



**ОБЪЕДИНЕННЫЙ ИНСТИТУТ ЯДЕРНЫХ ИССЛЕДОВАНИЙ**

*K 59*

**9-88-590**

**УДК 621.384.6**

**КОЗЛОВ**

**Святослав Иванович**

**РАЗРАБОТКА И ИССЛЕДОВАНИЕ  
ИЗОХРОННЫХ ЦИКЛОТРОНОВ  
ТЯЖЕЛЫХ ИОНОВ**

**Специальность: 01.04.20 – физика пучков  
заряженных частиц и ускорительная техника**

**Автореферат диссертации на соискание ученой степени  
доктора технических наук**

**Дубна 1988**

Работа выполнена в Лаборатории ядерных реакций Объединенного института ядерных исследований.

Официальные оппоненты:

доктор технических наук

Алим Алексеевич  
ГЛАЗОВ

доктор технических наук

Артем Арменакович  
АРЗУМАНОВ

доктор технических наук

Альберт Владимирович  
СТЕПАНОВ

Ведущее научно-исследовательское учреждение:

Институт ядерных исследований  
АН УССР (г. Киев)

Защита состоится "\_\_\_" \_\_\_\_\_ 1988 г. в "\_\_\_" часов на заседании Специализированного совета Д.047.01.03 при Лаборатории ядерных проблем Объединенного института ядерных исследований, г. Дубна Московской области, ДЯП ОИЯИ, конференц-зал.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке ДЯП ОИЯИ.

Автореферат разослан "\_\_\_" \_\_\_\_\_ 1988 г.

Ученый секретарь  
Специализированного Совета

Ю.А.БАТУСОВ

## ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

### Актуальность темы

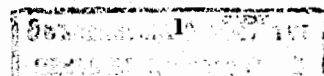
Развитие современной ядерной физики тесно связано с успехами в разработке ускорителей заряженных частиц.

Экспериментальные исследования с тяжелыми ионами ознаменовались крупными научными достижениями. В Лаборатории ядерных реакций ОИЯИ выполнен ряд важнейших работ по синтезу новых элементов, получению и изучению свойств нейтронно-избыточных легких ядер и исследованию запаздывающих протонов, запаздывающего деления и спонтанно делящихся изотопов в области тяжелых элементов, по экспериментальному измерению ультракоротких времен жизни ядер, изучению механизма взаимодействия сложных ядер (реакций, протекающих с образованием составного ядра), многонуклонных передач, деления и ряде других.

Эти работы были выполнены на пучках ускоренных до энергии 5+ +10 МэВ/нукл. ионов с массой  $A < 100$ . Дальнейшее продвижение к ускорению тяжелых ионов вплоть до урана, существенное повышение энергии частиц до 100+200 МэВ/н, интенсивности пучков даст новый скачок в исследовании проблем физики атомного ядра, открывает широкие возможности в решении целого ряда фундаментальных задач.

Деление тяжелых атомов под действием ускоренных ионов с массой  $A > 100$  позволит получать изотопы элементов вплоть до  $Z=80$  с избытком нейтронов более 10-12 единиц. На пучках ионов с  $A > 200$  могут быть поставлены качественно новые эксперименты по проверке фундаментальных законов квантовой электродинамики, изучению квазиатомных состояний тяжелых атомов. Пучки тяжелых ионов позволяют проводить исследование структур и изучение химических процессов с сильно ионизованными атомами, свойств нуклидов на границе ядерной стабильности, что важно для развития теории ядра и некоторых направлений в астрофизике. Возможно исследование новых явлений в реакциях с тяжелыми ионами, когда реализуется состояние ядерной материи с аномально высокой плотностью и температурой. Большой интерес проявляется к изучению процессов кумулятивного рождения мезонов при энергиях больше 80 МэВ/нукл. и генерации высокоэнергетичных нуклонов и легких ядер.

Поскольку использование ускоренных тяжелых ионов существенно увеличивает число каналов реакций, а сечение образования большинства исследуемых изотопов не превышает значений  $10^{-32}-10^{-33}$  см<sup>2</sup>, то интенсивности пучков ионов должны соответствовать величине  $10^{12}-10^{13}$  част./с. Для большинства экспериментов величину разброса по энергии частиц в



пучке в 1% следует считать достаточной, т.е. этот параметр пучка в нашем случае не является основным. Однако для отдельных прецизионных опытов следует предусмотреть режим работы ускорителя, дополнительное оборудование, обеспечивающие монохроматичность пучка на уровне 0,1-0,2%.

Для эффективного использования ускоренных пучков тяжелых ионов, создания достаточно экономичной системы разводки внешних пучков эмиттанс пучка должен быть порядка  $20 \pm 30$  п.мм.мрад.

В Лаборатории ядерных реакций Объединенного института ядерных исследований под руководством академика Г.Н.Флерова и профессора Ю.Ц.Оганесяна в течение последних 25 лет ведутся исследования наиболее перспективного для решения указанных выше задач - циклотронного метода ускорения тяжелых ионов.

Диссертация является обобщением работ, выполненных в соответствии с научно-техническими планами ЛЯР ОИЯИ по развитию ускорительной базы Лаборатории.

Разработка новых ускорителей обуславливает проведение большого комплекса исследований, разбиваемого на этапы численного моделирования динамики частиц, магнитных систем на ЭВМ, создания моделей для экспериментальных исследований.

Цель реферлируемой диссертации заключается в исследовании процессов ускорения и выводе частиц в циклотронах и обосновании технических решений, обуславливающих получение интенсивных пучков тяжелых ионов на изохронных циклотронах с энергиями до сотни МэВ на нуклон, а именно:

- а) в разработке центральной ионной оптики циклотронов для ускорения ионов в широком диапазоне отношений  $A/Z$ ;
- б) в разработке магнитных структур изохронных циклотронов тяжелых ионов;
- в) в исследованиях эффективных способов выводе пучков тяжелых ионов;
- г) в исследованиях каскадных способов ускорения тяжелых ионов.

Научная новизна исследований, относящихся к проблеме ускорения тяжелых ионов в циклотронах, определяется тем, что эта задача была полностью решена впервые на циклотронах ЛЯР и послужила основой для развития этих работ во многих других лабораториях. Решение этой проблемы включает в себя ряд положений, обладающих научной новизной.

Предложены и исследованы магнитные структуры изохронных циклотронов тяжелых ионов  $U-400$  и  $U-400M$ , обладающие высокой эффективностью в ускорении частиц широкого диапазона масс и энергий при незначительной токовой коррекции распределений среднего магнитного поля по радиусу.

Теоретически и экспериментально развит эффективный вывод пучков тяжелых ионов из изохронных циклотронов методом перезарядки на тонкой мишени, позволяющий получать значительное радиальное разделение орбит ионов с близкими зарядами (после прохождения мишени); проводить плавное регулирование энергии выводимых с разных радиусов ускорения частиц; создавать, благодаря резкому уменьшению магнитной жесткости ионов, компактные экономичные системы разводки внешних пучков.

Проведен теоретический и экспериментальный анализ тандема циклотронов с общим магнитным потоком.

Результаты исследований, представленные в диссертации, явились основой для решения крупных научно-технических задач - создания изохронного циклотрона тяжелых ионов  $U-400$  и разработки проекта циклотронного комплекса ЛЯР  $U-400+U-400M$ .

#### Практическая ценность работы

Результаты исследований, проведенных в диссертации, нашли широкое практическое применение при разработке и запуске в 1968 году первого в СССР изохронного циклотрона тяжелых ионов с диаметром полюсов 200см -  $U-200$ ; первого тандема циклотронов ( $U-300+U-200$ ), запущенного в 1971 году; одного из самых мощных изохронных циклотронов тяжелых ионов -  $U-400$ , введенного в строй действующих в 1978 году.

