

34521

дис.



**ОБЪЕДИНЕННЫЙ ИНСТИТУТ ЯДЕРНЫХ ИССЛЕДОВАНИЙ**

9-89-734

**ОГАНЕСЯН  
Рубен Цолакович**

УДК 621.384.633

**ИЗОХРОННЫЕ ЦИКЛОТРОНЫ ТЯЖЕЛЫХ ИОНОВ  
С ВЫСОКИМ УРОВНЕМ МАГНИТНОГО ПОЛЯ  
ДЛЯ ЯДЕРНО-ФИЗИЧЕСКИХ  
И ПРИКЛАДНЫХ ИССЛЕДОВАНИЙ**

**Специальность: 01.04.13 - электрофизика**

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

**Дубна 1989**

Работа выполнена в Лаборатории ядерных реакций Объединенного института ядерных исследований.

Официальные оппоненты:

доктор физико-математических наук, старший научный сотрудник

Владимир Иванович Данилов

доктор технических наук, старший научный сотрудник

Николай Иванович Веников

доктор технических наук, старший научный сотрудник

Артем Арменакович Арзуманов

Ведущее научно-исследовательское учреждение

НИИЭФА им. Д.В.Ефремова (Ленинград)

Защита состоится " " 1989 г. в " " часов на заседании Специализированного совета Д-47.01.02 при Лаборатории высоких энергий Объединенного института ядерных исследований, г.Дубна Московской области.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке ЛВЭ ОИЯИ.

Автореферат разослан " " \_\_\_\_\_ 1989 года.

Ученый секретарь  
Специализированного совета

М.Ф.Лихачев

## ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы. В настоящее время использование пучков ускоренных тяжелых ионов низких и средних энергий стало основным методом исследований в области ядерной физики<sup>\*</sup>. Ядерные реакции с тяжелыми ионами позволяют исследовать взаимодействие сложных систем, состоящих из большого числа нуклонов, в которых проявляются коллективные эффекты, связанные со свойствами ядерной материи – кулоновскими и поверхностными силами, сжимаемостью и вязкостью ядерного вещества, свойствами ядерной поверхности и плотности. Продуктами этих реакций являются новые ядра, которые могут находиться в экстремальных состояниях вблизи границы ядерной устойчивости с большим избытком протонов или нейтронов, обладающих значительной энергией возбуждения (~100 МэВ) и высоким угловым моментом (вплоть до  $70\hbar$ ). Исследования таких состояний ядерной материи позволяют получать важную физическую информацию не только в области ядерной физики, но и в других областях науки – астрофизике, физике твердого тела и конденсированных сред и др. Реакции с тяжелыми ионами являются единственным способом синтеза тяжелых элементов, включая одну из важных задач ядерной физики – синтез и изучение свойств сверхтяжелых трансфермиевых элементов. Тяжелые ионы представляют также уникальные возможности для исследований в области атомной физики, квантовой электродинамики, для проверки идей о существовании сверхтяжелых атомов, сверхплотных ядер и др.

Большие удельные потери энергии тяжелых ионов позволяют исследовать вещество в экстремальных состояниях, в условиях сверхвысоких температур и существенного изменения структуры образца. Здесь необходимо выделить весьма важную область – радиационное материаловедение, связанную с исследованием металлов и композиционных сплавов, подвергающихся действию больших нейтронных потоков. Эксперименты, проведенные в различных научных центрах мира, показали, что проявляющиеся макроскопические дефекты структуры этих материалов могут успешно моделироваться на пучках тяжелых ионов, деструктивное воздействие которых в  $10^5$ – $10^6$  раз выше, чем у нейтронов, в условиях фактически полного отсутствия радиоактивности исследуемого образца. Другим перспективным направлением применения тяжелых ионов является получение с их помощью микропористых мембран, используемых в настоящее время в различных областях науки, техники и производства. Ядерные мембраны

<sup>\*</sup>Понятие низкие энергии для пучков тяжелых ионов подразумевает энергетический диапазон до (10–20)МэВ/нук, а средние энергии – до (100–200) МэВ/нук.



получаются путем облучения тяжелыми ионами полимерных пленок и последующего травления участков полимера вдоль следов ионов. Изменяя условия облучения и травления, можно варьировать размеры пор в широких пределах (от 0,01 до 10 мкм), а также изменять число пор на единичной площади ядерной мембраны (от  $10^5$  до  $10^{10}$  на  $\text{см}^2$ ).

Наконец, пучки тяжелых ионов могут быть использованы для глубокой послойной имплантации в различные вещества, что открывает широкие возможности для исследований в физике твердого тела и полупроводниковой технике.

Решение перечисленных выше задач, в первую очередь, связано с созданием мощных ускорительных установок, предназначенных для получения пучков тяжелых ионов в широком диапазоне масс и энергий. Поэтому в последнее время в ряде ведущих центров мира (ФРГ, Франция, США, Япония, Италия, Канада, Китай) разрабатываются и создаются крупные ускорительные комплексы различных типов, позволяющие генерировать пучки тяжелых ионов вплоть до урана с энергиями до (100–200) МэВ/нук.

Настоящая диссертация посвящена вопросам разработки и создания высокоточных изохронных циклотронов тяжелых ионов Лаборатории ядерных реакций ОИЯИ, позволяющих проводить на современном мировом уровне актуальные исследования, имеющие фундаментальный и прикладной характер.

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

Цель работы заключается в научном обосновании и реализации наиболее оптимальных технических решений, обеспечивающих получение ускоренных интенсивных пучков тяжелых ионов низких и средних энергий в изохронных циклотронах, а именно:

- а) в разработке и создании компактных и экономичных магнитных структур, позволяющих обеспечить устойчивое и изохронное ускорение ионов в широком диапазоне масс и энергий;
- б) в экспериментальных исследованиях режимов ускорения тяжелых ионов и способах повышения их эффективности;
- в) в разработке многоцелевого циклотрона, предназначенного для получения пучков легких и тяжелых ионов;
- г) в создании изохронного циклотрона тяжелых ионов для прикладных исследований.

Научная новизна выполненных исследований, относящихся к проблеме получения интенсивных пучков тяжелых ионов, заключается в том, что эта задача впервые была решена на ускорителях ЛЯР, что явилось основой для развития циклотронного метода ускорения тяжелых ионов во

многих лабораториях мира. Решение этой проблемы определяется целым рядом положений, обладающих научной новизной. Впервые разработаны, исследованы и реализованы на циклотронах У-200, У-200П и У-400 компактные и экономичные магнитные структуры, обеспечивающие устойчивое и изохронное ускорение пучков ионов в широком диапазоне масс и энергий. Показано, что использование магнитных полей в области неполного насыщения железа позволяет наиболее оптимальным образом сформировать требуемые зависимости поля при минимальной токовой коррекции. Выполнены для циклотронов У-200 и У-400 экспериментальные исследования режимов ускорения тяжелых ионов и предложены способы повышения их эффективности. Для циклотрона ИЦ-100 исследована и реализована схема ускорения ионов в центральной области, эффективно работающая на четвертой и шестой гармониках при неизменной геометрии начальной оптики. Проведены теоретические и экспериментальные исследования вывода пучка ускоренных ионов двумя способами: электростатическим дефлектором и методом перезарядки ионов на тонкой мишени. Предложен и реализован способ получения внешнего однородного пучка большой площади, используемого для создания ядерных мембран.

Практическая ценность. Теоретический анализ и практические разработки, связанные с созданием элементов и систем ускорителей, исследованием их характеристик легли в основу конструкций циклотронов тяжелых ионов, разработанных в ЛЯР ОИЯИ. На их базе создан и запущен в 1968 году первый в СССР изохронный циклотрон тяжелых ионов У-200, один из самых мощных ускорителей тяжелых ионов циклотрон У-400, введенный в строй действующих в 1978 году, разработан и реализуется проект многоцелевого изохронного циклотрона У-250, создан и с 1986 года введен в эксплуатацию первый в мире циклотрон тяжелых ионов для прикладных исследований ИЦ-100.

#### Автор защищает:

1. Принципы и концепцию создания изохронных циклотронов с высоким уровнем магнитного поля для получения интенсивных пучков тяжелых ионов низких и средних энергий.
2. Результаты теоретических и экспериментальных исследований различных вариантов магнитных структур, обеспечивающих устойчивое и изохронное ускорение ионов в широком диапазоне масс и энергий.
3. Методику расчета и результаты исследований динамики движения тяжелых ионов в центральной области, ускоряемых на различных гармониках частоты обращения.
4. Результаты теоретических и экспериментальных исследований вывода пучка методами электростатики и перезарядки ионов на твердой мишени.

