

323-93



сообщения  
объединенного  
института  
ядерных  
исследований  
дубна

345к

P9-93-323

Г.Г.Гульбекян, Б.Н.Гикал, Б.А.Кленин, А.М.Мордуев

ЧЕТЫРЕХМЕТРОВЫЙ ИЗОХРОННЫЙ  
ЦИКЛОТРОН ТЯЖЕЛЫХ ИОНОВ У-400  
С ПОНИЖЕННЫМИ УРОВНЯМИ  
СРЕДНИХ МАГНИТНЫХ ПОЛЕЙ

1993

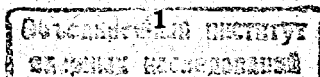
## 1. Введение

Четырехметровый изохронный циклотрон У-400, введенный в эксплуатацию в 1978 г., создан на основе экспериментальных результатов, полученных при сооружении и эксплуатации двухметрового циклотрона У-200. Циклотрон У-400 может ускорять ионы с массовыми числами  $4 \leq A \leq 250$  до кинетических энергий 35–1 МэВ/нукл., соответственно [1]. Магнитная структура ускорителя создается четырьмя парами секторов, имеющих прямые границы и угловую протяженность –  $45^\circ$ . Изохронная зависимость магнитного поля от радиуса в диапазоне 18,5–21,1 кГс создается кольцевыми и боковыми шиммами, размещенными на поверхности и на торцах секторов, а также токовыми корректирующими катушками. Десять пар кольцевых радиальных катушек, каждая из которых создает поле до 100 Гс, размещены в зазоре между крышками камеры и полюсами. Кроме того, имеется восемь пар азимутальных катушек для коррекции первой гармоники азимутальной неоднородности магнитного поля с амплитудой  $\sim 16$  Гс, которые располагаются в долинах циклотрона. Радиальная фокусировка ионов осуществляется за счет роста среднего магнитного поля по радиусу, а аксиальная за счет вариации поля – флаттера, составляющего 0,075 – 0,09 на конечных радиусах ускорителя [1].

Пучки ионов выводятся из циклотрона методом их перезарядки на тонких углеродных фольгах [2] толщиной 40 – 60 мкг/см<sup>2</sup>, при этом возможен вывод как одним, так и двумя – тремя оборотами после мишени, что дает возможность вариации энергии выведенных пучков за счет радиального и азимутального перемещений фольги. Срок службы фольги определяется типом и интенсивностью падающих на нее пучков ионов. Например, для ионов  $^{14}\text{N}^{+2}$  с интенсивностью  $6 \cdot 10^{13}\text{c}^{-1}$  срок службы фольги составляет 48 – 80 часов, а для ионов  $^{55}\text{Mn}^{+5}$  с интенсивностью  $10^{13}\text{c}^{-1}$  фольга разрушается после  $\sim 45$  часов работы.

Коэффициент вывода определяется эффективностью перезарядки ионов до нужного заряда и составляет  $\sim 100\%$  для самых легких ионов и 15 – 20% для тяжелых.

В связи с резким ростом цен на энергоносители, в том числе и



на электроэнергию, представляется целесообразным рассмотреть пути снижения мощности питания электромагнитов циклотронов Лаборатории ядерных реакций. В работе представлена одна из возможностей решения этой проблемы для четырехметрового изохронного циклотрона тяжелых ионов — У-400.

## 2. Магнитное поле циклотрона

Результаты формирования магнитного поля циклотрона в 1978 и 1982 годах представлены на рисунках [1]. На рис.1 приведена зависимость среднего уровня магнитного поля в центре циклотрона от тока возбуждения в основных обмотках. Видно, что при токах возбуждения 1000 – 2500А уменьшение его на 400 – 500А приводит к снижению магнитного поля в центре циклотрона на  $\sim 1$  кГс и уменьшению максимальной мощности питания основных катушек  $\sim$  в 1,5 раза. Зависимости средних магнитных полей от радиуса

