

ОБЪЕДИНЕННЫЙ ИНСТИТУТ ЯДЕРНЫХ ИССЛЕДОВАНИЙ

9-2001-74

На правах рукописи
УДК 621.384.633

К-21

КАРАМЫШЕВА
Галина Анатольевна

**ДИНАМИКА ЧАСТИЦ
В СИЛЬНОТОЧНЫХ ЦИКЛОТРОНАХ
С ПРОСТРАНСТВЕННОЙ ВАРИАЦИЕЙ ПОЛЯ**

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

**Автореферат диссертации на соискание ученой степени
кандидата физико-математических наук**

Дубна 2001

Работа выполнена в Лаборатории ядерных проблем
Объединенного института ядерных исследований.

Научный руководитель:
доктор физико-математических наук **Ворожцов С.Б.**

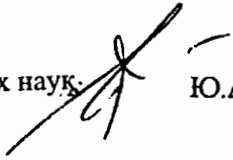
Официальные оппоненты:
доктор технических наук **Шелаев И.А.**
кандидат физико-математических наук **Белов В.П.**

Ведущее научно-исследовательское учреждение:
Институт физики высоких энергий, Серпухов.

Защита диссертации состоится “ ” _____ 2001 года
на заседании диссертационного совета Д 720.001.03 Объединенного
института ядерных исследований (Лаборатория ядерных проблем),
г. Дубна Московской области.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке ОИЯИ.

Автореферат разослан “ ” _____ 2001 года

Учёный секретарь Совета
кандидат физико-математических наук:  **Ю.А. Батусов.**

Общая характеристика работы

Актуальность темы

В настоящее время наиболее пригодными для многих ядерно-физических исследований и выполнения различных прикладных работ являются ускорители циклотронного типа, позволяющие получать различные ионы в области низких и средних энергий. Развитие современных циклотронов идёт в направлении повышения интенсивности, энергии и расширения ассортимента ускоряемых частиц. Вопросы теории движения частиц в современных циклотронах с пространственной вариацией поля изучены недостаточно глубоко, в частности не всё ясно с влиянием пространственного заряда пучка частиц на его движение.

В то же время наблюдается растущий интерес к использованию сильноточных пучков ускоренных частиц для получения энергии в подкритических сборках делящихся элементов (Pu, U, Th) так называемых “усилителях энергии” и для трансмутации радиоактивных отходов атомных электростанций (АДТТ). Проблемы ядерной безопасности приобрели глобальную актуальность для планеты при сохранении задачи энергоснабжения её населения. Поэтому наработка новых технологий, основанных на использовании ядерной энергии, остаётся одним из главных направлений прикладной ядерной физики. Интересна возможность использования сильноточных пучков для термоядерного синтеза (Inertial fusion). Важной задачей является получение пучков радиоактивных изотопов с широким диапазоном масс, энергиями на несколько сот МэВ/нуклон и интенсивностями предельно высокого уровня.

Для энергетического усилителя средний ток пучка должен составлять не менее 5-10мА, для трансмутации радиоактивных отходов – 100мА.[1] Циклотрон, как более простой, дешёвый и экономичный ускоритель по сравнению с линейным, наилучшим образом подходит для генерации пучков высокой интенсивности.

Основные проблемы, которые возникают при разработке циклотронов и линейных ускорителей на такие токи, связаны с эффектами пространственного заряда пучка, которые возникают из-за кулоновского расталкивания, усиливающегося при увеличении плотности заряда.

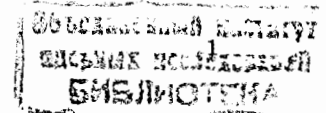
В связи с вышесказанным настоящая работа, представляющая исследования в области проектирования и динамических расчётов циклотронов с учётом эффектов пространственного заряда, является полезной и актуальной.

Цель работы

Цель диссертационной работы состоит в разработке методов моделирования динамики частиц в циклотронах с пространственной вариацией магнитного поля, выбора параметров и в исследовании динамических характеристик циклотронов с учётом влияния пространственного заряда на движение частиц.

Научная новизна

создан комплекс программ, включающий в себя весь набор необходимых для расчётов инструментов, а именно: базу данных для хранения и обработки информации о различных циклотронах, Электронную книгу «Циклотрон» пакета Mathcad для



аналитических расчётов параметров циклотронов и программы, предназначенные для численного моделирования динамики пучка;

-произведён сравнительный анализ и изучено влияние эффектов пространственного заряда различных типов сильноточных циклотронов;

-продемонстрировано существование режима ускорения, приводящего к формированию круглого пучка под действием сил пространственного заряда в численных расчётах по программе NAJO;

а также в нетрадиционности и новизне рассматриваемых ускорителей.