5. Результаты экспериментальных исследований различных режимов ускорения тяжелых ионов в циклотронах с высоким уровнем магнитного поля и способы повышения их эффективности.

6. Разработку проекта многоцелевого изохронного циклотрона легких и тяжелых ионов и создание циклотрона тяжелых ионов для прикладных исследований.

Апробация работ. Основные результаты диссертационной работы докладывались на I-X Всесоюзных совещаниях по ускорителям заряженных частиц, VI, X и XI Международных конференциях по изохронным циклотронам (Ванкувер, 1972, Ист-Лансинг, 1984, Токио, 1986), XVI, XXIII Европейских совещаниях по циклотронам (Виллиген, 1979, Дебрецен, 1986), Национальных конференциях США по ускорителям (Вашингтон, 1969, Чикаго, 1971 и 1977, Ванкувер, 1985), Международных совещаниях по циклотронам и их применению (Бехине, 1985 и 1989), Международном рабочем совещании по технике изохронных циклотронов (Краков, 1978), Международной школе-семинаре по физике тяжелых ионов (Алушта, 1983), Международной школе молодых ученых по проблемам ускорителей заряженных частиц (Дубна, 1984), Международном рабочем совещании по использованию ядерных фильтров для решения научно-технических и народнохозяйственных задач и радиационному материаловедению (Дубна, 1986), Всесоюзном совещании по ускорителям низких и средних энергий (Киев, 1981), Всесоюзном совещании по использованию ядернофизических методов для решения научно-технических и народнохозяйственных задач (Дубна, 1982).

Публикации. По теме диссертации опубликовано 50 работ, основные результаты содержатся в 37 публикациях, приведенных в списке литературы.

Структура диссертации. Работа состоит из введения, четырех глав и заключения. Общий объем диссертации составляет 212 страниц, включая 92 рисунка и список литературных ссылок из 170 наименований.

Введение содержит постановку задачи, перечень рассмотренных проблем и обоснование структуры диссертации. В первой главе рассмотрены способы получения и ускорения тяжелых ионов низких и средних энергий. Вторая глава посвящена вопросам создания изохронных циклотронов тяжелых ионов с высоким уровнем магнитного поля для ядернофизических исследований. В третьей главе дано описание специализированного изохронного циклотрона тяжелых ионов для прикладных исследований. Четвертая глава посвящена вопросам применения пучков тяжелых ионов для изучения процессов дефектообразования в конденсированных средах. В заключении дан краткий перечень основных научных результатов.

## СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

В первой главе диссертации рассмотрены способы получения и ускорения тяжелых ионов низких и средних энергий. Из анализа принципов действия различных типов ионных источников (дуоплазмотрон, дуговой, лазерный, источник, основанный на явлении электронного циклотронного резонанса, электроннолучевой) сделан вывод о том, что для получения достаточно высокой средней интенсивности ускоренного пучка ( $>10^{12} \text{с}^{-1}$ ) наиболее подходящими являются источник дугового типа (PIQ) и, особенно, источник с электронным циклотронным резонансом (ECR), способные генерировать ионы относительно высокого заряда в непрерывном или квазинепрерывном режимах. Другим методом получения интенсивного пучка высокозарядных ионов является способ перезарядки при прохождении ионов с определенной начальной энергией через газовую и твердотельную мишени.

Далее рассмотрены методы ускорения тяжелых ионов в электростатических и линейных ускорителях и дан анализ преимуществ и недостатков каждого из них. Показано, что на современном этапе своего развития электростатические ускорители дают возможность генерировать пучки ионов в массовом диапазоне  $A \leq 100$  с энергиями до 10 МэВ/нук и интенсивностями до  $(10^9 - 10^{11}) \text{с}^{-1}$  в зависимости от типа ускоряемой частицы. Дальнейшее расширение возможностей электростатических ускорителей в плане увеличения энергии и диапазона ускоряемых масс связано с их использованием в качестве инжекторов в ускорители других типов.

Помимо ускорения тяжелых ионов в электростатических ускорителях успешно развивался метод линейного ускорения. Ускорители этого типа позволяют получать относительно большую среднюю интенсивность пучков (примером совершенной конструкции такого ускорителя является созданный и запущенный в 1975 году ускоритель UNILAS, на котором получен пучки ионов от  $^{14}\text{N}$  до  $^{238}\text{U}$  с максимальной энергией 20 МэВ/нук и интенсивностями  $10^{13} - 2 \cdot 10^{11} \text{с}^{-1}$ ), однако существенное повышение энергии ионов представляет серьезную техническую проблему и связано с большими трудностями. В диссертации рассмотрены различные схемы линейного ускорения тяжелых ионов (в том числе с использованием высокочастотной квадрупольной фокусировки на начальном этапе ускорения) и показаны основные ограничения, связанные с интенсивностью и энергией ускоренного пучка.

Значительно большие возможности предоставляет циклотронный метод, который при сравнительно разумных затратах позволяет получать интенсивные пучки тяжелых ионов достаточно высоких энергий (100 - 200) МэВ/нук в широком диапазоне масс (вплоть до урана) и с хорошим

качеством (энергетическое разрешение  $\leq 10^{-3}$ , эмиттанс пучка  $\leq 5 \text{ нм.мрад}$ ). Для циклотрона принципиально существует две возможности: прямой метод ускорения ионов, при котором заряд частицы из ионного источника остается постоянным в процессе всего ускорения и каскадный способ ускорения со скачкообразным увеличением заряда иона за счет перезарядки на каждом этапе. Прямой метод ускорения с использованием высокоинтенсивного источника ионов обеспечивает наибольший ток пучка, в то время как каскадный способ представляется наиболее оптимальным с точки зрения достижения максимальной энергии ионов.

В диссертации кратко описаны различные конструктивные варианты циклотронов тяжелых ионов (включая сверхпроводящие) и указаны преимущества и недостатки той или иной схемы.

Во второй главе рассмотрены некоторые аспекты разработки и создания изохронных циклотронов тяжелых ионов с высоким уровнем магнитного поля. Сформулирован подход и выработаны критерии выбора варианта циклотрона для получения интенсивных пучков тяжелых ионов низких и средних энергий. На основе проведенного анализа с использованием результатов экспериментальных исследований пучков, полученных на ускорителях У-200 и У-400, показано, что использование циклотрона с большим энергетическим параметром и мощным источником РИГ позволяет в диапазоне энергий до  $(10-20) \text{ МэВ/нук}$  получать наиболее интенсивные пучки тяжелых ионов элементов первой половины периодической таблицы Д.И. Менделеева. Повышение энергии и расширение диапазоны масс ускоряемых ионов (за счет использования более высоких зарядов) связано с использованием источника ECR, хотя в этом случае интенсивности пучков получаются меньше. Если требуется одновременно иметь пучки достаточно высоких энергий ( $\sim 100 \text{ МэВ/нук}$ ) и интенсивностей ( $\sim 10^{12} \text{ с}^{-1}$ ), то единственным радикальным способом является применение мощного предускорителя циклотронного типа с источником РИГ, генерирующим пучки сравнительно малозарядных ионов высокой интенсивности с последующим повышением заряда ионов за счет перезарядки и их последующим ускорением во втором циклотроне. Это положение явилось основой для создаваемого в настоящее время циклотронного комплекса У-400+У-400М, предназначенного для получения пучков ионов от  $^{16}\text{O}$  до  $^{238}\text{U}$  с энергиями  $(120-20) \text{ МэВ/нук}$  и интенсивностями  $(5 \cdot 10^{12} - 10^{11}) \text{ с}^{-1}$ .

Рассмотрены особенности ускорения тяжелых ионов в изохронных циклотронах ЛЯР. На основе экспериментальных исследований, выполненных на ускорителях У-200 и У-400, показана возможность использования циклотрона в качестве масс-спектрометра для разделения пучков ионов, имеющих одинаковое отношение атомного числа к заряду, но отличающихся отношением массы к заряду из-за дефекта масс ядер. На рис. 1 представ-

лены резонансные кривые для ионов  $^4\text{He}^{1+}$ ,  $^{12}\text{C}^{3+}$ ,  $^{16}\text{O}^{4+}$ , ускоренных в циклотроне У-200 на второй гармонике, из которых следует, что разрешающая способность ускорителя на конечном радиусе составляет 1500. Аналогичные эксперименты, проведенные для У-400, показали, что для ионов  $^{10}\text{B}^{1+}$ ,  $^{20}\text{Ne}^{2+}$ ,  $^{40}\text{Ar}^{4+}$ , ширина резонансной настройки магнитного поля на конечном радиусе составляет 5 гс, а значение разрешающей способности циклотрона равно 3600.

