

тральным плотностям:

$$S_2(f) = \rho_1^2 g^2 S_p(f). \quad (38)$$

Здесь S_2 — составляющая шумов реактивности при наличии пустот; $S_p(f)$ — спектральная плотность относительных флюктуаций давления.

Таким образом, дополнительная составляющая шумов реактивности за счет флюктуаций давления повторяет по форме спектральный состав последних. Она исчезает с исчезновением пустот в реакторе ($g = 0$). При очень малых размерах пузырьков формулу (38) следует поправить, учитывая отличие давления в пузырьке от давления в окружающем его теплоносителе:

$$S_2(f) = \rho_1^2 g^2 S_p(f) \left(\frac{1}{1 + \frac{2\kappa}{r_0 p}} \right)^2. \quad (38a)$$

Последнее выражение показывает, что сокращение размеров пузырьков приводит к постепенному уменьшению вклада названной составляющей до полного ее исчезновения.

Соотношение (38) может быть применено для определения концентрации пустот в теплоносителе. Для получения большей точности при возможности выделить рассматриваемую составляющую целесообразно перейти в формуле (38) к средним квадратам относительных отклонений $\sigma_p^2 = \int_0^\infty S_p(f) df$ и $\sigma_2^2 = \int_0^\infty S_2(f) df$:

$$g = \frac{\sigma_2}{\rho_1 \sigma_p}. \quad (39)$$

Совместное действие на реактивность циркулирующих пузырьков и флюктуаций давления

Две названные выше составляющие действуют обычно совместно, т. е. наблюдается шум реактивности, который в силу статистической независимости действия этих случайных процессов описывается выражением

$$S(f) = \frac{2r'\alpha'}{\gamma Q} g \bar{V} |\Phi(f)|^2 + g^2 \rho_1^2 S_p^2(f). \quad (40)$$

Однако частотный состав составляющих обычно различается. Это отличие может быть использовано для их разделения (первая составляющая часто имеет более широкую полосу частот, чем вторая). В этом случае по зависимости $S(f)$ можно определить отдельно концентрацию пустот в теплоносителе g и средний объем пузырька \bar{V} .

Как уже отмечалось, рассматриваемые компоненты обладают различной чувствительностью к размерам пузырьков. Если первая составляющая наблюдается лишь при сравнительно крупных размерах пузырьков, то вторая проявляется при гораздо менее жестких условиях.

Полученные выше зависимости могут быть полезны при анализе реакторных шумов, в том числе для исследования процессов кипения теплоносителей в реакторе.

В заключение автор благодарит С. А. Морозова и Г. П. Кривелева за полезные дискуссии.

Поступила в Редакцию 11/V 1970 г.
В окончательной редакции 22/VII 1970 г.

Проект четырехметрового изохронного циклотрона ОИЯИ с плавно регулируемой энергией тяжелых ионов

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

УДК 621.384.633

Дальнейшее развитие физики ядерных реакций между сложными ядрами связано с использованием в этих реакциях пучков быстрых ионов все более тяжелых элементов, а также с повышением их энергии и интенсивности. С этой целью в Лаборатории ядерных реакций ОИЯИ на основе результатов, полученных при создании двухметрового изохронного циклотрона ОИЯИ У-200 [1], спроектирован четырехметровый изохронный циклотрон (ускоритель У-400).

В настоящее время в ОИЯИ ведутся работы по изготовлению 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 ускорителя У-400 существенно отличаются от У-300. Циклотрон У-400 во многом подобен ускорителю У-200, который можно

