

A-809



ОБЪЕДИНЕННЫЙ ИНСТИТУТ ЯДЕРНЫХ ИССЛЕДОВАНИЙ

9 - 7260

АРЗУМАНОВ

Артем Арменакович

**ИССЛЕДОВАНИЕ И СОЗДАНИЕ
ИЗОХРОННОГО ЦИКЛОТРОНА
С РЕГУЛИРУЕМОЙ ЭНЕРГИЕЙ ИОНОВ**

Специальность 05.14.11

- электрофизические установки и ускорители

Автореферат диссертации на соискание ученой
степени доктора технических наук

(Диссертация написана на русском языке)

Дубна 1973

Работа выполнена в Институте ядерной физики Академии наук
Казахской ССР.

Официальные оппоненты:

доктор физико-математических наук, профессор В.П. Дмитриевский,
доктор технических наук, профессор В.С. Панасик,
доктор технических наук И.Ф. Малышев.

Ведущее научно-исследовательское учреждение: Радиотехнический
институт АН СССР, Москва.

Автореферат разослан " " 1973 года.

Защита диссертации состоится " " 1973 года
на заседании Ученого совета Лаборатории ядерных проблем ОИЯИ.

Адрес: г. Дубна, Московской области, Объединенный Институт ядерных
исследований, Лаборатория ядерных проблем.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке ОИЯИ.

Ученый секретарь Совета
кандидат физико-математических наук

Ю.А. Батусов.

АРЗУМАНОВ

Артем Арменакович

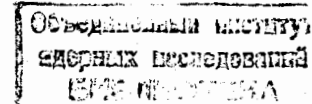
ИССЛЕДОВАНИЕ И СОЗДАНИЕ
ИЗОХРОННОГО ЦИКЛОТРОНА
С РЕГУЛИРУЕМОЙ ЭНЕРГИЕЙ ИОНОВ

Специальность 05.14.11

- электрофизические установки и ускорители

Автореферат диссертации на соискание ученой
степени доктора технических наук

(Диссертация написана на русском языке)



Решение одной из фундаментальных проблем современной физики — выяснение природы ядерных сил и структуры атомного ядра — тесно связано с развитием ускорителей заряженных частиц. В процессе своего интенсивного развития в течение последних четырех десятилетий ускорители прошли огромный путь от настольных приборов размером в несколько сантиметров до современных гигантов с длиной ускорительной дорожки в несколько километров, и выделились в самостоятельную бурно развивающуюся отрасль технической физики.

Широко распространенным циклическим ускорителем ионов в области низких и средних энергий является циклотрон, что объясняется присущими этому типу ускорителей особенностями, а именно: высокой плотностью частиц в выведенном пучке, возможностью ускорять различные ионы, сравнительной компактностью установки. Однако противоречивость требований пространственной и фазовой устойчивости орбит при ускорении ионов существенно ограничивала их энергию. Максимальное значение энергии протонов и дейтронов для циклотрона с аксиально-симметричным магнитным полем и диаметром полюсов, равным 150 см, достигало приблизительно 20 МэВ. Наиболее эффективный путь преодоления этого ограничения заключался во введении азимутальной вариации магнитного поля, предложенной Л.Г.Томасом в 1938 г. [1]. Интерес к идее Л.Г.Томаса сильно возрос к концу сороковых годов. Примерно в одно время в США и в СССР были начаты работы по исследованию возможности создания изохронного циклотрона [2,3]. Первым опытом применения секторной фокусировки было ускорение ионов в 105 см циклотроне Лос-Аламоса [4]. Магнитное поле в нем обладало 5 % вариацией, которая создавалась тремя секторами с угловой протяженностью 50° . Максимальная

энергия ускоренных протонов составляла 9 МэВ. Первым изохронным циклотроном принято считать ускоритель в Дельфте [5] с диаметром полюсов 85 см. Вариация магнитного поля в нем создавалась четырьмя радиальными секторами. Протоны в циклотроне были ускорены до 12 МэВ. В 1959 г. в Лаборатории ядерных проблем в Дубне были ускорены дейтоны до энергии 14 МэВ в 120 см циклотроне с пространственной вариацией магнитного поля, образованной с помощью шести секторов в виде спирали Архимеда [6].

С середины пятидесятых годов возрастает интерес к созданию циклотронов с регулируемой энергией ионов. Первым таким ускорителем, по-видимому, следует считать небольшой Рочестерский циклотрон с диаметром полюсов 66 см [7]. В 1954 г. в нем были ускорены протоны от 2 до 7 МэВ, дейтоны от 3 до 4 МэВ. Производилось изменение энергии ионов и в уже упоминавшемся циклотроне Дос-Аламаса. В 1959-61 гг. в ИАЭ им. И. В. Курчатова в 150 см циклотроне с азимутальной вариацией магнитного поля были ускорены дейтоны до максимальной энергии 32 МэВ [8,9]. Энергия ионов изменялась в диапазоне 12-32 МэВ. Дейтоны с энергией 20 МэВ и 32 МэВ были выведены из ускорительной камеры. В то время это была максимальная энергия выведенных ионов, ускоренных в циклотроне с секторной фокусировкой.

Рассмотрению различных аспектов создания и работы изохронных циклотронов было посвящено несколько международных конференций. Интенсивное развитие этого типа ускорителей можно объяснить тем обстоятельством, что изохронный циклотрон с регулируемой энергией ионов отвечает основным требованиям, предъявляемым к современным ускорителям заряженных частиц: повышение энергии ускоряемых ионов, ее регулирование и увеличение тока пучка.

