

ОБЪЕДИНЕННЫЙ ИНСТИТУТ ЯДЕРНЫХ ИССЛЕДОВАНИЙ

9-2005-59

На правах рукописи
УДК 621.384.633

ТРУБНИКОВ
Григорий Владимирович

**ДИНАМИКА ЧАСТИЦ В ЦИКЛИЧЕСКИХ УСКОРИТЕЛЯХ
С ФОКУСИРОВКОЙ ПРОДОЛЬНЫМ МАГНИТНЫМ ПОЛЕМ**

Специальность: 01.04.20 — физика пучков
заряженных частиц и ускорительная техника

Автореферат диссертации на соискание ученой степени
кандидата физико-математических наук

Работа выполнена в Лаборатории ядерных проблем им. В.П. Дзелепова
Объединенного института ядерных исследований.

Научные руководители:

Доктор физико-математических наук, профессор,
член-корреспондент РАН

И.Н. Мешков

кандидат физико-математических наук

А.О. Сидорин

Официальные оппоненты:

Доктор физико-математических наук,
член-корреспондент РАН

Г.Д. Ширков
(ОИЯИ)

Доктор физико-математических наук

Е.Б. Левичев
(ИЯФ им.Г.И.Будкера СО РАН)

Ведущая организация:

Институт теоретической и экспериментальной физики, Москва

Защита диссертации состоится _____ 2005 г. в "_____"
часов на заседании диссертационного совета Д 720.001.03 в Объединенном
институте ядерных исследований, г.Дубна Московской области.

Автореферат разослан "_____" _____ 2005 г.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке Объединенного института
ядерных исследований.

Ученый секретарь диссертационного совета
доктор физико-математических наук



Ю.А. Батусов

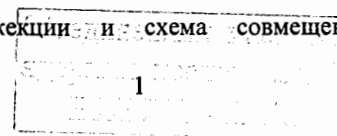
Общая характеристика работы

Актуальность темы

Модифицированный бетатрон представляет собой ускоритель с фокусировкой продольным (азимутальным) магнитным полем. Первоначально такие ускорители были предложены для получения электронных пучков с током несколько килоампер и энергией несколько десятков МэВ. Впоследствии накопитель электронов с аналогичной структурой фокусирующей системы был предложен в качестве системы электронного охлаждения с циркулирующим электронным пучком при энергии охлаждаемых ионов несколько ГэВ. Подобный накопитель, используемый для накопления и электронного охлаждения позитронов с энергией несколько кэВ, может быть использован для генерации интенсивных потоков позитрония и антиводорода (в комбинации с накопителем антипротонов).

Одной из проблем модифицированного бетатрона является сложность инжекции и вывода замагниченных пучков. В азимутально-симметричной структуре эту проблему решить не удалось. В случае использования секционированной структуры в таком накопителе, благодаря наличию прямолинейных промежутков, появляются дополнительные возможности для размещения устройств впуска-выпуска, диагностики, электронного охлаждения и т.п.

В 1998 г. в ОИЯИ были начата разработка и сооружение накопителя позитронов низкой энергии LEPTA, предназначенного для генерации интенсивных потоков позитрония и экспериментов с ними в принципиально новой постановке. Второй возможный вариант работы накопителя – использование его в качестве системы электронного охлаждения с циркулирующим электронным пучком с энергией 2-4 МэВ. В сентябре 2004 года был осуществлен физический пуск этого накопителя с циркулирующим электронным пучком при энергии 1-10 кэВ. В этом накопителе реализована оригинальная схема инжекции и схема совмещения циркулирующего



2. Физический проект фокусирующей системы накопителя LEPTA, предназначенного для генерации потоков атомов позитрония.
3. Получение устойчивого циркулирующего электронного пучка в накопителе LEPTA.
4. Результаты экспериментальных исследований динамики частиц в накопителе LEPTA.

Апробация работы

Материалы диссертации докладывались на отечественных и международных конференциях по ускорителям заряженных частиц: российских конференциях по ускорителям заряженных частиц: XVII (2000г., Протвино), XVIII (2002 г., Обнинск) и XIX (2004 г., Дубна), европейских конференциях по ускорителям EPAC'2000 (Вена, Австрия), EPAC'2002 (Париж), EPAC'2004 (Люцерн, Швейцария), приглашенный доклад на Международной конференции по физике антипротонов низкой энергии LEAP'2003 (Йокогама, Япония), Международных конференциях по компьютерным расчетам в физике ускорителей ICAP'2000 (Дармштадт, Германия), ICAP'2004 (Санкт Петербург), Международных совещаниях по охлаждению пучков заряженных частиц ESOOL'1999 (Упсала, Швеция), COOL'2001 (Бед Хоннеф, Германия), ESOOL'2003 (Фуджи, Япония), Международной конференции по атомной физике на ускорителях APAC'2001 (Дания), 4-й, 5-й и 6-й конференции молодых ученых и специалистов (Дубна, 2000, 2001, 2002 г.г.), международных научных семинарах памяти В.П. Саранцева (Дубна, 2001, 2003 г.г.), неоднократно обсуждались на научных семинарах в Объединенном Институте Ядерных Исследований.

Публикации

Основные результаты исследований, составивших основу диссертации, опубликованы в 12 печатных работах.

Структура и объем диссертации

Диссертация состоит из введения, четырех глав, заключения и списка литературы из 46 наименований. Общий объем: 117 страниц.

Содержание диссертационной работы

Содержание работы изложено в четырех главах.

В главе 1 дан обзор циклических ускорителей типа модифицированный бетатрон - ускорителей с дополнительной азимутальной компонентой магнитного поля, позволяющей осуществить эффективную фокусировку интенсивного пучка при малой энергии ускоряемых частиц, а также разновидностей модифицированных бетатронов – стеллатронов, в которых устойчивость частиц обеспечивается введением дополнительного спирального мультиполюсного поля, аналогичного полю стелларатора. Цель разработки таких установок – получение интенсивных электронных пучков (с током несколько килоампер) с энергией несколько десятков МэВ.