Параметры циклотронов У-300 и У-400 Таблица 1

Продолжение табл. 1

Характеристика системы	У-300	У-400
Электромагнит		
Диаметр полюсных наконечников, см	310	400
Конечный радиус ускорения, см	138	180
Вес магнита, т	1900	2260
Средний воздушный зазор, мм	540	200
Число витков основной обмотки возбуждения	2×224	2×224
Рабочий ток в обмотке электромагнита, а	1870	1000 ÷ 2500
Среднее значение магнитного поля, кэ	16,7	16 ÷ 20
Число секторов	—	4
Угол спирали	—	30°
Радиальный спад магнитного поля, %	0,8	Изохронный
Число вспомогательных обмоток	4	19
ВЧ-система	2	2
Число дуантов		
Азимутальная протяженность дуанта	180°	45°
Напряжение на дуанте, кэ	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	Закорачивающая пластина	Подвижная панель
Стабильность напряжения на дуанте, %	Нет	0,2
Режим работы	Импульсный	Любой
Вакуумная система		
Объем вакуумной камеры, м ³	75	25
Давление в камере, мм рт. ст.	6·10 ⁻⁶	1·10 ⁻⁶
Число высоковакуумных паромасляных насосов	5	5 (7)
Производительность одного насоса, сек ⁻¹	20000	8000
Система вывода и транспортировки пучка		
Азимутальная протяженность deflectора, градусы	103	45
Входной и выходной каналы, мм	8/22	6
Высшее напряжение deflectора, кэ	40—60	40—60
Азимутальная протяженность фокусирующего магнитного канала, градусы	34	45
Градиент поля в канале, э/см	450	1500

Характеристика системы	У-300	У-400
Число выведенных пучков	1	2
Число коммутирующих магнитов	2	3
Число рабочих направлений	12	16
Эффективность вывода, %	30	30—100
Пучки		
Энергия ускоряемых ионов, Мэв/нуклон	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

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 с различными A/Z и частота обращения этих ионов в выбранном диапазоне рабочих уровней среднего магнитного поля циклотрона (16—20 кэ на конечном радиусе 180 см). На этом рисунке заштрихованные граничные области соответствуют возникающим в этих областях нарушениям условий устойчивости бетатронных колебаний. Расширение диапазона конечной энергии ускоряемых на циклотроне ионов с $E = 5 \div 10$ до $E = 1 \div 50$ Мэв/нуклон и интервала отношений A/Z с 5—7 до 3,5—25 обеспечивается повышением уровня магнитного поля, введением азимутальной вариации и другими изменениями в конструкции циклотрона.

Магнитная структура

С целью повышения уровня магнитного поля до 20 кэ поперечное сечение магнитопровода электромагнита (рис. 2) увеличивается на 13%, а расстояние между основными обмотками возбуждения уменьшается на 500 мм. Конический полюсный наконечник ($D_{\text{макс}} = 400$ см, $D_{\text{мин}} = 310$ см) заменяется цилиндрическим диаметром 400 см. Новый полюсный наконечник набирается из отдельных дисков по той же технологии, что и для циклотрона У-200 [3]. Средний воздушный зазор между полюсами уменьшен с 540 до 200 мм.