#### Апробация работы

Основные результаты диссертационной работы докладывались на I+X Всесоюзных совещаниях по ускорителям заряженных частиц, на Международных конференциях по изохронным циклотронам (1969 г. - Оксфорд, 1972 г. - Ванкувер, 1969 г. - Вашингтон, 1984 г. - Истлансинг), на УП Международной конференции по ускорителям высоких энергий (Ереван, 1969 г.), на Международном совещании по циклотронам и их применению, Бехине, ЧССР, на научных семинарах в ОИЯИ и других научных центрах СССР.

#### Публикации

По теме диссертации опубликовано 53 работы; основные результаты содержатся в 27 печатных работах, приведенных в списке литературы.

#### Структура диссертации

Работа состоит из введения, четырех глав и заключения. Общий объем диссертации составляет 302 страницы, включая 100 рисунков и список литературных ссылок из 282 наименований.

Введение содержит постановку задачи, перечень рассмотренных проблем, даны перспективы развития ускорителей тяжелых ионов, обзор различных методов ускорения и описание структуры диссертации. Первая глава диссертации посвящена исследованию динамики пучков тяжелых ио-

нов в центральной области циклотрона, выбору параметров центрально-оптической системы, позволяющей эффективно ускорять ионы в широком диапазоне отношений  $A/Z$ .

Во второй главе приведены результаты исследований ускорения пучков до конечного радиуса изохронного циклотрона У-400, включающих разработку быстродействующей методики измерения магнитного поля, формирование магнитного поля, изучение динамики пучков тяжелых ионов.

Третья глава посвящена разработке и исследованию вывода пучков тяжелых ионов из камеры ускорителей У-200 и У-400 методом перезарядки частиц на тонкой мишени.

В четвертой главе диссертации представлены результаты анализа циклотронного способа ускорения тяжелых ионов, проведенного с целью расширения диапазона масс ускоряемых в Лаборатории ионов до урана и энергии частиц до  $100+120$  МэВ/нуклон. Представлены результаты исследований создаваемого в ЛЯР циклотронного комплекса У-400+У-400М.

В заключении коротко суммируются основные научные результаты диссертации.

#### СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

##### Первая глава диссертации

Начальные орбиты ионов в циклотроне существенным образом определяют качество пучка частиц, ускоренных до конечной энергии. Оптические свойства геометрии центральной области циклотрона должны обеспечить захват ионов в ускорение в той области фаз высокочастотного напряжения, где существует наиболее эффективная аксиальная фокусировка на начальных оборотах, минимальный разброс энергии частиц в пучке по сравнению с начальным приростом энергии, центрирование орбит ионов с различными отношениями  $A/Z$ .

Исследование движения ионов в центральной области циклотрона сталкивается со значительными трудностями, возникающими из-за необходимости учета действия на частицу сложного распределения электрических и магнитных полей.

Ускоряющая система циклотронов У-200 и У-400 состоит из двух дуэнтов с угловой протяженностью  $40^\circ$  и размещенных в противоположных долинах. Прирост энергии иона за оборот при этом составляет

$\Delta W = 4ZeU_0 \sin \frac{n\pi}{2}$ . При синфазном возбуждении дуэнтов ионы ускоряются на четных гармониках высокочастотного напряжения  $n$ , в противофазном — на нечетных. Таким образом, применяемая система позволяет ускорять ионы в широком диапазоне отношений  $A/Z$  с соответствующим набором энергии за оборот:  $1,5ZeU_0$  ( $n=1$ ),  $2,83ZeU_0$  ( $n=2$ ) и т.д.

Получение экспериментальных распределений магнитных  $B(r, \theta)$  и электрических полей  $(V(x, y, z), V(r, \theta, z))$  в центральной области ускорителя из магнитных измерений и моделирования на электролитической ванне послужило основой для строгой постановки задачи численного моделирования динамики ионов на начальных оборотах путем интегрирования полных уравнений движения частиц в электромагнитных полях.

В работе представлена методика исследования движения ионов, на основе которой установлены определенные критерии для выбора оптимальных параметров центральной ионной оптики и распределений электрических и магнитных полей, обеспечивающих высокое качество пучков ускоренных ионов в широком диапазоне отношений  $A/Z$ .

Нахождение оптимальной геометрии первого ускоряющего промежутка (ионный источник — пулер) связано как с получением пучка высокой интенсивности, определяемой диапазоном фаз ионов  $\Delta\varphi$ , захваченного в ускорение, так и разбросом центров орбит. В результате исследований расстояние источник — вытягивающий электрод выбрано равным 5 мм для напряжения на дуэнтах циклотронов У-200 и У-400  $U_0 = 80+100$  кВ. Угол пролета ( $\tau_{пр.}$ ) частиц через этот промежуток изменяется от  $0,5$  рад для  $n=1$  до  $3$  рад для  $n=4$ .

Диапазон фаз ионов  $\Delta\varphi$ , как следует из расчетов, лежит в отрицательной области фаз высокочастотного напряжения. Так, значение "центральной" фазы сгустка ионов ( $\varphi_c$ ), для которой прирост энергии частицы максимален, меняется от  $-18^\circ$  для  $n=1$  до  $-70^\circ$  для  $n=4$  (рис. 1). Для эффективного набора энергии ионами на по-

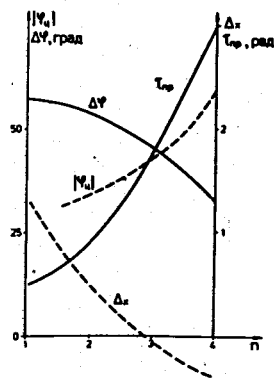
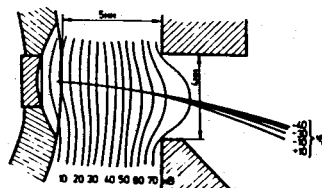


Рис. 1

Траектории движения ионов с начальными фазами ( $\varphi_0$ ) в первом ускоряющем промежутке циклотрона, зависимости диапазона фаз ионов ( $\Delta\varphi$ ), значений центральной фазы ( $\varphi_c$ ), времени пролета частиц ( $\tau_{пр.}$ ) и углового положения ионного источника и пулера относительно кромки дуэнта ( $\Delta x$ ) в зависимости от номера гармоники ускоряющего напряжения ( $n$ ).



следующих ускоряющих промежутках центральная фаза сгустка ионов должна быть согласована с соответствующим моментом высокочастотного напряжения, что достигается выбором определенного углового положения ионного источника и пулера  $\Delta\chi$  относительно кромки дуанта циклотрона, обусловленного значениями  $|\varphi_0|$ ,  $\tau_{пр.}$ , полученными для данного режима ускорения частиц ( $A/Z, n$ ) - рис. 1. Таким образом, эффективный захват ионов широкого диапазона отношений  $A/Z$  в ускорение предполагает значительное регулирование углового положения источника и пулера. Далее встает сложный вопрос центрирования орбит ускоряемых ионов с разными отношениями  $A/Z$ . Режим работы циклотрона при постоянстве орбит ускоряемых ионов, когда радиальное положение ионного источника зафиксировано, может быть реализован соответствующим изменением амплитуды напряжения на дуантах и уровня магнитного поля согласно соотношению  $B^2/(U_0 A/Z) = const$ .

