

P9-2002-185

Ю. Г. Аленицкий, Н. Л. Заплатин, Л. М. Онищенко,
Е. В. Самсонов, А. Ф. Чеснов, С. И. Чеснова

**МОДЕЛИРОВАНИЕ МАГНИТНОЙ СИСТЕМЫ
ИЗОХРОННОГО ЦИКЛОТРОНА ЦИТРЕК**

Введение

Циклотрон проектировался для ускорения тяжелых ионов с отношением массы к заряду $A/Z \approx 5$ до энергии $W=2,4$ МэВ/нуклон. В качестве инжектора ионов используется ECR-источник с интенсивностью $3,5 \cdot 10^{12} \text{ с}^{-1}$. Выведенный пучок ($\sim 10^{11} \text{ с}^{-1}$) применяется для производства трековых мембран.

Основные параметры магнитной системы циклотрона получены на основании расчетов по аналитическим формулам, использующим равномерное намагничивание элементов системы, и по двухмерным программам расчета магнитного поля с помощью сеточной методики.

Для циклотрона используется III-образный электромагнит с диаметром полюсов $d=1600$ мм и зазором между ними $\delta=100$ мм. Габаритные размеры магнита составляют $3,5 \times 1,8 \times 1,65$ м, толщина горизонтальных ярм 0,6 м и вертикальных - 0,7 м. Для аксиальной инжекции пучка предусматриваются осевые отверстия в полюсах $d=20-50$ мм и в горизонтальных ярмах $d=250$ мм. Обмотка возбуждения электромагнита состоит из двух (верхней и нижней) катушек, изготовленных из медного проводника сечением $18,5 \times 18,5$ мм, с отверстием для охлаждения диаметром $d=8$ мм. Требуемые ампер-витки составляют $IW \sim 120$ кА.

Вариация магнитного поля создается системой 4-х пар секторных шимм, закреплённых зеркально на полюсах через 90° по азимуту так, что они образуют радиально-секторную структуру поля Томаса с периодичностью $N=4$. Минимальный зазор между шиммами принят равным $h_1=40$ мм, а их высота составляет $b=30$ мм. Выбранные параметры секторных шимм обеспечивают аксиальную устойчивость ускоренных частиц $0 < Q_z < 0,5$.

Формирование изохронного среднего магнитного поля осуществляется в основном за счет изменения угловой протяженности секторных шимм $\alpha=30-42^\circ$, а также путём использования долильных шимм. Кроме того, долильные шиммы применяются для коррекции первой гармоники магнитного поля циклотрона.

Ускоряющие дуанты установлены в двух противоположных долинах магнитной системы, в других двух долинах расположены электростатический выводной канал и элементы диагностики.

В настоящей работе приводятся основные результаты моделирования магнитной системы циклотрона ЦИТРЕК в масштабе 1:2,5.

Модель магнита и результаты формирования магнитного поля

Модель магнитной системы циклотрона ЦИТРЕК спроектирована и изготовлена в масштабе 1:2,5 для выбора формы секторных шимм, которые формируют требуемое среднее магнитное поле. Проведены ее испытания при максимальном токе в обмотке электромагнита $I=550$ А. Основные параметры модели магнитной системы циклотрона ЦИТРЕК представлены в таблице.

Для измерения топографии магнитного поля изготовлен и отлажен измерительный стенд, который включает в себя:

- 1) автоматизированную систему, позволяющую перемещать датчик Холла по азимуту с заданным шагом на периоде магнитной системы или на всей окружности в зазоре 16 мм;
- 2) ЭВМ с пакетом программ для управления процессом измерения и предварительной обработки результатов в режиме онлайн.

Основные параметры модели магнитной системы

№	Параметр	Величина
1	Габаритные размеры магнитопровода (мм)	1360x720x660
2	Толщина балок магнитопровода (мм)	250
3	Диаметр полюсов (мм)	640
4	Зазор между полюсами (мм)	40
5	Диаметр осевого отверстия в полюсах (мм)	8
6	Угловой размер секторов (град) [*]	30-42
7	Высота секторов (мм)	12
8	Зазор между катушками (мм)	80
9	Сечение катушки (мм)	100 x 80
10	Сечение медного проводника (мм)	8,5x8,5,Ø5
11	Число витков: в галете в катушке (3 галеты) в обмотке (2 катушки)	16 48 96
12	Максимальные ампер-витки обмотки (кА)	50
13	Максимальная рассеиваемая мощность (кВт)	20
14	Вес железа (т)	4
15	Вес меди (кг)	98

^{*} На первом этапе моделирования системы угловая протяженность секторных шимм составляла $\alpha=30^\circ$.

