

ОБЪЕДИНЕННЫЙ ИНСТИТУТ ЯДЕРНЫХ ИССЛЕДОВАНИЙ

ЛАБОРАТОРИЯ ЯДЕРНЫХ РЕАКЦИЙ

С 345

0-361

9 - 5061

Р.Ц. Оганесян

**ФОРМИРОВАНИЕ МАГНИТНОГО ПОЛЯ
ДВУХМЕТРОВОГО ИЗОХРОННОГО ЦИКЛОТРОНА 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.

Официальные оппоненты:

доктор физико-математических наук, старший научный сотрудник

В.П. Саранцев,

кандидат технических наук, старший научный сотрудник

Н.И. Веников

Ведущее предприятие: Научно-исследовательский институт электрофизической аппаратуры имени Д.В. Ефремова.

Автореферат разослан " " 1970 года

Защита диссертации состоится " " 1970 года на заседании Объединенного Ученого 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.

Ученый секретарь Совета

Э.Н. Каржавина

9 - 5061

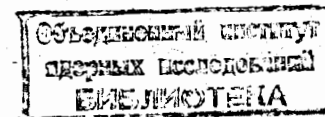
Р.Ц. Оганесян

ФОРМИРОВАНИЕ МАГНИТНОГО ПОЛЯ
ДВУХМЕТРОВОГО ИЗОХРОННОГО ЦИКЛОТРОНА ОИЯИ

Специальность 260 - приборы экспериментальной физики

Автореферат диссертации на соискание учёной степени кандидата технических наук

6922 вр.



В последние годы для получения интенсивных пучков ускоренных тяжелых ионов весьма эффективно используется циклотронный метод ускорения.

В настоящее время на классическом 310-сантиметровом циклотроне тяжелых ионов ОИЯИ получены пучки ионов от ^{10}B до ^{40}Ar с энергией до 10 Мэв/нуклон. Вместе с тем попытки ускорения ионов с массой больше 40 связаны с определенными трудностями, которые, в сущности, заключаются в следующем. С увеличением массы частицы отношение заряда к массе уменьшается, и для достижения необходимой энергии на выходе ускорителя необходимо увеличить либо радиус ускорения, либо величину среднего магнитного поля.

Практически для всех конструкций классических и изохронных циклотронов среднее значение магнитной индукции в межполюсном зазоре не превышает 16-17 кэ, и тогда расширение диапазона ускоряемых ионов непосредственно связано с увеличением размера ускорителя. Увеличение энергии или диапазона ускоряемых ионов может быть достигнуто путем существенного повышения уровня среднего поля, что требует нового подхода как к конструкции ускорителя, так и к вопросам формирования магнитного поля в ускорительной камере.

Настоящая работа посвящена получению изохронного поля 200-сантиметрового циклотрона тяжелых ионов со средним значением около 20 кэ.

Диссертация состоит из трех глав.

В первой главе рассматриваются вопросы, связанные с получением высокого уровня поля в изохронном циклотроне. Рассмотрена конструкция основных элементов ускорителя с целью получения необходимой величины азимутальной вариации и радиального распределения магнитного поля для ускорения ионов в диапазоне $2,8 \leq \frac{A}{Z} \leq 4$.

Во второй главе приводится методика измерения магнитного поля, анализ экспериментальных данных и обсуждение результатов с точки зрения устойчивости движения ионов от начального этапа ускорения до конечного радиуса.

Экспериментальные результаты, полученные с помощью пучков ускоренных ионов различной массы, обсуждаются в третьей главе.

Глава 1

Преимущества изохронного циклотрона перед классическим хорошо известны. Однако в большинстве конструкций изохронных циклотронов дуант или дуанты большой угловой протяженности располагаются в межполюсном зазоре таким образом, чтобы зазор между поверхностью дуанта и секторными накладками обеспечивал необходимую электрическую прочность. Ввиду того, что магнитное поле имеет определенную периодическую структуру и воздушный зазор между долинами заметно больший, чем между холмами, средний воздушный зазор между полюсами оказывается сравнимым с тем, который существует для классического циклотрона^{/1,2/}.