Расчеты магнитной цепи и экстраполяция экспериментальных результатов, полученных

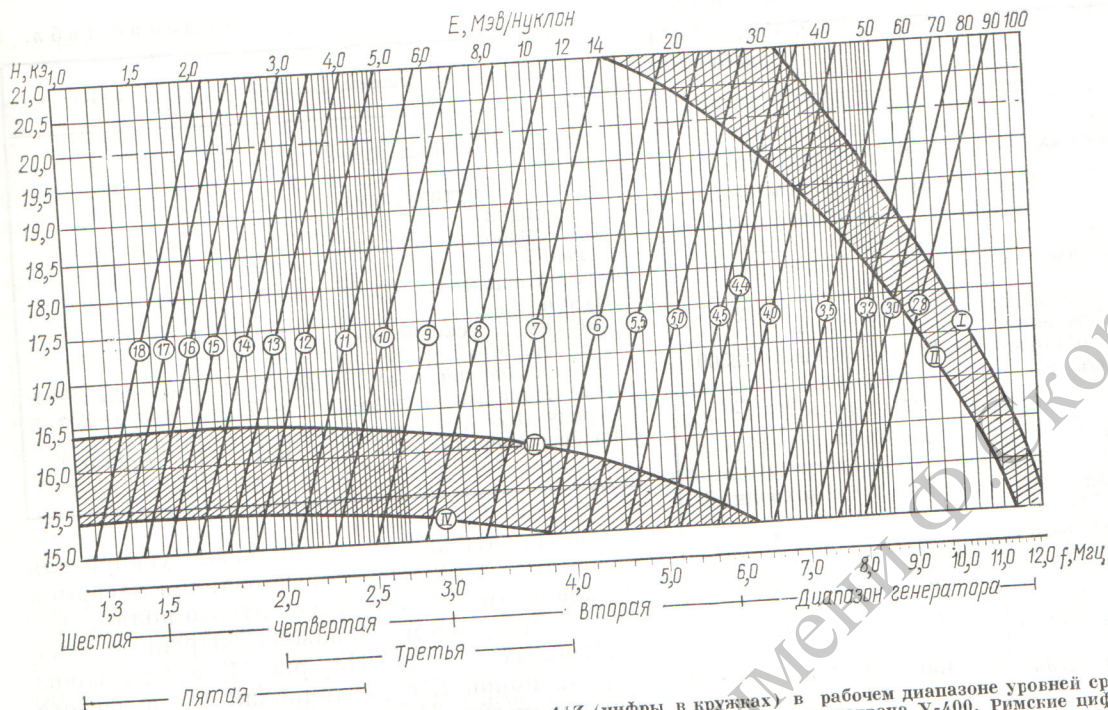


Рис. 1. Энергия ионов с различными значениями A/Z (цифры в кружках) в рабочем диапазоне уровней среднего поля H и частота обращения ионов f на конечном радиусе $R_k = 180$ см циклотрона У-400. Римские цифры I—IV соответствуют значениям v_z^2 , равным 0; 0,04; 0,21; 0,25.

на циклотроне У-200, показывают, что после выполнения указанных выше изменений сред-

нее магнитное поле величиной 20—20,5 кэ может быть получено при токе возбуждения в основной обмотке 2200—2500 а. Это позволяет сохранить без изменения прежнюю систему питания электромагнита.

Магнитный зазор циклотрона У-400 представлен на рис. 3. Зазор между стальными крышками вакуумной камеры равен 300 мм. В этом зазоре размещены элементы формирования структуры магнитного поля (секторы, концентрические обмотки и пр.) и дуанты. Эти элементы рассчитывались с учетом результатов, полученных на циклотроне У-200. Изохронная форма магнитного поля определяется выражением

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

где W — кинетическая энергия иона на нуклон; E_0 — энергия покоя протона; эта форма обеспечивается кольцевыми шиммами и концентрическими обмотками. Расчет необходимой конфигурации кольцевых шимм проводился на ЭВМ. Как показали эксперименты на У-200, точность этих расчетов составляет около 10%

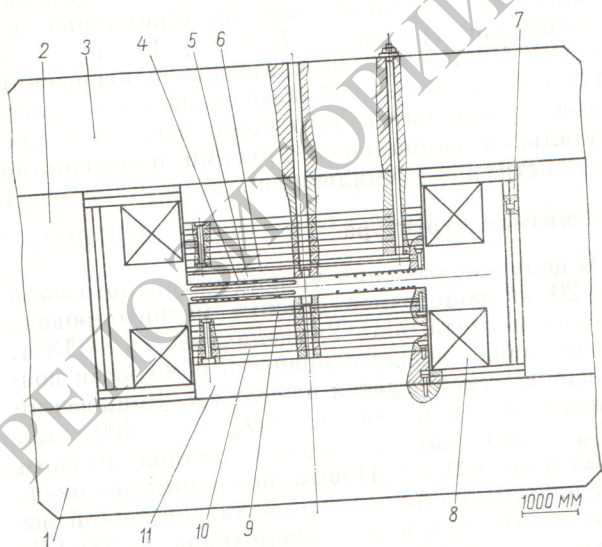


Рис. 2. Электромагнит циклотрона У-400: 1, 3 — нижняя и верхняя балки; 2 — стойки; 4 — сектор; 5 — крышка камеры; 6, 9 — верхний и нижний дистанционные диски; 7 — дополнительное железо ярма; 8 — обмотка возбуждения; 10, 11 — новый и прежний пакеты полюса.

