

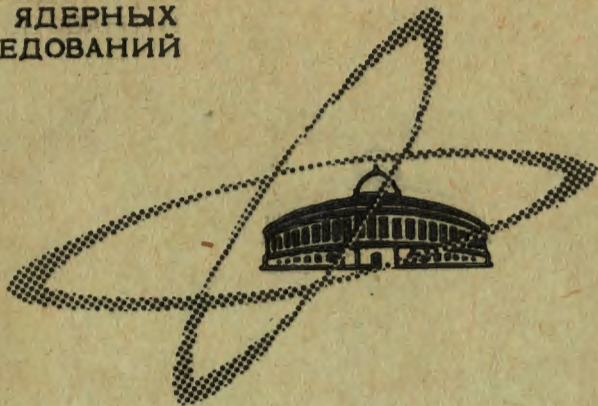
Ш-42

23/8-68

ОБЪЕДИНЕННЫЙ
ИНСТИТУТ
ЯДЕРНЫХ
ИССЛЕДОВАНИЙ

Дубна

9 - 3988



И.А.Шелаев, С.И.Козлов, Р.Ц.Оганесян,
Ю.Ц.Оганесян, В.А.Чугреев

ДВУХМЕТРОВЫЙ ИЗОХРОННЫЙ ЦИКЛОТРОН
ТЯЖЕЛЫХ ИОНОВ ОИЯИ

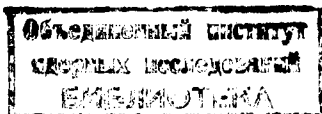
ЛАБОРАТОРИЯ ЯДЕРНЫХ РЕАКЦИЙ

1968

9 - 3988

И.А.Шелаев, С.И.Козлов, Р.Ц.Оганесян,
Ю.Ц.Оганесян, В.А.Чугреев

ДВУХМЕТРОВЫЙ ИЗОХРОННЫЙ ЦИКЛОТРОН
ТЯЖЕЛЫХ ИОНОВ ОИЯИ



7524/2 up.

В В Е Д Е Н И Е

Изучение реакций между сложными ядрами, возникающими под действием ускоренных тяжелых ионов, открывает широкие возможности для экспериментальных исследований во многих областях ядерной физики. Это направление в настоящее время интенсивно развивается в разных странах мира. Большой интерес, проявляемый к взаимодействию ядер с тяжелыми ионами, связан с рядом специфических возможностей, которые они обеспечивают для изучения ядернофизических процессов.

Для успешного проведения физических исследований необходимо, чтобы пучки ускоренных тяжелых ионов удовлетворяли следующим основным требованиям:

1. Высокий кулоновский барьер для тяжелой частицы требует ускорения ионов до сравнительно больших энергий.
2. Малый выход в ряде реакций с тяжелыми ионами (например, в опытах по получению трансурановых элементов) требует существенных интенсивностей пучков.

Существующие в Лаборатории ядерных реакций 310-сантиметровый и 150-сантиметровый циклотроны предназначены для ускорения ионов в диапазоне $2,8 \leq \frac{A}{Z} \leq 7$, и частица ${}_{40}^{+7}\text{Ar}$ является предельной с точки зрения, получения необходимой энергии и интенсивности. Ускорение ионов с еще большим значением $\frac{A}{Z}$ требует модернизации имеющихся ускорителей, и первым этапом на этом пути является реконструкция 150-сантиметрового циклотрона.

150-сантиметровый ускоритель тяжелых ионов ОИЯИ представляет собой специально перестроенный для работы в режиме ускорения тяжелых ионов стандартный полутораметровый циклотрон, выпускаемый отечественной промышленностью /1/.

Первоначальный проект реконструкции циклотрона У-150 предполагал перевод классического циклотрона в изохронный режим ускорения с одновременным увеличением диаметра полюсных наконечников до 200 см (У-200-1). Это дало бы возможность повысить энергию и интенсивность пучков ускоряемых ионов, а также значительно расширить их ассортимент. Кроме того, в ходе реконструкции должны были быть принципиально решены проблемы, связанные с предполагаемой реконструкцией 310-сантиметрового циклотрона ОИЯИ, так как У-150 можно считать его моделью в масштабе 1:2.

Критический анализ первоначального проекта привел к пересмотру всего проекта в целом. Основной целью второго варианта реконструкции явилась задача получения максимальной энергии ускоряемых ионов с использованием электромагнита циклотрона У-150 путем значительного увеличения уровня магнитного поля. При этом ставился ряд условий экономического и технического характера, а именно:

1. Основные катушки возбуждения циклотрона У-150 сохраняются.
2. Ядро электромагнита остается прежним (допускаются минимальные переделки).
3. Обязательно используются вакуумная камера и ряд других узлов, изготовленных по первоначальному проекту реконструкции.

Предварительные расчеты показали, что при среднем воздушном зазоре 10 см можно получить поле порядка 20 кэ. Это означает, что энергия ионов может быть увеличена почти на 50% по сравнению с первоначальным проектом. При таком малом зазоре дуанты могут быть расположены только в долинах подобно тому, как это сделано на цик-

лотроне в Лос-Анжелосе /2/. Основные параметры циклотрона У-150, а также У-200-I и У-200-II приведены в табл. 1.

Таблица 1

Основные параметры	У-150	У-200-I	У-200-II
1. Диаметр полюсного наконечника, в см	150	200	200
2. Конечный радиус ускорения, в см	67	90	90
3. Среднее значение магнитного поля (в центре), в кэ	17,5	18,7	20
4. Средний воздушный зазор, в см	18	18,3	10
5. Максимальный воздушный зазор (в долине), в см	-	23,7	15
6. Минимальный воздушный зазор (в холме), в см	-	15,3	6
7. Число секторов	-	3	4
8. Диапазон ускоряемых ионов	$2,8 \leq \frac{A}{Z} \leq 3,2$	$3 \leq \frac{A}{Z} \leq 4,5$	$2,8 \leq \frac{A}{Z} \leq 4,2$
9. Энергия ускоряемых ионов, в Мэв/нуклон	6+8	5+12	15+20
10. Диапазон частот в.ч. генератора, в Мгц	7,5+15	5,6-8,5	14,2+21,4
11. Число дуантов	2	1	2
12. Напряжение на дуанте, в кэ	100	100	75

МАГНИТНОЕ ПОЛЕ

Электромагнит циклотрона

Очевидно, что получение высокого среднего значения поля ($H = 20$ кэ) в циклотроне У-200 при сохранении основных катушек и тока

возбуждения возможно путем значительного уменьшения величины воздушного зазора. Как показали расчеты, эта величина поля может быть получена для среднего воздушного зазора около 100 мм с некоторыми изменениями в ярме электромагнита.

Электромагнит СП-72А, на базе которого выполнен циклотрон У-150, имеет сечение ярма, равное $S_{я} = 1,68 \text{ м}^2$ (без учета зазоров между листами, которые составляют 1+2%). Это дает для отношения

$\frac{2S_{я}}{S_n}$ значение 1,87, где S_n - сечение 150-сантиметрового полюсного наконечника. При этом ампер-витки ярма составляют 10+15% от суммарных ампер-витков (для различных значений магнитного поля в зазоре). При сохранении прежней величины сечения ярма в случае У-200 невозможно получение нужного поля, так как отношение $\frac{2S_{я}}{S_n}$ уменьшается до величины 1,07, ампер-витки ярма составляют значительную часть от суммарных (около 50%). Поэтому было принято решение увеличить сечение ярма на $0,21 \text{ м}^2$, что дает для отношения $\frac{2S_{я}}{S_n}$ значение, равное 1,21. При этом поле должно увеличиться на 800 э.

Во внутреннем скле электромагнита (рис.1) было установлено дополнительно около 8 тонн железа. Экспериментальная проверка показала, что увеличение поля составляет 700 э, что согласуется с данными, полученными расчетным путем, в пределах 20%. Дальнейшее увеличение необходимого уровня поля может быть достигнуто путем уменьшения зазора между основными катушками возбуждения, т.е. их сближением. Это снижает рассеяние магнитного потока и увеличивает вклад собственного поля катушек. Кривые намагничивания для различных расстояний между катушками приведены на рис.2.