Это обстоятельство приводит к большим трудностям в получении средней магнитной индукции в зазоре, превышающей 16-17 кэ. Вместе с тем хорошо известно, что в изохронном циклотроне наряду с ускорением на основной гармонике в.ч.

потенциала ($\omega_0 = \omega_r$) возможно также ускорение на кратных гармониках ($\omega_0 = \frac{\omega_r}{n}$). Тогда угловую протяженность дуантов можно существенно уменьшить, и дуанты могут быть помещены в долины, чтобы минимальное расстояние между секторами определялось только вертикальным размером пучка. Для такой конструкции значительно уменьшается средний воздушный зазор и таким образом можно заметно увеличить средний уровень магнитного поля. В циклотроне тяжелых ионов У-200^{/3,4/} в качестве ускоряющих электродов выбраны два дуанта с угловой протяженностью 45° , расположенные напротив друг друга в долинах. Количество секторов выбрано равным $N = 4$, т.к. при трехсекторном варианте необходимо было бы использовать три дуанта.

Электромагнит циклотрона У-200 создан на базе стандартного магнита СП-72, который используется в конструкции классического циклотрона У-150. Диаметр полюсных наконечников был увеличен до 200 см, и в воздушном зазоре 104 мм получено поле 18,6 кэ без изменения основных катушек возбуждения и мощности питания электромагнита. Это значение поля находится в хорошем согласии с расчетными данными.

В дальнейшем рассчитывалась зависимость поля в зазоре магнита от различных конструктивных параметров магнитной цепи. На основании полученных данных показано, что увеличение сечения ярма на 12% увеличивает среднее поле на величину $\Delta H = 900$ э. После введения дополнительного железа весом ≈ 12 тонн величина \bar{H} возросла на 700 э.

Ввиду того, что при $\bar{H} \approx 20$ кэ магнитная цепь находится в состоянии насыщения, важную роль играет поле рассеяния. Величина этого поля существенно зависит от геометрического положения катушек, в связи с чем была проведена серия измерений среднего поля \bar{H} от расстояния между катушками при различных значениях поля в зазоре. Было найдено, что при изменении расстояния между катушками от 1100 до 900 мм среднее поле увеличивается на $\Delta H = 650$ э.

Таким образом, увеличение сечения ярма электромагнита на 12% и уменьшение расстояния между катушками на 20% приводит к увеличению \dot{N} до 20 кэ. Выбор основных параметров магнитной структуры циклотрона (флаттер и радиальное распределение среднего поля) был сделан первоначально для ионов $^{14}\text{N}^{+5}$ ($E = 20$ Мэв/нуклон, показатель роста поля $k = 0,045$). Из опытов, проведенных на стенде магнитных измерений, были определены основные размеры секторов. Последние имеют постоянную по радиусу толщину, равную 46 мм, и подняты над поверхностью полюса на 14 мм. Этот зазор используется для кольцевых железных шимм и корректирующих катушек. Зазоры между долинами и холмами (секторами) составляют 150 и 30 мм соответственно (см. рис. 1).

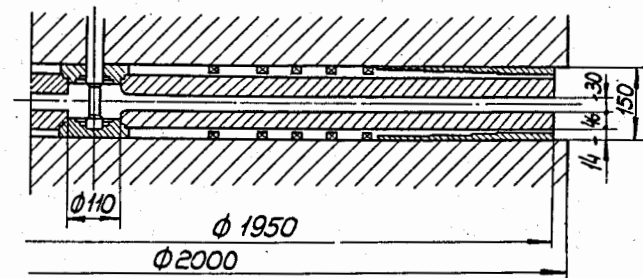
Изохронная зависимость радиального распределения поля была получена с помощью железных кольцевых шимм, размеры которых определяются расчётным путем^{/5/}. Дополнительная коррекция конфигурации шимм проводилась экспериментально с помощью кольцевых пластин толщиной 1 мм^{/6/}. Так было получено распределение поля, отличающееся от изохронного для всей области $R \geq 20$ см на величину 50 - 200 э.