Он становится обязательной установкой научных учреждений, ведущих исследования в области ядерной физики. В последние годы циклотрон начинает широко использоваться в ряде других областей науки и производства. Широкое разнообразие изохронных циклотронов по параметрам и типу объясняется характером проблемы, для решения которой он создается, а также возможностями, которыми располагает группа, разрабатывающая и проектирующая ускоритель. Практически все работающие в настоящее время изохронные циклотроны за редким исключением являются оригинальными установками.

В нашей стране созданы одни из первых ускорителей [6,8,9], в которых был осуществлен изохронный режим ускорения ионов. Вместе с тем, до последнего времени не было изохронных циклотронов, используемых для проведения физических исследований. Введенный в строй в 1968 г. в Лаборатории ядерных реакций ОИЯИ 200 см изохронный циклотрон работал с фиксированным магнитным полем и предназначался для ускорения тяжелых ионов с $\frac{A}{Z} \geq 2.8$ [10]. Однако многие физические исследования требуют ускорения легких ионов и возможность регулирования их энергии. Поэтому для расширения экспериментальных возможностей в области физики низких и средних энергий в Институте ядерной физики Академии наук КазССР после ввода в действие 150 см обычного циклотрона, автором с сотрудниками была начата работа по исследованию и созданию изохронного циклотрона с регулируемой энергией, что является целью изложенных в диссертации работ. В какой-то мере она явилась продолжением и дальнейшим развитием работ [8, 9] 1960 г., начатых в ИАЭ им. И. В. Курчатова.

В первоначальном виде проект реконструкции циклотрона ИЯФ АН КазССР в циклотрон с секторной фокусировкой и регулируемой энергией ионов был доложен на Международной конференции по ускорителям в Дубне в 1963 г. [11]. По этому проекту вариация магнитного поля, равная $\pm 40\%$, должна была создаваться тремя слабоспиральными секторами. Изменение магнитного поля по радиусу производилось с помощью десяти пар круговых обмоток. Резонансный контур представлял собой систему, состоящую из линии, нагруженной одним дуантом высотой 6 см. В таком циклотроне предполагалось обеспечить ускорение протонов в диапазоне от 5 до 40 МэВ, дейтонов от 10 до 32 МэВ. В 1966 г. на Международной конференции по изохронным циклотронам в Гетлинбурге (США) был представлен доклад [12], который являлся дальнейшим более конкретизированным развитием проекта, доложенного в Дубне. В дальнейшем в проект циклотрона был внесен еще ряд изменений. Практически был оставлен неизменным резонансный контур, что повлекло за собой увеличение зазора между секторами и уменьшение конечного радиуса. Предельная энергия получилась равной для протонов 30 МэВ, для дейтонов 25 МэВ, для ионов гелия-3 60 МэВ.

Основные теоретические исследования и исследования на модели магнита были закончены к 1967 г. [13,14], тогда же были начаты работы по проектированию и изготовлению отдельных элементов и систем ускорительной установки. Первый пучок протонов с энергией 30 МэВ был получен 30 сентября 1971 г.

В реферлируемой диссертации обобщены основные результаты исследований, выполненных автором с 1963 г. по 1973 г. Они охватывают широкий круг вопросов, связанных с исследованием и

разработкой изохронного циклотрона с регулируемой энергией ионов: от рассмотрения динамики орбит ионов в магнитном поле с пространственной вариацией до экспериментального исследования параметров пучка ионов, ускоренных в различных режимах. На основании полученных результатов была выбрана структура магнитного поля, определены условия устойчивого ускорения ионов, собрана система полуавтоматического измерения поля, выбрана схема ускорения ионов в центральной части, создана система вывода ионов, определены результирующие параметры циклотрона.

Диссертация состоит из пяти глав.

В первой главе приведены результаты исследования движения ионов в секторном магнитном поле. Нелинейные уравнения движения решаются асимптотическим методом Боголюбова-Крылова [15]. В уравнениях движения иона относительно равновесной орбиты учтены все члены до четвертого порядка малости включительно. Это позволяет при необходимости проводить рассмотрение до высоких степеней приближения. Для частоты радиальных колебаний получена зависимость от амплитуды колебаний в четвертой степени. Результаты вычисления частот по аналитическим выражениям как в линейном приближении, так и с учетом нелинейного сдвига проверялись численными методами. Нелинейный сдвиг радиальной частоты вплоть до значения относительной амплитуды 0,1 определялся с десятипроцентной точностью. Получено выражение для определения фазового движения иона с учетом скорости изменения разницы между реальным магнитным полем и изохронным:

$$\sin \phi(R_2) - \sin \phi(R_1) = -\frac{E_0}{\Delta E} \left(\frac{\omega_0}{c}\right)^2 \frac{h}{B_0} \int_{R_1}^{R_2} \Delta B(\rho) \left[\left(1 + \frac{\Delta B}{B_{uz}}\right) \frac{ds}{d\rho} + \frac{s}{B_{uz}} \frac{d\Delta B}{d\rho} - \frac{s}{\rho} \frac{\Delta B}{B_{uz}} \right] \rho d\rho \quad (I)$$

где R - радиус ускорения,

E_0 - энергия покоя иона,

ΔE - максимальный прирост энергии иона за оборот,

ω_0 - круговая частота обращения иона в центре циклотрона,

h - гармоника ускорения,

s - длина равновесной орбиты,

ΔB - разница между реальным и изохронным полями.

