

ОБЪЕДИНЕННЫЙ  
ИНСТИТУТ  
ЯДЕРНЫХ  
ИССЛЕДОВАНИЙ  
ДУБНА

384/83

14/1-83

9-82-756

Ю.Ц.Оганесян, И.В.Колесов, Г.Г.Гульбемян,  
А.И.Иваненко, Б.А.Кленин, С.И.Козлов,  
В.Б.Кутнер, В.Н.Мельников, Р.Ц.Оганесян,  
В.Н.Покровский, К.И.Семян, В.А.Чугреев

ЦИКЛОТРОННЫЙ КОМПЛЕКС  
ДЛЯ ПОЛУЧЕНИЯ ПУЧКОВ ТЯЖЕЛЫХ ИОНОВ  
С ЭНЕРГИЕЙ 20-120 МэВ/нуклон

Направлено в Оргкомитет VIII Всесоюзного  
совещания по ускорителям заряженных частиц,  
Протвино, октябрь 1982 года.

1982

Исследования на пучках тяжелых ионов в широком диапазоне масс вплоть до пучков ионов урана с энергией от 10-50 до 100-200 МэВ/нуклон представляют большие потенциальные возможности решения как фундаментальных научных проблем, так и важнейших народнохозяйственных задач. Пучки наиболее тяжелых бомбардирующих частиц, таких как ионов свинца и урана, дают большие возможности в области синтеза и изучения свойств тяжелых и сверхтяжелых ядер, имеющей первостепенное значение для решения вопроса о пределах стабильности химических элементов.

Работая с тяжелыми ионами с энергией до 10 МэВ/нуклон, ученые ряда стран /существенный вклад внесли ученые Дубны/ смогли получить ценную информацию о свойствах целого ряда ядер, удаленных от  $\beta$ -стабильности. Повышение энергии тяжелых ионов позволит перейти к получению нуклидов на границе ядерной стабильности, что исключительно важно для развития ядерной теории и некоторых актуальных направлений в астрофизике.

В последние годы резко возрос интерес к изучению поведения ядерной материи в экстремальных условиях. Ускоренные тяжелые ионы представляют собой уникальный инструмент для получения ядерной материи в состояниях аномально высокой плотности и температуры, в которых должны проявиться очень интересные и, возможно, неожиданные явления.

При изучении макроскопических свойств ядерного вещества большое значение имеют эксперименты, в которых проявляются коллективные движения большой амплитуды и процессы диссипации энергии такого движения. Реакции с тяжелыми ионами представляют собой практически единственный путь для получения ценной информации о таких явлениях.

Особый интерес проявляется к изучению процессов кумулятивного рождения мезонов и генераций высокоэнергичных нуклонов и легких ядер при столкновениях сложных ядер вблизи порога рождения / $\geq 80$  МэВ/нуклон для рождения мезонов/. Высокоэнергичные пучки тяжелых ионов позволяют проводить важнейшие исследования в области атомной физики, к которым относятся исследования электронной структуры сильно ионизованных атомов и изучение химических процессов в сильно ионизованных средах.

Исключительно большой интерес вызывает возможность проверки законов квантовой электродинамики в сверхсильных полях, возникающих при столкновении двух ядер урана.

Большие перспективы связаны с использованием тяжелых ионов для решения важнейших научно-технических и прикладных задач. 1

Решение большого числа важнейших народнохозяйственных задач связано с исследованиями по радиационному материаловедению. Здесь следует выделить такие актуальные проблемы, как масштабное и экспрессное моделирование радиационных повреждений в конструкционных материалах ядерных энергетических установок, глубокую послойную имплантацию разнообразных ионов с целью получения новых материалов для техники /сверхпроводники, полупроводниковые материалы и т.д./ . Важное значение имеют дальнейшие работы по получению новых типов ядерных фильтров из полимерных материалов, способных выдерживать условия высокой температуры и агрессивной среды.

Пучки тяжелых ионов открывают большие возможности в изучении биологических процессов и в медицинской диагностике с использованием облучений биологических объектов короткоживущими радиоактивными изотопами углерода, азота и кислорода.

Проведение исследований во всех перечисленных направлениях накладывает определенные требования на пучки ускоренных тяжелых ионов. Во-первых, должна быть обеспечена возможность ускорения ионов всех химических элементов. Во-вторых, энергия пучков должна быть  $\geq 100$  МэВ/нуклон. В-третьих, для проведения исследований по ряду важнейших направлений, таких как синтез новых элементов и ядер, удаленных от  $\beta$ -стабильности, изучение редких каналов реакций /рождение мезонов и высокоэнергичных фрагментов/, изучение подпороговых процессов, редких процессов распада и др., необходимо получение высокой интенсивности пучков  $> 10^{11} \text{ с}^{-1}$  /.

При достижении интенсивности пучка  $10^{12} \text{ с}^{-1}$  появляется возможность проведения исследований /подобно мезонам и пионам на протонных ускорителях/ на пучках вторичных ионов - радиоактивных продуктах реакций и осколках деления, отличающихся большой вариацией по параметру  $\Delta A/Z$ . Это такие ионы, как  $^6\text{He}$ ,  $^8\text{He}$ ,  $^{16}\text{C}$ ,  $^{11}\text{C}$ ,  $^{13}\text{N}$ ,  $^{15}\text{O}$ ,  $^{145}\text{Xe}$ ,  $^{139}\text{I}$ ,  $^{94}\text{Kr}$  и др.

Рассматривая различные модели ускорительных систем и современные достижения в области получения высокозарядных ионов, можно прийти к заключению, что наиболее эффективным для получения требуемых пучков ионов является тандемный метод ускорения, предусматривающий использование предускорителя, генерирующего пучки ионов с энергией до 2 МэВ/нуклон, с последующим резким повышением заряда ионов за счет потери электронов на твердой мишени, после чего проводится ускорение ионов до высоких энергий на второй ступени.