На основе анализа, проведенного для циклотронов с внутренним ионным источником, показано, что основной компонентой, определяющей величину рабочего давления в вакуумной камере, является количество газа, подаваемого в источник, что иллюстрируется рис. 2. Улучшение вакуума может быть достигнуто за счет импульсной подачи газа, установкой в центральной области дополнительных средств откачки, уменьшением десорбирующего действия попутных ионов с помощью диафрагм,

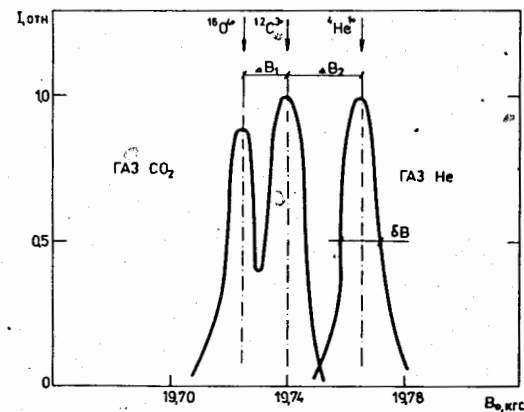


Рис. 1. Резонансное разделение ионов  $^4\text{He}^{1+}$ ,  $^{12}\text{C}^{3+}$ ,  $^{16}\text{O}^{4+}$  на конечном радиусе ускорения циклотрона У-200. Рабочий газ, подаваемый в источник, представлял смесь  $\text{CO}_2$  и He

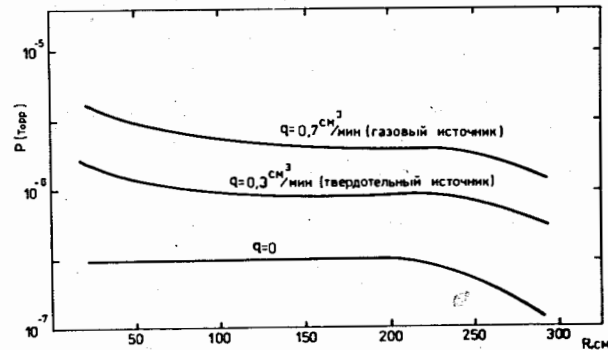


Рис. 2. Экспериментальная зависимость давления в вакуумной камере от радиуса циклотрона У-400 при различных количествах газа, подаваемого в ионный источник

сепарирующих пучков на первых оборотах и др. Однако кардинальным решением вопроса является размещение ионного источника вне вакуумного объема циклотрона и инъекция в него "чистого" пучка. С этой целью (а также для реализации возможностей использования внешних источников различных конструкций, в том числе ECR типа) на циклотроне У-200 создана система аксиальной инъекции. Экспериментальные исследования системы были проведены с пучком ионов  ${}^4\text{He}^{1+}$ , ускоряемых в циклотроне до энергии 36 МэВ. В качестве инфлектора использовалось электростатическое зеркало, напряжение инъекции равнялось около 15 кв. Исследования показали, что эффективность транспортировки пучка от сепарирующего магнита до вывода включительно составляет 8%, интенсивность выведенного пучка ионов на удаленной физической мишени равнялась 15 мка.

Приведены результаты теоретических и экспериментальных исследований различных вариантов магнитных структур, разработанных и реализованных на циклотронах ЛЯР, и описана методика формирования магнитного поля. Показано, что для компактных изохронных циклотронов тяжелых ионов наиболее эффективными оказываются магнитные структуры, когда дуанты относительно небольшой угловой протяженности размещаются в долинах, а минимальное расстояние между секторами определяется только вертикальным размером пучка. В такой конструкции значительно уменьшается средний воздушный зазор, что позволяет заметно увеличить средний уровень магнитного поля (до 20–22 кГс). Вместе с тем, в таких структурах пространство для расположения токовых корректирующих катушек ограничено, что ставит задачу о формировании поля, в основном, с помощью железных масс. Эта концепция была положена в основу при формировании магнитных полей изохронных циклотронов У-200 и У-200П Варшавского университета, а также У-400. Ее реализация, однако, может быть осуществлена различными способами. Схема вариантов магнитных структур этих циклотронов приведена на рис. 3.

Для циклотрона У-200 задача создания необходимой конфигурации магнитного поля, обеспечивающего устойчивое и изохронное ускорение ионов с  $0,22 \leq Z/A \leq 0,357$  до энергий (7,5–20) МэВ/нук, была решена с помощью кольцевых шимм, размещенных между секторами и крышкой вакуумной камеры, а также изменением угловой протяженности сектора. На основании расчетов и экспериментальных исследований были получены поля, отличающиеся от изохронных во всей рабочей области ускорения не более чем на 10 гс при изменении уровня поля в центре от 19,3 до 19,9 кГс (флаттер поля обеспечивает удовлетворительную вертикальную фокусировку и величина  $V_z$  составляет 0,2–0,25). Зависимости интенсивности пучков ионов  ${}^{12}\text{C}^{4+}$ ,  ${}^{16}\text{O}^{4+}$ ,  ${}^{22}\text{Ne}^{5+}$  от радиуса свидетельствуют практически об отсутствии фазовых потерь (~50% уменьшение интенсивности

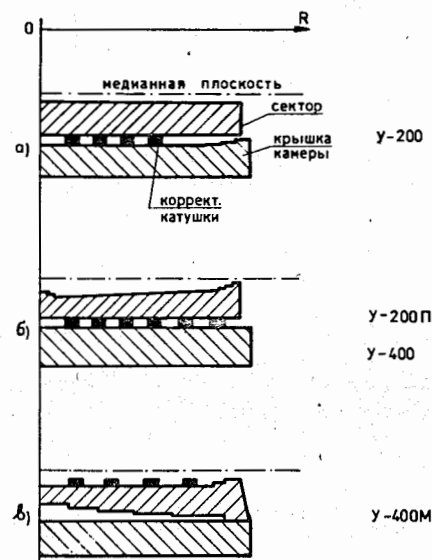


Рис. 3. Схема вариантов магнитных структур циклотронов У-200, У-200П, У-400, У-400М

У-200П явилась моделью для У-400 в масштабе 1:2).

Радиальные распределения среднего поля и флаттера для различных уровней представлены на рис. 4. Видно, что поле, сформированное для ионов с  $Z/A=0,25$  при сравнительно небольшом изменении в центре (от 18,75 до 21,4 кГс) перераспределяется и соответствует условиям ускорения частиц с  $0,1 \leq Z/A \leq 0,5$ , причем отличия реального и изохронного полей во всем диапазоне не более  $\pm 15$  гс. Следует указать, что такой механизм в распределении полей определяется только уровнем магнитного поля и не зависит от способа его формирования.

Из анализа результатов по формированию магнитного поля, полученных на циклотронах У-200, У-200П и У-400, следует, что использование магнитных полей относительно высокого уровня в переходной области кривой намагничивания (неполное насыщение) позволяет реализовать важную закономерность. При изменении уровня магнитного поля изменение в центре и на край оказывается различным. С ростом абсолютного значения среднего поля уменьшается отличие поля на конечном радиусе от поля в центре и т.о. появляется возможность, получив изохронную зависимость для ускорения одной частицы, ускорять ионы в определенном диапазоне  $Z/A$  практически без применения токовых корректирующих катушек (либо при минимальной их коррекции).

от центра до конечного радиуса связано с потерями из-за перезарядки на остаточном газе), а вертикальный размер, измеренный радиографически и трехламельным пробником, для всех значений радиусов не превышает 10 мм (минимальная апертура составляет 30 мм).