Учет приведенного в подынтегральном выражении члена $\frac{s}{B_{uz}} \frac{d\Delta B}{d\rho}$ особенно важен в случае ускорения ионов в области резкого спада магнитного поля на конечных радиусах, что имеет место для рассматриваемого циклотрона.

По результатам первой главы была проведена предварительная оценка свойств орбит и параметров ускорительной установки.

Во второй главе обсуждаются вопросы прохождения резонансов в циклотроне. Исследование проводится асимптотическим методом [15]. Подробно рассмотрены резонансы, существенно проявляющиеся в данном циклотроне. Особенности созданного циклотрона являются: сравнительно невысокое значение $\beta = \frac{v}{c} \approx 0,25$; ускорение ионов на последних орбитах в спадающем магнитном поле, что обусловлено необходимостью эффективного вывода пучка, сравнительно высокий прирост энергии за оборот, приблизительно равный 0,35 МэВ.

Эти особенности выражены на диаграмме устойчивости (рис. I), из которой следует, что в большей части области ускорения частота радиальных колебаний равна 1,05. Частота аксиальных колебаний равна 0,1-0,2. Конечная область ускорения характеризуется быстрым изменением частот колебаний. Цифрами помечены значения радиуса в см., которым соответствуют приведенные значения частот. На диаграмме можно видеть некоторые резонансные значения частот колебаний в созданном циклотроне. Для идеального поля наиболее серьезными являются - внутренний нелинейный резонанс $\omega_r = \frac{3}{3}$, проходимый дважды, и резонанс связи $\omega_r - 2\omega_z = 0$, который происходит непосредственно перед началом вывода пучка. Рассмотрено действие резонансов, вызываемых искажениями магнитного поля. Наиболее опасны внешний резонанс на первой и второй гармониках и параметрический резонанс на второй гармонике магнитного поля. Рассмотрены резонансы, вызываемые искажениями медианной поверхности, а также параметрический резонанс при $\omega_z = \frac{1}{2}$, проходимый в поле рассеяния на конечных орбитах. Оценено действие резонанса пересечения ускоряющего зазора. Некоторые из резонансов имеют место при одном и том же значении частоты колебаний, поэтому проводится исследование их совокупного действия.

Рассмотрение действия резонансов проводилось двояко. Вначале строились статические фазовые диаграммы, которые дают общее представление о резонансе. При этом они определялись интегрированием укороченных уравнений Боголюбова-Крылова или интегрированием общих уравнений движения. По статическим диаграммам определялись особые точки, области устойчивости, скорость перемещения отображающей точки на фазовой диаграмме, резонансная

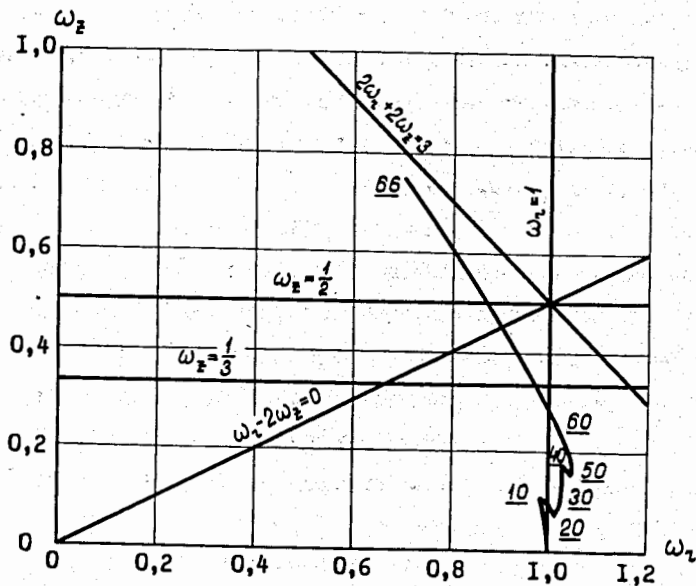


Рис. 1. Диаграмма устойчивости. Зависимость частот радиальных и аксиальных колебаний от радиуса ускорения (подчеркнутые цифры) для протонов с энергией 30 МэВ.

область частот. Наиболее важным для ускорения ионов является рассмотрение динамического прохождения резонансов, которое определяет конечные искажения пучка. Соответствующим выбором параметров магнитного поля можно в некоторых пределах изменять силу резонанса. Динамическое прохождение резонансов в сильной степени зависит от скорости изменения частот колебаний. Сравнительно высокое ускоряющее напряжение в рассматриваемом циклотроне способствует прохождению резонансов без существенного увеличения амплитуд колебаний.

По результатам второй главы определялись допуски на элементы магнитной системы ускорителя, оценивалось возможное искажение пучка в процессе ускорения. Влияние резонансов учитывалось при выборе магнитной структуры циклотрона.