При ускорении до энергии 100-200 МэВ/нуклон наибольшая интенсивность пучка может быть достигнута на установках циклотронного типа. Этот метод был впервые использован в 1971 году в Лаборатории ядерных реакций ОИЯИ для получения пучков тяжелых ионов вплоть до  $^{136}\text{Xe}$  на тандеме циклотронов и был принят в качестве основы при сооружении целого класса новых ускорителей тяжелых ионов третьего поколения.

В настоящее время в Лаборатории ядерных реакций ОИЯИ разработан проект создания циклотронного комплекса, включающего в качестве предускорителя мощный циклотрон тяжелых ионов У-400 /1/ и последующий ускоритель - циклотрон с разделенными секторами У-1000. Вместе с тем, анализируя результаты, а также тенденции развития физических и физико-технических исследований, проведенных во многих лабораториях мира в последние годы /США, Канада, Япония, Франция, ФРГ, Италия, Китай и др./, и исходя из основных положений, лежащих в основе ранее рассмотренного проекта циклотронного комплекса, можно прийти к заключению, что решение этой задачи может быть достигнуто в значительно более короткий срок и значительно более скромными средствами, если в качестве второй ступени использовать модернизированный циклотрон У-300 /У-400М/. Подобный комплекс позволит получать все пучки ионов от кислорода до урана с интенсивностью  $5 \cdot 10^{12} - 10^{11} \text{ с}^{-1}$  и с энергией 120-20 МэВ/нуклон соответственно. Такой ускорительный комплекс будет превосходить по интенсивности все действующие и сооружаемые установки тяжелых ионов в этом диапазоне энергий. По нашим оценкам, он будет иметь это преимущество по крайней мере в течение ближайших 10 лет.

#### 1. КРАТКОЕ ОПИСАНИЕ КОМПЛЕКСА ЦИКЛОТРОНОВ

Ускорительная установка из двух циклотронов У-400 и У-400М, схема которой приведена на рис.1, предназначена как для получения сверхтяжелых ионов, таких как  $\text{Xe-U}$  с энергией 20-40 МэВ/нуклон, так и легких с энергией ~120 МэВ/нуклон. Ионы, ускоренные в циклотроне-инжекторе У-400, выводятся электростатическим дефлектором, транспортируются по ионопроводу длиной ~120 м до циклотрона У-400М и, повышая свой заряд при прохождении тонкой мишени, инжектируются на равновесную орбиту и затем ускоряются до конечной энергии. Некоторые параметры ионов, ускоряемых в рассматриваемом комплексе циклотронов, приведены в табл.1.

Таблица 1

Ионы	У-400		У-400М	
	$z_1$	МэВ/нукл.	$z_2$	МэВ/нукл.
$^{16}\text{O}$	1	2,5	8	120
$^{20}\text{Ne}$	1	1,7	8	80
$^{40}\text{Ar}$	2	1,7	13	60
$^{84}\text{Kr}$	4	1,5	22	40
$^{136}\text{Xe}$	6	1,3	33	35
$^{238}\text{U}$	12	1,7	50	25

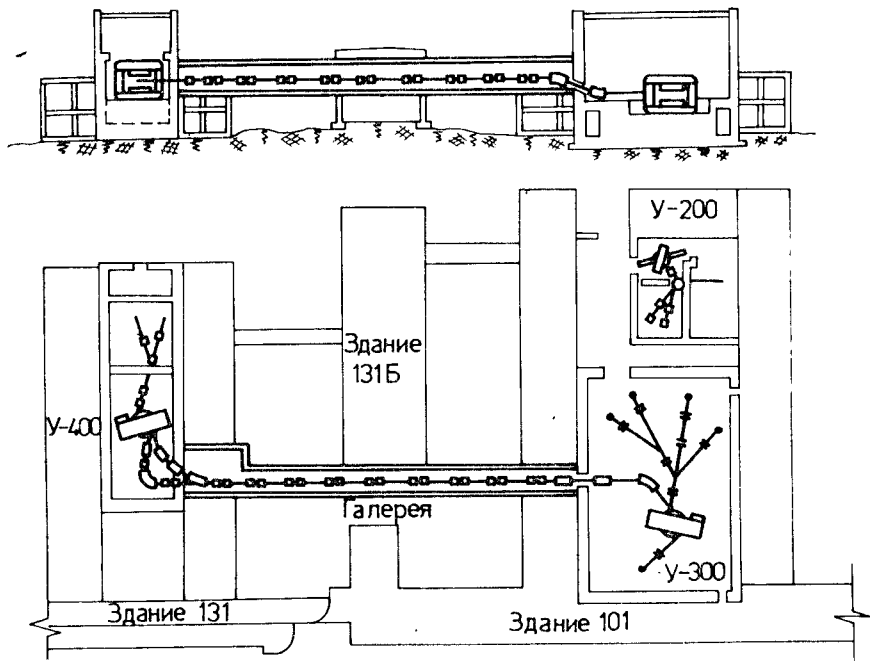


Рис.1. Схема циклотронного комплекса тяжелых ионов.

Для ускорения ионов до указанных энергий параметр  $K \approx 0,5 \frac{H_K^2 R_K^2}{H_K}$  - напряженность среднего магнитного поля,  $R_K$  - конечный радиус ускорения/ циклотрона У-400М должен составлять 550-560, что требует создания уровня среднего магнитного поля напряженностью  $\sim 20$  кЭ.

Для ускорителя У-400М выбрана четырехсекторная структура с двумя дуантами, расположенными в противоположных "долинах". Для получения значительного набора энергии за оборот, уменьшения потерь сверхтяжелых ионов на остаточном газе ускорителя на напряжение на дуантах должно составлять 200-250 кВ. Это требует большой  $\geq 50$  см/ апертуры "долины" ускорителя, что приводит к увеличению /по сравнению с циклотроном У-400/ среднего воздушного зазора циклотрона У-400М, а следовательно, к дополнительной реконструкции электромагнита ЕВ с целью сохранения указанного уровня среднего магнитного поля.