Выбор параметров магнитной структуры

Известно, что квадрат частоты вертикальных бетатронных колебаний можно записать в виде

$$\nu_z^2 = -k + F(1 + 2\gamma^2), \quad (1)$$

где F — глубина вариации (флаттер) магнитного поля, равный

$$F = \frac{\bar{H}^2}{H^2} - 1,$$

γ — угол спиральности сектора, k — индекс среднего по азимуту магнитного поля

$$k = -\frac{r}{H} \frac{\partial \bar{H}}{\partial r} = \frac{2 \frac{E}{E_0}}{1 - 2 \frac{E}{E_0}}. \quad (2)$$

Здесь E — кинетическая энергия иона, E_0 — энергия покоя. Если выбрать магнитное поле равным 20 кэ и конечный радиус ускорения $R_k = 90$ см, то для иона ${}_{14}^{+5}\text{N}$ с $\frac{A}{Z} = 2,8$ конечная энергия на нуклон составит 20 Мэв. Это дает для индекса среднего поля значение

$$k \leq 0,045 \left(\frac{r}{90} \right)^2. \quad (3)$$

Для циклотрона У-200 выбрана магнитная структура с прямыми границами секторов, т.е. в формуле (1) можно считать $\gamma = 0$. Прямая граница секторов выбрана потому, что в этом случае наиболее просто решается задача разборки машины. Обычно вертикальная фокусировка является удовлетворительной, если $\nu_z^2 \geq 0,01$. Если выбрать $\nu_z^2 = 0,015$, то с учетом (3) получаем для флаттера значение $F = 0,06$. Как показали эксперименты, проведенные на стенде магнитных измерений, чтобы обеспечить эту величину флаттера при среднем воздушном зазоре $\delta = 100$ мм,

необходимо выбрать зазоры в холме $\delta = 60$ мм и в долине $\delta = 150$ мм.

Для установки железных кольцевых шимм и корректирующих катушек между секторами и крышкой вакуумной камеры оставлен зазор 2×14 мм.

Окончательный вариант магнитного зазора приведен на рис.3.

Измерение магнитного поля

В изохронном циклотроне создание нужной топографии магнитного поля является сложной и трудоемкой задачей, так как для определения параметров пучка необходимо знать значение магнитного поля в очень большом ($\approx 10^3$ и более для одного уровня поля) чисел точек медианной плоскости с высокой точностью ($\approx 10^{-4}$). Так как единственным методом шиммирования является метод последовательного приближения к нужному закону распределения магнитного поля путем многократного измерения и последующей коррекции, то автоматизация процесса измерения, а также быстрая математическая обработка данных с применением ЭВМ приобретает важное значение.

Как показано в [3], если измерять магнитное поле через 2 см в радиальном направлении (50 точек) и через $1^{\circ},875$ по азимуту (48 точек на одном элементе периодичности), то для знания формы поля на одном уровне возбуждения требуется измерить поле в $4 \times 50 \times 48 = 9600$ точках.

Схема методики измерения магнитного поля приведена на рис.4. Как только датчик Холла, движущийся в азимутальном направлении, попадает в точку, где должно быть измерено поле, в цепи фотодиода вырабатывается запускающий импульс. Последний запускает цифровой вольтметр и цифровое печатающее устройство, разработанное на базе телеграфного аппарата СТА-2М. Показания цифрового вольтметра (значение

ЭДС Холла) выводятся на перфоленту и одновременно печатаются на телеграфную ленту для визуального контроля. Перфолента используется для ввода данных магнитных измерений непосредственно в ЭВМ типа "Минск".

Эта методика позволяет при скорости 2,5 сек на точку измерять поле с максимальной ошибкой в любой азимутальной точке ± 5 э, а в точках наибольшего градиента поля ± 20 э и в определении среднего поля ± 1 э.

Формирование магнитного поля

Зависимость магнитного поля от радиуса в изохронном циклотроне можно представить в виде

$$H_{\text{из}}(r) = H_0 \frac{1 + \sigma(r)}{\sqrt{1 - \frac{r^2}{r_\infty^2} [1 + \sigma(r)]^2}}, \quad (4)$$

где H_0 - поле в центре,

$$r_\infty = \frac{A E_0}{Z e H_0 c}.$$

Если функция $\sigma(r)$ подобрана правильно, то (4) есть совершенно точное выражение для изохронного поля. Используя приближенное выражение для $\sigma(r)$

$$\sigma(r) = \frac{1}{(1-k)(N^2-1)} \left(F + \frac{r}{2} \frac{dF}{dr} \right), \quad (5)$$

можно получить $H_{\text{из}}(r)$ с точностью лучшей чем $2 \cdot 10^{-4}$.

Формирование поля в изохронном циклотроне распадается на две относительно самостоятельные задачи - формирование среднего поля $H_{\text{из}}(r)$ и глубины вариации (флаттера) $F(r)$. При формировании сред-

него поля циклотрона У-200 основные ошибки в поле корректировались подбором кольцевых шимм (для центра $R = 0+10$ см и края $-R = 60+90$ см). После того, как отличие среднего поля от изохронного было уменьшено до величины порядка $100+200$ э, дальнейшая коррекция формы поля производилась по методике, разработанной в Оксфордской национальной лаборатории ^{/4/}. Допуская, что при изменении угловой протяженности сектора в небольших пределах уровень магнитного поля в холме и долине остается постоянным, можно произвести оценку изменения величин среднего поля и флаттера. Следует отметить, что изменение азимутальной протяженности сектора производилось путем искривления только одной его границы. Изменение величины среднего магнитного поля ΔH на заданном радиусе R в зависимости от линейного размера края сектора X в направлении θ можно представить в виде

$$X = \frac{\pi}{2} R \frac{\Delta H}{H_{\max} - H_{\min}}, \quad (6)$$

где H_{\max} , H_{\min} — магнитное поле в холме и долине соответственно.

Указанная методика позволяет достаточно успешно формировать среднее магнитное поле, изменяя угловую протяженность сектора, так как распределение поля по азимуту близко к трапеции.

Формирование изохронной зависимости в центральной части осуществлялось экспериментально путем набора колец различного диаметра и толщины.

Результаты формирования магнитного поля

На рис.5 и 6 представлены результаты формирования среднего поля и флаттера для различных уровней возбуждения магнита. Там же указаны изохронные зависимости, рассчитанные по формуле (4).

Как следует из рис.6, флаттер поля резко увеличивается с радиусом, достигая на радиусе $R = 24$ см максимального значения, равного 0,065, а затем спадая до значения 0,05 на конечном радиусе.

Среднее магнитное поле, сформированное с помощью железных масс, отличается от изохронного не более чем на $3\text{с} + 40$ э во всем диапазоне радиусов. Небольшой спад поля на начальных радиусах обеспечивает дополнительную вертикальную фокусировку при отрицательном значении $\frac{dH}{dr}$ в той области, где величина флаттера слишком незначительна для обеспечения достаточной фокусировки. Интересно отметить, что благодаря различной скорости возрастания поля с ростом тока в центре циклотрона и на краю, можно получить поле, близкое к изохронному, для ионов с различной энергией, причем поле в центре меняется незначительно. Следует отметить, что приведенные отличия рабочего поля от изохронного, равные $30 + 40$ э, уменьшатся, когда будут установлены кольцевые корректирующие катушки.

На рис.7 даны кривые азимутального распределения поля на элементе периодичности для нескольких радиусов. Кривые свидетельствуют о резком увеличении флаттера с радиусом. Каждый график начинается из центра холма. Видно, что поле в холме достигает значения, равного 26 кэ.

На рис.8 приведены амплитуды гармоник поля. Основной гармоникой является четвертая. Ее амплитуда достигает значения 6700 э на радиусе, равном 24 см. Так как распределение поля по азимуту близко к трапециoidalному, то следующей наибольшей гармоникой является двенадцатая. Ее амплитуда достигает значения 2200 э в районе конечного радиуса. Восьмая гармоника, имеющая на начальных радиусах амплитуду, равную 1900 э, уменьшается до значения 500 э на конечном радиусе.

В идеальном случае фурье-разложение магнитного поля содержит гармоники, кратные четвертой.

Однако ошибки в установке секторов и различная проницаемость железа в различных секторах приводят к появлению низших гармоник азимутальных возмущений поля. Наиболее опасной является первая гармоника, которая вызывает движение центра орбиты. Ее амплитуда и фаза указаны на рис.9.

Результаты формирования магнитного поля явились основанием для следующих выводов:

1. Очевидна экономичность данной магнитной структуры как по мощности питания магнита, так и по его весу в связи с малыми воздушными зазорами, а также ее компактность.

2. Малая относительная протяженность полей рассеяния магнита благоприятна для вывода частиц из ускорительной камеры.

3. Путем изменения угловой протяженности сектора и установкой кольцевых шимм определенных диаметров и толщин можно получить изохронный закон изменения среднего поля по радиусу для фиксированного уровня возбуждения магнита.

