

A-535

420/2-77

ОБЪЕДИНЕННЫЙ  
ИНСТИТУТ  
ЯДЕРНЫХ  
ИССЛЕДОВАНИЙ  
ДУБНА



7/2-77

9 - 10133

В.С.Алфеев, Б.А.Кленин, С.И.Козлов

ИЗОХРОННЫЙ ЦИКЛОТРОН ТЯЖЕЛЫХ ИОНОВ  
С ТРЕМЯ РАБОЧИМИ ЗАЗОРАМИ

**1976**

9 - 10133

В.С.Алфеев, Б.А.Кленин, С.И.Козлов

**ИЗОХРОННЫЙ ЦИКЛОТРОН ТЯЖЕЛЫХ ИОНОВ  
С ТРЕМЯ РАБОЧИМИ ЗАЗОРАМИ**

*Направлено в АЭ*



Алфеев В.С., Кленин Б.А., Козлов С.И.

9 - 10133

Изохронный циклотрон тяжелых ионов с тремя рабочими зазорами

Описывается двухэтапный ускоритель тяжелых ионов - изохронный циклотрон, использующий электромагнит Ш-образного типа с тремя рабочими зазорами. Показано, что циклотрон, имеющий электромагнит с диаметрами полюсов 400 см, позволит ускорять тяжелые ионы в диапазоне  $A/Z = 17-22$  (Ne-U) до энергий 7-50 МэВ/и. Интенсивности пучков ионов при этом составят  $10^{14} - 10^{11}$  1/с. Приводятся результаты расчетов и моделирования электромагнита с тремя зазорами.

Работа выполнена в Лаборатории ядерных реакций ОИЯИ.

Препринт Объединенного института ядерных исследований  
Дубна 1976

Для решения ряда новых задач ядерной физики необходимы пучки ионов тяжелых элементов, таких как ионы криптона, ксенона, урана. Поэтому во многих лабораториях мира проектируются и создаются установки, предназначенные для ускорения тяжелых ионов вплоть до ксенона <sup>/1/</sup> и урана <sup>/2,3/</sup>. Наряду с этим разрабатываются новые методы ускорения тяжелых ионов, такие как ускорение ионов с переменным зарядом в потенциальном электрическом поле <sup>/4/</sup>, метод плазменного ускорения <sup>/5/</sup>, коллективный метод ускорения <sup>/6/</sup> и др. Кроме того, большое внимание уделяется вопросам повышения эффективности существующих и вновь строящихся ускорителей тяжелых ионов. В частности, разрабатываются способы двухэтапного ускорения ионов на одном ускорителе с использованием эффекта перезарядки <sup>/7-10/</sup>.

В настоящей работе предлагается схема двухэтапного ускорения тяжелых ионов на изохронном циклотроне, основанная на повышении эффективности использования магнитного потока электромагнита ускорителя.

### ЭЛЕКТРОМАГНИТ ЦИКЛОТРОНА

Отличительная особенность Ш-образного электромагнита описываемого циклотрона состоит в том, что его стойки выполняются с горизонтальными воздушными зазорами, используемыми для расположения в них циклотронов - инжекторов. Схема электромагнита с тремя зазорами, имеющего диаметр полюсов 400 см и толщину

