

9-2005-60

На правах рукописи
УДК 621.384.633

СЕЛЕЗНЕВ
Игорь Алексеевич

**НАКОПИТЕЛЬ С ПРОДОЛЬНЫМ МАГНИТНЫМ ПОЛЕМ
«LEPТА»**

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, профессор

Г.М. Тер-Акопян
(ОИЯИ)

Доктор физико-математических наук

В.Н. Корчуганов
(РНЦ «КИ»)

Доктор физико-математических наук

А.В.Агафонов
(ФИАН им. Лебедева)

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, профессор



Ю.А.Батусов

Общая характеристика работы

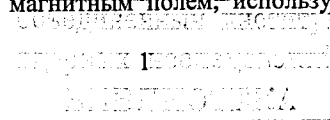
Актуальность темы

В 1998 г. в ОИЯИ были начата разработка и сооружение установки LEPTA, предназначенной для генерации интенсивных потоков позитрония и экспериментов с ними. В сентябре 2004 года был осуществлен физический пуск ключевого элемента этой установки - накопителя LEPTA (Low Energy Particle Toroidal Accumulator) с циркулирующим электронным пучком в диапазоне энергий 1-10 кэВ. В этом накопителе реализована оригинальная схема инжекции для циркулирующего пучка, схема ввода и вывода однопролетного электронного пучка, не возмущающая циркулирующий пучок. Также протестирована схема совмещения циркулирующего и однопролетного охлаждающего электронного пучков.

Для фокусировки заряженных частиц в накопителе LEPTA используется продольное магнитное поле которое присутствует на всей орбите циркулирующего пучка.

Первоначально ускорители с фокусировкой продольным (азимутальным) магнитным полем были предложены для получения электронных пучков с током несколько килоампер и энергией несколько десятков МэВ. Такие ускорители называются модифицированными бетатронами. Для формирования устойчивого движения частиц на равновесной орбите в них дополнительно к продольному магнитному полю может использоваться спиральное квадрупольное поле. Такое поле формируется стеллараторной обмоткой. Этот термин возник в физике плазмы, где для удержания плазмы в стеллараторах в дополнение к продольному магнитному полю была впервые использована спиральная мультиполярная обмотка.

Стеллараторы имеют азимутально-симметричную структуру, и для удержания плазмы (формирования замкнутых магнитных поверхностей) спиральная мультиполярная обмотка покрывает весь периметр установки. Ускорители с продольным магнитным полем, использующие для обеспечения



устойчивого движения на равновесной орбите стеллараторную обмотку, называют стеллатронами, по аналогии со стеллараторами.

Одной из проблем стеллатронов является сложность инъекции и вывода замагниченных пучков. В азимутально-симметричной структуре эту проблему решить не удалось.

Структура накопителя LEPTA является секционированной. В нем впервые стеллараторная обмотка покрывает не весь периметр равновесной орбиты, что позволяет ввести дополнительные прямолинейные промежутки для размещения устройств впуска-выпуска, диагностики, электронного охлаждения и т.п.

Экспериментальная проверка схемы инъекции и совмещения «замагниченных» циркулирующего позитронного и однопролетного электронного пучков открывает путь для широкого использования такого типа накопителей. Например, проект накопителя позитронов подобного типа разработан в рамках проекта FLAIR (GSI, Германия) для генерации потоков атомов антиводорода. Предложенная схема ввода-вывода пучка позволяет решить основные проблемы модифицированных бетатронов и дает возможность получения электронных пучков большой мощности.

В связи с вышесказанным, настоящая работа является актуальной и представляет большой интерес как для формирования потоков позитрония и антиводорода, так и для развития метода электронного охлаждения.

Основные цели работы

Данная работа имела целью разработку и тестирование отдельных элементов накопителя с продольным магнитным полем, сборку и пуск накопителя LEPTA с электронным пучком, проверку принципа совмещения «замагниченных» пучков за счет центробежного дрейфа в тороидальных соленоидах.

Научная новизна

Впервые предложена и осуществлена схема инъекции «замагниченного» пучка в накопитель с продольным магнитным полем без возмущения пучка, циркулирующего на равновесной орбите.

Впервые протестирована оригинальная схема совмещения «замагниченных» электронного и позитронного пучков.

Впервые предложена и осуществлена схема накопителя с продольным магнитным полем, в котором дополнительная спиральная квадрупольная обмотка покрывает не всю равновесную орбиту.

Разработана и экспериментально подтверждена математическая модель динамики циркулирующего пучка в дрейфовом приближении в накопителе с продольным магнитным полем.

Разработаны методики для измерения бетатронного числа в накопителе с продольным магнитным полем.

Практическая ценность работы

Сооружен уникальный накопитель частиц низкой энергии LEPTA, в котором реализована схема инъекции, не возмущая движение на равновесной орбите.

На накопителе LEPTA протестирован принцип совмещения «замагниченных» пучков электронов и позитронов, что подтверждает возможность его использования для генерации потоков позитрония и антиводорода.