Практическая ценность работы

Результаты расчётов по циклотрону DC-72, разрабатываемому в ЛЯР ОИЯИ для "CyLab" (Словакия) вошли в Техническое задание.

В результате произведённых исследований продемонстрирована возможность ускорения в изохронных секторных циклотронах пучков протонов с интенсивностью до 30 мА (рабочая интенсивность 10мА). Рассчитана динамика частиц в проектируемом сильноточном инжекторе в Фазотрон ОИЯИ. Показана принципиальная возможность создания таких машин на базе ускорителей типа TRITRON.

Созданный для расчётов комплекс компьютерных программ может быть использован при разработке и исследовании сильноточных циклотронов с пространственной вариацией поля.

На защиту выносятся:

1. Параметры базовой установки CyLab (Словакия) циклотрона DC-72, а именно: среднее поле, вариация, радиус магнита, полученные исходя из требований к ускорителю и ограничений, вызываемых потерями на диссоциацию Н- ионов в электромагнитном поле.
2. Обоснование возможности создания сильноточных машин на базе ускорителей типа TRITRON.
3. Обоснование возможности ускорения в секторных циклотронах пучков протонов с рабочей интенсивностью 10мА.
4. Комплекс программ, предназначенных для расчётов динамики пучка в циклотронах с пространственной вариацией поля, состоящий из:

Базы данных «Cyclotrons» для хранения и обработки информации о различных циклотронах.

Электронной Книги Mathcad для аналитических расчётов параметров циклотронов.

Программ, предназначенных для численных расчётов динамики частиц.

Апробация работы

Основные результаты диссертации доложены на XI, XVII Сессиях по ускорителям заряженных частиц, конференции Beam Dynamics & Optimization (Петербург, 1995г.), Seventh European Particle Accelerator Conference (EPAC 2000), обсуждались на семинарах НЭОНУ ОИЯИ.

Публикации

Результаты исследований, составившие основу диссертации, опубликованы в 9 печатных работах.

Структура и объём диссертации.

Диссертация состоит из введения, шести глав, заключения с основными выводами и результатами исследований, приложения и списка литературы из 50 наименований. Общий объём 144 страниц.

Содержание диссертационной работы.

Содержание работы изложено в шести главах.

В первой главе описано современное состояние теории динамики частиц, пространственного заряда в циклотронах, обзор действующих и проектируемых сильноточных циклотронов, моделей, применяемых для аналитических и численных расчётов эффектов пространственного заряда.

В второй главе диссертации описана методика, которая использовалась для расчётов динамики частиц в циклотронах с пространственной вариацией. Описан комплекс программ, состоящий из:

1. Базы данных Cyclotrons, содержащей информацию об основных параметрах циклотронов, позволяющей быстро найти нужные сведения о необходимой установке.
2. Электронной Книги «Циклотрон» в пакете Mathcad, предназначенной для выбора параметров циклотрона с пространственной вариацией поля.
3. Программ ORBITA, DINCİK, NAJO, предназначенных для проведения численных расчётов динамики пучка в циклотронах с учётом действия сил пространственного заряда.

База данных CYCLOTRONS.

База данных - это набор сведений, относящихся к определенной теме или задаче. Microsoft Access позволяет управлять всеми сведениями из одного файла базы данных, просматривать, добавлять и обновлять данные в таблицах с помощью электронных форм; находить и извлекать только нужные данные с помощью запросов; а также анализировать или печатать данные в заданном макете с помощью отчетов. В настоящее время база Cyclotron содержит информацию об 11 циклотронных установках.

ЦИКЛОТРОН -Электронная Книга MATHCAD

Каждая Электронная Книга Mathcad - это совокупность рабочих документов Mathcad, содержащих тексты, изображения, формулы и данные.

Каждая страница Электронной Книги - доступный для изменений рабочий документ Mathcad. В нём можно изменять значения, вычислять результаты и экспериментировать прямо на электронной странице.

Электронная книга «Циклотрон» содержит аналитическую оценку бетатронных частот, энергии, оптимизацию параметров магнита для компактного (со сплошным магнитом) циклотрона, расстановки магнитов для ускорителя типа TRITRON, оценки степени электромагнитной диссоциации Н⁺ ионов, оценки эффектов пространственного заряда.