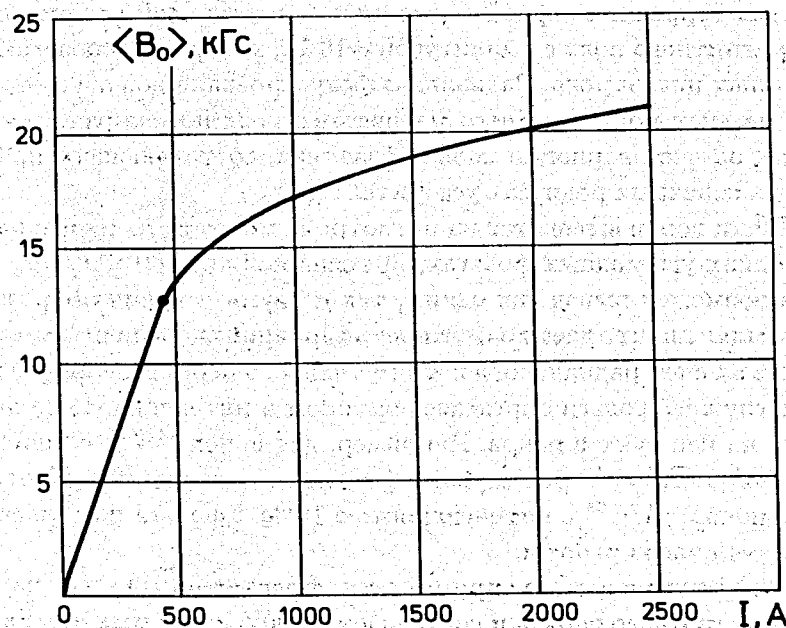


Рис.1. Кривая возбуждения электромагнита циклотрона У-400.

циклотрона, сформированные кольцевыми шиммами, при различных уровнях возбуждения обмоток электромагнита показаны на рис.2. Пунктирные линии на этом рисунке — требуемые изохронные поля для ионов с отношением  $A/Z = 4, 9, 10$ . Очевидно, что кольцевых шимм недостаточно для создания изохронных зависимостей магнитных полей (наблюдается спад, а не рост полей с увеличением радиуса циклотрона), поэтому последующее формирование полей осуществлялось секторными боковыми шиммами [1]. Магнитное поле циклотрона, сформированное кольцевыми и боковыми шиммами, показано на рис.3. Рис.4 иллюстрирует зависимости магнитных полей, усредненных по азимуту, от радиуса циклотрона

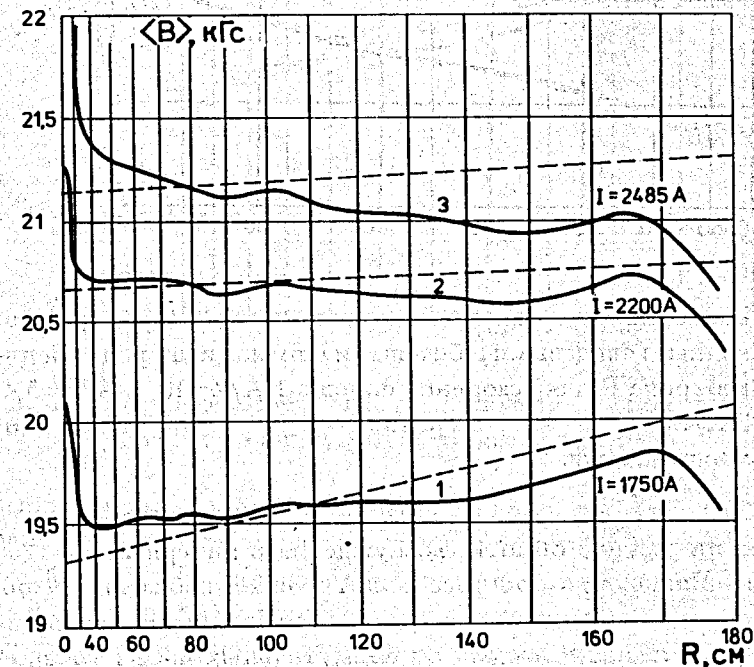


Рис.2. Зависимость средних магнитных полей  $\langle B \rangle$ , сформированных кольцевыми шиммами, от радиуса циклотрона  $R$  для ускорения ионов с различными  $A/Z$ ; 1- $A/Z=4$ , 2- $A/Z=9$ , 3- $A/Z=10$ . — измерения, - - - - требуемые изохронные поля.