Вертикальный зазор в "долине" циклотрона выбран равным 50 см, в "холме" - 10 см. Требуемый уровень магнитного поля при среднем зазоре 30 см достигается следующими способами:

1/ уменьшением расстояния между обмотками возбуждения со 180 см до 150 см;

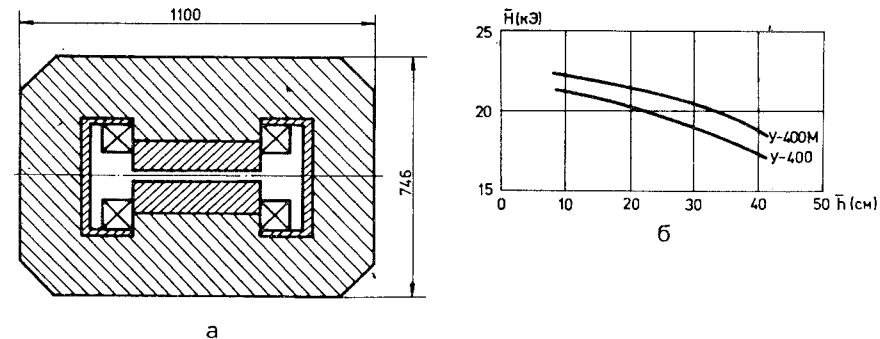


Рис.2. Схема электромагнита У-400М /а/; зависимость напряженности среднего магнитного поля от среднего зазора /б/.

2/ увеличением числа витков в обмотках с 448 до 504 и тока с 1900 до 2300 А;

3/ увеличением сечения магнитопровода на 10% за счет дополнительных стальных блоков /общим весом 160 т/, установленных во внутреннем окне электромагнита.

Расчет магнитного поля электромагнита /рис.2а/ ускорителя, выполненный по программе FIELD<sup>2</sup>, показал, что при указанных изменениях в магнитной цепи электромагнита уровень магнитного поля при среднем зазоре 30 см составляет  $\sim 20,5$  кЭ /рис.2б/, а азимутальная вариация магнитного поля /рис.3/ позволяет получить величину флаттера  $F = \frac{(\bar{H}^2 - \bar{H}^2)}{\bar{H}^2} \approx 0,1$ .

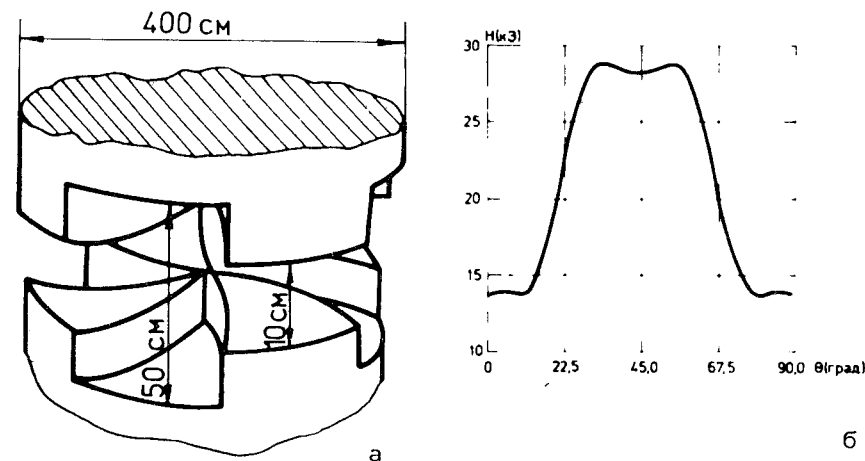


Рис.3. Геометрия магнитного зазора циклотрона У-400М /а/; распределение магнитного поля по азимуту в медианной плоскости циклотрона на радиусе 170 см /б/.

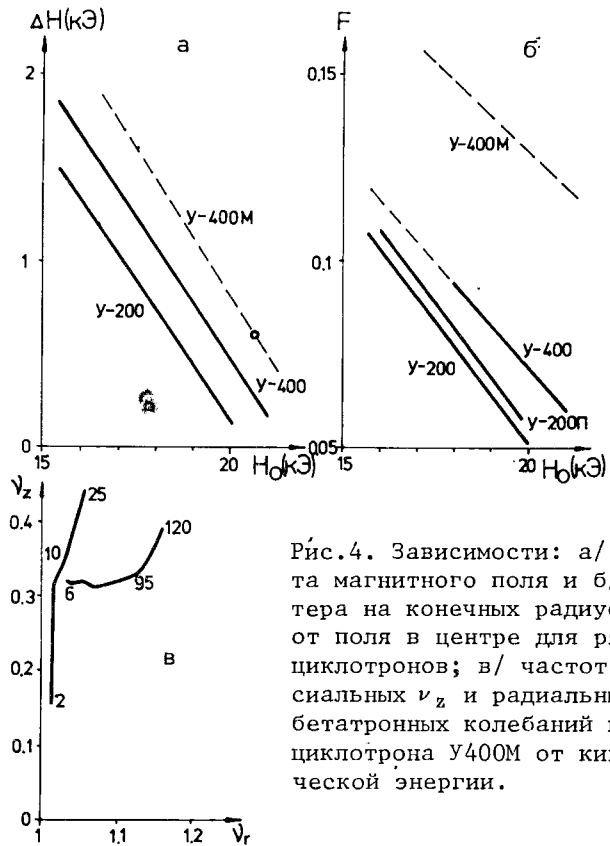


Рис. 4. Зависимости: а/ роста магнитного поля и б/ флаттера на конечных радиусах от поля в центре для ряда циклотронов; в/ частот аксиальных  $\nu_z$  и радиальных  $\nu_r$  бетатронных колебаний ионов циклотрона У400М от кинетической энергии.