Корректирующие катушки

На циклотроне У-200 предполагается провести большую работу по выбору типа и числа корректирующих обмоток, имея в виду их применение в основном при реконструкции 310-сантиметрового циклотрона. Как было отмечено выше, в настоящее время магнитное поле сформировано только за счет железных масс и работа будет производиться при фиксированном уровне возбуждения магнита.

Следует отметить, что при выборе корректирующих катушек нужно учесть специфические особенности циклотрона многозарядных ионов. В отличие от протонных циклотронов в случае ускорения многозарядных ионов энергию иона данного элемента можно изменить, ускоряя на том

же поле данный элемент с другой зарядностью. Этот способ дает дискретное изменение энергии на величину

$$\frac{\Delta E}{E} = 2 \frac{\Delta Z}{Z}, \quad (7)$$

которая тем меньше, чем выше заряд иона. Если заряд меняется на единицу ($\Delta Z = 1$), а величина заряда иона порядка 5+8, то для плавного регулирования энергии необходимо изменять магнитное поле на 20%. Очевидно, это значительно снижает величину вклада корректирующих катушек в основное поле по сравнению с протонными циклотронами, где основное поле меняется в два раза и более. В настоящее время проводятся подготовительные работы:

1. Наладка вычислительных программ для расчета корректирующих катушек.
2. Подготовка систем питания и стабилизации.
3. Выбор типа изоляции, так как катушки помещаются в высоковакуумный объем с целью экономии воздушного зазора.

Выбор типа ускоряющей системы

Указанная магнитная структура циклотрона с малыми воздушными зазорами предполагает размещение дуантов в области долин. При этом возможно использовать три или даже четыре дуанта, что значительно снизило бы количество оборотов, проходимых ионом, допуская на формирование магнитного поля, вакуума и. т.д., но на готовой камере возможно установить лишь два дуанта, что и определило в конечном счете выбор четырехсекторного варианта циклотрона.

Принятая схема ускоряющей системы с двумя дуантами угловой протяженностью по 45° , расположенными в противоположных долинах, поз-

воляет при сравнительно небольших напряжениях на дуанте получить довольно значительный прирост энергии за оборот и осуществлять ускорение в широком диапазоне $\frac{\Lambda}{Z}$ за счет работы на различных гармониках.

Суммарный прирост энергии за оборот в такой системе определяется выражением

$$\Delta E = 4U \sin \frac{n\pi}{8} \sin \left(\phi_0 + \frac{n\pi}{8} + \frac{\phi_{12}}{2} + \frac{n\pi}{2} \right) \cos \left(\frac{\phi_{12}}{2} + \frac{n\pi}{2} \right), \quad (8)$$

где U — напряжение на дуанте, n — номер гармоники, ϕ_0 — фазовый угол частицы, ϕ_{12} — фазовый угол между дуантами.

Указанная система дает возможность ускорять ионы на всех гармониках, вплоть до седьмой включительно, возбуждая дуанты в фазе ($\phi_{12} = 0$, ускорение на четных гармониках $n = 2, 4, 6$) или в противофазе ($\phi_{12} = \pi$, ускорение на нечетных гармониках $n = 1, 3, 5, 7$) с соответствующим приростом энергии за оборот.

В циклотроне У-200 выбран режим ускорения на второй гармонике, так как при этом, кроме снижения примерно в два раза числа оборотов по сравнению с первой гармоникой ($\Delta E = 2,83 Z U$ и $\Delta E = 1,53 Z U$ соответственно), возможно уменьшить интервал частот, необходимый для полного перекрытия всего диапазона ускоряемых ионов. Так, если работать на основной гармонике, то частотный диапазон генератора, должен меняться по крайней мере вдвое для плавного перекрытия, а если работать на второй гармонике, то всего лишь в полтора раза. Поэтому частотный диапазон генератора выбран равным $f = 14,2 + 21,4$ МГц.

В.ч. система циклотрона У-200

Для циклотрона У-200 используются существующие резонансные баки и штоки дуантов циклотрона У-150. Как отмечалось выше, частотный диапазон резонансной системы У-200 должен быть в пределах $14,2 + 21,4$ Мгц. Для исследования возможности получения указанного частотного диапазона был изготовлен макет резонансной системы в масштабе 1:1 и на нем проведены измерения:

1. Диапазона частот.
2. Емкости дуант-земля.
3. Добротности системы.

Измерения показали, что для получения верхней частоты заданного диапазона, необходимо увеличить диаметр штока с 200 мм до 300 мм на длине 350 мм от стыка дуант-шток. В этом случае остается свободное окно в баке для размещения витка связи. В результате диапазон частот расширился с $8+16$ Мгц для У-150 до $12+24$ Мгц. Добротность системы составляет $3500+4000$.

При перестройке в.ч. генератора был выбран вариант использования режима утроения частоты в первом каскаде. Это позволяет расширить диапазон частот генератора в интервале $9+22$ Мгц, так что в указанный диапазон укладывается и требуемый в нашем случае. Данный способ перестройки частоты в.ч. генератора позволяет получить высокую выходную мощность ($P=180 + 240$ квт), что обеспечивает необходимую величину ускоряющего потенциала на дуантах при сохранении высокого значения стабильности частоты ($\approx 1.10^{-5}$) диапазонного генератора и прежней градуировки.

При размещении дуантов в противоположных долинах связь между дуантами отсутствует, так как они оказываются полностью экранированными. Поэтому фаза напряжения на дуанте определяется тем, как близко частота данного дуантного контура совпадает с частотой в.ч. генера-

ра и добротностью контура. Очевидно, что в такой ситуации разность фаз напряжений на дуантах окажется произвольной.

Для устранения этого был установлен фидер связи, который через вакуумно-плотные изоляторы соединял между собой штоки дуантов. В этом случае в системе, как в обычном двухдуантном циклотроне, возникают колебания с двумя частотами связи: верхней (синфазной) и нижней (противофазной). Разность между этими частотами можно менять, изменяя расстояние между точкой присоединения фидера и закорачивающей пластиной. В дальнейшем предполагается установить конденсатор связи шток-фидер, который позволит плавно менять величину связи во всем заданном диапазоне частот в.ч. системы.

Это решение представляется нам сравнительно простым и эффективным.

Исследование начального движения

Качество пучка в циклотроне определяется в значительной степени первыми несколькими оборотами, поэтому проблеме центра уделяется большое внимание. Для расчета траекторий в центральной области циклотрона У-200 были составлены программы, позволяющие проводить численное интегрирование уравнений движения на ЭВМ.

Электрическое поле в центре циклотрона определялось с помощью электролитической ванны на моделях электродов (ионный источник, вытягивающий электрод, дуанты) в масштабе 5:1 для участка источник-вытягивающий электрод и 2:1 для участка центральной области от радиуса 1 до 12 см. Точность определения потенциала была не хуже чем 1%.

Геометрия центральной области циклотрона представлена на рис.10.

Потенциал электрического поля измерялся непосредственно в каждой исследуемой точке с помощью цифрового вольтметра. В целях удоб-

ства измерений для участка ионный источник – вытягивающий электрод была выбрана декартова система координат, а для второго участка (от $R=1$ см до $R=12$ см) – цилиндрическая.

Магнитное поле для участка источник – вытягивающий электрод задавалось постоянным и равным $H=20$ кэ, а для второго участка было взято из данных магнитных измерений.

Полученные таким образом сетки значений потенциалов электрического поля и данных магнитного поля вводились в ЭВМ типа М-20 и обрабатывались. Результаты расчетов позволяют получить, кроме координат частицы, значения энергии ионов, фазы, а также координаты мгновенных центров кривизны траектории.

Были проведены расчеты для различных начальных условий, а также для различных конфигураций электрического поля, которые позволили выбрать окончательный вариант начальной оптики.

На рис.10 изображена одна из полученных траекторий для ионов ${}_{14}^{30}\text{N}$ с $\frac{A}{Z}=2,8$ с начальным значением фазы $\phi_0 = -30^\circ$, начальной энергией $E=0$ для ускоряющего напряжения на дуэнте, равного $U=75$ кв.

Расчет параметров орбит (равновесная орбита)

В настоящее время разработаны методы, позволяющие по данным магнитных измерений определить основные параметры орбит частиц в изохронном циклотроне, а именно: период обращения ионов по равновесной орбите T , частоты вертикальных и радиальных бетатронных колебаний ν_z и ν_r и т.д. Эти параметры можно определить как аналитически по приближенным формулам, так и численным интегрированием

точных уравнений движения с помощью ЭВМ /5,6,7/. Метод численного интегрирования является наиболее точным, он и был применен для определения параметров равновесной орбиты циклотрона У-200.