ORBITA

Программа ORBITA даёт возможность при заданном магнитном поле определять характеристики равновесных орбит с учётом нелинейных эффектов. Исходное магнитное поле может задаваться как формулой, так и таблицей зависимости гармоник магнитного поля вдоль радиуса. Подпрограммы "INT" и "DIF" осуществляют интерполяцию исходных табличных данных и численное определение первой и второй производных. Подпрограмма EQ осуществляет поиск равновесной орбиты по методу Ньютона. Подпрограмма QRQZ определяет следующие параметры равновесной орбиты: средний радиус r ; частоты свободных колебаний Q_x и Q_z при заданной начальной амплитуде по формуле Флоке и методом совпадающих точек;

DINCIC

Вторая основная программа "DINCIC" позволяет вычислять траектории движения ионов в динамическом режиме с учётом ускоряющего поля.

NAJO

Программа NAJO была создана для расчётов динамики частиц в секторных циклотронах GANIL[2]. Для учёта действия пространственного заряда используется equivalent continuous method, в котором дискретный набор частиц заменяется непрерывным распределением. Среднеквадратичные величины реального распределения приравниваются к величинам эквивалентного распределения соответствующим выбором параметров. Силы, действующие на каждую частицу, рассчитываются аналитически из непрерывного распределения. Модель основана на следующем принципе: регулярно 8 раз на обороте проросты энергии и импульсов, обусловленные действием пространственного заряда и рассчитанные по аналитическим формулам, прибавляются к значениям, полученным в результате трассировки. Предполагается эллиптическая форма банча.

В третьей главе представлены результаты выбора параметров, разрабатываемого в ЛЯР ОИЯИ циклотрона DC-72 проекта "CyLab"(Словакия), а именно: среднего поля, вариации, радиуса магнита, исходя из требований к ускорителю и ограничений, вызываемых потерями на диссоциацию H^- ионов в электромагнитном поле. Расчёты проводились с использованием Электронной Книги «Циклотрон». Результаты расчётов по CyLab вошли в Техническое задание.

Для выбора параметров циклотрона оценивались потери на диссоциацию H^- ионов по эмпирическим формулам. Расчёты показали, что при ускорении пучка H^- ионов до 70 МэВ предельно большим полем в холме следует считать величину 1.9Т. При таком значении, пучок на выходе составляет около 95%.

Исходя из этого, был предложен вариант циклотрона с радиусом вывода – 1.1м, секторными магнитами, средним полем в центре 1.05 Т, средним полем на радиусе вывода 1.12Т, $B_{холм} - B_{дол} = 1.2$ Т. Аналитическая оценка бетатронных частот в таком поле находится в хорошем согласии с произведёнными в дальнейшем численными расчётами.

Для поставленных перед ускорителем задач достаточно $Kb=135MeV$, что при радиусе вывода 1.1м соответствует средней величине магнитного поля $B=15.25$ Т. Фокусирующая константа Kf равна 70 MeV. Это означает, что для частиц с $Z/A < Kf/Kb = 0.519$ максимальная энергия ионов ограничивается максимальным средним

полем, а для частиц с $Z/A > 0.519$ фокусирующей способностью ускорителя. На Рис. 1, даны зависимости энергии иона на нуклон от величины магнитного поля, жирные линии ограничивают максимальную энергию ионов, шесть кривых соответствуют различным Z/A , минимальное значение $Z/A = 0.1$ соответствует тяжелым ионам с небольшим зарядом, а максимальное $Z/A = 1$ - H^- ионам.

