

Л-33

ОБЪЕДИНЕННЫЙ ИНСТИТУТ ЯДЕРНЫХ ИССЛЕДОВАНИЙ

УДК 621.384.633.9

9-88-781

ЛЕ КИЕН ТХАНЬ

СПЕЦИАЛЬНЫЕ РЕЖИМЫ УСКОРЕНИЯ
В ИЗОХРОННЫХ ЦИКЛОТРОНАХ

Специальность: 01.04.20 - физика пучков
заряженных частиц и ускорительная техника

Автореферат диссертации на соискание ученой степени
кандидата физико-математических наук

Дубна 1988

Работа выполнена в Лаборатории ядерных проблем
Объединенного института ядерных исследований.

Научный руководитель:
доктор физико-математических наук В. В. Кольга

Официальные оппоненты:
доктор технических наук Н. И. Венников
(ИАЭ им. И. В. Курчатова, Москва)
кандидат физико-математических наук Е. Е. Олейник
(ИЯИ АН УССР, Киев)

Ведущая организация: Ленинградский институт ядерной
физики АН СССР (Гатчина).

Защита диссертации состоится "_____" _____ 1988 г.
в _____ час. на заседании Специализированного совета
Д-047.01.03 при Лаборатории ядерных проблем Объединенного инсти-
тута ядерных исследований, г. Дубна Московской области.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке ОИЯИ.

Автореферат разослан "_____" _____ 1988 г.

Ученый секретарь Специализированного совета
доктор физико-математических наук Ю. А. Батусов

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы. В современном научно-техническом прогрессе важная роль принадлежит ускорителям заряженных частиц. Они занимают определяющее место среди инструментов ядерной физики и находят все более широкое применение в народном хозяйстве. Среди различных типов ускорителей наиболее широкое распространение получили изохронные циклотроны, открывающие большие возможности для решения обширного комплекса прикладных задач. Являясь наряду с реакторами крупнейшим поставщиком радионуклидной продукции, изохронные циклотроны открывают исключительные возможности для производства специфических медицинских изотопов с высокой удельной активностью, обладающих уникальными диагностическими свойствами.

Изохронный циклотрон, как ускоритель с непрерывным режимом работы, позволяет получать пучки частиц с максимальной средней интенсивностью (до одного и более миллиампера). В то же время как ускоритель резонансного типа циклотрон имеет временную микроструктуру ускоренного пучка, необходимую для проведения некоторых экспериментальных программ.

В связи с широким использованием изохронных циклофонов для решения прикладных задач в последние годы происходит относительное увеличение числа этих машин на энергию (по протонам) до 30-40 МэВ. К 1986 г. таких изохронных циклофонов насчитывалось 27 в 15 странах мира, причем для производства медицинских радионуклидов и прикладных исследований использовалось от 50% до 100% общего времени работы. В связи с этим одним из актуальных направлений развития изохронных циклофонов является поиск различных возможностей, увеличивающих эффективность работы с пучком. Возникла настоятельная необходимость разрабатывать и реализовывать специальные режимы работы изохронных циклофонов, повышающих их экономичность и увеличивающих КПД установок.

Аналогичные соображения приводят к необходимости разработки специальных режимов работы также для фазотронов, которые являются уникальными дорогостоящими установками; увеличение эффективности их использования также является актуальной задачей.

Цель работы. Диссертационная работа посвящена исследованию специальных режимов ускорения в изохронных циклотронах и фазотронах. Предложены новые, теоретически рассчитанные и экспериментально проверенные режимы ускорения, а также рассмотрены известные применительно к конкретным ускорительным установкам - изохронный циклотрон У-120М Института ядерной физики ЧСАН (г.Ржеж, ЧССР) и фазотрон Объединенного института ядерных исследований (г.Дубна, СССР).

Научная новизна

1. Впервые проведено теоретическое исследование нового режима ускорения и вывода одновременно двух пучков противоположно заряженных ионов одного и того же элемента в изохронном циклотроне. Определены предельные энергии пучков, ускоряемых в этом режиме.

2. Предложен и создан комбинированный ионный источник, обеспечивающий начальные фазовые сдвиги сгустков обоих пучков, которые необходимы для ускорения протонов и H^- -ионов в изохронном циклотроне типа У-120М до энергии 35+40 МэВ.

3. Впервые рассмотрена возможность ускорения и высокоэффективного вывода на фазотроне ОИЯИ одновременно с пучком протонов пучка H^- -ионов до энергии 130+150 МэВ.

4. На изохронном циклотроне У-120М впервые были одновременно ускорены пучки протонов и H^- -ионов.

Практическая ценность

1. Созданы программы для численного расчета потерь отрицательных ионов вследствие электрической диссоциации и перезарядки на молекулах остаточного газа при ускорении в изохронных циклотронах и фазотронах.

2. Созданы программы для расчета искажений эмиттанса пучка протонов при многократном прохождении через перезарядную мишень.

3. Разработан и создан комбинированный ионный источник для одновременного ускорения пучков протонов и H^- -ионов на циклотроне У-120М.

4. Получены экспериментальным путем динамические характеристики протонного и H^- ионного пучков при их одновременном ускорении и выводе H^- -ионов на изохронном циклотроне У-120М в ИЯФ ЧСАН (ЧССР).

