

К-484

ОБЪЕДИНЕННЫЙ ИНСТИТУТ ЯДЕРНЫХ ИССЛЕДОВАНИЙ

9-81-745

КЛЕНИН

Борис Андреевич

ФОРМИРОВАНИЕ МАГНИТНОГО ПОЛЯ
И ИССЛЕДОВАНИЕ ДИНАМИКИ ВЫВОДА ИОНОВ
ЧЕТЫРЕХМЕТРОВОГО ИЗОХРОННОГО ЦИКЛОТРОНА

Специальность: 01.04.13 - электрофизика

Автореферат диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Дубна 1981

Работа выполнена в Лаборатории ядерных реакций Объединенного института ядерных исследований.

Научные руководители:

доктор физико-математических наук
профессор

Юрий Цолакович ОГАНЕСЯН

кандидат физико-математических наук
младший научный сотрудник

Святослав Иванович КОЗЛОВ

Официальные оппоненты:

доктор технических наук
старший научный сотрудник

Артем Арменакович АРЗУМАНОВ

кандидат физико-математических наук
старший научный сотрудник

Леон Арсенович САРКИСЯН

Ведущее научно-исследовательское учреждение:

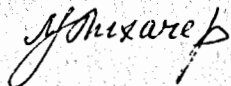
Институт ядерных исследований АН УССР, Киев.

Защита диссертации состоится " " 1982 года в " "
часов на заседании Специализированного совета Д-047.01.02 при Лабо-
ратории высоких энергий Объединенного института ядерных исследова-
ний по адресу: г.Дубна, Московской области, Лаборатория высоких
энергий.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке ЛВЭ ОИЯИ.

Автореферат разослан " " 1982 года.

УЧЕНЫЙ СЕКРЕТАРЬ СПЕЦИАЛИЗИРОВАННОГО СОВЕТА

 ЛИХАЧЕВ М.Ф.

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность

Успехи, достигнутые в физике тяжелых ионов за последние 10-15 лет, стимулировали разработку и создание ускорителей нового поколения, предназначенных для получения пучков тяжелых ионов всех элементов таблицы Д.И. Менделеева. Одно из основных направлений в развитии ускорителей тяжелых ионов получил циклотронный способ ускорения. Это обусловлено тем, что циклотрон отличается простотой конструкции, надежностью работы и высокой интенсивностью пучков ионов по сравнению с другими ускорителями.

Наиболее сложной задачей при создании изохронного циклотрона тяжелых ионов является формирование его магнитного поля. Большой объем и высокая точность измерений поля ставят целый ряд проблем, связанных с методиками измерения и формирования поля.

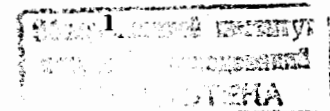
Большинство экспериментов на циклотронах тяжелых ионов проводится с выведенными пучками. Поэтому разработка системы эффективного вывода пучков ионов является одной из важных задач при сооружении ускорителя. Наряду с применением классического способа вывода ионов электростатическим полем разрабатываются и новые методы вывода. Одним из них является вывод ионов перезарядкой, предложенный в Лаборатории ядерных реакций^{х)}. Этот метод, отличающийся простотой, надежностью и высокой эффективностью вывода ионов, достигающей 100%, реализован на ряде циклотронов тяжелых ионов.

Самым крупным циклотроном является в настоящее время четырехметровый изохронный циклотрон тяжелых ионов ОИЯИ (У-400), запущенный в 1978 году. Циклотрон позволяет ускорять ионы от гелия до урана до кинетической энергии 1-35 МэВ/нуклон. Основным диапазоном являются ионы от Ne до Xe с энергией 6-10 МэВ/нуклон.

Целью настоящей работы является:

1. Формирование и исследование магнитного поля четырехметрового изохронного циклотрона тяжелых ионов /I/.
2. Теоретическое исследование динамики вывода ионов методом перезарядки из секторного циклотрона У-400 /2,3/, направленное на повышение эффективности вывода ионов.
3. Разработка комплекса вычислительных программ для исследований магнитного поля /4,5/ и динамики вывода ионов ускорителя.
4. Экспериментальное исследование по ускорению и выводу ионов на циклотроне.

^{х)} Г.Н. Вялов, Ю.Ц. Оганесян, Г.Н. Флеров, ОИЯИ, 1984, Дубна, 1964.