Для изохронного ускорения ионов в широком диапазоне конечных энергий /20-120 МэВ/нуклон/ необходимо формировать сильно различающиеся распределения магнитных полей по радиусу. Обычно это выполняется системой кольцевых токовых катушек, мощность питания которых составляет значительную часть питания основной обмотки возбуждения.

Рост среднего магнитного поля по радиусу  $\Delta H = H_k - H_0$  для циклотронов У-200 и У-400, как представлено на рис. 4а, является функцией поля в центре ускорителя ( $H_0$ ). При уменьшении уровня поля значение  $\Delta H$  растет. Этот эффект используется для выбора уровней средних магнитных полей циклотронов У-200 и У-400 с целью ускорения ионов до энергий 2-35 МэВ/нуклон с минимальным вкладом систем корректирующих катушек в распределение магнитного поля по радиусу. Несмотря на некоторые различия магнитных структур циклотронов У-200 и У-400, следует ожидать, что зависи-

мости  $\Delta H = f(H_0)$  и флаттера  $F = f(H_0)$  от магнитного поля сохраняются /рис. 4б/. Поэтому изохронное магнитное поле циклотрона У-400М для ускорения ионов с  $A/Z = 4$  до энергии ~20 МэВ/нуклон / $H_0 \approx 19,6$  кЭ,  $\Delta H \approx 400$  Э/ будет сформировано секторами, радиальный профиль которых увеличивается с ростом радиуса, а необходимый рост поля по радиусу для ускорения ионов с  $A/Z = 2$  до энергии  $\approx 120$  МэВ/нуклон / $H_0 \approx 16$  кЭ,  $\Delta H \approx 2$  кЭ/ будет получен путем изменения тока в основной обмотке возбуждения. Для окончательной коррекции распределения магнитного поля по радиусу будет использована система из восемнадцати токовых катушек. Значения флаттера на конечных радиусах /рис. 4б/ растут с уменьшением уровня магнитного поля циклотронов, что дает возможность получить необходимую вариацию магнитного поля по азимуту для фокусировки ионов с энергией до 120-130 МэВ/нуклон без применения мощных флаттерных обмоток.

Выражения для частот аксиальных  $\nu_z$  и радиальных  $\nu_r$  бетатронных колебаний ионов представляются в виде

$$\nu_z^2 = -K + 1,07 F(1 + 2 \operatorname{tg}^2 \xi),$$

/1/

$$\nu_r^2 = 1 + K + 0,287(1 + \operatorname{tg}^2 \xi),$$

где  $K = \gamma^2 - 1$ ,  $\gamma = W/W_0 + 1$ . Угол спиральности секторов  $\xi$  /рис. 3/ может быть представлен выражением

$$\operatorname{tg} \xi(r) = \frac{\mu r}{\sqrt{4R_\xi^2 - r^2}},$$

/2/

где  $R_\xi = \frac{R_k}{2 \sin \xi_k}$ ,  $\xi_k$  - значение угла спиральности на конечном радиусе ускорения частиц  $R_k$ . Значение  $\xi_k$ , равное  $40^\circ$ , было выбрано из принятых значений частот колебаний частиц, лежащих в пределах  $0,1 < \nu_z < 0,5$ ,  $\nu_r > 1,01$ . В расчетах частот колебаний  $\nu_z$ ,  $\nu_r$  /рис. 4в/ принят во внимание и тот факт, что значения флаттера на начальных радиусах приблизительно на 40% меньше флаттера в конце ускорения.

## 2. СИСТЕМЫ ВЫВОДА, ТРАНСПОРТИРОВКИ И ИНЖЕКЦИИ ПУЧКОВ ИОНОВ ЦИКЛОТРОНОВ У-400 и У-400М

Наиболее простой схемой инжекции ионов в циклотрон является способ, когда вводимые ионы испытывают перезарядку в центральной области основного ускорителя. Поэтому вывод пучков ионов из циклотрона У-400 должен осуществляться с помощью электростатического дефлектора. Численное моделирование процесса вывода частиц из У-400 производилось на ЭВМ. С целью эффективного вывода пучка с конечного радиуса ускорения и нацеливания его в канал транспортировки планируется использовать два дефлектора / $D_1$ ,  $D_2$ / на рис. 5а/ угловой протяженностью  $38^\circ$ , установленных в двух

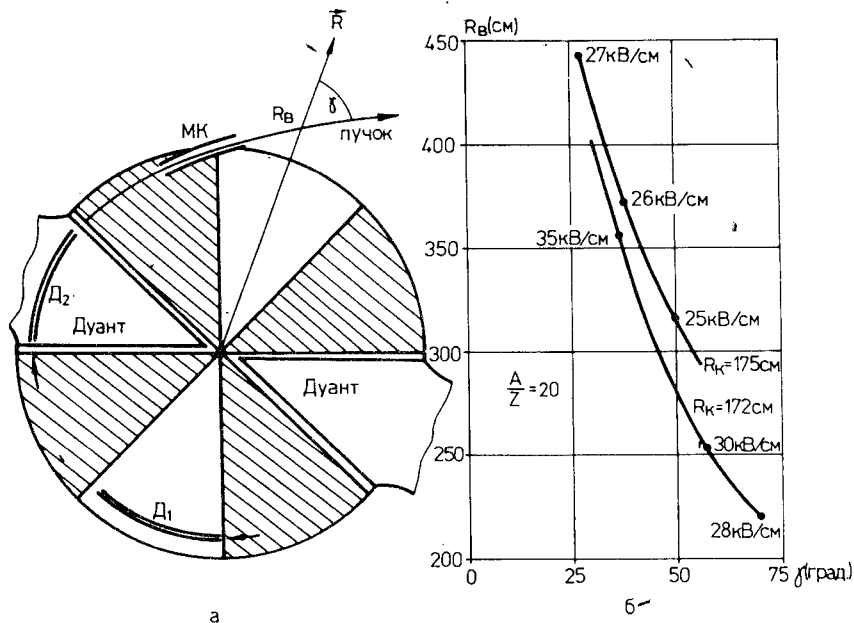


Рис.5. Схема вывода ионов из циклотрона У-400.