Ускоряющая система модифицированного бетатрона основана на том же принципе, что и в классическом бетатроне – вихревое электрическое поле создается переменным во времени потоком магнитного поля, пронизывающим орбиту.

При проектировании существовавших установок для исследования устойчивости движения частицы в азимутально-симметричном модифицированном бетатроне анализировались уравнения движения частицы в присутствии тороидального B_0 и неоднородного поворотного B_z магнитных полей и собственных полей интенсивного электронного пучка. Решение этих уравнений, с учётом пространственного заряда, имеет довольно громоздкий вид. В одночастичном приближении анализ значительно упрощается, и при малой энергии частиц, или большой величине продольного поля, система уравнений движения имеет четыре собственных значения, и все они чисто мнимые и приближённо

равны:

$$\lambda_{1,2} \approx \pm \frac{i}{\rho_L}, \quad \lambda_{3,4} \approx \pm \frac{i\rho_L \sqrt{(1-n) \cdot n}}{R_0^2}, \quad i \equiv \sqrt{-1}.$$

Здесь ρ_L - ларморовский радиус, R_0 - радиус тора, n - показатель спада поворотного магнитного поля. Первая пара собственных чисел соответствует быстрому (ларморовскому) вращению частицы вокруг силовой линии продольного поля, два других - медленному вращению пучка как целого. Частота ларморовского вращения, как правило, намного превосходит частоту медленного вращения:

$$\omega_L = \frac{\beta c}{2\pi\rho_L} \gg \omega_{slow} = \frac{\beta c}{2\pi} \cdot |\lambda_{3,4}|.$$

Аналогичный эффект фокусировки может быть достигнут введением мультипольного спирального поля, при этом спиральная обмотка занимает весь периметр ускорителя.

Преимуществом использования продольного магнитного поля являются увеличение предельного тока и времени жизни пучка, т.к. оба эти параметра существенно зависят от жёсткости фокусировки ускорителя.

Несколько установок типа модифицированный бетатрон были созданы и экспериментально исследованы в США в середине 80-х, начале 90-х годов прошлого века. Ни на одной из этих установок не были получены проектные параметры пучка, и экспериментальные исследования на этих установках были прекращены в середине 90-х годов. Основными причинами неудач были сложность схемы инжекции пучка в продольное поле и резонансы, связанные с ларморовским вращением электронов, которые приводили к гибели пучка на высоких энергиях.

С целью изучения возможностей применения модифицированного бетатрона для генерации позитрония и антиводорода, а также для электронного охлаждения циркулирующим пучком, в ОИЯИ был создан накопитель LEPTA (Low Energy Particle Toroidal Accumulator), физический пуск которого с циркулирующим электронным пучком был осуществлен в сентябре 2004 г.

Этот накопитель имеет секционированную структуру и представляет собой кольцевую систему соленоидов, помещенных в общий магнитный экран, состоящую из двух тороидальных и двух прямолинейных секций, с размещенной внутри вакуумной камерой. Короткая спиральная обмотка квадрупольного поля присутствует лишь на небольшом участке орбиты и располагается в одном из прямолинейных соленоидов. Проблема инжекции пучка в накопитель решена за счет использования септумных обмоток специальной конструкции и электрического кикера. Для совмещения и разведения электронного и позитронного пучков используется центробежный дрейф электронов на тороидальных участках накопителя, что также является оригинальной чертой данного проекта. Модифицированный бетатрон ОИЯИ предполагается использовать в двух вариантах. Первый - индукционное ускорение электронов до энергии в несколько МэВ для системы электронного охлаждения с циркулирующим электронным пучком. Этот проект носит название MOBY (MOdified Betatron prototYpe). Второй вариант - накопление без ускорения циркулирующего пучка позитронов с энергией до 10 кэВ с электронным охлаждением позитронов - LEPTA. Для генерации позитрония величина продольного магнитного поля определяется из требований совмещения циркулирующего позитронного пучка и однопролетного электронного и составляет 400 Гс при энергии позитронов 10 кэВ.

Таблица 1. Проектные параметры установки МОВУ/ЛЕРТА.

Параметры кольца	МОВУ	ЛЕРТА
Периметр, м	17,17	
Продольное магнитное поле, Гс	1000	400
Радиус тороидов, м.	1,45	
Поперечное магнитное поле в тороидах, Гс	2,4→124	2,4
Длина спирального квадрупольа, м и число шагов его спирали	1,6 2	
Градиент квадрупольного магнитного поля, Гс/см	10–20	
Давление остаточного газа, Торр	10^{-10}	
Параметры электронного пучка		
Энергия, кэВ	10 → 4360	10
Ток, А	0,1	0,5
Радиус электронного пучка, см	1	
Параметры позитронного пучка		
Энергия, кэВ	–	10
Число частиц	–	$1 \cdot 10^9$
Радиус пучка, см	–	0,5