На защиту выносятся:

1. Схема секционированного стеллатрона, в котором спиральная квадрупольная обмотка покрывает часть орбиты. Это позволяет инжектировать и удерживать длительное время «замагниченные» частицы, источник которых погружен в магнитное поле. Физический пуск накопителя LEPTA с циркулирующим электронным пучком, реализующего эту схему.

2. Конструкция накопителя заряженных частиц с продольным магнитным полем LEPTA.

2.1. Конструкция септума, обеспечивающая отдельный ввод в накопитель пучков позитронов и электронов без возмущения пучка, циркулирующего на равновесной орбите.

2.2. Конструкция безжелезного спирального квадрупольного, формирующего постоянный градиент в пределах апертуры и обеспечивающего устойчивость движения частиц циркулирующего пучка.

3. Экспериментальная проверка на накопителе с продольным магнитным полем LEPTA схемы совмещения двух «замагниченных» пучков, основанного на центробежном дрейфе частиц в тороидальных соленоидах. При этом движение позитронного пучка моделировалось пучком электронов, циркулирующих в накопителе, а орбита однопролетного пучка электронов формировалась при изменении направления поворотного поля в торах на противоположное.

4. Модель динамики частиц в секционированном накопителе с продольным магнитным полем в дрейфовом приближении, и ее экспериментальное подтверждение на накопителе LEPTA.

5. Методика настройки основных оптических элементов накопителя с фокусировкой продольным магнитным полем, методика формирования замкнутой орбиты и методика измерения бетатронного числа и экспериментальное подтверждение их эффективности на накопителе LEPTA.

Апробация работы

Материалы диссертации докладывались на российских конференциях по ускорителям заряженных частиц RuPAC: XVIII (2002 г., Обнинск) и XIX (2004 г., Дубна), европейских конференциях по ускорителям EPAC'2002 (Париж), EPAC'2004 (Люцерн, Швейцария), на международной конференции по физике антипротонов низкой энергии LEAP'2003 (Йокогама, Япония), международном совещании по охлаждению пучков заряженных частиц ESCOOL'2003 (Фуджи, Япония), международных научных семинарах памяти В.П. Саранцева (Дубна,

2001, 2003 г.г.), неоднократно обсуждались на научных семинарах в Объединенном Институте Ядерных Исследований.

Публикации

Результаты исследований, составивших основу диссертации, опубликованы в 8 печатных работах.

Структура и объем диссертации

Диссертация состоит из введения, четырех глав, заключения и списка литературы из 27 наименований. Общий объем: 99 страниц.

Содержание диссертационной работы

Содержание работы изложено в четырех главах.

В главе 1 приведена схема установки LEPTA, описаны отдельные элементы накопителя и изложены принципы совмещения однопролетного электронного пучка и циркулирующего позитронного.

Установка LEPTA состоит из инжектора позитронов, накопителя позитронов с системой электронного охлаждения и системы детектирования потока позитрония. Позитронный инжектор включает в себя β^+ активный источник на основе изотопа Na^{22} и ловушку Пеннинговского типа. Ловушка предназначена для предварительного накопления позитронов и последующей их однооборотной инжекции в накопитель.

Ключевым элементом установки является накопитель, предназначенный для удержания на стационарной орбите и электронного охлаждения позитронов с энергией примерно 10 кэВ. Атомы позитрония образуются при рекомбинации электронов и позитронов в секции охлаждения.

Из-за небольшой энергии позитронов для фокусировки циркулирующего пучка используется продольное магнитное поле в комбинации с дополнительным спиральным квадрупольным полем. Такая геометрия полей характерна для модифицированного бетатрона и его разновидности – стеллатрона. Но, в отличие

от стеллатронов, разработанных и исследованных в США, структура накопителя LEPTA не обладает азимутальной симметрией, и спиральное квадрупольное поле присутствует только на небольшой части орбиты в прямолинейной секции. Эта особенность позволяет реализовать оригинальную схему инъекции, обеспечивающую раздельный ввод в накопитель пучков позитронов и электронов без возмущения пучка, циркулирующего на равновесной орбите.

Для реализации предложенных принципов инъекции и совмещения пучков был разработан и сооружен накопитель LEPTA. Он состоит из двух прямолинейных секций, которые соединены между собой тороидальными секциями (рис. 1.). Фокусирующая система накопителя LEPTA представляет собой кольцевую систему соленоидов, установленных вплотную друг к другу, и помещенных в общий магнитный экран. Вакуумная камера размещена внутри соленоидов.

Первая прямолинейная секция включает в себя септум и кикер, который находится сразу после септума. Эта (септумная) секция располагается внутри овального септумного соленоида, который состоит из четырех одинаковых секций длиной 1 м. Секция, соединяющая септумную и вторую прямолинейную секцию, представляет собой три тороидальных соленоида круглого сечения. Два из них, с диаметром обмотки 196 мм, обеспечивают поворот на 150° . А третий, с диаметром обмотки 400 мм, обеспечивает поворот еще на 30° . Большой диаметр этого соленоида выбран, чтобы обеспечить возможность вывода пучка атомов позитрония в экспериментальный канал диаметром 80 мм по оси прямолинейной секции. При этом, стыковка всех соленоидов, формирующих продольное магнитное поле, выполнена практически без зазора, что является необходимым условием для формирования однородного продольного поля. Соленоиды второй прямолинейной секции имеют длину 1 м с диаметром обмотки 196 мм. Внутри этой секции располагается спиральный квадруполь, с противоположной стороны она соединена с септумной секцией через вторую тороидальную секцию, которая есть зеркальное отражение первой.