Дальнейшая коррекция осуществлялась изменением угловой протяженности сектора. Было найдено, что при изменении углового размера сектора на величину $\Delta\alpha$ изменение поля составляет

$$\Delta H = \frac{2}{\pi} \frac{\Delta\alpha}{R} (H_{\max} - H_{\min}).$$

В нашем случае оно равно 10 э на 1 мм дуги сектора в области крайних радиусов. Наиболее сложной задачей оказалось формирование магнитного поля в центральной области, где сталкиваются два противоречивых требования: для размещения ионного источника и вытягивающего электрода необходимо иметь плоский участок, а для получения необходимой вертикальной фокусировки требуется возможно быстрое возрастание флаттера

Сечение по холму



Сечение по долине

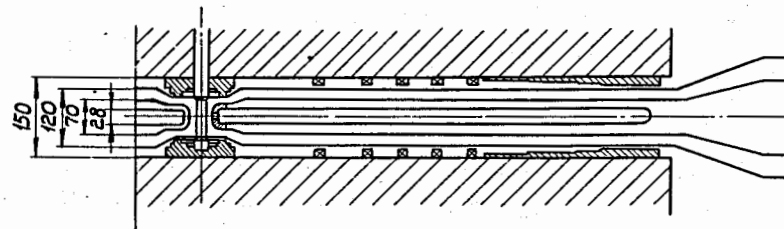


Рис. 1. Магнитный зазор циклотрона.

с радиусом. Кроме того, магнитное поле в центре искажается наличием в полюсном наконечнике вертикального отверстия для ввода ионного источника в камеру циклотрона. Аналитический расчёт магнитного поля в центральной области крайне затруднителен, поэтому для быстрого внесения изменений в геометрию центра эта область диаметром около 200 мм была сделана съёмной. Окончательная конфигурация центральной области подбиралась чисто экспериментальным путем.

Глава II

Получение требуемой для ускорения частиц конфигурации магнитного поля изохронного циклотрона является весьма трудоёмкой задачей. Это связано с необходимостью измерения значений магнитного поля в большом числе точек ($\approx 10^4$ и более) медианной плоскости с высокой степенью точности ($\approx 10^{-4}$). Для этих целей нами была создана специальная аппаратура измерений^{17/}. Регистрирующим элементом является датчик Холла, рабочий ток которого стабилизируется с точностью не хуже $2 \cdot 10^{-4}$. Сигнал, поступающий с датчика, измеряется цифровым вольтметром с точностью $5 \cdot 10^{-5}$.

В отличие от обычно принятых систем, когда измерение поля проводится для неподвижного датчика, в нашем случае датчик Холла непрерывно движется по азимуту с постоянной скоростью, и показания вольтметра выдаются периодически посредством опроса от специального устройства.

Суть конструкции кратко заключается в следующем.

На одной платформе с двигателем, перемещающим штангу в азимутальном направлении, находится источник света и фотодиод, помещенный в экран со щелью $(0,2 \times 8)$ мм². Между источником света и фотодиодом находится неподвижная лента с щелями, отстоящими друг от друга по углу на $1,875^\circ$. Этот угловой интервал выбран в качестве шага измерения по азиму-

ту ($n = 192$ на полном азимуте). В момент совпадения щелей ленты и фотодиода в цепи последнего вырабатывается импульс, который после дополнительного формирования запускает цифровой вольтметр. Показания его выводятся на перфоленту цифрочечатающего устройства, изготовленного на основе телеграфного аппарата СТА-2М. Геометрическая точность положения датчика в данном методе измерений составляет 0,01 см по радиусу, 0,05 см по высоте и $0,003^\circ$ по углу. Среднее время измерения каждой точки равно 2,5 сек, что в несколько раз ниже, чем это имеет место в методах с остановкой датчика^{18,9/}. Время измерения полного числа точек ($n = 9600$) в медианной плоскости составляет ≈ 10 часов.