В третьей главе рассмотрены вопросы численного определения параметров изохронного циклотрона. Существующие методы решения нелинейных задач довольно несовершенны. Они носят приближенный характер и хотя дают необходимую информацию, часто их точности недостаточно. Проблема получения необходимой точности вычислений решается численным методом с использованием ЭВМ. Поэтому с самого начала исследований орбит ионов в изохронном циклотроне было обращено внимание на составление необходимых программ вычислений и определение получающейся при этом погрешности. Автором был составлен и отлажен цикл программ для определения всех важных свойств орбит ионов и других характеристик циклотрона для одной из первых отечественных вычислительных машин М-20 [13]. Таким образом, было смоделировано движение иона в изохронном циклотроне с первого оборота до выхода иона из магнитного поля

циклотрона. Проведен анализ влияния остаточной и неустранимой погрешности на результаты численных расчетов. С помощью составленных программ решался широкий круг задач. Проводилась коррекция результатов магнитных измерений, определялась равновесная орбита и основные ее свойства: частоты колебаний при заданных значениях амплитуды, период обращения по равновесной орбите. С помощью программы для произвольной орбиты производился расчет движения иона в магнитном поле с учетом ускорения, определялось фазовое движение ионов, строились статические фазовые диаграммы, исследовались различные резонансы. Аналогичная программа позволяла определять движение ионов с учетом пространственного распределения электрического поля в ускоряющем зазоре. Изохронное поле получалось методом итераций с учетом периода обращения по равновесным орбитам для различных значений энергии иона. С помощью вычислительной программы производился также расчет системы вывода ионов из циклотрона. Вычислялись траектории иона в электростатическом дефлекторе и магнитном канале, при этом дефлектор мог состоять из нескольких частей с электродами различной формы. Определялись условия наибольшей эффективности вывода ионов при регулировании их энергии. Была составлена программа расчета токов в круговых корректирующих обмотках для оперативного изменения магнитного поля по радиусу, что необходимо при изменении энергии и типа ускоряемых ионов. Расчет токов проводился методом наименьших квадратов. Численными методами определялось также двумерное электрическое поле между дуантами, между электродами дефлектора и в ряде других случаев. Решение уравнения Лапласа при заданных граничных условиях производилось методом сеток.

Точность вычислений по составленным программам позволяла определять с допустимой погрешностью основные характеристики циклотрона.

По результатам третьей главы производился окончательный расчет свойств орбит, параметров магнитного поля, характеристики ускорительной установки.

В четвертой главе рассматриваются свойства магнитного поля циклотрона. Приводятся краткие сведения о модели основного магнита в $1/3$ натуральной величины и основные результаты проведенных на ней исследований магнитной структуры изохронного циклотрона. Для увеличения аксиальной фокусировки пучка ионов была принята схема трехсекторного поля. С целью уменьшения нелинейности выбраны слабоспиральные секторы. Для получения высокой точности при механическом изготовлении секторов кромки их выбраны прямоугольными. При выборе величины спиральности секторов учитывалось их насыщение.

Проведен анализ допустимой погрешности магнитных измерений для принятой точности определения основных характеристик орбит ионов. По величине остаточной погрешности для заданного магнитного поля определен необходимый радиальный и азимутальный интервал измерения поля. Приведены особенности полуавтоматической системы измерения индукции магнитного поля, разработанной в Лаборатории физики ускорительных процессов ИЯФ АН КазССР [16]. Система позволяла фиксировать азимутальную координату измеряемой точки с точностью ± 15 угловых секунд и радиальную координату с точностью ± 1 мм. Измерение индукции поля производилось с точностью ± 1 Гс.

При изготовлении и установке элементов магнитной системы циклотрона зафиксированы следующие отклонения от точных размеров: плоскостность крышек ускорительной камеры выдержана с точностью 0,04 мм; соосность верхней и нижней крышек - с точностью 0,06 мм; толщина секторов и их плоскость - с точностью 0,03 мм. Зазор между секторами и в долинах - с точностью 0,05 мм. Угловая погрешность в установке секторов не превышает 20 угловых секунд. Элементы магнитной системы после первой сборки не подвергались коррекции. На рисунке 2, носящем лишь иллюстративный характер, показана топография магнитного поля в средней плоскости при $B_0 = 11$ кГс. Тонкими сплошными линиями обозначены линии равной индукции, пунктиром - равновесная орбита на конечном радиусе.

Исследованы характеристики магнитного поля циклотрона: среднее поле, амплитуда и фаза гармоник в зависимости от радиуса, измеренные через 1 кГс в диапазоне 4 - 17 кГс. Максимальное значение амплитуды третьей гармоники составляет 0,3. Угол спиральности на конечном радиусе равен 25° . Амплитуда гармоник магнитного поля, ниже третьей, лежит в допустимых пределах. В области ускорения ионов амплитуда первой гармоники не превышает $4 \cdot 10^{-4}$, амплитуда второй гармоники - $5 \cdot 10^{-4}$. Показаны результаты по измерению полей корректирующих обмоток, которые позволяют изменять градиент среднего поля, а также управлять амплитудой и фазой первой гармоники. Электропитание круговых корректирующих обмоток осуществляется с помощью разработанных в Лаборатории физики ускорительных процессов ИЯФ АН КазССР сильноточных стабилизированных тиристорных выпрямителей [17]. Максимальный ток в обмотках - 750 А. Пульсации тока не превышают 10^{-3} . Стабильность тока в