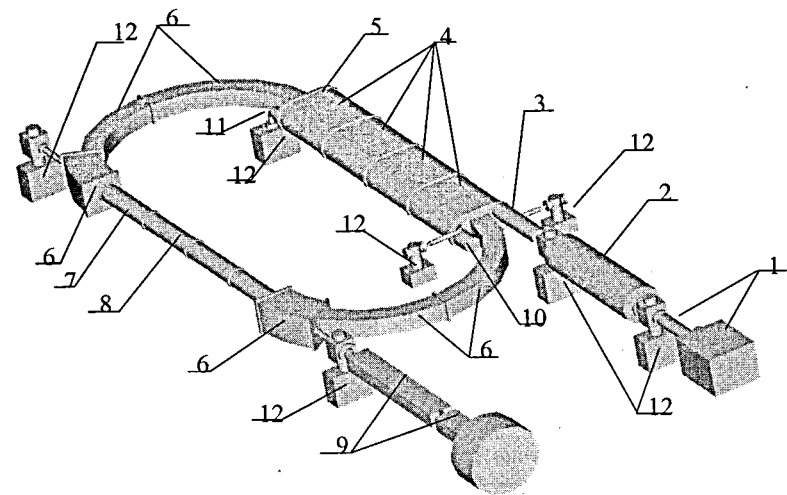


Рис. 1. Схема установки LEPTA. 1- источник позитронов, 2- позитронная ловушка, 3- транспортировочный канал, 4- септумный соленоид, 5- кикер, расположенный внутри септумного соленоида, 6- тороидальные соленоиды, 7- спиральный квадруполь, расположенный внутри прямолинейной секции, 8- прямолинейная секция, 9- экспериментальный канал, 10- электронная пушка, 11- коллектор электронов системы электронного охлаждения, 12- вакуумные насосы.

Проектные параметры накопителя LEPTA приведены в таб. 1.

Таблица 1. Проектные параметры накопителя LEPTA.

Периметр, м	17,2
Энергия циркулирующих частиц, кэВ	1 – 10
Продольное магнитное поле, Гс	300 – 1000
Радиус тороидальных секций, м.	1,45
Поворотное магнитное поле в торах, Гс	0 – 3
Длина спирального квадруполя, м и число шагов его спирали	1,6 2
Градиент квадрупольного магнитного поля, Гс/см	0 – 20
Радиус циркулирующего пучка, см	0,6
Давление остаточного газа, Торр	10^{-10}
Период обращения, нсек	300 – 2000

Сложность инжекции пучка в накопитель с продольным магнитным полем связана с тем, что «замагниченные» электронный и позитронный пучки транспортируются ко входу накопителя с помощью отдельных соленоидов, и для приведения обоих пучков на равновесную орбиту их необходимо сместить в направлении, перпендикулярном продольному полю, на расстояние порядка диаметра соленоида.

Эта задача решается с помощью инжекционного комплекса, который включает в себя электрический кикер и специальные септумные обмотки, расположенные внутри септумного соленоида. Инжекционный комплекс накопителя LEPTA предназначен для однооборотной инжекции позитронного пучка на равновесную орбиту, ввода и вывода из накопителя однопролетного электронного пучка системы электронного охлаждения.

Электрический кикер, расположенный сразу за септумом, включается только в момент инжекции. Он обеспечивает вертикальное смещение инжектируемого пучка на равновесную орбиту.

Горизонтальное смещение осуществляется септумными обмотками. Они

выполнены в виде двух соленоидов прямоугольного сечения, которые формируют дополнительное магнитное поле, направленное перпендикулярно к продольному полю септумного соленоида. Септумные обмотки расположены симметрично относительно медианной плоскости накопителя – над и под ней, а их магнитные поля имеют противоположное направление (рис. 2.). Такая схема расположения обмоток позволяет, с одной стороны сформировать достаточно однородное отклоняющее поле внутри обмоток и свести к минимуму рассеянные поля в области равновесной орбиты, так что они практически не возмущают движение циркулирующего пучка.