Данные измерений магнитного поля наносились в виде ряда точек на сетке полярных координат. Азимутальные интервалы равны $1^{\circ},875$, шаг по радиусу составляет 2 см. Данные брались для 192 точек по всему азимуту, чтобы исключить ошибки, связанные с неидентичностью секторов. Обработка результатов производилась на ЭВМ типа М-20 или БЭСМ-4.

На рис.11 и 12 представлены результаты расчетов частот вертикальных и радиальных бетатронных колебаний (ν_z и ν_r).

Ионные источники

В циклотроне У-200 используются ионные источники двух типов:

1. С катодом прямого накала и прямой или осциллирующей дугой для получения ионов ${}^1_1\text{H}$, ${}^1_2\text{D}$, ${}^4_2\text{He}$.

2. С катодом косвенного накала и мощной дугой в разряде для получения многозарядных ионов ${}^{12}_6\text{C}$, ${}^{14}_7\text{N}$, ${}^{16}_8\text{O}$.

Ионный источник, размещенный на конце металлической трубы, вводится через вертикальное отверстие в верхней балке ярма электромагнита. Высоковакуумная откачка этого объема производится насосом ВА-0,5-1 со скоростью откачки 200 л/сек. Предусмотрен шлюз для смены источника без нарушения вакуума в камере циклотрона.

Положение ионного источника может изменяться в небольших пределах. Это необходимо при настройке по пучку для выбора оптимального положения ионного источника и вытягивающего электрода. Имеющееся в ярме электромагнита вертикальное отверстие позволяет применить в будущем внешнюю инжекцию ионов.

Вакуумная система циклотрона

Вопрос получения высокого вакуума в ускорительной камере в циклотронах многозарядных ионов является весьма важным. Если в случае ускорения легких ионов (${}^1_1\text{H}$ ${}^2_4\text{He}$) потери пучка при взаимодействии с остаточным газом в камере определяются только рассеянием, то для многозарядных ионов весьма существенен процесс перезарядки, который полностью выводит частицы из режима ускорения.

Так, для 310-сантиметрового циклотрона при рабочем вакууме $8 \cdot 10^{-6}$ мм Hg потери пучка из-за перезарядки составляют 20+30%.

В циклотроне У-200 для обеспечения высокого вакуума установлены два насоса ВА-8-7 с фреоновыми ловушками со скоростью откачки 4100 литров в секунду каждый. Для улучшения рабочего вакуума в центральной части циклотрона установлен насос ВА-0,5-1 со скоростью откачки 200 литров в секунду. При натекании газа извне, составляющем $0,1 \text{ см}^3/\text{мин}$, эти насосы обеспечивают вакуум в ускорительной камере около $3 \cdot 10^{-6}$ мм Hg без подачи газа в ионный источник. При работающем источнике с расходом газа около $2 \text{ см}^3/\text{мин}$ рабочий вакуум в камере составляет $0,6 + 1 \cdot 10^{-5}$ мм Hg.

В дальнейшем намечается провести целый ряд мер для улучшения вакуума: применение масел лучшего качества для повышения предельного вакуума насосов, установка полупроводниковых ловушек и, наконец, уменьшение натекания газа в циклотрон, особенно за счет установки ионного источника вне машины.

Вывод пучка

В циклотроне У-200 предусматривается применить две системы вывода пучка: 1) с использованием принципа перезарядки и 2) электроста-

тическую систему. В изохронном циклотроне многозарядных ионов можно успешно осуществить вывод пучка с высокой эффективностью, используя принцип перезарядки тяжелой частицы при прохождении через вещество ^{18/}.

Предварительные расчеты показали, что наибольший эффект при использовании этого метода достигается для ионов ${}^4_2\text{He}^{+1}$; ${}^2_1\text{D}^{+1}$, так как при прохождении через перезаряжающее устройство, установленное на конечном радиусе, значение отношения

$$k = \frac{Z_1/A_1}{Z_2/A_2}$$

изменяется в два раза. Поэтому величина радиального смещения пучка после первого оборота весьма значительна. Так, для ионов ${}^2_1\text{D}^{+1}$ при ускорении ${}^2_1\text{D}^{+1}$ величина смещения ΔR равна 20 см и пучок после первого оборота испадает на радиус $R = R_k + \Delta R = 110$ см. При таком удалении от конечной орбиты магнитное поле заметно спадает и пучок будет выводиться из ускорительной камеры. В случае многозарядных ионов (${}^{12}_6\text{C}^{+4}$, ${}^{14}_7\text{N}^{+4}$, ${}^{16}_8\text{O}^{+6}$) величина радиального смещения после первого оборота пучка мала, однако использование нескольких оборотов позволит вывести пучок из циклотрона. Следует отметить, что использование принципа перезарядки для вывода пучка, конечно, не исключает применения электрстатической системы вывода.

ФИЗИЧЕСКИЙ ЗАПУСК

В настоящее время циклотрон запущен на легких частицах (${}^1_1\text{H}$, ${}^3_2\text{He}^{+1}$, ${}^4_2\text{He}^{+1}$) и пучок ускоренных ионов доведен до конечного радиуса с эффективностью 10%, причем пучок до радиуса $R = 70$ см проходит практически без потерь. Сейчас на циклотроне устанавливаются токовые корректирующие обмотки, что позволит уменьшить потери пучка.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Успешный запуск циклотрона дает возможность использовать накопленный опыт при реконструкции 310-сантиметрового циклотрона тяжелых ионов ОИЯИ, а также может явиться основой при реконструкции 120-сантиметрового и 150-сантиметрового циклотронов, работающих в различных исследовательских лабораториях Советского Союза и странах-участницах ОИЯИ. Такая реконструкция позволит при достаточно скромных затратах увеличить энергию ускоряемых ионов в 3 раза.

Авторы считают своим приятным долгом выразить благодарность проф. Г.Н.Флерову за постоянный интерес к работе и содействие, М.Р.Бургарель (Франция) – за ценные дискуссии при выборе основных параметров циклотрона, Ш.Гольдштейну (Франция), В.М. Николаеву – за полезные советы и подготовку вычислительных программ для расчета параметров орбит, М.Маковею (Румыния) – за предварительное моделирование начальной области циклотрона, Т.Тауту (Румыния) – за разработку ионного источника для получения легких ионов, М.Кармасиу (Чехословакия) – за расчеты магнитного поля, В.В.Батюше, Н.И.Спирidonову – за перестройку в.ч. генератора, С.Г.Фефиловой, Г.М.Куликовой, Х.Р.Нарзиеву – за помощь при проведении магнитных измерений, И.В.Колесову, Г.М.Соловьевой, В.Н.Титову – за разработку основных узлов ускорителя, В.Н.Покровскому, бригаде механиков – за хорошее и своевременное выполнение механической сборки циклотрона, В.С.Алфееву, В.А.Акимову, Р.И.Иванникову – за участие в физическом запуске.

Л и т е р а т у р а

1. Б.А.Загер и др. Перестройка полутораметрового циклотрона в режим ускорения многозарядных ионов. Препринт ОИЯИ, 1958, Дубна, 1964.

2. D.J.Clark and al. Design and operation of the U.C.L.A. 50 Mev Spiral-Ridge Cyclotron. Nucl. Instr. and Meth., 18-19, 1-24(1962).
3. Э.Г.Имаев и др. Методика измерения магнитного поля двухметрового изохронного циклотрона ОИЯИ. Преприят ОИЯИ, 9-3713, Дубна, 1968.
4. B.L.Cohen and al. The Oak Ridge Relativistic isochronous Cyclotron. Nucl. Instr. and Meth., 6, 2 (1960).
5. H.L.Hagedoorn, N.F.Verster. Nucl. Instr. and Meth., 18-19, 201 (1962).
6. L.Smith, A.A.Garren. Report UCRL- 8598, 1959.
7. T.A.Welton. Sector-focused Cyclotrons. Proceedings of Conference at Sea Island, 1959. p.48.
8. Г.Н.Вялов, Ю.Ц.Оганесян, Г.Н.Флеров. Метод вывода пучка тяжелых ионов из циклотрона с азимутальной вариацией магнитного поля. Преприят ОИЯИ, 1884, Дубна, 1964.

Рукопись поступила в издательский отдел
28 августа 1968 года.

