

Г-469

**ОБЪЕДИНЕННЫЙ ИНСТИТУТ ЯДЕРНЫХ ИССЛЕДОВАНИЙ**

УДК 621.384.6

9-89-485

**ГИКАЛ**

**Борис Николаевич**

**СИСТЕМА АКСИАЛЬНОЙ ИНЖЕКЦИИ ИОНОВ  
В ЦИКЛОТРОН У-200**

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

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

Дубна 1989

Работа выполнена в Лаборатории ядерных реакций  
Объединенного института ядерных исследований.

Научный руководитель:

кандидат технических наук  
старший научный сотрудник

Владимир Борисович  
КУТНЕР

Официальные оппоненты:

доктор технических наук  
старший научный сотрудник

Алим Алексеевич  
ГЛАЗОВ

доктор технических наук  
старший научный сотрудник

Альберт Владимирович  
СТЕПАНОВ

Ведущая организация: Институт атомной энергии  
им. И. В. Курчатова, г. Москва.

Защита диссертации состоится " \_\_\_\_ " \_\_\_\_\_ 1989 г.  
в \_\_\_\_ часов на заседании Специализированного совета Д-047.01.03  
при Лаборатории ядерных проблем Объединенного института ядерных  
исследований, г. Дубна Московской области.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке  
Объединенного института ядерных исследований.

Автореферат разослан " \_\_\_\_ " \_\_\_\_\_ 1989 г.

Ученый секретарь  
Специализированного совета  
доктор физико-математических наук

Д. А. Батусов

## ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность проблемы. Исследования на пучках тяжелых ионов в широком диапазоне масс и энергий представляют большие потенциальные возможности для решения как фундаментальных научных проблем, так и важнейших народнохозяйственных задач. Все большее применение находят тяжелые ионы в изучении биологических процессов и в медицинской диагностике с использованием облучений биологических объектов короткоживущими радиоактивными изотопами углерода, азота, кислорода и др. /а, б, в/.

Циклотроны являются эффективным средством получения интенсивных пучков ионов. Диапазон ускоряемых частиц и интенсивность ускоряемого пучка, как известно, во многом определяются ионным источником. В последние годы, помимо совершенствования традиционного для циклотронов дугового источника ионов, интенсивно развиваются другие типы ионных источников ECR, MALTICUSP, поляризованных частиц и др. Однако их использование в циклотронах стало возможным только благодаря системам внешней инжекции пучка. Во многих научных центрах западных стран реализованы системы аксиальной инжекции пучка в циклотроны - GANIL (Франция), Лувен (Бельгия), Беркли (США), Карлсруэ (ФРГ), Гренобль (Франция) и др. /г, д, е, ж, з/.

Для циклотронов тяжелых ионов аксиальная инжекция пучка имеет ряд преимуществ по сравнению с внутренним источником:

- Может быть использован ионный источник любого типа. Более того, на одном ускорителе могут быть установлены несколько типов источников, которые дают возможность получить широкий диапазон ионов, недостижимый на каком-либо одном.
- Вакуум в камере циклотрона в процессе ускорения может быть улучшен почти на порядок, тем самым уменьшены потери пучка, вызванные перезарядкой ускоряемых ионов на остаточном газе.
- Предварительная сепарация пучка в канале внешней инжекции приводит к снижению нагрузки на ВЧ-систему, что ведет к уменьшению вероятности пробоя с дуантов, улучшению условий стабилизации па-

Объединенный институт  
ядерных исследований  
Библиотека

раметров пучка и обеспечивает высокое качество ускоренного пучка, эффективный вывод и трассировку по каналам.

- За счет банчировки и эффективной системы аксиальной инжекции имеется возможность увеличить коэффициент использования пучков, генерируемых ионным источником. Особенно это важно для высокозарядных ионов, которые, как правило, имеют низкую интенсивность.
- Снижение общих потерь пучка в процессе ускорения ведет к уменьшению активации узлов циклотрона, увеличению их срока службы.

Цель работы. 1. Разработать и создать эффективную систему аксиальной инжекции пучка ионов в циклотрон У-200.

2. Исследовать условия транспортировки пучка ионов по каналу внешней инжекции. Найти наиболее эффективный способ инжекции пучка в медианную плоскость циклотрона. Сформулировать требования к элементам транспортировки и системам питания.