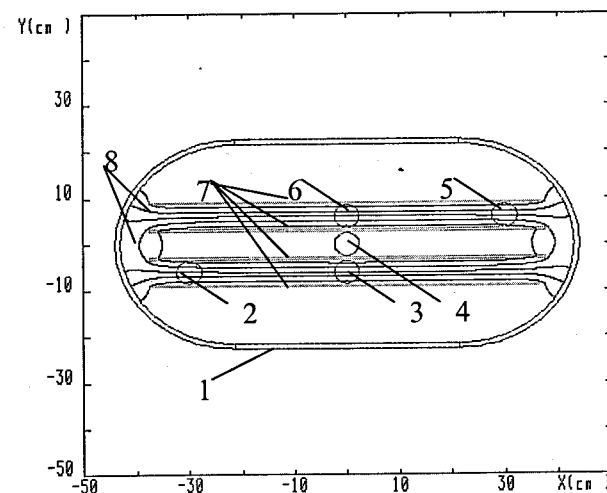


Рис. 2. Схема расположения септумных обмоток:

1 – септумный соленоид с магнитным экраном, 2 – транспортировочный канал для ввода электронного пучка, 3 – канал для вывода циркулирующего пучка, 4 – канал равновесной орбиты циркулирующего пучка, 5 – канал для ввода позитронного пучка, 6 – канал для вывода электронного пучка, 7 – септумные обмотки, формирующие поперечное магнитное поле, 8 – силовые линии магнитного поля, сформированного септумными обмотками.

Вакуумная камера внутри септумных обмоток состоит из нескольких отдельных каналов, которые располагаются в трех параллельных горизонтальных плоскостях (рис. 3.). В медианной плоскости располагается канал равновесной орбиты для циркулирующего пучка, направленный параллельно оси септумного соленоида.

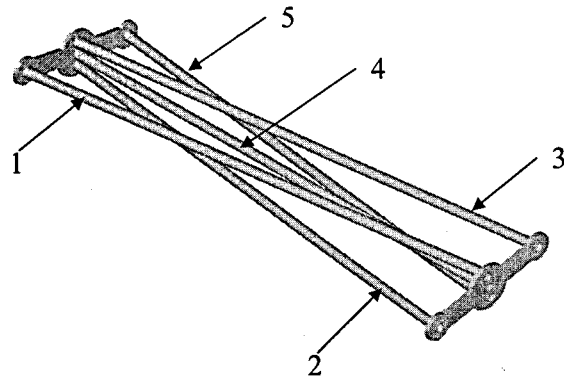


Рис. 3. Схема размещения транспортировочных каналов внутри септума: 1 – канал вывода электронного пучка, 2 – канал ввода электронного пучка, 3 – канал для инжекции позитронного пучка, 4 – канал циркулирующего пучка, 5 – канал для вывода циркулирующего пучка.

Выше медианной плоскости находятся каналы инжекции позитронного пучка и вывода электронного, они расположены внутри верхней септумной обмотки. Ниже медианной плоскости и внутри нижней септумной обмотки расположен канал ввода электронного пучка. В результате суперпозиции магнитных полей септумных обмоток и поля септумного соленоида силовая линия суммарного магнитного поля имеет тот же угол наклона к продольной оси, что и вакуумные камеры для ввода и вывода пучков. В верхней обмотке силовая линия направлена от внешней стороны накопителя ко внутренней, в нижней плоскости – в противоположном направлении. В результате, после прохождения

септумных обмоток пучок позитронов из инжектора оказывается над равновесной орбитой накопителя, а пучок электронов из электронной пушки под равновесной орбитой. Для реализации такой схемы инжекции были разработаны и изготовлены септумные обмотки, которые позволяют привести инжектируемые пучки на расстояние примерно 6 см выше или ниже равновесной орбиты.

Для генерации потока атомов позитрония необходимо совместить однооборотный охлаждающий пучок электронов с циркулирующим позитронным пучком. В накопителе с продольным магнитным полем, из-за равенства масс позитрона и электрона, совмещение и разведение пучков является достаточно сложной проблемой. Сведение и разведение пучков электронов и позитронов в вертикальном направлении в накопителях с продольным магнитным полем может быть осуществлено за счет центробежного дрейфа электронов в тороидальных секциях.

При движении заряженной частицы в тороидальном соленоиде, возникает центробежный дрейф. Дрейфовая скорость V_d равна:

$$V_d = \frac{pcV}{eB_0R} \frac{[\vec{B}_0 \times \vec{R}]}{B_0R}, \quad (1)$$

$$|V_d| = \frac{\rho_L}{R} V$$

а ее направление определяется векторным произведением $[\vec{B}_0 \times \vec{R}]$ с учетом знака заряда e . Здесь p – импульс частицы, e – ее заряд, V – ее продольная скорость, c – скорость света, R – радиус кривизны орбиты в тороидальных секциях, B_0 – значение продольного магнитного поля, ρ_L – радиус ларморовского вращения:

$$\rho_L = \frac{pc}{eB_0}. \quad (2)$$

Формулы (1, 2), и все последующие в данной работе записаны в Гауссовой системе.

В поле тороидального соленоида частица движется под углом α к силовой линии, который равен:

$$\alpha = \frac{V_d}{V} = \frac{\rho_L}{R}. \quad (3)$$

Величина вертикального смещения частицы в тороидальном соленоиде Δ , вызванного центробежным дрейфом, не зависит от радиуса поворота и определяется выражением

$$\Delta = \varphi \rho_L \quad (4)$$

где φ – угол поворота, а направление дрейфа определяется знаком заряда частицы. В торах для компенсации дрейфа циркулирующего на равновесной орбите пучка прикладывается дополнительное дипольное магнитное поле, значение которого B_{bend} равно

$$B_{bend} = \frac{pc}{eR} \text{ или } B_{bend} = \frac{\rho_L}{R} B_0 \quad (5)$$

Дополнительное поворотное поле, компенсирующее дрейф позитронов, удваивает вертикальное смещение электронного пучка, и при угле поворота равном π величина смещения составляет $2\rho_L$. При энергии электронов и позитронов $E = 10$ кэВ смещение электронного пучка по вертикали на тороидальном участке 6 см обеспечивается при продольном магнитном поле $B_0 = 400$ Гс. Требуемая величина смещения определяется конструкцией септума.