Однако, в общем случае, здесь предполагается ускорение ионов не при максимальной величине  $U_0$ , что, в конечном счете, приведет к увеличению длины пути ионов в циклотроне, а значит, и к увеличению потерь тяжелых частиц на остаточном газе в процессе ускорения. Это жесткое требование к поддержанию максимального напряжения на дуантах ведет к необходимости перемещения источника и пулера по радиусу с целью достижения удовлетворительного центрирования орбит ионов с разными  $A/Z$ . Характерной особенностью магнитных структур циклотронов У-200 и У-400 является то обстоятельство, что ионы с большими значениями отношений  $A/Z$  эффективно ускоряются на высоком уровне среднего магнитного поля, а с низкими - на пониженном уровне (гл. II). Это несколько уменьшает требуемый диапазон регулирования радиального положения ионного источника ( $r_{ион} \sim \sqrt{A/Z/B}$ ), но не снимает всех трудностей.

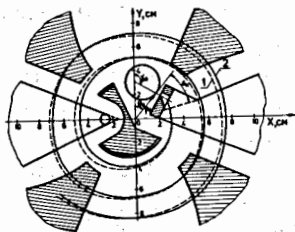


Рис. 2

Траектории движения ионов с отношением  $A/Z=3$  и начальными фазами  $\varphi_0 = -20^\circ, -50^\circ$  в центральной области изохронного циклотрона У-200 ( $B = 19.6$  кГс,  $U_0 = 65$  кВ,  $\theta = 34^\circ, \gamma = 119^\circ$ ).

Так, на рис. 2 представлена центральная область циклотрона У-200 ( $r_{ион} = 3$  см,  $\Delta\chi = 45^\circ, U_0 = 65$  кВ,  $n = 2$ ), ускоряющего ионы в относительно узком диапазоне отношений  $A/Z (3+4)$ . Для изохронного циклотрона

У-400, предназначенного для получения ускоренных ионов в широкой области масс и энергий ( $A/Z = 4+25, W = 1+35$  МэВ/н,  $n = 1+4$ ), требуемое для целей эффективного ускорения и центрирования орбит изменения углового положения источника и пулера ( $\Delta\chi$ ) лежит в пределах  $90^\circ$ , радиального - 50 мм, что является трудновыполнимой задачей, поскольку необходима разработка сложного механизма перемещения вертикального ионного источника и вытягивающего электрода. Поэтому здесь принята концепция сменяемой оптики для центрирования орбит ионов достаточно узкого диапазона отношений  $A/Z$  ускоряемых частиц ( $A/Z = 8+10, U_0 = 50$  мм,  $\Delta\chi = 45^\circ, U_0 = 80$  кВ,  $n = 2$ ).

Результаты исследования движения пучка в вертикальной плоскости циклотронов отражают высокие фокусирующие свойства разработанных центральных ионно-оптических систем. Так, частота аксиальных колебаний частиц  $V_z$  уже на первых оборотах пучка составляет величину 0,1-0,2, что достигалось тремя путями. Перевод диапазона фаз ионов, захваченных в ускорение, в положительную область фаз высокочастотного напряжения смещением источника и пулера относительно оси резонансных линий циклотрона на угол  $\pi/9n$ , позволил увеличить аксиальную фокусировку пучка электрическим полем дуантов. При этом же магнитные структуры циклотронов обеспечивают значительную взаимную вариацию магнитного поля на начальных оборотах (гл. II). Кроме того, для циклотрона У-400 распределение среднего магнитного поля по радиусу было выполнено спадающим от центра ( $(\partial B/\partial r)_{max} = 40$  Гс/см) и вносящим, таким образом, дополнительный вклад в вертикальную фокусировку пучка. Все это позволяет захватывать в ускорение и удерживать высокоинтенсивные пучки ионов.

Экспериментальные исследования указали на удовлетворительное качество пучков ионов в радиальном и аксиальном направлениях.

Вторая глава посвящена формированию магнитных полей изохронных циклотронов тяжелых ионов и исследованию устойчивости движения пучка до конечного радиуса. Энергия частицы с зарядом  $Z$  и массой  $A$  на конечном радиусе ускорения  $R_k$  в циклотроне с уровнем среднего магнитного поля  $\bar{B}$  определяется соотношением

$$W \approx 0.5 \cdot (\bar{B} R_k)^2 \cdot Z^2 / A^2 = K Z^2 / A^2 \quad (\text{МэВ/нуклон}),$$

где  $K$  - энергетический фактор ускорителя, позволяющий наиболее удобным способом проводить сравнение возможностей разных машин.

Работа над совершенствованием магнитов ускорителей ЛЯР с целью получения высокого значения энергетического фактора  $K$  велась как в сторону увеличения конечного радиуса ускорения частиц (перестройка полутораметрового циклотрона в двухметровый, создание четырехметрового У-400), так и по пути увеличения уровня среднего магнитного поля

повышением ампервитков катушек возбуждения электромагнитов, уменьшением расстояния между катушками, увеличением сечения ярма, жестким ограничением величины среднего воздушного зазора. Достигнутый высокий уровень средних магнитных полей циклотронов ЛЯР У-200 (20 кГс - К 150) и У-400 (21,3 кГс - К=625) открыл широкие возможности в получении ускоренных интенсивных пучков тяжелых ионов.

Создание условий для устойчивого ускорения ионов до конечной энергии связано с формированием требуемых распределений магнитного поля. Это является одним из важнейших и наиболее трудоемких этапов создания изохронного циклотрона. Получение необходимого распределения магнитного поля с высокой точностью требует значительного ( $\sim 10^6$ ) числа точек измерения. Поэтому создание быстродействующей методики измерения магнитного поля, применение эффективных способов формирования, разработка комплекса вычислительных программ обработки данных магнитных измерений и исследования временной и пространственной устойчивости движения пучка являются необходимым условием для успешного формирования требуемых распределений магнитного поля изохронных циклотронов. Для циклотрона У-400 была разработана полностью автоматизированная методика измерения магнитного поля в полярной системе координат, обладающая высоким быстродействием (0,6 с /точку) благодаря применению блока из десяти датчиков Холла, размещенных на штанге с шагом по радиусу 200 мм. Использование датчиков Холла из антимонида индия, имеющих низкий коэффициент температурной чувствительности, позволило исключить принудительное термостатирование датчиков Холла. Погрешность измерения поля в точке составила  $2 \cdot 10^{-4}$ . Регистрация данных магнитных измерений осуществлялась на перфоленге, обрабатываемой затем на ЭВМ.

Для проведения анализа магнитного поля разработан комплекс программ для вычисления поля в точках измерения, значений среднего поля, флаттера, амплитуд и фаз гармоник разложения в ряд Фурье распределения магнитного поля на данном радиусе по азимуту, расчета фазового движения ионов в процессе ускорения, частот аксиальных и радиальных бетатронных колебаний, исследования динамики частиц с учетом ускорения и ряд других.

Магнитная структура циклотрона У-400 включает четыре пары секторов, создающих азимутальную вариацию магнитного поля, с прямыми границами и угловой протяженностью  $45^\circ$  (рис. 3). Сектора имеют растущую по радиусу толщину (90±10 мм) и подняты над поверхностью полюса. В образовавшихся зазорах установлены 10 пар кольцевых токовых корректирующих катушек. Магнитные структуры изохронных циклотронов ЛЯР отличает высокая эффективность и технологичность. Поднятые над поверхностью полюсов

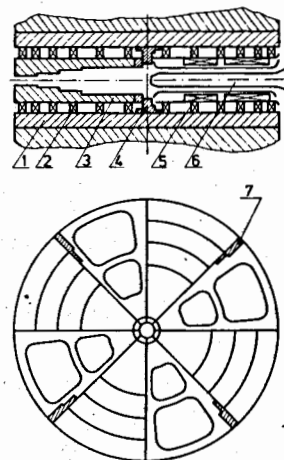


Рис. 3

Центральная магнитная структура изохронного циклотрона У-400: 1 - крышка камеры, 2 - кольцевые корректирующие катушки, 3 - сектора, 4 - центральный шимм, 5 - азимутальные катушки, 6 - дуант, 7 - боковой секторный шимм.

