

СЗУС

В-267

4952/2-76

СООБЩЕНИЯ
ОБЪЕДИНЕННОГО
ИНСТИТУТА
ЯДЕРНЫХ
ИССЛЕДОВАНИЙ

ДУБНА

13/II-76



P9 - 9939

Ч.Вейхерт, П.Гмай, Ю.Дворски, М.Ковальский,
Р.Морозович, Р.Ц.Оганесян, В.Перковски,
П.Радецки, Ю.Сура, С.Хойнацки, В.А.Чугреев,
С.Квятковски

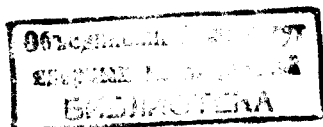
РЕЗУЛЬТАТЫ
ПРЕДВАРИТЕЛЬНОГО ФОРМИРОВАНИЯ
МАГНИТНОГО ПОЛЯ ЦИКЛОТРОНА У-200П
ВАРШАВСКОГО УНИВЕРСИТЕТА

1976

P9 - 9939

Ч.Вейхерт, П.Гмай, Ю.Дворски, М.Ковальский,
Р.Морозович, Р.Ц.Оганесян, В.Перковски,
П.Радецки, Ю.Сура, С.Хойнацки, В.А.Чугреев,
С.Квятковски

**РЕЗУЛЬТАТЫ
ПРЕДВАРИТЕЛЬНОГО ФОРМИРОВАНИЯ
МАГНИТНОГО ПОЛЯ ЦИКЛОТРОНА У-200П
ВАРШАВСКОГО УНИВЕРСИТЕТА**



Введение

Двухметровый изохронный циклотрон У-200П Варшавского университета предназначен для ускорения тяжелых ионов с отношением заряда к атомной массе в пределах $0,2 \leq Z/A \leq 0,5$ при уровнях среднего магнитного поля $16 \leq \bar{B} \leq 22$ кЭ/л/.

Ускоритель создается на базе электромагнита СП-72Л, который был разработан в Лаборатории ядерных реакций с учетом опыта, приобретенного во время строительства и эксплуатации двухметрового изохронного циклотрона У-200 ЛЯР ОИЯИ^{2,3/}. Ряд конструктивных изменений в ярме магнита и сближение основных катушек до 398 мм позволили получить при тех же ампер-витках уровень магнитного поля 21,4 кЭ при токе возбуждения 1300 А. Это позволяет увеличить энергию ионов с 156 до $178 (Z/A)^2$ МэВ/нуклон. Строящаяся новая система питания магнита позволит довести уровень поля до величины 22 кЭ при токе 1500 А и соответственно повысить энергию ионов до $189 (Z/A)^2$ МэВ/нуклон.

В настоящей работе представлены результаты формирования изохронного поля при уровнях от 16,7 до 21,4 кЭ с помощью железных масс.

Конструктивные элементы электромагнита циклотрона У-200П

Общий вид электромагнита СП-72Л циклотрона У-200П дан на рис. 1. Магнитная структура в принципе подобна структуре магнита циклотрона У-200 ЛЯР ОИЯИ. Азимутальная вариация магнитного поля обеспечивается четырьмя парами секторов с прямыми границами и уг-