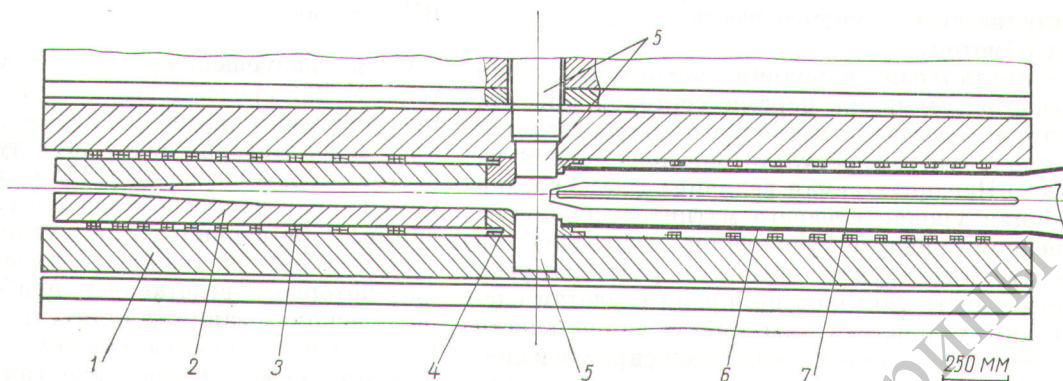


Рис. 3. Геометрия воздушного зазора циклотрона У-400:

1 — стальная крышка камеры; 2 — секторный шимм; 3 — кольцевая корректирующая обмотка; 4 — центральный шимм; 5 — сменные центральные пробки; 6 — плакировка камеры; 7 — диаметр.

полного вклада шимм ($\sim 1,5$ кэ), поэтому дальнейшая коррекция поля будет осуществляться экспериментально. В циклотроне У-400 такие шиммы размещаются только на секторах и выполняются одновременно с ними. Этот вариант размещения шимм несколько усложняет изготовление секторов, но в то же время позволяет уменьшить высоту кольцевых шимм и упрощает технологию их изготовления.

Коррекция среднего магнитного поля во всем рабочем интервале уровней полей осуществляется концентрическими обмотками. Расчет необходимых для коррекции ампер-витков проводился на ЭВМ методом наименьших квадратов для двух вариантов распределения обмоток по радиусу — равномерно по r и r^2 . Для получения изохронной формы магнитного поля в допустимых радиальных градиентах число пар обмоток варьировалось от 8 до 12. Следует отметить, что при распределении обмоток равномерно по r^2 величины ампер-витков каждой обмотки оказываются близкими друг к другу. Токовая корректирующая система У-400 содержит десять пар концентрических обмоток (суммарное число ампер-витков $IW = 22\,500$). Каждая кольцевая обмотка состоит из трех витков медного проводника $11,5 \times 11,5$ мм с отверстиями диаметром 8 мм для охлаждения. Витки, изолированные стеклолентой диоксидным компаундом, уложены в алюминиевый каркас, помещенный под секторами (см. рис. 3).

Каждая концентрическая обмотка питается от шестифазного кремниевого выпрямителя через дроссель фильтра. Регулирование тока (от 0 до 900 а) осуществляется магнитным уси-

лителем, включенным в первичную цепь понижающего трансформатора. Для трех пар концентрических обмоток предусмотрено раздельное питание верхней и нижней обмоток для коррекции медианной плоскости. Контроль амплитуды и фазы низших гармоник азимутальной неоднородности магнитного поля осу-

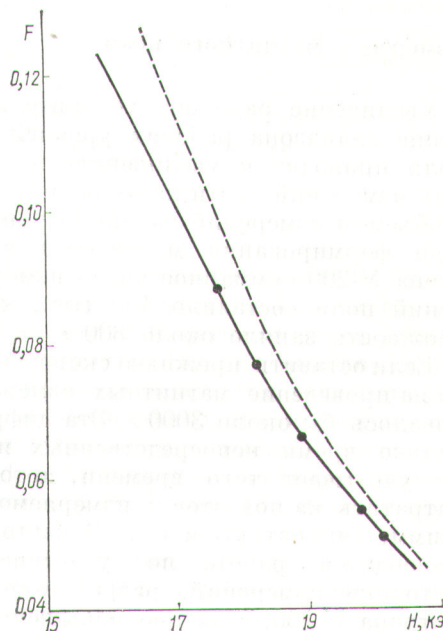


Рис. 4. Зависимость флаттера магнитного поля циклотрона У-200 (—) и скорректированного с учетом высоты секторов флаттера циклотрона У-400 (---) от уровня среднего поля на конечном радиусе ускорения.

ществляется с помощью шести пар азимутальных обмоток.