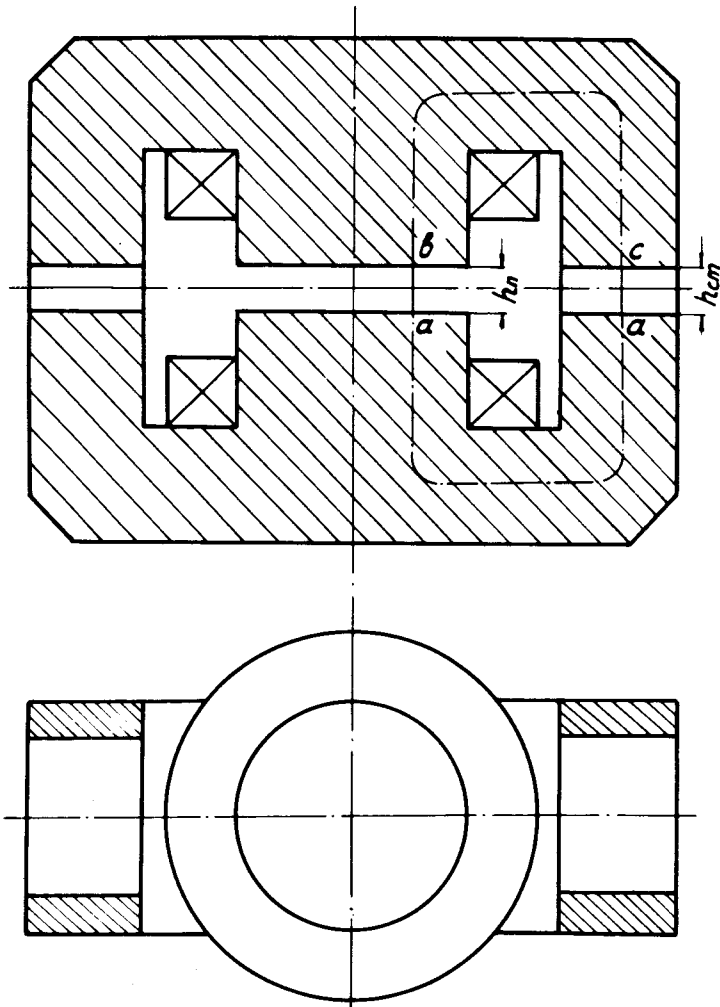


Рис. 1. Схема электромагнита с тремя зазорами.

стоек 200 см, приведена на рис. 1. Циклотрон с таким электромагнитом позволит ускорять тяжелые ионы в диапазоне от  $Ne$  до  $U$  включительно до энергий 7 - 50 МэВ/нуклон.

Исследование свойств магнитного поля электромагнита проводилось с помощью расчетов и экспериментального моделирования. Расчеты основывались на решении

уравнений магнитостатики с учетом магнитных свойств стали электромагнита. Для этой цели использовалась программа [11] численного решения двухмерного нелинейного уравнения Пуассона

$$\frac{\partial}{\partial x} \left( \frac{1}{\mu} \frac{\partial A_z}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left( \frac{1}{\mu} \frac{\partial A_z}{\partial y} \right) = -4\pi J,$$

где  $A_z - z$  - компонента векторного потенциала,  $\mu = \mu(B)^z$  - магнитная проницаемость стали /в данном случае сталь марки Ст-3/,  $J$  - плотность тока в обмотках возбуждения. Магнитное поле определяется как

$$B_x = \frac{\partial A_z}{\partial y}; \quad B_y = -\frac{\partial A_z}{\partial x}.$$

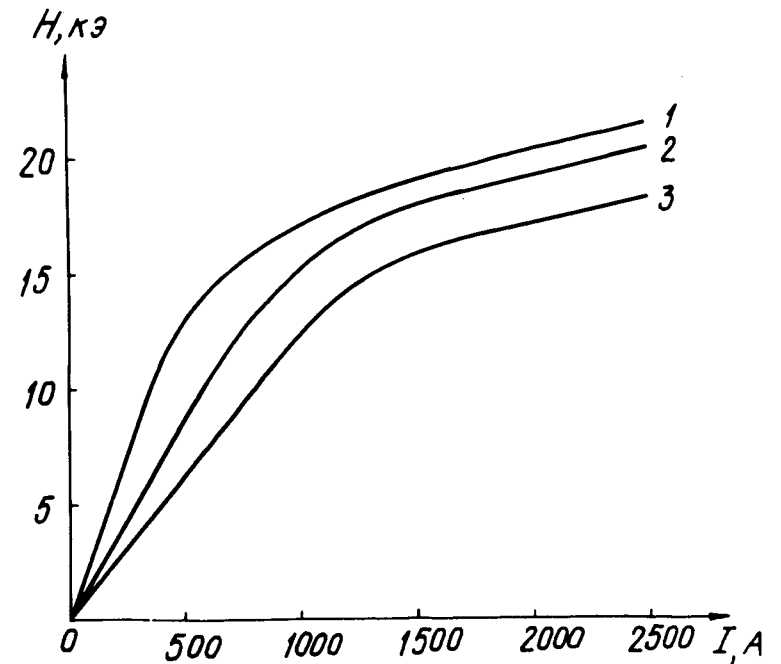


Рис. 2. Намагничивание электромагнита циклотрона между полюсами /1 -  $h_{II} = 20$  см,  $h_{CT} = 0$ ; 2 -  $h_{II} = h_{CT} = 20$  см/ и стойками /3 -  $h_{II} = 20$  см,  $h_{CT} = 20$  см/.