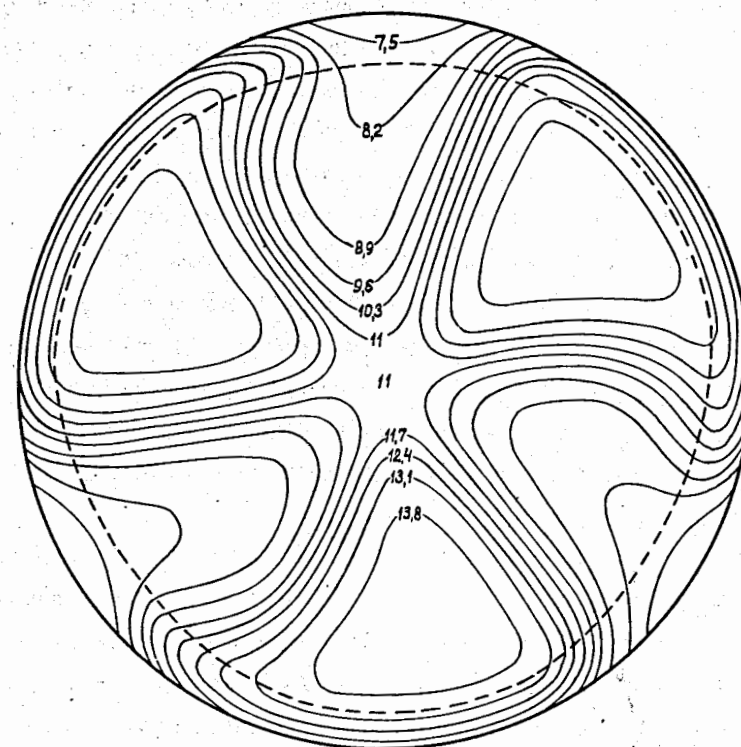


Рис. 2. Топография магнитного поля циклотрона при $B_0 = 11$ кГс.

течение суток - $3 \cdot 10^{-4}$. Максимальный градиент среднего поля во всей области ускорения, создаваемый круговыми корректирующими обмотками, составляет 45 Гс/см для низкого основного поля циклотрона и 35 Гс/см для высокого поля. На рис. 3 показан пример формирования среднего магнитного поля для режима ускорения протонов до максимальной энергии. На участке от 14 см до 58 см по радиусу отличие сформированного поля от изохронного не превышает 7 Гс. С помощью круговых корректирующих обмоток для протонов изохронное поле можно сформировать вплоть до индукции в центре $B_0 = 13$ кГс. Для ионов гелия-3 - до $B_0 = 14 - 15$ кГс; для дейтонов и альфа-частиц - до $B_0 = 15 - 16$ кГс. Глубина вариации и спиральность магнитного поля, создаваемые тремя секторами, обеспечивают аксиальную устойчивость с учетом ускорения в спадающем магнитном поле при ускорении протонов до 32 МэВ, ионов гелия-3 до 60 МэВ, альфа-частиц до 56 МэВ.

В пятой главе рассматриваются результаты ускорения ионов в различных режимах. Рассмотрено совокупное влияние различных элементов ускорительной установки на параметры пучка. На рис. 4 показана зависимость энергии ускоренных ионов от частоты ускоряющей системы и индукции магнитного поля для конечного радиуса 66,5 см. Там же приведены соответствующие зависимости и для различных тяжелых ионов. Приведенные кривые продолжены в область низких магнитных полей, что соответствует ускорению ионов на нечетных гармониках, кратных основной.

Обсуждены особенности ускорения ионов в рассматриваемом циклотроне. В частности, для решения проблемы регулирования энергии ионов в изохронном циклотроне изменена схема ускорения ионов в

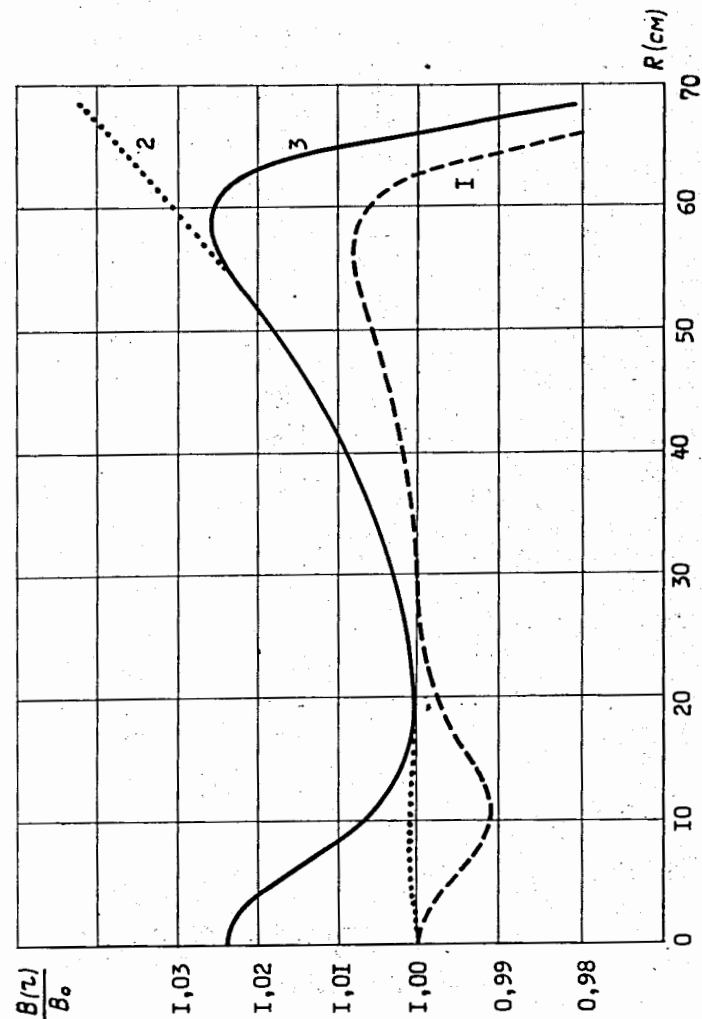


Рис. 3. Среднее магнитное поле для протонов максимальной энергии. 1 - изохронное поле, 2 - начальное поле, 3 - сформированное поле.

