

ОБЪЕДИНЕННЫЙ ИНСТИТУТ ЯДЕРНЫХ ИССЛЕДОВАНИЙ
ЛАБОРАТОРИЯ ЯДЕРНЫХ РЕАКЦИЙ

С 3-45
Ш-42

9 - 5062

И.А. Шелаев

ИЗОХРОННЫЕ ЦИКЛОТРОНЫ ТЯЖЕЛЫХ ИОНОВ ОИЯИ

Специальность 260 - приборы экспериментальной физики

Автореферат диссертации на соискание учёной
степени кандидата технических наук

Дубна 1970

Работа выполнена в Лаборатории ядерных реакций Объединенного института ядерных исследований.

Научный руководитель:

академик

Г.Н. Флеров

Официальные оппоненты:

доктор физико-математических наук

С.П. Капица,

доктор технических наук

И.Ф. Малышев

Ведущее предприятие: Ленинградский физико-технический институт им. А.Ф. Иоффе

Автореферат разослан " " 1970 года

Защита диссертации состоится " " 1970 года на заседании Объединенного совета Лаборатории ядерных реакций и Лаборатории нейтронной физики Объединенного института ядерных исследований.

Адрес: г. Дубна, Московской области, ОИЯИ, конференц-зал ЛНФ.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке ОИЯИ.

Учёный секретарь Совета

Э.Н. Каржавина

9 - 5062

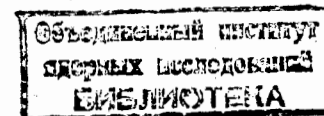
И.А. Шелаев

ИЗОХРОННЫЕ ЦИКЛОТРОНЫ ТЯЖЕЛЫХ ИОНОВ ОИЯИ

Специальность 260 - приборы экспериментальной физики

Автореферат диссертации на соискание учёной степени кандидата технических наук

6929 вр



Экспериментальные исследования ядерных реакций с участием сложных ядер привели к ряду важных научных открытий: синтезу новых трансурановых элементов ^{/1/}, обнаружению явления протонной радиоактивности ^{/2/} и др. Успех этих исследований во многом определен получением на ускорителях интенсивных пучков ионов с массой $A \leq 40$ и энергией до 10 Мэв/нукл. Увеличение массы ускоренных частиц позволит выполнить качественно новые исследования в этой области ядерной физики ^{/3/}, поэтому во многих лабораториях разрабатываются проекты и ведется сооружение ускорителей тяжелых ионов с массой $A > 40$ — вплоть до урана. Основная трудность решения проблемы ускорения ионов всех элементов связана с быстрым ростом размеров, веса и стоимости ускорителя с увеличением массы иона, т.к. при ускорении приходится использовать ионы с малым зарядом.

Реферируемая диссертация посвящена созданию изохронных циклотронов тяжелых ионов ОИЯИ. В этих машинах для снижения веса электромагнита используются высокие (до 20 кэ) уровни среднего магнитного поля.

В первой главе диссертации рассмотрены существующие ускорители тяжелых ионов, сооружение которых началось около 10 лет назад. Все ускорители условно разделены на две группы: "каскадные" и ускорители прямого действия. В машинах первой группы для уменьшения размеров ускорителя заряд ионов в про-

цессе ускорения увеличивается за счёт перезарядки быстрых ионов на тонкой (твердой или газовой) мишени. При этом в силу статистического характера процесса перезарядки количество ионов с данным зарядом составляет 20% и менее первоначального пучка. Помимо этого, угловое рассеяние ионов на ядрах мишени, нагрев и распыление последней приводят к тому, что интенсивность пучка в каскадных ускорителях в десятки раз меньше, чем в ускорителях прямого действия^{/4/}.

К машинам, ускоряющим тяжелые ионы с постоянным зарядом, относится 310-сантиметровый циклотрон тяжелых ионов ОИЯИ (У-300)^{/5/}, на котором получены наиболее интенсивные пучки. На основе опыта работы этого ускорителя в Лаборатории ядерных реакций для ускорения ионов с $A > 40$ разрабатывается циклотронный метод^{/6/}. Рассмотрение различных проектов изохронных циклотронов показывает, что для ускорения тяжелых ионов машиной с наименьшим весом является слабоспиральный секторно-фокусирующий циклотрон с высоким уровнем поля.

Экспериментальные исследования вопросов, связанных с созданием подобного ускорителя, выполнены при сооружении двухметрового изохронного циклотрона тяжелых ионов^{/7-8/} (У-200) и содержатся в главах 2-5.