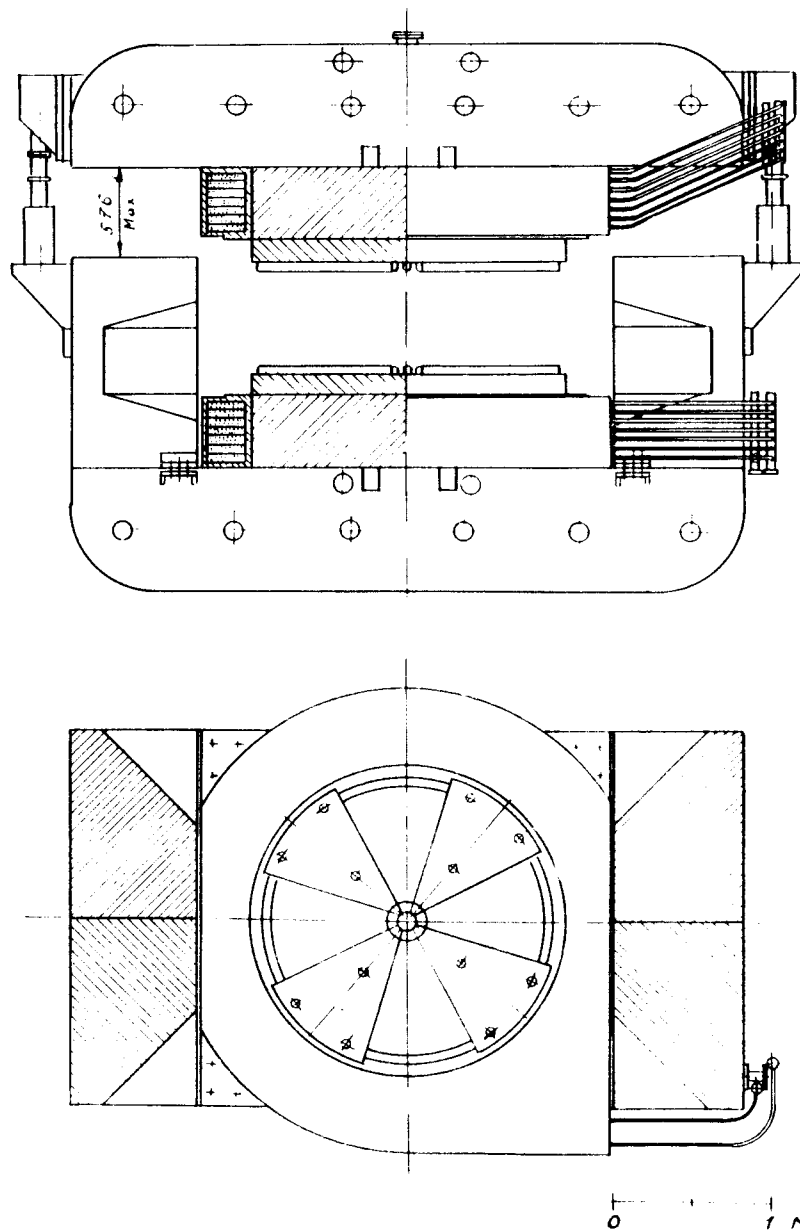


Рис. 1. Общий вид электромагнита СП-72Д циклотрона У-200П. Сверху - вид на магнит с поднятой верхней балкой. Внизу - вид на нижний полюс.

ловой протяженностью 45° . Изохронная форма магнитного поля обеспечивается кольцевыми шиммами и токовыми корректирующими катушками. В отличие от циклотрона У-200 ЛЯР, в ускорителе У-200П кольцевые шиммы размещаются только на секторах и выполняются одновременно с последними. Это позволяет существенно улучшить точность их изготовления. Секторы имеют переменную толщину 41-52 мм, зазор в холме составляет 26-50 мм, в долине - 150 мм. Они подняты над поверхностью дисков на 9 мм, и в полученном зазоре размещаются токовые корректирующие катушки /рис. 2/. Крепление сектора к дискам осуществляется тремя болтами М20.

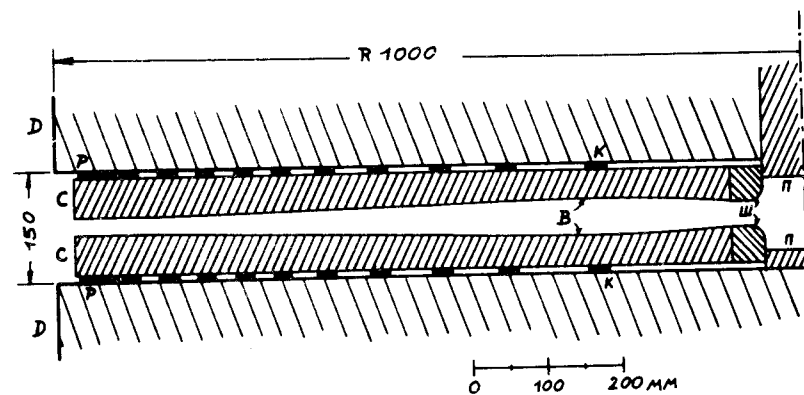


Рис. 2. Основные элементы магнитной структуры. Д - диски, С - секторы магнита с профильными поверхностями В /кольцевыми шиммами/, К - 10 пар корректирующих катушек по 3 витка, Р - внешние кольцевые шиммы, Ш - центральные шиммы, П - центральные вкладыши.

Зазор между сектором и диском выдерживается с точностью $\pm 0,05$ мм при помощи калиброванных проставок. Диски устанавливаются на поверхность полюсов с точностью $\pm 0,03$ мм. Секторы начинаются с радиуса 10 см и оканчиваются на радиусе 97,5 см. Продолжение секторов к центру от радиуса 10 до 5,5 см выполнено в виде отдельного съемного элемента и вместе с центральными вкладышами составляет центральный шимм магнита.

Зазор в долинах выдерживается с точностью $\pm 0,03$ мм. Его юстировка производится путем подбора калиброванных прокладок между дисками и полюсами на крепежных болтах в зазоре ~ 1 мм. Подбор прокладок производится после точных механических измерений при включенном поле для учета эффекта "дышания" магнита, который приводит к разнице в зазоре при включенном и выключенном состояниях $0,61$ мм.