Предварительные результаты измерений поля на модели магнитной системы циклотрона ЦИТРЕК представлены на рис. 1-3.

Пример азимутального измерения поля на радиусе $R=20$ см показан на рис. 1, где представлено распределение магнитного поля на одном периоде структуры магнитной системы с шагом 1° , который выбран для всех основных дальнейших измерений. Видно, что перепад поля между холмом и долиной в этой магнитной системе составляет 11 кГс. Выбранный шаг между точками измерений магнитного поля по азимуту обеспечивает вычисление величины магнитного поля в любой точке средней плоскости зазора с точностью не хуже чем при измерении поля в точке $\Delta B/B=(3-5) \cdot 10^{-4}$.

На рис.2 приведены характеристики магнитного поля для радиуса $R=10$ см в зависимости от тока в обмотке электромагнита. Для требуемого уровня среднего магнитного поля $B_m \sim 14,8$ кГс величина тока в обмотке составляет 440 А. Амплитуды гармоник равны $B_4=5,85$ кГс, $B_8=2,2$ кГс.

На рис.3 представлены зависимости магнитного поля от радиуса для электромагнита с плоским зазором (за исключением центра) $\delta=40$ мм (E18) и с предварительно выбранной системой секторных шимм с постоянной угловой протяженностью $\alpha=30^\circ$ (E9). Для этого эксперимента показаны также зависимости четвертой (B4) и восьмой (B8) гармоник поля. Всплеск поля на начальных радиусах в кривой (E18) обусловлен центральными вставками, которые формируют поле в центре (см. рис. 4).

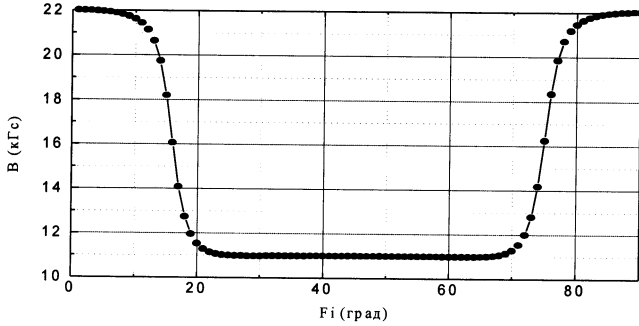


Рис. 1. Азимутальное распределение магнитного поля для радиуса $R=20$ см на одном периоде структуры магнитной системы

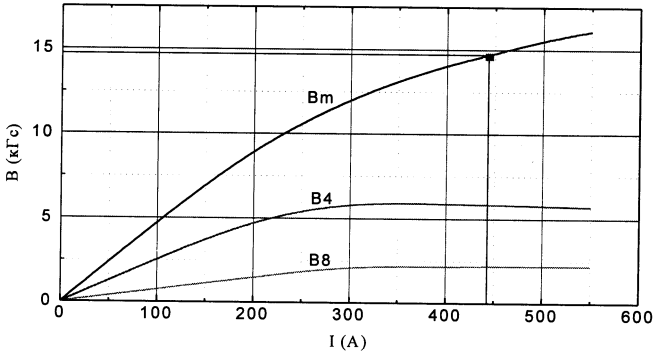


Рис. 2. Среднее магнитное поле и амплитуды гармоник для радиуса $R=10$ см в зависимости от тока в обмотке электромагнита

Видно, что величина вносимого секторными шиммами магнитного поля изменяется от ~ 2500 Гс в центральной области до ~ 2000 Гс на конечном радиусе ($R=30$ см). Спад среднего магнитного поля B_m на радиусе вывода (в масштабе модели $R=30$ см) относительно B_{is} составляет ~ 900 Гс. В центральной области наблюдается значительная неоднородность среднего магнитного поля, обусловленная выбранной геометрией центральной области магнитной системы (рис. 4) и изменением намагниченности секторных шимм. Полученное значение амплитуд гармоник (B_4 , B_8) вариации магнитного поля обеспечивает аксиальную фокусировку ускоренных ионов $0 < Q_z < 0,5$ в интервале рабочих радиусов.