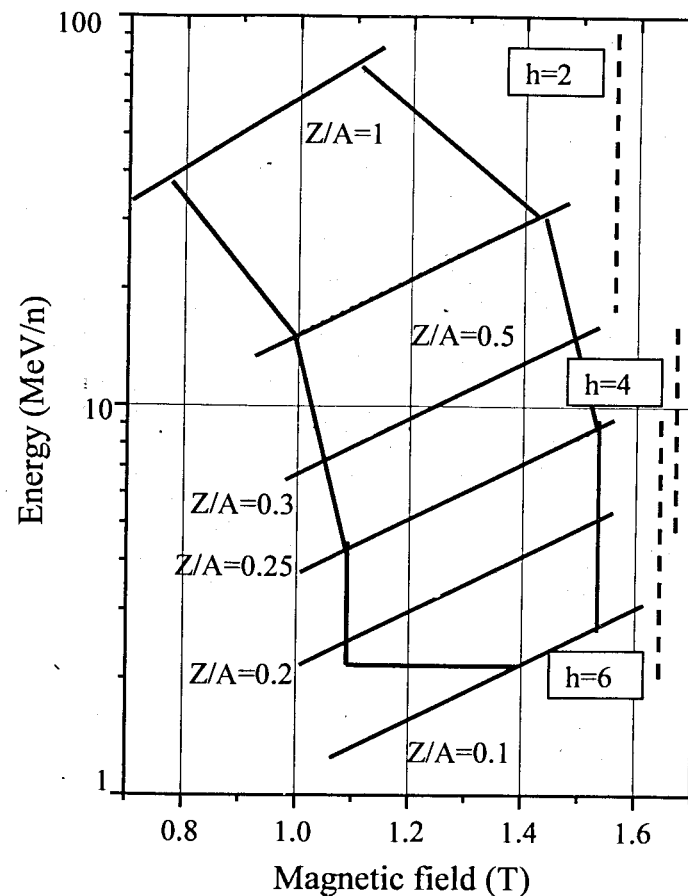


Рис. 1 Рабочий диапазон циклотрона DC-72

В циклотроне DC-72 ведущее и фокусирующее магнитное поле создается при помощи Ш-образного магнита.

Увеличение размеров магнита приводит с одной стороны к увеличению его стоимости, с другой стороны к уменьшению магнитного сопротивления, а, следовательно, мощности и затрат электроэнергии. Для нахождения разумного компромисса находили минимум целевой функции. Отдельно подбирались высота горизонтальных балок и толщина вертикальных стоек.

В результате произведённых расчётов по оптимизации параметров магнита предлагаются следующие размеры магнита: высота горизонтальной балки – 0.95м, толщина боковых стоек – 1м. Достаточно простая модель, используемая для оптимизации, показала результаты, совпадающие с результатами, полученными Морозовым Н.А. при помощи численных расчётов по программе POISSON.

В главе IV представлены проекты ускорителя TRICYC и комплекса на базе ускорителей типа TRITRON. Показана принципиальная возможность получения сильноточных пучков в подобных установках.

Установка TRITRON является циклотроном с разделенными орбитами. Поворот пучка осуществляется при помощи сверхпроводящих магнитов типа "оконная рама". Фокусировка пучка достигается за счет знакопеременных градиентов поля магнитов, расположенных вдоль спиральной траектории частиц. Магниты объединены в 12 плоских секторов, в промежутках между которыми расположены сверхпроводящие резонаторы или пробники для измерения положения пучка.

Основное отличие TRICYC от TRITRON - существенное повышение интенсивности ускоренного пучка с 1.4 мкА до 1000 мкА, за счёт увеличения разделения орбит и апертуры ускорителя.

Как показано в [3], даже для интенсивности 10 мА благодаря высокой проводимости медной ускорительной камеры, а также чрезвычайно малому времени ускорения (~ 14 оборотов * период обращения ~ 1.5 мкс.) проблемы резистивной поперечной неустойчивости пучка в ускорителе типа TRITRON не существует.

Сдвиги частот поперечных колебаний возникают в основном за счет поля заряда пучка. Оценки показывают, что даже для случая энергии инжекции 3 МэВ сдвиг частот поперечных колебаний не превышает 0.001 для тока пучка в 1 мА. При этом среднеквадратичные размеры пучка возрастают всего на 0.002 мм. Таким образом, сколько-нибудь заметного влияния пространственного заряда на динамику частиц не ожидается. Кроме того, как уже отмечалось ранее, в TRICYC движение частиц является малочувствительным к резонансам поперечных колебаний, поэтому допустимы и более значительные сдвиги частот.

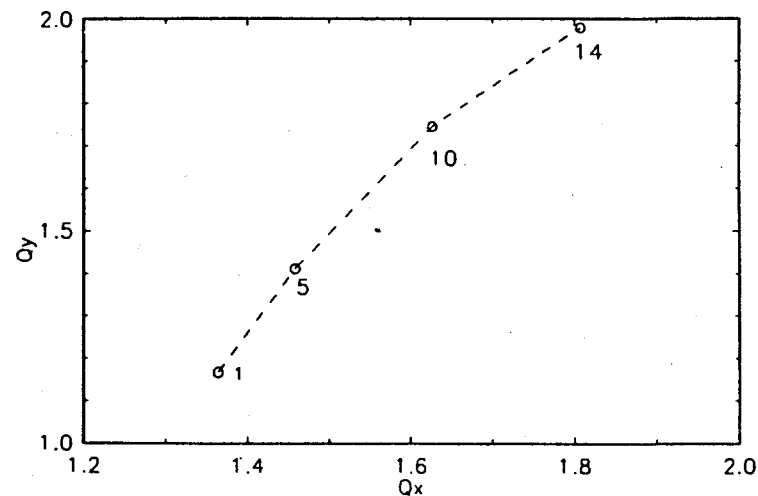


Рис. 2 Частоты бетатронных колебаний

На Рис. 2 показаны результаты расчетов бетатронных частот пучка в рассматриваемой структуре, полученные при помощи известной программы MAD[4]

В TRICYC высокая амплитуда ускоряющего напряжения определяет необычно большую частоту продольных колебаний частиц. В связи с этим сдвиги частот продольных колебаний за счет пространственного заряда оказывают мало заметное влияние на фазовую устойчивость пучка.