Научная новизна работы

1. Сформировано магнитное поле самого крупного изохронного циклотрона тяжелых ионов – ускорителя У-400 /1/.
2. Впервые исследована динамика вывода ионов двумя и тремя оборотами из циклотрона с азимутальной вариацией магнитного поля.
3. Обнаружен эффект пространственного разделения орбит выводимых ионов разных зарядов /3/, позволяющий реализовать вывод двух пучков, что приводит к увеличению эффективности вывода ионов из циклотрона У-400.

Практическая ценность работы

1. Сформированное магнитное поле циклотрона У-400 обеспечивает устойчивое и изохронное ускорение всех ионов заданного диапазона.
3. Теоретические исследования динамики вывода ионов нашли подтверждение при выводе ионов из циклотрона У-400. С радиусов 150-170 см ускорителя осуществлен вывод пучков ионов (^{16}O до ^{50}Ti) с эффективностью ~ 50-80%.
3. Полученные результаты по выводу ионов методом перезарядки могут быть использованы на других секторных циклотронах.

Апробация работы

Работы, положенные в основу диссертации, докладывались на Международном совещании по технике изохронных циклотронов (Краков, 1978) и на 6 и 7 Всесоюзных совещаниях по ускорителям заряженных частиц (Дубна, 1978, 1980гг).

Публикации

Основное содержание диссертации опубликовано в 7 работах.

Объем работы

Диссертация состоит из введения, трех глав и заключения. Она содержит 126 страниц машинописного текста, в том числе 52 рисунка и 4 таблицы и список литературы, состоящий из 90 наименований.

СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении дается краткий обзор развития циклотронного способа ускорения тяжелых ионов и рассматриваются общие требования к магнитному полю циклотрона. Изложены основные результаты диссертации по главам.

Первая глава диссертации посвящена формированию и исследованию магнитного поля /1/ изохронного циклотрона тяжелых ионов У-400.

Характерная особенность циклотрона – весьма высокая напряжен-

ность среднего магнитного поля, составляющая 21,3 кЭ и достигнутая оптимизацией магнитной цепи электромагнита.

Эффективным методом, позволяющим определить оптимальные геометрические параметры электромагнита, является численное моделирование его магнитного поля на ЭВМ. Эта задача сводится к решению уравнения Пуассона

$$\frac{\partial}{\partial x} \left(\frac{1}{\mu} \frac{\partial A}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(\frac{1}{\mu} \frac{\partial A}{\partial y} \right) = - \frac{4\pi j}{c} \quad (1)$$
$$B_x = \frac{\partial A}{\partial y}; \quad B_y = - \frac{\partial A}{\partial x},$$

где $\mu = \mu(B)$ – магнитная проницаемость стали электромагнита, зависящая от поля B , A – z -компонента векторного потенциала, j – плотность тока в обмотке возбуждения. Разработанная программа численного решения уравнения (1) /4/ успешно использовалась при создании электромагнита циклотрона У-400.

Оптимизация электромагнита циклотрона сводилась к следующему:

1. Выбору геометрии обмоток возбуждения и минимального расстояния между ними с целью создания максимального поля.
2. Выбору наименьшей допустимой высоты воздушного зазора.
3. Оптимальному выбору сечения магнитопровода, приводящему к уменьшению поля рассеяния.

Создание изохронного магнитного поля ускорителя У-400 является трудоемкой и сложной задачей. Это обусловлено тем, что формирование поля осуществляется методом последовательных приближений, который сводится к многократно повторяемой схеме: измерение поля → обработка и анализ результатов измерения → коррекция поля. Это приводит к большому объему магнитных измерений, составляющему ~ $2 \cdot 10^6$ точек. Очень высокие требования предъявляются и к точности формирования поля. Магнитное поле циклотрона должно обеспечивать пространственную и временную устойчивости движения ионов при их ускорении от начального до конечного радиусов. Для обеспечения временной устойчивости движения ионов, заключающейся в постоянстве частоты обращения ионов в циклотроне, отклонение рабочего поля от изохронного не должно превышать ± 10 Э для основного диапазона радиусов. Для пространственной устойчивости движения ионов градиент среднего магнитного поля в области конечных радиусов ускорения должен лежать в пределах $0 < \frac{dH}{dr} < 8$ Э/см. Указанные требования к точности формирования магнитного поля определяют требования к точности измерительной аппаратуры, созданной для циклотрона У-400 /6-7/. Основные ее особенности следующие: 1) магнитное поле измерялось десятью датчиками Холла, 2) измерение магнитного поля проводилось в старт-стоп-