В диссертации дан критерий выбора необходимого числа точек и проводится анализ возможных погрешностей измерений. По нашим оценкам, ошибка в величине поля составляет не более 5-6 э, что является удовлетворительным с точки зрения сохранения стабильности пучков ионов в процессе ускорения.

Информация, накопленная на перфоленте, вводится непосредственно в ЭВМ типа "Минск" для расчёта значений среднего поля и флаттера. Скорость обработки данных занимает 10-15 мин. Полученные результаты анализируются для последующей коррекции поля^{x/}.

Если не требуется последующей коррекции поля, то ведётся более детальный анализ данных, полученных на всем азимуте ($n = 9600$ точек), включающий расчёт амплитуд и фаз основных и низших гармоник поля, частот вертикальных и радиальных колебаний, фазового движения и т.д. Все эти операции выполняются с помощью специальных программ на ЭВМ типа "БЭСМ-4".

^{x/} Обычно для этих целей измерения проводились на элементе периодичности $\theta = 90^\circ$ ($n = 2400$ точек).

На рис. 26 представлена зависимость среднего поля от радиуса при трех значениях магнитной индукции, соответствующих ускорению ионов с $\frac{A}{Z} = 2,8; 3,2; 4$. Как следует из рисунка, отличие реального поля от изохронного составляет не более 30 э. Сдвиг фазы иона для трех указанных значений поля не превосходит величину $\Delta \sin \phi = \pm 0,4$ для всего диапазона радиусов (см. рис. 3). Следует отметить, что при изменении поля в центре от 19,3 до 20 кэ (см. рис. 26), изменение радиального распределения поля таково, что позволяет ускорять частицы в диапазоне $2,8 \leq \frac{A}{Z} \leq 4$ (энергия ионов от 9 до 20 Мэв/нуклон), без использования токовых корректирующих катушек [10]. Зависимость флаттера от радиуса представлена на рис. 2а. Начиная уже с $R \geq 10$ см, наблюдается резкое возрастание флаттера, чем достигается хорошая фокусировка пучка на начальных радиусах ускорения.

Глава III

После запуска ускорителя все полученные выше зависимости могут быть проанализированы с помощью пучков ускоренных ионов. На рис. 4 представлена зависимость интенсивностей пучка ионов от радиуса для C_{12}^{+4} , O_{16}^{+5} и He_4^{+1} ($\frac{A}{Z} = 3; 3,2; 4,0$ – соответственно). Все измерения проводились от $R = 10$ см до конечного радиуса $R = 88$ см. Как видно из рисунка, интенсивность пучка от $R = 20$ см до $R = 88$ см меняется слабо, что свидетельствует об отсутствии потерь, вызванных фазовыми сдвигами или нарушением устойчивости бетатронных колебаний. Незначительное уменьшение интенсивности в этой области связано с потерей ионов из-за перезарядки на остаточном газе ускорительной камеры. Вертикальное распределение пучка по радиусу, измеренное с помощью специального пробника, показало, что для всех значений $R \geq 10$ см вер-

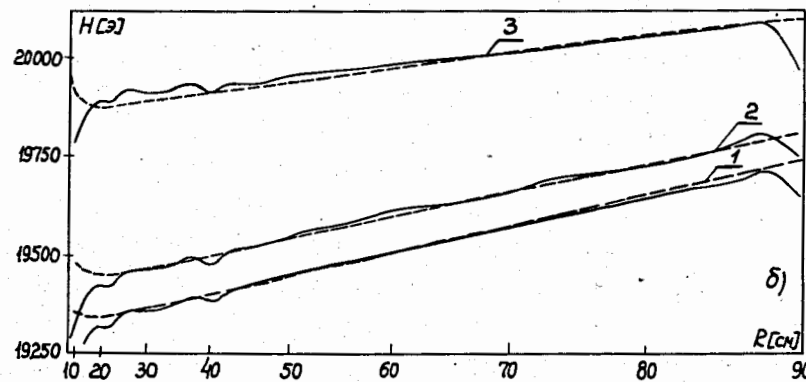
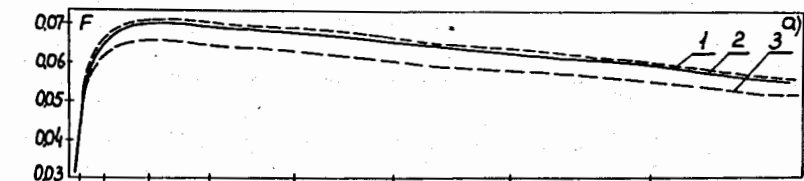