Азимутальная вариация магнитного поля создается четырьмя парами секторов. Высота сектора и флаттера магнитного поля рассчитывалась с учетом результатов, полученных на У-200. Предполагаемая величина флаттера как функция уровня среднего магнитного поля на конечном радиусе ускорения приведена на рис. 4. Используя эти значения флаттера, угол спиральности секторов выбирали с учетом следующих условий. С введением спиральности увеличивается вертикальная фокусировка и снижаются допуски на формирование магнитного поля, особенно на высоких уровнях. Однако при больших углах уменьшаются пределы регулирования поля, так как с уменьшением уровня поля величина v_z возрастает до 0,5. Угол спиральности секторов выбран равным 30° , чтобы при уровне магнитного поля 16 кэ для ионов с энергией до 5 Мэв/нуклон величина $v_z \leq 0,5$.

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

Измерение магнитного поля

Увеличение размеров ускорителя и расширение диапазона рабочих уровней магнитного поля приводит к увеличению объема магнитных измерений почти на порядок по сравнению с объемом измерений на циклотроне У-200 [4]. При формировании магнитного поля циклотрона У-200 суммарное число измеренных значений поля составило 400 тыс., что в общей сложности заняло около 300 г.

Если оставить прежнюю скорость измерений, то на проведение магнитных измерений потребовалось бы около 3000 г. Эта цифра включает только время непосредственных измерений и не учитывает того времени, которое следует затратить на подготовку измеряемого варианта шимм, аппаратуры и пр. В настоящее время проводится работа по усовершенствованию методики измерений, разработанной для циклотрона У-200, с целью повышения в три-четыре раза скорости измерений при сохранении и даже повышении их точности, а также с целью увеличения надежности и скорости записи результатов измерений.

ВЧ-система

Схема размещения основных узлов ускорителя У-400 представлена на рис. 5. Сохранение прежнего яра электромагнита затрудняет использование более двух дуантов. Выбор частотного диапазона (6—12 Мгц) для двухдуантового варианта определен следующими условиями. Во-первых, для ускорения ионов с $A/Z = 7 \div 12$ (наиболее тяжелых, получение которых представляет наибольший интерес) использование амплитуды ускоряющего напряжения было бы наиболее эффективным. Максимальный прирост энергии, получаемый частицей за один оборот, в такой системе составляет

$$\Delta E_{\text{макс}} = 4Z_e U_g \sin \frac{n\pi}{8},$$

где n — номер гармоники ускоряющего напряжения. Во-вторых, амплитуда ускоряющего напряжения должна быть такой, чтобы при выбранных зазорах дуант — плакировка камеры (7 см) практически полностью исключала-

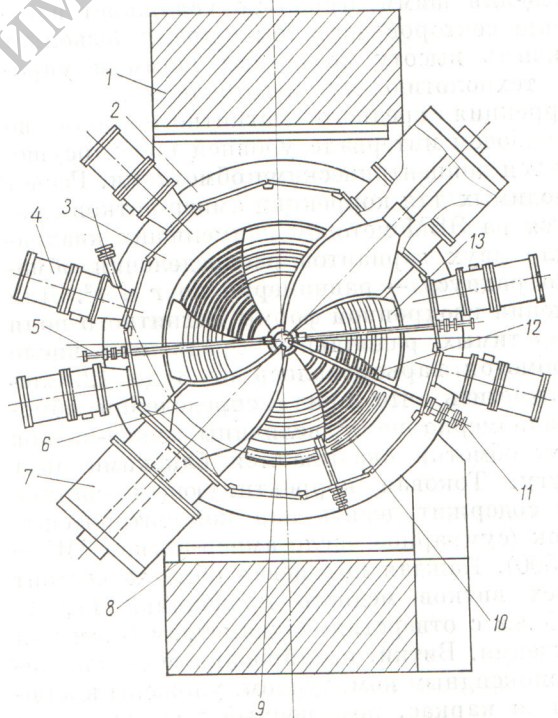


Рис. 5. Схема ускорителя У-400:

- 1 — стойка электромагнита; 2 — обмотка возбуждения;
- 3 — вакуумная камера; 4 — высоковакуумный насос ВА-8-4;
- 5 — плюсуемый пробник; 6 — дуант; 7 — резонатор; 8 — дополнительное железо яра; 9 — магнитный канал; 10 — электростатический дефлектор; 11 — ионный источник; 12 — концентрическая обмотка; 13 — секторный шимм.