Для формирования устойчивого движения в накопителе с продольным магнитным полем вводится дополнительная стеллараторная обмотка (спиральный квадруполь). В накопителе LEPTA используется спиральный квадруполь оригинальной конструкции. В отличие от квадрупольных обмоток, использовавшихся на других стеллатронах, спиральный квадруполь, установленный в накопителе LEPTA (рис. 4.) в каждом сечении повторяет геометрию безжелезной «линзы Панофского» квадратного сечения.

Достоинством такой конструкции является постоянство градиента поля по радиусу в пределах апертуры. Численное моделирование полей показывает, что величина относительного изменения градиента поля на размерах пучка мене 1%.

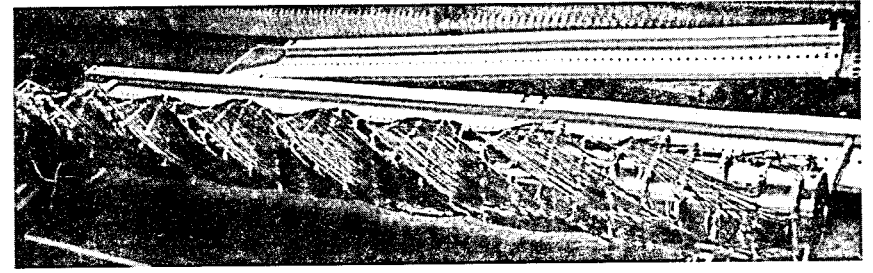


Рис. 4. Спиральный квадруполь, подготовленный для установки в накопитель. Витки квадрупольной обмотки наложены на квадрат со стороной – 12 см.

Глава 2 посвящена описанию динамики циркулирующего пучка в дрейфовом приближении. Дрейфовое приближение анализирует поведение оси ларморовской спирали, относительно которой вращается частица. Оно основано на усреднении движения частиц по быстрой ларморовской частоте вращения. Дрейфовое приближение можно использовать в случае, если $f_{rev} \ll f_L$ (f_{rev} – частота обращения пучка, f_L – ларморовская частота) или для отдельных элементов накопителя, длина которых $L_{element} \gg 2\pi\rho_L$.

Движение частиц в каждой секции накопителя может быть описано матрицей, которая преобразует координаты центра «ларморовского кружка» от входа к выходу. В этом приближении матрица прямолинейного соленоида является единичной, т.к. он не меняет положения центра вращения частицы. Матрица тороидального соленоида имеет вид:

$$M_{tor} = \begin{pmatrix} 1 & 0 \\ \theta \left(\frac{\rho}{R_0} \right) & 1 \end{pmatrix} \quad (6)$$

где θ – угол поворота частицы в нем. Элемент в левом нижнем углу матрицы описывает центробежный дрейф для частиц, отклоняющихся от равновесной орбиты. Предполагается, что для равновесной частицы дрейф скомпенсирован соответствующим поворотным полем.

Для учета дрейфа в торе, в случае, если поворотное поле отсутствует, или скорость частицы отклоняется от расчетной (в этом случае величина смещения

пучка в вертикальном направлении не зависит от координат частиц на входе в тор), в матрицу (6) можно искусственно ввести третий столбец, элементы которого позволят учесть смещение пучка как целого при пролете тора:

$$M_{tor} = \begin{pmatrix} 1 & 0 & \delta x \\ \theta \left(\frac{\rho}{R_0} \right) & 1 & \delta y \\ 0 & 0 & 1 \end{pmatrix}, \quad (7)$$

здесь $\delta y = \rho\theta$ в случае, если поворотное поле в торе отсутствует. Если же оно присутствует, но не точно компенсирует дрейф, этот элемент позволяет фактически учесть ошибку формирования равновесной орбиты, и точно таким же образом δx позволяет учесть ошибку по горизонтальной координате x .

Для квадруполя матрица преобразования соответствует преобразованию координат силовой линии магнитного поля в нем

$$MQ = \begin{pmatrix} \cos ks & \sin ks \\ -\sin ks & \cos ks \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \cos \sqrt{k^2 - \frac{G^2}{B_0^2}} s & \frac{\left(\frac{G}{B_0} + k \right)}{\sqrt{k^2 - \frac{G^2}{B_0^2}}} \sin \sqrt{k^2 - \frac{G^2}{B_0^2}} s \\ \frac{\left(\frac{G}{B_0} - k \right)}{\sqrt{k^2 - \frac{G^2}{B_0^2}}} \sin \sqrt{k^2 - \frac{G^2}{B_0^2}} s & \cos \sqrt{k^2 - \frac{G^2}{B_0^2}} s \end{pmatrix}. \quad (8)$$

Матрица кольца M_{ring} , составленная из матриц элементов, параметризуется стандартным образом, но параметры Твисса в нашем случае описывают не положение эллипса Флоке на фазовой плоскости, а форму поперечного сечения пучка. В дрейфовом приближении следствием теоремы Лиувилля является сохранение площади поперечного сечения пучка.