Различные вопросы формирования магнитного поля изохронного циклотрона представлены во второй главе. Разработанная в Лаборатории полуавтоматическая методика измерения магнитного поля^{/9/} с помощью датчика Холла обеспечивает необходимую точность измерений ($\pm 1\text{э}$ среднего поля) при высокой их скорости - 2,5 сек на одну точку, и позволяет вводить результаты измерений непосредственно в ЭВМ для выполнения расчетов параметров орбит ионов^{/10/}. Сформированное с помощью железных масс магнитное поле (рис. 2) обеспечивает устойчивое и изохронное ускорение ионов с различным отношением массы A к заряду z ($A/z = 2,8 + 4$ протонных единиц)

до энергии $156 z^2/A$ Мэв (рис. 1) при фиксированном уровне магнитного поля^{/11/}. При этом изохронная форма поля для ионов с различной конечной энергией на нуклон достигается путем незначительного изменения ($\Delta H = \pm 250$ э) уровня поля в центре^{/12/}.

Коррекция формы среднего магнитного поля и положения медианной плоскости осуществляется шестью парами кольцевых, а амплитуда и фаза первой гармоники - четырьмя парами азимутальных обмоток. Все корректирующие обмотки размещены в высоковакуумной камере ускорителя^{/13/}. При этом ухудшения вакуумных характеристик ускорителя не наблюдалось (рабочее давление в камере при ускорении ионов равно $2 \cdot 10^{-6}$ мм рт.ст. без подачи газа в источник натекающие составляет $0,05 \text{ см}^3 \text{ атм/мин}$). Это обстоятельство позволяет существенно упростить конструкцию камеры, т.к. не требуется применять дополнительную форвакуумную камеру для корректирующих обмоток^{/14/}.

Во второй главе приводятся некоторые экспериментальные результаты с пучками тяжелых ионов, полученные на циклотроне У-200^{/15/}. Сравнение параметров ускорителя У-200 (вес и конечная энергия ионов) показывает, что эта машина, выполненная на базе электромагнита СП-72А полутораметрового циклотрона^{/16/} (причем никаких специальных мер по снижению веса не принималось), по своим параметрам превосходит существующие ускорители с диаметром полюсов около 2 метров.

Высокий уровень магнитного поля на циклотроне У-200 получен в основном благодаря существенному уменьшению воздушного зазора электромагнита^{/17/}. При этом два 45-градусных дуанта размещаются в области большого зазора - в долине. Решение возникающих в связи с этим проблем высокочастотного питания ускорителя содержится в третьей главе диссертации. Специфическим для машин с "дуантами в долинах" является задача фазирования напряжения на дуантах. В обычном варианте с двумя 180-градусными дуантами между последними имеется