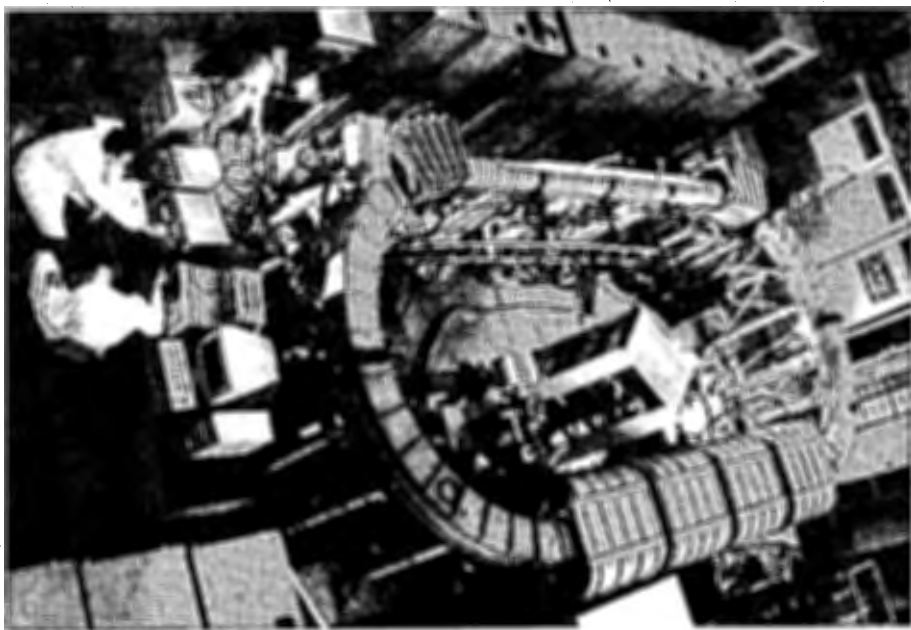


Рис. 1. Общий вид накопителя ЛЕРТА в экспериментальном зале.

Глава 2 посвящена описанию методики проектирования фокусирующих систем накопителей с продольным магнитным полем. Представлена схема расчета коэффициентов матриц преобразования. Дан обзор матричных методов анализа устойчивости движения и расчета структурных функций, описана методика анализа динамики частиц в накопителе с продольным магнитным полем.

В этой главе рассмотрены матрицы преобразования, полученные для всех элементов фокусирующей структуры накопителя с продольным магнитным полем: прямолинейная секция с продольным магнитным полем, тороидальная секция с продольным и поперечным (поворотным) магнитными полями, тороидальная секция с дополнительным спиральным квадрупольным полем, прямолинейная секция с продольным магнитным полем и дополнительным спиральным квадрупольным полем.

В секционированной структуре вид уравнений движения различен в разных оптических элементах, и исследование динамики целесообразно проводить с использованием матричного формализма. Анализ устойчивости движения, а также расчет дисперсионных функций кольца проводится в этом случае полностью аналогично анализу жесткофокусирующих накопителей. Для матрицы преобразования накопителя описаны методы анализа устойчивости движения частиц и расчета дисперсионных функций.

В присутствии продольного магнитного поля движение частиц, в отличие от обычных жесткофокусирующих ускорителей, является связанным в горизонтальной и вертикальной плоскостях. В работе показано, как для расчета инвариантов движения частицы и структурных функций накопителя при связанном движении следует применять один из двух известных методов - метод Эдвардса–Тенга, либо метод нахождения собственных векторов матрицы перехода, записанной для канонически сопряженных переменных. Приведен обзор методов расчета структурных функций накопителя с жесткой связью поперечных степеней свободы.

Ввиду специфики элементов оптической структуры модифицированного бетатрона ни одна из существующих в настоящее время компьютерных программ,

традиционно используемых для проектирования ускорителей, не позволяет исследовать вопросы, связанные с эволюцией параметров пучка в таких установках. Поэтому для численного моделирования динамики частиц в накопителях со связанным движением в ОИЯИ была разработана специальная программа BETATRON. Программа производит анализ устойчивости движения циркулирующего пучка и строит диаграмму устойчивости движения частиц (рис.2), рассчитывает структурные функции накопителя, критическую энергию, позволяет оценить кулоновский сдвиг частот колебаний, осуществляет траекторный анализ и рассчитывает параметры проекций траектории частицы на поперечные фазовые плоскости. Кроме того, программа позволяет оценить методом усреднения ширину и мощность некоторых нелинейных (2-го и 3-го порядков) резонансов.

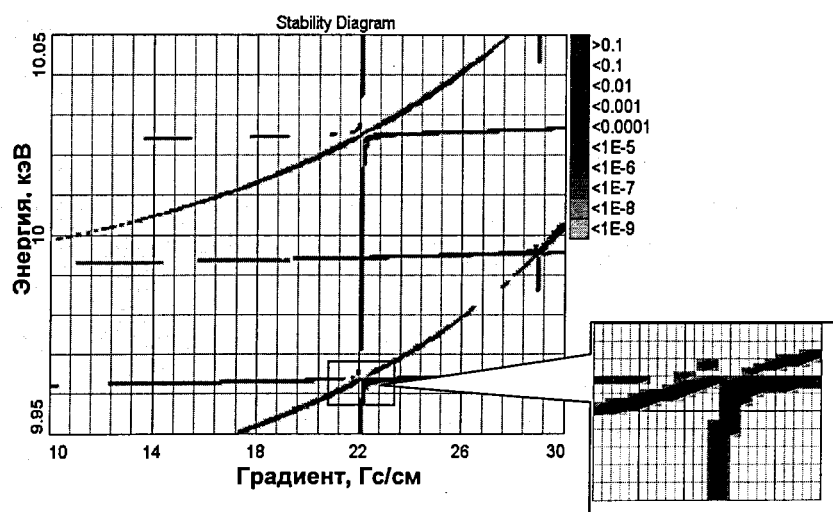


Рис. 2. Пример диаграммы устойчивости движения частиц. Справа показан укрупненный фрагмент, позволяющий оценить ширину и мощность резонансов.