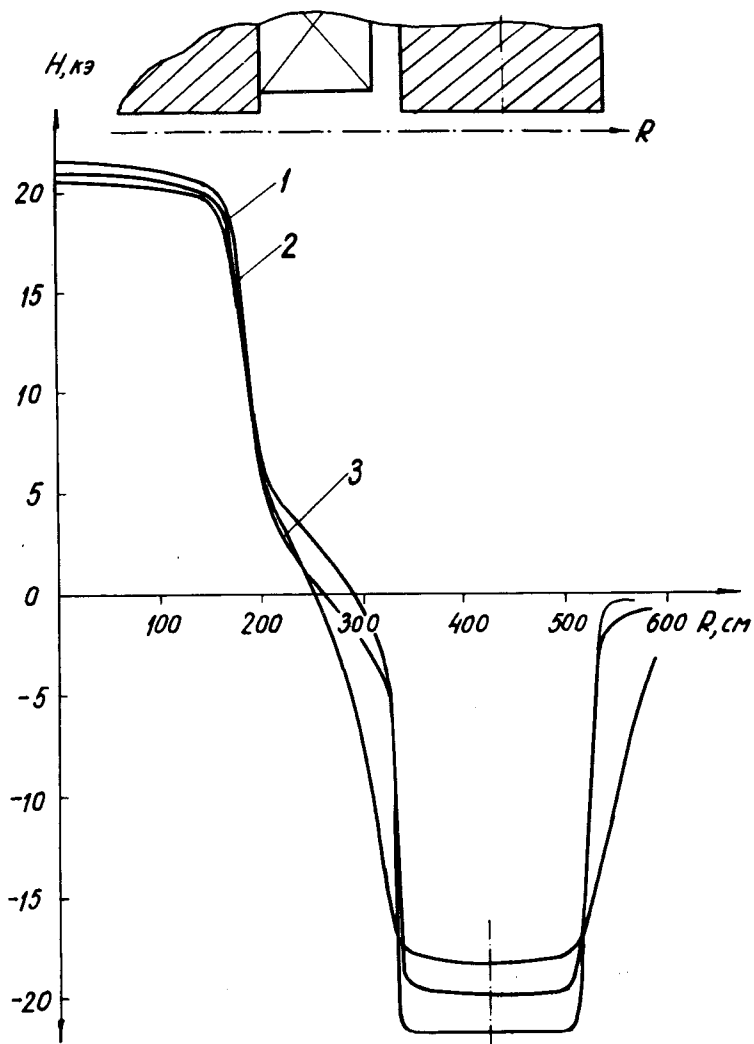


Рис. 3. Распределение магнитного поля в медианной плоскости электромагнита циклотрона. 1 -  $h_{\text{II}} = 20$  см,  $h_{\text{CT}} = 0$ ; 2 -  $h_{\text{II}} = h_{\text{CT}} = 20$  см; 3 -  $h_{\text{II}} = 20$  см,  $h_{\text{CT}} = 10$  см.

Программа позволяет рассчитывать магнитное поле в заданной области с погрешностью 1-5%. Расчет проводился на ЭВМ БЭСМ-6. Результаты расчета электромагнита с тремя зазорами приведены на рис. 2,3. Из рисунков видно, что воздушные зазоры в стойках приводят к снижению поля в зазорах между полюсами /в области насыщения стали/ на 5-10%. Поле в зазорах стоек на 10-20% ниже, чем поле в центральном зазоре. Кроме того, из рис. 3 видно, что центры симметрии магнитных полей не совпадают с геометрическими центрами стоек. Смещение их составляет ~ 15 см. Однако последнее может быть частично ликвидировано путем дополнительного шиммирования магнитного поля.

