

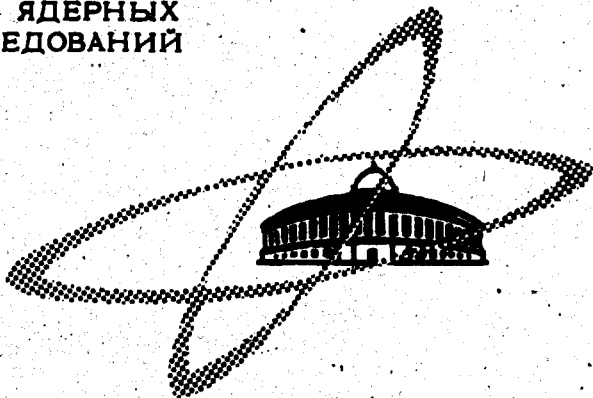
29/VI-70

Ш-42

ОБЪЕДИНЕННЫЙ
ИНСТИТУТ
ЯДЕРНЫХ
ИССЛЕДОВАНИЙ

Дубна

P9 - 5086



И.А. Шелаев, Е.Д. Воробьев, Б.А. Загер,
С.И. Козлов, В.И. Кузнецов, Р.Ц. Оганесян,
Ю.Ц. Оганесян, К.И. Семин, А.Н. Филипсон,
В.А. Чугреев

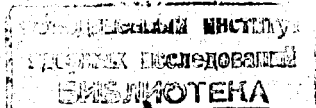
**ЧЕТЫРЕХМЕТРОВЫЙ ИЗОХРОННЫЙ ЦИКЛОТРОН ОИЯИ
С ПЛАВНО РЕГУЛИРУЕМОЙ ЭНЕРГИЕЙ
ТЯЖЕЛЫХ ИОНОВ**

P9 - 5086

8391/2 49
И.А. Шелаев, Е.Д. Воробьев, Б.А. Загер,
С.И. Козлов, В.И. Кузнецов, Р.Ц. Оганесян,
Ю.Ц. Оганесян, К.И. Семин, А.Н. Филипсон,
В.А. Чугреев

**ЧЕТЫРЕХМЕТРОВЫЙ ИЗОХРОННЫЙ ЦИКЛОТРОН ОИЯИ
С ПЛАВНО РЕГУЛИРУЕМОЙ ЭНЕРГИЕЙ
ТЯЖЕЛЫХ ИОНОВ**

Направлено в АЭ



Введение

Дальнейшее развитие физики ядерных реакций между сложными ядрами связано с использованием в этих реакциях пучков быстрых ионов все более тяжелых элементов, повышением их энергии и интенсивности. С этой целью в Лаборатории ядерных реакций на основе результатов, полученных при создании двухметрового изохронного циклотрона ОИЯИ^{1/}, спроектирован четырехметровый изохронный циклотрон (ускоритель У-400). В настоящее время в ОИЯИ ведется изготовление узлов и деталей ускорителя У-400, сооружаемого на основе имеющегося 310-сантиметрового классического циклотрона тяжелых ионов (ускоритель У-300)^{2/}.

Параметры этих ускорителей приведены в табл. 1, из которой видно, что практически все системы прежнего ускорителя существенно изменяются. Циклотрон У-400 во многом подобен ускорителю У-200, который можно рассматривать как модель большого ускорителя в масштабе 1:2. Некоторые отличия касаются прежде всего структуры магнитного поля в связи с расширением диапазона энергии и масс ускоренных ионов. На рис. 1 представлена энергия ионов E в Мэв/нукл. с различными A/z и частота обращения этих ионов в выбранном диапазоне рабочих уровней среднего магнитного поля циклотрона 16-20 кэ на

Таблица I
 Параметры циклотронов У-300 и У-400

Электромагнит	У-300	У-400
Диаметр полюсных наконечников (см)	310	400
Конечный радиус ускорения (см)	138	180
Вес магнита (тонн)	2090	2298
Средний воздушный зазор (мм)	540	200
Число витков основной обмотки возбуждения	2x224	2x224
Рабочий ток в обмотке электромагнита (а)	1870	1000-2500
Среднее значение магнитной индукции (кэ)	16,7	16-20
Число секторов	-	4
Угол спиральности	-	30°
Радиальный спад магнитного поля (%)	0,8	изохрон.
Число вспомогательных обмоток	4	18
<u>ВЧ система</u>		
Число дуантов	2	2
Азимутальная протяженность дуанта	180°	45°
Напряжение на дуанте (кв)	150	70-100
Диапазон длин волн (м)	50-100	25-50
Апертура дуанта (мм)	40-140	80-40
Зазор "дуант-плакировка камеры" (мм)	80	70
Перестраиваемый элемент	закор. пластина подвижная панель	
Стабильность напряжения на дуанте (%)	нет	0,2
Режим работы	импульсный	любой

1	2	3
---	---	---

Вакуумная система

Объем вакуумной камеры (м ³)	75	25
Давление в камере (мм рт.ст.)	$6 \cdot 10^{-6}$	$1 \cdot 10^{-6}$
Количество в/в паромасляных насосов	5	5 (7)
Производительность одного насоса (л/сек)	20000	8000

Система вывода и транспортировки пучка

Азимутальная протяженность дефлектора (°)	103	45
		45
Входной и выходной зазоры (мм)	8/22	6
Рабочее напряжение дефлектора (кв)	40-60	40-60
Азимутальная протяженность фокусирующего магнитного канала (°)	34	45
Градиент поля в канале (э/см)	450	1500
Количество выведенных пучков	1	2
Число коммутирующих магнитов	2	3
Число рабочих направлений	12	16
Эффективность вывода (%)	30	30-100

Пучки

Энергия ускоряемых ионов (Мэв/нукл.)	5-10	1-50
Полная энергия (Мэв)	$250 z^2 / A$	$400-625 z^2 / A$
Отношение массы к заряду (A/z)	5-7	3,5+25
Разброс энергии (%)	0,5	0,2-0,3

конечном радиусе 180 см. Заштрихованные граничные области на этом рисунке связаны с возникающим в этих областях нарушением условий устойчивости бетатронных колебаний. Расширение диапазона конечной энергии ускоряемых на циклотроне ионов с $E = 5-10$ Мэв/нуклон до $E = 1-50$ Мэв/нуклон и интервала отношений A/z с 5-7 до 3,5-25 обеспечивается повышением уровня магнитного поля, введением азимутальной вариации и рядом других изменений в конструкции циклотрона.