Схема расчета динамики частиц, основанного на матричном методе канонически сопряженных переменных, включает в себя построение оптической структуры из фокусирующих элементов с продольным магнитным полем. При этом определяются параметры каждого элемента (геометрические размеры,

магнитное поле и др.). На их основе формируется матрица преобразования всей структуры и производится расчет собственных чисел этой матрицы, а также дисперсионных функций. Дальнейший траекторный анализ преобразованных собственных векторов позволяет рассчитывать в любой точке накопителя структурные функции и параметры согласованного пучка в фазовом пространстве. Диаграмма устойчивости строится в координатах “Энергия - Градиент квадрупольной спиральной линзы”, поскольку именно эти параметры являются определяющими для устойчивого движения частиц. Такая диаграмма позволяет исследовать положение рабочей точки при ускорении и фиксированном значении продольного магнитного поля.

Третья глава содержит физическое обоснование основных параметров накопителя ЛЕРТА. Приводятся оценки эффектов согласования инжекции и диффузионных процессов, влияющих на время жизни пучка. Приведены результаты расчетов динамики пучка и оптимизации структурных и дисперсионных функций накопителя.

Основное назначение установки – электронное охлаждение позитронов и генерация интенсивных потоков атомов позитрония. В этом режиме энергия циркулирующего позитронного пучка постоянна и составляет примерно 10 кэВ, а его интенсивность, определяемая возможностями инжектора на базе радиоактивного источника, не превышает 50 мкА. Проектная величина продольного магнитного поля в этом режиме работы составляет 400 Гс, что соответствует более чем 300 шагов ларморовской спирали позитронов на периметре накопителя. Можно ожидать, что резонансы столь высокого порядка не будут существенно влиять на качество пучка. Для эффективного электронного охлаждения угловой разброс согласованного позитронного пучка не должен превышать несколько миллирадиан. Наиболее серьезным требованием к накопителю в этом режиме является обеспечение большого времени жизни циркулирующих позитронов, что при низкой энергии является серьезной проблемой. Основными целями при разработке физического проекта являлись:

оптимизация параметров позитронного пучка в секции охлаждения для обеспечения эффективного электронного охлаждения и интенсивной рекомбинации электронов и позитронов и определение требований к параметрам установки, ограничивающим время жизни пучка. С этой же целью требуются малый поперечный размер пучка и минимальный эксцентриситет поперечного сечения, что достигается минимизацией значений дисперсионных функций и бета- и альфа-функций.

Спиральная квадрупольная обмотка с адиабатическим изменением градиента поля на входе и выходе размещается внутри соленоида секции охлаждения. Обмотка, составляющая два шага спирали, имеет длину 1.6 м. При проектных параметрах накопителя LEPTA (табл. 1) устойчивое движение циркулирующего пучка обеспечивается при градиенте квадрупольного поля 10–15 Гс/см. При этом бетатронное число, соответствующее медленной моде колебаний, имеет значение 0.3–0.4. Бетатронное число, соответствующее ларморовской моде колебаний, лежит в интервале между 343-м и 344-м целыми резонансами и слабо зависит от величины градиента спирального поля. Сами резонансы ларморовской моды имеют очень высокий порядок и почти незаметны на диаграмме устойчивости (рис. 2). Изменением тока спиральной квадрупольной обмотки можно достаточно просто регулировать положение рабочей точки накопителя.

В случае, когда число шагов спиральной намотки квадрупольной линзы нецелое, из анализа матрицы преобразования накопителя на устойчивость следует, что в районе малых значений градиента движение частицы будет неустойчиво, и область устойчивости сокращается. Требования к погрешностям геометрии квадрупольной обмотки определяются необходимым размером области устойчивости.

С помощью программы BETATRON были рассчитаны структурные функции для обеих мод колебаний. Значения структурных бета-функций, полученные в результате оптимизации: бета-функции в вертикальной и горизонтальной плоскостях составляют порядка 0.5 см, дисперсионные функции

имеют значения около 6 см горизонтальная и -2 см вертикальная, что позволит обеспечить необходимые параметры пучка в секции охлаждения.

Угловой разброс и радиус согласованного циркулирующего пучка определяются в основном градиентом спиральной квадрупольной обмотки. Численное моделирование проводилось для двух вариантов квадрупольной обмотки: со скачкообразным изменением градиента на входе и на выходе и с адиабатическим изменением. Результаты расчетов дают верхнюю оценку для углового разброса в циркулирующем пучке. Ожидаемый угловой разброс в пучке в случае резкого изменения градиента не превышает 50 миллирадиан. Для квадрупольной обмотки с адиабатически меняющимся градиентом происходит уменьшение расчетного углового разброса пучка до нескольких миллирадиан.

К основным параметрам накопителя, влияющим на время жизни, относятся: апертура вакуумной камеры, величина неоднородности магнитного поля, характерная длина возмущения поля в местах стыковки оптических элементов, вакуумные условия. А также конструктивные особенности спирального квадрупольного поля, как ключевого элемента, обеспечивающего устойчивое движение частиц - длины областей нарастания и спада градиента поля, полное число шагов спирали, величина градиента поля.

Анализ движения частиц в накопителе показывает, что эксцентриситет и угол поворота эллипса поперечного сечения согласованного пучка в точке инжекции зависят от величины градиента магнитного поля в квадрупольной линзе и от направления тока в обмотке квадрупольной линзы. В расчетах было показано, что при одной полярности тока в квадрупольной линзе (будем считать это направление "положительным") и достаточно большом градиенте, вертикальный размер поперечного сечения пучка больше горизонтального. При противоположной полярности (направление "отрицательное") соотношение размеров обратное, т.е. в одном из этих случаев часть пучка может выходить за апертуру, и время жизни при этом будет ограничено параметрами согласования в точке инжекции. Аналогично, поворот квадрупольного поля вокруг его оси сопровождается поворотом осей эллипса поперечного сечения пучка, что также может приводить к снижению времени жизни из-за апертурных ограничений. Поэтому для

оптимизации положения квадруполя, в конструкции накопителя необходимо предусмотреть возможность его механического проворота на угол $\pm \pi/2$ с точностью $\sim 15^0$.