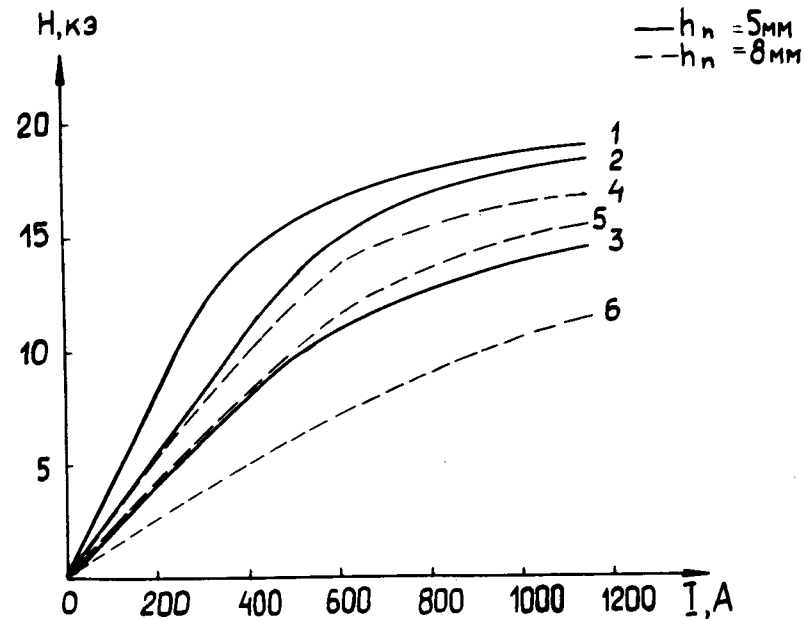


Рис. 4. Намагничивание экспериментального электромагнита с тремя зазорами между полюсами /1 -  $h_n = 5$  мм,  $h_{\text{CT}} = 0$ ; 2 -  $h_n = 5$  мм,  $h_{\text{CT}} = 5$  мм; 4 -  $h_n = 8$  мм,  $h_{\text{CT}} = 0$ ; 5 -  $h_n = 8$  мм,  $h_{\text{CT}} = 8$  мм/ и стойками /3 -  $h_{\text{CT}} = 5$  мм,  $h_n = 5$  мм; 6 -  $h_{\text{CT}} = 8$  мм,  $h_n = 8$  мм/.

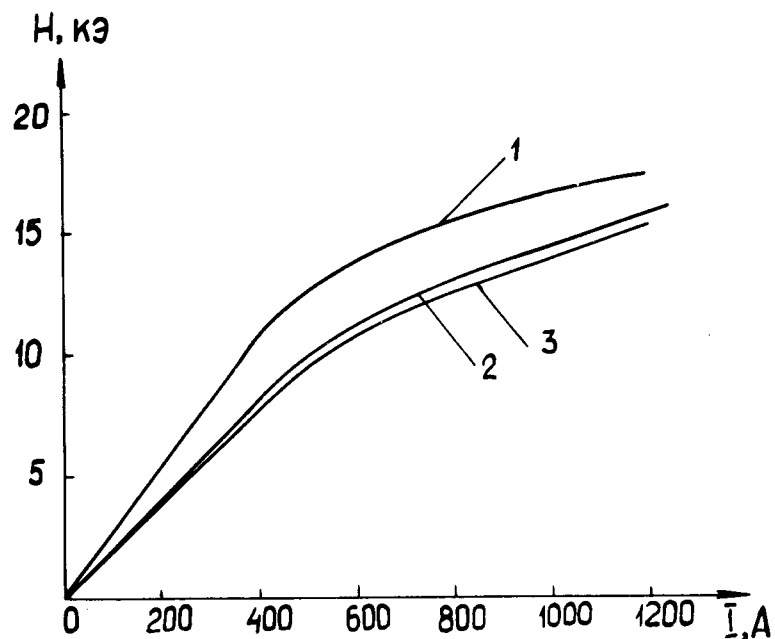


Рис. 5. Намагничивание экспериментального электромагнита между центральными полюсами /1 -  $h_{II} = 8$  мм,  $h_{CT} = 0$ ; 2 -  $h_{II} = 8$  мм,  $h_{CT} = 4$  мм/ и полюсами в стойках /3 -  $h_{CT} = 4$  мм,  $h_{II} = 8$  мм/.