3. Исследовать возможности инжекции интенсивных пучков ионов и экспериментально получить ограничения на параметры этих пучков. Исследовать особенности режимов работы элементов системы при транспортировке пучков высокой интенсивности.

Научная новизна. Впервые в СССР разработана и создана эффективная система аксиальной инжекции пучка в циклотрон на основе магнитных элементов.

На циклотроне У-200 исследовано распределение магнитного поля в аксиальном отверстии магнита, в нижней части которого величина рассеянного поля составляет свыше 2 кГс. Расчетным и экспериментальным путем показана возможность использования его для фокусировки пучка. Эффективность созданной системы при транспортировке пучка от анализирующего магнита до конечного радиуса ускорения в циклотроне составляет 8% без банчировки и 16% с использованием банчера.

Экспериментально исследовано влияние пространственного заряда пучка ионов  ${}^4\text{He}^{1+}$  на коэффициент трансмиссии канала внешней инжекции при интенсивностях до 800 мкА. Показано, что существующий канал может без потерь, вызванных влиянием пространственного заряда, транспортировать пучки до 500 мкА, при увеличении интенсивности коэффициент трансмиссии падает.

Измерено сечение перезарядки ионов  ${}^4\text{He}^{1+}$  в разных газах - воздухе, Ne, Ar, Xe при энергиях от 7 до 16 кэВ. Показано, что

потери пучка ионов в канале внешней инжекции вследствие перезарядки на остаточном газе при рабочем вакууме в канале  $7,9 \cdot 10^{-6}$  Торр составляют не более 10%.

Практическая ценность работы. Решена задача инжекции интенсивного пучка ионов из внешнего источника и ускорения его в циклотроне. Созданная система разработана для транспортировки пучков ионов в диапазоне  $A/Z = 2,8 \div 5$ , ускоряемом на У-200. Проведен комплекс пусконаладочных работ на пучке ионов  ${}^4\text{He}^{1+}$  ( $A/Z = 4$ ).

Установлены требуемые уровни стабилизации систем питания, ионного инжектора, фокусирующих элементов, анализирующего магнита и инжектора.

Исследовано движение пучка ионов через электростатическое зеркало, которое служит для поворота пучка из аксиального канала в медианную плоскость циклотрона. Получены режимы работы инжектора, при которых эффективность поворота составляет более 90%.

Снижены потери пучка в процессе ускорения от первого до конечного радиуса в циклотроне до 16% за счет формирования пучка в канале внешней инжекции и улучшения вакуума в камере циклотрона. Ускорен и выведен пучок ионов  ${}^4\text{He}^{1+}$ , на котором велись физические эксперименты.

Результаты, полученные при разработке и исследовании системы аксиальной инжекции пучка ионов в циклотрон У-200, могут быть полезны при создании подобных систем на циклотронах в научных центрах СССР и других социалистических стран, а также при проектировании новых ускорителей.

Апробация работы. Результаты, лежащие в основе диссертации, докладывались на

- Рабочих совещаниях по системам аксиальной инжекции в циклотроне в Дубне, 1985г. и 1986г.,
- 10 Всесоюзном совещании по ускорителям заряженных частиц в Дубне, 1986г.,
- 11 Всесоюзном совещании по ускорителям заряженных частиц в Дубне, 1988г.,
- Совещании по корреляционным экспериментам на пучках тяжелых ионов в Дрездене (ГДР), 1988г.,
- Семинаре "Плазменная электроника" в Харькове, 1988 г.

Публикации. Результаты исследований, составившие основу диссертации, опубликованы в 8 работах.

На защиту выносятся следующие положения и результаты:

1. Обоснование выбора структуры системы внешней инжекции пучка в циклотрон Лаборатории ядерных реакций ОИЯИ на основе магнитных элементов, с использованием для фокусировки пучка рассеянного поля в аксиальном канале магнита циклотрона.
2. Алгоритм и методика расчета системы аксиальной инжекции пучка в циклотрон с учетом рассеянного поля в аксиальном отверстии магнита и разработка на их основе системы внешней инжекции пучка в У-200.
3. Выбор оптимальных условий транспортировки пучка ионов по каналу внешней инжекции пучка.
4. Получение условий эффективного поворота пучка из вертикального канала в медианную плоскость (более 90%) с помощью инфлектора - электростатического зеркала.
5. Результаты экспериментальных исследований влияния пространственного заряда пучка на коэффициент трансмиссии канала при интенсивности пучка до 800 мкА.
6. Экспериментальные результаты, показывающие снижение потерь пучка в процессе ускорения в циклотроне при использовании внешней инжекции пучка.