Представленная в Электронной книге методика расчёта параметров позволяет быстро подобрать подходящую расстановку магнитов и резонаторов и проверить работоспособность полученного ускорителя. Рассчитанный таким способом комплекс позволяет ускорять протоны от 20МэВ до 760МэВ, при этом предполагается, что схема обладает всеми достоинствами ускорителя типа TRITRON.

В ускорителе TRITRON было осуществлено ускорение частиц в течение 6 оборотов, что доказывает жизнеспособность принципа работы ускорителя. Динамика пучка соответствует расчётной. Очевидно, что технологические проблемы, с которыми столкнулись создатели этой оригинальной установки, можно со временем решить. Авторы TRITRON указывают, что сложности в прохождении по узким каналам ускорителя можно преодолеть увеличив разделение орбит с 40мм до, например, 100 мм, что позволит обеспечить апертуру около 50мм. Напомним, что апертура TRITRON составляет 11мм. Для сравнения приведем значение разделения орбит в предлагаемых нами установках: TRICYC 60мм, трёхкаскадный ускоритель –100мм. Существенное увеличение разделения орбит позволяет сделать вывод о том, что предлагаемые установки лишены недостатка TRITRON, являющегося основной причиной проблем, возникших при его реализации.

Глава V посвящена описанию динамики частиц сильноточного секторного циклотрона. Рассмотрены два варианта ускорителя, первый вариант предназначен для ускорения дейтронов, второй – протонов.

Проводились расчёты по ускорению дейтронов и протонов с интенсивностями до 20 мА и 30 мА соответственно, до энергии 15 МэВ в секторном циклотроне. Параметры, используемые для расчётов, представлены в таблице 1.

Таблица 1.

Тип циклотрона – секторный		
Ускоряемая частица		дейтрон протон
Энергия инъекции (МэВ)		0.5 0.5
Конечная энергия (МэВ)		15 15
Интенсивность (мА)		10 10, 30
Магнитная система		
Число секторов	4	4
Угловая протяжённость сектора (°)	30	30
Межполюсной зазор (см)	3	3
Радиальная протяжённость полюса (см)	15÷165	15÷110
Среднее магнитное поле (кГс)	5	5
Максимальный флаттер	1.45	1.45
Ускоряющая система		
Число Δ -электродов	2	2
Угловая протяжённость Δ -электродов (°)	12.5	26
Ширина уск. щели (°)	2.5	4
Аксиальная апертура (см)	2	2
ВЧ напряжение (кВ)	100÷350	200÷350
Набор энергии (МэВ)	0.4÷1.2	0.8÷1.3
Резонансная частота (МГц)	49.5	49.5
Частота обращения (МГц)	4.125	8.25
Кратность ускорения	12	6

Поперечные эмиттансы пучка при инъекции принимались равными $50 \pi^* \text{мм}^* \text{мрад}$ (для дейтронов) и $30 \pi^* \text{мм}^* \text{мрад}$ (для протонов), продольный – $75 \pi^* \text{град}^* \text{промилле}$.

Центр

На Рис.3,4 представлены зависимости аксиальных эмиттансов от энергии дейтронов и протонов соответственно. Из рисунка видно, что действие поперечных сил пространственного заряда приводит к резкому увеличению эффективных аксиальных эмиттансов (объединение эмиттансов для всех энергий в пучке) в центре ускорителя. Таким образом, для дейтронов допускается ток не более 20 мА (аксиальный размер пучка при этом не превышает апертуры ускорителя), для протонов – 30 мА (аксиальный размер пучка < 0.8 апертуры Δ -электрода). Однако, следует заметить, что в расчётах эмиттанс вычислялся как функция среднеквадратичного отклонения, то есть не все частицы попадают в эмиттанс, следовательно реальный предел по поперечному пространственному заряду находится несколько ниже.

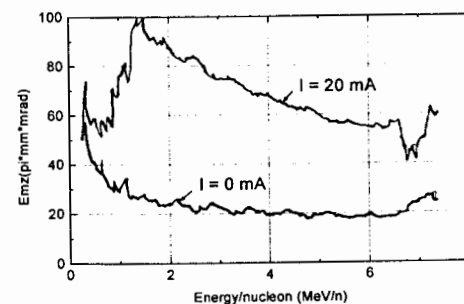


Рис. 3. Зависимость эффективных аксиальных эмиттансов от энергии дейтронов для $I=0$ мА и $I=20$ мА.