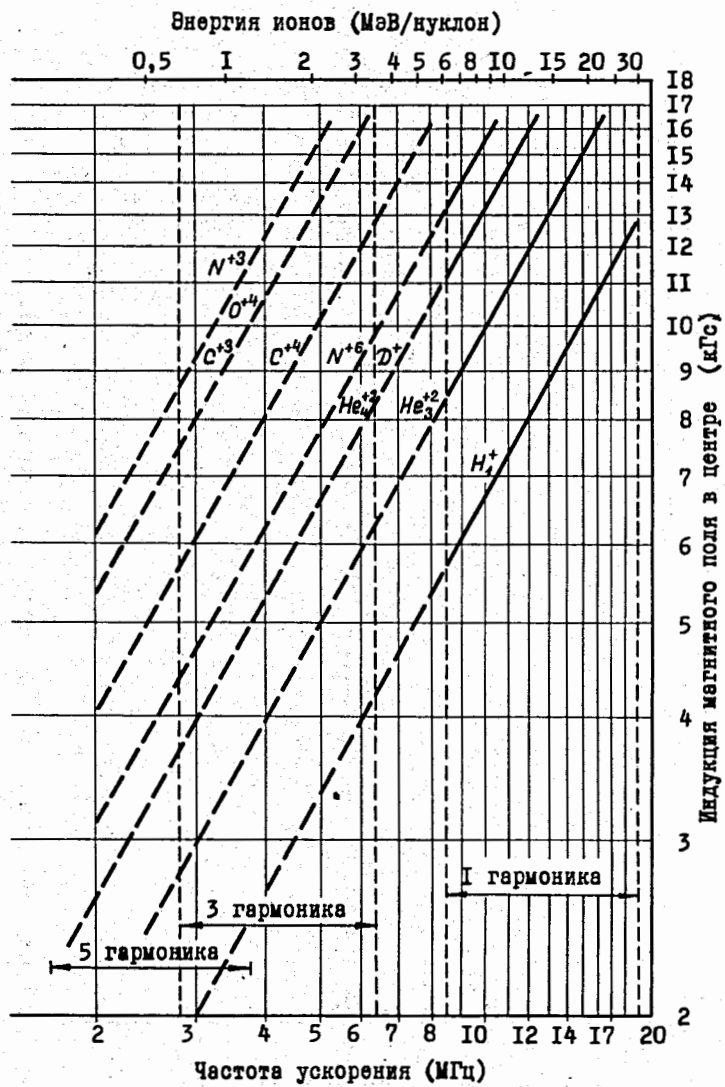


Рис. 4. Энергия ионов в циклотроне; $R_k = 66,5$ см.

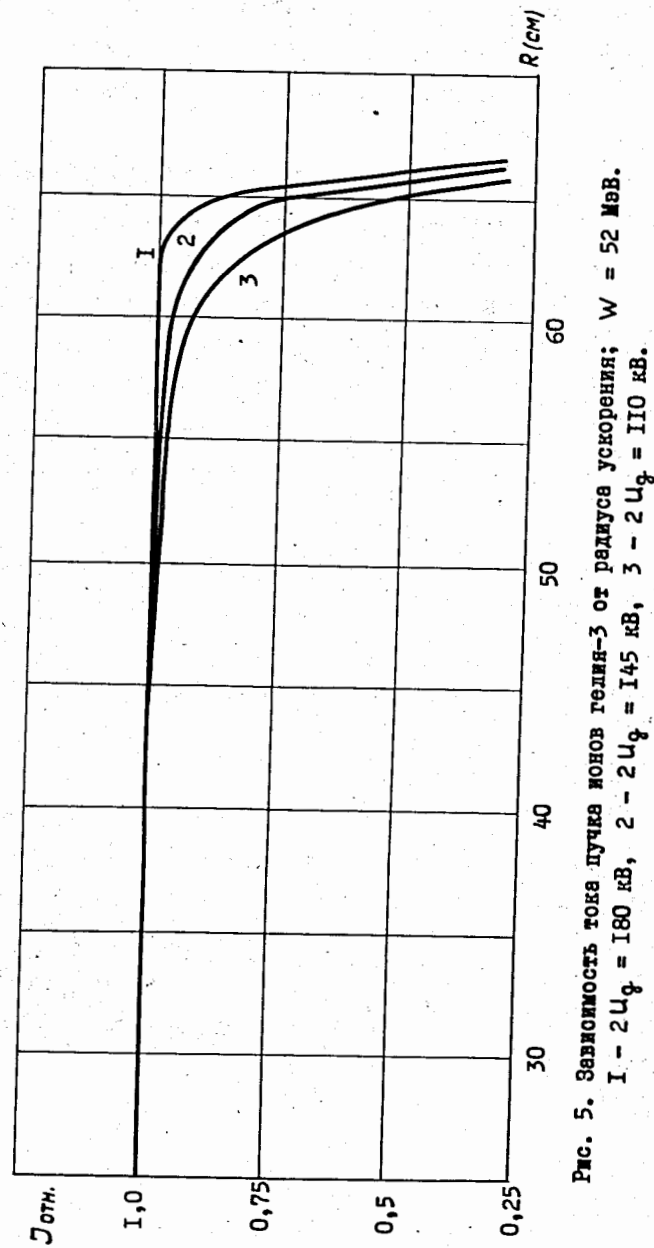


Рис. 5. Зависимость тока пучка ионов гелия-3 от радиуса ускорения; $W = 52$ МэВ.
 1 - $2U_g = 180$ кВ, 2 - $2U_g = 145$ кВ, 3 - $2U_g = 110$ кВ.