Для экспериментального исследования магнитного поля электромагнита циклотрона была изготовлена его модель в масштабе 1:25. Диаметр полюсов модели составляет 16 см, толщина стоек и балок - 8 см. Электромагнит изготовлен из стали марки СТ-3. Результаты магнитных измерений, сделанных на модели, приведены на рис. 4-6. На рис. 4 представлены значения магнитных полей в центрах зазоров электромагнита в зависимости от тока в обмотках возбуждения. Как видно из рис. 4, зазоры в стойках приводят к снижению поля между полюсами на 5-10% /в области насыщения/, что хорошо согласуется с расчетом. Магнитное поле в зазорах стоек на 20-30% /по расчету 10-20%/ ниже, чем поле между полюсами. На рис. 5 приведены зависимости, аналогичные рис. 4, но с явно выраженными полюсами /сечением

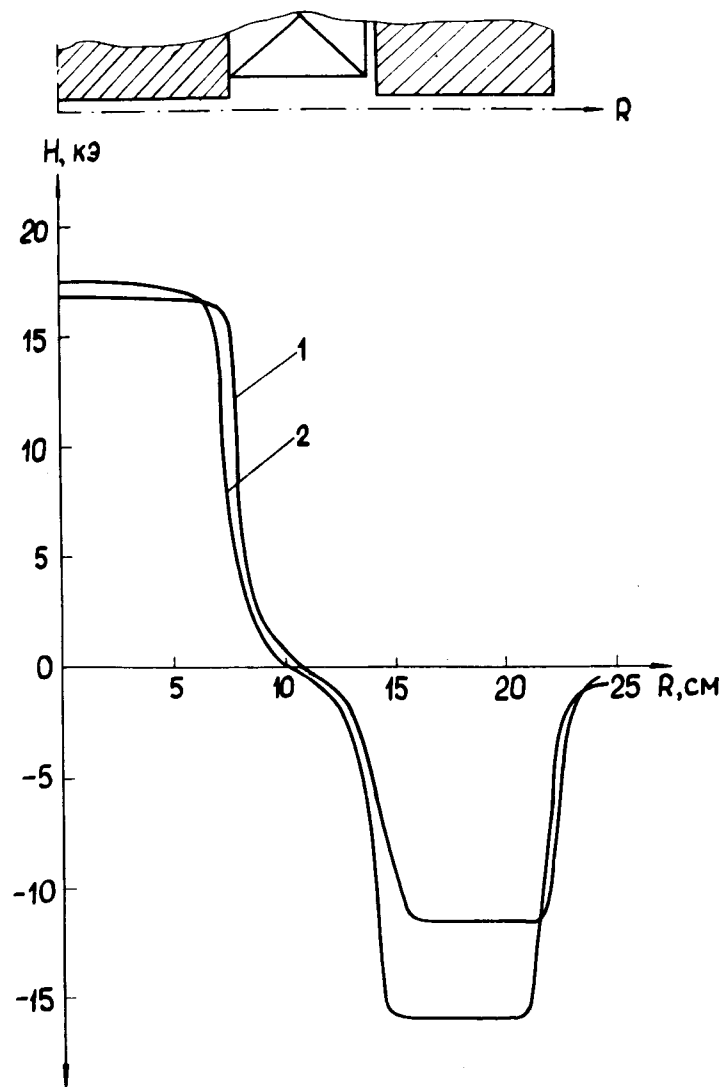


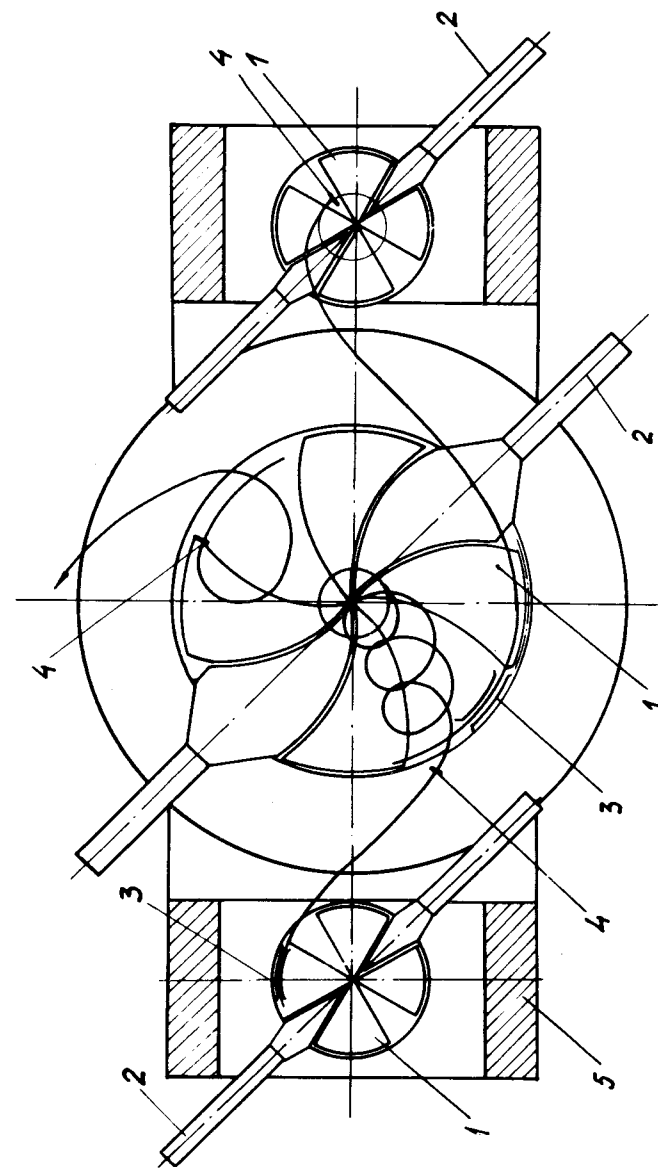
Рис. 6. Распределение магнитного поля в медианной плоскости экспериментального электромагнита. 1 - измерения, 2 - расчет,  $h_{II} = h_{CT} = 5$  мм.

80x80 мм/ в зазорах стоек. Полюса, как видно из *рис. 5*, приводят к существенному увеличению уровня поля в зазорах стоек. Значения магнитных полей между полюсами электромагнита с тремя зазорами на 10-15% ниже, чем для обычного электромагнита. Расчетные и измеренные распределения магнитного поля в медианной плоскости электромагнита представлены на *рис. 6*. При этом ток в обмотках возбуждения составлял 720 А, полюса в зазорах стоек отсутствовали. В области полюсов отличие расчетных и экспериментальных распределений магнитного поля составляет 3-5%. Большое отличие эксперимента от расчета в зазорах стоек объясняется тем, что сечение стоек модели в 1,3 раза больше, чем сечение полюсов. Однако при расчетах поля экспериментального электромагнита считалось, что сечения стоек и полюса одинаковы.