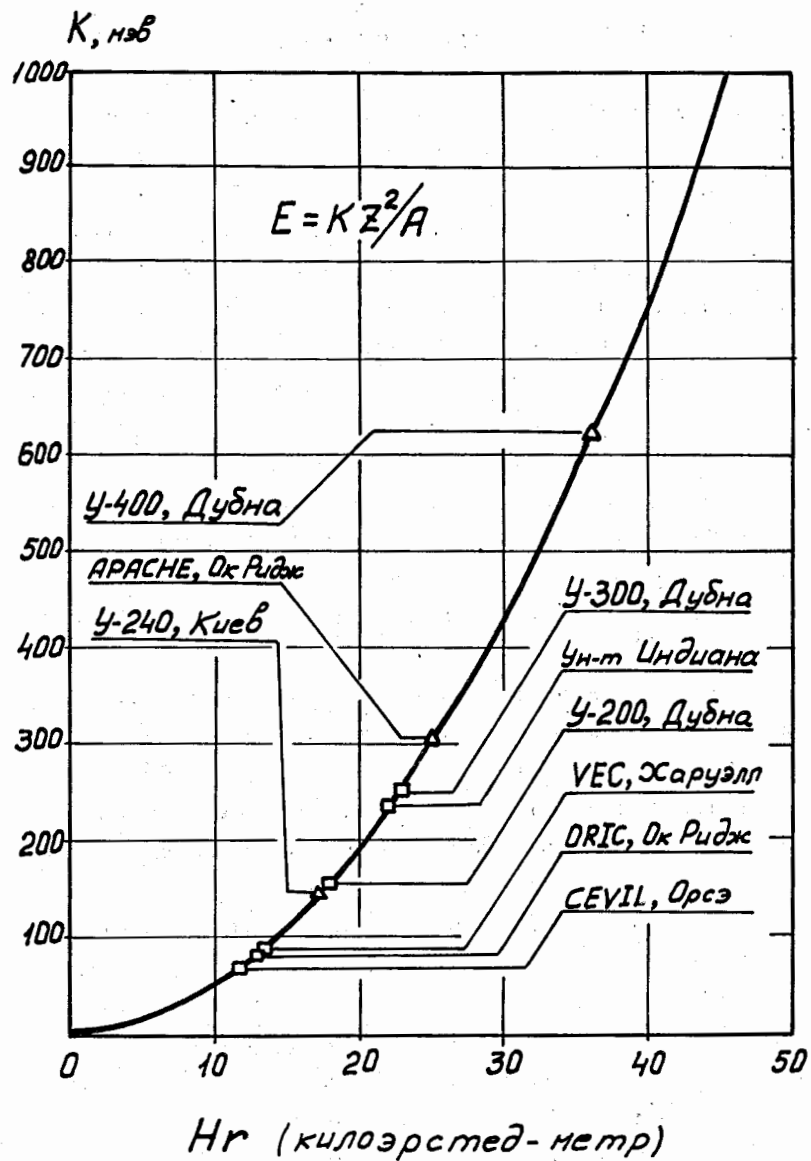


Рис. 1. Зависимость множителя k в выражении $E = kz^2/A$ от величины произведения Hr циклотрона. Квадратами обозначены работающие изохронные циклотроны тяжелых ионов, треугольниками - проектируемые или строящиеся.

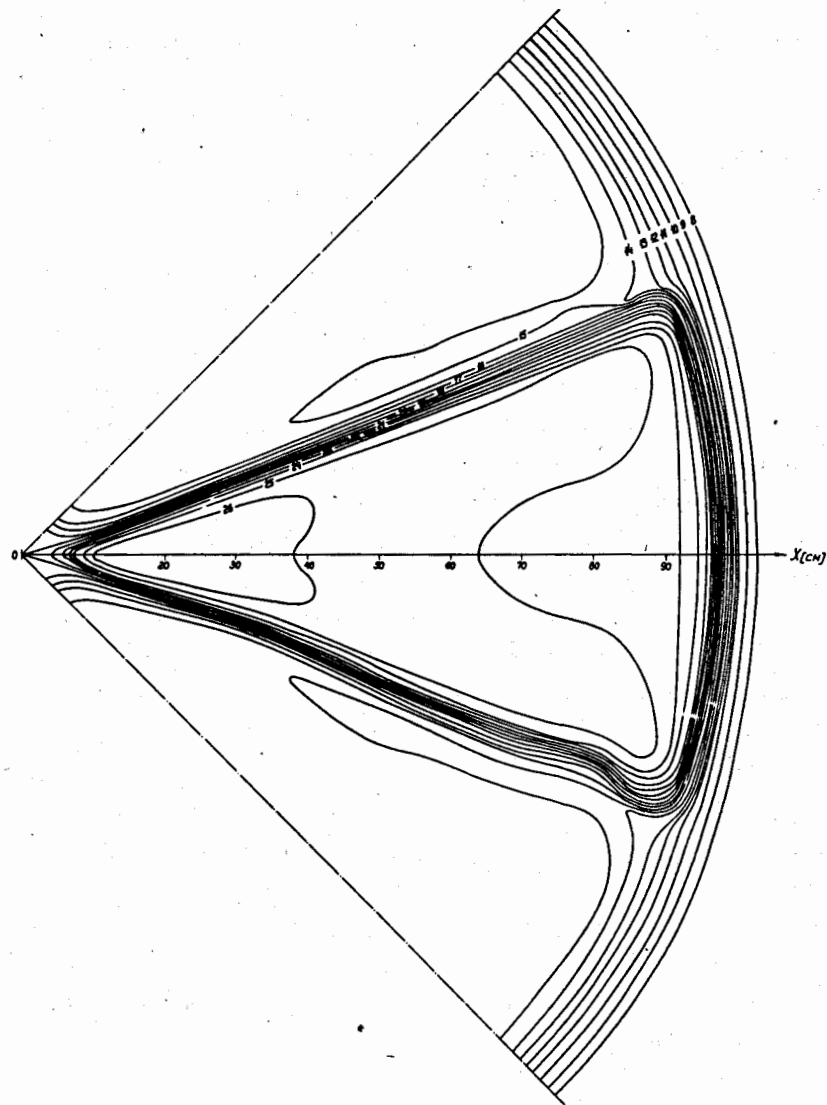


Рис. 2. Топография магнитного поля двухметрового изохронного циклотрона, рассчитанная на ЭВМ по результатам измерений на одном элементе периодичности. Цифрами на эквипотенциале указано значение вертикальной компоненты поля в кэ.