Выбор угловой протяженности секторных шимм в зависимости от радиуса для компенсации спада магнитного поля и создания изохронного среднего поля проводился на основании:

1) предварительных расчетов магнитного поля циклотрона по двухмерной программе сеточной методикой;

2) экспериментов по выделению магнитного поля от боковых накладок на секторные шиммы;

3) экспериментально полученного вклада в среднее магнитное поле секторными шиммами.

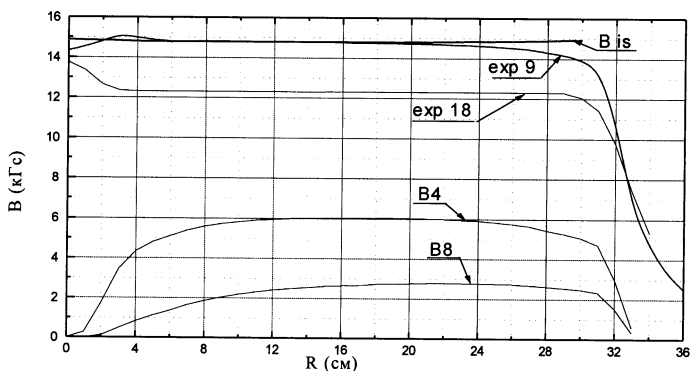


Рис. 3. Зависимости среднего магнитного поля (E9), четвертой (B4) и восьмой (B8) гармоник от радиуса для системы без долинных шимм, изохронного поля (B_{is}) для этого варианта и поле от плоского зазора (за исключением центра) магнита (E18)

На рис. 4 показаны поперечное сечение полюса магнита циклотрона и конфигурация секторной и долинных шимм. Долинные шиммы высотой $b=4$ мм расположены между контурами А и В (рис. 4), укреплены на полюс с двух сторон каждой секторной шиммы в области, которая не занята высокочастотной системой циклотрона. Они предназначены для точной коррекции магнитного поля циклотрона. Центральная вставка выбрана в области секторных шимм диаметром $d=24$ мм, во вставке имеется отверстие диаметром $d=8$ мм, для инжектирования пучка ионов из внешнего источника. Для компенсации спада поля в центре, вызванного этим отверстием, центральная вставка выступает над полюсом на 4,8 мм. Это, в свою очередь, приводит к значительному росту среднего магнитного поля на начальных радиусах. Для устранения этого роста высота шимм в диапазоне радиусов $\Delta R=12-30$ мм уменьшена. В этом диапазоне радиусов высота шимм растёт с 10 мм на $R=12$ мм до 16 мм на $R=30$ мм, как показано на рис. 4.

Выводная система установлена в одной из долин и занимает всё свободное от секторов угловое пространство и далее проходит в область расположения следующего сектора. Конструкция системы вывода такова, что она занимает по вертикали высоту 100 мм в натуральную величину. Для установки системы вывода в расчетное положение и обеспечения радиальных регулировок секций канала на конечных радиусах секторов снято железо, как показано на рис. 4. Влияние этого среза на магнитное поле на радиусе вывода незначительное.

На рис. 5 представлены результаты трёх этапов формирования среднего магнитного поля с секторными шиммами, угловая протяженность которых изменялась с увеличением радиуса от $\alpha=30^\circ$ в центральной области до $\alpha=42^\circ$ в зоне конечных радиусов (рис. 4).