### ЦИКЛОТРОН

Схема изохронного циклотрона тяжелых ионов представлена на *рис. 7*. Зазор между полюсами используется для основного циклотрона, а в зазорах стоек располагаются циклотроны-инжекторы. Геометрические центры инжекторов совмещены с центрами симметрии магнитных полей. Энергия инжекции составляет  $E = 120 Z^2/A$ , при этом максимальный уровень среднего магнитного поля равен 18,3 кЭ, а конечный радиус ускорения - 85 см. В основном ускорителе ионы приобретают максимальную энергию  $E = 650 Z^2/A / H = 20,5$  кЭ,  $R_k = 180$  см/. Средний воздушный зазор между полюсами в циклотроне и инжекторах составляет, соответственно, 20 и 10 см.

Ускорение ионов осуществляется в две стадии. На первой ионы с начальным зарядом  $Z_i$  ускоряются в инжекторе до конечного радиуса и выводятся с помощью электростатического дефлектора /3/ по направлению к основному ускорителю. После перезарядки ионов на тонкой фольге /4/ их заряд резко возрастает, радиус кривизны траектории уменьшается и осуществляется



*Рис. 7.* Схема циклотрона в плане: 1 - секторы, 2 - диаметры, 3 - дефлекторы, 4 - обдирочные устройства, 5 - проставки между стойками.

трохоидальная инжекция ионов /12-14/ по границе холм-долина/ на равновесную орбиту основного ускорителя. Число оборотов при вводе не превышает 10. Заметим, что если в качестве инжектора используется большой циклотрон, то инжекция ионов в основной ускоритель /циклотрон в зазорах стоек/ упрощается /см. рис.7/. Однако при одинаковых начальных зарядах  $Z_i$  конечная энергия ускоренных ионов в 1,5 раза меньше, чем в схеме с малым инжектором. Это объясняется снижением скорости роста заряда в процессе перезарядки при увеличении энергии инжекции.