В дрейфовом приближении проведен анализ устойчивости вращения пучка как целого относительно оси квадруполя, рассчитана форма поперечного сечения пучка во всех элементах накопителя.

Третья глава содержит методики и результаты тестирования отдельных элементов накопителя.

Для тестирования схемы инъекции септум был собран вместе с кикером, и они были установлены в септумном соленоиде в штатном положении. На выходе тестируемых каналов септума были установлены люминесцентные экраны. К кикеру была присоединена электронная пушка системы электронного охлаждения. Пушка располагалась внутри своего соленоида. Она позволяла инжектировать пучок в направлении противоположном штатному (в результате выход тестового пучка соответствовал входу пучков в штатном режиме, рис. 5.).

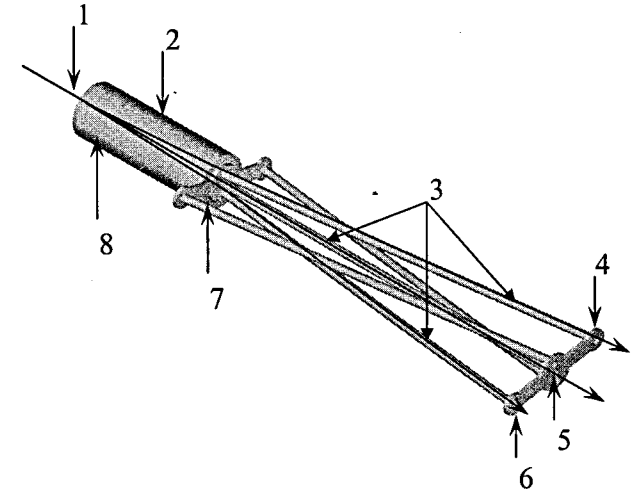


Рис. 5. Тестирование схемы инъекции: 1 – положение электронной пушки при тестировании инъекционного комплекса, 2 – кикер, 3 – тестируемые каналы септума, 4 – положение люминофора на входе в канал инъекции позитронного пучка, 5 – положение люминофора на входе в канал равновесной орбиты, 6 – положение люминофора на входе в канал для ввода электронного пучка, 7 – положение диафрагмы на входе в кикер, 8 – положение диафрагмы на выходе из кикера.

Пушка работала в импульсном режиме. Пучок инжектировался в кикер, где под действием горизонтального электрического поля он смещался в вертикальном направлении вверх или вниз в зависимости от знака напряжения, приложенного к пластинам кикера. Продольное магнитное поле создавалось соленоидами септума и пушки.

В результате механической юстировки септума и подбора тока в септумных обмотках удалось, меняя только напряжение на пластинах кикера, добиться прохождения тока от пушки к каждому из трех люминофоров (по очереди) при фиксированном токе септумных обмоток.

Важным результатом было то, что прохождение пучка по каналу равновесной орбиты не зависело от значения тока в септумных обмотках, что подтверждает отсутствие влияния рассеянных полей септумных обмоток на пучок в этом канале. Результаты тестирования позволили настроить инжекционный комплекс и показали работоспособность предложенной схемы инжекции.

Для обеспечения устойчивости циркулирующего пучка в накопителе с продольным магнитным полем спиральный квадруполь должен поворачивать пучок как целое вокруг оси квадруполя. Угол поворота пучка в квадруполе пропорционален квадрату градиента магнитного поля в нем:

$$\Delta\varphi \approx Q_0 L, \quad Q_0 \equiv \frac{G^2}{2kB_0^2} \quad (9)$$

где G – градиент магнитного поля, $k=1/h$, h – шаг спиральности квадруполя, L – его длина.

Тестирование квадруполя проводилось импульсным электронным пучком диаметром 13 мм. На пути пучка перед квадруполем была установлена диафрагма с двумя отверстиями диаметром 1,5 мм, разнесенными по вертикали, с расстоянием между ними 10 мм. Таким образом, диафрагма формировала два тонких луча. Положение пучков после прохождения квадруполя наблюдалось на люминесцентном экране. Один из них выводился коррекциями поперечного поля на ось квадруполя, а угол поворота второго φ измерялся в зависимости от тока квадруполя (рис. 6.), погрешность измерения угла не превышала 5° .

Экспериментальные результаты находятся в хорошем соответствии с теоретической зависимостью (9).