Главными "одночастичными" эффектами, определяющими длительность времени жизни частицы в стеллатроне, являются её рассеяние на атомах остаточного газа и взаимодействие с неидеальной магнитной системой.

При оценке эффекта рассеяния частиц на атомах остаточного газа необходимо учитывать однократное упругое рассеяние - что в случае накопителя ЛЕРТА дает значение времени жизни на несколько порядков большее (от 10^2 до 10^4 раз), чем в обычных жестко-фокусирующих накопителях из-за большого "апертурного угла" - до $\pi/2$. А также диффузионный уход частиц на апертуру из-за их многократного рассеяния на остаточном газе. Время жизни частицы в последнем случае учета рассеяния пропорционально:

$$\tau_{vacuum} \propto \frac{\sqrt{Eb^2}}{P} B_0^2, \quad (1)$$

где E - энергия, b - минимальный радиус апертуры, P - давление остаточного газа, B_0 - магнитное поле.

Если за один оборот в накопителе частица проходит N_B возмущений магнитного поля протяженностью $L_B^{(i)}$ с максимальным возмущением ΔB , каждое из них, то время жизни τ_B возрастает с ростом поля и длины возмущения L_B и падает с ростом энергии частиц E как

$$\tau_B \propto \exp \left\{ \sqrt{\frac{2}{Emc^2}} \cdot eBL_B \right\} \frac{b^2}{L_B^2} \cdot \frac{T}{N_b} \cdot \sqrt{E} \cdot \left(\frac{\Delta B}{B_0} \right)^{-2}. \quad (2)$$

Здесь T - период обращения частицы. Таким образом, зависимость времени жизни от энергии электронов имеет резко нелинейный характер: τ_B резко спадает, когда величина ларморовского радиуса сравнима с длиной возмущения: $\rho_L(E) \rightarrow L_B$.

Зависимость времени жизни от диффузионных эффектов может быть оценена следующим выражением:

$$\tau_{life} = \left(\frac{1}{\tau_B} + \frac{1}{\tau_{vacuum}} \right)^{-1}.$$

На рис.3 построены соответствующие расчетные зависимости для накопителя со следующими параметрами: 6 оптических элементов, т.е 6 «стыков», ожидаемая протяженность области возмущения (стыка) ~ 6 см, амплитуда неоднородностей магнитного поля $\Delta B/B = 0.2$, энергия пучка 10 кэВ, апертура - 1.35 см.

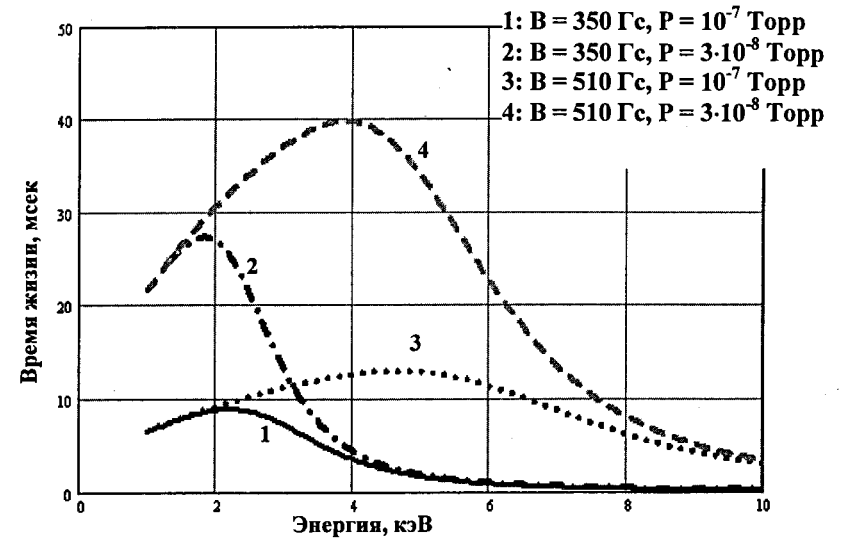


Рис.3. Расчетные значения времени жизни пучка при различных режимах.

Требования к точности основных параметров накопителя для получения устойчивой циркуляции пучка в течение времени, достаточного для электронного охлаждения позитронов и генерации позитрония представлены в Таблице 2.

Таблица 2. Требования к точности основных параметров накопителя

Радиус апертуры (ограничен участком вакуумной камеры в септуме с минимальным диаметром), см	2.5
Неоднородность магнитного поля, $(\Delta B / B)$, %	$< 5 \cdot 10^{-2}$
Характерная длина возмущения поля (сравнима с диаметром соленоидов)	~ 20
Давление остаточного газа, Торр	10^{-10}
Длина роста и спада градиента в квадруполе, см	80 (0.5 периода)
Нецелость числа шагов спирали квадрупольной обмотки, %	10
Градиент спирального квадруполя, Гс/см	15 - 20

В четвертой главе приводятся результаты экспериментальных исследований динамики циркулирующего электронного пучка в накопителе LEPTA. Физический пуск накопителя был осуществлен в сентябре 2004 г. Диагностика циркулирующего пучка осуществляется с помощью сегментных диафрагм и двух пикап-станций (вертикальной и горизонтальной). После замыкания орбиты наблюдается сигнал с пикап-станций от нескольких оборотов циркулирующего пучка. Сигналы с пикап-станций, соответствующие отдельным оборотам пучка, наблюдаются сразу после выключения кикера. Включение квадруполя позволяет получить устойчивое движение на равновесной орбите. При соответствующих настройках инжекции пучка можно наблюдать сигнал меньшей амплитуды и меньшей частоты (рис. 4). Эта медленная частота соответствует вращению пучка как целого относительно равновесной орбиты, и ее значение определяется градиентом поля в квадруполе. Сигналы медленной частоты с двух пластин пикап-станции имеют противоположную фазу, что и подтверждает вращение пучка как целого.