Помимо способа формирования магнитного поля, реализованного на циклотроне У-200, возможен вариант, в котором для получения требуемого распределения поля кольцевые ступенчатые шиммы выполняются на поверхности секторов со стороны меданной плоскости. Этот метод впервые был использован для формирования поля циклотрона У-200П и в дальнейшем реализован на циклотроне У-400 (магнитная структура

Как показал опыт эксплуатации циклотрона У-200, при ускорении ионов с  $0,167 \leq Z/A \leq 0,357$  до энергий (4-20) МэВ/нук (магнитное поле в центре изменяется от 19,3 до 20 кГс) требуемая мощность токовых катушек, корректирующих распределение среднего магнитного поля, составляет менее 5 квт. В циклотроне У-400 для ускорения ионов с  $0,08 \leq Z/A \leq 0,2$

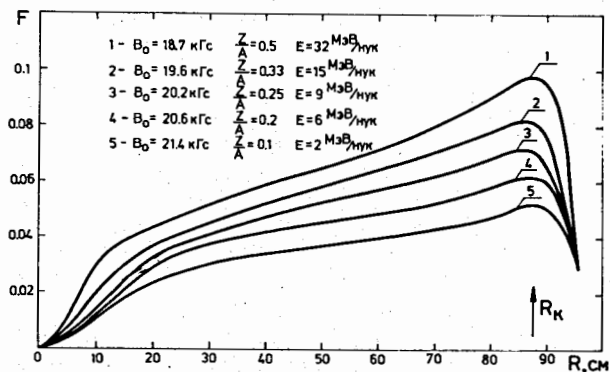
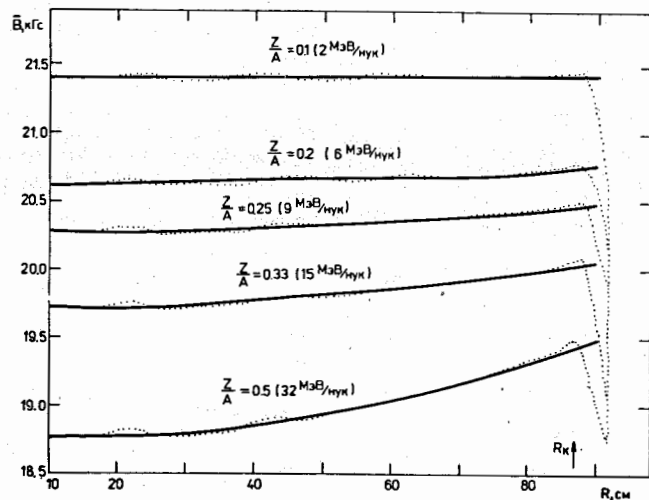


Рис. 4. Радиальные распределения среднего магнитного поля и флаттера для ионов с различным отношением  $Z/A$  в циклотроне У-200. Цифры, указанные в скобках, соответствуют энергиям на конечном радиусе ускорения. Магнитное поле сформировано с помощью железных масс при уровне  $B_0 = 20,2$  кГс для ионов с  $Z/A = 0,25$

(от  $^{10}B^{2+}$  до  $^{84}Kr^{7+}$ ) с энергиями (3,5-23) МэВ/нук (соответствующие изменения магнитного поля в центре составляют 19,8-21,3 кГс) мощность кольцевых корректирующих катушек не превышает 10 квт.

Использование магнитных полей в области неполного насыщения позволяет достаточно оптимально варьировать энергию тяжелых ионов путем ускорения иона с различными зарядами на различных гармониках частоты обращения. Дополнительное изменение энергии внешнего пучка (до 0,6 от энергии на конечном радиусе) может быть осуществлено за счет радиального и азимутального перемещения фольги при выводе ионов методом перезарядки.

На основе опыта проектирования, изготовления и работы циклотронов У-200 и У-400 в ЛЯР ОИЯИ предложен и разработан проект 250 см изохронного циклотрона (У-250), реализация которого осуществляется в настоящее время в НИИЭФА им. Д.В.Ефремова.

Циклотрон У-250 предназначен для ускорения ионов в диапазоне  $Z/A$  от 0,5 до 0,1 с максимальной энергией  $E = 200 Z^2/A^2$  МэВ/нук. Работа циклотрона будет происходить на уровнях возбуждения электромагнита, соответствующих величине магнитного поля в центре от 16 до 19 кГс. Нижний уровень поля используется при ускорении самых легких ионов (протонов с энергией 40 МэВ), уровень поля в 19 кГс - при ускорении большинства тяжелых ионов, что позволит реализовать максимальный энергетический параметр циклотрона.

В диссертации представлены конструктивные особенности циклотрона У-250 и дано описание его основных узлов и систем. Для получения интенсивных пучков тяжелых ионов на первом этапе будет использоваться внутренний дуговой источник РДС с аксиальным вводом в циклотрон. Наличие вертикального канала в ядре и полюсе электромагнита позволит в дальнейшем реализовать систему аксиальной инжекции пучка от внешнего источника ECR, что существенно расширит возможности циклотрона (рис.5).

Вывод ионов из ускорителя будет, в основном, осуществляться методом перезарядки их на тонких углеродных мишенях. Этот метод наиболее эффективен (коэффициент выпуска близок к 100%) для легких ионов (p, d,  $^3He$ ,  $^4He$ ), т.к. он позволяет существенно уменьшить уровень наведенной радиоактивности внутри циклотрона, что в значительной степени повышает его надежность и облегчает условия эксплуатации. Для ионов от  $^{10}B$  до  $^{40}Ar$  с энергиями (12-8) МэВ/нук коэффициент выпуска составляет (90-50)%. Наряду с методом перезарядки планируется использование электростатического дефлектора в тех режимах ускорения тяжелых ионов, где метод перезарядки не обеспечивает достаточно высокие эффективности выпуска и качества выведенного пучка.



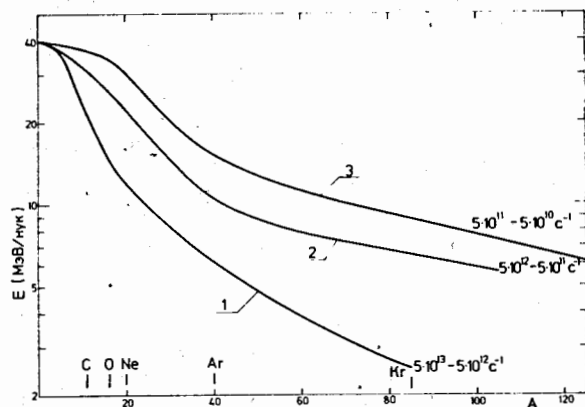


Рис. 5. Зависимость энергии ускоренных ионов от массового числа для циклотрона У-250. Кривая 1 соответствует внутреннему источнику РИГ, кривые 2, 3 - источнику ECR. Цифры около каждой кривой обозначают интенсивности пучков ионов для всего диапазона масс

Создаваемый циклотрон позволит значительно модернизировать существующую ускорительную базу для ядерной физики в научных центрах СССР и странах-участницах ОИЯИ и даст возможность на современном уровне реализовать широкую программу исследований, имеющих фундаментальный и прикладной характер.

Третья глава диссертации посвящена разработке, созданию и запуску специализированного циклотрона ИЦ-100, предназначенного для исследований взаимодействия тяжелых ионов с веществом. Ускоритель с энергетическим параметром  $K=40$  позволяет получать пучки ионов с  $Z/A=0,114-0,187$  до энергий  $(0,5-1,2)$  МэВ/нук.

Его магнитная структура состоит из четырех секторов с прямыми границами и угловой протяженностью  $56^\circ$ . С целью существенного упрощения конструкции и облегчения условий эксплуатации циклотрона ИЦ-100 магнитное поле сформировано с помощью только железных масс без применения токовых корректирующих катушек. Формирование магнитного поля в основной рабочей области осуществлялось комбинированным способом. "Трубное" шиммирование поля (отличие реального и изохронного полей составляло  $\pm 200$  Гс) было сделано по результатам расчетов и модельных измерений кольцевыми шиммами, выполненными на внутренней поверхности секторов. "Тонкое" шиммирование осуществлялось изменением угловой протяженности сектора. Как следует из радиальных распределений среднего магнитного поля и флаттера для трех уровней возбуждения, отличия

реальных и изохронных полей не превышает  $\pm 20$  Гс, что обеспечивает малый фазовый сдвиг ионов в процессе ускорения, а флаттер магнитного поля - достаточную вертикальную фокусировку, начиная с первых оборотов ( $\Delta \sin^2 \psi \leq 0,1$  и  $\psi_2 \sim 0,3-0,35$ ).

Выбор параметров центральнооптической системы, позволяющей эффективно ускорять ионы в широком диапазоне  $Z/A$  на различных гармониках частоты обращения, осуществлен численным интегрированием полных уравнений движения частиц в электромагнитных полях. В расчетах магнитное поле задавалось в виде реальной карты поля, измеренного с шагом по радиусу 5 мм и азимуту  $1,875^\circ$ , а для электрического поля использовалось аналитическое приближение реального распределения потенциала, горизонтальная компонента которого описывалась гауссовским распределением. В качестве основных критериев для неизменной геометрии элементов начальной оптики, обеспечивающей ускорение ионов на четвертой и шестой гармониках, являлись: хорошая центровка орбит для максимальной полосы начальных фаз ионов и устойчивость вертикального движения на первых пяти оборотах. Вычислялись траектории ионов в медианной и вертикальной плоскостях, энергия и фаза иона относительно ускоряющего напряжения, центры кривизны орбит.