емкость дуант-дуант, играющая роль емкости связи между контурами. При этом в системе возникают две частоты связанных колебаний – верхняя, при которой напряжения на дуантах в фазе, и нижняя, противофазная. На рис. 3 представлены различные схемы решения задачи фазирования напряжений на дуантах в циклотронах с дуантами менее 180° . Для двухметрового циклотрона выбран вариант пассивной связи ^{/21/} (рис. 3г).

Кроме того, в этой главе освещены вопросы перестройки в.ч. генератора и дуантного контура в связи с изменением диапазона рабочих частот ускорителя (для улучшения использования дуантного напряжения ионы ускоряются на второй гармонике). Там же приводятся результаты макетирования резонатора панельного типа ^{/20/} для четырехметрового циклотрона.

В четвертой главе описаны разработанные для двухметрового циклотрона конструкции вертикального ионного источника для легких ионов ^{/22/} и аналогично ^{/23/} – для многозарядных. В отличие от других вертикальных источников в источнике многозарядных ионов для У-200 обеспечивается четкая фиксация напряжения катода и антикатода и охлаждение последнего (рис. 4). Приведены экспериментальные результаты по ускорению ионов на циклотроне У-200.

Оптимальное положение эмиссионной щели ионного источника и вытягивающего электрода дуанта ^{/24/}, обеспечивающее вертикальную электрическую фокусировку и минимальную амплитуду радиальных колебаний ионов, выбиралось на основе расчетов начального движения частиц на ЭВМ ^{/25/}. В расчетах использовалось измеренное на модели центра распределение электрического потенциала дуантов. Причем в отличие от метода эквипотенциалей ^{/26/} измерялось с точностью 1% ^{/25/} значение потенциала в наперед заданной координатной точке, что позволяет вводить непосредственно в ЭВМ результаты измерений. Для сравнения расчеты траекторий ионов проводились в однородном и реальном магнитном поле; приведен простой способ определения в реальном поле амплитуды радиальных колебаний, вызванных неточным центрированием орбит.

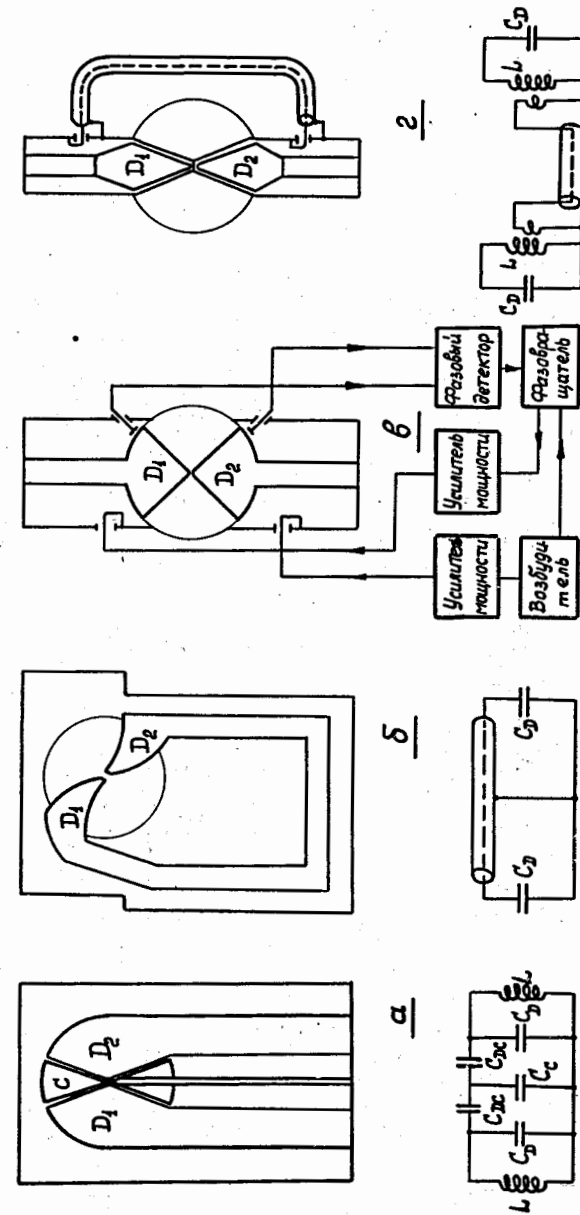


Рис. 3. Различные схемы фазирования напряжений на дуантах с малой угловой протяженностью: а – циклотрон Мичиганского университета /18/, б – Калифорнийского /19/, в – Мэрилендского /20/, г – двухметрового циклотрона ОИЯИ.