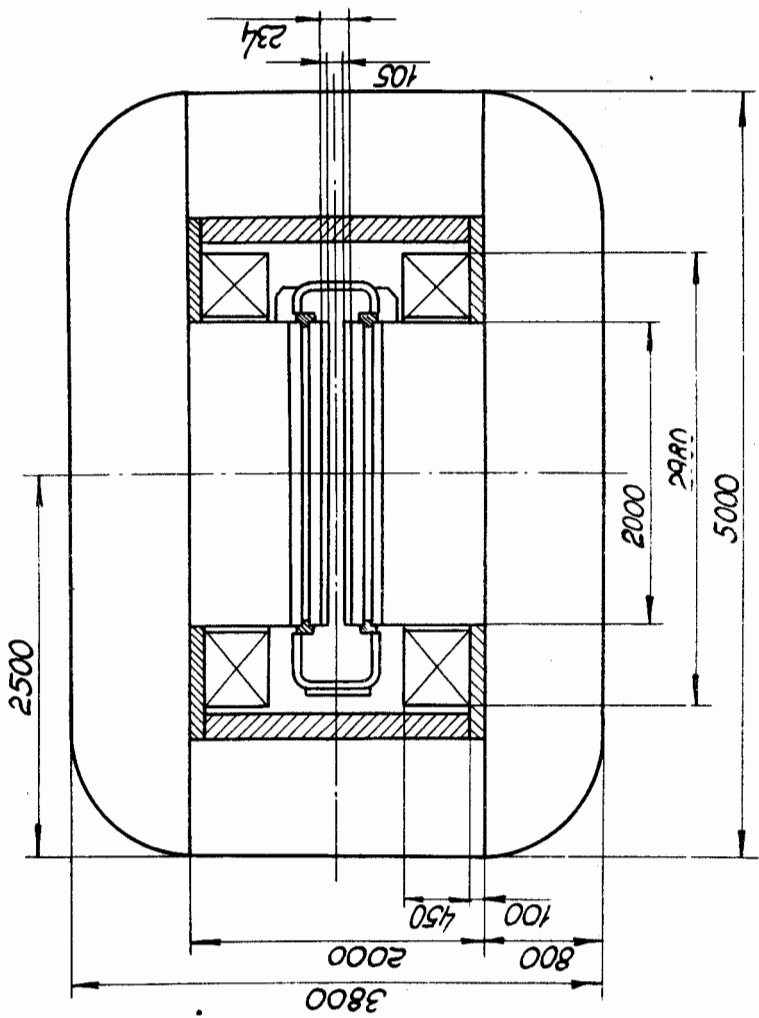


Рис.1. Общий вид электромагнита У-200.

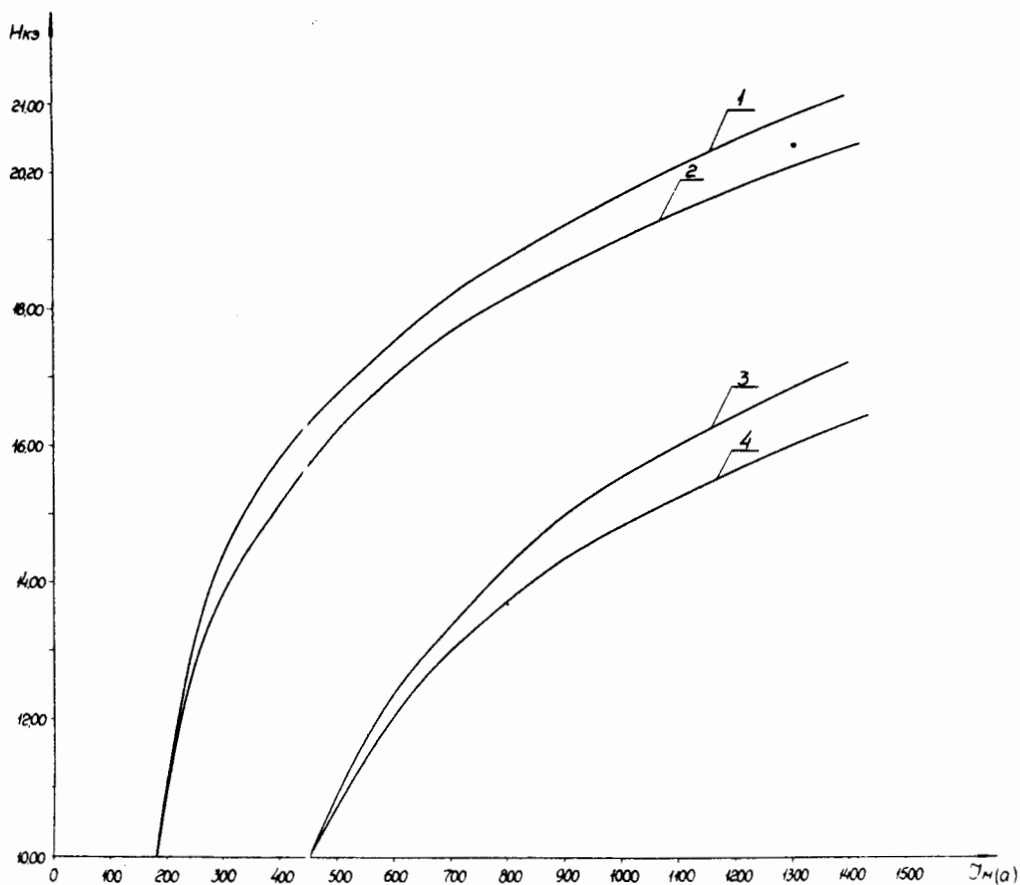


Рис.2. Кривые намагничивания циклотрона У-200 при разных расстояниях между главными катушками возбуждения.

Расстояние между катушками: 1-570 мм, 2-780 мм ($\delta = 94$ мм);
3-780 мм, 4-1100 мм ($\delta = 240$ мм).

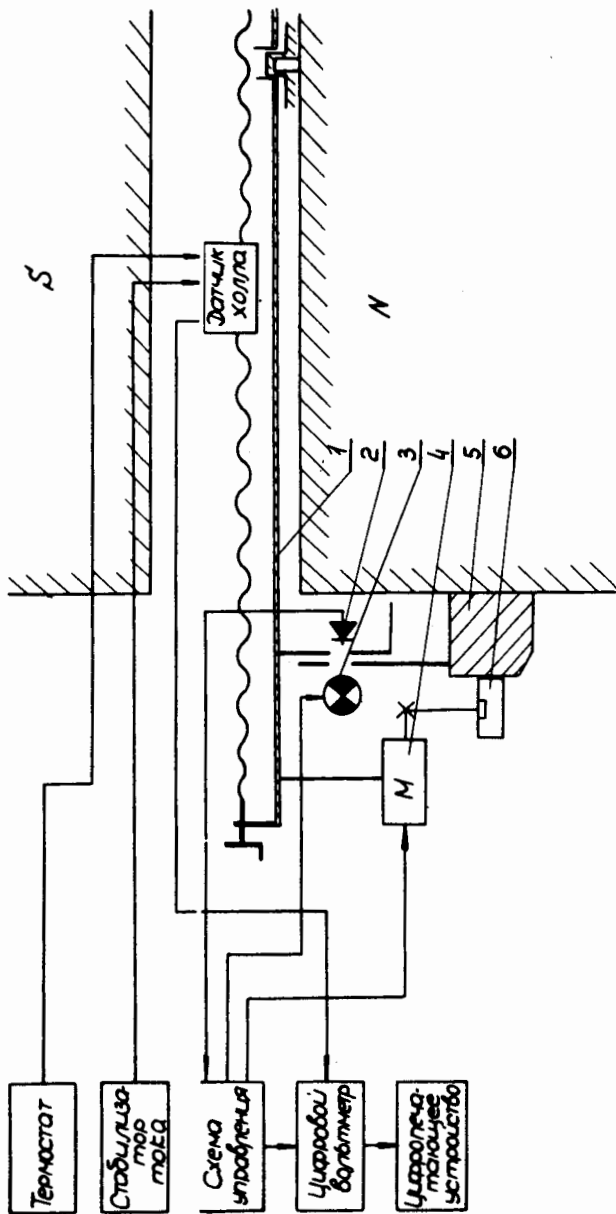


Рис.4. Схема методики измерения магнитного поля циклотрона У-200.
 1-измерительная штанга, 2 - фотодиод, 3 - источник света, 4 - двй-
 гатель, 5 - дюралюминиевое кольцо, 6 - резиновый валик.