Зона вывода

Для минимизации действия продольного пространственного заряда, необходим большой набор энергии, при этом нужно обеспечить сохранение надлежащего качества пучка в процессе ускорения. В наших расчётах набор энергий позволил ускорить пучок частиц до энергии 15 МэВ за 20 оборотов (дейтроны) и 14 оборотов (протоны). При этом напряжение на резонаторах менялось линейно (величины указаны в таблице). На Рис.5 представлены радиальные распределения дейтронов при $I = 0$ мА (слева), при $I = 10$ мА (справа), на Рис.6 – протонов при $I = 10$ мА (слева), при $I = 30$ мА (справа). Видно, что ситуация с ускорением протонов существенно лучше, несмотря на то, что при ускорении дейтронов использовался flattop-резонатор, а при ускорении протонов – нет.

Заметим, что начальная фазовая ширина сгустка 20 град ВЧ является оптимальной для тока 30 мА; для тока 10 мА оптимальная ширина сгустка равна приблизительно 10 град ВЧ. Уменьшение фазовой ширины приводит к увеличению плотности заряда в банче, что приводит к ухудшению качества пучка; увеличение фазовой ширины ухудшает условия для формирования круглого пучка, что приводит к формированию пучка с ярко выраженной спиральной формой (см. Рис.7 слева). При оптимальной для каждого тока величине фазовой протяжённости сгустка быстро формируется круглый пучок (см. Рис.7 справа, процесс формирования почти завершён), как описано в работе С.Адама [5].

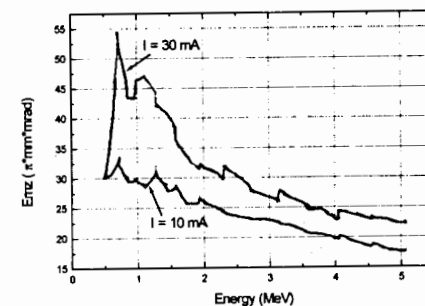


Рис.4. Зависимость эффективных аксиальных эмиттансов от энергии протонов для $I=10$ мА, $I=30$ мА.

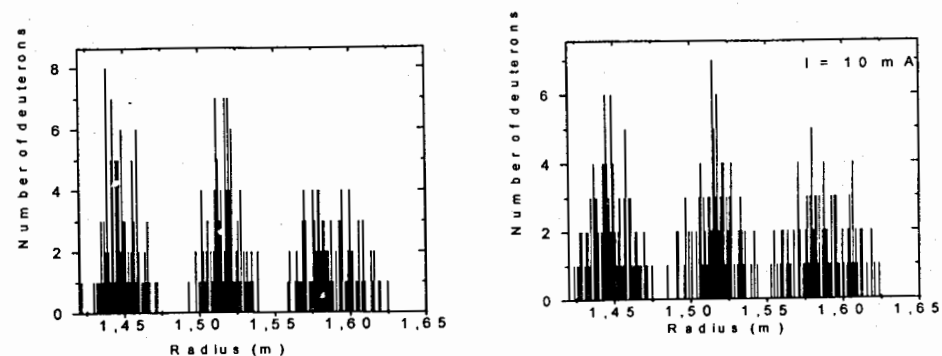


Рис.5. Радиальные распределения дейтронов для последних трёх оборотов (слева - при $I = 0$ мА, справа - при $I = 10$ мА).

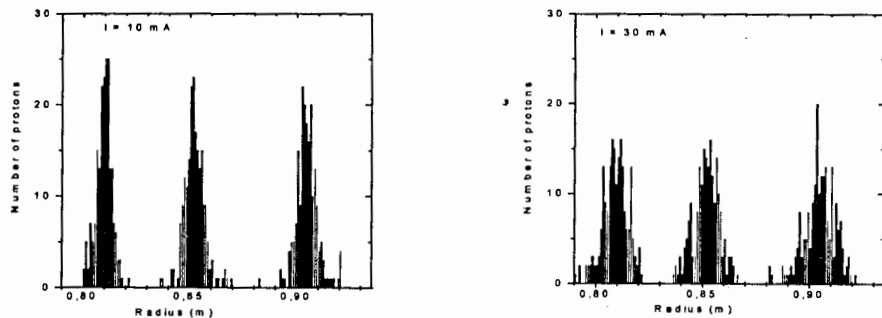


Рис.6. Радиальные распределения протонов для последних трёх оборотов (слева - при $I = 10$ мА, справа - при $I = 30$ мА).