Показано, что хорошая центровка пучка ( $\Delta R_{II} \leq 5$  мм) в обоих режимах достигается для отрицательных начальных фаз ( $-70^\circ \leq \psi_0 \leq -10^\circ$  при  $n=4$  и  $-30^\circ \leq \psi_0 \leq -10^\circ$  при  $n=6$ ), причем наблюдаемое сужение начального фазового диапазона не сопровождается разбросом по энергии и центрам орбит ионов. Что касается вертикального движения, то ионы уже на первом обороте ускорения испытывают влияние азимутальной вариации магнитного поля, фокусирующее воздействие которого оказывается заметно сильнее, чем электрического поля и является определяющим для амплитуд вертикальных колебаний, величина которых не превышает 10 мм. Таким образом проведенный анализ начального движения показывает, что при неизменной геометрии центральной области циклотрона ИЦ-100 возможно эффективное ускорение на четвертой и шестой гармониках.

Высокочастотная система циклотрона ИЦ-100 состоит из двух коаксиальных резонансных линий и дуантов угловой протяженностью  $34^\circ$ . Выбор четных гармоник (четвертой и шестой) для ускорения ионов позволил осуществить синфазное возбуждение дуантов путем их соединения жесткой механической связью в центре. На основе расчетов по специальной разработанной вычислительной программе и модельных измерений осуществлена оптимизация геометрических параметров резонансной линии (высота дуанта, геометрия переходного участка, соотношение диаметров штока и бака однородного участка) и в.ч. мощности, выделяющейся в резонаторах. Это позволило при добротности резонансной системы, равной 4700, получить на каждом дуанте в.ч. напряжение до 70 кВ при величине активной мощ-



ности в одном резонаторе, не превышающей 5 квт. Корпус резонатора выполнен из нержавеющей стали, плакированной медью. Хороший тепловой контакт медной плакировки с внутренней поверхностью резонатора достигнут применением современной технологии соединения двух разнородных металлических поверхностей – сваркой взрывом. Конструкцией предусмотрены механизмы истирки дуантов в рабочем состоянии без нарушения вакуума. Грубая перестройка частоты резонансной системы в пределах  $\pm 2,2\%$  осуществляется закорачивающей пластиной, для плавной подстройки используется триммер, обеспечивающий вариацию частоты в диапазоне  $\pm 0,25\%$ .

Питание высокочастотных резонаторов осуществляется от типового в.ч. генератора мощностью 25 квт и частотным диапазоном 3–24 МГц. Связь с резонансной системой индуктивная, регулируемая витком связи, расположенным на одном резонаторе.

Для циклотрона ИЦ-100 используется вертикальный ионный источник дугового типа с косвенным подогревом катода. Он позволяет получать интенсивные пучки тяжелых ионов как из газообразных ( $^{12}\text{C}^{2+}$ ,  $^{16}\text{O}^{3+}$ ,  $^{22}\text{Ne}^{4+}$ ,  $^{40}\text{Ar}^{7+}$ ), так и твердых ( $^{11}\text{B}^{2+}$ ,  $^{23}\text{Na}^{4+}$ ,  $^{56}\text{Fe}^{7+}$ ) веществ.

Источник вводится в центральную область циклотрона через аксиальное отверстие, выполненное в верхней балке и полюсе электромагнита. Конструкцией предусмотрено шлюзовое устройство, позволяющее менять источник без нарушения вакуума в камере ускорителя. Срок службы источника в режиме генерации высокозарядных ионов составляет (15–20) часов.

Система высоковакуумной откачки циклотрона ИЦ-100, имеющего вакуумный объем 1500 л, включает в себя один диффузионный агрегат ВА-8-7, установленный на камере, и два агрегата АВП-2, расположенных на резонансных баках. Суммарная быстрота действия средств откачки по азоту составляет  $5250 \text{ л}\cdot\text{с}^{-1}$ . Из экспериментально измеренных радиальных распределений давления в вакуумной камере при различных газовых потоках, подаваемых в ионный источник, следует, что в статическом режиме (без ионного источника) давление в камере в области ускорения пучка составляет  $1,5\cdot 10^{-6}$  тор (на периферии оно равно  $7\cdot 10^{-7}$  тор). При работе дугового источника с расходом газа

(1–2)  $\text{см}^3\cdot\text{мин}^{-1}$  система высоковакуумной откачки обеспечивает среднее давление в камере  $(5\text{--}10)\cdot 10^{-6}$  тор. Время откачки циклотрона ИЦ-100 от атмосферного давления до  $p=10^{-5}$  тор не превышает 1 часа.

Рассмотрены результаты ускорения ионов в различных режимах и проанализировано совокупное влияние характеристик различных элементов циклотрона на параметры пучка. На рис.6 показаны зависимости относительной интенсивности пучков ионов  $^{22}\text{Ne}^{4+}$ ,  $^{35}\text{Cl}^{4+}$  и  $^{40}\text{Ar}^{7+}$  от радиуса. Как видно из рисунка, интенсивность пучка от  $R=20$  см до  $R=46$  см меняется относительно слабо, что свидетельствует об отсутствии потерь

ионов в процессе ускорения, вызванных фазовым движением или нарушением устойчивости бетатронных колебаний. Незначительное уменьшение интенсивности пучка связано с потерей ионов из-за перезарядки на остаточном газе. Из зависимости интенсивности пучка ионов  $^{40}\text{Ar}^{7+}$  от давления в камере следует, что для  $\sim 50\%$  прохождения пучка до конечного радиуса необходимое давление в камере циклотрона должно быть не хуже  $10^{-5}$  тор. Автограф пучка, измеренный на различных радиусах, показывает, что во всей области ускорения пучок находится в медианной плоскости и имеет вертикальный размер, не превышающий половины рабочей апертуры (меньше 10 мм). Радиальный размер пучка на конечном радиусе составляет 5–6 мм. Основные параметры пучков ионов, ускоренных на циклотроне ИЦ-100, приведены в таблице (на циклотроне получены также пучки ионов  $^{11}\text{B}^{2+}$  с энергией 1,2 МэВ/нук интенсивностью  $2\cdot 10^{13}\text{ с}^{-1}$  и ионов  $^{56}\text{Fe}^{7+}$  с энергией 0,5 МэВ/нук и интенсивностью  $10^{11}\text{ с}^{-1}$ ).

Вывод ионов из ИЦ-100 осуществлен двумя способами: с помощью электростатического дефлектора и методом перезарядки на тонкой углеродной фольге. Схема электростатического вывода представлена на рис.7. Дефлектор с угловой протяженностью  $28^\circ$  и радиальной апертурой 10 мм расположен в долине циклотрона, максимальный потенциал на отклоняющей пластине составляет 50 кВ. Конструкция дефлектора смонтирована на фланце вакуумной камеры, что позволяет оперативно извлекать его для ревизии.

В ряде прикладных задач, в том числе и в производстве ядерных мембран, требуется облучение пучком тяжелых ионов широких (до нескольких десятков сантиметров) мишеней. Использование особенностей магнитного поля циклотрона ИЦ-100, а именно, существование высокоградиентной ( $\sim 50$  Тл/м) области рассеянного поля (точки 2+3) и его сильно дефокусирующего в радиальном направлении воздействия на пучок, позволило решить задачу получения на мишени (точка 4), отстоящей на расстоянии 0,5 м от выводного фланца камеры циклотрона широкого пучка ( $\sim 300$  мм) без применения традиционных схем и элементов пучковой оптики. Интенсивность пучка на мишени составила  $\sim 50\%$  от интенсивности внутреннего пучка циклотрона. Измерения, выполненные с помощью сеточного монитора для ионов  $^{16}\text{O}^{3+}$  и  $^{40}\text{Ar}^{7+}$ , показали, что таким способом в плоскости облучения получен сформированный пучок площадью  $\sim 6000 \text{ мм}^2$ , однородность которого не хуже 10–15%.