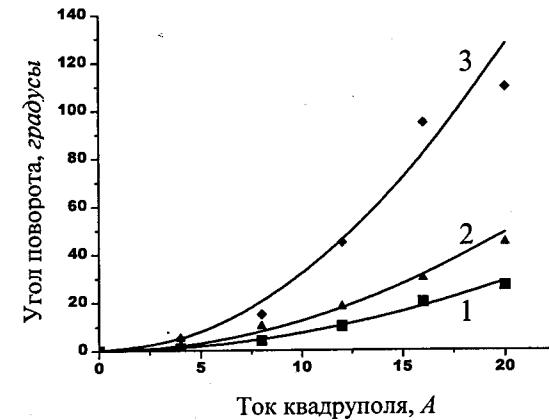


Рис. 6. Зависимость угла поворота пучка от тока квадруполя; продольное магнитное поле B_0 (Гс) равно 533 (1), 400 (2), 267 (3).

Для проверки трассировки орбиты однопролетного электронного пучка накопитель был собран (рис. 7.), электронная пушка установлена в штатное положение, а в канал для вывода однопролетного электронного пучка системы электронного охлаждения установлен люминофор. Трассировка орбиты электронного пучка системы электронного охлаждения была проведена в импульсном режиме.

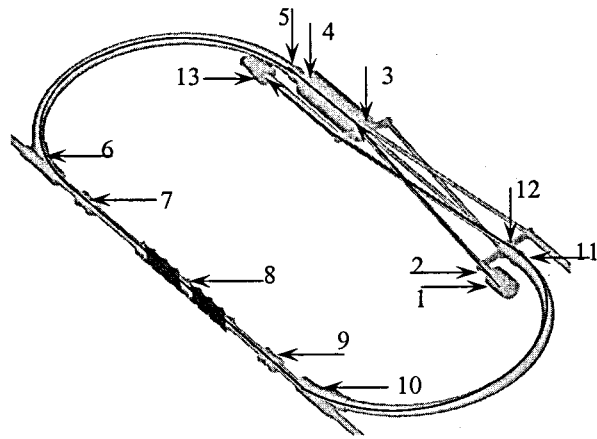


Рис. 7. Схема трассировки орбиты пучка системы электронного охлаждения: 1 – электронная пушка, 2 – положение вертикальной и горизонтальной коррекций пучка на входе в септум, 3 – диафрагма на входе в кикер, 4 – диафрагма на выходе из кикера, 5 – положение вертикальной и горизонтальной коррекций на входе в тор, 6 – положение вертикальной и горизонтальной коррекций на входе в прямолинейную секцию, 7 – вертикальная пикап-станция, 8 – спиральный квадруполь, 9 – горизонтальная пикап-станция, 10 – положение вертикальной и горизонтальной коррекций на выходе из прямолинейной секции, 11 – положение вертикальной и горизонтальной коррекций на входе в септум, 12 – положение диафрагмы на входе в септум, 13 – положение люминофора.

В результате, были проверены все каналы септума, определены параметры коррекций, а также значения токов, формирующих поворотное поле в торах. Направление поворотного поля в торах соответствовало компенсации центростремительного дрейфа для позитронов.

В четвертой главе приводится методика формирования равновесной орбиты в накопителе с продольным магнитным полем и экспериментальные результаты.

При выключенном квадруполе, контролируя положение пучка по сегментным диафрагмам и пикапам, с помощью коррекций расположенных на кольце (рис. 7.) удается получить несколько оборотов циркулирующего пучка (рис. 8.). Сигналы от нескольких оборотов наблюдаются после выключения кикера (момент времени *a*).

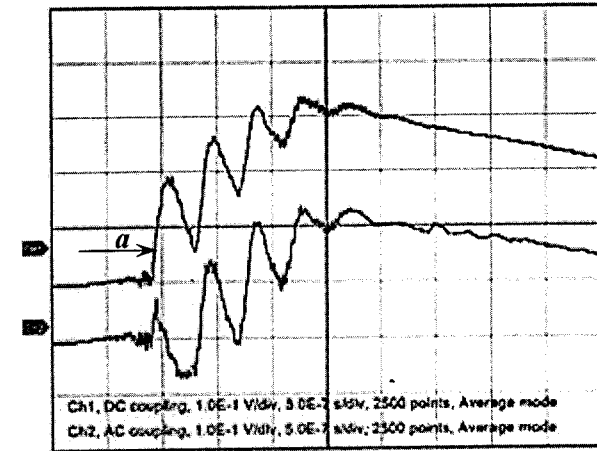


Рис. 8. Сигналы с электродов вертикальной пикап-станции. Развертка 0.5 мкс/дел, чувствительность 0.1 В/дел. Верхняя кривая – сигнал с верхнего электрода пикап-станции, нижняя – с нижнего; *a* – момент выключения кикера.

После включения квадруполя характер влияния коррекций на положение равновесной орбиты меняется. Поведение равновесной орбиты при изменении коррекций может быть исследовано в дрейфовом приближении. Для этого в матрицу накопителя добавляются матрицы, учитывающие влияние коррекций:

$$M_{LEPTA} = M_{shift} M_{tor} M_{shift} M_Q M_{shift} M_{tor} M_{shift} M_{solenoid}, \quad (10)$$

$$M_{shift} = \begin{pmatrix} 1 & 0 & \delta x \\ 0 & 1 & \delta y \\ 0 & 0 & 1 \end{pmatrix}, \quad (11)$$

где M_{shift} – «матрица смещения» и $\delta x, \delta y$ – коррекции орбиты по x и y .

