

9-99-278

На правах рукописи
УДК 621.384.633.5

Э - 53

ЭЛЬ-ШАЗЛИ
Мохамед Нашаат Мохамед

**СИСТЕМА АКСИАЛЬНОЙ ИНЖЕКЦИИ
ЦИКЛОТРОНА У-400М**

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

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

Работа выполнена в Лаборатории ядерных реакций им. Г.Н.Флерова
Объединенного института ядерных исследований

Научный руководитель
доктор технических наук
старший научный сотрудник

Р.Ц.Оганесян

Официальные оппоненты:

доктор физико-математических наук

С.Б. Ворожцов

кандидат физико-математических наук

С.И. Тютюнников

Ведущая научная организация:

Российский научный центр "Курчатовский институт"
Институт общей и ядерной физики, г. Москва

Защита диссертации состоится " " 1999 г. в " " часов
на заседании специализированного совета Д-047.01.06 при Лаборатории
физики частиц Объединенного института ядерных исследований,
г. Дубна Московской области.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке ОИЯИ.

Автореферат разослан " " 1999 г.

Ученый секретарь
специализированного совета

кандидат физико-математических
наук

В.Г. Кривохижин

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность проблемы.

Развитие атомной и ядерной физики, а также прикладных областей науки и техники для решения как фундаментальных, так и важнейших задач народного хозяйства, требует разработки и совершенствования методов и техники получения высокоинтенсивных пучков ускоренных ионов. Для этой цели находят эффективное применение циклотроны с различными типами ионных источников, определяющих как диапазон зарядового состояния, так и интенсивность пучка заряженных частиц. Это источники как традиционного типа - дуговой источник с подогревным катодом (PIG) внутреннего расположения в камере ускорителя, так и все более распространенные в последнее время источники внешнего расположения: ECR, MULTICUSP, лазерный (LPIS) и электронно-лучевой (EBIS). Однако, использование источников внешнего расположения возможно только благодаря реализации системы внешней инжекции пучка ионов в камеру ускорителя.

Использование системы внешней инжекции для циклотронов тяжелых ионов дает возможность установки как одного, так и одновременно нескольких типов источников, обеспечивающих необходимый диапазон ионов предельной интенсивности. Поэтому большинство современных циклотронов, и работающих, и вновь проектируемых, в качестве главного компонента включают эту систему. Система аксиальной инжекции как наиболее оптимальная для компактных циклотронов разновидность внешней инжекции реализована в научных центрах многих стран: Лувен (Бельгия), GANIL (Франция), Карлсруэ (Германия), Беркли (США) и др. Однако, проблемы совершенствования системы аксиальной инжекции с целью достижения максимальной эффективности остаются по-прежнему актуальными. Очевидно, что задачу постоянной модернизации ускорительной базы Лаборатории ядерных реакций трудно переоценить для решения самых актуальных фундаментальных и прикладных задач. Поэтому в связи с реконструкцией ускорителя У-300 Лаборатории ядерных реакций в модернизированный изохронный циклотрон У-400М¹ возникла и чрезвычайно актуальная задача обеспечения качественно нового циклотрона высокоэффективной системой аксиальной инжекции. Возможность

¹ Gulbekian G. et al., 13th Inter. Conf. on Cyclotrons and Their Application, Vancouver, 1992, p. 11

Объединенный институт
ядерных исследований
БИБЛИОТЕКА

использования благодаря аксиальной инжекции высокоинтенсивного ЭЦР² источника с высоко зарядными состояниями ионов, недостижимыми внутренним PIG источником, позволит ускорять на циклотроне У400М ионы в широком диапазоне масс и энергий (для отношения массы к заряду $A/Z=2+10$): от ионов легких, начиная с дейтерия, до тяжелых, включая ^{238}U , с энергией, изменяющейся от 20 до 100 МэВ/нуклон.

Цель работы.

Разработка системы аксиальной инжекции циклотрона У-400М, способной эффективно инжектировать максимально интенсивный пучок ионов в широком диапазоне отношения массы к заряду ($A/Z = 2 \div 10$) из источника ЭЦР в центральную область циклотрона. Проведение расчетов и выбор элементов системы аксиальной инжекции и оптимизация ее параметров, теоретическое и экспериментальное исследование динамики пучка в начальной области ускорения.