соседних "долинах". На рис.5б в качестве примера представлены зависимости радиуса выведенных пучков  $R_b$  с отношением  $A/Z = 20$  от угла траектории  $\gamma$  к радиусу-вектору  $\vec{R}$  при различных напряженностях электрического поля на дефлекторах, отмеченные цифрами /кВ/см/ на кривых. Трехэлементный фокусирующий по радиусу магнитный канал устанавливается после второго дефлектора по ходу пучка /рис.5а/, где максимальный градиент магнитного поля к орбите выпускаемого пучка ионов достигает величины  $1,5 \text{ кЭ/см}$ . Зависимости  $R_b = f(\gamma)$  позволяют выбрать необходимое направление выведенного пучка для согласования его с направлением галереи, связывающей экспериментальные залы циклотронов У-400 и У-400М. Пучки транспортируются по ионопроводу диаметром 100 мм. Для поворота пучков в горизонтальной плоскости /рис.1/ могут быть использованы электромагниты СП-027 с углом поворота  $54^\circ$ , радиусом 2,5 м и напряженностью магнитного поля 18 кЭ. Фокусировка пучков ионов при транспортировке осуществляется квадрупольными линзами с максимальным градиентом магнитного поля 600 Э/см. Для транспортировки пучка из медианной плоскости циклотрона У-400 в медианную плоскость ускорителя У-400М используются магниты типа СП-09.

Из табл.1 следует, что кратность перезарядки ионов на тонкой мишени варьируется в широких пределах, поэтому радиус ее установки в центральной области циклотрона У-400М меняется до 30 до

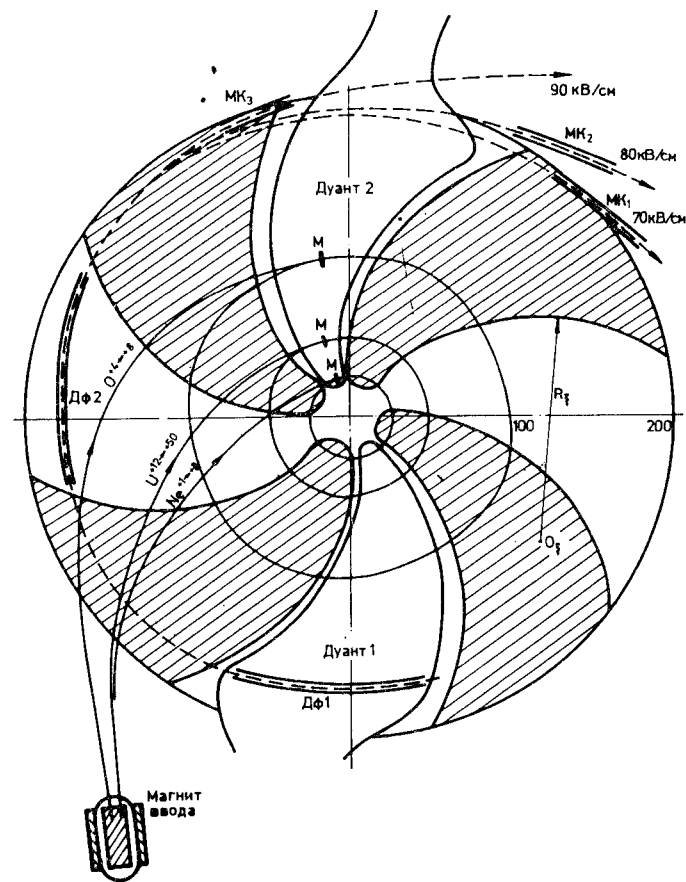


Рис.6. Схема инъекции и вывода ионов ускорителя У-400М.

100 см /рис.6/. Опыт работы тандема циклотронов У-300 и У-200<sup>3/4</sup> Лаборатории ядерных реакций показывает, что для точного согласования траекторий ионов, прошедших перезарядную мишень, с их равновесной орбитой необходим тщательный расчет движения ионов, инжектируемых в ускоритель У-400М, а для нацеливания пучка на мишень требуется корректирующий электромагнит с углом отклонения пучков в пределах  $\pm 3^\circ$ .

### 3. СИСТЕМЫ ВЫВОДА И ТРАНСПОРТИРОВКИ ИОНОВ ИЗ ЦИКЛОТРОНА У-400М

Набор энергии ионов за оборот при двухдуантной ускоряющей системе угловой протяженностью  $\phi$  составляет  $\Delta W = 4zV \sin \frac{\phi}{2}$ .

Для эффективного ускорения и вывода тяжелых ионов на циклотроне У-400М необходимо использовать режим ускорения на второй /п = 2/ и третьей /п = 3/ гармониках высокочастотного напряжения. Требуемый диапазон частот резонаторов циклотрона при этом составит 15-25 МГц. Прирост радиуса за оборот при ускорении ионов от Ne до U до энергий 20-60 МэВ/нуклон равен  $2,5-5,5 \text{ мм} / V = 200-250 \text{ кВ/}$ , что позволит выводить ионы двумя электростатическими дефлекторами без дополнительного разделения орбит. На рис.6 представлены траектории частиц с энергией 40 МэВ/нуклон, выведенных из ускорителя, при разных напряженностях электрического поля на дефлекторах. В расчетах использовалась реконструированная карта распределения магнитного поля циклотрона У-400. Местоположения фокусирующих магнитных каналов /МК на рис.6/ соответствуют максимальным градиентам магнитного поля. Для вывода частиц с энергией 120-130 МэВ/нуклон напряженность электрического поля составит 150-160 кВ/см.