Рис. 2. Радиальные распределения флаттера (а) и среднего поля (б) для 1) $H_0 = 19,3$ кэ $\frac{A}{Z} = 2,8$
2) $H_0 = 19,55$ кэ $\frac{A}{Z} = 3,2$
3) $H_0 = 19,9$ кэ $\frac{A}{Z} = 4,0$

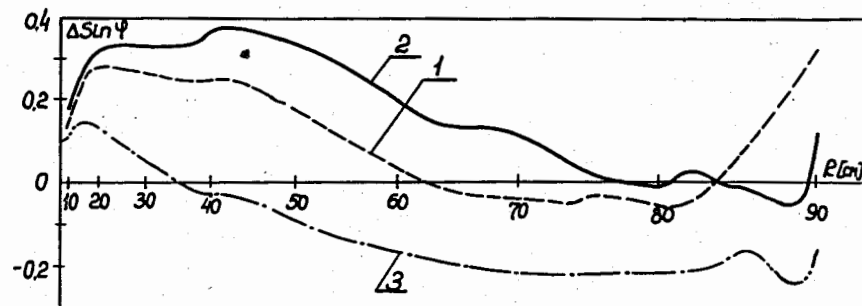


Рис. 3. Сдвиг фазы частицы $\Delta \sin \phi (\phi_0 = 0)$ в зависимости от радиуса. Кривые 1,2,3 соответствуют значениям $H_0 = 19,3; 19,55; 19,9$ кэ.

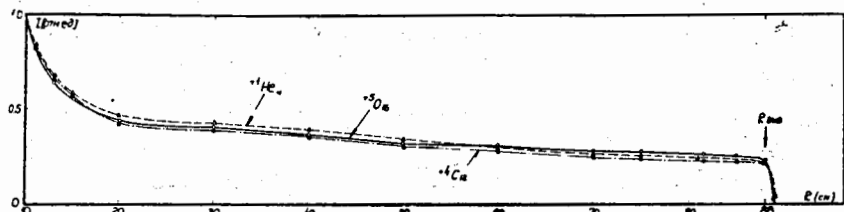


Рис. 4. Зависимость интенсивности пучков C_{12}^{+4} , O_{16}^{+5} и He_4^{+1} ($\frac{\lambda}{z} = 3,0; 3,2; 4,0$) от радиуса ускорения. Измерения проведены при $U_g = 75$ кв и давлении в камере ускорителя $p = 3 \cdot 10^{-6}$ мм рт.ст.

тичный размер пучка не превышает 10 мм (минимальный вертикальный зазор для пучка составляет 30 мм). Полученные данные свидетельствуют о стабильности пучка в процессе ускорения для всех ионов с $2,8 \leq \frac{\lambda}{z} \leq 4$.

В диссертации приводятся резонансные кривые, измеренные на различных радиусах для различных ионов, дана зависимость тока пучка от вакуума в ускорительной камере. Интенсивность и энергия пучков ионов, полученных на циклотроне У-200, пред-

Таблица

Тип ионов	Полная энергия, Мэв	Энергия в мэв/нукл.	Интенсивность в импульсе (мкА)
Дейтроны (при уск. D_2^{+1})	19,5	9,7	200
He_3^{+1}	52	17	400
He_4^{+1}	39	9,9	600
C_{12}^{+3}	118	10	300
C_{12}^{+4}	210	17,5	80
N_{14}^{+4}	180	13	80
N_{14}^{+5}	280	20	20
N_{15}^{+5}	260	17	10
O_{16}^{+5}	245	15	10
Ne_{20}^{+5}	195	9,7	10