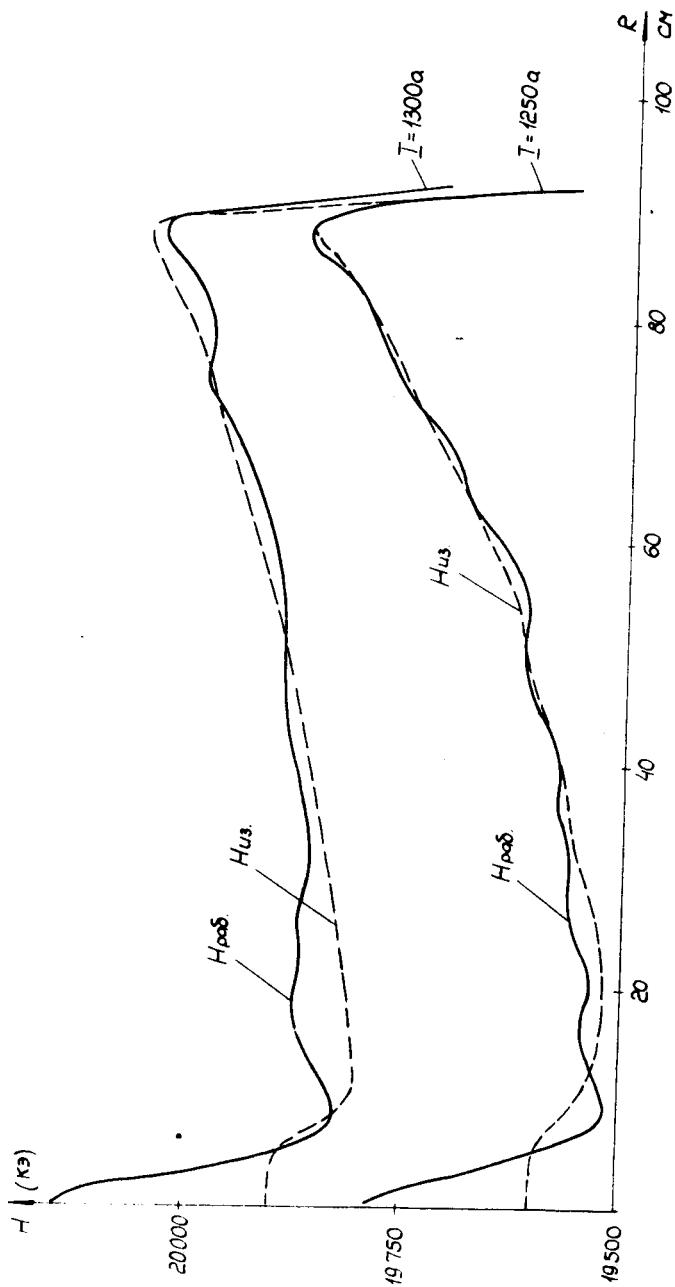


Рис.5. Среднее магнитное поле при различных уровнях возбуждения магнита.

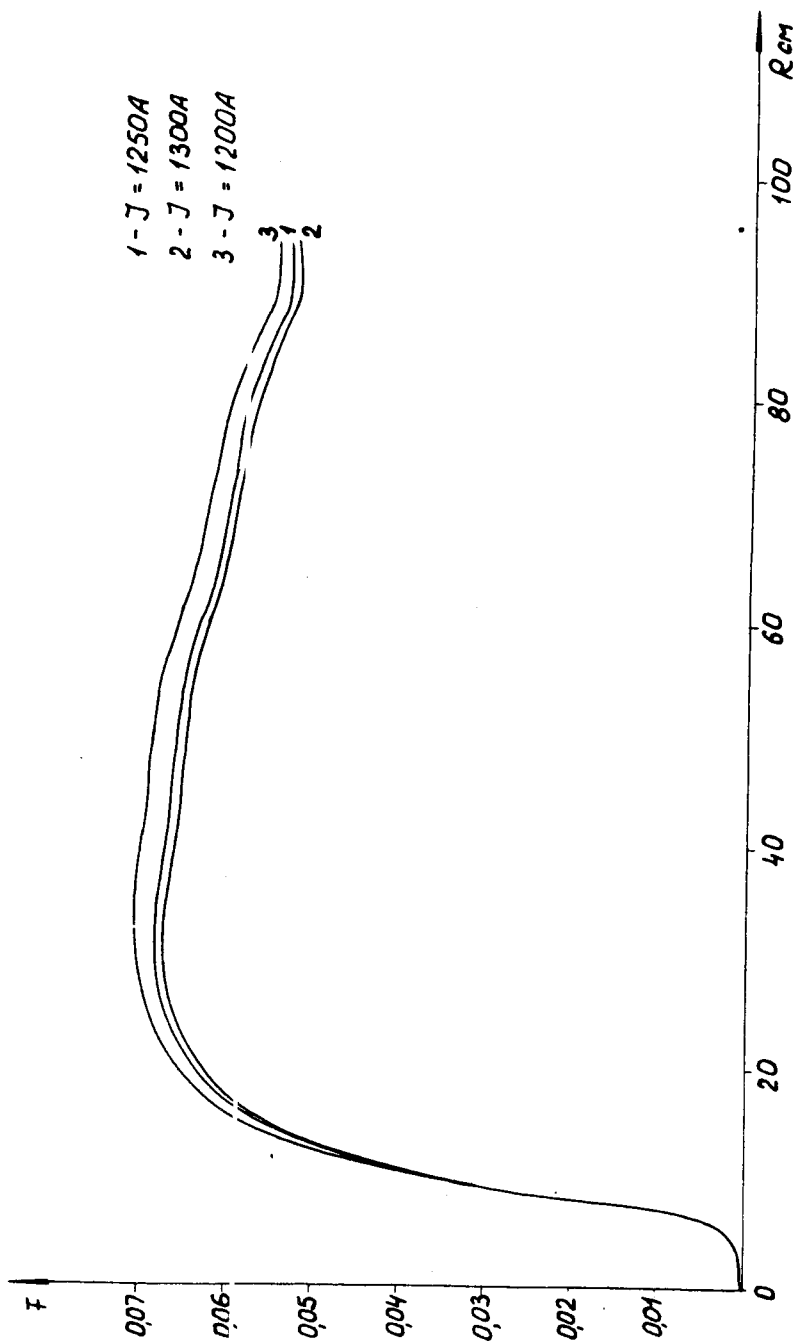


Рис.6. Флаптер магнитного поля при различных уровнях возбуждения магнита.

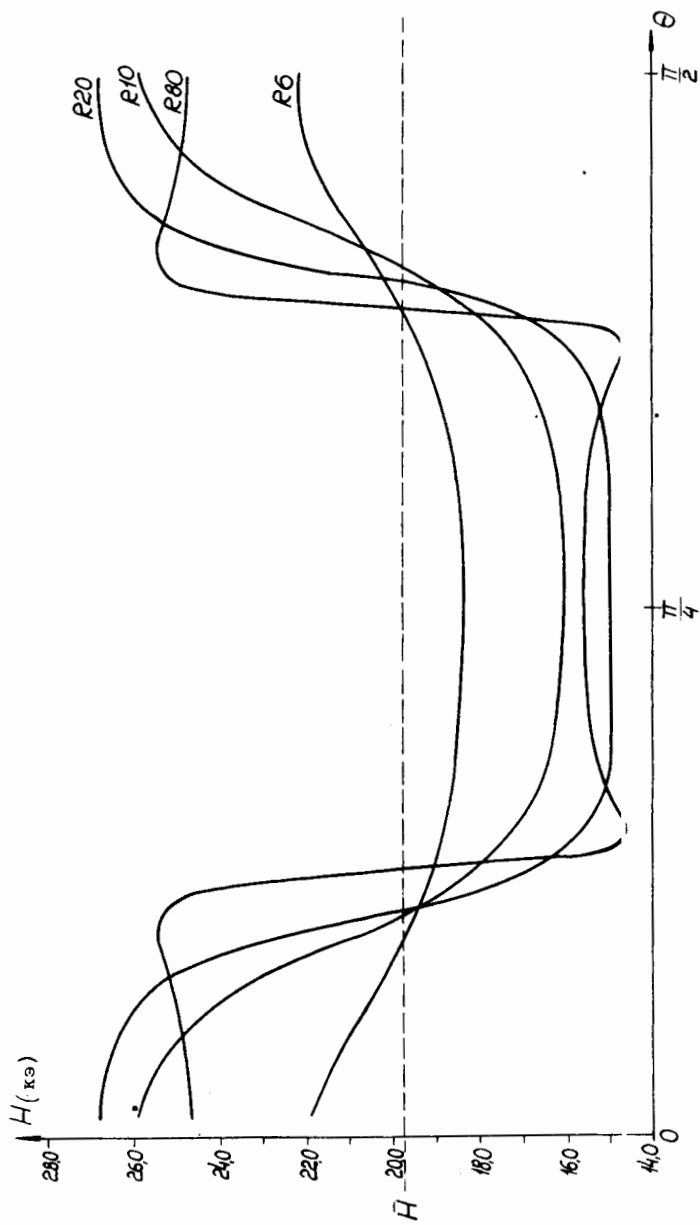


Рис.7. Распределение магнитного поля по азимуту (на элементе периодичности) циклотрона У-200.