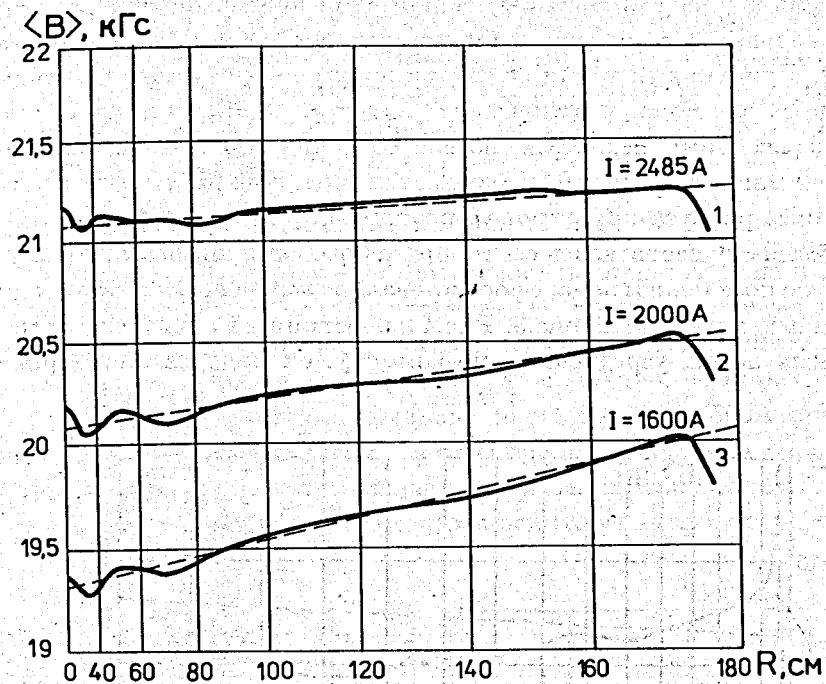


Рис.3 Зависимости средних магнитных полей  $\langle B \rangle$ , сформированные кольцевыми и боковыми шиммами, от радиуса циклотрона  $R$  для ускорения ионов с 1-  $A/Z=10$ , 2-  $A/Z=5,4$ , 3-  $A/Z=4,2$ . — — измерения, - - - - требуемые изохронные поля.

для токов в основной обмотке возбуждения в интервале от 1260A до 2000A. Видно, что при токе 1800A и ниже наблюдается рост магнитного поля с увеличением радиуса циклотрона. Распределение среднего магнитного поля от азимутальных шимм толщиной 1 мм представлено на рис.5. Вклад этих шимм в среднее магнитное поле ускорителя в интервале радиусов 100 – 175 см составляет  $\Delta\langle B \rangle = (5-3,5)$  Гс/мм. На основе приведенных выше результатов по формированию магнитного поля для ускорения ионов на циклотроне вместо прежнего диапазона средних полей в центре 18,5 – 21,5 кГс

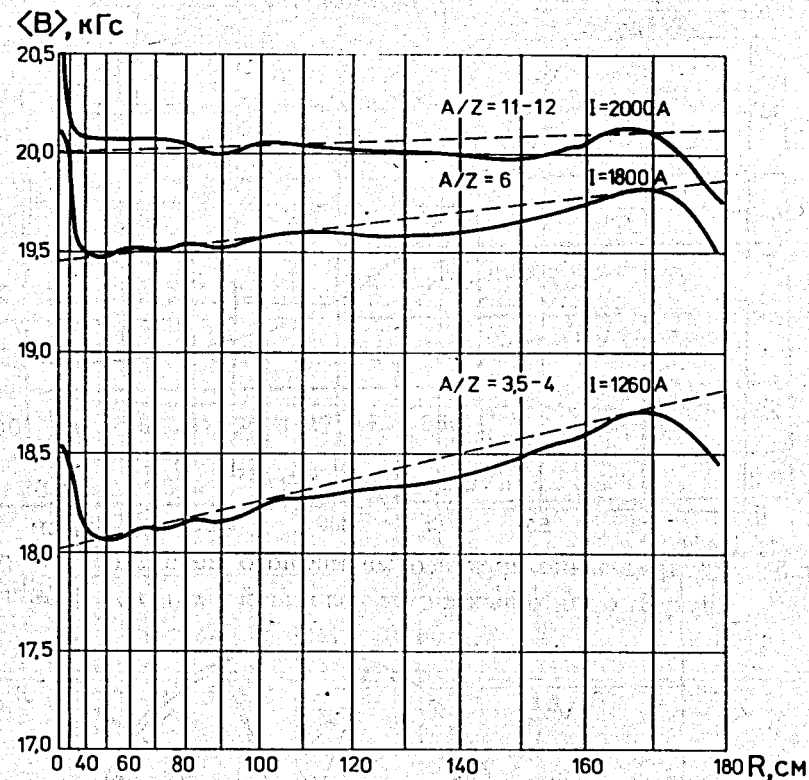


Рис.4 Распределение магнитных полей  $\langle B \rangle$  при пониженных уровнях по радиусу  $R$  (без боковых шимм).