Вывод ионов методом перезарядки реализован таким образом, что пучок ионов выводится в том же направлении, что и пучок, выведенный электростатическим дефлектором. Экспериментально полученное значение коэффициента вывода для ионов, ускоряемых в циклотроне ИЦ-100, составляет (50–70)%, что хорошо согласуется с расчетными и опытными

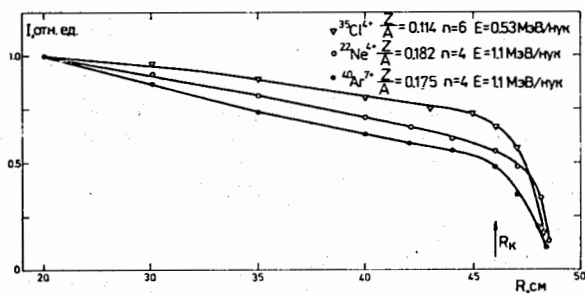


Рис. 6. Зависимость интенсивности пучков тяжелых ионов, ускоренных в циклотроне ИЦ-100, от радиуса

Таблица

Основные параметры пучков ионов, ускоренных в циклотроне ИЦ-100

Ион	$\frac{Z}{A}$	$V, \text{ кГс}$	$f, \text{ МГц}$	$n$	$E, \text{ мэВ}$	$\frac{E}{A}$ $\frac{\text{мэВ}}{\text{нук}}$	$I_{\text{пучк}}, \text{ с}^{-1}$	Раб. в-во
$^{12}\text{C}^{2+}$	0.167	19.85	20.2	4	13.3	1.1	$6 \cdot 10^{13}$	$\text{CO}_2$
$^{16}\text{O}^{3+}$	0.187	18.3	20.93	4	19.2	1.2	$3 \cdot 10^{13}$	$\text{CO}_2$
$^{22}\text{Ne}^{4+}$	0.182	18.89	20.93	4	26.5	1.2	$4 \cdot 10^{13}$	Ne, обог.
$^{23}\text{Na}^{4+}$	0.174	19.3	20.43	4	26.3	1.1	$10^{12}$	NaCl
$^{35}\text{Cl}^{4+}$	0.114	19.55	20.43	6	17.5	0.5	$2 \cdot 10^{13}$	$\text{CCl}_4$
$^{40}\text{Ar}^{7+}$	0.175	19.13	20.43	4	46.0	1.1	$2 \cdot 10^{12}$	Ar, ест.

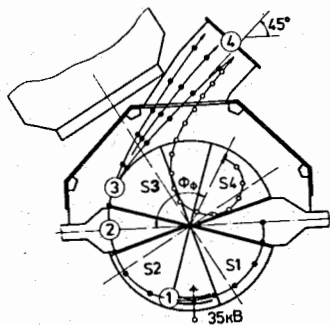


Рис. 7. Схема вывода ионов из циклотрона ИЦ-100

данными по зарядовому распределению ионов после перезарядки. Размер выведенного пучка в плоскости облучения составляет около 25 мм в диаметре.

Четвертая глава посвящена вопросам применения тяжелых ионов для изучения процессов дефектообразования в конденсированных средах. Отмечается, что в последнее время значительное развитие как самостоятельное направление исследований в физике твердого тела получила физика радиационных повреждений и радиационного материаловедения, изучающего изменения структурных и механических свойств реальных конструкционных материалов в мощных нейтронных потоках. Показано, что по сравнению с нейтронами и легкими заряженными частицами, используемыми для исследований эффектов радиационного дефектообразования в таких материалах, тяжелые ионы с энергией  $\sim 1$  МэВ/нук имеют ряд ощутимых преимуществ, основными из которых являются высокая скорость дефектообразования (на 5-7 порядков выше, чем для других видов излучения) и отсутствие активации исследуемых образцов. Приведены результаты экспериментальных исследований радиационного упрочнения различных металлов и сплавов (никель, ванадий, медь, нержавеющая сталь и др.), облученных ионами  $^{22}\text{Ne}^{4+}$  и  $^{40}\text{Ar}^{7+}$  с энергиями 0,3 - 1,2 МэВ/нук (облучения проводились как на внутреннем пучке, энергия которого варьировалась, так и на выведенном пучке). На пучках ионов  $^{16}\text{O}^{3+}$ ,  $^{22}\text{Ne}^{4+}$ ,  $^{35}\text{Cl}^{4+}$ ,  $^{40}\text{Ar}^{7+}$  выполнены исследования механических и диэлектрических свойств различных пьезоэлектриков ( $\text{ZnO}$ ,  $\text{LiNbO}_3$  и др.), используемых в качестве акустических дефектоскопов в современных ядерных реакторах. Методами оптической спектроскопии и измерения микротвердости изучены процессы дефектообразования в щелочно-галлоидных кристаллах ( $\text{LiF}$  и др.) и различных полупроводниках ( $\text{Si}$ ,  $\text{Ge}$ ,  $\text{AsGa}$ ) и показано, что изменения оптических свойств таких кристаллов обусловлены ионизационными потерями энергии тяжелых ионов, приводящими к образованию центров поглощения, а радиационное упрочнение связано с потерями энергии на упругие соударения.

В последнее время наблюдается значительный интерес к пучкам тяжелых ионов как к уникальному инструменту для целенаправленной модификации микроструктуры твердых тел и, в частности, полимерных материалов. При прохождении тяжелого иона через полимер выделяющаяся вдоль его траектории энергия приводит к образованию сплошного протяженного дефекта структуры, называемого треком и обладающего способностью к избирательному химическому травлению при воздействии подходящих реагентов, причем скорость травления максимальна при энергии ионов (1-2) МэВ/нук. Созданные на этом принципе ядерные мембраны находят широкое применение в различных областях науки и техники. Для их

производства на циклотроне ИЦ-100 используются пучки ионов  $Ag$  с энергией 1,1 МэВ/нук и интенсивностью  $10^{12} c^{-1}$ , а также ионы  $^{35}Cl$  с энергией 0,5 МэВ/нук и интенсивностью  $10^{13} c^{-1}$ .

Использование широкого однородного пучка этих ионов, выводимого из циклотрона электростатическим методом, позволяет проводить эффективное облучение полимерных пленок толщиной до 10 мкм включительно без применения достаточно сложных систем сканирования пучка.

В заключении сформулированы основные результаты диссертации.

#### Основные результаты диссертационной работы

1. Сформулирован подход и выработаны критерии создания изохронного циклотрона тяжелых ионов с высоким уровнем среднего магнитного поля. На основе проведенного анализа с использованием результатов экспериментальных исследований пучков, полученных на циклотронах У-200, У-400 и тандем-циклотроне У-200 - У-300 показано, что для обеспечения высокой интенсивности пучков ускоренных тяжелых ионов ( $10^{12}-10^{13} c^{-1}$ ) с энергиями до (10-20) МэВ/нук наиболее оптимальным является прямой метод ускорения с использованием изохронного циклотрона с большим энергетическим параметром и мощным дуговым источником (циклотрон У-400), в то время как для достижения максимальной энергии ( $\sim 100$  МэВ/нук) преимущество имеет каскадный метод ускорения (циклотронный комплекс У-400 + У-400М).

2. Впервые предложены, разработаны, исследованы и реализованы на циклотронах У-200, У-200М и У-400 компактные и экономичные магнитные структуры, обеспечивающие устойчивое и изохронное ускорение пучков ионов в широком диапазоне масс и энергий. Показано, что использование магнитных полей в переходной области кривой намагничивания (область неполного насыщения магнитной цепи) позволяет, в основном, с помощью железных масс наиболее оптимальным образом сформировать требуемые радиальные распределения среднего магнитного поля при минимальной мощности токовых корректирующих катушек.

3. Предложен, разработан и реализуется проект многоцелевого изохронного циклотрона с диаметром полюсов 250 см (У-250), предназначенного для генерации пучков легких и тяжелых ионов с максимальной энергией  $E = 200 z^2/A^2$  МэВ/нук. Создаваемый циклотрон позволит значительно модернизировать существующую ускорительную базу для ядерной физики в научных центрах СССР и странах-участницах ОИЯИ и даст возможность на современном уровне реализовать широкую программу исследований, имеющих фундаментальный и прикладной характер.

4. Предложен, разработан, создан и введен в эксплуатацию первый в мире специализированный циклотрон тяжелых ионов ИЦ-100 для прикладных исследований,

а) Исследована и реализована схема ускорения ионов в центральной области, эффективно работающая на четвертой и шестой гармониках частоты обращения.

б) Решена задача формирования с помощью только железных масс магнитного поля, обеспечивающего устойчивое и изохронное ускорение ионов с различными отношениями  $Z/A$ .

в) На основе проведенных расчетных и экспериментальных исследований создана экономичная высокочастотная система, позволяющая при величине активной мощности  $\sim 10$  квт, выделяемой в резонаторах, получить амплитудное значение в.ч. напряжения на каждом дуанте до 70 кв.

г) Выполнены теоретические и экспериментальные исследования вывода пучка ускоренных ионов двумя способами: с помощью электростатического дефлектора и методом перезарядки ионов на углеродной фольге. Эффективность вывода для обоих методов составила (50-70)%.