В системе транспортировки внешних пучков ускорительного комплекса предполагается иметь не менее пяти каналов транспортировки пучков на физические установки.

Параметры выведенных из циклотрона У-400М пучков позволяют применить для их отклонения и фокусировки электромагниты СП-027 и квадрупольные линзы с максимальным градиентом 600 Э/см. Корректирующими элементами могут служить магниты ЭМК-0,46 с напряженностью магнитного поля 400 Э.

#### 4. ВЫСОКОЧАСТОТНАЯ СИСТЕМА ЦИКЛОТРОНА У-400М

Высокочастотная ускоряющая система циклотрона У-400М обеспечивает ускоряющее напряжение на дуантах 150-300 кВ в диапазоне частот 15-25 МГц. Согласно критерию пробоя Килпатрика /4/

$$V [В] E [В/см] e \frac{-1,7 \cdot 10^5}{E} < 1,8 \cdot 10^{14}$$

минимальный зазор дуант-плакировка равен 6 см. Оценки показывают, что могут быть приняты следующие геометрические характеристики:

Высота дуанта	- 100 мм
Вертикальный зазор дуант -плакировка	- 200 мм
Радиальная протяженность дуанта	- от 200 до 2000 мм
Горизонтальный зазор дуант-плакировка	- 50-200 мм.

Дуант с угловой протяженностью около 45° закреплен на штоке короткозамкнутой коаксиальной линии /диаметр бака 1800 мм, диаметр штока 500 мм, длина для  $f=15 \text{ МГц}$  3290 мм, для  $f=25 \text{ МГц}$  - 1360 мм/. Перестройка частоты резонансного контура будет выполняться передвижной закорачивающей пластиной.

Распределения волнового сопротивления линии дуант-плакировка и напряжения на дуанте по радиусу представлены на рис.7 и 8.

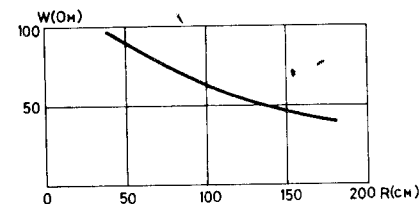


Рис.7

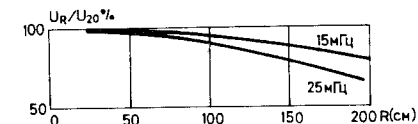


Рис.8

Энергетические характеристики резонансной системы циклотрона У-400М ожидаются следующими:

	При частоте	
	15 МГц	25 МГц
Входное сопротивление, кОм	400	500
Потребляемая мощность в импульсе, кВт	100	80
Ток, протекающий через закорачивающую пластину, А	2600	5200

Перестройка частоты резонансного контура в пределах 3% будет осуществляться триммером площадью 1000 см<sup>2</sup> при минимальном зазоре триммер-дуант 100 мм.

Требуемую высокочастотную мощность будут обеспечивать два ВЧ генератора с выходной мощностью по 120 кВт каждый. Оба генератора возбуждаются одним задающим генератором и согласованы по фазе для работы на четной и нечетной гармониках. Предполагается использовать автоматическую подстройку частоты резонаторов с точностью не хуже 1% по фазе и стабилизацию амплитуды ВЧ напряжения с точностью 10<sup>-3</sup>. Связь генераторов с резонаторами будет осуществляться петлями связи.

#### 5. СИНХРОНИЗАЦИЯ РАБОТЫ ЦИКЛОТРОНОВ У-400 И У-400М

Для эффективной инъекции ионов в циклотрон У-400М необходимо временное согласование режима его работы с ускорителем У-400. Это достигается при условии кратности частот обращения ионов:

$$N = \frac{n_2 H_2 Z_2}{n_1 H_1 Z_1} = \frac{n_2 f_{об2}}{n_1 f_{об1}},$$

/3/

где члены с индексом "1" относятся к У-400, с "2" - к У-400М;  $n$  - номер гармоники ускоряющего напряжения;  $H$  - значения средних магнитных полей;  $Z_1$  и  $Z_2$  - заряды ионов до и после перезарядки соответственно. Условие согласования [3] может быть обеспечено выбором значений напряженностей магнитных полей обоих ускорителей и заряда пучка  $Z_2$  после прохождения стриппера, поскольку интенсивности пучков ионов с близкими зарядами  $Z_2 \pm \Delta$  мало различаются. Так, при ускорении ионов от Ar до U значение  $N$  равно 3 либо 4 для  $n_1=4$  и  $n_2=3$ .

## 6. ВАКУУМНАЯ СИСТЕМА ЦИКЛОТРОНОВ У-400 и У-400М

В процессе эксплуатации циклотрона У-400 в его камере с помощью масляных диффузионных насосов с азотными экранами достигнуто давление остаточного газа, составляющее  $5 \cdot 10^{-7} - 1 \cdot 10^{-8}$  Тор<sup>5/</sup>. Однако при работе ускорителя У-400 в режиме инжектора ускорительного комплекса при ускорении ионов малой зарядности требования к величине давления остаточного газа внутри циклотрона возрастают. Основные потери ионов в процессе ускорения обусловлены потерями их электронов. Так, например, средние интегральные сечения  $\bar{\sigma}_{tot} = \frac{1}{W_k} \int_0^{W_k} \sigma_{tot} dW$  для ионов от ксенона до урана

составляют  $/3-5/ \cdot 10^{-16}$  см<sup>2</sup>, что потребует /при эффективности ускорения ~90%/ создания давления в камере циклотрона У-400 на уровне  $5 \cdot 10^{-8}$  Тор. Это может быть достигнуто, в дополнение к существующим системам, путем применения криогенных систем откачки.