Эти результаты могут быть использованы при практической реализации новых режимов ускорения на проектируемых и действующих установках в институтах стран-участниц ОИЯИ.

Автор диссертации представляет к защите:

1. Исследование потерь интенсивности пучка H^- -ионов за счет электрической диссоциации и перезарядки на молекулах остаточного газа при ускорении на изохронном циклотроне У-120М и фазотроне ОИЯИ, включающее:

а) численный расчет по созданным программам,

б) эксперимент на изохронном циклотроне У-120М.

2. Аналитическое и численное исследование нового режима ускорения и вывода одновременно двух пучков противоположно заряженных ионов данного элемента на изохронных циклотронах и фазотронах.

3. Экспериментальное исследование одновременного ускорения протонов и H^- -ионов, а также вывода H^- -ионов на изохронном циклотроне У-120М.

Апробация работы. Результаты диссертации докладывались на Международном совещании по циклотронам и их применению (г.Бехине, ЧССР, 1985 г.), на I Европейской конференции по ускорителям и их применению (г.Рим, Италия, 1988 г.), на научных семинарах Лаборатории ядерных проблем ОИЯИ, Института ядерной физики ЧСАН (ЧССР), Института физики (г.Ханой, СРВ).

Публикации. По результатам и положениям диссертации опубликовано 6 печатных работ, приведенных в списке литературы.

Структура работы. Диссертация состоит из введения, четырех глав и заключения. Общий объем составляет 133 страницы, включая 65 рисунков, 6 таблиц, список литературы насчитывает 59 наименований.

СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

В первой главе диссертации дан обзор основных работ по использованию изохронных циклотронов в медицине и других прикладных областях народного хозяйства. Рассматриваются три группы задач, для которых использование изохронных циклотронов стало традиционным. Во-первых, это производство радиоактивных изотопов, широко используемых в медицине, биологии, промышленности, сельском хозяйстве. Во-вторых, группа работ по анализу элементного состава вещества. В третью группу входят работы, связанные с использованием циклотрона как источника быстрых нейтронов. В конце главы приведены данные о необходимых для этих целей типах частиц, их энергиях и интенсивностях пучков.

Во второй главе рассматриваются возможности ускорения H^- -ионов в изохронном циклотроне У-120М ИЯФ ЧСАН (г.Ржеж, ЧССР) и фазотроне ОИЯИ.

Ускорение отрицательных ионов, как правило, H^- и D^- , в изохронных циклотронах и фазотронах является одним из наиболее важных специальных режимов работы этих ускорителей, при использовании которого возможно реализовать ряд новых качеств. К ним относятся, в первую очередь, возможность 100% вывода ускоренного пучка с помощью практически полной перезарядки отрицательных ионов в положительные на соот-

ветствующей "обдирочной" мишени, возможность достаточно глубоко и плавно регулировать энергию выведенного пучка, возможность получения высоких интенсивностей внешнего пучка (до 500 мкА), существенно превышающих интенсивности выведенных пучков при электростатической системе вывода в циклотронах со сплошной магнитной системой.

Однако, наряду с несомненными достоинствами этого режима, при ускорении отрицательных ионов возникает ряд проблем. Наиболее негативной из них являются специфические потери отрицательных ионов в процессе ускорения. Эти потери обусловлены, во-первых, электрической диссоциацией иона, вызываемой силой Лоренца в магнитном поле, во-вторых, взаимодействием ионов с молекулами остаточного газа в камере, при котором происходит перезарядка отрицательных ионов, в основном, в атомы, и выбыванием их из процесса ускорения.

Расчет потерь интенсивности (I) H^- и D^- -ионов за счет электрической диссоциации проводится исходя из формулы

$$I(t) = I_0 \exp\left[-\int_0^t \frac{dt}{\tau(t)}\right], \quad (1)$$

где $\tau(t)$ - среднее время жизни H^- -иона, определяемое вероятностью проникновения внешнего электрона через потенциальный барьер при наличии электрического поля $\mathcal{E} \left[\frac{MB}{cm}\right] = 3 \cdot \beta \cdot \gamma \cdot B [T]$, $\beta = v/c$, γ - релятивистский фактор.

Из многих известных аналитических выражений для $\tau(t)$ в работе выбрано наиболее адекватное циклотронному режиму ускорения. Значения постоянных параметров в этом выражении определяются из сопоставления с данными известных экспериментов в наиболее важном диапазоне величин \mathcal{E} ($1,8 < \mathcal{E} < 2,6$ МВ/см), и тогда выражение имеет вид

$$\tau(t) = \frac{7,96 \cdot 10^{-14}}{\mathcal{E}} \exp\left(\frac{42,56}{\mathcal{E}}\right). \quad (2)$$

Поскольку напряженность электрического поля зависит от энергии иона и мгновенного значения магнитного поля на орбите иона, то для корректного определения потерь отрицательных ионов в процессе ускорения необходимо численное интегрирование по траектории ускоряемого иона с учетом значений магнитного поля на этой траектории. Для удобства численных расчетов в случае циклического ускорителя в качестве переменной интегрирования в работе используется число оборотов иона (ν). При этом $dt = d\nu / \ell$, где ℓ - орбитальная частота иона, которая в изохронном циклотроне постоянна. Тогда с учетом (2) потери интенсивности в изохронном циклотроне определяются выражением

$$I(\nu) = I_0 \exp\left[-\frac{10^{14}}{7,96 \cdot \ell} \int_0^{\nu_k} \mathcal{E} \cdot \exp\left(-\frac{42,56}{\mathcal{E}}\right) d\nu\right], \quad (3)$$

где ν_k - полное число оборотов отрицательного иона.