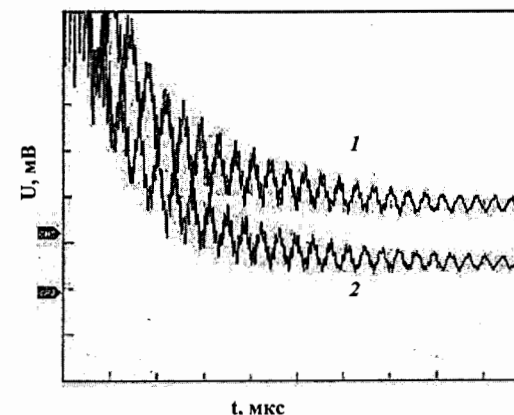


Рис. 4. Медленное вращение пучка. Цена деления по горизонтальной оси 5 мкс, по вертикальной – 5 мВ.

Экспериментальные исследования динамики циркулирующего электронного пучка показали, что полупелый резонанс медленной моды, соответствующий величине градиента спирального поля 22 Гс/см, приводит к гибели пучка. Влияние резонансов быстрой моды на параметры пучка обнаружить не удалось.

Экспериментальные измерения зависимости Q_{bet} от тока квадруполя показали, что область устойчивой циркуляции пучка лежит в пределах изменения тока квадруполя от 35 до 60 А, а бетатронное число меняется от 0.1 до 0.47 (рис. 5а). Эти измерения дают хорошее согласие с расчетными кривыми, полученными при моделировании динамики частиц в накопителе LEPTA при тех же значениях параметров накопителя, что и в эксперименте (рис. 5б).

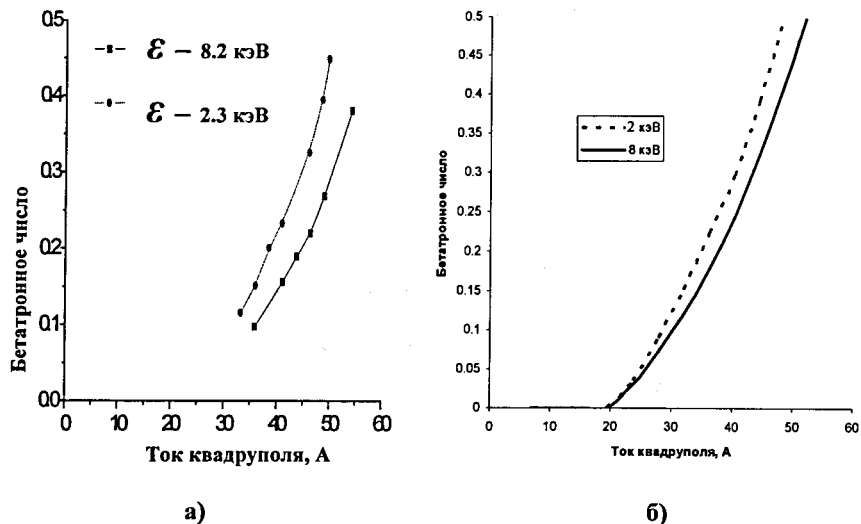


Рис. 5. Экспериментальные (а) и расчетные (б) зависимости бетатронного числа от градиента квадруполя ($B=310 \text{ Гс}$, число шагов спирали квадруполя $k=1,8$).

Измерение времени жизни пучка производилось методом сброса пучка в заданный момент времени. Для этого на одну из пластин кикера подается импульс напряжения амплитудой 500 В и с задержкой, регулируемой по времени. Это импульсное поперечное поле смещает пучок по вертикали и приводит к его гибели. При этом с пикап-станций наблюдается сигнал, пропорциональный току пучка, циркулировавшего до "удара".

Экспериментально исследовано влияние полярности питания квадруполя. Получено различие значений времени жизни пучка примерно вдвое (рис.6). Как уже сказано выше, это происходит это из-за того, что ориентация эллипса поперечного сечения согласованного пучка зависит от направления тока в обмотках квадруполя, и эллипс при определенной полярности оказывается вытянутым по горизонтали, так что его горизонтальный размер превышает расстояние между пластинами кикера (27 мм). В результате часть пучка выходит за апертуру.

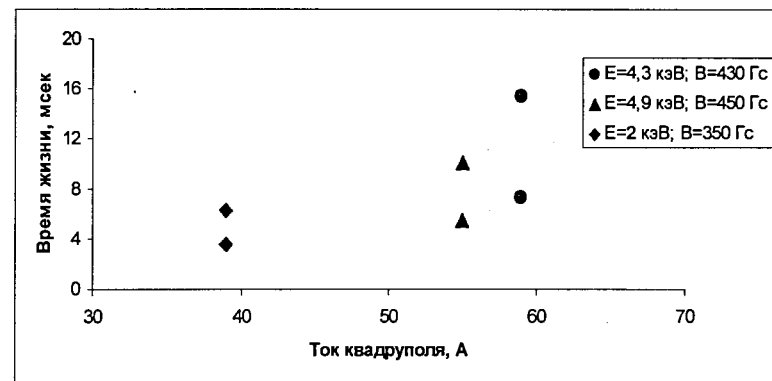


Рис. 6. Зависимость времени жизни частиц от полярности направления тока квадрупольной обмотки. Три нижние точки соответствуют «отрицательной» полярности, три верхние точки – «положительной».

В экспериментах был исследован также эффект влияния угла проворота спиральной квадрупольной линзы вокруг оси на время жизни пучка. В ходе измерений было подобрано положение стеллараторной обмотки внутри прямолинейного соленоида, обеспечивающее оптимальное значение времени жизни пучка (рис.7).