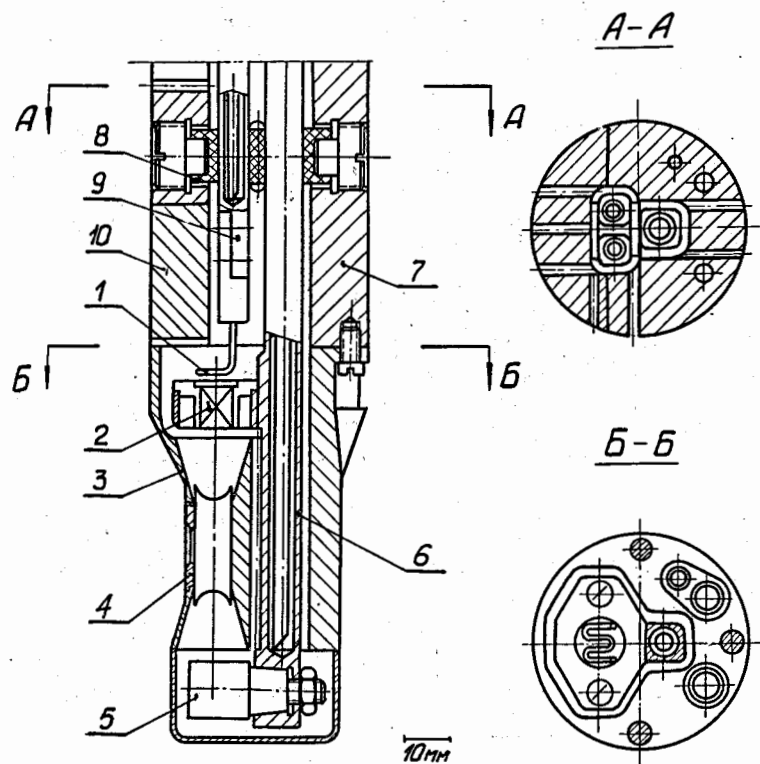


Рис. 4. Вертикальный источник многозарядных ионов двухметрового циклотрона: 1 - нить накала, 2 - подогревной катод, 3 - газоразрядная камера, 4 - молибденовая линза, 5 - антикатод, 6 - держатель катода и антикатада, 7 и 10 - стальная часть штока, 8 - изолятор, 9 - держатель нити.

Пятая глава диссертации содержит экспериментальные и расчётные работы по выводу пучка из двухметрового циклотрона двумя различными методами^{/27/}: перезарядкой ионов и при помощи электростатического дефлектора в комбинации с фокусирующим магнитным каналом. Существо предложенного в Лаборатории^{/28/} метода вывода пучка тяжелых ионов перезарядкой понятно из рис. 5а: тяжелый ион, попадая на конечном радиусе в перезарядное устройство, изменяет скачком свой заряд, вследствие чего радиальное движение его оказывается неустойчивым. Впервые этим методом получен внешний пучок^{/29/}, на котором проводятся физические эксперименты^{/30/}. Таким методом нельзя вывести все ионы, ускоряемые на циклотроне У-200 (см. рис. 5), поэтому для вывода других ионов применен электростатический метод^{/31/}. Отклонение частиц с равновесной орбиты на конечном радиусе осуществляется 30-градусным дефлектором, расположенным внутри дуанта, при потенциале 22-40 кв. Радиальная фокусировка пучка достигается при помощи трехэлементного стального магнитного канала^{/32/}, размещенного во втором (по траектории отклоненного пучка) холме.

Отличие примененного на циклотроне У-200 канала состоит в том, что для простоты изготовления шиммы выполнены из прутков круглого сечения^{/33/}, диаметр которых окончательно подбирался экспериментально.