ном режиме (датчики неподвижны в момент измерения), 3) датчики по радиусу и азимуту перемещались автоматически. Измерения по радиусу проводились с шагом 20–40 мм, а по азимуту с угловым интервалом $0,9375^\circ$. Средняя скорость измерения поля в одной точке составляла 0,6 с. Для измерения использовались датчики из антимолида индия. Точность измерения магнитного поля в точке составляла $2 \cdot 10^{-4}$. Результаты измерения магнитного поля в виде ЭДС Холла выводились на перфоленту, а затем обрабатывались на ЭВМ "Минск-32". Для математической обработки магнитного поля разработана библиотека программ, позволяющая получать следующую информацию о поле: 1) зависимость среднего поля и флаттера от радиуса; 2) значения основных и низших гармоник разложения поля в ряд Фурье; 3) частоты радиальных и аксиальных бетатронных колебаний; 4) фазовое движение ионов.

Центральная магнитная структура циклотрона У-400 представлена на рис. 1. Четыре пары секторов, создающих азимутальную вариацию магнитного поля, имеют прямые границы и угловую протяженность 45° . Их высота, составляющая 90 мм, выбиралась из требований аксиальной фокусировки ионов, ускоряемых до энергии 30–35 МэВ/нуклон. Максимальная величина флаттера магнитного поля равна $\sim 0,09$.

Изохронная форма магнитного поля создается кольцевыми и азимутальными (на границах секторов) шиммами, а также десятью парами кольцевых корректирующих катушек. Для коррекции амплитуды и фазы первой гармоники азимутальной неоднородности магнитного поля используется 12 пар гармонических обмоток.

Зависимость сформированных магнитных полей от радиуса циклотрона для ионов с $A/Z = 4; 5,4; 10$ (A – массовое число иона, Z – заряд иона в единицах заряда протона) представлена на рис. 2. Отклонения магнитных полей, сформированных железными массами, от изохронных составляют $\pm 10 - 30$ Э для радиусов ускорения 40 – 175 см. Круговые корректирующие катушки позволяют уменьшить погрешности сформированного поля до $\pm 5 - 20$ Э. Для дополнительной вертикальной фокусировки ионов в центральной области циклотрона (0 – 20 см) магнитное поле выполнено спадающим с градиентом ~ 40 Э/см.

Исследования показали, что сформированное магнитное поле циклотрона У-400 удовлетворяет требованиям пространственной и временной устойчивости движения ионов. Частоты бетатронных колебаний составляют $\nu_r = 0,98 - 1,03$, $\nu_z = 0,15 - 0,25$. Сдвиг фаз ионов равен $\pm 10 - 15^\circ$ для всех ускоряемых ионов с $A/Z = 4 - 10$.

Во второй главе приведены результаты теоретических исследований по динамике вывода ионов методом перезарядки из секторного циклотрона У-400.

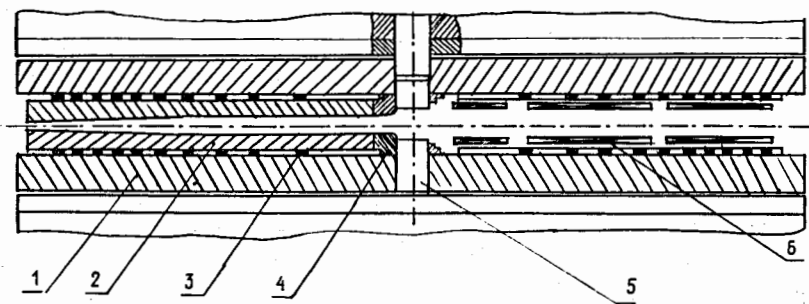


Рис. 1. Магнитный зазор ускорителя. 1 – крышки вакуумной камеры, 2 – секторы, 3 – корректирующие обмотки, 4 – центральные шиммы, 5 – центральные пробки, 6 – гармонические обмотки.