Принцип формирования изохронного поля

Задача формирования магнитного поля циклотрона заключается в создании поля, обеспечивающего устойчивость движения ионов в вертикальном и радиальном направлениях и изохронности на протяжении ускорения для ионов с $Z/A = 0,25$; требуется практически с помощью железных масс получить при уровне $20,3$ кЭ поле, соответствующее изохронному ускорению ионов с $E < 10$ МэВ/нуклон.

При формировании поля У-200П ставилась задача получения при уровне $20,3$ кЭ изохронного поля для ионов с $Z/A = 0,25$ с конечной энергией $E < 10$ МэВ/нукл. практически с помощью только железных масс.

После предварительных измерений было решено добиваться изохронного распределения среднего поля путем профилирования поверхностей секторов /кольцевые шиммы/ таким образом, чтобы во всем диапазоне уровней поля $16-22$ кЭ токи в корректирующих катушках были минимальными при ускорении всех частиц заданного диапазона $0,2 \leq Z/A \leq 0,5$, учитывая, что система токовой коррекции /А/ на 50% мощнее. Исходный профиль был выполнен в виде 9 ступенек высотой от $0,5$ до $1,5$ мм. При этом были измерены распределения среднего поля на 12 уровнях при токах возбуждения от 500 до 1300 А. На основании результатов обработки измерений рассчитывались поправки на изменение профиля поверхностей секторов. Расчет поправок проводился по полуэмпирическим формулам, полученным в предположении ло-

кальности изменения поля, вызванного данным количеством железа. Для механической обработки принималась величина на 25% меньше расчетной. Механическая обработка секторов, установленных на дисках, выполнялась на карусельном станке.

После трехкратного повторения цикла измерение - расчеты - обработка был получен профиль поверхностей, состоящий из 70 ступенек /кольцевых шимм/ величиной от $0,1$ до $0,3$ мм, изготовленных с точностью $\pm 0,01$ мм, который удовлетворял условиям поставленной задачи. Кроме формирования поверхностей, отдельно обрабатывались центральные шиммы и внешние кольцевые шиммы.

В итоге обработки железных масс были получены результаты, представленные на нижеследующих рисунках. Прежде чем к ним перейти, следует несколько слов сказать о методике измерений и измерительной аппаратуре.

Измерительная аппаратура и методика измерений

При формировании магнитного поля ставилась задача получения нужной конфигурации при уровне $20,3$ кЭ с помощью только железных масс. В этом случае среднее поле должно быть выполнено с высокой точностью. Так как приближение к нужному распределению осуществляется путем измерений и последующей коррекции поля, то объем магнитных измерений довольно высок. Поэтому необходимо использование точной и быстродействующей методики измерения.

Измерение магнитного поля осуществляется датчиком Холла типа Х510. Датчик размером $2 \times 2 \times 0,3$ мм³ изготовлен из арсенида индия и обладает чувствительностью 133 мВ/А Э, температурным коэффициентом $0,04\%$ /°С. Через слюдяную подложку толщиной $0,05$ мм датчик прикреплен в желобе медной пластинки теплопроводящим клеем. В пластинке высверлены два отверстия, в которых вклеены термистор и нагреватель. Термистор и нагреватель включены в схему стабилизации темпе-

ратуры. Форма медной пластинки и расположение в ней датчика Холла, термистора и нагревателя подбирались с точки зрения получения однородного распределения температуры. Вся пластинка помещается во второй термостат, который также работает по принципу нагревания. В итоге, двойное термостатирование обеспечивает температуру датчика Холла $t = 39^\circ\text{C}$ с точностью не хуже $\pm 0,023^\circ\text{C}$ при изменении внешней температуры в пределах $+17 \div 27^\circ\text{C}$. Датчик питается стабилизированным током, заниженным до величины $18,960 \text{ мА}$ со степенью стабилизации не хуже $5 \cdot 10^{-5}$. При этом чувствительность датчика равна $\sim 3,3 \text{ мкВ/Э}$. Все электронные схемы датчика выполнены на интегральных схемах.

Измерение ЭДС Холла производится шестизначным цифровым вольтметром типа А210 фирмы Solartron - Schlumberger чувствительностью 1 мкВ на шкале 100 мВ . Градуировка датчика производилась по ядерному магнитометру на стенде магнитных измерений в диапазоне полей $6 \div 25 \text{ кЭ}$. Зависимость магнитного поля B от ЭДС Холла E_x в пределах точности измерений ядерного магнитометра представлялась в виде

$$B = 1,5539 + 0,29143 \cdot E_x - 2,3007 \cdot 10^{-4} \cdot E_x^2,$$

где B - в кЭ, а E_x - в мВ.