На основе результатов, полученных при создании двухметрового циклотрона, спроектирован сооружаемый в ОИЯИ четырехметровый изохронный циклотрон тяжелых ионов с переменной энергией^{/34/}. Основные параметры и идеи проекта этого ускорителя содержатся в шестой главе. В целом эта машина подобна ускорителю У-200. Отличие состоит в том, что изохронный режим ускорения ионов в интервале энергии 1-50 Мэв/нукл. обеспечивается при изменении уровня среднего магнитного поля в пределах 16-20 кэ (рис. 6). Это обстоятельство с учётом возможности использовать для ускорения ионы с различным зарядом позволит получить пучки быстрых ионов данного элемен-

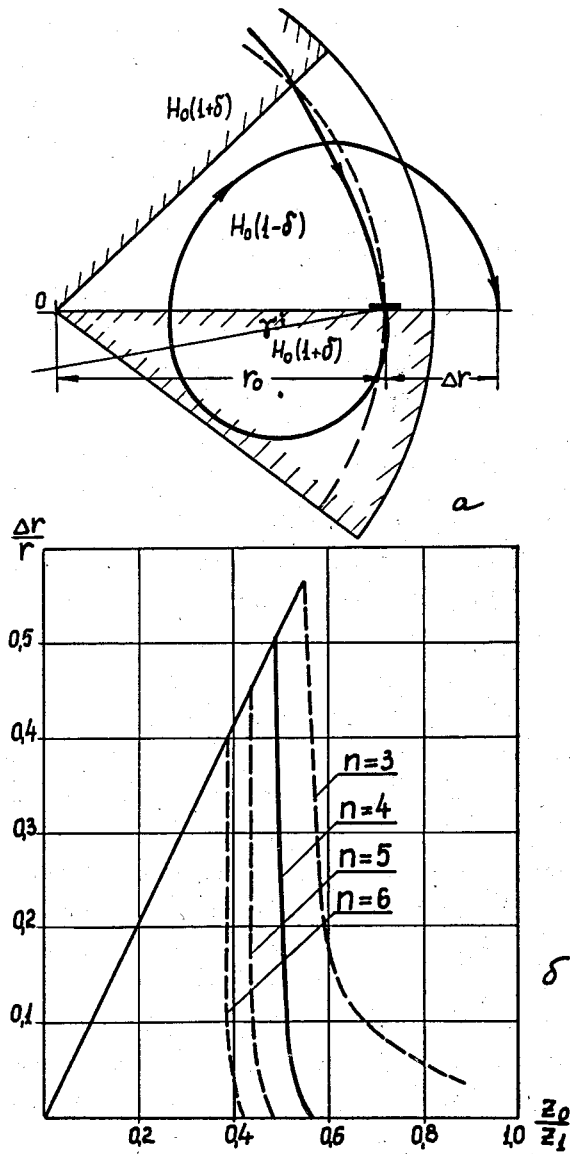


Рис. 5. Принципиальная схема вывода пучка тяжелых ионов методом перезарядки (а) и относительный прирост радиуса иона за оборот для изохронного циклотрона с различным числом секторов n при $\delta = 0,25$ и равных азимутальных протяженностях холма и долины (б).

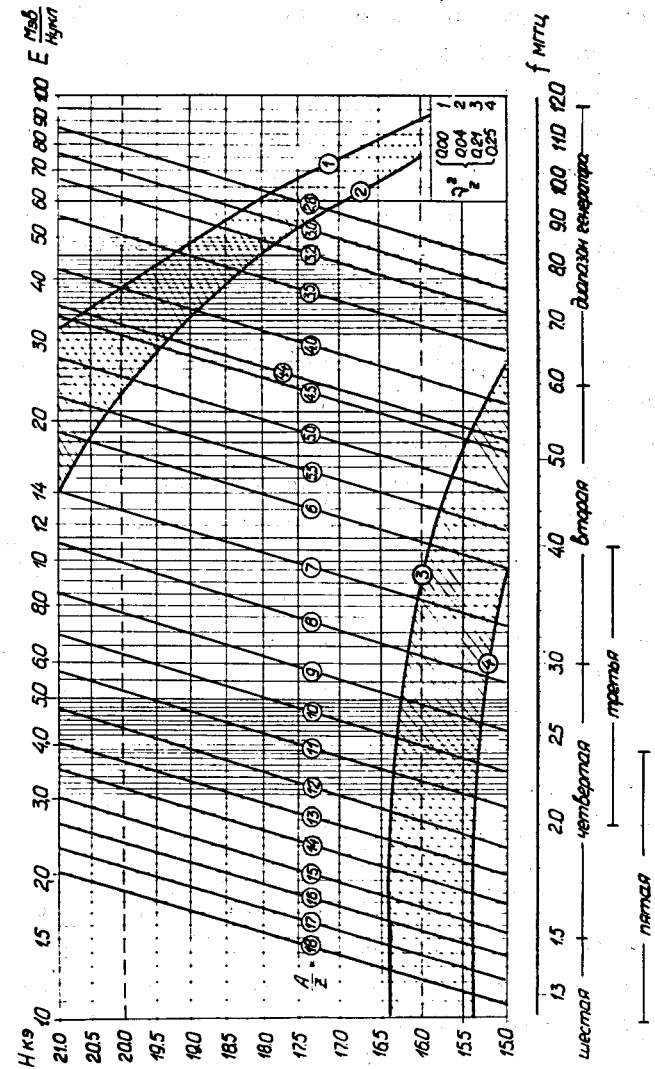


Рис. 6. Энергия ионов с различным A/z (цифры в кружках) в рабочем диапазоне уровней среднего магнитного поля на конечном радиусе 180 см и частоте обращения ионов f четырехметрового циклотрона.