выбран новый пониженный интервал полей от 18 кГс до 20 кГс, что позволит снизить мощность питания электромагнита ускорителя до 250 – 650 кВт. Для формирования средних изохронных магнитных полей (рис.4), с пониженными уровнями поля в центре, используется новый набор азимутальных шимм (рис.6), геометрические размеры которых рассчитывались на основе экспериментальных результатов, полученных при измерении поля от шимма толщиной 1 мм (рис.5). Основные параметры циклотрона для средних магнитных полей с пониженными уровнями и типы ионов, ускоряемые в этих полях и их кинетические энергии приведены в таблице и на рис.7.

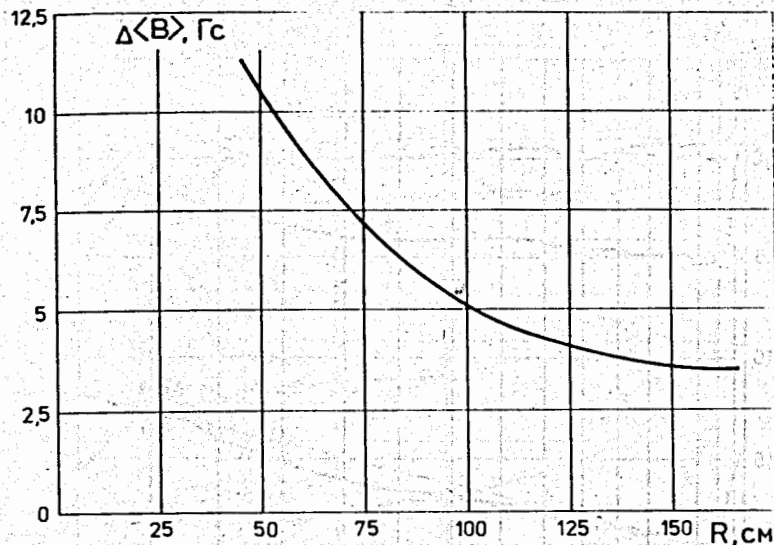


Рис.5 Распределение среднего магнитного поля  $\Delta\langle B \rangle$  по радиусу  $R$  от боковых шимм толщиной 1 мм (измерения)

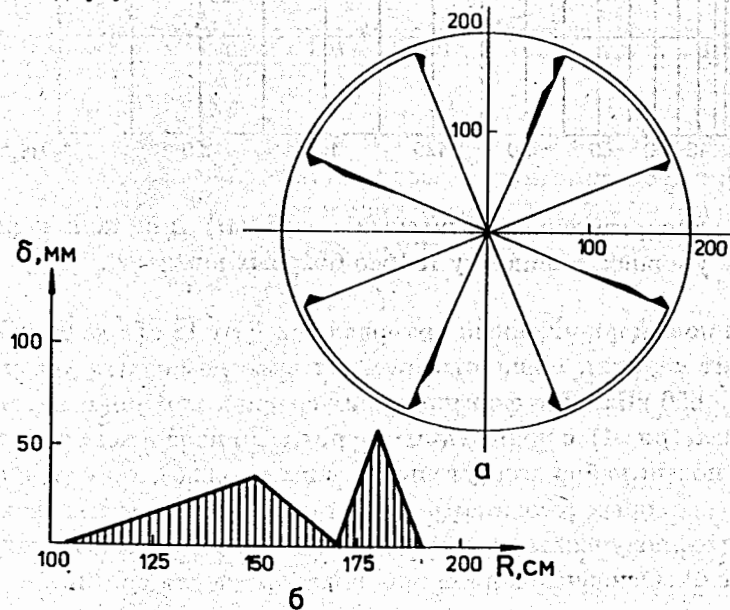


Рис.6 Шиммирование магнитного поля циклотрона с пониженными уровнями. Распределение (а) и размеры (б) шимм.