Датчик размещался на штанге измерительного устройства У-200 ЛЯР^{5/}, работающего по схеме старт-стоп. Для механической юстировки датчика были установлены конусные полюса в долине. Сильно неоднородное поле этих полюсов позволило получить пространственное разрешение в установке датчика не хуже чем $\pm 0,1 \text{ мм}$ по всем координатам. Эту точность обеспечивает также механический привод датчика.

Цифровой вольтметр срабатывает после остановки датчика в точке. Его показания через переходное устройство типа А295 выводятся на перфоленту с помощью ждущего перфоратора FACIT 4070. Перфолента используется для непосредственной обработки данных на ЭВМ "Минск-22", а также для дальнейшей обработки на ЭВМ CDC 6200.

Результирующая точность измерений, оцениваемая по точностям отдельных элементов измерительного канала, не хуже $1,4 \cdot 10^{-4}$, а действительная повторяемость результатов в каждой точке не превышала 1 Э.

Результаты формирования магнитного поля

Общие результаты предварительного формирования магнитного поля представлены на рисунках. На рис. 3 показаны некоторые измеренные распределения поля в функции квадрата радиуса при токах возбуждения от 500 до 1300 А. Как видно, при изменении тока в катушках возбуждения электромагнита изменение поля в центре и на краю различно. Последнее обстоятельство дает возможность ускорять ионы в широком диапазоне Z/A и энергий при небольшой мощности корректирующих катушек. Так, ионы с $Z/A \leq 0,25$ будут ускоряться при высоком уровне магнитного поля до энергий $E \leq 10 \text{ МэВ/нуклон}$ /флаттер составляет 0,05/, а ионы с $Z/A = 0,5$ могут быть ускорены до энергий 30 МэВ/нукл. при поле 18 кЭ , где величина флаттера составляет 0,1. Это следует из рис. 4, где представлена зависимость флаттера магнитного поля от радиуса при различных уровнях возбуждения. Распределение среднего магнитного поля по радиусу для уровня $20,3 \text{ кЭ}$ представлено на рис. 5. Как следует из рисунка, рабочее поле отличается от изохронного в основной области ускорения на величину, не большую $\pm 20 \text{ Э}$. В центральной области и в районе конечного радиуса рабочее поле отличается примерно на 100 Э , что потребует дополнительного шиммирования и коррекции при окончательном варианте профиля магнитного поля. На рис. 6 представлена зависимость уровня поля B_0 в функции тока возбуждения /кривая А/, экстраполированная до тока 1500 А, т.е. до тока, который обеспечит новая система питания /для сравнения на том же рисунке показана кривая намагничивания магнита без секторов, т.е. при зазоре 150 мм - кривая В/. На рис. 7 показана зависимость максимального флаттера /на радиусе 86 см и на конечном радиусе/ в функции тока возбуждения.