д) Получены пучки ускоренных ионов от  $^{11}B$  до  $^{40}Ar$  с энергиями (0,5-1,2) МэВ/нук и интенсивностями ( $2 \cdot 10^{13} - 2 \cdot 10^{12}$ )  $c^{-1}$  и проведено исследование их характеристик.

5. Выполнены экспериментальные исследования по взаимодействию пучков тяжелых ионов, ускоренных на циклотроне ИЦ-100, с различными материалами. Показана высокая эффективность использования ускорителя ИЦ-100 для создания ядерных мембран на основе полимерной пленки и исследованиям процессов радиационного дефектообразования в кристаллах и металлах.

Основные результаты диссертации опубликованы в следующих работах:

1. Двухметровый изохронный циклотрон тяжелых ионов ОИЯИ / И.А.Шелаев, С.И.Козлов, Р.Ц.Оганесян, Ю.Ц.Оганесян; Объед. ин-т ядерн. исслед. - Препринт. - Дубна, 1968. - 9-3988. - 34 с.
2. Isochronous heavy ion cyclotron of JINR / I.A.Shelaev, S.I.Kozlov, R.Ts.Oganessian, Yu.Ts.Oganessian. // IEEE Trans. on Nucl. Sci. - 1969. - NS-16, № 3. - P.802-803.
3. Формирование магнитного поля двухметрового изохронного циклотрона ОИЯИ / И.А.Шелаев, С.И.Козлов, Р.Ц.Оганесян, С.Г.Фефилова; Объед. ин-т ядерн. исслед. - Препринт. - Дубна, 1968. - P9-4233. - 26 с.
4. С.И.Козлов, Р.Ц.Оганесян, И.А.Шелаев. Магнитное поле двухметрового изохронного циклотрона ОИЯИ // Труды I-го Всесоюзного совещания по ускорителям заряженных частиц, М., 9-16 октября 1968 г. - М., ВИНТИ, 1970. - С.121-124.
5. Система токовой коррекции двухметрового изохронного циклотрона ОИЯИ / И.А.Шелаев, А.И.Иваненко, С.И.Козлов, Р.Ц.Оганесян; Объед. ин-т ядерн. исслед. - Препринт. - Дубна, 1970. - P9-5047. - 10 с.
6. Вывод пучка методом перезарядки из двухметрового изохронного цикло-



- трона тяжелых ионов. / И.А.Шелаев, В.С.Алфеев, С.И.Козлов, Р.Ц.Оганесян; Объед. ин-т ядерн. исслед. - Препринт. - Дубна, 1969. - P9-483I. - 13 с. // ПТЭ. - 1970. - № 3. - С.63-66.
7. Параметры пучков ускоренных ионов двухметрового изохронного циклотрона ОИЯИ. / И.А.Шелаев, В.С.Алфеев, С.И.Козлов, В.М.Николаев, Р.Ц.Оганесян; Объед. ин-т ядерн. исслед. - Препринт. - Дубна, 1970. - P9-5048. - 18 с.
8. General design features of the four-meter isochronous cyclotron at Dubna with smoothly variable heavy ion energy. / I.A.Shelaev, E.D.Vorobiev, B.A.Zager, S.I.Kozlov, V.I.Kuznetsov, R.Ts.Oganessian, Yu.Ts.Oganessian, K.I.Semin, A.N.Filipson, V.A.Chugreev. // IEEE Trans. on Nucl. Sci. - 1971. - NS-18, № 3. - P.332-334.
9. Ускорение ионов ксенона на тандем-циклотроне ОИЯИ. / И.А.Шелаев, В.С.Алфеев, Б.А.Загер, С.И.Козлов, И.В.Колесов, А.Ф.Линев, В.Н.Мельников, Р.Ц.Оганесян, Ю.Ц.Оганесян, В.А.Чугреев; Объед. ин-т ядерн. исслед. - Препринт. - Дубна, 1971. - P9-6062. - 14 с.
10. Acceleration of Xe ions in the JINR tandem-cyclotrons. / I.A.Shelaev, V.S.Alfeev, B.A.Zager, S.I.Kozlov, V.N.Melnikov, R.Ts.Oganessian, A.N.Filipson, V.A.Chugreev. // Proc. of 6th Int. Cycl. Conf., Vancouver, Canada, 18-21 June 1972. - New York, 1972. - P.232-242.
11. Тандем-циклотрон ОИЯИ. / И.А.Шелаев, В.С.Алфеев, Б.А.Загер, С.И.Козлов, В.Н.Мельников, Р.Ц.Оганесян. // Труды 3-го Всесоюзного совещания по ускорителям заряженных частиц, М., 2-4 октября 1972 г. - М., Наука, 1973. - С.186-193.
12. Четырехметровый изохронный циклотрон ОИЯИ. / Г.Н.Флеров, И.А.Шелаев, В.С.Алфеев, С.И.Козлов, И.В.Колесов, Р.Ц.Оганесян, В.Н.Покровский, К.И.Семин, А.Н.Филипсон, В.А.Чугреев. // Труды 4-го Всесоюзного совещания по ускорителям заряженных частиц, М., 18-20 ноября 1974 г. - М., Наука, 1975. - С.34-39.
13. Сооружение ускорителя У-400. / Г.Н.Флеров, А.И.Иваненко, С.И.Козлов, И.В.Колесов, Б.Н.Марков, Р.Ц.Оганесян, А.С.Пасжк, В.Н.Покровский, К.И.Семин, В.А.Чугреев, И.А.Шелаев. // Труды 5-го Всесоюзного совещания по ускорителям заряженных частиц, Дубна, 5-7 октября 1976 г. - М., Наука, 1977. - С.58-65.
14. Двухметровый изохронный циклотрон Варшавского университета. / С.Кулински, С.Хойнацки, Ю.Сура, Ч.Вейхерт, П.Гмай, М.Ковальски, П.Радецки, Е.Плавски, П.Гетка, И.В.Колесов, Р.Ц.Оганесян, В.Н.Покровский, К.И.Семин, В.А.Чугреев. // Труды 5-го Всесоюзного совещания по ускорителям заряженных частиц, Дубна, 5-7 октября 1976 г. - М., Наука, 1977. - С.67-70.

15. Результаты предварительного формирования магнитного поля циклотрона У-200П Варшавского университета. / Ч.Вейхерт, П.Гмай, Ю.Дворски, М.Ковальски, С.Квятковски, Р.Морозович, Р.Ц.Оганесян, В.Перковски, П.Радецки, Ю.Сура, С.Хойнацки, В.А.Чугреев; Объед. ин-т ядерн. исслед. - Препринт. - Дубна, 1976. - P9-9939. - 10 с.
16. Магнитное поле четырехметрового изохронного циклотрона тяжелых ионов. / Ю.Ц.Оганесян, А.К.Евдокимов, С.И.Козлов, Б.А.Кленин, Р.Ц.Оганесян, Ю.Сура, А.М.Сухов, С.Г.Фефилова, В.А.Чугреев; Объед. ин-т ядерн. исслед. - Препринт. - Дубна, 1978. - 9-II992. - 14 с.
17. Изохронный циклотрон У-400 и перспективы развития ускорителей тяжелых ионов Лаборатории ядерных реакций ОИЯИ. / Г.Н.Флеров, Ю.Ц.Оганесян, В.В.Болтушкин, Г.Г.Гульбекян, А.И.Иваненко, Б.А.Кленин, С.И.Козлов, И.В.Колесов, В.Б.Кутнер, А.М.Мордуев, Р.Ц.Оганесян, В.Н.Покровский, К.И.Семин, В.А.Чугреев. // Труды 7-го Всесоюзного совещания по ускорителям заряженных частиц, Дубна, 14-16 октября 1980 г. - Дубна, 1981. - Т.1. - С.59-65.
18. Циклотронный комплекс для получения пучков тяжелых ионов с энергиями 20-120 МэВ/нук. / Ю.Ц.Оганесян, И.В.Колесов, Г.Г.Гульбекян, А.И.Иваненко, Б.А.Кленин, С.И.Козлов, В.Б.Кутнер, В.Н.Мельников, Р.Ц.Оганесян, В.Н.Покровский, К.И.Семин, В.А.Чугреев; Объед. ин-т ядерн. исслед. - Препринт. - Дубна, 1982. - 9-32-756. - 16 с.
19. Р.Ц.Оганесян. Многоцелевой изохронный циклотрон У-250. // Труды 4-го Всесоюзного совещания по использованию новых ядернофизических методов для решения научно-технических и народнохозяйственных задач, Дубна, 20-23 октября 1981 г. - Дубна, 1982. - 18-82-II7. - С.61-70.
20. Изохронный циклотрон тяжелых ионов с диаметром полюсов 250 см (У-250). / А.В.Гальчук, И.Ф.Малышев, А.В.Степанов, Г.Г.Гульбекян, В.Б.Кутнер, Р.Ц.Оганесян. // Труды Всесоюзного совещания по ускорителям ионов низких и средних энергий, Киев, 1-2 декабря 1981 г. - Киев, Наукова Думка, 1982. - С.82-92.
21. Проектные особенности циклотрона тяжелых ионов У-250. / И.Ф.Малышев, Ю.П.Вахрушин, М.Ф.Ворогушин, А.В.Гальчук, В.Г.Мудролюбов, А.В.Степанов, Ю.И.Стогов, П.В.Богданов, В.В.Большаков, С.П.Гурин, А.В.Климов, А.А.Солаамее, М.М.Суворов, Г.Г.Гульбекян, В.Б.Кутнер, Р.Ц.Оганесян, А.И.Муминов, Б.И.Исламов. // Труды 8-го Всесоюзного совещания по ускорителям заряженных частиц, Протвино, 19-21 октября 1982 г. - Дубна, 1983. - Т.1. - С.80-83.
22. Опыт эксплуатации и совершенствование циклотрона У-200. / Б.Н.Гикал, Г.Г.Гульбекян, С.И.Козлов, Р.Ц.Оганесян; Объед. ин-т ядерн. исслед. - Препринт. - Дубна, 1983. - 9-83-311. - 12 с.