сектора циклотронов, кроме удобства размещения корректирующих катушек, как показали эксперименты, дают увеличение флаттера магнитного поля на  $15 \pm 20\%$  и среднего поля на  $1 \pm 1,5\%$  на конечных радиусах.

Формирование распределения среднего магнитного поля по радиусу осуществлялось с помощью железных масс: шиммами, устанавливаемыми на поверхности секторов, что давало отличие от изохронного в пределах  $100 \pm 200$  Гс, и боковыми секторными накладками - до  $\pm 20$  Гс. Последний способ шиммирования является весьма эффективным. Окончательная коррекция среднего магнитного поля осуществляется кольцевыми токовыми катушками, распределение полей которых предварительно определено. Измерение распределений магнитных полей проведено на пяти основных уровнях поля.

Исследования показали, что высокий уровень магнитных полей циклотронов ЛЯР позволяет использовать явление неравномерного насыщения полюсов электромагнитов по радиусу для получения, при варьировании тока возбуждения, распределений средних магнитных полей по радиусу (рис. 4), удовлетворяющих условиям изохронного ускорения ионов в широком диапазоне отношений  $A/Z$  при сравнительно низкой ( $\sim 50$  кВт) мощности питания корректирующих обмоток. Так, при самом высоком уровне магнитного поля на циклотроне У-400 могут быть ускорены ионы с отношениями  $A/Z = 15 \pm 25$  до энергии  $1 \pm 2$  МэВ/н., при низком же ( $B = 16 \pm 17$  кГс) - ионы с  $A/Z = 4 \pm 6$  до энергии  $15 \pm 30$  МэВ/н. Причем в нашем случае изменение флаттера магнитного поля от тока возбуждения магнита (рис. 4) согласуется с требованиями увеличения фокусирующих свойств магнитного

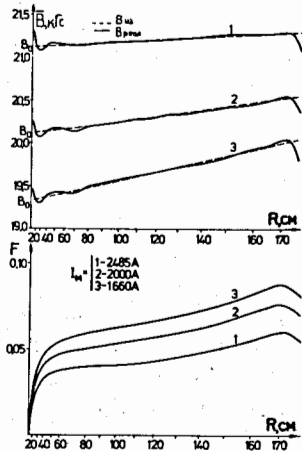


Рис. 4

Распределения среднего магнитного поля и флэттера по радиусу изохронного циклотрона У-400 для разных токов возбуждения электромагнита.

поля при увеличении энергии ускоряемых частиц. Поэтому значения частот аксиальных и радиальных колебаний при ускорении ионов в широком диапазоне  $A/Z$  и энергий остаются практически неизменными ( $V_1 = 1,01 \pm 1,02$ ;  $V_2 = 0,1 \pm 0,2$ ). Смещение частиц по фазе ВЧ-напряжения в процессе ускорения находится в пределах  $\pm 15^\circ$ .

Относительные амплитуды низших азимутальных гармоник магнитного поля не превышают величину  $6 \cdot 10^{-4}$ , что свидетельствует об удовлетворительной сборке элементов магнитного зазора циклотрона У-400, где зафиксированы следующие отклонения: точность установки секторов по высоте - 0,05 мм, по азимуту - 1 мм, по радиусу - 0,5 мм. Несоосность дисков полюса - 0,1 мм, непараллельность - 0,1 мм. Для окончательной коррекции низших гармоник используется система из восьми пар азимутальных катушек (рис. 3), позволяющая независимо варьировать амплитуду и фазу первой гармоники.

Отклонение медианной плоскости от средней геометрической зазора циклотрона вызывает появление вынужденных вертикальных колебаний пучка относительно средней геометрической, что ведет к снижению аксиального акцептанса ускорителя. По измерениям положения медианной плоскости, выполненным различными методами, установлено, что ее отклонение не превышает величины  $\pm 5$  мм во всей области ускорения пучка. Регулирование положения медианной плоскости в циклотроне У-400 осуществляется тремя парами кольцевых токовых катушек, имеющих раздельное питание верхних и нижних частей обмоток.

Экспериментальные исследования на циклотроне У-400 показали, что аксиальный размер ускоренных пучков ионов менее 10 мм, смещение пучка от средней геометрической плоскости находится в пределах  $\pm 5$  мм, сдвиги центров орбит не превышают 2+3 см. Можно заключить, что параметры пучков ионов соответствуют результатам, полученным при анализе распределений магнитных полей.

Наблюдаемые уменьшения интенсивности пучков тяжелых ионов по радиусу в 2+3 раза в процессе ускорения вызваны, как следует из экспериментов, перезарядкой частиц на остаточном газе камеры циклотрона ( $P = 1 + 2 \cdot 10^{-6}$  Торр). Это относится к одной из серьезных проблем, возникающих при ускорении пучков тяжелых ионов. Полученные экспериментальные данные сечений перезарядки тяжелых ионов на газе позволяют с хорошей надежностью оценивать уровень требуемого рабочего давления в камерах действующих и проектируемых циклотронов.

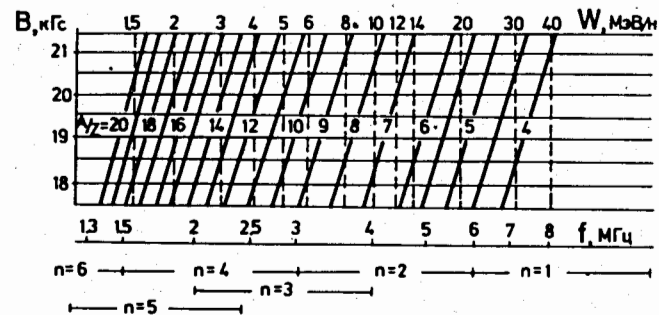


Рис. 5. Диаграмма настройки изохронного циклотрона тяжелых ионов У-400.

Возможности циклотрона У-400 иллюстрируются диаграммой (рис. 5), связывающей диапазоны частот, гармоники ускоряющего напряжения, уровни среднего магнитного поля, энергии ионов с различными отношениями  $A/Z$ . К настоящему времени на циклотроне У-400 ускорено около двух десятков различных ионов от азота ( $N_{14}^{+2}$ ) до криптона ( $Kr_{84}^{+9}$ ) с интенсивностями  $10^{14} + 10^{11}$  част./с.

В третьей главе диссертации на основе численного моделирования движения ионов в циклотроне на ЭВМ и обширных экспериментальных исследований проведен всесторонний анализ предложенного в ДЯР выводе тяжелых ионов из изохронных циклотронов методом перезарядки частиц на тонкой мишени<sup>х)</sup>.

х) Вялов Г.Н., Оганесян Ю.Ц., Флеров Г.Н., Метод выводе пучков тяжелых ионов из циклотронов с азимутальной вариацией магнитного поля, ОИЯИ 1884, Дубна, 1964.

Основная особенность вывода частиц перезарядкой состоит в том, что пучок ускоренных ионов с зарядом  $Z_1$  пропускается через твердую мишень, частицы повышают свой заряд до  $Z_2$ , кривизна траектории резко увеличивается, а движение ионов в магнитном поле секторного циклотрона становится радиально неустойчивым. В зависимости от соотношения  $Z_1/Z_2$ , глубины вариации магнитного поля, положения перезарядной мишени пучок, совершив 1+2 оборота вдоль крошки сектора, выводится из камеры ускорителя (рис. 6).