Таблица

$I, A$	$\langle B_0 \rangle, kGc$	$K$	$\gamma$	$A/Z$	$E, MэВ$ н	$W, кВт$	Уск. ионы
1260	18	507	1,05	3,5÷4	35-40	250	$^{14}N^{+4}, ^{16}O^{+4}, ^{20}Ne^{+5}, \dots$
1500	19	540	1,03	4,5÷5	25	360	$^{20}Ne^{+4}, ^{15}N^{+3}, \dots$
1800	19,5	556	1,015	6	15	500	$^{31}P^{+5}, ^{40}Ar^{+7}, \dots$
1900	19,75	568	1,01	7	12	575	$^{40}Ar^{+6}, ^{48}Ti^{+7}, ^{52}Cr^{+7}, \dots$
2000	20	574	1,005	11÷12	5÷4	650	$^{48}Ti^{+4}, ^{58}Fe^{+5}, ^{84}Kr^{+8}, ^{136}Xe^{+12}$
$I=2000A; K=574, ^{238}U^{+10}, E \approx 1 MэВ/н$							

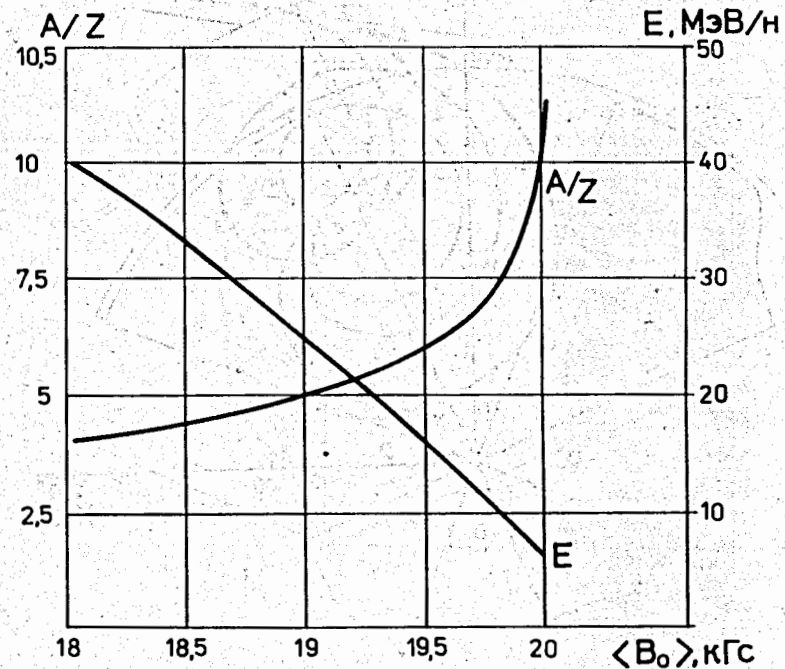


Рис.7 Зависимость энергии ускоряемых ионов для различных  $A/Z$  от уровня среднего поля в центре циклотрона.

### 3. Вывод ионов из циклотрона

Ионы выводятся из циклотрона методом их перезарядки на тонкой углеродной фольге одним или двумя – тремя оборотами [2,3]. Смещение  $\Delta r$  траектории иона в процессе вывода вдоль выбранного направления характеризует заброс пучка ионов. За выбранное направление принимаем вектор, направленный из центра циклотрона в выводное окно вакуумной камеры (рис.8). Заброс ионов при выводе определяется как