Структура и объем диссертации. Диссертация состоит из введения, трех глав, раздела с основными выводами и результатами исследований, заключения и списка литературы (61 наименование). Общий объем диссертации составляет 98 страниц, включая 50 рисунков.

#### СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении обосновывается актуальность разработки и проведенных исследований, рассматриваются основные проблемы и особенности создания системы аксиальной инжекции пучка в циклотрон тяжелых ионов.

В первой главе анализируются элементы системы аксиальной инжекции пучка в циклотрон, сравниваются характеристики ионных источ-

ников, которые могут быть использованы в разрабатываемой системе.

Рассмотрены принципы выбора энергии инжекции. Исходя из требований к системе транспортировки, определяемых эмиттансом ионного пучка, который должен быть согласован с аксептансом системы, рассмотрены свойства разных типов фокусирующих элементов: магнитных линз - соленоидов, магнитных квадрупольных линз, электростатических линз, электростатических квадрупольных линз.

Сравниваются свойства анализируемых систем, выполненных на базе двух  $45^\circ$  магнитов и одного  $90^\circ$  магнита.

Дается методика расчета четырех типов инфлекторов - гиперболического, параболического, спирального и электростатического зеркал, сравниваются их свойства. Приводится также способ расчета банчера.

В конце главы сформулирована задача создания и исследования системы аксиальной инжекции пучка в циклотрон У-200.

Вторая глава посвящена расчету и описанию технических решений узлов системы аксиальной инжекции пучка в циклотрон У-200. Сформулированы основные требования и исходные данные, на основании которых по программе "TRANSPORT" проведен расчет системы, с учетом рассеянного магнитного поля в аксиальном отверстии магнита, которое в нижней половине канала составляет величину свыше 2 кГс (рис. 1).

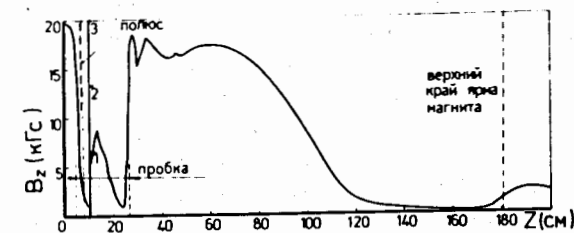


Рис. 1. Распределение магнитного поля в аксиальном отверстии магнита в рабочем режиме (ток основной обмотки 1250 А).

Показана возможность использования его для фокусировки пучка. Математически проанализирована трансформация эмиттанса пучка в процессе транспортировки. Проведена оптимизация тракта с точки зрения возрастания эмиттанса из-за смешивания подпространств  $(x, P_x)$  и  $(y, P_y)$  при движении пучка по каналу внешней инжекции, включая инфлектор - электростатическое зеркало. Минимальный коэффициент возрастания составляет 1,5 для  $(x, P_x)$  и 1,2 для  $(y, P_y)$ . Огибающая пучка при оптимальных условиях транспортировки приведена на рис. 2.

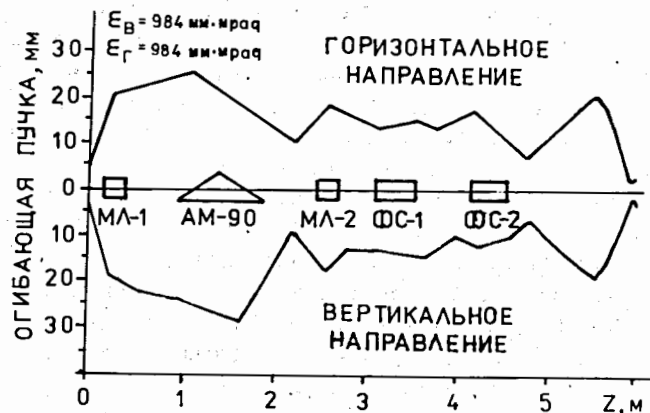


Рис. 2. Огибающая пучка при движении ионов от источника до входа в пулер дуанта.