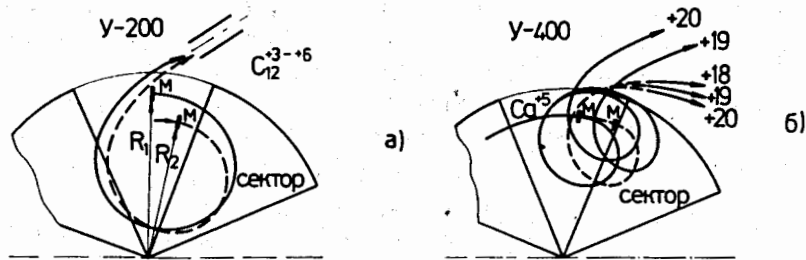


Рис. 6. Схемы вывода пучков тяжелых ионов на изохронных циклотронах У-200 и У-400 методом перезарядки частиц на тонкой мишени.

В результате прохождения пучка тяжелых ионов через мишень соответствующей толщины устанавливается равновесное распределение частиц по зарядам  $F(Z)$ , зависящее от заряда ядра иона  $Z$ , скорости частиц. В диссертации представлен обзор работ по эффектам, сопровождающим прохождение пучка тяжелых ионов через твердую мишень, а также зависимость срока службы применяемых для перезарядки ионов на циклотронах ДНР углеродных фольг от параметров пучков.

Для исследования процесса вывода частиц на изохронных циклотронах У-200 и У-400 проводилось численное моделирование движения ионов в измеренных магнитных полях ускорителей. Траектории пучков вычислялись для нескольких наиболее интенсивных зарядов групп ионов. Для изохронного циклотрона У-200 основной диапазон ускоряемых частиц составляют легкие ионы ( $Ne_3^{+1} + Ne_{20}^{+5}$ ), которые при перезарядке с высокой эффективностью увеличивают свой заряд вдвое  $Z_1/Z_2 = 0,5$ , когда прирост радиуса  $\Delta r$  за один оборот максимален. В случае вывода пучков тяжелых ионов из циклотрона У-400 изменение заряда самой интенсивной группы ионов более значительно (3+4 раза):  $Ne_{20}^{+2} \rightarrow +9$ ,  $Ar^{+4} \rightarrow +16$  и т.д., т.е. отношение  $Z_1/Z_2$  снижается, что приводит к уменьшению радиального заброса ионов при использовании однооборотного вывода. Установлено, что при

варьировании азимутального положения перезарядной мишени можно получить значительно больший заброс пучка, совершающего после перезарядки два оборота в магнитном поле циклотрона (рис. 6). Движение выпускаемого пучка ионов в аксиальной плоскости, определяемое дефокусирующим действием краевого поля секторов и фокусирующим рассеянного магнитного поля ускорителя за конечным радиусом, в целом оказывается устойчивым.

Поскольку в пучках тяжелых ионов после прохождения мишени образуется ряд групп частиц с близкими интенсивностями, но отличающимися по заряду на одну-две единицы  $Z \pm 1, Z \pm 2$ , то в процессе расчетов вычислялись траектории и этих ионов. Так как эффективность перезарядки ионов ( $Ar + Kr$ ), составляющих основной диапазон частиц, ускоряемых на У-400, понижается до 30% и для увеличения интенсивности выведенных пучков желательно использовать пучки ионов с зарядами близкими к равновесному. Однако здесь возникает проблема пространственного разделения пучков на выходе ускорителя (рис. 6). Исследования показали, что вывод пучков ионов с зарядами, отличающимися на единицу двумя оборотами, позволяет получать расстояние между центральными траекториями почти на порядок больше, чем при выводе одним оборотом (рис. 6). Тем самым можно повысить эффективность вывода, расширить экспериментальные возможности ускорителя в целом.

Применение вывода пучков методом перезарядки представляет возможность плавного регулирования энергии частиц на выходе ускорителей путем изменения радиального (и азимутального положения) перезарядной мишени (рис. 6) и, что особенно важно, при сохранении настройки параметров циклотрона. Так, на У-200 диапазон варьирования энергии частиц составил около 30%:  $C_{12}^{+3} - (76+112)$  МэВ,  $Ne_4^{+1} - (24+35)$  МэВ, на У-400 вывод пучков ионов осуществляется с радиусов  $R = 145+172$  см, для чего разработано устройство перемещения мишени по радиусу и азимуту ( $\Delta\theta \approx 20^\circ$ ), управляемое с пульта ускорителя.

Фокусировка пучков ионов в рассеянном поле циклотронов осуществляется с помощью пассивных трехэлементных магнитных каналов. Коэффициент вывода пучков ионов из циклотронов У-200 и У-400 составляет 30+90%, что близко к эффективности получения данных ионов с равновесным зарядом. Интенсивность пучков составляет  $10^{11} + 10^{14}$  част./с и не ограничивается жесткими требованиями к качеству внутреннего пучка. Значения эмиттансов пучков лежат в пределах  $20+40 \pi$  мм·мрад, энергетический разброс - около 1%.

Значительное (в 2+4 раза) снижение магнитной жесткости частиц при использовании вывода ионов перезарядкой на тонкой мишени является несомненным преимуществом этого метода перед электростатическим, по-



сколькo позволяет создавать широко разветвленные системы разводки внешних пучков ионов, пользуясь магнитными элементами относительно небольшой мощности. Примером может служить система, разработанная для циклотрона У-400, включающая 9 физических отводов, размещенных в экспериментальном зале площадью 140 м<sup>2</sup>.

Таким образом, в Лаборатории ядерных реакций ОИЯИ при непосредственном участии автора разработан изохронный циклотрон тяжелых ионов У-400, отличающийся высоким уровнем среднего магнитного поля (до 21,3 кГс), уникальными возможностями ускорения ионов в широком диапазоне отношений  $A/Z$  без использования мощных систем токовой коррекции магнитного поля, эффективным методом вывода частиц — перезарядкой на тонкой мишени, компактной системой разводки внешних пучков ионов, высокими (до  $10^{14}$  част./с) интенсивностями пучков тяжелых ионов.

Четвертая глава диссертации посвящена проблеме расширения масс ускоренных на циклотронах ионов вплоть до урана и увеличения энергии частиц до 100 МэВ/н. Это может быть достигнуто повышением произведения  $\bar{V}R_k$  ускорителя либо значительным увеличением заряда ускоряемых ионов. Применяемые на циклотронах ЛЯР источники дугового типа обеспечивают получение пучков тяжелых ионов с приемлемой интенсивностью с максимальными зарядами  $10+12$ . То есть предельной частицей для циклотрона У-400, имеющей энергию порядка 6 МэВ/н, являются ионы Хе. В последние годы проблема ускорения тяжелых ионов стимулировала развитие источников многозарядных ионов. К ним можно отнести электронно-лучевой и наиболее перспективный для использования в циклотронных установках электронно-циклотронно-резонансный (ЕСР)<sup>X</sup>, на котором, например, получены ионы Хе<sup>+26</sup> с интенсивностью  $\sim 4 \cdot 10^{10}$  част./с.

Представляется, что дальнейшее совершенствование изохронного циклотрона У-400 может быть связано с разработкой источника типа ЕСР, использование которого подразумевает создание системы аксиальной инжекции пучка.

Анализ возможностей циклотронного способа ускорения интенсивных пучков тяжелых ионов, включая использование сверхпроводящих катушек возбуждения циклотрона, показал, что наиболее приемлемым для решения этого вопроса в Лаборатории с технической и экономической точек зрения является применение каскадного способа ускорения тяжелых ионов, когда используется поэтапное повышение заряда ионов на тонких мишенях в процессе ускорения. Этот способ получил в настоящее время широкое развитие, и большинство проектируемых и создаваемых ускорителей тяжелых ионов являются многостадийными установками.

<sup>X</sup>Geller R., IEEE Trans. on Nucl. Sci., NS-26, 2, p. 2120, 1979.

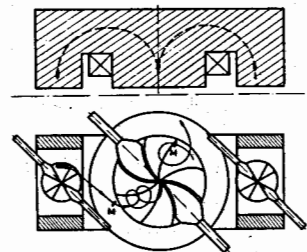


Рис. 7

Схема тандема циклотронов тяжелых ионов с общим магнитным потоком.