Электромагнит

С целью повышения уровня магнитного поля до 20 кэ поперечное сечение магнитопровода электромагнита Е-8 (рис. 2) увеличивается на 13% и расстояние между основными обмотками возбуждения уменьшается на 500 мм. Конический полюсной наконечник ($\phi_{\max} = 400$ см, $\phi_{\min} = 310$ см) заменяется цилиндрическим с диаметром 400 см. Новый полюсной наконечник набирается из отдельных дисков и стягивается шпильками по такой же технологии, что использовалась для циклотрона У-200^{/3/}. Средний воздушный зазор между полюсами уменьшен с 540 до 200 мм.

Рассчитанная с учётом указанных изменений в цепи магнитопровода кривая возбуждения электромагнита Е-8 приведена на рис. 3. Применённая методика расчёта не позволяет точно учесть влияние на величину магнитного поля эффекта сближения основных обмоток возбуждения, поэтому оценка этого эффекта проводилась экстраполяцией экспериментальных результатов, полученных на циклотроне У-200. Предполагаемый благодаря этому эффекту дополнительный вклад в среднее магнитное поле представлен на рис. 4. Таким образом, расчёты показывают, что после выполнения указанных изменений среднее магнитное поле в электромагните Е-8 величиной 20 - 20,5 кэ может быть получено при токе возбуж-

дения в обмотке $I_M = 2200-2500$ а. Это позволяет сохранить прежние обмотки и оставить без изменений систему питания электромагнита.

Кольцевые шиммы

Магнитный зазор циклотрона У-400 изображен на рис. 5. Зазор между стальными крышками вакуумной камеры составил 300 мм. В этом зазоре размещены элементы формирования структуры магнитного поля (сектора, корректирующие обмотки и пр.) и дуанты. Расчёт этих элементов проводился с учётом результатов, полученных на циклотроне У-200. Изменение радиального распределения среднего магнитного поля на циклотроне У-200 для различных уровней показано на рис. 6, а величины флаттера в районе конечных радиусов - на рис. 7. Изохронная форма магнитного поля

$$H_{из} = \frac{H_0}{\sqrt{1 - \frac{2E_0}{W}}}$$

(где E_0 - кинетическая энергия иона на нуклон, $W = 931,48$ Мэв - энергия покоя протона) обеспечивается кольцевыми шиммами и корректирующими обмотками. Анализ величины ампер-витков корректирующих обмоток показывает, что для данной структуры магнитного поля и выбранного диапазона энергий минимум этой величины достигается в том случае, если магнитное поле в центре, сформированное только железными массами при уровне $H = 20$ кэ, выше поля на конечном радиусе на 200 э. Однако этот минимум неглубокий, поэтому на уровне 20 кэ распределение среднего магнитного поля выбрано таким, что соответствует конечной энергии ионов ≈ 10 Мэв/нуклон.

Для получения такой формы поля ступенчатые кольцевые шиммы рассчитывались на ЭВМ в предположении равномерной намагниченности каждой ступени с последующей суперпозицией их вклада. Как показали эксперименты на У-200, точность этих расчётов составляет около 10% от полного вклада шимм, поэтому дальнейшая коррекция поля будет осуществляться экспериментально. В циклотроне У-400 такие шиммы размещаются только на секторах и выполняются одновременно с последними. Этот вариант размещения шимм несколько усложняет изготовление секторов, но в то же время позволяет уменьшить высоту кольцевых шимм и увеличить точность их изготовления.

Корректирующие обмотки

Коррекция среднего магнитного поля во всем рабочем интервале уровней полей осуществляется кольцевыми обмотками. Расчёт необходимых для коррекции ампервитков проводится на ЭВМ методом наименьших квадратов для двух вариантов распределения обмоток по радиусу - равномерно по r и по r^2 . Число пар обмоток варьировалось от 8 до 12 с целью получения изохронной формы магнитного поля и допустимых радиальных градиентов. В результате найдено, что хотя суммарное число ампервитков в обоих случаях примерно одинаково, однако при распределении обмоток равномерно по r^2 ампер-витки каждой обмотки оказываются близкими друг к другу и величина градиента среднего поля, особенно на больших радиусах, меньше. Эта величина, очевидно, тем меньше, чем больше число обмоток. Но уже в случае десяти пар $\frac{\partial H(r)}{\partial r} / \frac{\text{макс}}{\text{мин}} \approx \pm 2$ э/см, что вполне удовлетворительно. Каждая кольцевая обмотка состоит из трех витков медного проводника $s = 11,5 \times 11,5 \text{ мм}^2$ с отверстиями $\phi = 8$ мм для охлаждения. Изолированные стеклолентой с эпоксидным компаундом витки уложены в алюминиевый каркас, поме-

женный под секторами (см. рис. 5). Помимо кольцевых корректирующих обмоток, на циклотроне У-400 предусмотрена также установка шести пар азимутальных обмоток для контроля амплитуды и фазы первой гармоники поля вблизи центра, на средних и внешних радиусах.

Питание каждой корректирующей обмотки осуществляется от шестифазного кремниевого выпрямителя через дроссель фильтра. Регулирование тока от 0 до 900 а выполняется магнитным усилителем, включенным в первичную цепь понижающего трансформатора. Для трех пар кольцевых обмоток предусмотрено раздельное питание верхней и нижней обмотки для коррекции медианной плоскости.