Для расчета потерь интенсивности пучка из-за перезарядки отрицательных ионов на молекулах остаточного газа для изохронного циклотрона в работе получено следующее выражение:

$$I(W) = I_0 \exp\left[-\frac{4,6 \cdot 10^{25} \cdot p \cdot A}{\ell \cdot eV} \int_{W_H}^{W_k} \sigma(W) \sqrt{W + \left(\frac{W}{43,34}\right)^2} \cdot dW\right], \quad (4)$$

где eV - средний набор энергии единичным зарядом за оборот (МэВ), ℓ - частота обращения иона (Гц), W_H , W_k - начальная и конечная кинетические энергии иона (МэВ), A - атомный вес, σ - сечение перезарядки отрицательного иона на молекулу остаточного газа (cm^2), p - давление остаточного газа (Торр).

При перезарядке отрицательного иона (например, $H^- \rightarrow H^0$) определяющее значение имеет сечение перехода отрицательного иона в нейтральный $\sigma_{-I,0}$, так как сечение $\sigma_{-I,I}$ в диапазоне энергий до 100 МэВ составляет менее 4% от $\sigma_{-I,0}$. Сечением захвата также можно пренебречь. Тогда сечение перезарядки определяется формулой

$$\sigma_{-I,0} = \frac{K_M \cdot 10^{-16}}{W^{0,77}} [cm^2], \quad (5)$$

где K_M - постоянная величина, определяемая из эксперимента, которая зависит от состава остаточного газа ($K_M = 0,412$ для водорода и $K_M = 3,533$ для азота). Из формул (4), (5) при $W_H = 0$ найдем

$$I(W) = I_0 \exp\left[-\frac{C_M \cdot 10^{10} \cdot p \cdot A}{eV \cdot \ell} \int_0^{W_k} W^{-0,77} \sqrt{W + \left(\frac{W}{43,34}\right)^2} \cdot dW\right], \quad (6)$$

где $C_M = 1,625$ для N_2 , $C_M = 0,189$ для H_2 , $C_M = 1,838$ для воздуха. Для нерелятивистского случая интеграл в (6) сводится к табличному и для вычисления потерь получим формулу:

$$I = I_0 \exp\left[-\frac{A \cdot D_M \cdot W_k^{0,73} \cdot p \cdot 10^4}{eV \cdot \ell}\right], \quad (7)$$

где $D_M = 2,523$ для воздуха, $D_M = 2,23$ для N_2 , $D_M = 0,26$ для H_2 , частота обращения иона ℓ в МГц.

Для проведения расчетов потерь H^- -ионов за счет электрической диссоциации и перезарядки на молекулах остаточного газа была создана программа **HMID** для ЭВМ ЕС-1010. Проведено сравнение результатов расчетов с имеющимися экспериментальными данными, полученными на действующих ускорителях (**TRIUMF** - Канада, **UCLA** - США). Из этих сравнений можно заключить, что алгоритмы и методика расчетов по программе **HMID** дают результаты, достаточно близкие к эксперименталь-

ным данным. Расчеты, выполненные по программе **HMID** для циклотрона У-120М при энергиях Н⁻-ионов до 40 МэВ, показывают, что сила Лоренца практически не влияет на интенсивность пучка отрицательных ионов, т.е. при ускорении Н⁻- и D⁻-ионов на У-120М потери пучка происходят только за счет перезарядки ионов на остаточном газе. На рис.1 показаны зависимости интенсивности пучка от радиуса для различных давлений и состава газа в камере У-120М, рассчитанные по **HMID**.

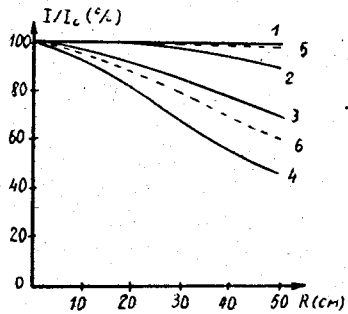


Рис.1. Потери Н⁻-ионов на остаточном газе для У-120М : 1 - P = 10⁻⁷ Торр (воздух), 2 - P = 1·10⁻⁶ Торр (воздух), 3 - P = 3·10⁻⁶ Торр (воздух), 4 - P = 6·10⁻⁶ Торр (воздух), 5 - P = 3·10⁻⁶ Торр (Н₂), 6 - P = 4·10⁻⁵ Торр (Н₂).

В работе проведен эксперимент по определению потерь Н⁻-ионов при ускорении на циклотроне У-120М до энергии 33 МэВ.

На рис.2 экспериментальные данные изображены сплошной линией, теоретические - пунктирной линией. Эксперимент проведен при давлении в камере P = 3,7·10⁻⁵ Торр.