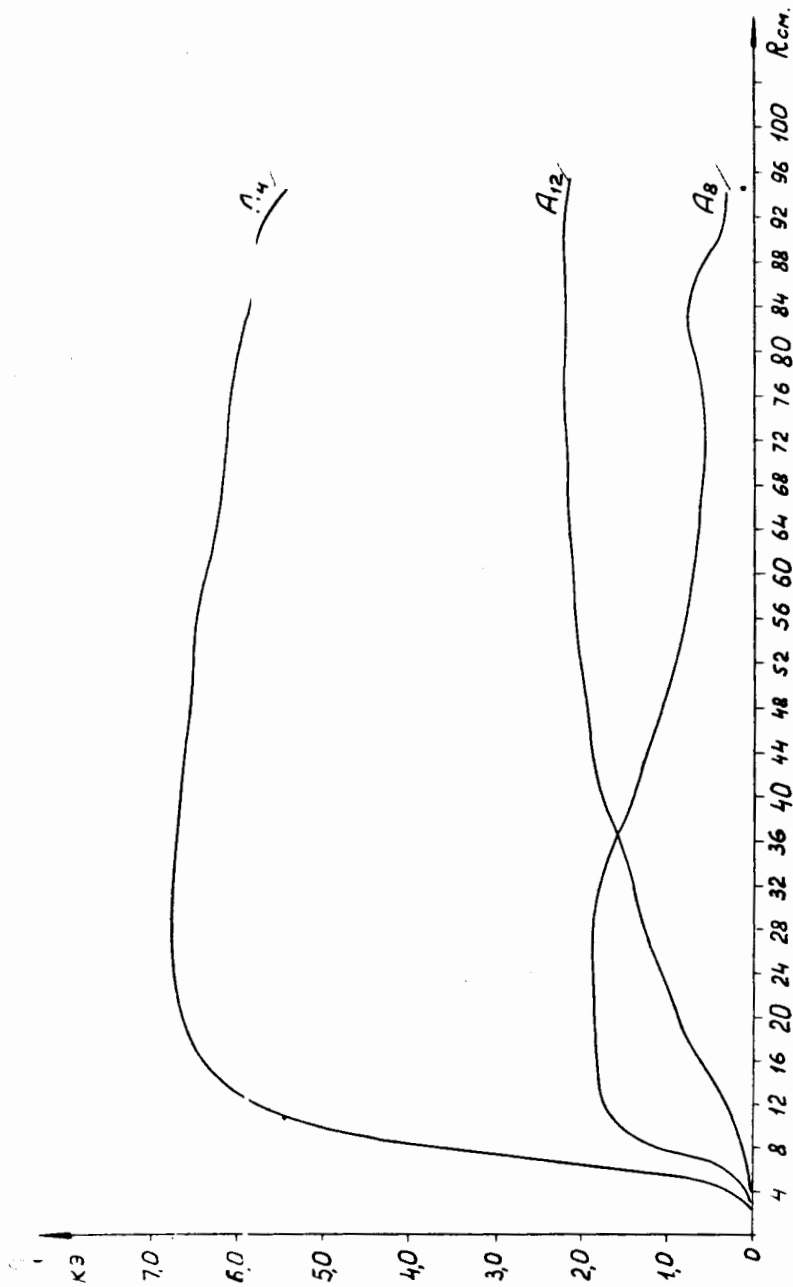


Рис.8. Основные гармоники магнитного поля циклотрона У-200.

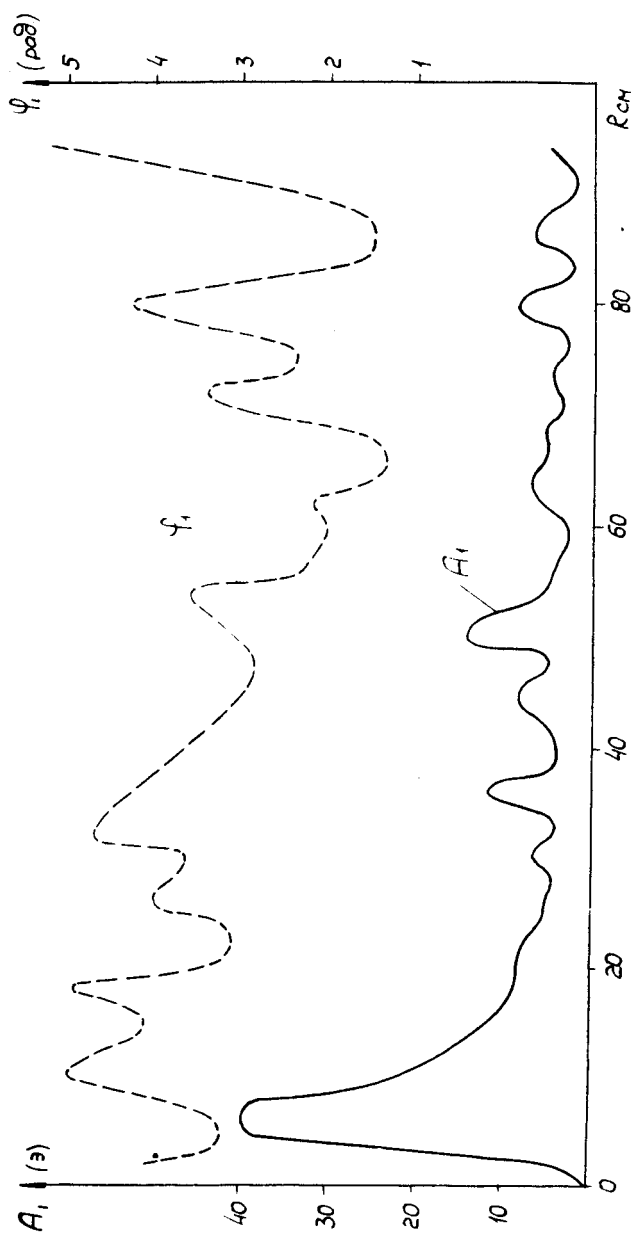


Рис.8. Амплитуда и фаза первой гармоники азимутальных возмущений магнитного поля циклотрона У-200.