На основании расчетов динамики движения пучка разработана конструкция системы аксиальной инъекции пучка в циклотрон У-200, представленная на рис. 3. В качестве фокусирующих элементов использованы магнитные линзы (МЛ-1, МЛ-2) и фокусирующие соленоиды (ФС-1, ФС-2). Сепарацию пучка ионов по зарядам в системе аксиальной инъекции осуществляет магнит АМ-90, который одновременно служит для поворота основного пучка из горизонтальной плоскости в вертикальный канал. Анализирующий магнит С-образного типа имеет скошенные торцы под углом  $26,5^\circ$  для осуществления фокусировки пучка в плоскости поворота магнита.

Перевод пучка из аксиального канала в медианную плоскость циклотрона осуществляется электростатическим зеркалом.

В диссертации приводятся схемы конструкций всех элементов системы аксиальной инъекции и их параметры.

Разработанная система аксиальной инъекции пучка способна транспортировать пучки с эмиттансом до 1000 мм.мрад.

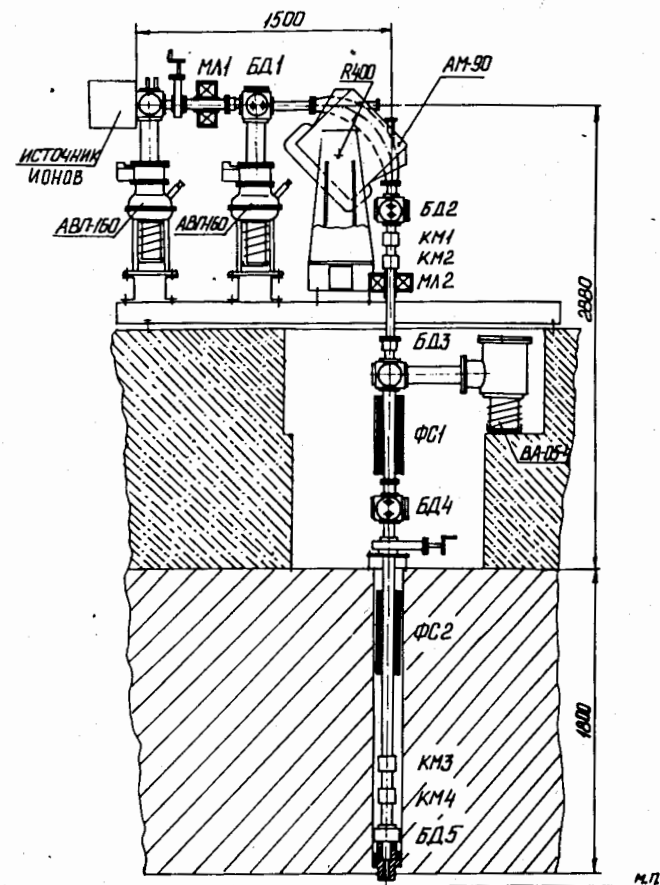


Рис. 3. Конструкция канала аксиальной инъекции пучка в циклотрон У-200.

В третьей главе приводятся результаты исследований оптимальных условий транспортировки пучка по каналу внешней инъекции, проведенных на пучке  ${}^4\text{He}^{1+}$ . Экспериментально установлена необходимая стабильность агрегатов питания элементов системы. Исследовано движение пучка через инфлектор, выбраны условия эффективной транспортировки. Профиль пучка и траектория его движения через инфлектор, снятые с помощью токочувствительной бумаги, приводятся на рис. 4.

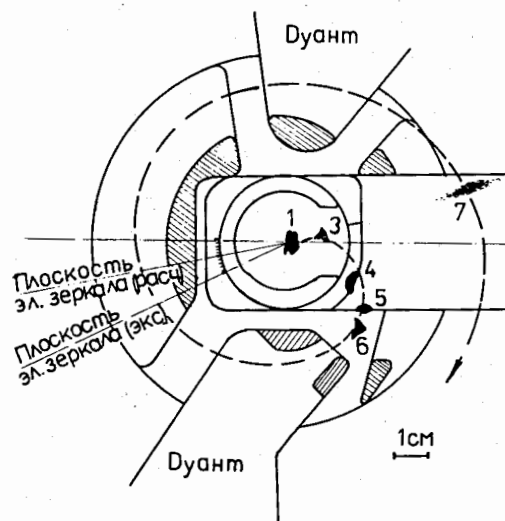


Рис. 4. Траектория движения пучка в центральной области циклотрона. В точках 1-7 даны профили пучка, измеренные в плоскости, перпендикулярной направлению движения.

Токи пучка ионов по каналу аксиальной инъекции, а также в процессе ускорения даны в таблице 1.