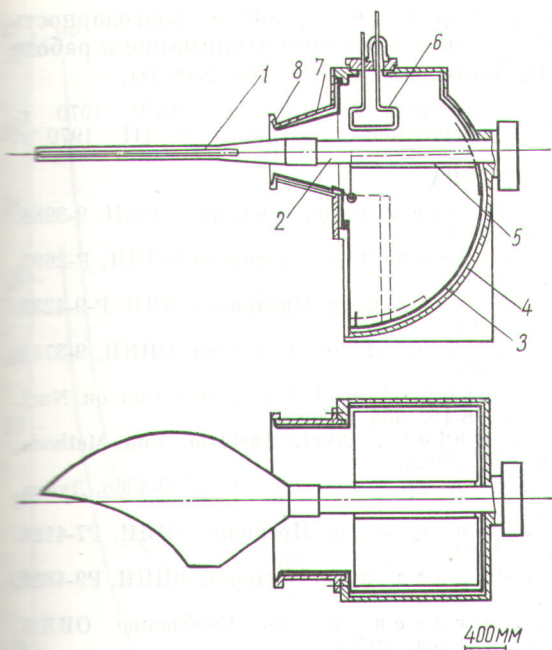


Рис. 6. Макет резонатора циклотрона У-400:

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.

лись пробои в камере, этим обеспечивается устойчивая работа машины в непрерывном и импульсном режимах. Наконец, третье условие при выборе частотного диапазона состояло в том, чтобы он был бы кратным диапазону частоты имеющегося генератора «Апатит» ($f = 3 \div 6 \text{ Мгц}$).

Исходя из этого для ионов с $A/Z = 7 \div 12$ выбран режим ускорения на второй — четвертой гармонике (см. рис. 1). Тогда при амплитуде напряжения на дуанте $U_g = 100 \text{ кВ}$ эти ионы, ускоряясь до конечной энергии, будут совершать около 200 оборотов. Увеличение числа оборотов и работа на высоких гармониках частоты обращения ионов требует стабилизации амплитуды ускоряющего напряжения с точностью порядка $\pm 0,2\%$. Частота дуантного контура регулируется в заданном диапазоне с помощью движущейся панели.

Выбранный для циклотрона У-400 вариант резонатора с одной вращающейся панелью [5] позволяет сравнительно просто осуществить изменение частоты дуантного контура вдвое. Макет резонатора циклотрона У-400 изображен на рис. 6. 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 в натуральную величину, показали, что напряжение на дуанте амплитудой 100 кВ обеспечивается на любой частоте заданного диапазона при мощности генератора $75-100 \text{ кВт}$.

Ионные источники

Сравнительно большой зазор между крышками вакуумной камеры циклотрона У-400 (см. рис. 5) позволяет использовать ионные источники в горизонтальном и вертикальном исполнениях. Источники горизонтальной конструкции предназначаются в основном для получения ионов элементов, находящихся в обычных условиях только в твердом состоянии, так как в этом случае размеры камеры увеличиваются за счет испарителей рабочего вещества, размещаемых в непосредственной близости. Вертикальное отверстие в ярме электромагнита позволяет применить ионный источник в вертикальном исполнении [6, 7], кроме того, оно может быть использовано для внешней инжекции пучка тяжелых ионов от источников, работающих на иных принципах [8]. Размещение таких источников в камере ускорителя и их работа в магнитном поле циклотрона представляет определенные трудности.

Вывод пучка

Вывод пучка из циклотрона У-400 будет осуществляться двумя методами — электростатическим дефлектором и методом перезарядки ионов на тонкой фольге [9, 10]. Как показали опыты на У-200, реализация этих двух методов не встретит принципиальных трудностей, однако вследствие испарения и распыления перезаряженной фольги вывод интенсивных пучков тяжелых ионов с $A \geq 40$ методом перезарядки ограничен.