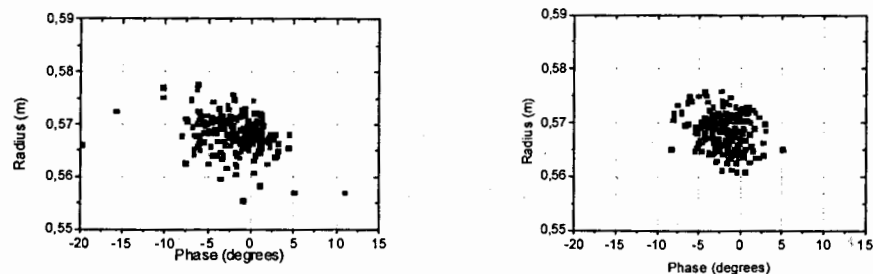


Рис.7. Портреты пучка после 7 оборотов, $I=10$ мА, фазовая ширина ступка при инжекции 20 град ВЧ (слева) и 10 град ВЧ (справа).

Таким образом, наблюдается качественное совпадение результатов расчётов сильноточного циклотрона с численными и экспериментальными данными PSI Injector II.

В Главе VI представлены результаты расчётов динамики частиц циклотрона ЦИ-5, предназначенного для инжекции в Фазотрон ОИЯИ с целью увеличения интенсивности последнего до проектной величины 50мкА. Для преодоления ограничения на предельную интенсивность в центральной зоне Фазотрона ОИЯИ, обусловленного в основном слабостью вертикальной фокусировки, был предложен способ увеличения, примерно на порядок, интенсивности протонного пучка ускорителя путем внешней инжекции и последовательной двухступенчатой перезарядки пучка H^- сначала в H^0 и затем в H^+ [3]

В качестве инжектора в Фазотрон предлагается использовать секторный циклотрон типа описанного выше, но с конечной энергией 5 МэВ, радиус магнита при этом составит ~ 0.7 м. Учитывая отсутствие необходимости использования flattop-резонатора, расчёты проводились с наличием четырёх Δ - электродов, что позволило снизить ускоряющее напряжение до $100\div 200$ кВ.

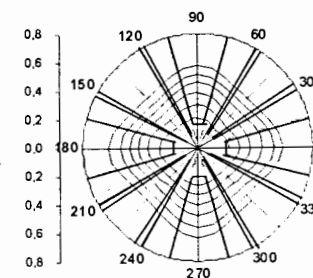
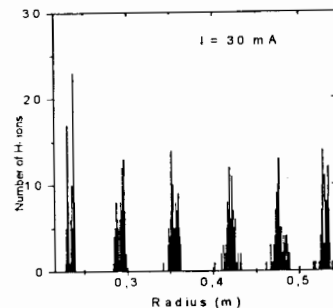


Рис.8 Радиальные распределения протонов. Рис.9 Траектория равновесной частицы.

На Рис.8 представлены радиальные распределения протонов при токе $I=30$ мА. Расстояние между оборотами в зоне вывода около 5 см, при этом наблюдается некоторое уширение пучка, приводящее к уменьшению зоны свободной от частиц до 3 см. На Рис.9 показана траектория равновесной частицы.

Силы пространственного заряда допускают работу дейтронного варианта сильноточного циклотрона в режиме разделённых орбит с предельным током пучка до 10 мА. Использование flattop-резонатора обязательно.

Эффекты поперечного пространственного заряда приводят к существенному увеличению аксиального эмиттанса в центре протонного варианта циклотрона при $I = 30$ мА, не превышая при этом акцептанса ускорителя. При заданном наборе энергии частиц имеет место достаточное для 100% вывода пучка протонов разделение орбит на конечном радиусе при интенсивностях ниже 30мА без использования flattop-резонатора. Рабочей интенсивностью можно считать интенсивность в 10 мА.

Силы пространственного заряда допускают работу циклотрона-инжектора в режиме разделённых орбит с предельным током пучка до 30 мА. Использование четырёх Δ -резонаторов позволит существенно уменьшить ускоряющие напряжения. Рабочей интенсивностью можно считать интенсивность в 10 мА.

В заключении содержатся основные результаты и выводы диссертации:

1. Произведён выбор параметров базовой установки проекта "CyLab" циклотрона DC-72, а именно: среднего поля, вариации, радиуса магнита, исходя из требований к ускорителю и ограничений, вызываемых потерями на диссоциацию H^- ионов в электромагнитном поле; рассчитаны оптимальные размеры магнита. Результаты расчётов по CyLab вошли в Техническое задание.