та в широком интервале энергий. В то же время высокое значение произведения Hg этого ускорителя (см. рис. 1) обеспечит ускорение ионов He^{+13}_{132} до энергии выше кулоновского барьера на тяжелых ядрах.

Проблема ускорения ионов всех элементов периодической таблицы Д.И. Менделеева представляет чрезвычайно большой интерес для современной ядерной физики и других отраслей знаний. Имеющиеся трудности решения этой проблемы заставляют искать новые пути. Выбранный в Лаборатории ядерных реакций для решения этой проблемы тип ускорителя – секторно-фокусирующий циклотрон с высоким уровнем магнитного поля – представляется наиболее перспективным. Экспериментальное изучение особенностей такого ускорителя, выполненное на двухметровом циклотроне, дало возможность приобрести обширный материал, на основе которого разработаны проекты подобных ускорителей с большим диаметром полюсов: четырехметрового и восьмиметрового ^{/8/}. Сооружение последнего позволило бы ускорить ионы всех элементов вплоть до U .

Основные выводы диссертации сводятся к следующим.

1. Сооружением двухметрового изохронного циклотрона тяжелых ионов ОИЯИ экспериментально доказана возможность получения высокого уровня магнитного поля с необходимой глубиной азимутальной вариации в изохронном циклотроне большого диаметра. При этом получение такого уровня поля не связано с чрезмерным увеличением мощности возбуждения или веса электромагнита, а достигается рациональной компоновкой ускорителя. В результате вес, мощность питания и стоимость ускорителя оказываются меньшими, чем у циклотрона той же энергии, но с низким уровнем магнитного поля.

2. Опыты по ускорению и выводу пучка тяжелых ионов, выполненные на двухметровом циклотроне, показывают, что специфические задачи циклотронной техники, возникающие в связи с уменьшением зазора, изменением геометрии ускоряющих электродов и т.д., могут быть успешно решены. Возможные за счёт

снижения апертуры дуантов и камеры ускорителя дополнительные потери интенсивности не наблюдались.

3. Разработана и экспериментально проверена библиотека вычислительных программ, позволяющая проводить на ЭВМ обширный круг расчётов по определению траектории ионов в центре, параметров равновесных орбит, траектории выведенного пучка и др. с использованием данных измерения сложной топографии магнитного поля изохронного циклотрона. Для получения этих данных разработана скоростная методика измерения магнитного поля.

4. Разработан проект сооружаемого в ОИЯИ четырехметрового изохронного циклотрона тяжелых ионов с плавно регулируемой энергией, генерирующий пучки ионов любых элементов вплоть до ксенона. В основу проекта положены экспериментальные данные, полученные на двухметровом циклотроне.

Основные результаты, использованные в диссертации, опубликованы в работах ^{/5-13, 15, 21-27, 29, 31, 32, 34/}, докладывались на первом Всесоюзном совещании по ускорителям заряженных частиц в Москве ^{/12, 21/}, на Национальной конференции по ускорителям заряженных частиц в Вашингтоне ^{/8/} и были представлены на Международную конференцию по изохронным циклотронам в Оксфорде ^{/8, 27/}.

Все работы выполнены в Лаборатории ядерных реакций ОИЯИ.

Л и т е р а т у р а

1. Г.Н. Флеров. Препринт ОИЯИ, Р15-4315, Дубна (1969).
2. В.А. Карнаухов и др. АЭ, 17, 310 (1964).
3. Г.Н. Флеров и др. УФН, т. 100, вып. 1, 45 (1970).
4. R.S. Livingston. ORNL-TM-2662, rep. on Int. conf. on Nucl. Reactions Induced by Heavy Ions, Heidelberg (1969).
5. В.С. Алфеев, Г.Н. Вялов, А.Ф. Лиев, В.Н. Покровский, В.А. Савельев, В.Н. Титов, В.А. Чугреев, И.А. Шелаев. Препринт ОИЯИ, Р-2693, Дубна (1966).