Таблица 1

	БД-1	БД-2	БД-4	R=20см	R=80см
I (мкА)	23	20	18	1,9	1,6

БД - блок диагностики, R - радиус ускорения.

Исследованы потери пучка  ${}^4\text{He}^{1+}$  вследствие перезарядки на остаточном газе в канале внешней инъекции, показано, что при рабочем вакууме

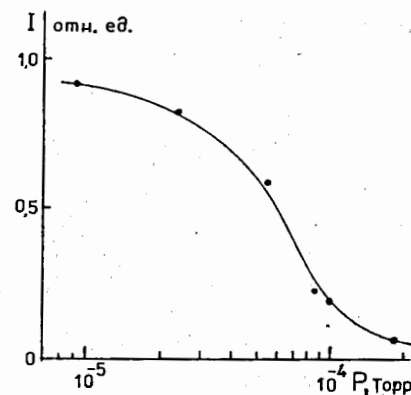
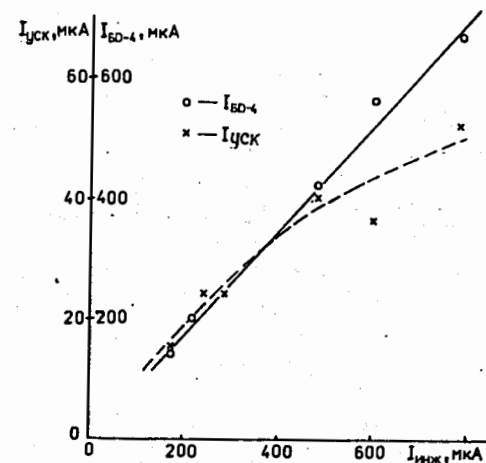


Рис. 5. Зависимость тока пучка ионов  ${}^4\text{He}^{1+}$  на входе в инфлектор от давления в ионопроводе при  $U_{\text{инж}} = 15$  кВ.

экспериментально исследовано влияние пространственного заряда в канале аксиальной инъекции пучка. Показано, что существующая система способна транспортировать пучки с интенсивностью до 500 мкА без изменения

эффективности. При дальнейшем повышении тока инжектируемого пучка коэффициент трансмиссии падает (рис. 6).



в ионопроводе  $7-9 \cdot 10^{-6}$  Torr теряется не более 10% пучка (рис. 5).

Использование внешнего ионного источника позволило улучшить рабочий вакуум в камере циклотрона. Давление во всем ускорительном зазоре снизилось до  $1 \cdot 10^{-6}$  Torr. При таком давлении суммарные фазовые и вакуумные потери не превышают 16% при ускорении от R = 15 см до R = 80 см при напряжении на дуантах 60 кВ.

Экспериментально исследовано влияние пространственного заряда в канале аксиальной инъекции пучка. Показано, что существующая система способна транспортировать пучки с интенсивностью до 500 мкА без изменения

Использование в системе аксиальной инъекции пучка в У-200 двухзазорного банчера, работающего на первой гармонике ВЧ-напряжения, дало увеличение интенсивности пучка в два раза при токе ускоренного пучка без банчировки 0,75 мкА.

Рис. 6. Зависимость тока ускоренного пучка от тока инжектируемого пучка ионов  ${}^4\text{He}^{1+}$  при оптимальных условиях транспортировки.

## ОСНОВНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ РАБОТЫ

Однако при увеличении тока пучка в несколько раз эффект банчировки не наблюдался, что связано с влиянием пространственного заряда в продольном направлении.

Параметры системы аксиальной инжекции пучка в циклотрон У-200 ЛЯР в сравнении с зарубежными системами даны в таблице 2.

Таблица 2

Центр	Пучок	Энергия инжекции, кВ	Элементы аксиального канала	Тип инфлектора	Банчер	Эффективность транспортировки, %
Berkeley	тяжелые ионы	10	SL	зеркало	+	17
CYCLONE	"	15±18	ML	спиральный	+	5±15
GANIL	"	15±18	SL	гиперболический	+	20 3.5
Grenoble	"	8±20	ML	спиральный	+	15
Karlsruhe	"	10	EQ+EL	гиперболический	+	5±8
Julich	"	--	SL+ML	гиперболический	+	--
Groningen	"	20	SL	гиперболический	+	4
ЛЯР ОИЯИ	He <sup>+</sup>	15	SL+ML	зеркало	- +	8 16

ML - магнитные линзы

SL - соленоиды

EL - электростатические линзы

EQ - электростатические квадрупольные линзы.