Параметры магнитной структуры

Азимутальная вариация магнитного поля создается четырьмя парами секторов. Расчёт высоты сектора и флаттера магнитного поля проводился с учётом результатов, полученных на У-200. Предполагаемая величина флаттера как функция уровня среднего магнитного поля приведена на рис. 7. Угол спиральности секторов выбирался при использовании этих значений флаттера и учёте следующих обстоятельств. Во-первых, с введением спиральности достигается увеличение вертикальной фокусировки и тем самым снижаются допуски на формирование магнитного поля особенно на высоких уровнях, но при больших углах уменьшаются пределы регулирования поля, т.к. с уменьшением уровня поля ν_z возрастает до 0,5. Поэтому угол спиральности секторов выбран равным 30° с тем, чтобы при уровне магнитного поля 16 кэ $\nu_z \leq 0,5$ для ионов с энергией $\approx 5 \text{ Мэв/нуклон}$.

Таким образом, выбранная на циклотроне У-400 структура магнитного поля позволит ускорить ионы с широким интервалом Δ/z и плавно регулируемой энергией (рис. 1) без применения флаттерных корректирующих обмоток.

Измерение магнитного поля

Увеличение размеров ускорителя, расширение диапазона рабочих уровней магнитного поля приведет к увеличению объема магнитных измерений почти на порядок по сравнению с тем, что имелось на циклотроне У-200^{1/4}. При формировании магнитного поля циклотрона У-200 суммарное число измеренных значений поля составило 400 000, что в общей сложности заняло около 300 часов. При сохранении прежней скорости проведение магнитных измерений потребует около 3000 часов. Эта цифра включает лишь время непосредственных измерений и не учитывает того времени, что следует затратить на подготовку варианта шимм, аппаратуры и пр. Поэтому сейчас разработанная для циклотрона У-200 методика измерений усовершенствуется с целью повышения скорости в 3-4 раза при сохранении и даже улучшение их точности, а также с целью увеличения надежности и скорости записи результатов.

ВЧ система

Схема размещения основных узлов ускорителя У-400 представлена на рис. 8. Сохранение прежнего ярма электромагнита затрудняет применение более двух дуантов. Выбор частотного диапазона (6-12 МГц) для двухдуантного варианта определен следующими условиями. Во-первых, при ускорении ионов с $A/z = 7-12$, т.е. наиболее тяжелых ионов, для ускорения которых строится данная машина, использование амплитуды ускоряющего напряжения было бы наиболее эффективным. Максимальный прирост энергии, получаемый частицей за оборот в такой системе составляет

$$\Delta E_{\max} = 4ZeU_g \sin \frac{n\pi}{8},$$

где n - номер гармоники ускоряющего напряжения. Во-вторых, амплитуда ускоряющего напряжения должна быть такова, чтобы при выбранных зазорах дуант-плакировка камеры (7 см) практически полностью исключались пробои в камере и тем самым обеспечивалась устойчивая работа машины в непрерывном и в импульсном режиме. В то же время число оборотов ионов с $A/z = 7+12$ было бы невелико. Наконец, третье условие при выборе частотного диапазона состояло в том, чтобы его величина была бы кратна величине диапазона частоты имеющегося генератора "Апатит" ($f_0 = 3 + 6$ МГц).

Исходя из этого, для ионов с $A/z = 7-12$ выбран режим ускорения на второй - четвертой гармонике (см. рис. 1). Тогда при амплитуде напряжения на дуанте $U_g = 100$ кв эти ионы, ускоряясь до конечной энергии, будут совершать около 200 оборотов. Увеличение числа оборотов и работа на высоких гармониках частоты обращения ионов создает необходимость стабилизировать амплитуду ускоряющего напряжения с точностью порядка $\pm 0,2\%$. Перестройка частоты дуантного контура в заданном диапазоне осуществляется с помощью движущейся панели.

Выбранный для циклотрона У-400 вариант резонатора с одной вращающейся панелью ^{/6/} позволяет сравнительно просто осуществить изменение частоты дуантного контура вдвое. Макет резонатора циклотрона У-400 изображен на рис. 9. Один край вращающейся панели подсоединен к плакировке резонатора при помощи гофрированной медной пластины, а контакт второго края обеспечивается емкостью вакуумного конденсатора, образуемого башмаком и стенкой резонатора. Измерения добротности и импеданса резонатора, выполненные на макете 1:1, показали, что напряжение на дуанте амплитудой 100 кв обеспечивается на любой частоте заданного диапазона при мощности генератора 75-100 квт.

Вакуумная система

Сокращение объема резонатора и вакуумной камеры, а также рациональное размещение высоковакуумных насосов на камере ускорителя позволит, как показывают соответствующие расчёты и опыт работы циклотрона У-200^{/5/}, получить рабочее давление в машине порядка $1 \cdot 10^{-6}$ мм рт. ст. Обычно для расчёта потерь ионов, связанных с изменением заряда при столкновении с атомами остаточного газа, используют выражение

$$I/I_0 = \exp - \left[10^{27} p \int_0^t \sigma(\beta) \beta dt \right],$$

где I_0 и I - начальный и конечный ток ускоренных ионов соответственно; p - среднее давление в камере, $\sigma(\beta)$ - полное сечение перезарядки, t - время ускорения иона, $\beta = v/c$. Оценки показывают, что потери ионов при таком давлении за счёт перезарядки на остаточном газе составляют около 30%.

Ионные источники

Сравнительно большой зазор между крышками вакуумной камеры циклотрона У-400 (см. рис. 5) позволяет использовать ионные источники в горизонтальном и вертикальном исполнении. Источники горизонтальной конструкции предназначаются в основном для получения ионов элементов, находящихся в обычных условиях только в твердом состоянии, т.к. в этом случае размеры камеры увеличиваются за счёт размещенных в непосредственной близости испарителей рабочего вещества. Отверстие в ярме электромагнита Е-8 позволяет применить ионный источник в вертикальном исполнении^{/7,8/}, а для внешней инжекции пучка тяжелых ионов могут быть использованы источники с другим принципом действия^{/9/}. Размещение таких источников в камере ускорителя и их работа в магнитном поле циклотрона сопряжены с большими трудностями.