$$\Delta r_1 \cong 4R_b \frac{\delta}{1 - \delta^2} \frac{Z_1}{Z_2},$$

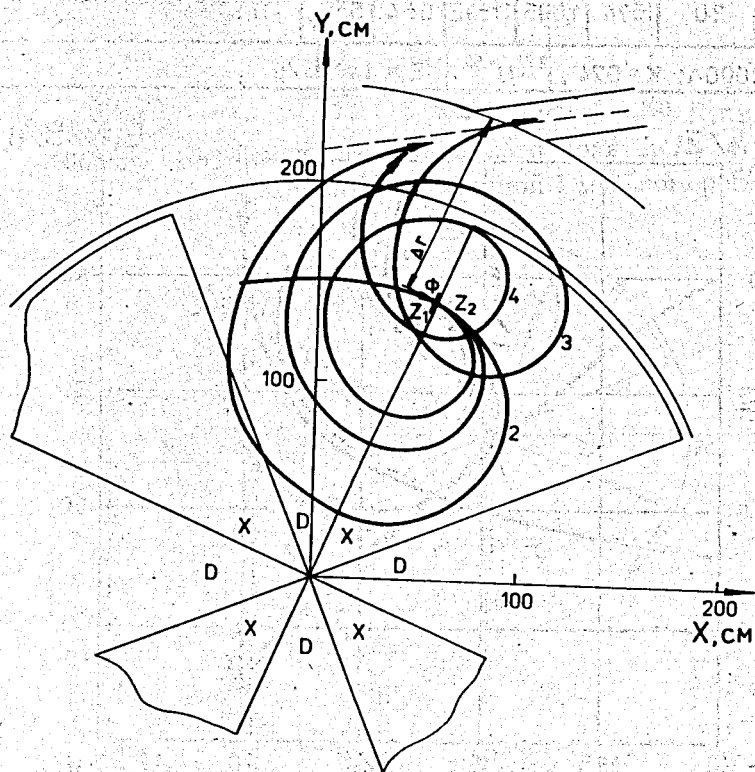


Рис.8 Вывод ионов с радиуса 150 см. X – холм, D – долина. Цифры у траекторий – отношение зарядов  $Z_1/Z_2$ ,  $\Phi$  – фольга.

для однооборотного вывода и

$$\Delta r_2 \cong 8R_b \frac{\delta}{1 - \delta^2} \frac{Z_1}{Z_2}$$

для вывода двумя оборотами, где  $R_b$  – радиус вывода ионов,  $\delta$  – глубина вариации магнитного поля

$$\delta = \frac{B_x - \langle B \rangle}{\langle B \rangle}, \text{ или } \delta = \frac{\langle B \rangle - B_q}{\langle B \rangle},$$

здесь  $B_x, B_q$  – кусочно однородное поле в холме и долине,  $\langle B \rangle$  – среднее магнитное поле на радиусе вывода,  $Z_1, Z_2$  – заряды иона до и после фольги соответственно. Для существующих полей циклотрона  $\delta=0,25$ ; при перешиммировании полей значение  $\delta$  возрастает до 0,27 – 0,28 ( $B_x = 23,5$  кГс,  $B_q = 13,5$  кГс,  $\langle B \rangle = 18,5$  кГс).

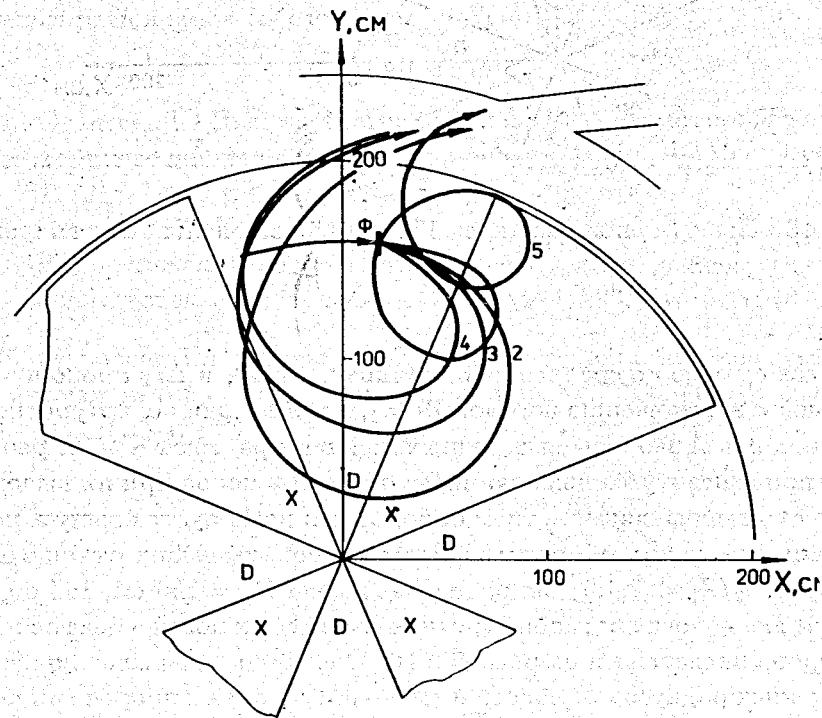


Рис.9 Вывод ионов с радиуса 160 см. Обозначения аналогичны рис.8.