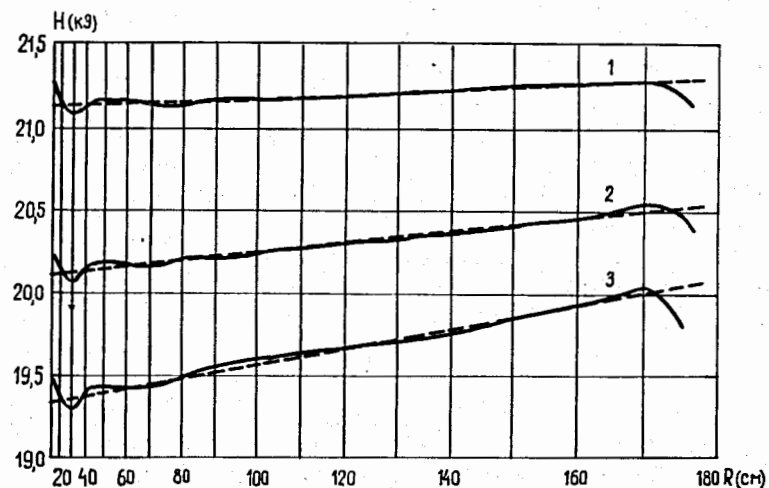


Рис. 2. Средние магнитные поля циклотрона, сформированные кольцевыми и азимутальными шиммами, для ионов с отношениями 1 – $A/Z = 10$, 2 – $A/Z = 5,4$, 3 – $A/Z = 4$. — — — — — изохронные поля, ————— сформированные поля.

Этот способ вывода впервые реализован на циклотроне тяжелых ионов У-200^х). Сущность вывода (рис.3) состоит в следующем. Ионы с зарядом Z_i , ускоренные до радиуса R циклотрона, проходят через тонкую (20 - 100 мкг/см²) мишень (например, из углерода), повышая свой заряд до \bar{Z} . После перезарядки радиус кривизны траектории иона резко уменьшается, движение иона из-за разных напряженностей магнитных полей в "холме" и "долине" циклотрона становится радиально неустойчивым и ионы выводятся из вакуумной камеры ускорителя. В зависимости от отношения зарядов Z_i/\bar{Z} , радиального и азимутального положений мишени пучок может выйти из циклотрона, совершив один, два и более оборотов после перезарядки. После прохождения пучком мишени в нем устанавливается распределение интенсивности по зарядам $I/I_0 = f(\bar{Z})$, где I_0 - интенсивность пучка с зарядом Z_i , I - интенсивность ионов, имеющих заряд \bar{Z} . Функция $f(\bar{Z})$ зависит от кинетической энергии ионов, толщины мишени и не зависит от начального заряда Z_i . Эффективность вывода ионов определяется интенсивностью группы ионов с зарядом \bar{Z} . Если для ионов от He до Ne, ускоренных до энергии 6-10 МэВ/нуклон, интенсивность I/I_0 ионов с зарядом \bar{Z} близка к 100%, то для ионов от Ar до Xe с той же кинетической энергией эта интенсивность равна 60 - 15%. Однако для ионов Ar-Xe наряду с ионами, имеющими заряд \bar{Z} , образуются группы ионов с зарядами $\bar{Z} \pm 1$, $\bar{Z} \pm 2$ и интенсивностями I/I_0 (для ионов с зарядами $\bar{Z} \pm 1$), равными 30 - 15%. Поэтому для циклотрона У-400 имеется возможность одновременного выпуска двух-трех пучков ионов разных зарядов.

Динамика вывода ионов исследовалась численным моделированием движения ионов в магнитном поле циклотрона. Уравнения движения ионов

$$\frac{d}{dt}(Am\vec{v}) = \frac{eZ}{c}[\vec{v} \times \vec{H}] \quad (2)$$

где Am , eZ - масса и заряд иона, \vec{v} - скорость иона, \vec{H} - напряженность магнитного поля, c - скорость света, t - время, интегрировались на ЭВМ методом Рунге-Кутты четвертого порядка. Цель расчетов траекторий выводимых ионов состояла в следующем:

1. Исследовать особенности однооборотного, двухоборотного и трехоборотного выводов ионов из циклотрона.
2. Исследовать пространственное разделение выводимых пучков ионов разных зарядов.

^х) И.А.Шелаев, В.С.Алфеев, С.И.Козлов, Р.Ц.Оганесян. ПТЭ № 3, 1970, 53.