Вывод пучка

Осуществление вывода пучка тяжелых ионов на циклотроне У-400, как показали опыты на У-200^{10,11/}, не встретит принципиальных трудностей. Более того, одновременное использование двух методов - электростатического и метода с перезарядкой - на циклотроне дает возможность получить два внешних пучка. При этом методом перезарядки можно частично или даже полностью вывести ту долю ионного пучка, которая неизбежно была бы потеряна на дефлекторе из-за радиальных колебаний. Таким образом, повышение энергии и расширение диапазона отношений A/z ускоряемых ионов позволит повысить интенсивность пучков ионов традиционных элементов (неона, аргона) с массой $A \leq 40$ за счёт ускорения в изохронном режиме ионов этих элементов с меньшим зарядом или увеличить их энергию, ускоряя ионы с прежним зарядом, и, наконец, ускорить ионы с массой $A \leq 132$. В табл. 2 приведены интенсивность и максимальная энергия различных тяжелых ионов, которые будут ускорены на циклотроне У-400.

Таблица 2

Тип ускоряемых ионов	Энергия, Мэв/нукл.	Полная энергия, Мэв	Интенсивность, мка
Ne ⁺² ₂₀	6,2	125	300
Ne ⁺³ ₂₀	14,1	282	200
Ne ⁺³ ₂₂	11,6	256	200
Ar ⁺⁵ ₄₀	9,8	390	50
Zn ⁺⁷ ₆₄	7,5	480	30
Kr ⁺⁸ ₈₄	5,7	480	25
Kr ⁺⁹ ₈₄	7,2	602	2
Xe ⁺¹² ₁₈₂	5,2	686	1
Xe ⁺¹³ ₁₈₂	6,1	805	0,2

Авторы выражают глубокую благодарность академику Г.Н. Флерову за постоянное внимание и поддержку и доктору технических наук И.Ф. Малышеву за ценные и полезные советы.

Л и т е р а т у р а

1. И.А. Шелаев и др. Препринт ОИЯИ, 9-3988, Дубна, 1968.
2. В.С. Алфеев и др. Препринт ОИЯИ, Р-2693, Дубна, 1966.
3. И.А. Шелаев и др. Препринт ОИЯИ, Р9-4233, Дубна, 1968.
4. Э.Г. Имаев и др. Препринт ОИЯИ, 9-3713, Дубна, 1968.
5. I.A. Shelaev et al. IEEE transactions on Nucl. Science, v.NS-16, N3, 1969.
6. K.H.Johnson et al, IEEE transactions on Nucl. Science, v.NS-16, N3, 438, 1969.
7. K.W.Ehlers. Nucl.Instr. and Meth., 18-19, 571 (1962).
8. Т. Таут и др. Сообщение ОИЯИ, 9-4368, Дубна, 1969.
9. Е.Д. Донец и др. Препринт ОИЯИ, Р7-4124, Дубна, 1968.
10. И.А. Шелаев и др. Препринт ОИЯИ, Р9-4831, Дубна, 1969.
11. И.А. Шелаев и др. Сообщение ОИЯИ, Р9-5037, Дубна, 1970.

Рукопись поступила в издательский отдел

29 апреля 1970 года.