23. The present status and perspectives of development of the JINR Laboratory of Nuclear Reactions heavy ion accelerators. / Yu.Ts.Oganessian, G.G.Gulbekian, B.N.Gikal, A.I.Ivanenko, B.A.Klenin, S.I.Kozlov, I.V.Kolesov, V.B.Kutner, V.N.Melnikov, R.Ts.Oganessian, A.S.Pasyuk, V.A.Chugreev. // Proc. of 10th Int. Conf. on Cycl. and their Application, East Lansing, USA, 30 April - 3 May 1984. - P.317-321.
24. Циклотронный метод ускорения тяжелых ионов. / Б.Н.Гикал, Г.Г.Гульбекия, В.Б.Кутнер, Р.Ц.Оганесян. // Труды Международной школы молодых ученых по проблемам ускорителей заряженных частиц, Дубна, 11-20 сентября 1984 г. - Дубна, 1984. - Д9-84-817. - С.24-42.
25. Циклический имплантатор тяжелых ионов для прикладных исследований. / Г.Н.Флеров, А.М.Андриянов, П.Ю.Апель, С.Л.Богомолов, Г.Г.Гульбекия, А.И.Иваненко, Б.А.Кленин, И.В.Колесов, В.И.Кузнецов, В.Б.Кутнер, А.М.Мордуев, Р.Ц.Оганесян, К.И.Семян, В.А.Чугреев. // Труды 9-го Всесоюзного совещания по ускорителям заряженных частиц, Дубна, 16-18 октября 1984 г. - Дубна, 1985. - Т.2. - С.86-90.
26. Магнитное поле циклического имплантатора ИЦ-100. / А.М.Андриянов, Г.Г.Гульбекия, Э.Л.Иванов, А.М.Мордуев, Р.Ц.Оганесян, В.А.Чугреев; Объед. ин-т ядерн. исслед. - Препринт. - Дубна, 1985. - 9-85-598. - 8 с.
27. Циклический имплантатор тяжелых ионов ИЦ-100. / А.М.Андриянов, С.Л.Богомолов, В.В.Болтушкин, П.Г.Бондаренко, Буй Бинь Тхуан, Г.Г.Гульбекия, А.И.Иваненко, Э.Л.Иванов, Ю.А.Иванов, Б.А.Кленин, И.В.Колесов, В.Б.Кутнер, Е.А.Минин, А.М.Мордуев, Р.Ц.Оганесян, С.В.Пащенко, В.А.Чугреев, Б.В.Фефилов. // Труды Международного совещания по циклотронам и их применению, Бехине, ЧССР, 25-28 июня 1985 г. - Дубна, 1985. - P9-85-707. - С.87-95.
28. Результаты пусконаладочных работ на циклическом имплантаторе тяжелых ионов ИЦ-100. / В.В.Болтушкин, С.Л.Богомолов, Г.Г.Гульбекия, А.И.Иваненко, А.М.Мордуев, Р.Ц.Оганесян; Объед. ин-т ядерн. исслед. - Препринт. - Дубна, 1986. - 9-86-305. - 6 с.
29. Получение выведенных пучков на циклическом имплантаторе тяжелых ионов ИЦ-100. / Г.Г.Гульбекия, Б.А.Кленин, А.М.Мордуев, Р.Ц.Оганесян, К.Хавличек, В.А.Чугреев; Объед. ин-т ядерн. исслед. - Препринт. - Дубна, 1986. - 9-86-785. - 6 с.
30. В.И.Кузнецов, Р.Ц.Оганесян. Циклические ускорители тяжелых ионов. // Труды Совещания по использованию ядерных фильтров для решения научно-технических и народнохозяйственных задач и радиационному материаловедению, Дубна, 16-17 октября 1985 г. - Дубна, 1986. - P18-86-110. - С.9-16.
31. R.Ts.Oganessian. Heavy ion cyclotron development at JINR. // Proc. of 11th Int. Conf. on Cycl. and their Application, Tokyo, Japan, 13-17 October, 1986. - Tokyo, Ionics Publishing Comp., 1986. - P.566-570.
32. Создание циклического имплантатора тяжелых ионов ИЦ-100. / Буй Бинь Тхуан, Г.Г.Гульбекия, А.И.Иваненко, Э.Л.Иванов, Ю.А.Иванов, Б.А.Кленин, И.В.Колесов, В.Б.Кутнер, Е.А.Минин, А.М.Мордуев, Р.Ц.Оганесян, С.В.Пащенко, К.Хавличек, В.А.Чугреев. // Труды 10 Всесоюзного совещания по ускорителям заряженных частиц, Дубна, 21-23 октября 1986 г. - Дубна, 1987. - Т.1. - Д9-87-105. - С.131-135.
33. Разработка ускорительного комплекса тяжелых ионов ОИЯИ У-400 - У-400М. / Г.Н.Флеров, Ю.Ц.Оганесян, А.М.Андриянов, Б.Н.Гикал, Г.Г.Гульбекия, А.И.Иваненко, Б.А.Кленин, С.И.Козлов, И.В.Колесов, В.Б.Кутнер, В.Н.Мельников, Р.Ц.Оганесян, В.А.Чугреев. // Труды 10-го Всесоюзного совещания по ускорителям заряженных частиц, Дубна, 21-23 октября 1986 г. - Дубна, 1987. - Т.1. - Д9-87-105. - С.109-114.
34. Система аксиальной инжекции ионов в циклотрон У-200. / Ю.Б.Виноградов, Б.Н.Гикал, Г.Г.Гульбекия, А.И.Иваненко, Д.Калчев, И.В.Колесов, В.Б.Кутнер, В.Н.Мельников, Р.Ц.Оганесян, В.А.Чугреев. // Труды 10-го Всесоюзного совещания по ускорителям заряженных частиц, Дубна, 21-23 октября 1986 г. - Дубна, 1987. - Т.2. - Д9-87-105. - С.143-146.
35. Создание и запуск системы аксиальной инжекции ионов в циклотрон У-200. / В.В.Бехтерев, Ю.Б.Виноградов, Б.Н.Гикал, Г.Г.Гульбекия, А.А.Ефремов, А.И.Иваненко, Д.Калчев, И.В.Колесов, В.Б.Кутнер, В.Н.Мельников, Р.Ц.Оганесян, Ю.П.Третьяков, В.А.Чугреев; Объед. ин-т ядерн. исслед. - Препринт. - Дубна, 1987. - 9-87-379. - 14с.
36. Влияние ионизационных и ядерных потерь энергии тяжелых ионов на дефектообразование в кристаллах / А.Ю.Дидык, Р.Ц.Оганесян, В.Р.Регель, В.А.Скуратов; Объед. ин-т ядерн. исслед. - Препринт. - Дубна, 1988. - 14-88-524. - 10 с.
37. Использование ускорителей тяжелых ионов для производства ядерных мембран. / Г.Н.Флеров, П.Ю.Апель, А.Ю.Дидык, В.И.Кузнецов, Р.Ц.Оганесян; Объед. ин-т ядерн. исслед. - Препринт. - Дубна, 1988. - P7-88-696. - 12 с.

Рукопись поступила в издательский отдел  
27 октября 1989 года.