Поскольку в циклотроне У-400М ускоряются ионы, прошедшие "обдирку" на твердой мишени, то их заряд больше равновесного заряда для газовой среды, поэтому изменение заряда возможно только за счет захвата электрона. Сечение этого процесса падает с увеличением энергии. Кроме того, из-за большого набора энергии ионом за оборот  $V=150-300$  кВ/ длина пути ионов составляет менее 1,5 км, что позволяет при давлении в камере У-400М  $5 \cdot 10^{-7}$  Тор ускорить ионы с высокой эффективностью.

Газовая нагрузка вакуумного объема У-400М определяется величиной внешнего натекания и газоотделением с внутренних поверхностей объема площадью около 300 м<sup>2</sup>. Суммарная газовая нагрузка, по оценкам, составит около  $1 \cdot 10^{-2}$  л.Тор/с. Требуемая скорость откачки должна быть равна ~20000 л/с, а с учетом проводимостей элементов вакуумных систем и надежности скорость действия откачивающих средств должна составлять около 50000 л/с. Для этой цели будут использованы высоковакуумные агрегаты, снабженные ловушками, охлаждаемые жидким азотом.

## 7. ПАРАМЕТРЫ УСКОРИТЕЛЬНОГО КОМПЛЕКСА

Основные параметры ускорительного комплекса представлены в табл.2, а зависимость кинетической энергии ионов от массового числа для ряда ускорителей<sup>6/</sup>, в том числе и У-400 → У-400М, показана на рис.9.

Таблица 2

	У-400	У-400М
	2	3
<u>Электромагнит</u>		
Диаметр полюсов, см	400	400
Конечный радиус ускорения, см	175	175
Вес магнита, т	2200	2300
Средний воздушный зазор, мм	200	300
Число витков основной катушки возбуждения	2x252	2x252
Рабочий ток в обмотке электромагнита, А	2500	2300
Максимальное среднее магнитное поле, кЭ	21,3	20,5
Число секторов	4	4
Угол спиральности, град.	0	40
Число корректирующих обмоток	18	18
<u>Высокочастотная система</u>		
Число дуантов	2	2
Азимутальная протяженность, град.	40	40
Напряжение на дуанте, кВ	75	200
Диапазон частот, МГц	6-12	15-25
Апертура дуанта, мм	120	100
Зазор дуант-земля, мм	50	200
<u>Вакуумная система</u>		
Объем вакуумной камеры, м <sup>3</sup>	75	60
Давление в камере, Тор	$5 \cdot 10^{-8}$	$5 \cdot 10^{-7}$
Количество насосов	5	5
Скорость откачки, л/с	$4 \cdot 10^6$	$5 \cdot 10^5$
<u>Система вывода и транспортировки пучка</u>		
Азимутальная протяженность дефлекторов, град.	2x38	2x38
Входной зазор, мм	10	5
Напряжение на дефлекторе, кВ	60	80



	1	2	3
Азимутальная протяженность фокусирующего магнитного канала, град.		45	45
Градиент поля в канале, Э/см		500-800	500-800
Эффективность вывода, %		60	60
Число каналов внешних пучков		12	5
<u>Пучки</u>			
Энергия ускоренных ионов, МэВ/нуклон		2-10	20-120
Полная энергия, МэВ		$675 Z^2/A$	$400-600 Z^2/A$
Отношение массы к заряду, A/Z		10-20	2-5
Разброс энергии, %		0,5	0,5
Интенсивность пучков, частиц/с		$10^{12} - 10^{14}$	$10^{10} - 5 \cdot 10^{11}$

## 8. СИСТЕМЫ ОБЕСПЕЧЕНИЯ РАБОТЫ УСКОРИТЕЛЬНОГО КОМПЛЕКСА

Большинство систем, обеспечивающих работу циклотрона У-300, будут использованы на ускорителе У-400М.

С целью обеспечения возрастающего энергоснабжения и надежности электропитания необходимо осуществить дополнительный ввод электропитания от понизительной подстанции и установить новый силовой трансформатор мощностью 400 кВА. Для питания основной и дополнительных обмоток электромагнита У-400М, элементов систем ввода и вывода пучка, элементов каналов пучка и т.д. будут использованы статистические преобразователи, которые заменят находящиеся в эксплуатации вращающиеся преобразователи. Установка их будет выполнена в машинном зале У-300 и в других помещениях.

Управление ускорительным комплексом будет осуществляться с центрального пульта и, как и при эксплуатации тандема циклотронов У-300 - У-200, параллельно с автономных пультов управления. В системе управления и контроля предусматривается использование ЭВМ. На первом этапе ЭВМ будет осуществлять автоматический сбор информации и представлять ее персоналу в удобном для восприятия виде. На втором этапе будет разрабатываться автоматизированная система управления и контроля ускорительным комплексом, поддержания оптимального режима работы и автоматической проверки состояния комплекса. Система управления ускорительным комплексом будет решаться по модульному принципу с учетом прогресса в электронике и малых ЭВМ. Вся тепловая нагрузка ускорителя У-400М будет сниматься охлаждающей водой существующей двухконтурной системы, производительность которой, по оценкам, достаточна для обеспечения охлаждения систем этого циклотрона.