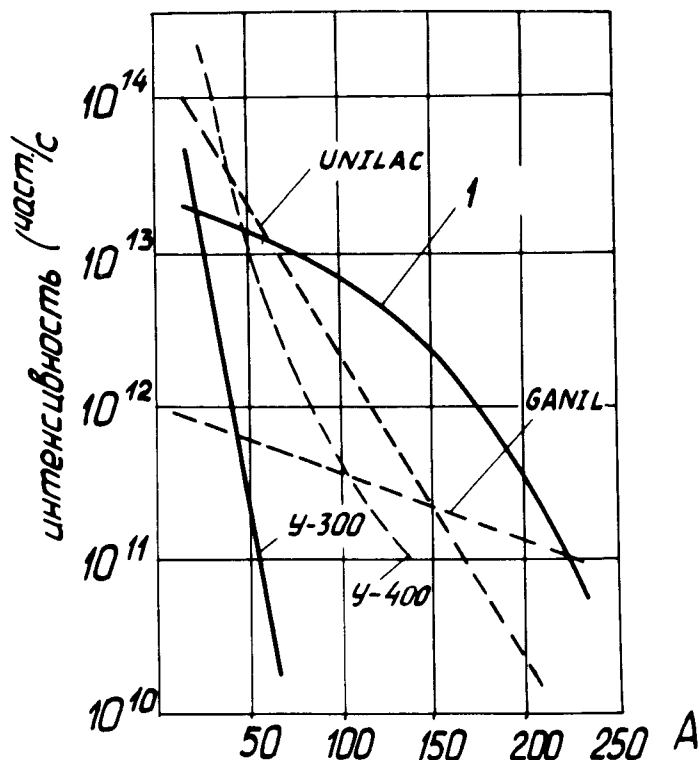


Рис. 8. Сравнительные характеристики некоторых ускорителей тяжелых ионов.

Таблица

Инжектор $E = 120 Z^2 / A$			Циклотрон $E = 650 Z^2 / A$			
Ускор. ион	$A/Z$	$E_{об.}$ (МэВ)	$Z_{об.}$	$A/Z_{об.}$	$E_k$ (МэВ)	$E_k/A$ (МэВ/и)
$^{20}\text{Ne}^{+1}$	20	6	+6	3,34	1120	58
$^{40}\text{Ar}^{+2}$	20	12	+9	3,34	1350	34
$^{52}\text{Cr}^{+3}$	17,3	20,3	+12	4,33	1800	35
$^{56}\text{Fe}^{+3}$	18,7	19,3	+12	4,66	1670	30
$^{84}\text{Kr}^{+4}$	21	23	+13	6,46	1310	15,6
$^{127}\text{I}^{+5}$	21,2	34	+18	7,06	1650	13,0
$^{132}\text{Xe}^{+6}$	22	32,7	+17	7,76	1420	10,8
$^{184}\text{W}^{+10}$	18,4	65	+23	8,0	1870	10,0
$^{208}\text{Pb}^{+10}$	20,8	57,5	+22	9,45	1540	7,3
$^{238}\text{U}^{+11}$	21,7	61	+24	9,92	1570	6,6
$^{238}\text{U}^{+12}$	19,9	72	+25	9,55	1700	7,1

Возможности трехзакорного циклотрона иллюстрируются таблицей. В ней приведены типы ускоряемых ионов, их начальный заряд, энергия инжекции ( $E_i$ ), заряд ионов после перезарядки ( $Z_{об.}$ ) и конечная энергия ионов ( $E_k$ ). Частоты обращения ионов в инжекторах и ускорителе составляют, соответственно,  $1,2 \div 1,7$  МГц и  $3 \div 9,5$  МГц. Угловые протяженности дуантов и секторов, равные, соответственно,  $30^\circ$  и  $60^\circ$ , выбраны из условий максимального прироста энергии за оборот ионов с  $A/Z = 17 \div 23$  и создания высокого уровня среднего магнитного поля в зазорах инжекторов. Ускорение ионов в инжекторах осуществляется на  $6 \div 8$  гармониках ускоряющего напряжения. Полное число оборотов при ускорении на 6 гармонике и напряжении на дуантах 100 кВ не превышает 30.



Угловая протяженность и угол спиральности секторов основного циклотрона, составляющие, соответственно,  $45^\circ$  и  $30^\circ$ , выбраны из условий аксиальной фокусировки ионов, ускоряемых до энергий  $7-50$  МэВ/нуклон. Ускорение осуществляется на  $2-6$  гармониках в.ч.напряжения.