Научная новизна.

1. Создана система аксиальной инжекции циклотрона У-400М, способная эффективно инжектировать интенсивный пучок ионов в широком диапазоне отношения массы к заряду ($A/Z = 2 \div 10$) из источника ЭЦР в центральную область циклотрона.
2. Проведены исследования транспортировки пучков ионов во всем диапазоне отношения массы к заряду от источника ЭЦР до центральной области циклотрона У-400М. На основе этих расчетов созданы ионно-оптические элементы транспорта пучка, которые показали высокую эффективность.
3. Выполнены исследования во всем диапазоне $A/Z = 2 \div 10$ начального движения ионов, ускоренных на различных гармониках В.Ч. потенциала (вторая, третья и четвертая гармоники). На основе анализа различных типов инфлекторов (спиральный, гиперболический, параболический и электростатическое зеркало) показано, что электростатическое зеркало позволяет при относительно простой технической реализации осуществить эффективное центрирование пучка и его устойчивость в широком диапазоне A/Z .
4. Для системы аксиальной инжекции пучка циклотрона У-400М проведен анализ использования различных типов банчеров (синусоидального и линейного с одним и двумя зазорами, работающих на различных гармониках ВЧ потенциала). Согласно оптимизационному расчету выбран синусоидальный банчер, работающий на основной частоте, установленный на расстоянии одного метра от центра циклотрона. Экспериментально подтверждено расчетное

увеличение интенсивности ускоренного пучка в 3 раза благодаря банчеру, установленному в канале аксиальной инжекции.

5. На основе разработанной автором модели расчёта вакуумных систем с различными проводимостями исследовано распределение давления вдоль линии транспорта пучков ионов. Эти исследования позволили оптимизировать расположение элементов вакуумной откачки, что, в конечном итоге, дало возможность обеспечить по трассе аксиальной инжекции необходимую эффективность трансмиссии пучков высокозарядных тяжелых ионов.

Практическая ценность работы.

1. Проведенная работа по исследованию, оптимизации и, в конечном счете, созданию системы аксиальной инжекции циклотрона У-400М позволила существенно расширить диапазон ускоряемых ионов в область значительно более тяжелых ионов благодаря возможности использования современного ЭЦР источника DECRIS-14-2. Это открывает новые перспективы для проведения широкого круга фундаментальных и прикладных исследований.
2. Созданный для оптимизационных расчетов пакет компьютерных программ может быть использован при разработке и исследовании подобных систем.

Апробация работы.

Результаты исследований, положенных в основу диссертации, докладывались на Международных и Национальных конференциях, в том числе:

- Egyptian-Russian School¹ and Workshop on Cyclotrons and their Applications, Cairo, Egypt, 15-19 February 1995;
- Workshop on the Magnetic Field and Ion Beam Dynamics of the VINCY Cyclotron, March 11-15, 1996, Dubna, Russia;
- Egyptian-Russian School and Workshop on Cyclotrons and their Applications, Cairo, Egypt, 15-19 March 1997;
- XVII Particle Accelerator Conference, Vancouver, Canada, 12-16 May 1997;
- VI European Particle Accelerator Conference 98, Stockholm, Sweden, 22-26 June 1998
- XV International Conference on Cyclotrons and their Applications, Ceau. France, 14-19 June 1998.

Публикации. Результаты исследований, составившие основу диссертации, опубликованы в 5 работах.

Структура и объем диссертации. Диссертация состоит из введения, трех глав, раздела с основными выводами и результатами исследований, заключения

² Efremov A. et al., Rev. Sci. Inst., Vol. 65 (4), 1994, p.1084.

и списка литературы из 70 наименований. Общий объем диссертации составляет 110 страниц, включая 50 рисунков.