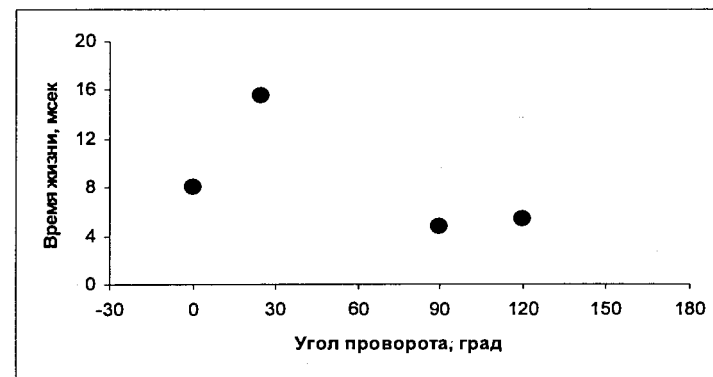


Рис. 7. Зависимость времени жизни пучка от угла проворота квадруполя. Магнитное поле $B=430 \text{ Гс}$, энергия $E=4.07 \text{ кэВ}$, градиент поля $G=20 \text{ Гс/см}$.

Экспериментальные зависимости времени жизни от энергии (рис. 8 а,б) хорошо подтверждают оценки, описанные выше, и показывают, что существуют две области значений энергии:

$$0 \leq E_I \leq E_{крит}, \quad E_{крит} < E_{II},$$

где $E_{крит} = E(B,P)$ - значение энергии, соответствующее максимума кривых на (рис. 3) области E_I время жизни хорошо аппроксимируется зависимостью (1). В области E_{II} наблюдается быстрый спад времени жизни с энергией, что можно объяснить нарушением адиабатичности движения частиц в неоднородном магнитном поле (2), и этот механизм преобладает над рассеянием на остаточном газе. Такое неоднородное магнитное поле присутствует в области стыков элементов кольца. Начиная с энергии, примерно 5 кэВ, кривые (рис. 8а) сливаются - $\tau_{life}(E)$ -уже не зависит от давления. Смещение максимума времени жизни из-за изменения магнитного поля подтверждает влияние участков возмущения поля (рис. 8б).

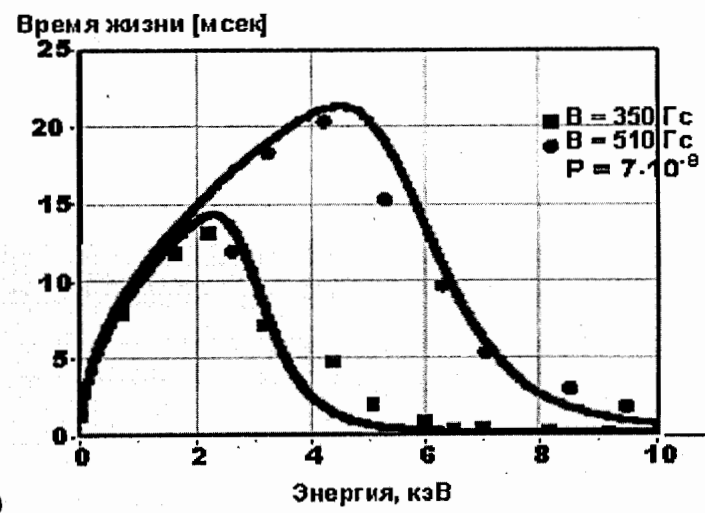
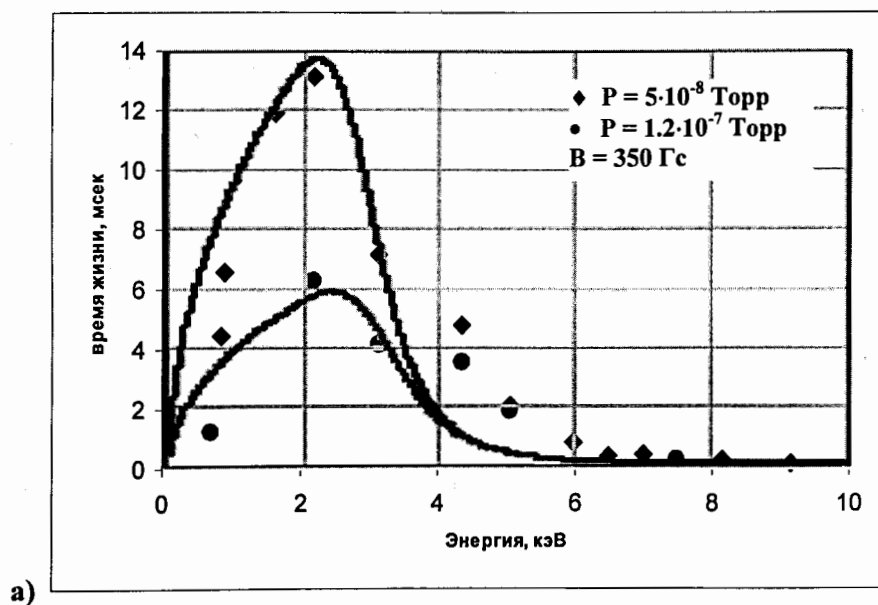


Рис. 8. Зависимости времени жизни от энергии при различных значениях давления остаточного газа (а) и основного поля (б). Точками показаны экспериментальные значения, линиями — аналитические зависимости, фитированные коэффициентами, соответствующими рабочим параметрам установки.

В заключении изложены основные результаты диссертационной работы.

Выводы

1. Впервые разработана методика проектирования фокусирующих систем секционированных накопителей с продольным магнитным и стеллараторным полями.

1.1. Выбран и оптимизирован способ расчета динамики частиц в секционированных структурах, состоящих из оптических элементов с продольным магнитным и стеллараторным полями, на основе метода канонически сопряженных переменных.