6. I.A. Shelaev, S.I. Kozlov, R.Tz. Oganessian, Yu.Tz. Oganessian, IEEE Trans. on Nucl. Sci., NS-16 802 (1969).
7. И.А. Шелаев, С.И. Козлов, Р.Ц. Оганесян, Ю.Ц. Оганесян, В.А. Чугреев. Препринт ОИЯИ, 9-3688, Дубна (1968).
8. I.A. Shelaev, S.I. Kozlov, R.Tz. Oganessian, Yu.Tz. Oganessian, Report on Int. Conf. on Cyclotron, Oxford (1969).
9. Э.Г. Имаев, С.И. Козлов, Р.Ц. Оганесян, С.Г. Фефилова, Л.П. Челноков, И.А. Шелаев. Препринт ОИЯИ, 9-3713 (1968).
10. И.А. Шелаев, С.И. Козлов, Б.А. Кленин. Сообщение ОИЯИ, P9-5033, Дубна (1970).
11. И.А. Шелаев, С.И. Козлов, Р.Ц. Оганесян, С.Г. Фефилова. Препринт ОИЯИ, P9-4233, Дубна (1968).
12. И.А. Шелаев, С.И. Козлов, Р.Ц. Оганесян. Доклад на Первом всесоюзном совещании по ускорителям заряженных частиц, Москва (1968).
13. И.А. Шелаев, А.И. Иваненко, С.И. Козлов, Р.Ц. Оганесян, В.А. Чугреев. Сообщение ОИЯИ, P9-5047, Дубна (1970).
14. А.Г. Алексеев и др. Международная конференция по ускорителям. Дубна, 1963 г. АИ, 600 (1964).
15. И.А. Шелаев, А.С. Алфеев, В.М. Николаев, С.И. Козлов, Р.Ц. Оганесян. Сообщение ОИЯИ, Дубна (1970).
16. Р.Ц. Оганесян и др. АЭ, 18, 385 (1965).
17. D.J. Clark et al. Nucl. Instr. and Meth., 18, 19, 1 (1962).
18. W.P. Johnson. Proc. of Int. Conf. on Sector-Focused Cyclotron and Meson Factories, 279m, Geneva (1963).
19. K.A. Mackenzie et al. Nucl. Instr. and Meth., 18, 19, 177 (1962).
20. T.H. Johnson et al. IEEE Trans. on Nucl. Sci., NS-16, 438 (1969).
21. И.А. Шелаев, С.И. Козлов, Р.Ц. Оганесян. Доклад на Первом всесоюзном совещании по ускорителям заряженных частиц, Москва (1968).
22. Т. Таут, И.А. Шелаев, Г.М. Соловьева. Сообщение ОИЯИ, 9-4368, Дубна (1969).

23. А.С. Пасюк, И.А. Шелаев, Го Ци-цянь, Ю.П. Третьяков. ПТЭ, 5, 23 (1964).
24. С.И. Козлов, Р.Ц. Оганесян, Пек Ден Ги, И.А. Шелаев. Препринт ОИЯИ, P-2854 (1966).
25. И.А. Шелаев, С.И. Козлов, В.М. Николаев. Сообщение ОИЯИ, P9-5032, Дубна (1970).
26. Г. Индреаш, И.А. Шелаев. Препринт ОИЯИ, 2184, Дубна (1965).
27. I.A. Shelaev, S.I. Kozlov, R.Tz. Oganessian, Yu.Tz. Oganessian. Report on Int. Conf. on Cyclotron, Oxford (1969).
28. Г.Н. Вялов, Ю.Ц. Оганесян, Г.Н. Флеров. Препринт ОИЯИ, 1884, Дубна (1964).
29. И.А. Шелаев, В.С. Алфеев, С.И. Козлов, Р.Ц. Оганесян. Препринт ОИЯИ, P9-4831 (1969).
30. S. Dalhsuren, G.N. Flerov et al. Preprint JINR, D15-4744, Dubna (1969).
31. И.А. Шелаев, В.С. Алфеев, С.И. Козлов, В.Н. Николаев, Р.Ц. Оганесян. Сообщение ОИЯИ, P9-5037, Дубна (1970).
32. В.И. Данилов, Б.А. Загер, А.Ф. Линев, И.А. Шелаев. Препринт ОИЯИ, P-2588, Дубна (1966).
33. M. Odera et al. Nucl. Instr. and Meth., 65, 247 (1968).
34. 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. Препринт ОИЯИ, P9-5086, Дубна (1970).

Рукопись поступила в издательский отдел

• 23 апреля 1970 года.