На защиту выносятся следующие положения и результаты:

1. Обоснование выбора принципиальной схемы аксиальной инжекции для циклотрона У-400М.
2. Результаты оптимизации транспортировки пучка ионов в тракте аксиальной инжекции во всем диапазоне отношений $A/Z = 2 \div 10$.
3. Выбор элементов ионно-оптической системы канала аксиальной инжекции.
4. Результаты моделирования вакуумной системы тракта аксиальной инжекции.
5. Обоснование выбора типа инфлектора и результаты его оптимизации для эффективного и устойчивого движения пучка в центральной области циклотрона У-400М.

СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении обосновывается актуальность проводимых исследований на основе обзора реализованных и проектируемых систем внешней инжекции, рассматриваются основные проблемы и особенности создания системы аксиальной инжекции для циклотронов тяжелых ионов, формулируются цели и задачи диссертации, приводится краткое содержание диссертации.

В первой главе проводится сравнительный анализ принципиальных схем аксиальной инжекции и обосновывается выбор оптимальной схемы с конкретизацией основных элементов и главных параметров.

Представлены результаты расчетов по оптимизации ионно-оптической системы с помощью программы TRANSPORT³. Для рассмотрения всего диапазона отношений массы к заряду для ускоряемых на У-400М ионов в расчетах динамики пучка принимались основные начальные параметры пучков ионов из ЭЦП источника, указанные в таблице 1.

Таблица 1. Основные начальные параметры пучков ионов из ЭЦП источника для оптимизации транспортировки.

A/Z	V _{inj} (kV)	B ₀ (T)	P (Gev/c)	ε _x (π·mm·mrad)	ε _y (π·mm·mrad)
2	25	1.575	9.65×10 ⁻³	150	150
5	16	1.995	1.22×10 ⁻²	150	150
10	8	1.995	1.22×10 ⁻²	150	150

В расчетах использовались данные измерений рассеянного магнитного поля в вертикальном канале У-400М, выполненных для разных уровней возбуждения электромагнита циклотрона.

Рассмотрены условия наиболее эффективной сепарации пучка по отношению A/Z ионов посредством соленоидальной линзы и магнита (90°).

На основе оптимизационных расчетов динамики пучка выбрана предварительная схема расстановки ионно-оптических элементов. Она включает в себя соленоидальную линзу (короткую); магнит, выполняющий функции поворотного (на 90° из горизонтальной в вертикальную плоскость) и анализирующего; четыре корректирующих магнита и три фокусирующих соленоида.

Исследовано влияние пространственного заряда на поперечные размеры пучка при транспортировке ионов в канале аксиальной инжекции. Результаты исследований показывают, что влияние пространственного заряда незначительно, если интенсивность тяжелых ионов не превышает 100 μA. Оптимальная огибающая для условий A/Z=2 и интенсивности равной I=100 μA в расчетах, учитывающих пространственный заряд представлена на рис. 1. По итогам анализа принята окончательная схема расстановки элементов ионной оптики по трассе аксиальной инжекции.

Разработка геометрической структуры каждого элемента для получения необходимых магнитных характеристик выполнена на основе расчетов по программе POISSON⁴.

Выполнен тепловой расчет для системы водоохлаждения на основе разработанной компьютерной программы.

Проведен анализ системы банчировки пучка, позволяющей значительно увеличивать интенсивность ионного пучка за счет формирования из непрерывного пучка сгустков (банчей) и согласования пучка с продольным фазовым акцептансом ускорителя. Выполнен обзор различных типов систем^{5,6}. Разработана компьютерная программа для расчета и оптимизации системы банчировки, исследующая в качестве определяющих параметров амплитуду прикладываемого напряжения, расстояние от ускоряющего зазора банчера до медианной плоскости циклотрона У-400М и продольный фазовый акцептанс ускорителя. Оптимизация проводилась для синусоидального банчера; системы двух синусоидальных банчеров; системы линейного и синусоидального банчеров.

В результате был выбран синусоидальный банчер, расположенный на расстоянии 1 м от медианной плоскости циклотрона У-400М, как достаточно

⁴ <http://www.lanl.gov>

⁵ H.w. Lefvre, et. al., Rev. Sci. Inst. 33 (1962) 1231.