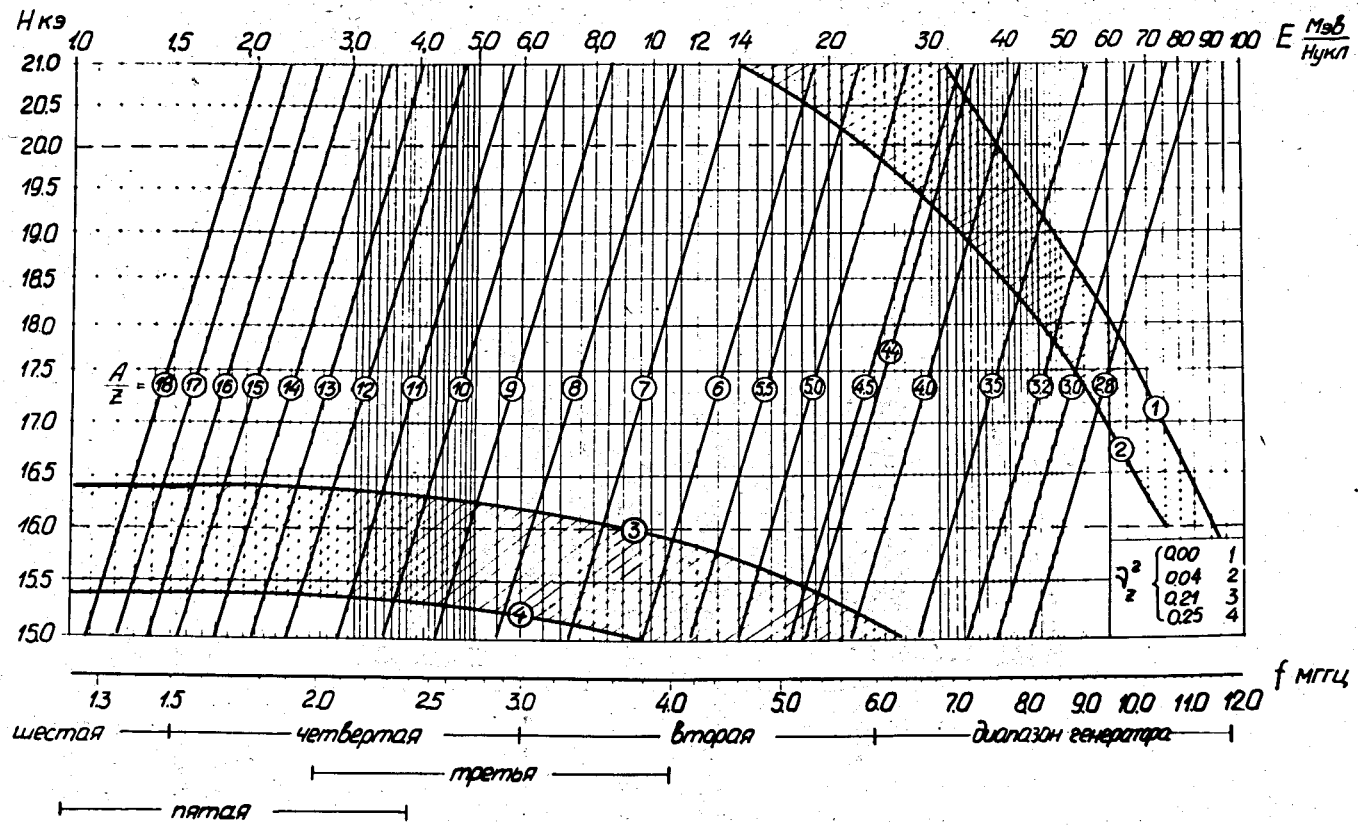


Рис. 1. Энергия ионов с различным A/z (цифры в кружках) в рабочем диапазоне уровней среднего поля H и частота обращения ионов f на конечном радиусе $R_k = 180$ см циклотрона У-400.

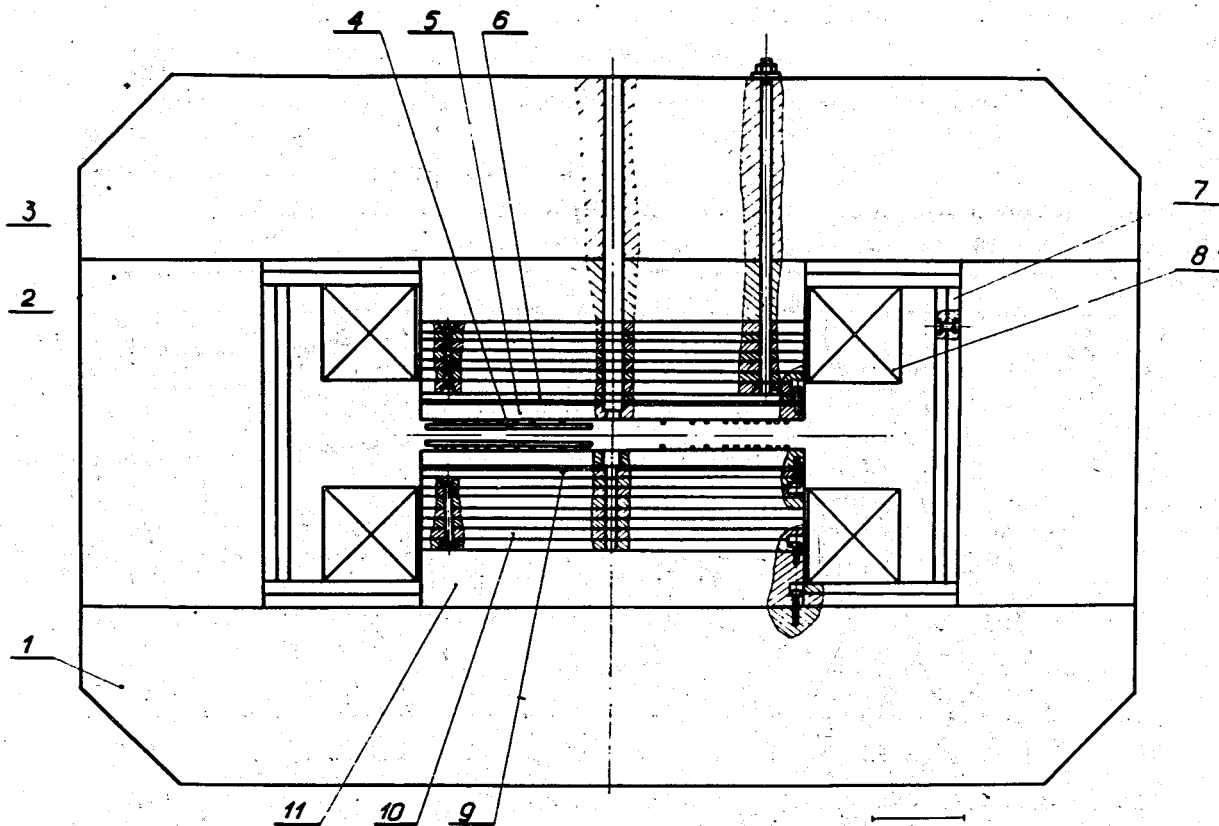


Рис. 2. Электромагнит Е-8 циклотрона У-400. 1 и 3—нижняя и верхняя балки, 2 — стойки, 4 — сектор, 5 — крышка камеры, 6 и 9 — верхний и нижний дистанционные диски, 7 — дополнительное железо яма, 8 — обмотка возбуждения, 10 и 11 — новый и прежний пакеты полюса.