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 счет ускорения в изохронном режиме ионов элементов с меньшим зарядом или увеличить их энергию при

Энергия и интенсивность ионов, которые будут ускорены в циклотроне У-400 Таблица 2

Тип ускоряемых ионов	Энергия, Мэв/нуклон	Интенсивность внутреннего пучка, частиц/сек
Ne ₂₀ ⁺²	6,2	9 м·10 ¹⁴
Ne ₂₀ ⁺³	14,1	4·10 ¹⁴
Ne ₂₂ ⁺³	11,6	4·10 ¹⁴
Ar ₄₀ ⁺⁵	9,8	6·10 ¹³
Zn ₆₄ ⁺⁷	7,5	2,5·10 ¹³
Kr ₈₄ ⁺⁸	5,7	1,8·10 ¹³
Kr ₈₄ ⁺⁹	7,2	1,3·10 ¹²
Xe ₁₃₂ ⁺¹²	5,2	5·10 ¹¹
Xe ₁₃₂ ⁺¹³	6,1	10 ¹¹

ускорении ионов 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.

Авторы выражают глубокую благодарность Г. Н. Флёрову за постоянное внимание к работе и И. Ф. Малышеву за ценные советы.

Поступила в Редакцию 13/V 1970 г.
В окончательной редакции 3/VIII 1970 г.

ЛИТЕРАТУРА

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, Р-9-4233. Дубна, 1968.
4. Э. Г. Имаев и др. Препринт ОИЯИ, 9-3713. Дубна, 1968.
5. T. Johnson et al. IEEE Transaction on Nucl. Science, NS-16, 438 (1969).
6. K. W. Ehlers. Nucl. Instrum. and Methods, 18-19, 571 (1962).
7. Т. Гаут и др. Сообщение ОИЯИ, 9-4368. Дубна, 1969.
8. Е. Д. Донец и др. Препринт ОИЯИ, Р7-4124. Дубна, 1968.
9. И. А. Шелаев и др. Препринт ОИЯИ, Р9-4831, 1969.
10. И. А. Шелаев и др. Сообщение ОИЯИ, Р9-5037. Дубна, 1970.

Система медленного наведения ускоренного пучка на внутренние мишени ускорителя ИФВЭ на энергию 70 Гэв

В. И. ГРИДАСОВ, А. А. КАРДАШ, К. М. КОЗЛОВ, О. В. КУРНАЕВ;
В. В. ЛАПИН, С. В. ЛОБАНОВ, Л. Л. МОЙЖЕС, К. П. МЫЗНИКОВ, А. А. НАУМОВ

УДК 621.384.6

Большинство физических экспериментов, использующих счетную методику, проводится на ускорителе ИФВЭ с пучками вторичных частиц, образуемыми на внутренних мишенях. На каждый из действующих каналов работает по нескольку мишеней. Положение мишеней внутри вакуумной камеры выбирается таким образом, чтобы обеспечить вывод в канал вторичных частиц в широком диапазоне импульсов с минимальными углами рождения. При этом удается получить большую интенсивность выведенных пучков вторичных частиц — до 10⁶ частиц в импульсе. В оптимальном положении мишени смещены по радиусу относительно центра вакуумной камеры на расстояние вплоть до ±5 см. Наведение ускоренного пучка на мишени производится в течение плоской части магнитного цикла ускорителя. Длительность наведения составляет 1,5 сек при стабильности поля ускорителя 4·10⁻⁴ на уровне 12 кэ и относительной величине амплитуд пульсаций преобладающих частот 25, 50, 150 ц, равной 2 ÷ 3·10⁻⁵.

Для эффективного использования пучков вторичных частиц необходимо максимально увеличивать длительность вывода и ликвидировать модуляцию плотности выведенных пучков. В ускорителе ИФВЭ увеличение длительности вывода свыше 1 сек достигается уменьшением скорости наведения пучка на мишень до 3—5 мм/сек. При таких скоростях получить достаточно равномерные во времени интенсивности пучков и устранить модуляцию, определяемую пульсациями магнитного поля, можно только введением в систему наведения обратной связи по току частиц с мишени.

В этих условиях совершенно неприемлемы широко используемые на ускорителях методы наведения пучка на мишень путем изменения режимов ВЧ-ускорения [1]. Они не дают возможности смещать пучок на расстояние ±5 см от равновесной орбиты без потери устойчивости и не позволяют ликвидировать временную структуру выведенного пучка. Описываемая ниже система наведения ускоренного пучка на внутренние мишени основана на искусст-