В работе предложен и рассмотрен вариант тандема циклотронов, имеющих общий магнитный поток, совмещенных в одном Ш-образном электромагните, у которого выполнены рабочие зазоры в стойках в одной плоскости с основным (рис. 7) и где размещается циклотрон-инжектор. Проведенные численные и экспериментальные (на модели) исследования магнитной цепи циклотрона, динамики частиц показали на возможность создания на основе магнита с диаметром полюсов четыре метра установки для получения ускоренных ионов вплоть до урана с энергией 6+7 МэВ/н. Хотя данный способ выгодно отличается от ранее предлагавшихся подобного рода установок, однако и ему присущи определенные трудности в реализации.

Более практичным является использование отдельно действующих инжектора тяжелых ионов и постускорителя. Существенным вкладом в создание ускорительных установок для получения очень тяжелых ионов является опыт разработки в Лаборатории тандема циклотронов У-300+У-200, получивший в настоящее время широкое развитие. Здесь впервые в мире были ускорены ионы Хе до энергии 5+7 МэВ/н. В диссертации приведено краткое описание комплекса исследований, связанных с переводом циклотрона-инжектора У-300 в режим ускорения ионов на третьей гармонике высокочастотного напряжения (центральная ионная оптика, система вывода пучка), с разработкой систем транспортировки и инжекции частиц в циклотрон У-200. Эта работа показала широкие возможности Лаборатории в получении ускоренных очень тяжелых ионов, еще больше возросшие с вводом в строй действующих циклотрона У-400.

Дальнейшее расширение диапазона масс и энергий ускоряемых ионов в Лаборатории ядерных реакций связывается с разработкой изохронного циклотрона У-400М на основе электромагнита ускорителя У-300. К настоящему времени в Лаборатории выполнен широкий круг теоретических и экспериментальных исследований, составивших основу технического проекта циклотронного комплекса ЛЯР У-400+У-400М, создаваемого для получения ускоренных ионов от кислорода до урана с энергией 15+120 МэВ/н.

При использовании циклотрона У-400 в инжекторном режиме ускоряются пучки ионов с  $A/Z = 16+25$  на четвертой гармонике высокочастотного напряжения до энергий  $1+2$  МэВ/н. При этом необходимо внести соответствующую коррекцию в центральную ионнооптическую систему циклотрона. Угол установки щели ионного источника и пулера по отношению к оси резонансных линий циклотрона должен составлять  $12^\circ$ , а радиус — 70 мм при напряжении на дуэнтах 80 кВ. Вывод ионов из У-400 будет осуществляться электростатическим полем дефлектора угловой протяженностью  $36^\circ$  и апертурой 10 мм с максимальным напряжением 60 кВ и радиально-фокусирующим магнитным каналом с градиентом магнитного поля около  $1,5$  кГс/см. Система транспортировки ионов длиной около 100 м размещается в галерее, связывающей залы ускорителей У-400 и У-400М (рис. 8), состоит из пяти поворотных магнитов и 16 пар квадрупольных линз.

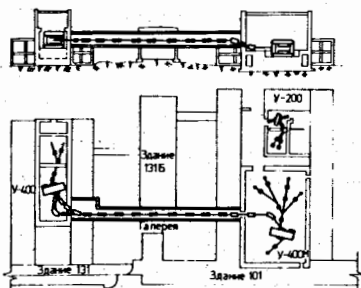


Рис. 8  
Циклотронный комплекс тяжелых ионов У-400+У-400М.

Постускоритель — изохронный циклотрон У-400М предназначен как для ускорения сверхтяжелых ионов, таких как  $\text{Xe} \div \text{U}$  до энергии  $20+40$  МэВ/н, так и легких ( $\text{He} \div \text{Ne}$ ) до энергий  $80+120$  МэВ/н. Диапазон отношений  $A/Z$  ионов, прошедших перезарядную мишень, составит  $2+5$ . Для достижения указанных энергий частиц требуется получение максимального среднего поля на уровне 20 кГс.

Для У-400М принята фокусирующая структура с четырьмя секторами угловой протяженностью  $45^\circ$  и углом спиральности на конечной радиусе ускорения  $40^\circ$  (рис. 9). Для обеспечения условий фокусировки частиц величина флаттера магнитного поля должна составлять более 0,1, что и достигается, как показало численное моделирование магнитной цепи ускорителя, при зазоре в холме ускорителя, равном 10 см, и долине 50 см. Это создает определенные затруднения в получении необходимого уровня среднего магнитного поля из-за увеличения (по сравнению с У-400) среднего воздушного зазора. Для достижения необходимого уровня поля уменьшается расстояние между катушками возбуждения на 30 см, увеличивается число витков в обмотках с 448 до 504 за счет установки дополнительных

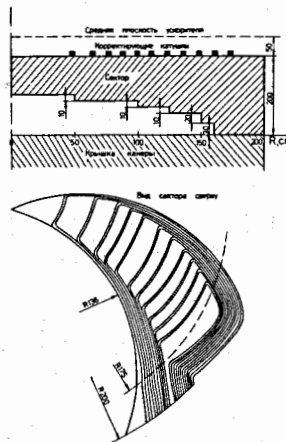


Рис. 9  
Магнитная структура изохронного циклотрона тяжелых ионов У-400М.

секций и тока возбуждения с 1900 до 2300 А, увеличивается сечение магнитопровода на 5% с помощью стальных блоков.

Формирование изохронного распределения магнитного поля выполняется растущей по радиусу толщиной секторов и системой токовых корректирующих катушек, установленных на плоской части секторов, обращенной к рабочему зазору (рис. 9).

Экспериментальные исследования распределений магнитного поля на модели электромагнита циклотрона У-400М (М1:3) показали хорошую согласованность с результатами численного моделирования. Следует отметить, что для ускорителя У-400М существует та характерная зависимость распределений среднего магнитного поля по радиусу, имеющая место и для У-200 и У-400, когда при изменении уровня магнитного поля наклон кривых  $\bar{B}(r)$  изменяется так, что возможно ускорение ионов в широком диапазоне энергий при небольшой коррекции поля токовой системой. Распределения средних магнитных полей и флаттера удовлетворяют условиям устойчивого ускорения частиц с отношениями  $A/Z = 2+5$ .

Система инжекции внешних пучков тяжелых ионов в циклотрон У-400М включает в себя дублет квадрупольных линз, магнит коррекции положения пучка в горизонтальной плоскости, радиально-фокусирующий магнитный канал и устройство перемещения перезарядной мишени (рис. 10). Численное моделирование динамики пучка позволило определить основные параметры элементов системы инжекции, угол подхода ионпровода к полюсу ускорителя, радиальные и азимутальные положения мишени, удовлетворяющие выполнению условий согласования пучка, прошедшего перезарядную мишень, с его равновесной орбитой.

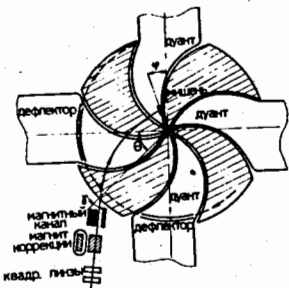


Рис. 10

Схемы систем инжекции и вывода пучков тяжелых ионов циклотрона У-400М.

Ускорение ионов в У-400М будет производиться четырьмя дуантами, расположенными в долинах циклотрона, с напряжением до 120 кВ в диапазоне частот 15±25 МГц.