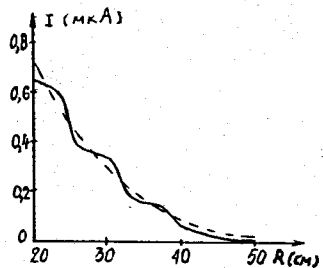
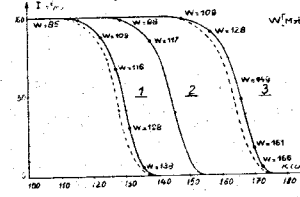


Рис.2. Потери Н⁻-ионов на остаточном газе для У-120М : - - - - теоретические данные, — — — — экспериментальные данные.

Результаты численных расчетов и эксперимента показывают, что для уменьшения потерь пучка до приемлемой величины необходимо по крайней мере на порядок уменьшить давление газа в ускорительной камере. Фазотрон Объединенного института ядерных исследований (установка "Ф") ускоряет протоны до энергии 680 МэВ при токе внутреннего пучка 5+10 мкА. Для ряда экспериментов, выполняемых на фазотроне, необходимы пучки с энергией от 100 до 200 МэВ. Обычно эти энергии достигаются путем торможения выведенного пучка с энергией 680 МэВ в графитовых замедлителях. Ускорение Н⁻-ионов на фазотроне способствовало бы получению выведенного пучка с оперативно изменяющейся энергией в заданном диапазоне.

В связи с этим создана программа **HMIDF** для численного расчета потерь Н⁻-ионов в установке "Ф" вследствие электрической диссо-

циации при различных уровнях магнитного поля, а также потерь из-за перезарядки на молекулах остаточного газа в зависимости от величины вакуума и состава остаточного газа.



Потери Н⁻-ионов из-за силы Лоренца
 — — — — НАПРЯЖЕНИЕ ПО ДИАМЕТРУ 20 КВ
 - - - - НАПРЯЖЕНИЕ ПО ДИАМЕТРУ 10 КВ
 1. P = 10⁻⁶ Торр
 2. P = 1·10⁻⁶ Торр
 3. P = 3·10⁻⁶ Торр

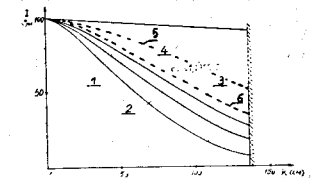
Рис.3

различных величинах давления в камере (воздух). Пунктирные линии показывают соответствующие изменения интенсивности при перезарядке на молекулах водорода. Заштрихованная граница обозначает место полного исчезновения пучка из-за силы Лоренца. С учетом полных потерь при ускорении до энергии 130 МэВ (V₀ = 1,1902 Тл) и вакууме P = 10⁻⁶ Торр (воздух) интенсивность пучка Н⁻-ионов составит ~ 3% от I₀. При том же режиме, но для водорода (P = 5·10⁻⁶ Торр), интенсивность равна 11% от I₀.

В третьей главе изложено теоретическое исследование нового способа существенного увеличения эффективности работы изохронного циклотрона, повышения КПД установки. Идея способа заключается в том, что в изохронном циклотроне одновременно ускоряются два пучка противоположно заряженных ионов одного и того же элемента (например, протоны и Н⁻-ионы, дейтроны и D⁻-ионы). При этом каждый из ускоренных пучков выводится отдельной системой вывода - пучок отрицательных ионов с помощью перезарядной мишени, пучок положительных ионов в процессе ускорения пересекает эту мишень и выводится в другом направлении с помощью электростатического дефлектора. Таким образом, возможно одновременно

На рис.3 приведены результаты расчетов потерь Н⁻-ионов за счет силы Лоренца. При значении магнитного поля в центре V₀ = 1,1902 Тл и среднем напряжении на дуанте U_д = 20 кВ (в этом режиме протоны ускоряются до максимальной энергии) интенсивность Н⁻-ионов составляет 23% от I₀ при энергии W = 130 МэВ, а при W = 153 МэВ, I = 7·10⁻⁴I₀. При этих энергиях частота обращения уменьшается не более чем на 5%.

На рис.4 сплошными линиями показаны результаты расчетов потерь Н⁻-ионов из-за перезарядки на остаточном газе при



Потери Н⁻-ионов на остаточном газе
 1. P = 10⁻⁶ Торр (воздух) - - - - - 10 кВ
 2. P = 1·10⁻⁶ Торр (воздух) - - - - - 20 кВ
 3. P = 3·10⁻⁶ Торр (воздух) - - - - - 20 кВ
 4. P = 10⁻⁶ Торр (Н₂) - - - - - 20 кВ
 5. P = 5·10⁻⁶ Торр (Н₂) - - - - - 20 кВ
 6. P = 1·10⁻⁵ Торр (Н₂) - - - - - 20 кВ

Рис.4

проводить два экспериментальных исследования, например, на одном пучке вести ядерно-физические работы, на другом - производство изотопов. В третьей главе проведено аналитическое и численное рассмотрение процесса ускорения двух пучков в циклотроне. Так как массы положительных и отрицательных ионов различны, то прежде всего рассматривается фазовое движение ступок ионов при их одновременном ускорении в изохронном циклотроне.