Интенсивности выведенных пучков ионов оценивались на основе выхода их из ионных источников, разработанных и используемых в ЛЯР ОИЯИ<sup>15/</sup>, с учетом суммарных потерь ионов в процессе ускорения их до конечной энергии /см. таблицу/. При этом давление в вакуумной камере принималось равным  $10^{-6}$  мм рт.ст. Основными являются потери ионов при перезарядке их на тонкой мишени и при захвате ионов в режим ускорения на первой и второй стадиях.

На рис. 8 /кривая 1/ представлена зависимость интенсивностей выведенных пучков ионов от массового числа для циклотрона с тремя зазорами. Для сравнения на том же рисунке приведены аналогичные зависимости для ряда ускорителей тяжелых ионов: У-300<sup>16/</sup>, У-400<sup>17/</sup>, UNILAC<sup>17/</sup>, GANIL<sup>3/</sup>.

Из табл. и рис.8 видно, что двухэтапное ускорение ионов в магнитном поле одного электромагнита с диаметром полюсов 400 см расширяет возможности ускорителя по сравнению с циклотроном прямого действия, имеющего тот же диаметр полюсов, а именно: 1/ увеличивается эффективность использования магнитного потока электромагнита, 2/ диапазон ускоряемых ионов расширяется до  $U$ , 3/ интенсивности пучков ионов в диапазоне Кг-Хе в среднем возрастают ~ в 20 раз.

В заключение авторы выражают благодарность Г.Г.Гульбекяну, А.К.Евдокимову, В.Н.Мельникову за помощь при проведении магнитных измерений и С.Г.Фефиловой за калибровку датчиков Холла, а также В.Т.Степанову и Н.А.Порозову за создание модели магнита.

#### ЛИТЕРАТУРА

1. И.А.Шелаев и др. Препринт ОИЯИ, Р9-5086, Дубна, 1970.
2. Ch.Schmelzer et al. Proc. of the 1970 Proton Linear Acceleration Conference, NAL, Batavia, 1970, p.949.

3. The GANIL study group 91406 Orsay, FRANCE Proc. 7th Int. Conf. on Cyclotrons and their Applications (Birkhauser, Basel, 1975), p. 111-116.
4. G.Horting, Z.Phys., 176, 115, 1963.
5. G.S.Janes, R.H.Levy, H.A.Bethe, B.T.Feld, Phys.Rev., 145, 925, 1966.
6. М.Л.Иовнович, Н.Б.Рубин, В.П.Саранцев. Препринт ОИЯИ, Р9-4257, Дубна, 1969.
7. В.П.Джелепов, В.П.Дмитриевский, Б.И.Замолодчиков, В.В.Кольга. АЭ, 24, 323 /1968/.
8. Н.И.Тарантин. Препринт ОИЯИ, Р9-4555, Дубна, 1969.
9. J.R.J.Bennet. Part.Ac., 3, 43 (1972).
10. B.T.Wright et al. IEEE Trans. on Nucl. Sci., NS-18, 277 (1971).
11. Ю.С.Дерендяев, Б.А.Кленин. Сообщение ОИЯИ, Р11-6579, Дубна, 1972.
12. W.Joho. Proc. 7th Conf. on Cyclotrons and their Applications (Birkhauser, Basel, 1975), p. 209-218.
13. W.Avan Kampen and J.Liedorp. Proc. 7th Int. Conf. on Cyclotrons and their Applications (Birkhauser, Basel, 1975), p. 254-259.
14. В.А.Гладышев и др. АЭ, 18, 3, 268 /1965/.
15. Е.Д.Воробьев, А.С.Пасюк. Препринт ОИЯИ, Р7-5177, Дубна, 1970.
16. Г.Н.Вялов. Природа, №10, 42 /1966/.
17. UNILAC-Projektbericht Nr, 13, GSI-PB-3-74(1974).

Рукопись поступила в издательский отдел  
27 сентября 1976 года.

Редколлегия журнала ЭЧАЯ сообщает, что вышел в свет журнал "Физика элементарных частиц и атомного ядра", том 7, вып. 3. Подписаться на журнал можно в агентствах и отделениях "Союзпечати", в отделениях связи, а также у общественных распространителей.