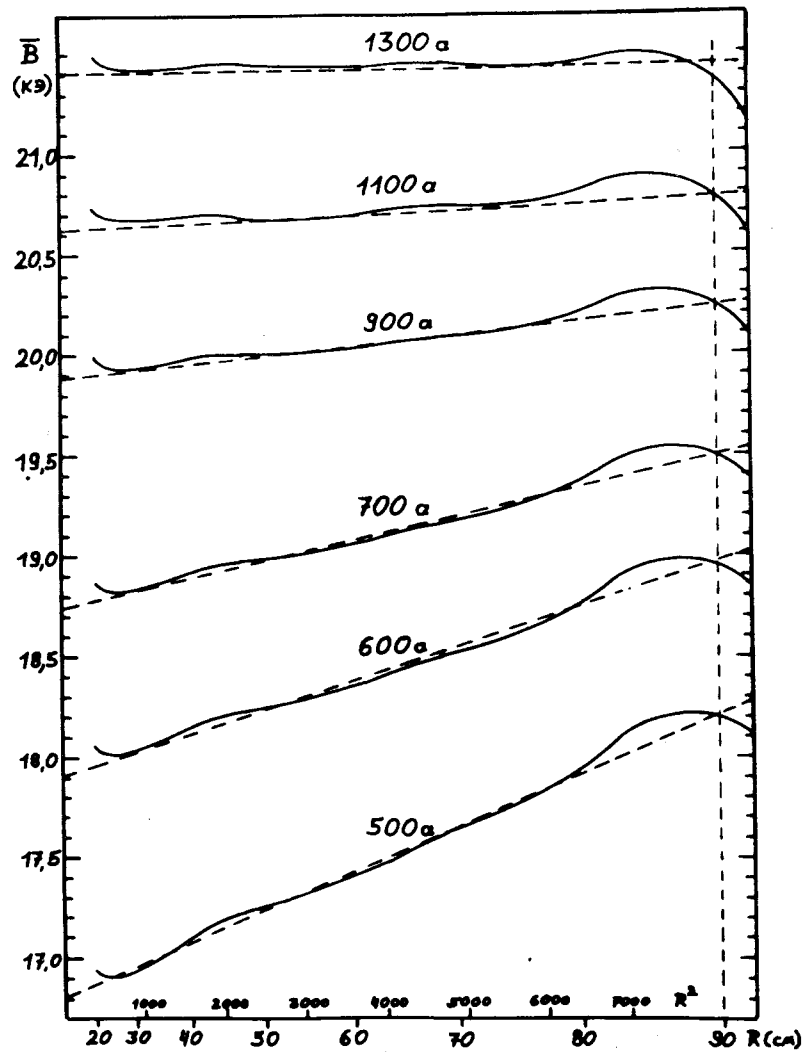


Рис. 3. Зависимость среднего поля от радиуса при различных уровнях возбуждения магнита. Сплошная кривая - измеренное поле, пунктирная кривая - расчетное изохронное поле.

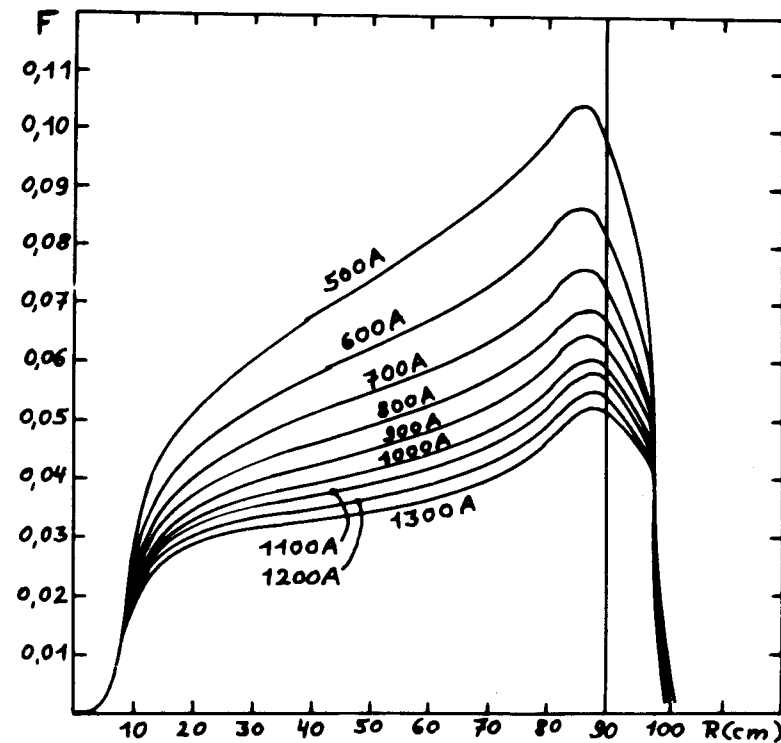


Рис. 4. Экспериментальная зависимость флаттера от радиуса при различных уровнях возбуждения магнита.

На основании полученных экспериментальных результатов по формированию магнитного поля построена диаграмма /рис. 8/, на которой изображена энергия ионов с различными значениями Z/A и частота обращения этих ионов в выбранном диапазоне рабочих уровней среднего магнитного поля /16-22 кЭ на конечном радиусе 90 см/. Ионы основного диапазона ускоряются на второй гармонике, для вспомогательного диапазона выбран режим ускорения на первой и третьей гармониках. Основные параметры ионов, которые будут ускоряться на циклотроне У-200 П, представлены в таблице. На диаграмме линии v_z ($v_z = 0,14$ и $v_z = 0$) соответствуют граничным условиям, связанным с вертикальной устой-