Аналитическое описание изменения фазы высокочастотного напряжения в момент прохождения ионом середины ускоряющего зазора в зависимости от кинетической энергии базируется на выражении

$$\frac{d\phi}{dV} = \frac{d\phi}{dW} \cdot \frac{dW}{dV} = 2 \cdot \pi \cdot q \cdot \frac{\Delta T}{T_0}, \quad (9)$$

где $\frac{d\phi}{dV}$ - изменение фазы за оборот, q - кратность ускорения, T_0 - период обращения иона в изохронном магнитном поле, ΔT - отклонение периода обращения иона от изохронного значения. Если магнитное поле изохронно для иона с энергией покоя E_0 и периодом обращения T_0 , то в этом случае $\Delta\psi = 0$ и фаза иона в процессе ускорения не изменяется. Если одновременно с ним ускоряется другой ион с энергией покоя $E_0 + \Delta E_0$, периодом обращения $T_0 + \Delta T$ до одного и того же радиуса, то изменение периода обращения этого иона описывается выражением

$$\frac{\Delta T}{T_0} = \frac{\Delta E_0}{\gamma^2 \cdot E_0}. \quad (10)$$

Тогда из (9), (10) можно найти сдвиг фазы иона с энергией покоя $E_0 + \Delta E_0$

$$\sin \phi_K - \sin \phi_H = 2 \cdot \pi \cdot q \cdot \frac{\Delta E_0}{E_0} \cdot \frac{E_0^2}{E_H \cdot E_K} \cdot \frac{W_K - W_H}{\Delta W_m}, \quad (11)$$

где ΔW_m - максимальный набор энергии иона за оборот, E_H , E_K - начальная и конечная полные энергии изохронного иона. Сдвиг фазы при одновременном ускорении положительных и отрицательных ионов, когда изохронный рост магнитного поля соответствует среднему значению энергии покоя \bar{E}_0 , определяется формулой

$$\sin \phi_K = \sin \phi_H \pm \pi \cdot q \cdot \frac{\Delta E_0}{\bar{E}_0} \cdot \frac{\bar{E}_0^2}{E_H \cdot E_K} \cdot \frac{W_K - W_H}{\Delta W_m}, \quad (12)$$

где ΔE_0 - суммарное различие масс покоя. Знак "+" соответствует отрицательным ионам, "-" - положительным. Максимальный прирост энергии ($W_K - W_H$) при одновременном ускорении однозарядных положительных и отрицательных ионов одного и того же элемента находится из (12) и определяется формулой

$$W_K - W_H = 300 \cdot A \cdot |\sin \phi_K - \sin \phi_H| \cdot \Delta W_m / q. \quad (13)$$

Например, если принять для положительных ионов $\phi_H = 60^\circ$ и $\phi_K = -60^\circ$, то $W_K - W_H \approx 520 \cdot A (\Delta W_m / q)$.

Для изохронного циклотрона У-120М примем $W_H = 0$, $\Delta W_m = 0,1$ МэВ, $q = 1$. При $\bar{E}_0 = 938,79$ МэВ из (12) получается формула для сдвига фаз протонов и H^- -ионов при одновременном ускорении их в У-120М:

$$\sin \phi_K = \sin \phi_H \pm 0,334 \cdot \nu_c, \quad (14)$$

ν_c - максимальное число сотен оборотов иона в циклотроне. Из формулы (14) следует, что если из ионного источника ионы выходят с $\phi_H = 0$, то при $\phi_K = 30^\circ$ $W_K = 15$ МэВ ($\nu_c = 1,5$), при $\phi_K = 45^\circ$ $W_K = 21,2$ МэВ, при $\phi_K = 60^\circ$ $W_K = 25,9$ МэВ. Приведенные выше результаты расчетов показывают, что для получения на У-120М максимальных энергий протонов и H^- -ионов (порядка 35+40 МэВ) необходимо, чтобы конструкции ионных источников и пулера обеспечивали получение начальных фаз около 30° для протонов и -30° для H^- -ионов. При этом можно получить $W_K = 40$ МэВ при $\phi_K = 57^\circ$. Такие начальные фазы можно, например, обеспечить с помощью поворота обоих ионных источников и пулера около центра магнитной системы на угол 30° относительно ускоряющей кромки дуанта против направления вращения протонного пучка, а также создания S-образной формы кромки дуанта в центральной области.

При одновременном ускорении дейтронов и D^- -ионов $\Delta E_0 / \bar{E}_0$ в два раза меньше, чем для протонов, и при ускорении на У-120М двух пучков до максимальной энергии 20 МэВ и $\phi_H = 0$ сдвиг фаз на конечном радиусе составит около $\pm 18^\circ$.

Для численного моделирования движения ионов при одновременном ускорении двух пучков создана программа **DRANA** с разветвленной системой подпрограмм и возможностью работы в диалоговом режиме при использовании ЭВМ ЕС-1010. С помощью этой программы для циклотрона У-120М выполнено детальное исследование радиально-фазового движения протонов и H^- -ионов при предложенной в работе новой конфигурации центральной области, найдены оптимальные положения ионных источников и пулера, а также другие параметры, необходимые для практической реализации одновременного ускорения двух пучков на циклотроне У-120М.