3. Определить размеры выводимых пучков.
4. Определить диапазон регулирования энергии ионов.
5. Определить координаты перезарядной мишени при выводе ионов одним, двумя и тремя оборотами.

Рисунок 3, на котором (в качестве примера) приведены расчетные траектории ионов ⁴⁸Ca, показывает особенности вывода ионов из циклотрона У-400. Разделение пучков при однооборотном выводе, состав-

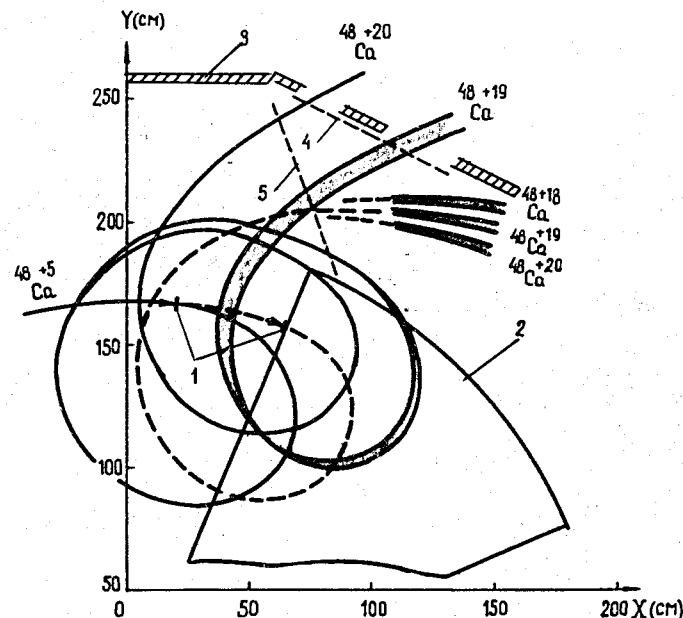


Рис.3. Траектории ионов ⁴⁸Ca, выведенных с радиуса 172 см циклотрона У-400. 1 - перезарядная мишень, 2 - сектор, 3 - вакуумная камера, 4 - многоламельный токовый пробник, 5 - токовый пробник - сканер.

лящее 3-4 см, достигается только за счет разных зарядов ионов. При выводе ионов двумя и более оборотами существует дополнительный механизм разделения пучков, который является преобладающим по сравнению с зарядовым разделением. Это разделение достигается при таком положении мишени, когда центр орбиты одного из выводимых пучков дрейфу-

ет как вдоль радиальной, так и азимутальной границ сектора. Исследования показали, что для ионов основного диапазона ($Ne-Xe$), ускоренных до конечного радиуса, азимутальное положение мишени, при котором осуществляется двухоборотный вывод двух пучков и достигается разделение между пучками в 35–40 см (заряды пучков отличаются на 1–3 единицы) лежит в пределах $0 - 11^\circ$ от середины долины (по ходу пучка). Ионы легких элементов ($He-O$), ускоренные до энергии 30–35 МэВ/нукл., выводятся одним оборотом (один пучок). Горизонтальные и вертикальные размеры пучков за вакуумной камерой циклотрона (без фокусирующего канала) не превышают 10 см.

Циклотрон У-400 является ускорителем с регулируемой энергией выводимых пучков ионов. Дискретное регулирование энергии ионов достигается изменениями уровня среднего магнитного поля циклотрона и заряда ускоряемых ионов. Это позволяет изменять их энергию от 6 до 35 МэВ/нуклон. Плавное регулирование энергии ионов осуществляется изменением радиального и азимутального положений мишени. Показано, что при выводе ионов двумя оборотами пределы регулирования энергии на циклотроне У-400 составляют 30–35%, что в 3–4 раза больше, чем при однооборотном выводе. Вывод ионов с внутренних радиусов (до $R = 150$ см) осуществляется при положении мишени $12^\circ < \varphi \leq 25^\circ$ от середины долины.

В третьей главе приведены экспериментальные результаты по измерению ряда параметров ускоренных и выведенных пучков ионов циклотрона У-400, таких, как:

1. Зависимость интенсивности пучков ионов от радиуса ускорения при различных напряжениях на дуантах и давлении в камере циклотрона.
2. Вертикальные и горизонтальные размеры ускоренных пучков в зависимости от радиуса.
3. Пространственные положения, разделение и размеры выведенных пучков ионов разных зарядов.