ТАБЛИЦА I

Z/A	Ион	Мэв/нуклон		Полная энергия иона Мэв	
		мин.	макс.	мин.	макс.
0,148	$^{27}\text{Al}^{+4}$	2,8	4,1	75	112
0,167	$^{24}\text{Mg}^{+4}$	2,8	5,3	67	126
0,193	$^{31}\text{P}^{+6}$	3,7	7,1	116	219
0,2	$^{35}\text{Cl}^{+7}$	4,0	7,5	140	265
	$^{40}\text{Ar}^{+8}$	4,0	7,6	160	302
0,210	$^{19}\text{F}^{+4}$	4,4	8,4	84	159
0,214	$^{14}\text{N}^{+3}$	4,6	8,7	64	122
	$^{14}\text{C}^{+3}$	4,6	8,7	64	122
	$^{28}\text{Si}^{+6}$	4,6	8,7	129	243
0,219	$^{32}\text{S}^{+7}$	4,8	9,0	153	290
0,222	$^{27}\text{Al}^{+6}$	4,9	9,3	133	252
0,227	$^{22}\text{Ne}^{+5}$	5,2	9,8	114	215
0,25	D_2^+	6,2	11,7	12	23 (d)
	$^4\text{He}^+$	6,2	11,7	25	47 (α)
	$^{12}\text{C}^{+3}$	6,2	11,7	75	140
	$^{16}\text{O}^{+4}$	6,2	11,7	100	187
	$^{20}\text{Ne}^{+5}$	6,2	11,7	125	234
	$^{24}\text{Mg}^{+6}$	6,2	11,7	150	281
0,273	$^{11}\text{B}^{+3}$	7,4	13,5	82	149
0,286	$^7\text{Li}^{+2}$	8,2	14,5	57	102
	$^{14}\text{N}^{+4}$	8,2	14,5	114	204
	$^{14}\text{C}^{+4}$	8,2	14,5	114	204
0,312	$^{16}\text{O}^{+5}$	9,8	16,3	156	260
0,333	$^{12}\text{C}^{+4}$	11,1	18,0	133	216
	$^9\text{Be}^{+3}$	11,1	18,0	100	162
	$^3\text{He}^+$	11,1	18,0	33	54
0,384	$^{11}\text{B}^{+4}$	13,2	19,1	145	210
0,5	H_2^+	25	30,5	25	30,5 (p)
	D_I^+	25	30,5	50	61 (d)

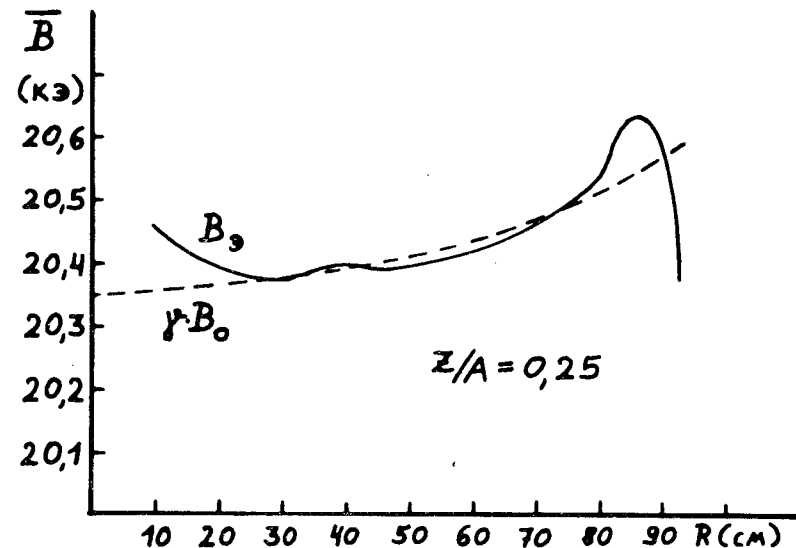


Рис. 5. Экспериментальное распределение среднего поля $B_э$ без корректирующих катушек и расчетное изохронное поле для частиц $cZ/A = 0,25$.

чивостью ионов. Вертикальные пунктирные линии определяют область максимальных энергий ионов, ограниченную диапазоном частот резонансной системы циклотрона $\omega/f = 12,3 \div 21,4$ МГц/.

Заключение

В результате проделанной работы сформировано с помощью только железных масс магнитное поле при уровне в центре 20,3 кЭ, отличающееся от изохронного в основной области ускорения на величину, не большую ± 20 Э. Для получения необходимой конфигурации полей во всем заданном диапазоне уровней возбуждения /16-22 кЭ/ будет использоваться система токовых корректирующих катушек; тогда магнитная структура обеспечит устойчивое и изохронное ускорение ионов с отношением $0,2 \leq Z/A \leq 0,5$ до максимальной энергии $189(Z/A)^2$.