⁶ S.T. Ivanov, et. al., Nucl. Inst. and Meth. A262(1987)179

³ Carey "THIRD ORDER TRANSPORT, A Computer Program for Designing Charged Particle Beams Transport Systems" SLAC-R-95-462, (1995).

эффективный (увеличивающий интенсивность пучка в 3 раза) и относительно простой в реализации.

$$A/Z=2$$

Without Buncher and with space charge effect

$$I=100 \mu A$$

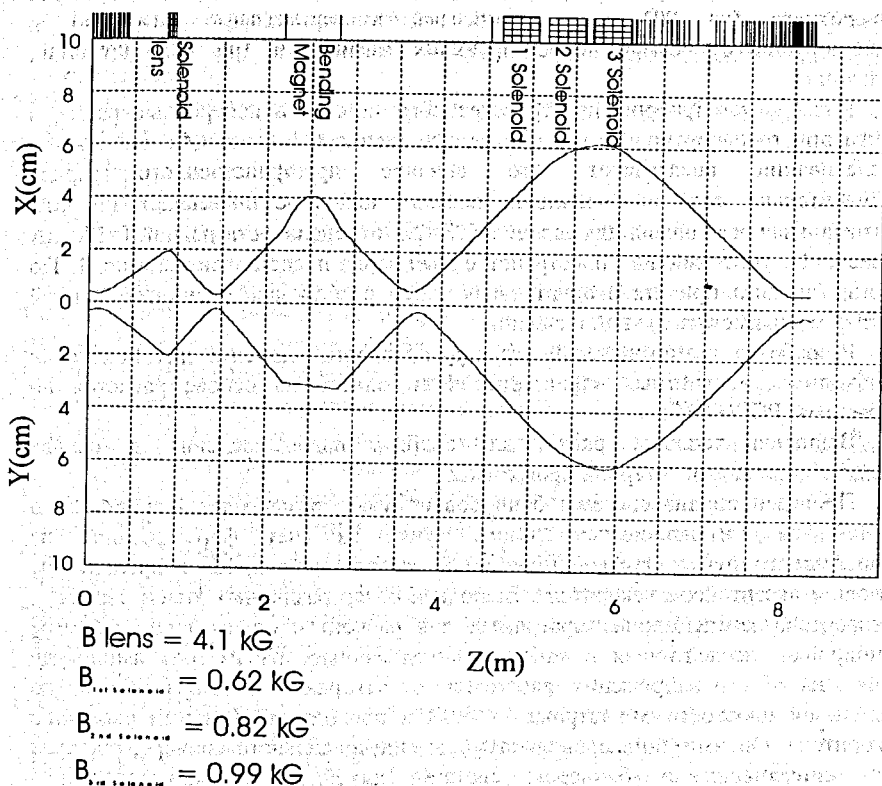


Рис. 1. Огибающая пучка ионов вдоль канала аксиальной инжекции для условий $A/Z=2$ и интенсивности равной $I=100 \mu A$ в расчете, учитывающем пространственный заряд.

Вторая глава представляет методику моделирования потерь пучка, обусловленных перезарядкой ионов на остаточном газе в тракте транспортировки пучка аксиальной инжекции. Исследованы основные параметры, определяющие потери пучка. Эффективность трансмиссии ионов зависит от сечения перезарядки иона на остаточном газе, давления в канале транспортировки и от протяженности транспортировки пучка. Сечение перезарядки иона зависит от потенциала ионизации газа, изменяется в прямой пропорциональной зависимости от заряда инжектируемого иона и практически не зависит от энергии ионов в рассматриваемом интервале энергий инжекции (до 25 кэВ/нуклон)⁷. Особое внимание уделено исследованию распределения давления в протяженных вакуумных камерах, поскольку давление остаточного газа является определяющим параметром для трансмиссии ионов в ионопроводе аксиальной инжекции.

Описан алгоритм моделирующей компьютерной программы, разработанной для расчета эффективности трансмиссии ионов на основе численного моделирования распределения давления остаточного газа. Исследовались зависимости распределения давления как от геометрических размеров протяженных вакуумных камер, так и от основных параметров вакуумной системы: скорости откачки насосов, интервала между насосами и различными газовыми нагрузками (статическими и динамическими).