1.2. Проанализировано влияние погрешностей оптических элементов на параметры пучка.

1.3. Предложен способ расчета времени жизни пучка в таком накопителе.

2. Впервые разработан физический проект накопителя с фокусировкой продольным магнитным полем и стеллараторным полем LEPTA для генерации позитрония.

2.1. Выбраны основные параметры оптических элементов.

2.2. Сформулированы требования к степени однородности магнитных полей.

3. Получен циркулирующий электронный пучок в накопителе LEPTA, сооруженном в соответствии с разработанным проектом.

4. Результаты, полученные при расчетах динамики частиц в накопителе с продольным магнитным полем и стеллараторным полем получили экспериментальную апробацию на накопителе LEPTA и находятся в хорошем согласии с экспериментальными измерениями.

4.1. Впервые экспериментально исследованы условия устойчивости в этом накопителе.

4.2. Измерено и оптимизировано положение рабочей точки накопителя.

4.3. Измерена зависимость времени жизни циркулирующего электронного пучка от его энергии в накопителе LEPTA.

Основные результаты диссертации опубликованы в российских и иностранных рецензируемых журналах:

1. Антропов В.К., Болтушкин Е.В., Иванов А.В., Ивашкевич С.А., Калинин В.В., Коротаев Ю.В., Лохматов В.И., Мешков И.Н., Селезнев И.А., Сидорин А.О., Смирнов А.В., Сыресин Е.М., Трубников Г.В., Яковенко С.Л., Накопитель позитронов низкой энергии для генерации направленных потоков позитрония (проект LEPTA), Журнал «Атомная энергия», т. 94, вып. 1, 2003, стр. 54-57.

2. В.К. Антропов, Е.В. Болтушкин, А.В. Иванов, С.А. Ивашкевич, А.Г. Кобец, Ю.В. Коротаев, В.И. Лохматов, И.Н. Мешков, В.Н. Павлов, Р.В. Пивин, И.А. Селезнев, А.О. Сидорин, А.В. Смирнов, Е.М. Сыресин, Г.В. Трубников, С.Л. Яковенко, Проект LEPTA: первые эксперименты с электронным пучком, журнал «Письма в ЭЧАЯ», № 3(126), 2005, стр. 19-24.

3. Е.В. Болтушкин, А.Г. Кобец, Ю.В. Коротаев, В.И. Лохматов, В.Н. Малахов, И.Н. Мешков, Р.В. Пивин, И.А. Селезнев, А.О. Сидорин, А.В. Смирнов, Е.М. Сыресин, Г.В. Трубников, С.Л. Яковенко, Физический пуск накопителя LEPTA, Журнал «Атомная энергия», т.98, вып. 3, 2005 г. стр. 225-233.

4. И.Н. Мешков, А.О. Сидорин, А.В. Смирнов, Е.М. Сыресин, Г.В. Трубников, Моделирование динамики частиц в накопительных кольцах со связанным поперечным движением, Журнал «Атомная энергия», т.98, вып. 4, 2005 г., стр. 300-306.

5. A. Ivanov, Yu. Korotaev, I. Meshkov, S. Mironov, A. Petrov, A. Smirnov, A. Sidorin, G. Trubnikov, Focusing system of the modified betatron: technology, manufacturing and test, NIM A v.441(2000), Nos 1-2, p.262-266.

6. I.N.Meshkov, A.O.Sidorin, A.V.Smirnov, E.M.Syresin, G.V. Trubnikov, O.V. Zeinalova, Electron cooling of magnetized positrons, NIM A v.441(2000), Nos 1-2, p.145-149.

7. I.N.Meshkov, A.O.Sidorin, A.V.Smirnov, E.M.Syresin, G.V. Trubnikov, Particle Dynamics in the sectional modified betatron, NIM A v.441(2000), Nos 1-2, p.267-270.

8. I.N.Meshkov, A.O.Sidorin, A.V.Smirnov, G.V. Trubnikov, Electron Cooling of Positron in LEPTA, Hyperfine Interactions. 2003. Vol.146/147, No.1/4. p.197-201.

9. I. Meshkov, I. Seleznev, A. Sidorin, A. Smirnov, G. Trubnikov, S. Yakovenko, Positron storage ring for positronium and antihydrogen generation in flight: The LEPTA project, NIM B 214 (2004) p. 186-190.
10. V. Antropov, E. Boltushkin, A. Ivanov, Yu. Korotaev, V. Lohmatov, I. Meshkov, V. Pavlov, R. Pivin, I. Seleznev, A. Sidorin, A. Smirnov, E. Syresin, G. Trubnikov, S. Yakovenko, Positron storage ring LEPTA, NIM A, v. 532, 2004, p. 172-176.
11. С.Б.Федоренко, А.В. Иванов, С.А. Ивашкевич, В.В. Калиниченко, Ю.В. Коротаев, И.Н. Мешков, С.В. Миронов, А.Л. Петров, А.О. Сидорин, А.В. Смирнов, Е.М. Сыресин, Г.В. Трубников, С.Л. Яковенко, Накопитель позитронов низкой энергии для генерации направленных потоков позитрония: статус и развитие, Труды XVII Совецания по ускорителям заряженных частиц, 2000г. Протвино, т.1, стр. 87.
12. V. Antropov, E. Boltushkin, V. Bykovsky, A. Ivanov, A. Kobets, Yu. Korotaev, V. Lohmatov, I. Meshkov, D. Monahov, V. Pavlov, R. Pivin, I. Seleznev, A. Sidorin, A. Smirnov, E. Syresin, G. Trubnikov, S. Yakovenko, Particle Dynamics in the Low Energy Positron Toroidal Accumulator: first experiments and results, Proc. of EPAC'2004, Lucerne, p1396.

Получено 18 мая 2005 г.