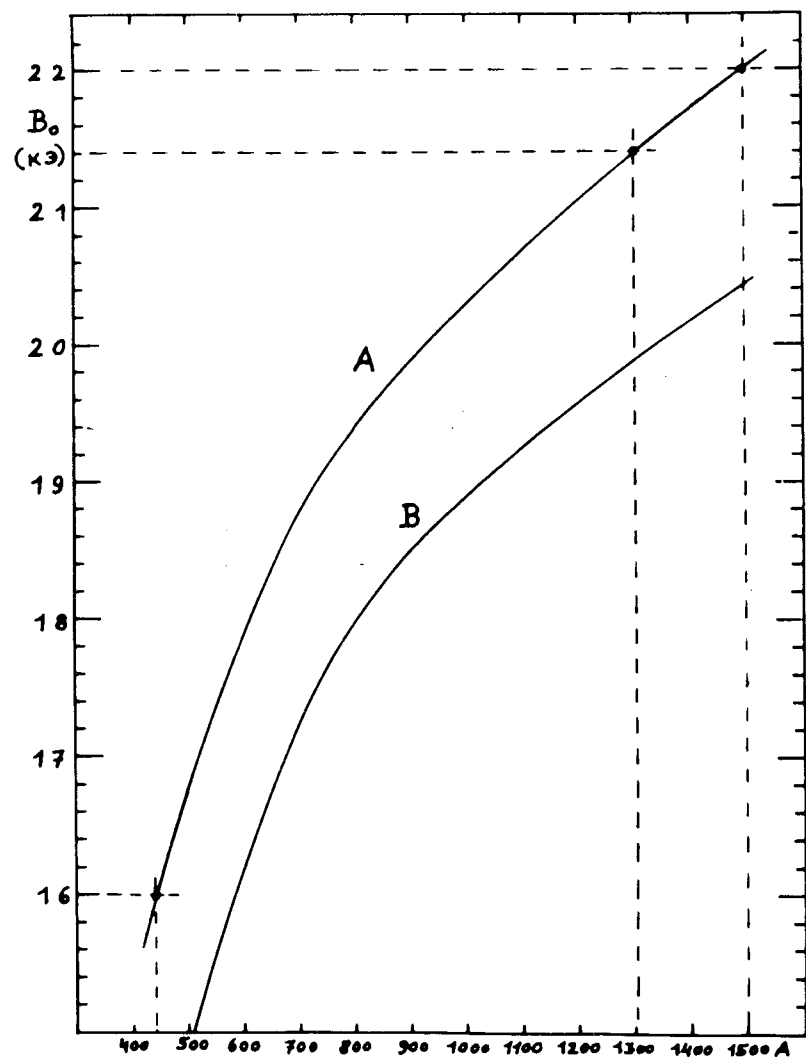


Рис. 6. Кривые намагничивания электромагнита СП-72Л. Кривая А - зависимость уровня поля B_0 в центре /с установленными секторами/ от тока возбуждения. В - без секторов.

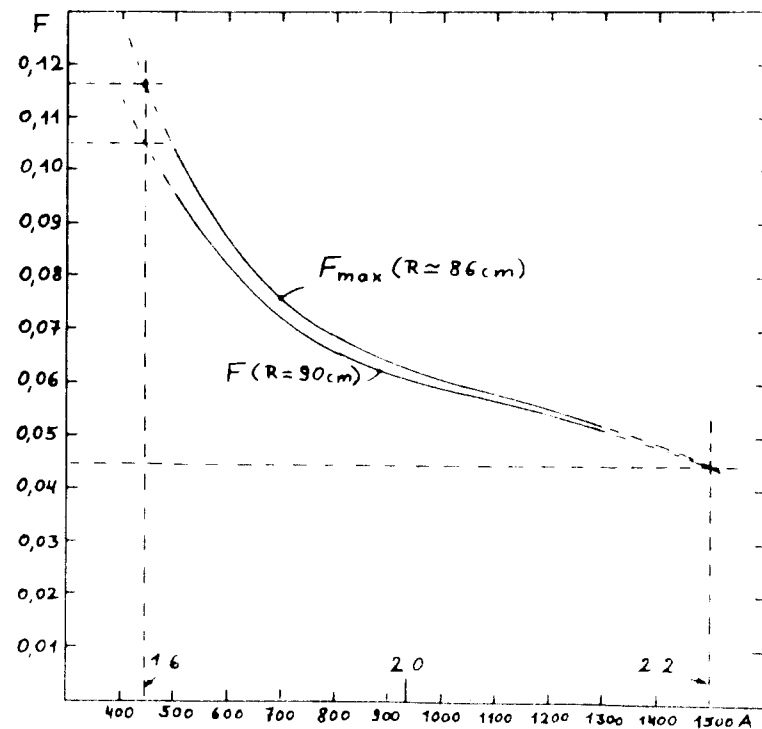


Рис. 7. Зависимость флаттера на радиусах 86 и 90 см от уровня возбуждения магнита.

Авторы выражают искреннюю благодарность академику Г.Н.Флерову за постоянный, стимулирующий интерес к работе, С.Г.Фефиловой за помощь при проведении магнитных измерений, И.В.Колесову, В.Н.Покровскому за помощь в организации механических работ, К.И.Семинову за подготовку системы стабилизации тока.