ставлены в таблице. Все измерения проводились при работе циклотрона в импульсном режиме (длительность импульса 1-1,5 мсек, частота посылок 200-300 гц) при напряжении на дуантах $U = 75$ кв и давлении в камере $p = (2-3) \cdot 10^{-6}$ мм рт.ст. /11,12/

Из полученных в работе данных можно сделать следующие выводы:

1. В результате расчетов и модельных опытов показано, что на основе серийного магнита СП-72 может быть создан 200-сантиметровый изохронный циклотрон с уровнем среднего поля ≈ 20 кэ. Это достигается существенным уменьшением воздушного зазора электромагнита ($\delta/D \approx 0,05$) и помещением дуантов протяженностью 45° в долине.

2. Разработана экспрессная методика магнитных измерений. Средняя скорость измерения поля в каждой точке составила 2,5 сек, погрешность определения не превышает 5-6 э на уровне 20 000 э.

3. Для получения необходимого пространственного распределения магнитного поля в межполюсном зазоре не использовались специальные ферромагнитные сплавы, все элементы магнитной цепи сделаны из стали Ст. 3.

4. Выбранная структура магнитного поля обеспечивает хорошую фокусировку частиц в процессе ускорения и позволяет получить интенсивные пучки ионов от дейтронов до ионов неона практически без использования корректирующих катушек.

Полученные результаты являются основой для конструирования целой серии ускорителей различного назначения, в том числе и циклотронов тяжелых ионов в широком диапазоне масс ускоряемых частиц.

Результаты, лежащие в основе диссертации, докладывались на Всесоюзном совещании по ускорителям заряженных частиц (Москва, 1968 г.), на Национальной конференции по ускорителям (Вашингтон, 1969 г.) и представлены на Международную конференцию по циклотронам (Оксфорд, 1969 г.).

Диссертация написана по материалам работ /3-4,6-7, 10-12/

Л и т е р а т у р а

1. R.J. Jones et al. Nucl.Instr. and Meth., v.18-19, 46, 1962.
2. А.Г. Алексеев и др. Труды Международной конференции по ускорителям, стр. 600-603, Дубна, 1963 г.
3. И.А. Шелаев, С.И. Козлов, Р.Ц. Оганесян, Ю.Ц. Оганесян, В.А. Чугреев. Препринт ОИЯИ, 9-3999, Дубна, 1968.
4. И.А. Шелаев, С.И. Козлов, Р.Ц. Оганесян. Доклад на Всесоюзном совещании по ускорителям заряженных частиц (труды конференции), Москва, 1968 г.
5. В.И. Данилов. Автореферат диссертации ОИЯИ Р-362, 1959.
6. С.И. Козлов, Р.Ц. Оганесян, И.А. Шелаев. Труды Всесоюзного совещания по ускорителям заряженных частиц, Москва, 1968 г.
7. Э.Г. Имаев, С.И. Козлов, Р.Ц. Оганесян, С.Г. Фефилова, И.А. Шелаев, Л.П. Челноков. Препринт ОИЯИ, 9-3713, Дубна, 1968 г.
8. J.H. Dorst. Nucl.Instr. and Meth., v. 18-19, 135, 1962.
9. E.D. Hudson et al. Nucl.Instr. and Meth., v. 18-19, 159, 1962.
10. И.А. Шелаев, С.И. Козлов, Р.Ц. Оганесян, С.Г. Фефилова. Препринт ОИЯИ, Р9-4233, Дубна, 1968 г.
11. I.A. Shelaev, S.I. Kozlov, R.Tz. Oganessian and Yu.Tz. Oganessian, IEEE Transactions on Nucl. Science, v. NS-16, N3, 802, 1969.
12. И.А. Шелаев, В.С. Алфеев, С.И. Козлов, В.М. Николаев, Р.Ц. Оганесян. Сообщения ОИЯИ, Р9-5048, Дубна, 1970 г.

Рукопись поступила в издательский отдел
23 апреля 1970 года.