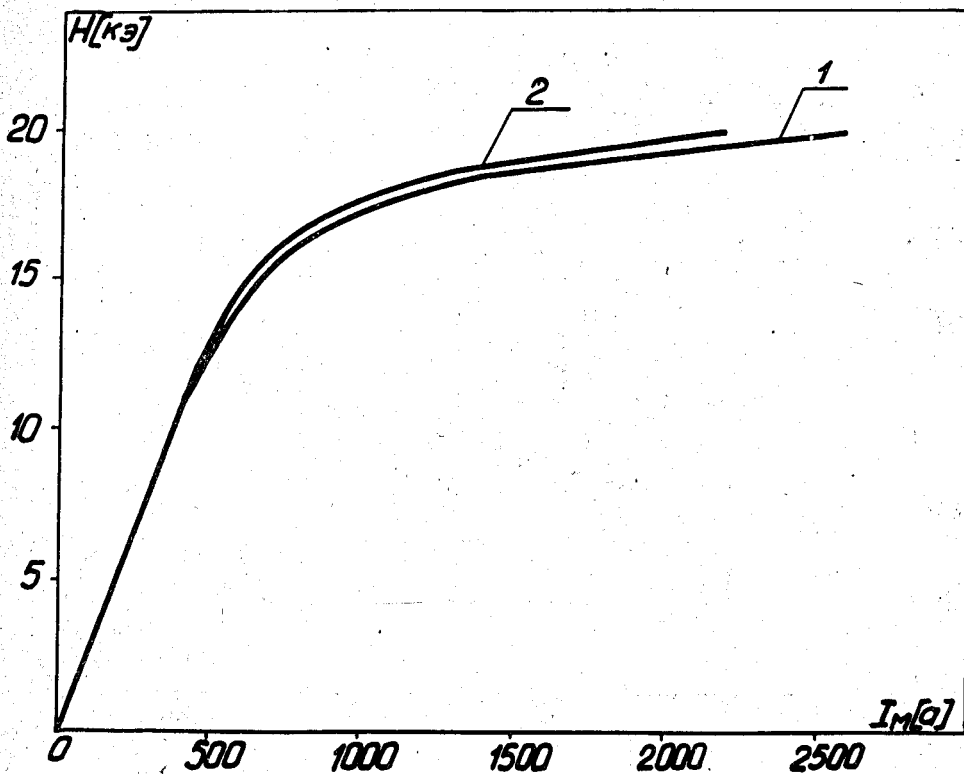


Рис. 3. Кривая возбуждения электромагнита Е-8 для среднего воздушного зазора 200 мм (1) и с дополнительным железом, установленным на ярме (2).

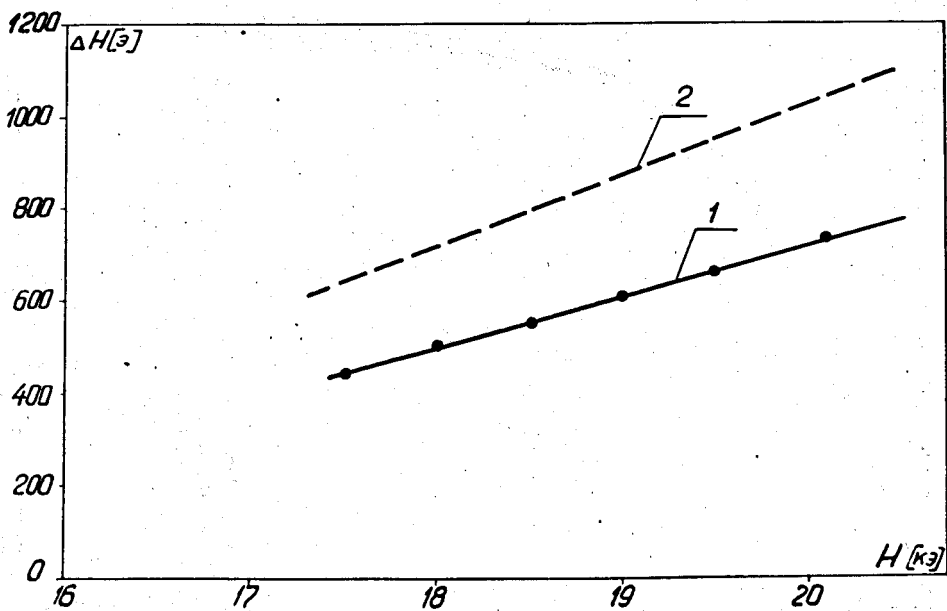


Рис. 4. Дополнительный вклад в среднее магнитное поле в зависимости от уровня поля за счёт сближения основных обмоток возбуждения. 1 - экспериментальная кривая, полученная на циклотроне У-200, 2 - расчётная для У-400.

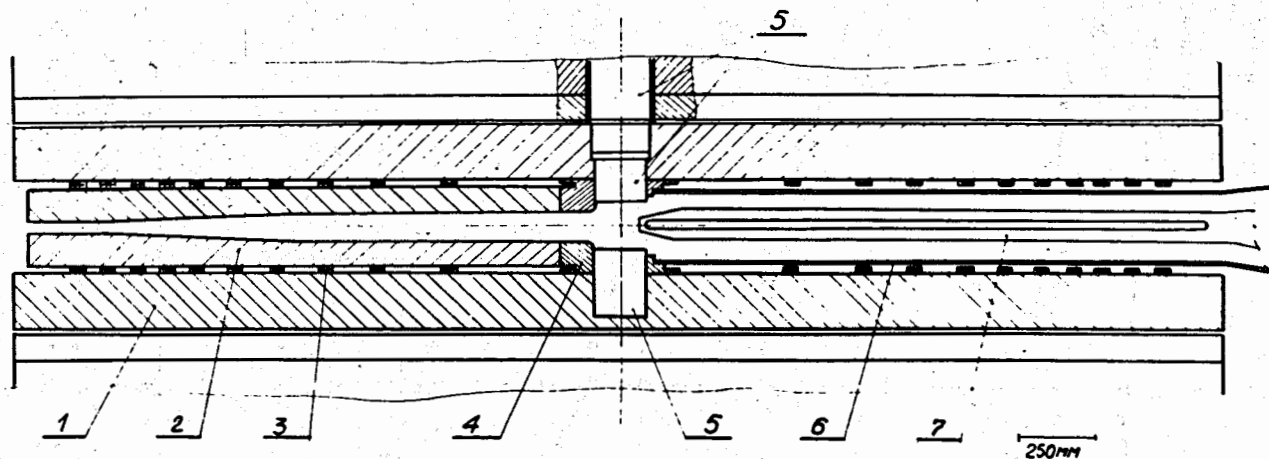


Рис. 5. Геометрия воздушного зазора циклотрона У-400. 1 - стальная крышка камеры, 2 - секторная шимма, 3 - кольцевая корректирующая обмотка, 4 - центральная шимма, 5 - сменные центральные пробки, 6 - плакировка камеры, 7 - дуант.

