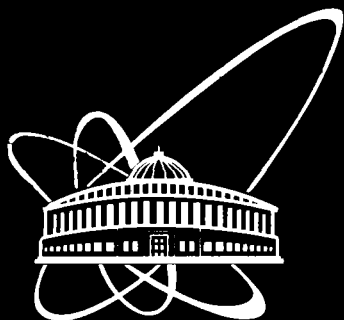




XJ0300104



**СООБЩЕНИЯ
ОБЪЕДИНЕННОГО
ИНСТИТУТА
ЯДЕРНЫХ
ИССЛЕДОВАНИЙ**

Дубна

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**

2002

Введение

Циклотрон проектировался для ускорения тяжелых ионов с отношением массы к заряду $A/Z \geq 5$ 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 двумерным программам расчета магнитного поля с помощью сеточной методики.

Для циклотрона используется Ш-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 $N=4$ 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 долинных шимм. Кроме того, долинные 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	16
	в катушке (3 галеты)	48
	в обмотке (2 катушки)	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).

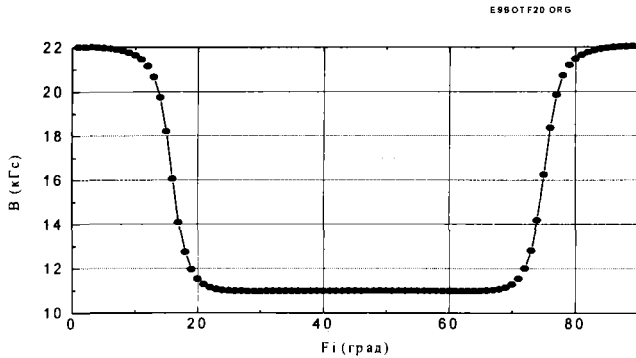


Рис. 1. Азимутальное распределение магнитного поля для радиуса $R=20$ см на одном периоде структуры магнитной системы

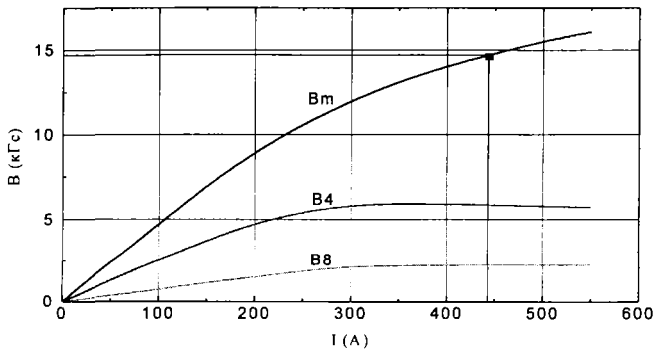


Рис. 2. Среднее магнитное поле и амплитуды гармоник для радиуса $R=10$ см в зависимости от тока в обмотке электромагнита

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 двумерной 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.

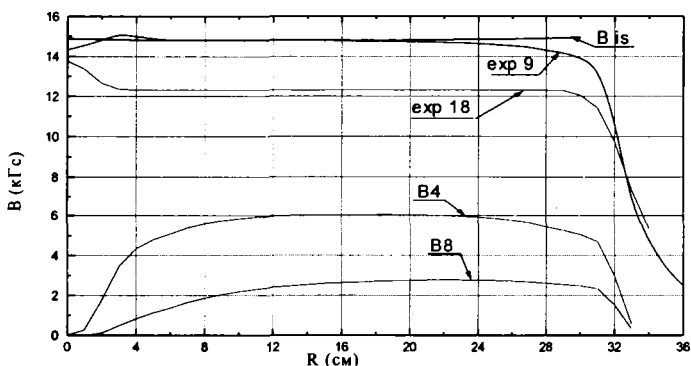


Рис. 3. Зависимости среднего магнитного поля (E9), четвертой (B4) и восьмой (B8) гармоник от радиуса для системы без долинных шимм, изохронного поля (Bis) для этого варианта и поле от плоского зазора (за исключением центра) магнита (E18)

На рис. 4 показаны поперечное сечение полюса магнита циклотрона и конфигурация секторной и долинных шимм. Долинны 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).

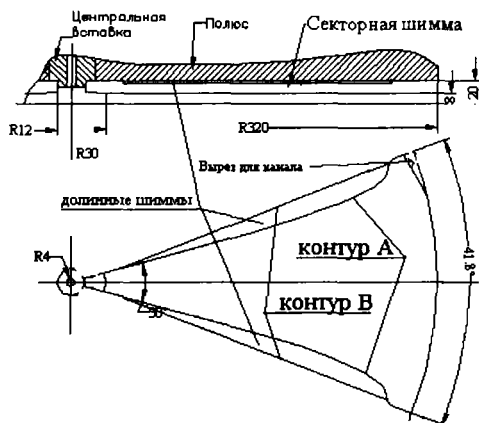


Рис. 4. Поперечное сечение полюса магнитной системы и конфигурация секторной шиммы ускорителя

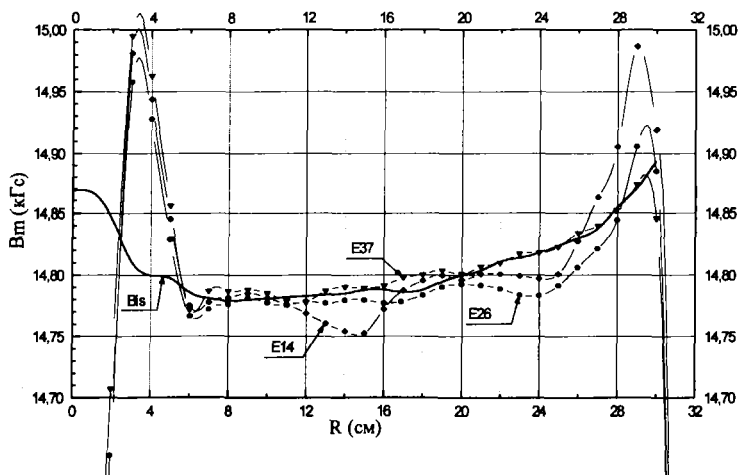


Рис. 5. Основные этапы формирования среднего магнитного поля на модели магнитной системы циклотрона (обозначения в тексте)

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.