Эффективность трансмиссии пучка ионов в зависимости от среднего давления в канале аксиальной инжекции для различных зарядовых состояний ионов представлена на рис.2.

Проведены эксперименты по измерению давления в различных точках канала аксиальной инжекции. Сравнение измеренных точек с расчетным распределением давления дало хорошее совпадение экспериментальных результатов с численным моделированием, что показано на рис.3.

В результате оптимизации параметров элементов системы аксиальной инжекции циклотрона У-400М была принята окончательная схема, на основе которой разработана конструкция аксиальной инжекции, показанная на рис. 4.

⁷ A. Muller and E. Salzborn, Phys. Lett., 62A, p.391, 1977

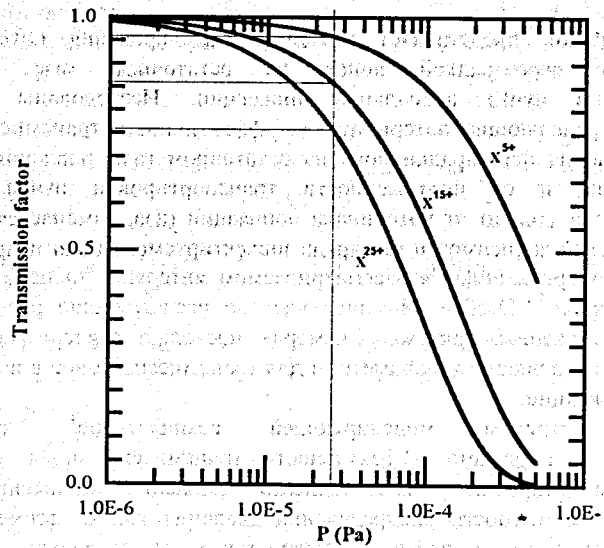


Рис. 2. Эффективность трансмиссии ионов в канале аксиальной инжекции для различных зарядовых состояний ионов.

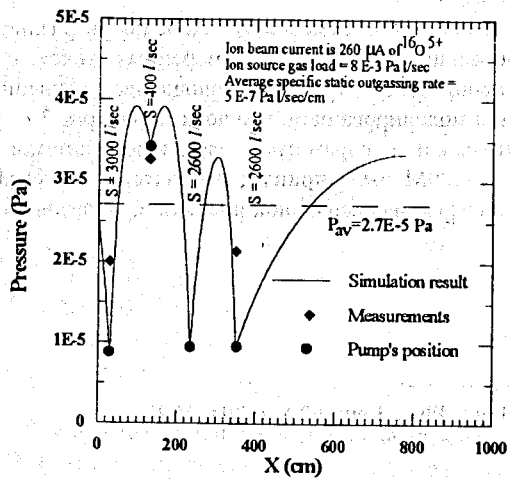


Рис. 3. Распределение давления в ионопроводе.