В разделе ОСНОВНЫЕ ВЫВОДЫ И РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЙ дан краткий анализ результатов, полученных в процессе работы.

В заклучении рассматриваются возможные пути совершенствования созданной системы аксиальной инжекции пучка в циклотроне У-200, а также перспективы использования подобных систем в других ускорителях ЛЯР.

Основные результаты работы, изложенные в диссертации, заключаются в следующем:

1. Впервые в СССР разработана и создана эффективная система аксиальной инжекции пучка в циклотрон на основе магнитных элементов с использованием для фокусировки пучка в вертикальном канале рассеянного поля магнита циклотрона. Решена задача инжекции интенсивного пучка ионов из внешнего источника и ускорения его в циклотроне.

Система разработана для транспортировки ионов в диапазоне  $A/Z = 2,8 \pm 5$ , ускоряемых на У-200. Проведен комплекс пусконаладочных работ на пучке ионов  ${}^4\text{He}^{1+}$  ( $A/Z = 4$ ), которые выбраны в качестве тестовой частицы.

2. Разработаны алгоритм и методика расчета системы аксиальной инжекции пучка с учетом рассеянного поля в вертикальном канале магнита циклотрона. Показана возможность использования его для фокусировки пучка в нижней части канала, где аксиальная компонента рассеянного поля имеет величину свыше 2 кГс.

3. Экспериментально получена максимальная эффективность трансмиссии пучка от анализирующего магнита до конечного радиуса ускорения в циклотроне 8% без банчировки и 16% с использованием банчера.

4. Исследованы условия транспортировки пучка ионов по каналу внешней инжекции, установлены требуемые уровни стабилизации систем питания, которые составили для напряжения инжекции  $1 \cdot 10^{-3}$ , напряжения инфлектора  $3 \cdot 10^{-2}$ , тока магнитных линз  $3 \cdot 10^{-3}$  и  $4 \cdot 10^{-2}$ , анализирующего магнита  $1 \cdot 10^{-3}$ .

5. Проведено исследование условий инфлексии пучка ионов из аксиального канала в медианную плоскость циклотрона с помощью электростатического зеркала. Получены режимы работы инфлектора, при которых эффективность перевода пучка из вертикального канала до входа в пулер составляет более 90%.

6. Экспериментально исследовано влияние пространственного заряда пучка ионов  ${}^4\text{He}^{1+}$  на коэффициент трансмиссии канала внешней инжекции при интенсивностях до 800 мкА. Показано, что существующий канал может без потерь, вызванных влиянием пространственного заряда, транспортировать пучки до 500 мкА. При больших интенсивностях коэффициент трансмиссии падает.

7. Исследованы потери пучка ионов в канале внешней инжекции вследствие перезарядки на остаточном газе. Измерено сечение перезарядки ионов  ${}^4\text{He}^{1+}$  в разных газах: воздухе, He, Ar, Xe при энергиях от 7 до 16 кэВ. Показано, что при рабочем вакууме в канале  $7,9 \cdot 10^{-6}$  Торр теряется не более 10% пучка.

8. Потери пучка в процессе ускорения от первого до конечного радиуса в циклотроне снижены до 16% за счет формирования пучка в канале внешней инжекции ионов и улучшения вакуума в камере циклотрона. Ускорен и выведен пучок ионов  ${}^4\text{He}^{1+}$ , на котором велись физические эксперименты.

9. В ходе проведенных исследований получены данные, необходимые для разработки канала внешней инжекции пучка в циклотроны У-400 и У-400М. Полученные результаты могут быть полезны при создании подобных систем на циклотронах У-120 и У-150 в научных центрах СССР и других социалистических стран, а также при проектировании новых ускорителей.