К настоящему времени на циклотроне ускорены пучки ионов от I_{60} до ^{63}Cu с отношениями $A/Z = 7-10$. Средние интенсивности пучков на конечном радиусе ускорения 172 см составили от $4 \cdot 10^{13}$ I/c (для кислорода) до $2 \cdot 10^{12}$ I/c (для меди). Измерения указанных параметров показали, что сформированное магнитное поле обеспечивает фокусировку и изохронность при движении ионов, ускоряемых на циклотроне. При достаточно высоком вакууме, составляющем $\sim (5-7) \cdot 10^{-7}$ Торр, интенсивность пучков в интервале радиусов ускорения $R = 40-172$ см меняется слабо (рис. 4), что указывает на отсутствие потерь ионов в процессе ускорения, вызванных фазовыми сдвигами или нарушением пространственной устойчивости движения ионов. Распределение пучка ионов по вертикали,

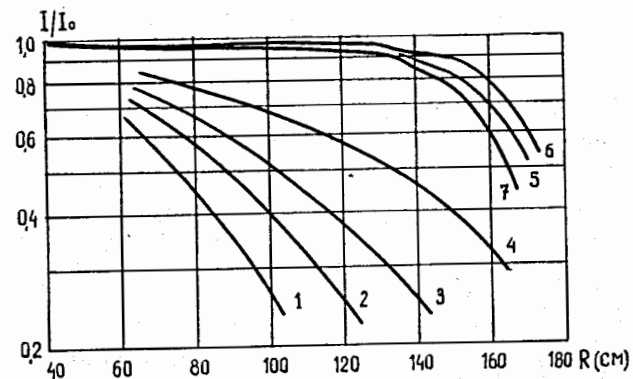


Рис. 4. Зависимость интенсивности ускоренных пучков ионов $^{24}Mg^{+3}$ (1-4), $^{22}Ne^{+3}$ (5), $^{40}Ar^{+5}$ (6) и $^{63}Cu^{+8}$ (7) от радиуса ускорения при напряжении на дуантах 79 кВ и давлениях в вакуумной камере ускорителя (Торр): 1 - $P = 5 \cdot 10^{-6}$, 2 - $P = 3 \cdot 10^{-6}$; 3 - $P = 2 \cdot 10^{-6}$, 4 - $P = 10^{-6}$, 5-7 - $P = 7 \cdot 10^{-7}$.

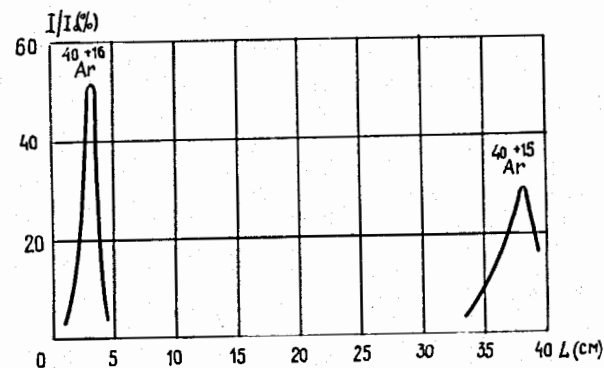


Рис. 5. Горизонтальное распределение интенсивностей пучков ионов ^{40}Ar , выведенных с радиуса 160 см. циклотрона У-400.

измеренное трехламельным токовым пробником (высота центральной ламели составляла 10 мм, а верхней и нижней 15 мм) показало, что размеры пучка по вертикали не превышают 10–15 мм, а медианная и средняя геометрические плоскости циклотрона близки друг к другу. Измерения амплитуд некогерентных колебаний ускоряемых ионов (двумя пробниками по "методу теней") показали, что эти амплитуды составляют ~ 10 мм для $R = 152$ см и ~ 6 мм для $R = 170$ см циклотрона.