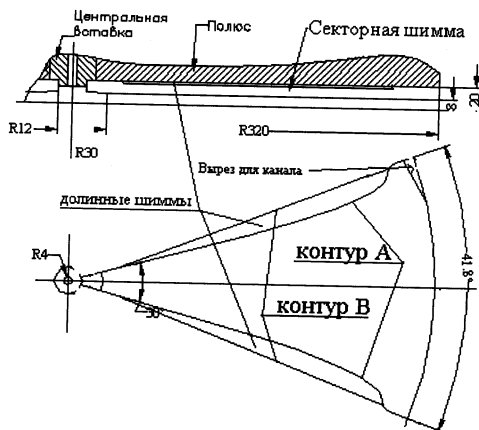


Рис. 4. Поперечное сечение полюса магнитной системы и конфигурация секторной шиммы ускорителя

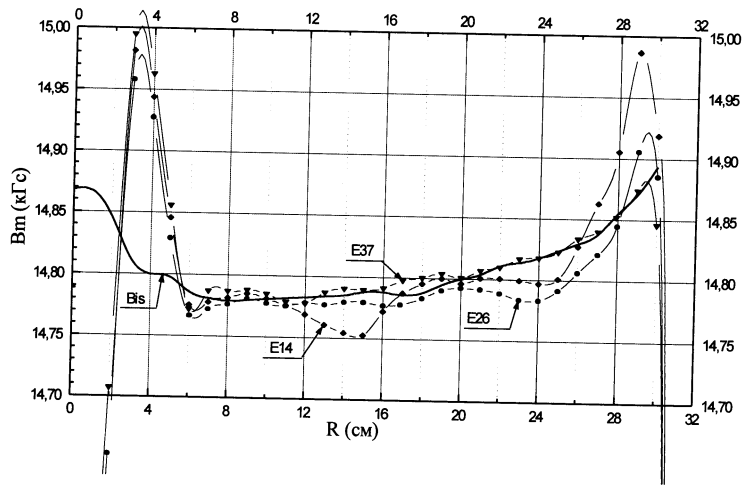


Рис. 5. Основные этапы формирования среднего магнитного поля на модели магнитной системы циклотрона (обозначения в тексте)

В эксперименте E14 угловая протяженность секторных шимм была получена за счет боковых накладок $\Delta\alpha=0-6^\circ$ на секторные шиммы ($\alpha=30^\circ$) в интервале радиусов $\Delta R=18-32$ см. Эксперимент E26 был проведен для вновь изготовленных шимм $\alpha=30-42^\circ$, а E37 - с дополнительной корректировкой этих секторных шимм с помощью боковых накладок $\Delta=0,5-1,0$ мм в интервале радиусов $\Delta R=13-28$ см.

Для всех приведенных зависимостей отклонения поля относительно требуемого в центральной области $\Delta R=0-5$ см составляют в центре ~ 700 Гс (на рисунке не видно) и $\sim +350$ Гс на радиусе $R=3$ см. Как показали численные расчеты фазового движения частиц и частот свободных бетатронных колебаний, такие отклонения являются допустимыми. Отклонения среднего магнитного поля от требуемого для E37 не превышают ± 25 Гс для $\Delta R=6-30$ см, что находится на уровне точности проведения моделирования магнитной системы в масштабе 1:2,5, и будут скорректированы на магнитной системе циклотрона с помощью предусмотренных в системе долинных шимм.

На рис. 6 представлены амплитуды и фазы первой гармоники магнитного поля в полярной системе координат.

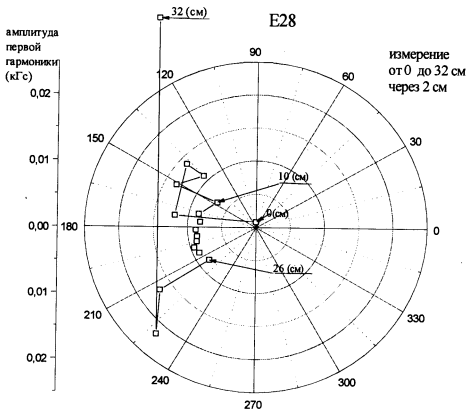


Рис. 6. Амплитуда и фаза первой гармоники магнитного поля, полученные на модели

Как видно из рис. 6, амплитуда первой гармоники магнитного поля, полученная на модели, в основном составляет величину около 10 Гс, что совершенно недопустимо для ускорителя подобного типа, так как расчетная радиальная частота бетатронных колебаний близка к $Q_r=1$. Для обеспечения высокоэффективного вывода частиц из циклотрона первая гармоника магнитного поля не должна превышать 2-3 Гс. Таким образом, возможность работы этого ускорителя полностью зависит от точности, а точнее, от симметричности изготовления всех элементов магнита. В связи с этим все балки электромагнита, полюса и секторные шиммы по горизонтальным плоскостям обрабатывались на шлифовальных станках, а штифтовые отверстия выполнялись на координатно-расточных станках с максимально возможной точностью изготовления.