центральной области, а также вывода ионов из циклотрона. Для выделения необходимой области фаз служит подвижная диафрагма в центральной области, которая может перемещаться без нарушения вакуума вдоль зазора между дуантами.

Одной из основных характеристик пучка ионов, ускоренных в циклотроне, является зависимость тока пучка от радиуса ускорения. На рис.5 показаны характерные кривые для режима ускорения ионов гелия-3 до энергии 52 МэВ при трех значениях ускоряющего напряжения. Приведенные кривые свидетельствуют практически об отсутствии фазовых потерь пучка. Производилась оценка фазового движения ионов в процессе ускорения. Для большинства режимов экспериментально определенная область фаз на конечном радиусе равна $15-50^\circ$.

Аксиальный размер и положение пучка определялись двумя методами: радиографически и с помощью трехлампового зонда. Измерения показали незначительное смещение пучка от средней плоскости, при этом размер пучка несколько изменялся в зависимости от значения аксиальной фокусирующей силы.

Для вывода ионов применена электростатическая отклоняющая система с неоднородным электрическим полем [18] вместе с магнитным экраном. Высокий прирост энергии ионов за оборот и вывод ионов с орбиты, находящейся в поле рассеяния, обеспечивают достаточно точное разделение орбит на конечном радиусе. Для протонов с энергией 30 МэВ максимальное разделение орбит на конечном радиусе составляло 11 мм. Максимальный потенциал на отклоняющей пластине был равен 70 кВ.

Импульсное значение тока пучка на удаленной мишени составляло 90-200 мкА. Максимальное значение усредненного во времени тока на удаленной мишени, в частности для альфа-частиц с энергией 50,5 МэВ, было равно 30-40 мкА; ионов гелия-3 - 20 мкА и ограничивалось теплостойкостью мишеней. Коэффициент выпуска изменялся от 60 % для ионов высоких энергий до 20 % для ионов низких энергий.

Для 100 % выведенного пучка горизонтальный эмиттанс равен 32 мм·мрад, вертикальный эмиттанс равен 15 мм·мрад.

Результирующие параметры циклотрона на май 1973 г. приведены в таблице I.

Основные результаты диссертационной работы сводятся к следующему:

1. Создан и с 15 марта 1972 г. вступил в строй действующих ускорителей изохронный циклотрон с регулируемой энергией ионов.
2. Проведено аналитическое рассмотрение основных свойств орбит ионов в секторном магнитном поле, при этом в уравнениях движения учтены члены до четвертого порядка малости включительно. Показано, что при определении фазового движения ионов необходимо учитывать не только разность между рабочим и изохронным полями, но и скорость ее изменения.

Исследованы особенности наиболее важных в созданном циклотроне резонансов, рассмотрено их совместное действие. Показано, что при выбранных параметрах циклотрона резонансы проходятся без существенных искажений пучка.

3. Составлены программы на ЭВМ, позволяющие проводить практически все необходимые расчеты при создании изохронного циклотрона

Таблица I

Основные параметры
изохронного циклотрона с регулируемой энергией ионов
Института ядерной физики Академии наук Казахской ССР

Ускоряемые ионы, энергия (МэВ) и диапазон регулирования	протоны	6,1-30,0
	ионы гелия-3	18,6-62,0
	дейтоны	12,4-25,0
	альфа-частицы	24,8-50,5
Возможно ускорение и других ионов		
Ток пучка внутри камеры в импульсе (мкА)		160-1900
Ток пучка на удаленной мишени в импульсе (мкА)		90-200
Эмиттанс выведенного пучка (мм·мрад) для 100 % тока:	горизонтальный	32
	вертикальный	15
Конечный радиус ускорения (см)		66,5
Диаметр полюсов электромагнита (см)		150
Зазор между секторами (см)		21,6
Число секторов и их угловая протяженность (град)		3;60
Спиральность на конечном радиусе (град)		25
Максимальная глубина вариации для разных уровней поля (%)		20-30
Относительная величина первой и второй гармоник магнитного поля		$(4-5) \cdot 10^{-4}$

Число круговых токовых обмоток на крышку ускорительной камеры		9
Число гармонических токовых обмоток на крышку ускорительной камеры		6
Максимальная индукция основного магнитного поля в центре (кГс)		16,5
Максимальная мощность питания основного электромагнита (кВт)		300
Максимальная мощность питания корректирующих обмоток (кВт)		50
Число дуантов и их угловая протяженность (град)		2;180
Апертура дуанта (для пучка - см)		7
Диапазон изменения частоты ускоряющей системы (МГц)		8,5-19,0
Отдаваемая мощность ВЧ-генератора (кВт)		250
Способ отклонения и вывода ускоренных ионов	Электростатическая отклоняющая система с неоднородным полем, железный экран	
Максимальное напряжение на отклоняющей системе (кВ)		70
Источник ионов	целевого типа, вводимый горизонтально	
Фактическая работа установки (час/неделя)		138

с регулируемой энергией ионов. Проведен контроль погрешности вычислительных программ. Выбором соответствующего интерполяционного многочлена существенно снижена остаточная погрешность вычислений.