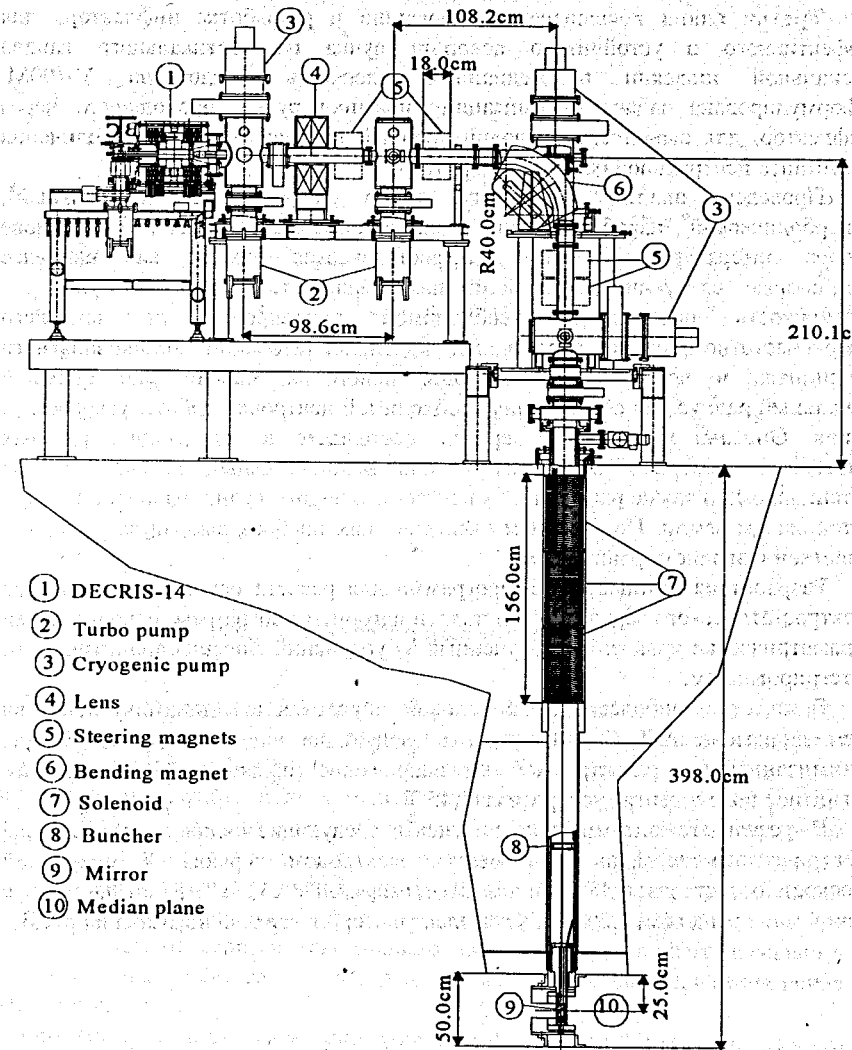


Рис. 4. Система аксиальной инжекции циклотрона У400М.

Третья глава посвящена исследованию и разработке инфлектора для эффективного и устойчивого поворота пучка из вертикального канала аксиальной инжекции в медианную плоскость циклотрона У-400М. Сформулирована задача оптимизации динамики пучка, проходящего через инфлектор, для выполнения условий хорошей центровки орбит и увеличения аксептанса центральной области ускорителя.

Проведен анализ различных типов инфлекторов (спиральный⁸, гиперболический⁹, параболический⁸ и электростатическое зеркало¹⁰) на основе обзора литературы. Выбрано электростатическое зеркало как наиболее отвечающее следующим условиям: наименьшие геометрические размеры, возможность обеспечения необходимой экранировки от внешнего высокочастотного поля, обеспечения надежной изоляции высоковольтного потенциала и возможность инжекции ионов на максимально большой начальный радиус для обеспечения необходимой центровки орбиты ускоряемых ионов. Описана конструкция зеркала, состоящего из следующих главных элементов: электрода, находящегося под положительным высоковольтным потенциалом; а также решетки и охлаждаемого водой экрана, находящегося под потенциалом земли. По условиям электрических пробоев выбран зазор между решеткой и экраном, равный 7 мм.

Разработана компьютерная программа для расчета основных параметров электростатического зеркала. Представлен алгоритм программы, использующей параметрические уравнения, полученные из уравнений Лоренца аналитическим интегрированием.

В качестве наиболее жестких условий, определяющих динамику ионов во всем диапазоне A/Z ($2 \div 10$) приняты следующие входные параметры для оптимизационного расчета: $A/Z = 2$, напряжение инжекции 25 кВ, среднее магнитное поле в центре ускорителя 1,45 Т.

В результате оптимизации получены следующие основные параметры электрического зеркала: угол между электродом зеркала и медианной плоскостью составляет 47° ; максимальное напряжение 23,6 кВ; расстояние между электродом и решеткой 9,2 мм. Схема электрического зеркала показана на рис.5.