При использовании циклотрона У-400М в качестве постускорителя вакуумные условия для эффективного ускорения тяжелых ионов достаточно благоприятны, поскольку при отсутствии натекания рабочего газа ионного источника давление в камере циклотрона будет поддерживаться на уровне  $(2+3) \cdot 10^{-7}$  Торр с помощью паромасляных насосов с азотными ловушками. Автономный режим работы циклотрона У-400М предусматривает ускорение легких ионов ( $He \div Me$ ), потери которых незначительны ввиду малого сечения перезарядки легких частиц на остаточном газе камеры ускорителя.

Вывод пучков ускоренных ионов из циклотрона будет осуществляться двумя электростатическими дефлекторами, расположенными в дуантах ускорителя. Расчеты показали, что для выпуска частиц с максимальной энергией 120 МэВ/н. потребуются напряженность электрического поля до 120 кВ/см. Фокусировка пучка в рассеянном поле циклотрона обеспечивается магнитным каналом. Для увеличения радиального разделения орбит на конечных радиусах ускорения исследован прецессионный способ раскачки радиальных колебаний введением контролируемой первой гармоники азимутальной неоднородности магнитного поля. По оценкам, коэффициент вывода составит более 50% для всего диапазона отношений  $A/Z$  ускоряемых ионов.

Предусматриваемый проектом автономный режим работы изохронного циклотрона У-400М, с собственным источником ионов, позволяет использовать вывод частиц  $He_4^{+1}$ ,  $C_{12}^{+3}$ ,  $O_{16}^{+4}$ ,  $Ne_{20}^{+5}$  методом перезарядки на тонкой мишени.

Полная эффективность ускорения частиц тандемом циклотронов У-400+У-400М составляет около  $10^{-4}$ , что обеспечит получение пучков ионов с интенсивностями на уровне  $10^{11}$  част./с.

В таблице приведены основные параметры ускорителей циклотронного комплекса ЛЯР.

Параметры	Таблица	
	У-400	У-400М
<b>Электромагнит</b>		
Диаметр полюсов, см	400	400
Конечный радиус ускорения, см	175	175
Вес магнита, тн	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, кГс	21.3	19.5
Число секторов	4	4
Угол спиральности, град.	-	40
Флаттер магнитного поля	0.07	0.13
Число корректирующих обмоток	10	17
<b>Высокочастотная система</b>		
Число дуантов	2	4
Азимутальная протяженность, град.	40	40
Напряжение на дуанте, кВ	80	120
Диапазон частот, МГц	6-12	15-25
Апертура дуанте, мм	120	100
Зазор дуант-земля, мм	50	150
<b>Вакуумная система</b>		
Объем вакуумной камеры, м <sup>3</sup>	25	35
Давление в камере, Торр	$1 \cdot 10^{-6}$	$5 \cdot 10^{-7}$
Количество насосов	5	6
Скорость откачки, л/с	$1 \cdot 10^5$	$1,2 \cdot 10^5$
<b>Система вывода и транспортировки пучка</b>		
Азимутальная протяженность дефлекторов, град	38	2x38
Входной зазор, мм	10	5
Напряжение на дефлекторе, кВ	60	60
Азимутальная протяженность фокусирующего магнитного поля, град.	20	25
Градиент поля в канале, Гс/см	1000	1000±1300
Эффективность вывода, %	50	50
Число каналов внешних пучков	9	8
<b>Пучки</b>		
Энергия ускоренных ионов, МэВ/н	1±20	15±120
Отношение массы к зазору,	4±25	2±5
Разброс энергии, %	1	0.5
Интенсивность пучков, частиц/с	$10^{13} \pm 10^{14}$	$10^{11} \pm 10^{12}$

В заключении сформулированы основные результаты диссертации.

#### Основные результаты диссертационной работы

1. Проведено численное моделирование процесса ускорения тяжелых ионов в центральной области циклотронов ЛЯР с использованием измеренных электрических и магнитных полей; определены параметры ионной оптики, обеспечивающей эффективный захват в ускорение частиц с различными отношениями  $A/Z$  на кратных гармониках высокочастотного напряжения.

2. Решена задача формирования и исследования магнитного поля изохронного циклотрона У-400, обеспечивающего устойчивое ускорение интенсивных пучков тяжелых ионов в широком диапазоне масс и энергий.

Разработаны быстродействующие методики измерения и эффективные способы шиммирования магнитного поля изохронных циклотронов, составлен комплекс вычислительных программ обработки результатов магнитных измерений и исследований динамики частиц.

Получение на изохронном циклотроне У-400 ускоренных пучков тяжелых ионов с энергией  $5 \pm 20$  МэВ/нуклон и рекордными (до  $10^{14}$  част./с) интенсивностями характеризует высокое качество параметров центральной ионной оптики и распределений магнитного поля ускорителя.

3. Выполнены теоретические и экспериментальные исследования динамики вывода тяжелых ионов из циклотронов У-200 и У-400 методом перезарядки частиц на тонкой мишени.

Реализовано плавное регулирование энергии выводимых с разных радиусов ускорения ионов, показана возможность получения значительного радиального разделения орбит частиц с близкими зарядами после прохождения мишени.

Эффективность вывода ионов от He до Fe на циклотронах У-200 и У-400 составляет  $90 \pm 30\%$ .

4. Решен комплекс задач по разработке ускорения тяжелых ионов каскадным способом на циклотронах:

- проведены исследования динамики инжекции и вывода частиц на тандеме циклотронов ЛЯР У-300+У-200;

- выполнены теоретические и экспериментальные исследования тандема циклотронов тяжелых ионов с общим магнитным потоком;

- решен широкий круг вопросов по разработке магнитной структуры, исследованиям динамики частиц, составивший основу проекта циклотронного комплекса ЛЯР У-400+У-400М, создаваемого для ускорения ионов от He до U до энергии  $15 \pm 120$  МэВ/нуклон.

Все работы выполнены в Лаборатории ядерных реакций Объединенного института ядерных исследований. Основные результаты диссертации опубликованы в следующих работах:

#### Литература

1. Козлов С.И., Оганесян Р.Ц., Пен Ден Ги, Шелаев И.А., Расчет движения ионов в центральной области циклотрона при повороте источника.- Дубна, 1966.- 17 с. (Препринт Объед. ин-та ядерн.исслед.: P9-2854).
2. Shelaev I.A., Kozlov S.I., Oganessian R.Ts., Oganessian Yu.Ts., Isochronous heavy ion cyclotron of JINR,- IEEE Trans. on Nucl. Sci., 1969, NS-16, N3, p. 802-803.
3. Шелаев И.А., Козлов С.И., Алфеев В.С., Оганесян Р.Ц., Вывод пучка методом перезарядки из двухметрового изохронного циклотрона тяжелых ионов.- ПТЭ, 1970, с. 53-66.
4. Шелаев И.А., Козлов С.И., Николаев В.М., Движение ионов в центре двухметрового изохронного циклотрона ОИИИ.- Дубна, 1970.- 16 с. (Препринт/Объед. ин-та ядерн. исслед.: P9-5032).
5. Шелаев И.А., Козлов С.И., Кленин Б.А., Параметры орбит двухметрового изохронного циклотрона тяжелых ионов ОИИИ.- Дубна, 1970.- 18 с. (Препринт/Объед. ин-та ядерн. исслед.: P9-5033).
6. Шелаев И.А., Козлов С.И., Оганесян Р.Ц., Магнитное поле двухметрового изохронного циклотрона ОИИИ.- В кн.: Труды I Всесоюзн. совещ. по уск. заряжен. частиц, М., Наука, 1969.- С. 248-251.
7. Shelaev I.A., ..., Kozlov S.I. et al., General design features of the JINR 4m isochronous cyclotron with smoothly variable heavy ion energy,- Nucl. Instr. and Meth., 1971, v. 93, p. 557-561;  
- Атомная энергия, 1971, т. 30, вып. 6, с. 48-55.
8. Shelaev I.A., ..., Kozlov S.I. et al., Acceleration of Xe ions in the JINR tandem-cyclotrons,- Proceedings of the Sixth Int. Cycl. Conf., Vancouver, Canada, 1972, p. 232-243.
9. Шелаев И.А., Алфеев В.С., Загер Б.А., Козлов С.И., Мельников В.Н., Оганесян Р.Ц., Чугреев В.А., Тандем-циклотрон ОИИИ.- В кн.: Труды III Всесоюзн.совещ.по уск.заряж.частиц, М., Наука, 1971, с. 186-193.
10. Флеров Г.Н., Шелаев И.А., Алфеев В.С., Козлов С.И., Колесов И.В., Оганесян Р.Ц., Покровский В.Н., Семин К.И., Филипсон А.Н., Чугреев В.А., Четырехметровый изохронный циклотрон тяжелых ионов ОИИИ.- Труды IV Всесоюзн.совещ.по уск.заряж.частиц, М., Наука, 1974, с. 34-40.