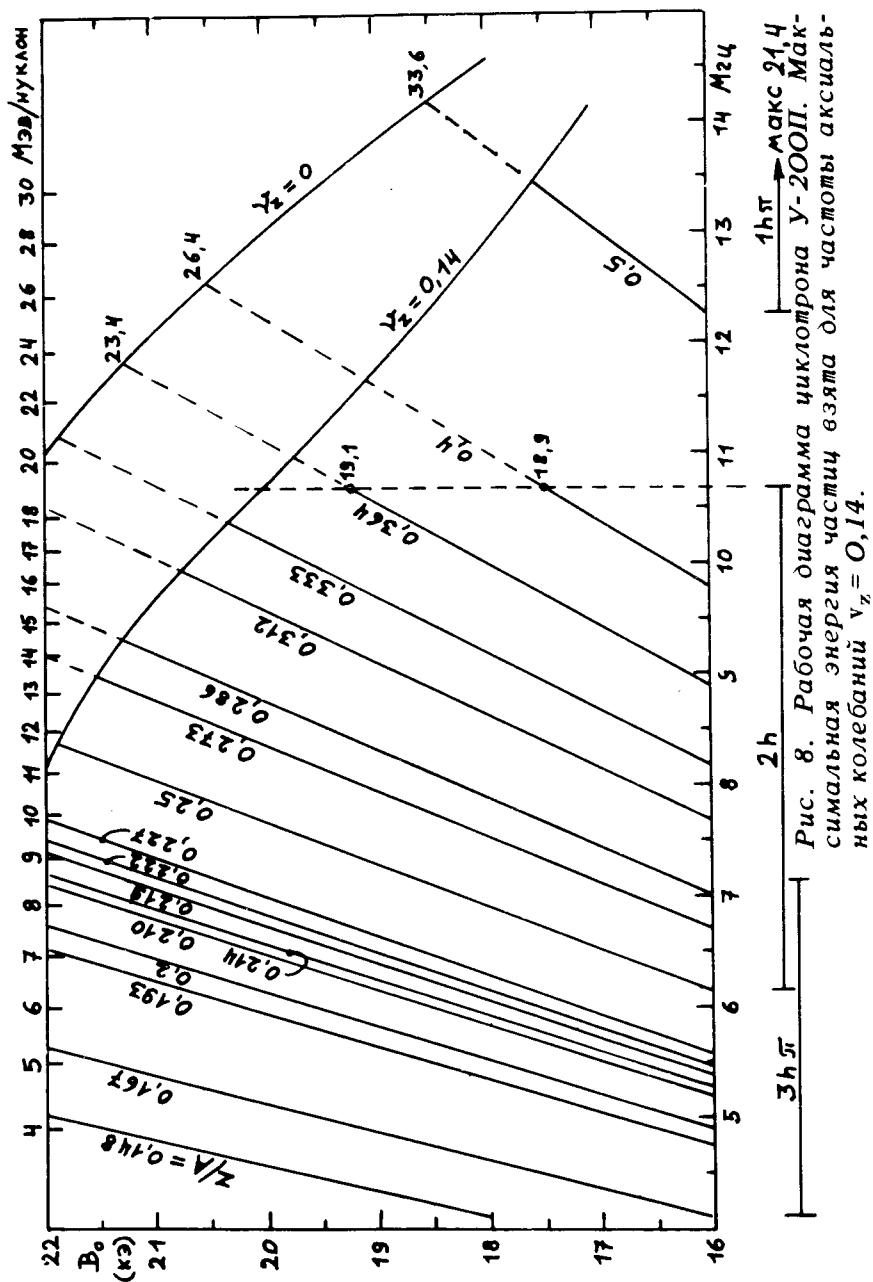


Рис. 8. Рабочая диаграмма циклотрона у-200П. Максимальная энергия частиц взята для частоты аксиальных колебаний $\nu_z = 0,14$.

Литература

1. S. Chojnacki. 7th Int. Conf. on Cyclotrons and their Applications, Zurich, August, 1975.
2. И.А.Шелаев, С.И.Козлов, Р.Ц.Оганесян, Ю.Ц.Оганесян, В.А.Чугреев. Препринт ОИЯИ, 9-3988, Дубна, 1968.
3. И.А.Шелаев, С.И.Козлов, Р.Ц.Оганесян, С.Г.Фефилова. Препринт ОИЯИ, Р9-4233, Дубна, 1968.
4. И.А.Шелаев, А.И.Иваненко, С.И.Козлов, Р.Ц.Оганесян, В.А.Чугреев. Препринт ОИЯИ, Р9-5047, Дубна, 1970.
5. Э.Г.Имаев, С.И.Козлов, Р.Ц.Оганесян, С.Г.Фефилова, И.А.Шелаев, Л.П.Челноков. Препринт ОИЯИ, 9-3713, Дубна, 1968.

Рукопись поступила в издательский отдел
5 июля 1976 года.