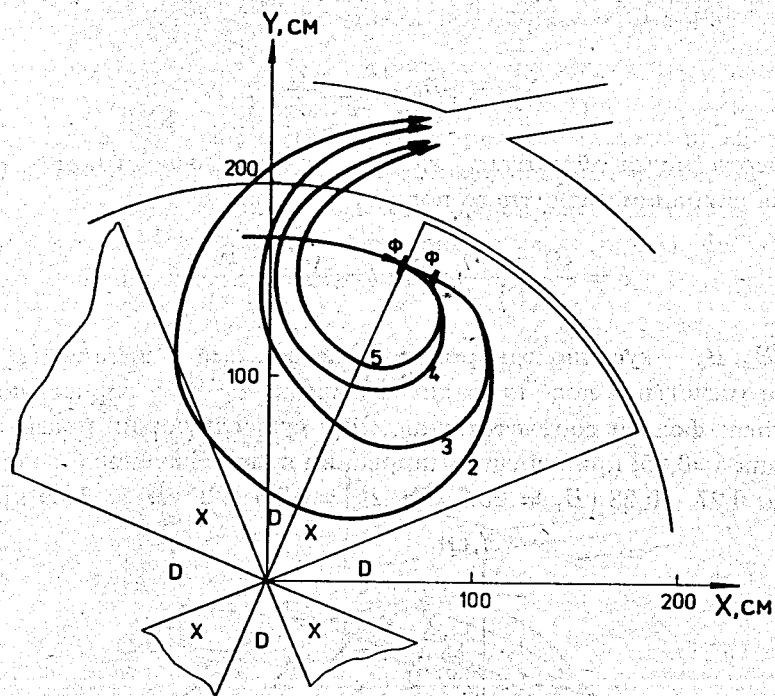


Рис.10 Вывод ионов с радиуса 172 см. Обозначения аналогичны рис.8.

Так как  $\delta^2$  мало по сравнению с единицей, то  $\Delta r_1$  и  $\Delta r_2$  пропорциональны  $\delta$  и отношению зарядов  $Z_1/Z_2$ , поэтому для новых уровней средних полей забросы выведенных ионов возрастают  $\sim$  в 1,1 раза. Это приводит к уменьшению числа оборотов ионов при их выводе, и вместо вывода двумя – тремя оборотами реализуется выпуск ионов одним – двумя оборотами. Вывод ионов, имеющих отношение зарядов  $Z_2/Z_1=2,3,4,5$ , для радиусов вывода  $R_n = 150$  см, 160 см и 172 см для нового диапазона средних магнитных полей в центре циклотрона представлен на рис.8,9 и 10. Очевидно, что вывод ионов с указанных радиусов осуществляется одним – двумя оборотами после фольги, что упрощает выпуск частиц и приводит к уменьшению их потерь.

#### 4. Заключение

Формирование нового диапазона изохронных магнитных полей циклотрона У-400 для ускорения ионов с отношениями  $A/Z = 3,5-12$  предполагается провести по схеме:

1. Измерение поля при уровне  $\langle B_0 \rangle = 20$  кГс на элементе периодичности для существующих азимутальных шимм.
2. Измерение поля  $\langle B_0 \rangle = 20$  кГс без шимм.
3. Определение вклада  $\Delta(B)$  боковых шимм для различных радиусов от 40 см до 196 см.
4. Расчет профиля боковых шимм для формирования изохронного поля при  $\langle B_0 \rangle = 20$  кГс.
5. Измерение сформированных полей с новыми шиммами при уровнях  $\langle B_0 \rangle = 18$  кГс, 19 кГс, 20 кГс.
6. Шиммирование поля в области конечного радиуса ускорения с целью расширения  $R_k$  от 172 см до  $R_k = 180 - 182$  см.

#### Литература

1. Оганесян Ю.Ц. и др. Магнитное поле четырехметрового изохронного циклотрона тяжелых ионов. – ОИЯИ, 9-11992, Дубна, 1978.
2. Оганесян Ю.Ц., Козлов С.И., Гульбекян Г.Г., Кленин Б.А. Вывод тяжелых ионов из секторно-фокусирующих циклотронов методом перезарядки. – ОИЯИ, 9-11993, Дубна, 1978.
3. Гульбекян Г.Г., Мордуев А.М. Исследование вывода пучков ионов методом обдирки из циклотрона У-400. – ОИЯИ, 9-84-480, Дубна, 1984.

Рукопись поступила в издательский отдел  
31 августа 1993 года.