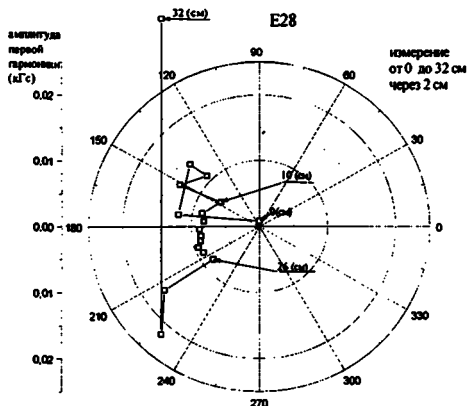


Рис. 6. Амплитуда и фаза первой гармоники магнитного поля, полученные на модели

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 природы, 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 фурье-гармоник экспериментального поля.

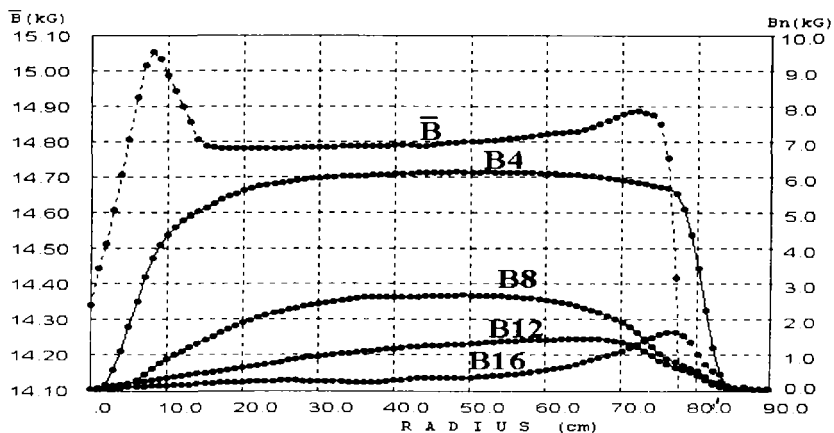


Рис. 7. Характеристики базовой карты поля, использованные для расчета динамики пучка

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 эмиттанса 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 исполнителем по точкам в декартовой системе координат, между которыми строилась сплайн-функция. По заданной сплайн-функции шимма обрабатывалась на станке с программным управлением.

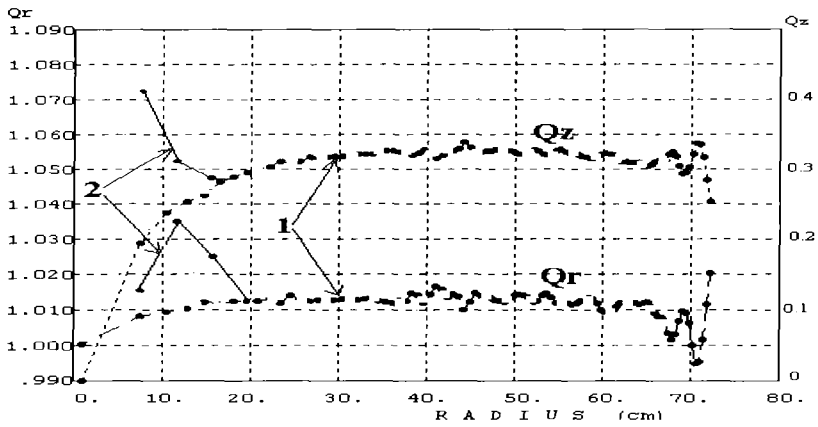


Рис.8. Частоты свободных колебаний частиц. 1 - учет только магнитного поля, 2 - учет электрического и магнитного полей

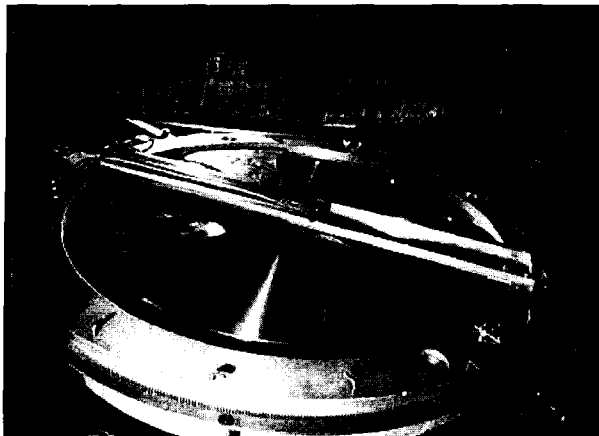


Рис. 9. Нижний полюс модели магнитной системы с измерительной штангой

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

Получено 29 июля 2002 г.

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 ($\sim 10^{11} \text{ с}^{-1}$) 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. Дзелепова ОИЯИ.

Сообщение Объединенного института ядерных исследований. Дубна, 2002

Перевод авторов

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 ш-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 Dzheleпов 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.