В процессе моделирования контролировалась динамика пучка численными методами для некоторой базовой карты магнитного поля, в которой использовалась комбинация экспериментов E9 и E16 на модели. Расчеты велись в масштабе натуры, поэтому на рис. 7 и рис. 8 характеристики магнитного поля показаны в масштабе 1:1. Этим экспериментам соответствует вертикальный зазор в центре между центральными вставками 72,5 мм ($B_{(r=0)}=14,33$ кГс). В области центральных радиусов $R=0-20$ см и в области радиусов вывода $R=73-120$ см среднее магнитное поле выбиралось экспериментальное. В области ускорения $R=20-73$ см поле выбиралось изохронное,

которое предварительно было рассчитано с учетом влияния первых трёх кратных периодичности системы фурие-гармоник экспериментального поля.

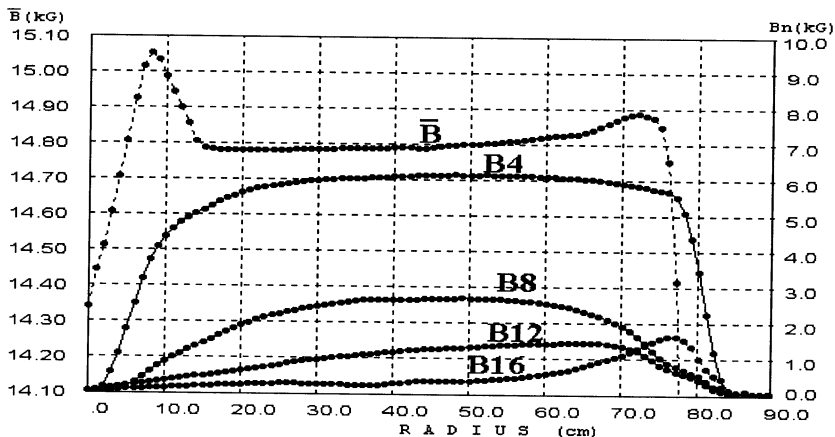


Рис. 7. Характеристики базовой карты поля, использованные для расчета динамики пучка

Весь цикл расчетов динамики был разбит на три части: центральная область, область основного ускорения и область вывода. Для этих областей использовались разные программные средства.

Расчеты показали, что провал магнитного поля в центре циклотрона на ~ 500 Гс от его изохронного значения приводит, при номинальном значении ускоряющего напряжения 50 кВ, к когерентным радиальным колебаниям пучка с амплитудой 4 мм, что в конечном итоге вызывает увеличение эмитанса пучка, заброшенного на вход системы вывода, и является причиной снижения коэффициента вывода с 80 до 55 %. Однако можно практически полностью избежать возникновения когерентного радиального движения, если увеличить амплитуду ускоряющего ВЧ напряжения с 50 до 60 кВ. В этом режиме работы циклотрона эффективность системы вывода достигает 78 %.

Частоты бетатронных колебаний в области ускорения показаны на рис. 8. Видно, что вариация магнитного поля обеспечивает частоту Q_z в допустимых пределах. Формирование изохронного магнитного поля и первой гармоники поля было затем проведено на магнитной системе циклотрона в натуральную величину.

На рис. 9 показан нижний полюс модели магнитной системы с измерительной штангой. Верхний полюс поднят.

Заключение

В процессе моделирования выбрана форма секторных и долинных шимм. Шиммы выбранной конфигурации, установленные в плоском зазоре электромагнита, создают требуемое изохронное магнитное поле циклотрона в диапазоне рабочих радиусов с необходимой точностью. Выбранный контур секторных шимм (контур А, рис. 4) задавался исполнителю по точкам в декартовой системе координат, между которыми строилась сплайн-функция. По заданной сплайн-функции шимма обрабатывалась на станке с программным управлением.