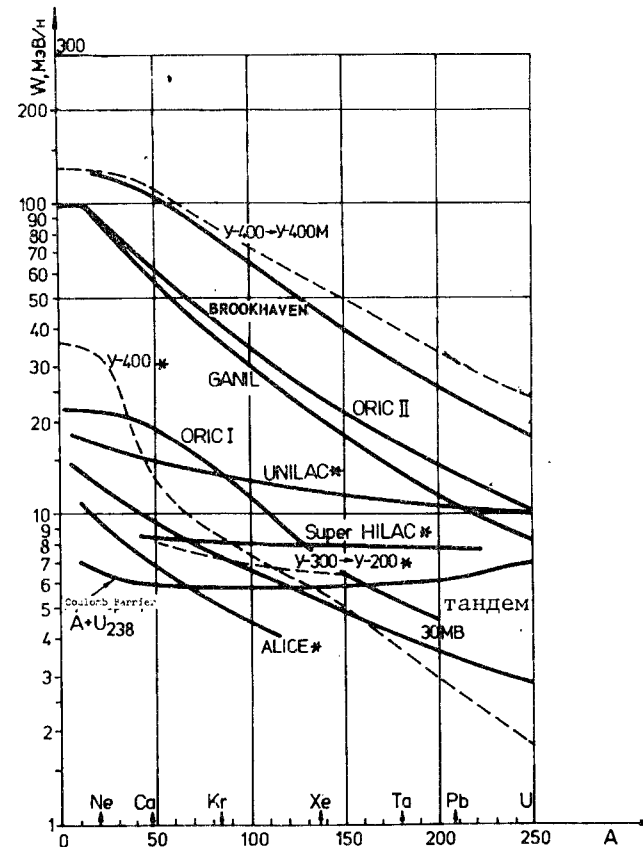


Рис.9

Оценки показывают, что существующие стены ускорительного зала из бетона толщиной 2 м обеспечат безопасные условия за пределами зала при работе циклотрона У-400М. Защитные стены и перекрытия экспериментальных помещений в пределах ускорительного зала будут демонтироваться. Для каждого канала внешних пучков ускорителя У-400М будет создаваться местная защита по мере необходимости. В связи с тем, что система дозиметрического контроля, используемая на циклотроне У-300, выполнена на устаревших приборах и элементах, предусматривается создать новую, выполненную на современных элементах, электронных блоках в системе КАМАК с использованием малой ЭВМ для регистрации и обработки данных с датчиков дозиметрического контроля.

Все остальные системы практически без существенных изменений будут использованы для обеспечения работы циклотрона У-400М.

## 9. ТЕХНИЧЕСКИЕ ВОПРОСЫ РЕАЛИЗАЦИИ ПРЕДЛАГАЕМОГО ПРОЕКТА

Предлагаемый ускорительный комплекс тяжелых ионов может быть относительно легко реализован и требует небольших материальных затрат, поскольку циклотрон У-400 является действующим, а ускоритель У-400М создается на основе циклотрона У-300, а следовательно, многие его узлы и системы могут быть использованы. На ускорителе У-400 дополнительно необходимо выполнить работы, связанные с улучшением вакуума. При создании циклотрона У-400М будет максимально использован опыт создания циклотрона У-400, когда многие узлы и системы создавались силами лаборатории, опытного производства и других подразделений Института.

Галерея и канал для транспортировки пучков циклотрона У-400 в зал циклотрона У-300 будут создаваться по отдельному проекту и предназначены в первую очередь для повышения эффективности использования пучков У-400 путем размещения экспериментальных установок в зале циклотрона У-300. Одновременно галерея и канал могут служить для транспортировки пучков У-400 до циклотрона У-400М.

В заключение авторы выражают благодарность академику Г.Н.Флерову за постоянное внимание к этой работе.

### ЛИТЕРАТУРА

1. Флеров Г.Н. и др. Труды VII Всесоюзного совещания по ускорителям заряженных частиц, т.1, с. 59-65. ОИЯИ, Дубна, 1981.
2. Дерендяев Ю.С., Кленин Б.А. ОИЯИ, P11-6579, Дубна, 1972.
3. Шелаев И.А. и др. ОИЯИ, P9-6062, Дубна, 1971.
4. Kilpatrick W.D. UCRL 2321, September, 1953.
5. Гульбеян Г.Г. и др. ОИЯИ, 13-80-843, Дубна, 1980.
6. Kamitsubo H. et al. IPSR Cyclotron Progress Report, 1978, 12, p. 4.

Рукопись поступила в издательский отдел  
1 ноября 1982 года.

Оганесян Ю.Ц. и др.

9-82-756

Циклотронный комплекс для получения пучков тяжелых ионов с энергией 20-120 МэВ/нуклон

Приводится описание циклотронного комплекса Лаборатории ядерных реакций, предназначенного для ускорения ионов всех элементов таблицы Д.И.Менделеева до энергии 20-120 МэВ/нуклон. Ускорительный комплекс состоит из двух изохронных циклотронов с диаметром полюсов четыре метра, один из которых - циклотрон У-400 - является инжектором основного ускорителя - циклотрона У-400М, который будет создан на основе электромагнита классического циклотрона У-300. Ускорение ионов на установке будет проводиться в два этапа: сначала на циклотроне У-400 до энергии 1,5-3 МэВ/нуклон, а затем после их вывода и перезарядки, позволяющей повысить заряд ионов в 4-8 раз, на основном ускорителе У-400М. Дается физико-техническое обоснование ускорительного комплекса и приводятся его основные параметры.

Работа выполнена в Лаборатории ядерных реакций ОИЯИ.  
Препринт Объединенного института ядерных исследований. Дубна 1982

Oganessian Yu.Ts. et al.

9-82-756

Cyclotron Facility Designed to Accelerate Heavy Ions to 20-120 MeV/ Nucleon

The cyclotron facility of the Laboratory of Nuclear Reactions designed to accelerate ions of all elements of the Mendeleev Periodic Table to 20-120 MeV/nucleon energies is described. This facility consists of two isochronous cyclotrons with 4 m pole diameters, one of which is an injector for the main accelerator (U-400M) to be built on the basis of the electromagnet of the classical cyclotron (U-300). Ion acceleration will be performed in two stages: at first, to 1.5-3 MeV/nucleon at the U-400 cyclotron, and then, after extraction and charge exchange to increase the ion charge by a factor of 4-8, at the main accelerator U-400M. The physico-technical justification and the main parameters of the accelerator system are given.

The investigation has been performed at the Laboratory of Nuclear Research, JINR.  
Preprint of the Joint Institute for Nuclear Research. Dubna 1982

Перевод О.С.Виноградовой.