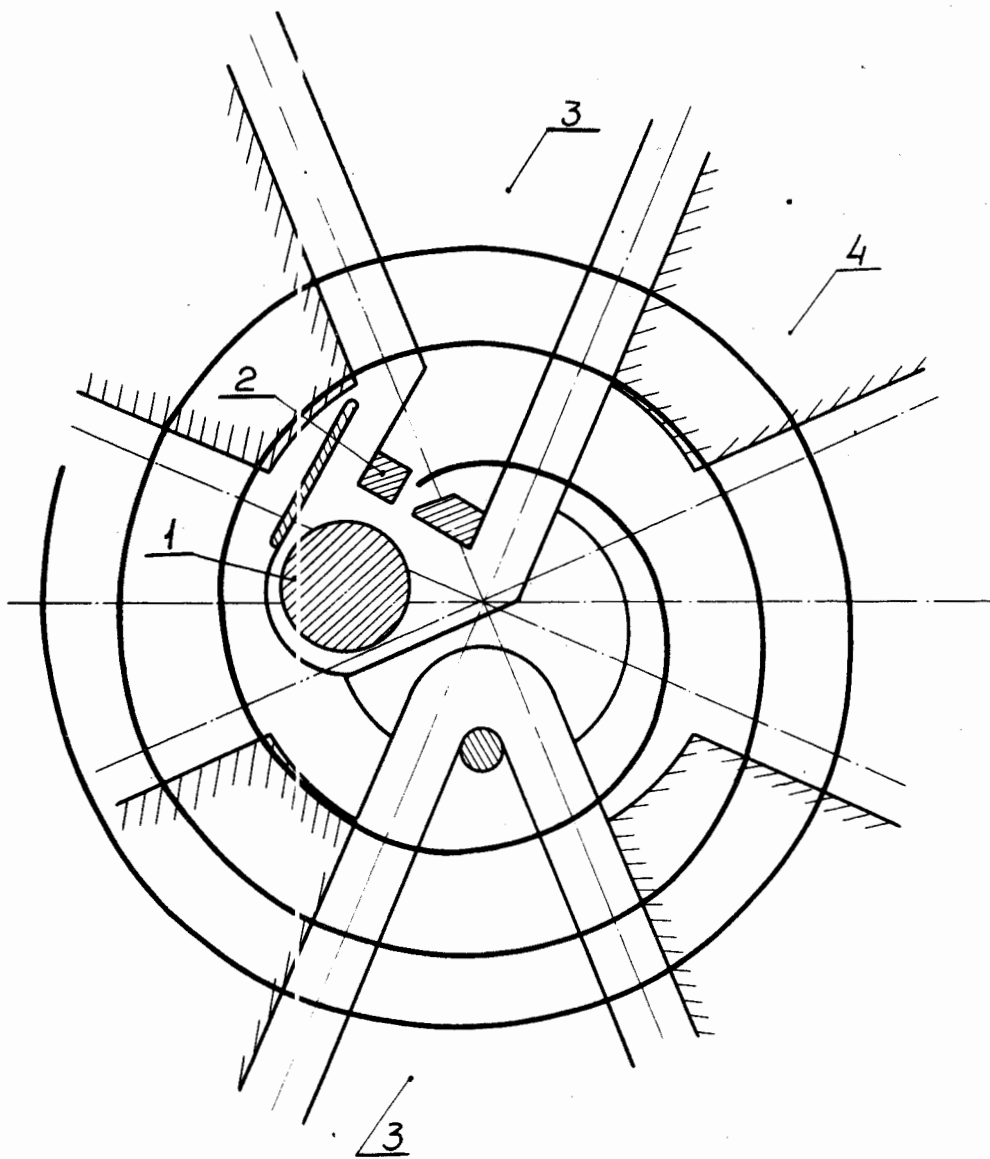


Рис.10. Геометрия центральной области циклотрона У-200.

1-ионный источник, 2 - вытягивающий электрод, 3 - дуанты.

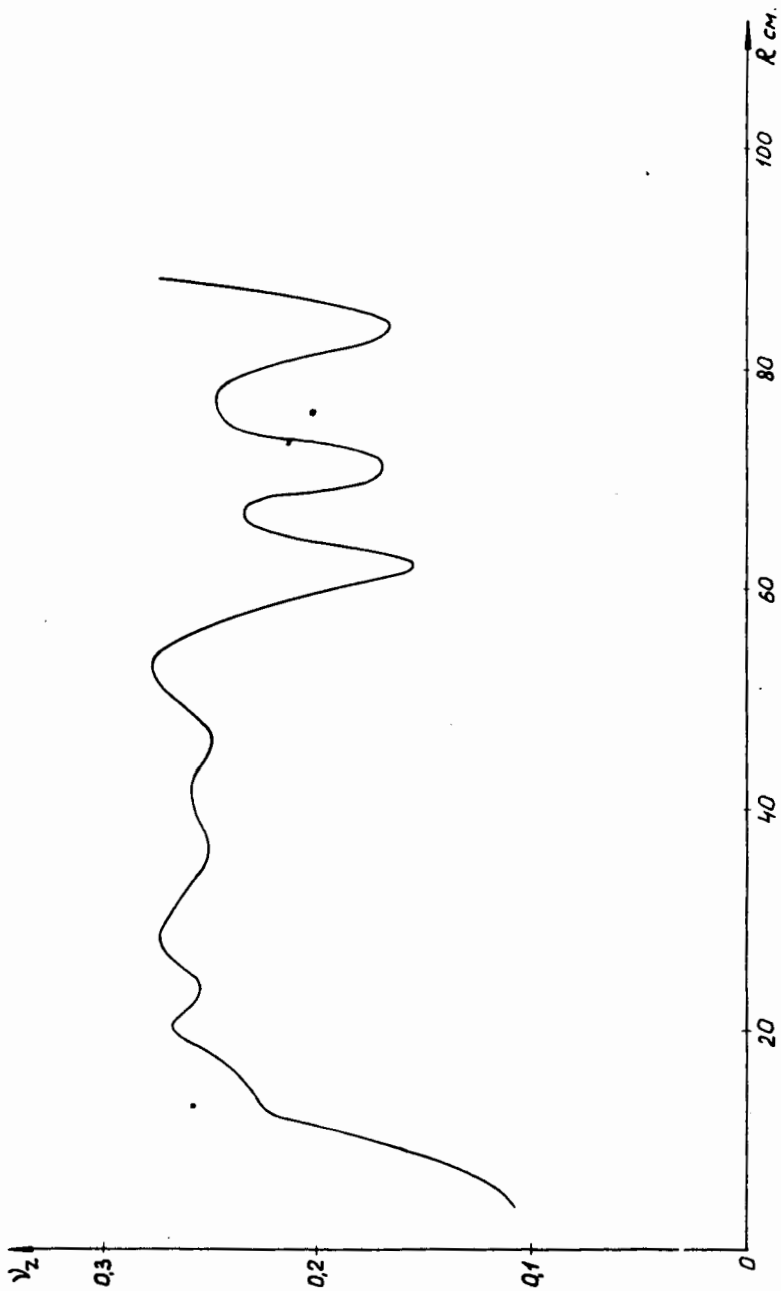


Рис.11. Результаты расчета частоты вертикальных бетатронных колебаний (ν_z).

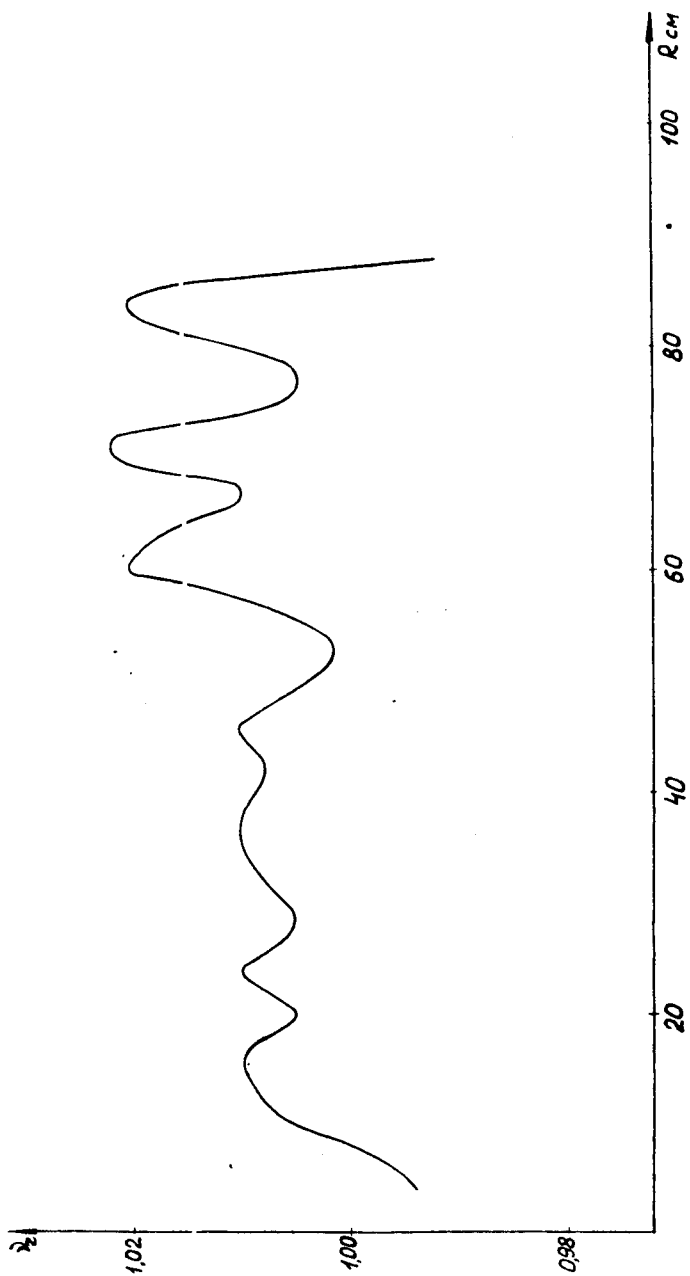


Рис.12. Результаты расчета частоты радиальных бетатронных колебаний (ν_r).