На рис.5 изображены начальные траектории протонов (сплошные линии) и H^- -ионов (точки) для различных значений фаз вылета из источника. На рис.6 приведена серия полученных зависимостей значений $\sin \phi$ ускоренных ионов от кинетической энергии.

Другой важной проблемой при одновременном ускорении двух пучков является взаимодействие частиц с перезарядной мишенью. Проведенные

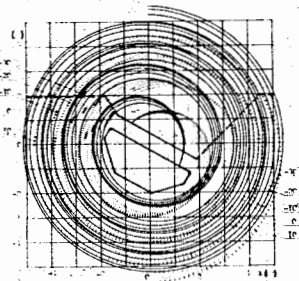


Рис.5

в работе расчеты показывают, что в данном диапазоне энергий (35+40 МэВ) пучок H^- -ионов за одно прохождение практически полностью перезарядается в пучок протонов при минимальной толщине углеродной мишени 50 мкг/см² (0,25 мкм).

Для того, чтобы все частицы пучка H^- -ионов пересекли перезарядную мишень, ее ширина вдоль радиуса должна несколько превышать радиальное расстояние между соседними траекториями частиц пучка. Радиальный шаг между соседними траекториями можно записать в виде

$$\delta r \approx \Delta r + 2 \cdot a \cdot \sin(2\pi \cdot Q_r \cdot \nu + \theta_0) \cdot \sin(\pi \cdot Q_r), \quad (15)$$

где Δr - набор за оборот, a , θ_0 - амплитуда и начальная фаза свободных радиальных колебаний. Для циклотрона У-120М в режиме ускорения протонов до энергии 35+38 МэВ, напряжении на дуанте 50 кВ при амплитуде свободных колебаний $a = 0,35$ см, $\Delta r = 0,06$ см, $Q_r = 1,04$ величина δr_{\max} составит 0,15 см. Таким образом, ширина перезарядной мишени должна быть не менее 0,15 см.

В процессе ускорения в области конечных радиусов пучок протонов многократно проходит через перезарядную мишень. При этом из-за многократного упругого рассеяния, а также потерь энергии протонов в мишени эмиттансы пучка (особенно аксиальный) могут увеличиться. Для определения величины влияния перезарядной мишени на пучок положительных ионов было проведено с использованием метода Монте-Карло численное моделирование процесса ускорения частиц с учетом гауссовского распределения углов многократного рассеяния и средних потерь энергии

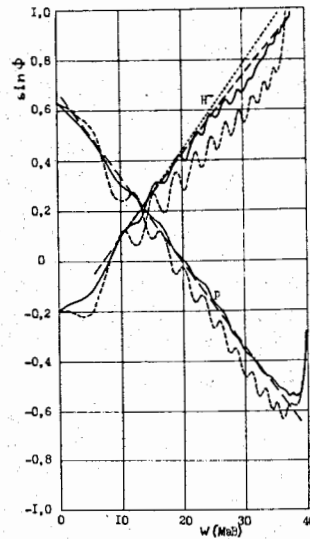


Рис.6

в мишени. Результаты моделирования показали, что искажения аксиального эмиттанса на У-120М не приводят к значительным потерям пучка при выводе, если толщина углеродной мишени менее одного микрона (~ 200 мкг/см²).

По такой же схеме, как в изохронном циклотроне, возможно одновременное ускорение протонов и H^- -ионов в фазотроне. Так как в фазотроне продольные колебания частиц в ступке устойчивы, то разница в массах протонов и H^- -ионов не оказывает (в отличие от изохронного циклотрона) практически никакого влияния на процесс ускорения обоих ионов. Оптимальные размеры перезарядной углеродной мишени для установки "Ф" составляют 0,5 мкм по толщине и 3+5 мм по ширине.

Для определения выходных характеристик второго, выведенного после перезарядки, пучка протонов создана специальная программа DRUNH на ASS-2 для ЭВМ ЕС-1010, в которой начало координат задается на произвольных расстояниях и азимуте относительно центра фазотрона.

На рис.7 приведены траектории H^- -ионов с энергией 130 МэВ, соответствующей штатному уровню магнитного поля ($B_0 = 1,1902$ Тл), и траектория H^- -ионов с $W = 165$ МэВ при сниженном на 0,2 Тл уровне магнитного поля. Видно, что возможно направить оба выведенных пучка протонов с энергией 130 МэВ и 670 МэВ в существующие каналы пучков. При этом радиальный эмиттанс второго пучка практически не искажается.

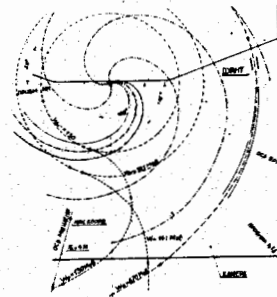


Рис.7

Четвертая глава посвящена описанию цикла экспериментальных исследований по одновременному ускорению протонов и H^- -ионов, выполненных на изохронном циклотроне У-120М ИЯФ ЧСАН. Приведены особенности конструкции комбинированного ионного источника и пулера.

На рис.8 показан общий вид комбинированного ионного источника, в котором имеются два накаливаемых катода (3,8), два антикатода (4,6) и две отдельные разрядные камеры.