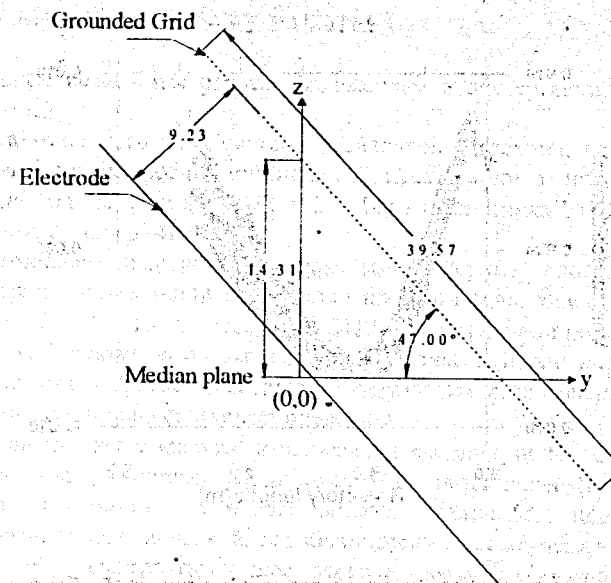


Рис. 5. Схема электрического зеркала.

Исследована динамика пучка в центральной области циклотрона У-400М на основе разработанной компьютерной программы. Описан алгоритм программы, опирающийся в своем построении на считывание и анализ карты измеренного магнитного поля в медианной плоскости циклотрона на разных уровнях возбуждения обмотки электромагнита ускорителя. Высокочастотное электрическое поле в ускоряющем зазоре в расчете принималось в форме распределения Гаусса. Уравнения для траектории ионов получены численным интегрированием уравнений Лоренца по методу Рунге-Кутты. Особое внимание уделено геометрии первого ускоряющего зазора, определяющего начальные параметры пучка, очень важные для дальнейшего устойчивого движения ионов в процессе ускорения.

Оптимизированные траектории движения пяти ионов с шагом 10° из всего диапазона фаз захвата высокочастотного электрического ускоряющего поля (40°) при напряжении на дуантах от 140 до 170 кВ в двух взаимно-перпендикулярных плоскостях представлены на рис.6 и рис.7.

В итоге оптимизационного расчета получены геометрические параметры центральной области циклотрона У-400М, на основе которых разработана ее конструкция.

⁸ J.L. Belmont, et. al., IEEE Trans. Nucl. Sci. Ns-13 No. 4, 1966, P. 191

⁹ R.W. Myller, Nuc. Ins. and Meth., 54, 1967, p. 29.

¹⁰ G. Bellomo et al., Nuc. Ins. and Meth., 206, 1983, p. 19.

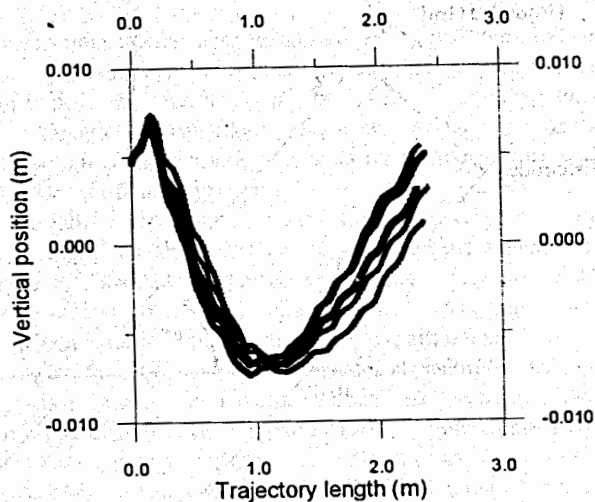


Рис. 6. Вертикальное движение ионов в центральной области.

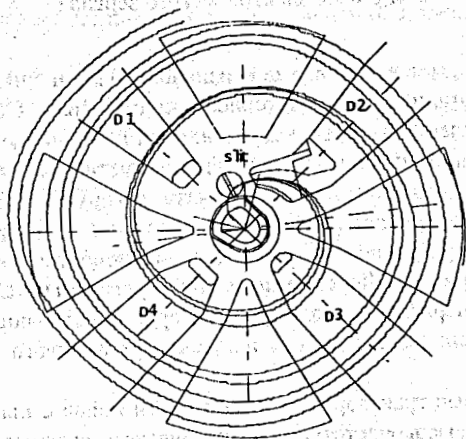


Рис. 7. Траектории движения ионов в центральной области для напряжений

140, 150 и 170 кВ.

ОСНОВНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ РАБОТЫ

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

1. Разработана и создана система аксиальной инжекции, которая позволяет эффективно инжектировать интенсивный пучок ионов в широком диапазоне отношения массы к заряду ($A/Z = 2 \div 10$) из источника ЭЦР в центральную область циклотрона У-400М.
2. С помощью созданных автором компьютерных программ проведены расчеты транспортировки пучков ионов в широком диапазоне отношения массы к заряду ($A/Z = 2 \div 10$) от источника ЭЦР до центральной области циклотрона У-400М. На основе этих вычислений созданы ионнооптические элементы транспорта пучка. Экспериментальные результаты исследования трансмиссии пучка показали что она составляет около 90%.
3. Выполнены исследования начального движения ионов с $A/Z = 2 \div 10$, ускоренных на различных гармониках В.Ч. потенциала (вторая, третья и четвертая гармоники). На основе анализа различных типов инфлекторов (спиральный, гиперболический, параболический и электростатическое зеркало) показано, что электростатическое зеркало позволяет относительно просто осуществить эффективное центрирование пучка и его устойчивость в широком диапазоне A/Z .
4. Для системы аксиальной инжекции пучка циклотрона У-400М проведен анализ использования различных типов банчеров (синусоидальный с одним и двумя зазорами, работающие на субгармониках ВЧ потенциала). Выбран синусоидальный банчер, работающий на основной частоте, с одним ускоряющим зазором, установленный на расстоянии одного метра от центра циклотрона. Экспериментально показано, что банчер позволяет увеличить интенсивность ускоренного пучка в 3 раза.
5. На основе разработанной автором модели расчёта вакуумных систем с различными проводимостями исследовано распределение давления вдоль линии транспорта пучков ионов. Эти исследования позволили оптимизировать расположение элементов вакуумной откачки, что, в конечном итоге, дало возможность обеспечить по трассе длиной 9 м эффективность трансмиссии высозарядных тяжелых ионов пучков более 85%.
6. С использованием разработанной системы аксиальной инжекции пучка в циклотроне У-400М достигнута общая эффективность ускорения равная 24%, что является одним из лучших результатов в мире.

Основные результаты диссертации опубликованы в следующих работах:

1. M. N. El-Shazly, A. V. Tikhomirov, G. G. Gulbekian, P. Kovač., "GENAP - the code for a pressure distribution calculation, Vacuum 52, 1999, P. 401-405.
2. M. N. El-Shazly, M. V. Khabarov, M. V. Ivanenko, G. G. Gulbekian., "Vacuum beam losses in the axial injection systems of the FLNR heavy ions cyclotrons" EPAC 98, Stockholm, Sweden, P.2172.
3. Gulbekian, I.V. Kolesov, V.V. Bekhterev, S.L. Bogomolov, A.A. Efremov, M. N. El-Shazly, B.N. Gikal, A.I. Ivanenko, V.B. Kutner, V.N. Melnikov, Yu.Ts. Oganessian., "Axial injection system for the U-400M cyclotron with an ECR ion source". JINR Rapid Communications, 4 (72) - 95, P. 63-74.
4. M. N. El-Shazly, J. Franko , G.G. Gulbekian , A.V. Tikhomirov., "The main principles of cyclotron design". Book of invited lectures, Egyptian-Russian School and workshop on Cyclotrons and their Applications, Cairo, Egypt, 1997, P 138-150.
5. M. N. El-Shazly, G. G. Gulbekian, B. N. Gikal., "An investigation of the pressure distribution and the transmission factor in the axial injection system of U-400M cyclotron", II Int. School and workshop on Cyclotrons and their Applications, Cairo, Egypt, 15-19 March 1997, P.78.

Рукопись поступила в издательский отдел
20 октября 1999 года.