2.	Теоретическая физика высоких энергий
3.	Экспериментальная нейтронная физика
4.	Теоретическая физика низких энергий
5.	Математика
6.	Ядерная спектроскопия и радиохимия
7.	Физика тяжелых ионов
8.	Криогеника
9.	Ускорители
10.	Автоматизация обработки экспериментальных данных
11.	Вычислительная математика и техника
12.	Химия
13.	Техника физического эксперимента
14.	Исследования твердых тел и жидкостей ядерными методами
15.	Экспериментальная физика ядерных реакций при низких энергиях
16.	Дозиметрия и физика защиты
17.	Теория конденсированного состояния
18.	Использование результатов и методов фундаментальных физических исследований в смежных областях науки и техники
19.	Биофизика

Андриянов А.М. и др.

9-84-322

Моделирование некоторых параметров магнитной системы четырехметрового изохронного циклотрона У-400М

Приведены экспериментальные результаты формирования магнитного поля четырехметрового изохронного циклотрона У-400М на модели в масштабе 1:20. Определены рабочие размеры магнитной структуры. Сформировано среднее магнитное поле на уровнях от 15 до 19,3 кЭ. Полученные значения флаттера $f = 0,1-0,15$ удовлетворяют условиям фокусировки ионов с отношением массы к заряду $A/Z = 2 - 5$, с энергией 120 - 20 МэВ/нукл. Результаты исследований послужат основой для проектирования и сооружения электромагнита циклотрона У-400М.

Работа выполнена в Лаборатории ядерных реакций ОИЯИ.

Сообщение Объединенного института ядерных исследований. Дубна 1984

Перевод О.С.Виноградовой

Andriyanov A.M. et al.

9-84-322

Simulation of Some Parameters of the Magnetic System for the 4-Meter Isochronous U-400M Cyclotron

The experimental results on forming the magnetic field of the 4-meter isochronous U-400M cyclotron using a 1/20-scale model are presented. The working dimensions of the magnetic structure have been determined. The average magnetic field is formed at 15 up to 19.3 kOe levels. The obtained flutter values ($f = 0.1-0.15$) satisfy the conditions required for focusing ions with the mass-to-charge ratio $A/Z = 2-5$ accelerated to 120-20 MeV/nucleon energies. The results of the present study will form the basis for the design and construction of the U-400 cyclotron magnet.

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

Communication of the Joint Institute for Nuclear Research. Dubna 1984