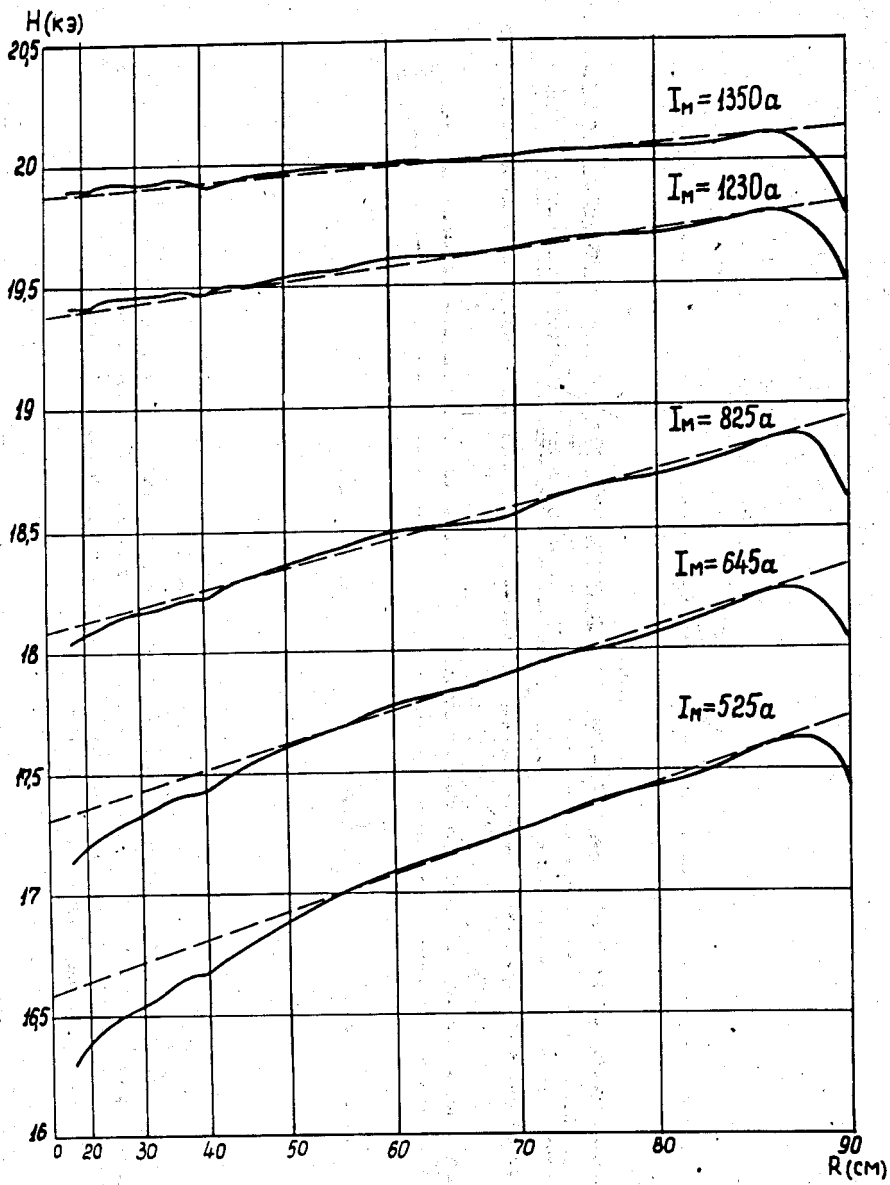


Рис. 6. Распределение среднего магнитного поля по радиусу для циклотрона У-200 при различных токах возбуждения I_M .

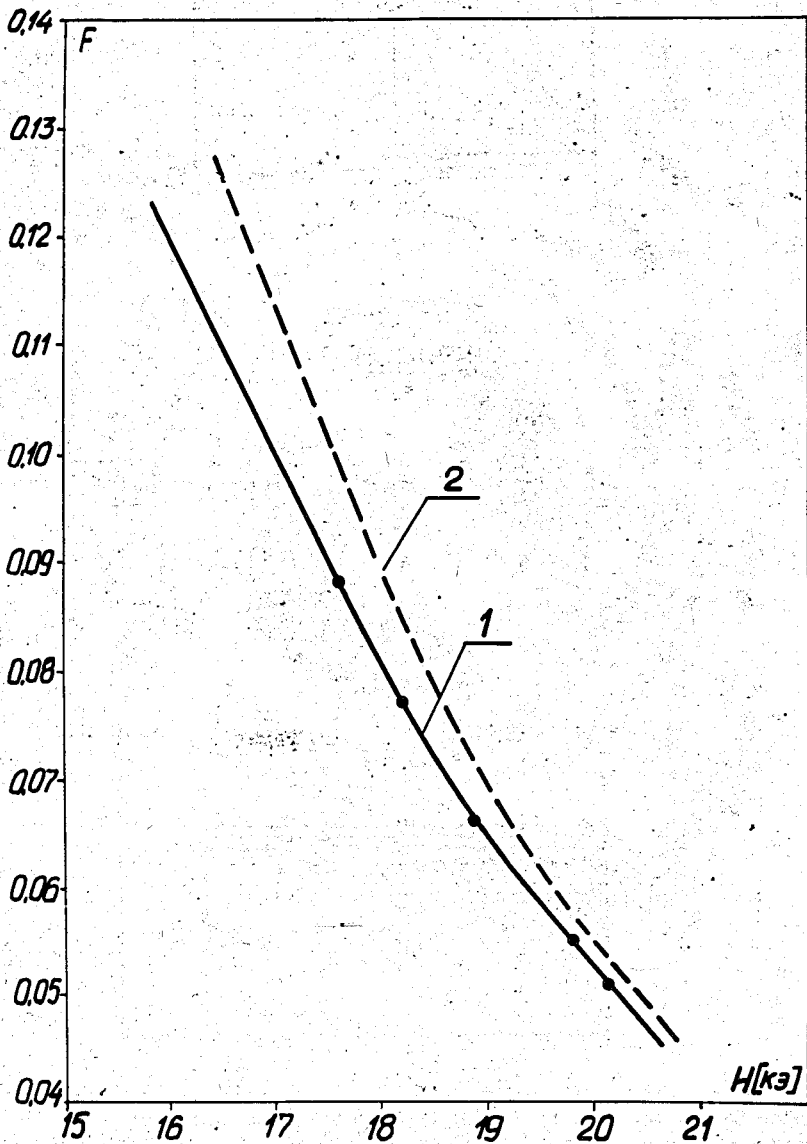


Рис. 7. Зависимость флаттера магнитного поля циклотрона У-200 (1) и скорректированного с учётом высоты секторов флаттера циклотрона У-400 (2) от уровня среднего поля.