11. Алфеев В.С., Козлов С.И., Кленин Б.А., Изохронный циклотрон тяжелых ионов с тремя рабочими зорами.- Дубна, 1976, с. 15. (Сообщение/Объед. ин-та ядерн. исслед.: 9-10133).
12. Кленин Б.А., Козлов С.И., Фикс М.М., Расчеты вывода пучков тяжелых ионов из изохронного циклотрона У-400 методом перезарядки.- Дубна, 1977.- с. 14 (Сообщение/Объед. ин-та ядерн. исслед.: 9-10652).
13. Гульбекян Г.Г., Евдокимов А.К., Козлов С.И., Плавное регулирование энергии выведенного пучка ионов из циклотрона У-200.- Дубна, 1977.- с. 4 (Сообщение/Объед. ин-та ядерн.исслед.: 9-10990).
14. Оганесян Ю.Ц., Козлов С.И., Гульбекян Г.Г., Кленин Б.А., Вывод тяжелых ионов из секторно-фокусирующих циклотронов методом перезарядки.- Дубна, 1978, с. 14 (Препринт/Объедин. ин-та ядерн. исслед.: 9-11993).
15. Оганесян Ю.Ц., Козлов С.И., Кленин Б.А., Евдокимов А.К. Фефилова С.Г., Оганесян Р.Ц., Сура Ю., Сухов А.М., Чугреев В.А., Магнитное поле четырехметрового изохронного циклотрона тяжелых ионов.- Дубна, 1978.- с. 14 (Препринт/Объед. ин-та ядерн.исслед.: 9-11992).
16. Евдокимов А.К., Кленин Б.А., Козлов С.И., Мельникова Л.М., Михушкин А.В., Носокин В.В., Саламатина Т.С., Соловьева Г.М., Сухов А.М., Тер-Акопян Э.А., Фефилова С.Г., Фефилов Б.В., Чугреев В.А., Аппаратура для измерения магнитного поля изохронного циклотрона У-400.- Дубна, 1980.- 6 с. (Сообщение/Объед.ин-та ядерн.исслед.: 9-80-800).
17. Флеров Г.Н., Оганесян Ю.Ц., Болтушкин В.Б., Гульбекян Г.Г., Ивченко А.И., Кленин Б.А., Козлов С.И., Колесов И.В., Кутнер В.Б., Мордуев А.М., Оганесян Р.Ц., Покровский В.Н., Семин К.И., Сура Ю., Чугреев В.А., Изохронный циклотрон У-400 и перспективы развития ускорителей тяжелых ионов Лаборатории ядерных реакций,- В кн.: Труды УП Всесоюзн.совещ. по уск.заряж.частиц, 1981, М., "Наука", т. I, с. 59-61.
18. Оганесян Ю.Ц., Колесов И.В., Гульбекян Г.Г., Ивченко А.И., Кленин Б.А., Козлов С.И., Кутнер В.Б., Мельников В.Н., Оганесян Р.Ц., Семин К.И., Чугреев В.А. Ускорительный комплекс тяжелых ионов ЛЯР ОИЯИ.- Труды УШ Всесоюзн.совещ.по уск. заряж. частиц, Дубна, 1983, т. I, с. 47-51.
19. Оганесян Ю.Ц., Колесов И.В., Гульбекян Г.Г., Ивченко А.И., Кленин Б.А., Козлов С.И., Кутнер В.Б., Мельников В.Н., Оганесян Р.Ц., Покровский В.Н., Семин К.И., Чугреев В.А. Циклотронный комплекс для получения пучков тяжелых ионов с энергией 20+120 МэВ/нуклон.- Дубна, 1982.- 12 с. (Препр./Объед.ин-та ядерн.исслед.: 9-82-756).

20. Кленин Б.А., Козлов С.И., Оганесян Р.Ц., Численное моделирование магнитной системы циклотрона У-400М.- Дубна, 1983, - 8 с. (Сообщение/Объед. ин-та ядерн. исслед.: 9-83-125).
21. Козлов С.И., О сечениях перезарядки тяжелых ионов на газах.- Дубна, 1983.- 6 с. (Сообщ./Объед. ин-та ядерн.исслед.: 9-83-268).
22. Андриянов А.М., Гульбекян Г.Г., Кленин Б.А., Козлов С.И., Мельников В.Н., Моделирование некоторых параметров магнитной системы изохронного циклотрона У-400М.- Дубна, 1984.- 6 с. (Сообщение/Объед. ин-та ядерн. исслед.: 8-84-322).
23. Oganessian Yu.Ts.,..., Kozlov S.I. et al. The present status and perspectives of development of JINR Laboratory of Nuclear Reactions heavy ion accelerators,- Tenth Int. Conf. on cyclotrons and their Appl., East Lansing, Michigan, USA, 1984, p. 317-321.
24. Оганесян Ю.Ц., Колесов И.В., Гикал Б.Н., Гульбекян Г.Г., Ивченко А.И., Кленин Б.А., Козлов С.И., Кутнер В.Б., Мельников В.Н., Мордуев А.М., Оганесян Р.Ц., Семин К.И., Чугреев В.А., Состояние работ по созданию циклотронного комплекса тяжелых ионов Лаборатории ядерных реакций ОИЯИ.- Труды IX Всесоюзн. совещ. по уск.заряж. частиц, Дубна, 1984, с. 47-56.
25. Гульбекян Г.Г., Козлов С.И., Мельников В.Н., Оганесян Ю.Ц., Системе транспортировки пучков изохронного циклотрона У-400.- Труды Межд.совещ.по цикл. и их применению, Бахине, СССР, 1985, с. 269-275.
26. Флеров Г.Н., Оганесян Ю.Ц., Богомолов С.Л., Гикал Б.Н., Гульбекян Г.Г., Ивченко А.И., Каманин В.В., Кленин Б.А., Козлов С.И., Колесов И.В., Кутнер В.Б., Мельников В.Н., Минин Е.А., Мордуев А.М., Оганесян Р.Ц., Пасюк А.С., Пенионжквич Ю.Э., Семин К.И., Фефилов Б.В., Чугреев В.А., Циклотронный комплекс тяжелых ионов.- Дубна, 1984, - 60 с. (Сообщение/Объед. ин-та ядерн. исслед.: 9-84-555).
27. Флеров Г.Н., Оганесян Ю.Ц., Андриянов А.М., Гикал Б.Н., Гульбекян Г.Г., Ивченко А.И., Кленин Б.А., Козлов С.И., Колесов И.В., Кутнер В.Б., Мельников В.Н., Оганесян Р.Ц., Чугреев В.А. Разработка ускорительного комплекса тяжелых ионов ОИЯИ У-400+У-400М.- Труды Десятого Всесоюзн.совещ. по уск.заряж.частиц,- Дубна, 1985, с. 109-115.

Рукопись поступила в издательский отдел  
2 августа 1988 года.