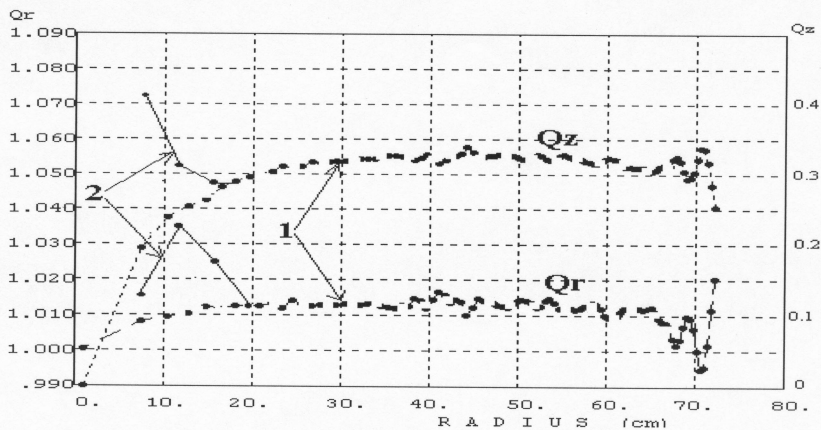


Рис.8. Частоты свободных колебаний частиц. 1 - учет только магнитного поля, 2 - учет электрического и магнитного полей



Рис. 9. Нижний полюс модели магнитной системы с измерительной штангой

Моделируемая магнитная система была изготовлена и собрана, измерения показали, что полученное поле удовлетворяет требованиям, циклотрон успешно работает.

Получено 29 июля 2002 г.

Handwritten signature and date:
 29.07.2002

Моделирование магнитной системы изохронного циклотрона ЦИТРЕК

Приводятся основные результаты моделирования магнитной системы циклотрона ЦИТРЕК в масштабе 1:2,5. Модель магнитной системы циклотрона ЦИТРЕК спроектирована и изготовлена для выбора формы секторных шимм, которые формируют требуемое среднее магнитное поле.

Циклотрон используется для ускорения тяжелых ионов с отношением массы к заряду $A/Z \cong 5$ до энергии $W = 2,4$ МэВ/нуклон. Выведенный пучок ($\sim 10^{11} \text{ c}^{-1}$) предназначается для производства трековых мембран.

Для циклотрона используется ш-образный электромагнит с диаметром полюсов 1600 мм и зазором между ними $\delta = 100$ мм. Вариация магнитного поля создается системой четырех пар секторных шимм, закрепленных зеркально на полюсах так, что они образуют радиально-секторную структуру поля Томаса с периодичностью $N = 4$. Минимальный зазор между шиммами принят равным $h_1 = 40$ мм, а их высота составляет $b = 30$ мм. Выбранные параметры секторных шимм обеспечивают аксиальную устойчивость ускоренных частиц $0 < Q_z < 0,5$.

Работа выполнена в Лаборатории ядерных проблем им. В. П. Джелепова ОИЯИ.

Сообщение Объединенного института ядерных исследований. Дубна, 2002

Перевод авторов

Modeling of Magnetic System Isochronous Cyclotron CYTREC

The basic results on modeling system cyclotron CYTREC in scale 1:2.5 are presented. The model of the magnetic system cyclotron CYTREC is designed and produced for a choice of the form of sector shims, which form a required average magnetic field.

The cyclotron is made for acceleration of heavy mass ions with the relation of weight to the charge $A/Z \cong 5$ up to the energy $W = 2.4$ MeV/nucleon. The extracted beam ($\sim 10^{11} \text{ sec}^{-1}$) is intended for manufacture of track membranes.

For cyclotron the ω -shape electromagnet with the diameter of poles 1600 mm and gap between them $\delta = 100$ mm is used. The variation of the magnetic field is created by the system of 4 pairs of sector shims fixed on poles in axial symmetry, forming radial-sector structure of a field such as Thomas shape with periodicity $N = 4$. The minimal gap between shims is accepted equal to $h_1 = 40$ mm, and their height makes $b = 30$ mm. The chosen parameters of the sector shims provide axial stability of the accelerated particles $0 < Q_z < 0.5$.

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

Communication of the Joint Institute for Nuclear Research. Dubna, 2002

*Редактор А. Н. Шабашова
Макет Н. А. Киселевой*

Подписано в печать 02.10.2002.

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

Усл. печ. л. 0,5. Уч.-изд. л. 0,72. Тираж 285 экз. Заказ № 53546.

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