Эксперимент был проведен в двух вариантах. Первый режим соответствовал реверсу тока в основной и во всех корректирующих обмотках электромагнита циклотрона (обратное поле). В этом режиме протоны, выходя из левой цели источника, вращаются по часовой стрелке, а H^- -ионы, инжектируемые из правой цели, - против часовой стрелки. Была получена интенсивность обоих пучков при частоте ускоряющего напряжения $f = 21,2$ МГц, что соответствует энергии протонов 24 МэВ при $r_k = 50$ см.

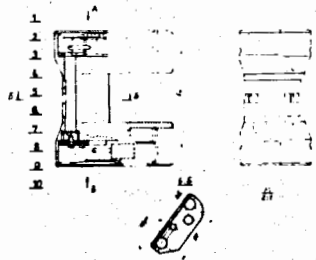


Рис. 8. Общий вид комбинированного ионного источника: 1 - корпус; 2, 9 - экраны; 3, 8 - катоды; 4, 6 - антикатоды; 7 - изолятор.

Во втором режиме направление магнитного поля соответствовало режиму обычной эксплуатации (прямое поле). В этом режиме пучки протонов и H^- -ионов менялись местами и была достигнута интенсив-

ность пучков при частоте $f = 20,31$ МГц. При этом на радиусе $r_k = 50$ см энергия протонов равна 22 МэВ.

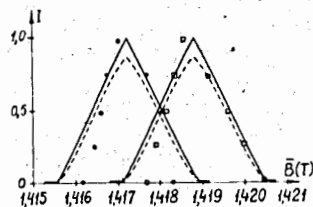


Рис. 9

Резонансные кривые были измерены для протонов и H^- -ионов в режимах ускорения каждого пучка и одновременно обоих пучков. На рис. 9 приведено сравнение экспериментальных данных с теоретическими расчетами. При этом максимальные токи пучков, различающиеся для протонов и H^- -ионов в этих измерениях примерно в 50-60 раз, приведены к одинаковой величине. Радиус кромки измерительной мишени - 45 см. Сплошной линией изображена расчетная кривая, основанная на зависимости тока из источника от действующего напряжения на дуанте в виде $I = I_0 \cdot (U_g \cdot \cos \phi)^{3/2}$. Расчетная интенсивность определяется путем численного интегрирования по возможным начальным фазам в пределах ϕ_{H1}, ϕ_{H2} . При этом в зависимости от знака расстройки магнитного поля $B - B_{рез}$, одна из крайних начальных фаз задавалась величиной $\phi_{H1} = 45^\circ$. Другая крайняя начальная фаза ϕ_{H2} находилась из расчета фазового движения для различных величин магнитного поля при условии, что значение соответствующей конечной фазы $\phi_{k2} \leq 45^\circ$. Пунктирной линией обозначена другая расчетная зависимость при предположении, что $I = I_0 \cdot (U_g \cdot \cos \phi)^3$.

Расстояние между экспериментальными максимумами резонансных кривых для протонов и H^- -ионов с точностью 2% соответствует массе двух электронов.

Было проведено измерение зависимости фаз ускоряемых ступок от формы магнитного поля в центральной области. С помощью численных расчетов и экспериментов на пучке протонов было найдено, что изменением тока в центральной корректирующей обмотке можно в достаточно широких пределах регулировать начальную фазу ускоряемых ступок. Эта обмотка создает в центральной области "бамп" магнитного поля величиной

34 Гс при токе в ней $\Delta I_2 = 100$ А, который имеет протяженность до $r = 18+20$ см. Фазовый сдвиг ступка до этих радиусов изменялся на $\pm 10+12^\circ$ при изменении тока в обмотке на ∓ 100 А. В прямом магнитном поле была найдена наилучшая зависимость интенсивности пучка протонов вдоль радиуса при величине тока в обмотке $I_2 = -300$ А. При обратном поле оптимальное значение тока центральной корректирующей обмотки составляет $I_2 = -48$ А для протонного пучка. На рис. 10 показана измененная с помощью пикап-электродов зависимость фазы центра ступка протонов от радиуса в прямом поле (кривая 1). Среднее магнитное поле

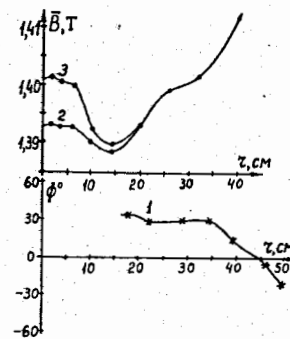


Рис. 10

для этой зависимости фазы, соответствующее табличным значениям токов коррекции, изображается кривой 2. Кривая 3 показывает форму среднего магнитного поля в центральной области, соответствующую оптимальному режиму одновременного ускорения двух пучков.