Результаты диссертации опубликованы в следующих работах:

1. Б. Н. Гикал, Г. Г. Гульбекия, В. Б. Кутнер, Р. Ц. Оганесян. Возможности и пути развития ускорителей ЛЯР. - В кн.: Совещание по корреляционным экспериментам на пучках тяжелых ионов, Дрезден (ГДР), 1988, Сборник аннотаций, с. 7-10 (Объед. ин-т ядерн. исслед.: Д7-88-299).
2. 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. Чутреев. Система аксиальной инжекции ионов в циклотрон У-200. - В кн.: 10 Всесоюзное совещание по ускорителям заряженных частиц, Дубна, 1986, т. 2, с. 143-146 (Объед. ин-т ядерн. исслед.: Д9-87-105).
3. В. В. Бехтерев, Ю. Б. Виноградов, Б. Н. Гикал, Г. Г. Гульбекия, А. А. Ефремов, А. И. Иваненко, Д. И. Калчев, И. В. Колесов, В. Б. Кутнер, В. Н. Мельников, Р. Ц. Оганесян, Ю. П. Третьяков, В. А. Чутреев. Создание и запуск системы аксиальной инжекции ионов в циклотрон У-200. Дубна, 1987. - 14 с. (Сообщение/Объед. ин-т ядерн. исслед.: 9-87-379).
4. Ю. Б. Виноградов, Б. Н. Гикал, Г. Г. Гульбекия, Д. И. Калчев. Расчет системы аксиальной инжекции ионов в изохронный циклотрон У-200. Дубна, 1987. - 10 с. (Сообщение/Объед. ин-т ядерн. исслед.: 9-87-869).

5. Ю. Б. Виноградов, Б. Н. Гикал, Г. Г. Гульбекия, А. А. Ефремов, Д. Калчев, В. Б. Кутнер. Транспортировка пучка ионов  ${}^4\text{He}^{1+}$  в системе аксиальной инжекции циклотрона У-200. Дубна, 1988. - 9 с. (Сообщение/Объед. ин-т ядерн. исслед.: Р9-88-20).
6. Ю. Б. Виноградов, Б. Н. Гикал, Г. Г. Гульбекия, А. А. Ефремов, Д. Калчев, В. Б. Кутнер. Транспортировка пучка ионов  ${}^4\text{He}^{1+}$  в системе аксиальной инжекции циклотрона У-200. - В кн.: Всесоюзный семинар "Плазменная электроника", Харьков, ХФТИ АН УССР, 1988, Тезисы докладов, с. 152.
7. С. Л. Богомолов, Ю. Б. Виноградов, Б. Н. Гикал, Г. Г. Гульбекия, А. А. Ефремов, Д. И. Калчев, И. В. Колесов, В. Б. Кутнер, Р. Ц. Оганесян. Исследование системы аксиальной инжекции ионов в циклотрон У-200. Дубна, 1988. - 11 с. (Препринт/Объед. ин-т ядерн. исслед.: Р9-88-641).
8. С. Л. Богомолов, Ю. Б. Виноградов, Б. Н. Гикал, Г. Г. Гульбекия, А. А. Ефремов, Д. И. Калчев, И. В. Колесов, В. Б. Кутнер, Р. Ц. Оганесян. Исследование системы аксиальной инжекции ионов в циклотрон У-200. - В кн.: 11 Всесоюзное совещание по ускорителям заряженных частиц. Дубна, 1988. Сборник аннотаций, с. 36-37 (Объед. ин-т ядерн. исслед.: Р9-88-738).

Цитируемая литература:

- а/ Oganessian Yu. Ts., Lazarev Yu. A. - In: Treatise on heavy Ion Science. New York, London: Plenum Press, 1984, v. 4, p. 3 - 251.
- б/ Г. Н. Флеров. - В кн.: Труды Международной школы-семинара по физике тяжелых ионов, Дубна, ОИЯИ, Д7-83-644, 1983, с. 9-20.
- в/ D. Comar. - In: Proc. of 9th. Int. Conf. on Cyclotrons and Their Application, Caen, France, 1981, p. 645-652.
- г/ E. Bargon, L. Bex, M. P. Bourgarel. Rapport GANIL, A 86-03, 1988, p. 6.
- д/ G. H. Ryckewaert. - In: Proc. of 10th. Int. Conf. on Cyclotrons and Their Application, East Lansing, Michigan, USA, 1984, p. 126-129.
- е/ D. J. Clark and C. M. Lyneis. - In: Proc. of 11th. Int. Conf. on Cyclotrons and Their Application, Tokyo, Japan, 1987, p. 449-453.
- ж/ V. Bechtold, L. Friedrich and F. Schulz. - In: Proc. of 10th. Int. Conf. on Cyclotrons and Their Application, East Lansing, 1984, p. 118-121.
- з/ J. M. Loiseaux and M. Fruneau. - In: Proc. of 10th. Int. Conf. on Cyclotrons and Their Application, East Lansing, 1984, p. 188-194.

Рукопись поступила в издательский отдел  
26 июня 1989 года.