На ускорителе У-400 с радиусов 150–170 см выведены пучки ионов от ^{16}O до ^{48}Tl . В качестве перезарядной выводной мишени используется фольга из углерода толщиной 40–60 мкг/см² и размером ~ 10x10 мм², которая укрепляется в медной рамке. Перемещение фольги по радиусу (от 150 до 180 см) и азимуту (от 0° до 22,5° от середины "долины") осуществляется специальным кинематическим устройством. Положение и размеры выводимых пучков ионов измерялись токовым пробником, состоящим из 24 ламелей (высота ламели 100 мм и ширина 20 мм), и токовым пробником – сканером с вертикальным размером 100 мм и горизонтальным 1 мм. Первый из них располагался у вакуумной камеры циклотрона (рис.3), а второй перемещался от камеры до сектора ускорителя.

Указанные ионы выведены двумя оборотами. Эффективность вывода составила ~ 50% для ионов ^{48}Tl и ~ 80% для ионов ^{16}O . Полуширины выведенных пучков (без фокусирующего канала) не превышали ~ 5 см. Вертикальный размер пучка составлял ~ 1 см. Расстояние между пучками ионов разных зарядов (отличающихся на единицу) составило (для ионов от Ne до Ca) ~ 35–40 см (рис.5).

Транспортировка пучков ионов до физической мишени осуществлялась по ионопроводу диаметром 110 мм и длиной ~ 15 м. Для фокусировки использовались квадрупольные линзы 2МЛ-5-2. Положение и форма пучка определялись как визуально с помощью телевизионной установки ВАТ I.I фирмы RFT (ГДР) по свечению кварцевой пластины, так и системой токовых пробников. Интенсивность пучков на конце ионопровода измерялась цилиндром Фарадея. Эффективность прохождения пучков от вакуумной камеры циклотрона до физической мишени составляет ~ 70%, а размеры пучков на мишени равны ~ 15x15 мм².

ОСНОВНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ ДИССЕРТАЦИИ

1. Сформировано и исследовано магнитное поле четырехметрового изохронного циклотрона тяжелых ионов, обеспечивающее устойчивое и изохронное движение ускоряемых ионов.

2. До конечного радиуса циклотрона ускорены ионы с отношениями $A/Z = 7-10$ с энергиями 6–12 МэВ/нуклон и средними интенсивностями $2 \cdot 10^{12} - 4 \cdot 10^{13}$ и/с.

3. Исследована динамика однооборотного, двухоборотного и трехоборотного выводов ионов методом перезарядки.

4. Показано, что для циклотрона У-400 как ускорителя с плавно регулируемой энергией ионов необходимо наряду с однооборотным выводом использовать вывод ионов двумя оборотами, что позволяет регулировать энергию ионов в пределах 30–35%.

5. С радиусов 150–170 см циклотрона осуществлен двухоборотный вывод ионов $^{16}\text{O} - ^{48}\text{Tl}$ с эффективностью 50–80%.

6. Обнаружен эффект пространственного разделения орбит выводимых ионов разных зарядов, позволяющий выводить с конечного радиуса циклотрона У-400 одновременно два пучка ионов. Это приводит к увеличению эффективности вывода ионов в 1,5 – 2 раза.

7. Разработан комплекс программ для ЭВМ БЭСМ-6 и "Минск-32" для исследований магнитного поля и динамики вывода ионов циклотрона У-400.

Работы, положенные в основу диссертации:

1. Ю.Ц.Оганесян, С.И.Козлов, Б.А.Кленин и др. ОИЯИ, 9-II992, Дубна, 1978.
2. Б.А.Кленин, С.И.Козлов, М.М.Фикс. ОИЯИ, 9-10652, Дубна, 1977.
3. Ю.Ц.Оганесян, С.И.Козлов, Г.Г.Гульбекян, Б.А.Кленин. ОИЯИ, 9-II993, Дубна, 1978.
4. Ю.С.Дерендяев, Б.А.Кленин. ОИЯИ, PII-6579, Дубна, 1972.
5. И.А.Шелаев, С.И.Козлов, Б.А.Кленин. ОИЯИ, P9-5033, Дубна, 1970.
6. А.К.Евдокимов, В.Б.Злоказов, С.И.Козлов, Б.А.Кленин и др. ОИЯИ, 9-9545, Дубна, 1976.
7. Р.Ц.Оганесян, С.И.Козлов, Б.А.Кленин и др. В кн.: Всесоюзная научно-техн. конф. по теории, методам и средствам измерения магнитных величин. Тезисы докладов. Изд. ВНИИЭП АН СССР, Ленинград, 1977, с.29.

Рукопись поступила в издательский отдел
25 ноября 1981 года.