Для осуществления режима одновременного ускорения двух пучков вначале измерялись на токовых пробниках резонансные зависимости интенсивности пучков протонов и H^- -ионов при изменении тока в основной обмотке магнита циклотрона. После этого вводился пробник с перезарядной мишенью на

$r_2 = 47$ см, величина тока магнита выбиралась между резонансными значениями токов для протонов и H^- -ионов ($B_{ср} = 1,418$ Тл) и впервые наблюдалось одновременное ускорение двух пучков противоположно заряженных ионов. Регистрировались одновременно ток ускоренного протонного пучка на $r_3 = 49$ см и через телесистему светящееся пятно на флуоресцирующем экране, создаваемое отклоненным в магнитном поле протонным пучком после перезарядки на $r_2 = 47$ см ускоренных H^- -ионов. На рис. 11 приведено изображение светящегося пятна от пучка H^- -ионов на люминесцентном экране. Ана-

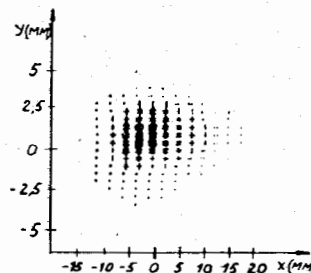


Рис. 11

логично было зафиксировано одновременное ускорение двух пучков в прямом поле.

Основные результаты диссертационной работы:

1. Созданы программы *HMID* и *HMIDF* для численного расчета потерь отрицательных ионов вследствие электрической диссоциации и перезарядки на молекулах остаточного газа при ускорении в изохронных циклотронах и фазотронах. Проведено сравнение результатов расчетов с известными экспериментальными данными, которое показало достаточную точность определения потерь по этим программам.

2. Исследования, проведенные для изохронного циклотрона У-120М, показывают, что в этом циклотроне возможно ускорять H^- - и D^- -ионы с незначительными потерями при улучшении вакуума до $3 \cdot 10^{-6}$ Торр для молекул воздуха.

3. Согласно расчетам по созданным программам в фазотроне ОИЯИ возможно ускорять H^- -ионы до энергии 130+150 МэВ, которая определяется потерями вследствие электрической диссоциации. Для обеспечения приемлемой интенсивности пучка необходимая величина вакуума равна $\sim 2 \cdot 10^{-6}$ Торр для молекул воздуха.

4. Проведено детальное теоретическое исследование нового способа существенного увеличения эффективности использования изохронного циклотрона и фазотрона путем одновременного ускорения и вывода двух пучков противоположно заряженных ионов одного и того же элемента (например, протонов и H^- -ионов, дейтронов и D^- -ионов). Для изохронных циклотронов определены предельные энергии пучков, ускоряемых в этом режиме.

5. Впервые показано, что при использовании комбинированного ионного источника и специальной формы дуанта в центральной области в изохронных циклотронах типа У-120М возможно одновременное ускорение протонов и H^- -ионов до максимальной энергии 35+40 МэВ.

6. Показано, что в фазотроне ОИЯИ второй пучок H^- -ионов после перезарядки в протоны возможно вывести в направлении основного пучка протонов, причем искажение радиального эмиттанса незначительно.

7. На изохронном циклотроне У-120М впервые выполнен эксперимент по одновременному ускорению протонов и H^- -ионов. Измеренные динамические характеристики обоих пучков, а также вывод пучка H^- -ионов подтвердили выполненные в работе аналитические и численные расчеты этого специального режима работы ускорителя.

Основные результаты диссертации изложены в следующих публикациях:

1. Дмитриевский В.П., Кольга В.В., Ле Киен Тхань, Бейшовец В., Крживанек М., Трейбал З., Чигака М. Исследование возможности ускорения H^- и D^- ионов в циклотроне У-120М. - Труды Международного совещания по циклотронам и их применению (г.Бехине, ЧССР). ОИЯИ, Р9-85-707, Дубна, 1985, с.251-257.

2. Дмитриевский В.П., Кольга В.В., Ле Киен Тхань, Ломакина О.В., Трейбал З. Динамические процессы при одновременном ускорении протонов и H^- -ионов в циклотроне. - Дубна, 1987. - 9 с. (Препринт/Объед. ин-т ядерн.исслед.: Р9-87-703).
3. Дмитриевский В.П., Кольга В.В., Ле Киен Тхань, Ломакина О.В., Трейбал З. Взаимодействие протонного пучка с мишенью при одновременном ускорении протонов и H^- ионов в циклотроне. - Дубна, 1988. - 12 с. (Препринт/Объед. ин-т ядерн.исслед.: Р9-88-243).
4. Бейшовец В., Василенко А.Т., Глазов А.А., Дмитриевский В.П., Кольга В.В., Крживанек М., Ле Киен Тхань, Трейбал З., Тучек Й., Чигака М. Экспериментальное исследование одновременного ускорения протонов и H^- ионов на изохронном циклотроне У-120М. - Дубна, 1988. - 9 с. (Препринт/Объед. ин-т ядерн.исслед.: Р9-88-249).
5. Bejšovec V., Šihák M., Dmitrievsky V.P., Glazov A.A., Kolga V.V., Krivanek M., Thanh L.K., Treibal Z., Tuček J., Vasilenko A.T. Experimental study of simultaneous acceleration of protons and H^- ions in the cyclotron. - Dubna, 1988. - 6 p. (Preprint/JINR: E9-88-310).
6. Кольга В.В., Ле Киен Тхань, Онищенко Л.М. Теоретическое рассмотрение возможности ускорения и вывода H^- ионов на фазотроне ОИЯИ. - Дубна, 1988. - 13 с. (Препринт/Объед. ин-т ядерн.исслед.: Р9-88-637).

Рукопись поступила в издательский отдел.
1 ноября 1988 года.