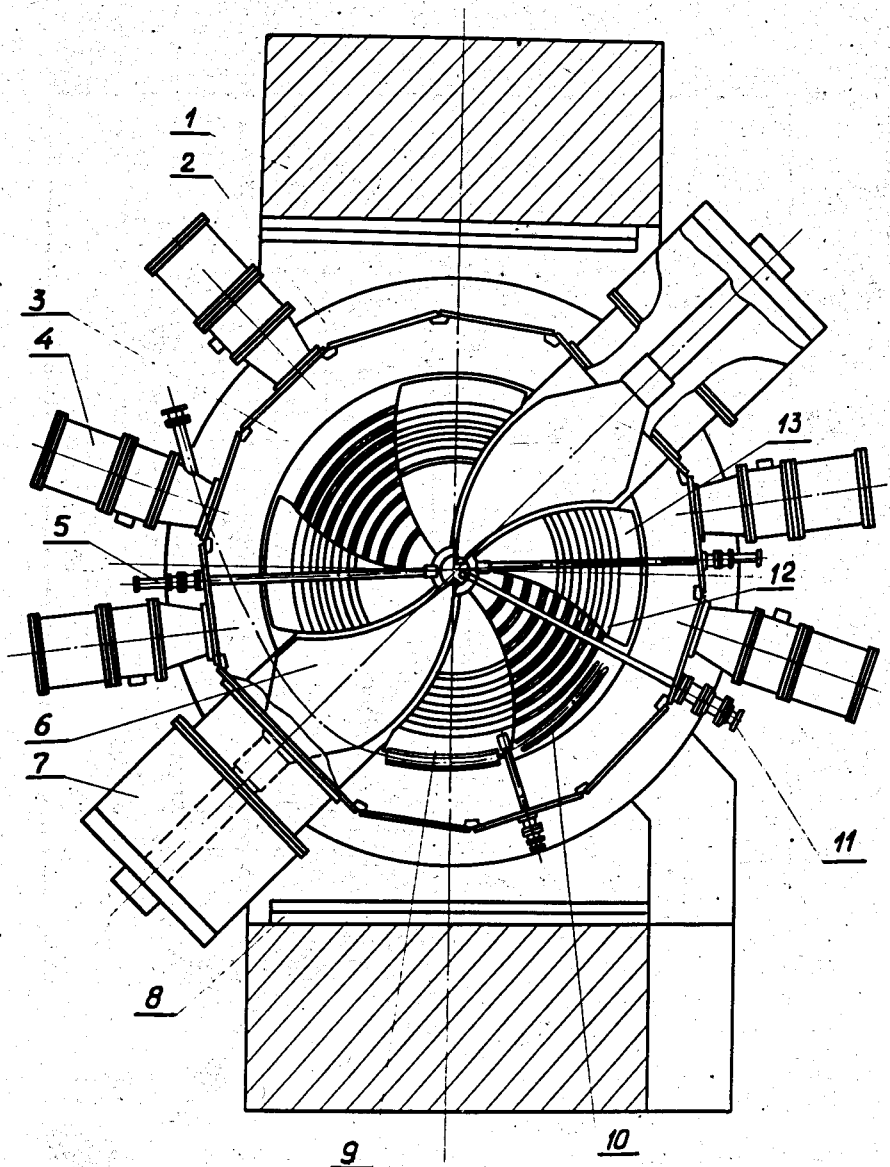
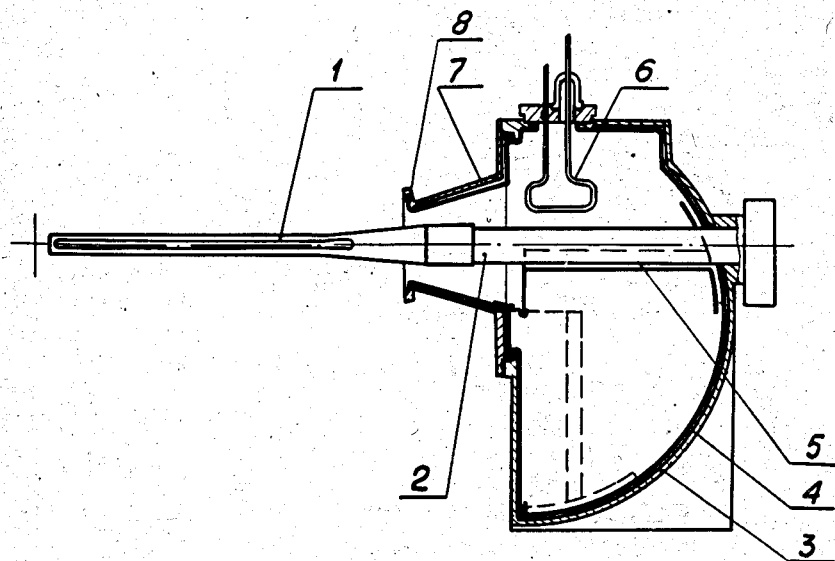


Рис. 8. Схема ускорителя У-400: 1 - стойка электромагнита Е-8, 2 - обмотка возбуждения, 3 - вакуумная камера, 4 - в/в насос ВА-8-4, 5 - шлюзуемый пробник, 6 - дуант, 7 - резонатор, 8 - дополнительное железо ярма, 9 - магнитный канал, 10 - электростатический дефлектор, 11 - ионный источник, 12 - кольцевая корректирующая обмотка, 13 - секторная шимма.



400mm

Рис. 9. Макет резонатора циклотрона У-400: 1 - дуант, 2 - шток, 3 - каркас резонатора, 4 - медная плакировка резонатора, 5 - подвижная панель в положении максимальной частоты (штрихами показано положение панели при минимальной частоте), 6 - виток связи, 7 - переходной патрубков, 8 - фланец.