4. На основании проведенного анализа возможных погрешностей при магнитных измерениях выбрана и создана полуавтоматическая система измерения индукции магнитного поля изохронного циклотрона.

Дано обоснование выбранной магнитной структуры циклотрона, приведены результаты формирования его магнитного поля.

Малая погрешность проведенных магнитных измерений позволила вычислить основные параметры орбит ионов с необходимой для практики точностью.

5. Осуществлена схема ускорения в центральной области циклотрона, эффективно работающая при различных энергиях ионов.

6. Создана система вывода, позволяющая эффективно отклонять, выводить и транспортировать ионы при различных энергиях.

Основное содержание диссертации докладывалось на международных конференциях по ускорителям в Дубне (1963 г.), Гетлинбурге (1966 г.), на Всесоюзном совещании по изохронным циклотронам в Алма-Ате (1967 г.), на третьем всесоюзном совещании по ускорителям заряженных частиц в Москве (1972 г.) и опубликовано в работах [II, I2, I3, I4, I6, I8, I9, 20, 2I].

Все работы выполнены в Лаборатории физики ускорительных процессов Института ядерной физики АН КазССР.

Л и т е р а т у р а

1. L.H. Thomas, Phys. Rev., 54, 580 (1938).
2. Kelly E.L., Pyle R.V., Thornton R.L., Richardson J.R., Wright B.T., Rev. Sci. Instr., 27, 493 (1956).
3. Е.М. Мороз, М.С. Рабинович. Доклады на Симпозиуме в ЦЕРНе. Женева. 547 (1956).
4. Thornton R.L., Boyer K., Peterson J.M., Peaceful uses of atomic energy. Geneva, 4, 87 (1956).
5. Neun F.A., Khoo Kong Tat, Rev. Sci. Instr., 29, 622 (1958).
6. Василевская Д.П., Глазов А.А., Данилов В.И., Денисов Ю.Н., Желепов В.П., Дмитриевский В.П., Замолодчиков Б.И., Заплатин Н.Д., Кольга В.В., Кропич А.А., Лю-Нэ-чуань, Рыбалко В.С., Савенков А.Д., Саркисян Л.А., АЭ, 6, 657 (1959).
7. Fulbright H.W., Bromley D.A., Bruner J.A., Phys. Rev., 99, 654 (1955).
8. Zavenjagin J.A., Metscherov R.A., Mironov B.S., Nemenov L.M., Kholmovskiy J.A., Proc. Inter. conf. on high-energy accelerators and instrumentation. CERN, 225 (1959).
9. А.А. Арзуманов, Р.А. Мещеров, Е.С. Миронов, Л.М. Неменов, С.Н. Рыбин, Д.А. Холмовский, АЭ, 10, 501 (1961).
10. И.А. Шелаев, С.Н. Козлов, Р.Ц. Оганесян, Ю.Ц. Оганесян, В.А. Чугреев, Препринт ОИЯИ 9-3988, Дубна, 1968.
11. А.А. Арзуманов, Е.А. Мелешко, Р.А. Мещеров, Л.М. Неменов. Труды Международной конференции по ускорителям заряженных частиц. Дубна, 1963. Атомиздат, 604 (1964).
12. L.M. Nemenov, A.A. Arzumanov, P.A. Bersenev. IREB Trans. on Nuclear Science. NS-13, 4, 411 (1968).

13. А.А.Арзуманов. Тезисы докладов на Всесоюзном совещании по изохронным циклотронам. Алма-Ата, 4 (1967).
14. А.А.Арзуманов, М.Х.Нигматов. Тезисы докладов на Всесоюзном совещании по изохронным циклотронам. Алма-Ата, 5 (1967).
15. Н.Н.Боголюбов, Ю.А.Митропольский. Асимптотические методы решения нелинейных уравнений. Физматгиз. 1962.
16. А.А.Арзуманов, С.С.Баталин, Б.А.Волков, В.И.Саначев, М.Х.Нигматов. Измерительная техника, № 2, 50 (1973).
17. А.А.Арзуманов, С.С.Баталин, Г.А.Быков, Б.А.Волков, В.Ф.Езерский. ПТЭ, 4, 171 (1970).
18. А.А.Арзуманов, Е.С.Миронов, АЭ, 6, 202 (1959).
19. А.А.Арзуманов. Аннотации докладов, представленных на третье Всесоюзное совещание по ускорителям заряженных частиц. Москва. 86 (1972).
20. О.К.Анисимов, А.А.Арзуманов, Л.М.Неменов, С.С.Баталин, Б.А.Волков, М.Х.Нигматов, С.Н.Рыбин. Аннотации докладов, представленных на третье Всесоюзное совещание по ускорителям заряженных частиц. Москва. 81 (1972).
21. А.А. Arzumanov, L.M. Nemenov, Nucl. Instr. and Methods, 106, 201 (1973).

Рукопись поступила в издательский отдел
18 июня 1973 года.