2. Показана принципиальная возможность создания сильноточных машин на базе ускорителей типа TRITRON. Существенно большее, чем в TRITRON, разделение орбит позволяет сделать вывод о том, что предлагаемые установки лишены недостатка TRITRON (малое разделение орбит, малая апертура), являющегося основной причиной проблем, возникших при его реализации.

3. Продемонстрирована возможность ускорения в изохронных секторных циклотронах пучков протонов с интенсивностью до 30 мА. Рабочей интенсивностью следует считать интенсивность 10 мА.

4. Создан комплекс программ, состоящий из:

Базы данных Cyclotrons, содержащей информацию об основных параметрах циклотронов, позволяющей быстро найти нужные сведения о необходимой установке.

Электронной Книги «Циклотрон» в пакете Mathcad, предназначенной для выбора параметров циклотрона с пространственной вариацией поля, включающей в себя аналитическую оценку частот, энергии, оптимизацию параметров магнита для компактного циклотрона, расстановки магнитов для ускорителя типа TRITRON, оценки степени электромагнитной диссоциации H^- ионов, оценки эффектов пространственного заряда.

Программ ORBITA, DINCİK, NAJO, предназначенных для проведения численных расчётов динамики пучка в циклотронах с учётом действия сил пространственного заряда.

В приложении даны тексты электронной книги «Циклотрон» пакета Mathcad.

Основные результаты диссертации опубликованы в следующих работах:

1. Борисов О.Н., Карамышева Г. А., и др. Система программ для исследования динамики частиц в циклических ускорителях, Труды XI Всесоюзного совещания по ускорителям заряженных частиц, Дубна, 1989, т.1, с.495.
2. Ворожцов С.Б., Дмитриевский В.П., Карамышева Г.А. Расчёт параметров трёхкаскадного ускорителя типа TRITRON, Сообщения ОИЯИ, P9-94-261, Дубна, 1994.
3. Vorozhtsov S.B., Dmitrievsky V.P., Karamysheva G.A., TRICYC. TRI tron – Based Analog of CYClope (Proposal), Сообщения ОИЯИ, E9-94933, Дубна, 1994.
4. Борисов О.Н., Ворожцов С.Б., Гульбемян Г.Г., Карамышева Г.А. и др., Циклотронная лаборатория (CyLab) при Словацком Метрологическом Институте, Сообщения ОИЯИ, P9-97-86, Дубна, 1997.
5. Самсонов Е.В., Карамышева Г.А., Ворожцов С.Б., Расчёт динамики частиц в циклотроне ЦИ-10, Сообщения ОИЯИ, P9-99-126, Дубна, 1999.
6. Ворожцов С.Б., Глазов А.А., Карамышева Г.А., Динамика частиц с учётом пространственного заряда в сильноточном циклотроне. (Протонный вариант), Сообщения ОИЯИ, P9-2000-239, Дубна, 2000.

7. Ворожцов С.Б., Глазов А.А., Карамышева Г.А., Самсонов Е.В., Динамика частиц с учётом пространственного заряда в сильноточном циклотроне. (Дейтронный вариант), Сообщения ОИЯИ P9-2000-274, Дубна, 2000.
8. Karamysheva G.A., Onischenko L.M., Vorozhtsov S.B., Space Charge effects in a high-current Injector Cyclotron, EPAC 2000, Vienna, 2000, p.548. Physics of Particles and Nuclei, Lett., 2001, No.2 [105]-2001.
9. Ворожцов С.Б., Глазов А.А., Карамышева Г.А., Онищенко Л.М., Эффекты пространственного заряда в циклотронах, Труды XVII Совещания по ускорителям заряженных частиц, Протвино, 2000.

Литература

1. В.П.Дмитриевский, Электроядерный метод получения энергии, Труды Международной школы молодых учёных по проблемам ускорителей заряженных частиц, Дубна, 1997, с.267.
2. Chabert A., Prome M., In Proc. of the Conf. on Accel. Design and Oper., Berlin, 1984, p.164.
3. U.Trinks. The Superconducting Separated-Orbit Cyclotron Tritron. 13-th International Conference on Cyclotrons and their Applications, July 6-10, 1992, Vancouver, Canada.
4. Grote H., Iselin F.C. The MAD Program (methodical accelerator design): version 8.4; User's Reference Manual. CERN SL 90-13 AP rev 2, CERN, 27 Aug. 1991.
5. S. Adam, Space charge effects in cyclotrons – from simulations to insights, in Proc. Cyclotrons and their Applications, Caen, 1998, p.446.
6. О.В.Савченко "Предложения по новому варианту внешней инжекции фазотрона ОИЯИ и возможностям его реализации". Дубна, 26 ноября 1999.

Рукопись поступила в издательский отдел
17 апреля 2001 года.