Величины $\delta x, \delta y$ произвольны и независимы для различных матриц, они учитывают величину смещения пучка коррекцией в соответствующих точках кольца (см. рис. 7.).

Для определения смещения равновесной орбиты в любой точке кольца необходимо построить его матрицу, начиная с этой точки. Тогда вектор смещения орбиты в этой точке будет вычисляться по формуле:

$$\Delta = (M_{ring} - E)^{-1} \cdot \delta, \quad (12)$$

где $\Delta = \begin{pmatrix} \delta x \\ \delta y \end{pmatrix}$ – вектор смещения равновесной орбиты в этой точке, M_{ring} – верхний левый блок матрицы кольца M_{LEPTA} размерностью 2×2 , E – единичная матрица, δ – вектор составленный из двух верхних элементов третьего столбца матрицы кольца. Параметры эллипса Флоке определяются верхним левым блоком матрицы кольца M_{LEPTA} размерностью 2×2 , а положение его центра определяется третьим столбцом этой матрицы.

В аналитическом виде результаты расчетов, выполненных по формуле (12), оказываются громоздкими, и их сложно анализировать. Поэтому на рис. 9. приведены результаты численных расчетов для некоторых конкретных значений градиента в квадруполе.

Из рис. 9. следует, что при малом значении градиента $G = 7.5$ Г/см коррекция $\delta_x = 4$ см приводит к смещению равновесной орбиты на величину $\Delta_y = 6$ см, в то время как $\delta_y = 4$ см соответствует $\Delta_x = 10$ см. Поэтому для получения равновесной орбиты в пределах апертуры значения градиента квадруполя должны быть достаточно велики, чтобы смещение равновесной орбиты, вызванное коррекцией, было по крайней мере не больше величин δ_x и δ_y . В нашем случае это $G \geq 10$ Г/см.

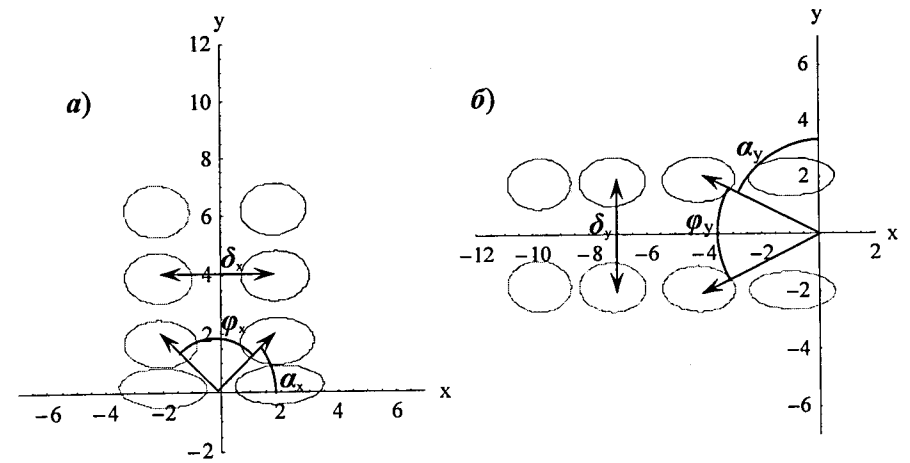


Рис 9. а) Изменение формы поперечного сечения пучка и его положения на входе в квадруполь (эллипсы, расположенные справа от оси y) и на выходе из него (эллипсы, расположенные слева от оси y) в зависимости от градиента квадруполя при горизонтальной коррекции $\delta x = 4$ см. Градиент, сверху вниз 7.5, 9, 12, 17 Г/см. α_x – угол между направлением коррекции и направлением смещения равновесной орбиты под ее воздействием, ϕ_x – угол поворота пучка в квадруполе. б) То же, для вертикальной коррекции $\delta y = 4$ см. Градиент, слева на право 7.5, 9, 12, 17 Г/см. На входе в квадруполь (эллипсы, расположенные выше оси x) и на выходе из него (эллипсы, расположенные ниже оси x). α_y – угол между направлением коррекции и направлением смещения равновесной орбиты под ее воздействием, ϕ_y – угол поворота пучка в квадруполе.

Для получения устойчивого движения циркулирующего электронного пучка на равновесной орбите направление поворотного поля в тороидальных секциях было изменено на противоположное, с целью компенсировать центробежный дрейф для электронов. После замыкания орбиты с включенным квадруполем в сентябре 2004 г был осуществлен физический пуск накопителя LEPTA с циркулирующим электронным пучком.

Тем самым, существование в одной структуре орбиты для однопролетного электронного пучка и равновесной орбиты для циркулирующего электронного пучка при изменении направления поворотного поля в торах, экспериментально подтверждает принцип совмещения «замагниченных» пучков электронов и позитронов в накопителях с продольным магнитным полем, основанный на центробежном дрейфе частиц в тороидальных соленоидах.

Однако дальнейшее исследование параметров машины потребовало увеличения градиента магнитного поля в квадруполе. С этой целью квадруполь был перемотан проводником большего диаметра (рис. 10.)

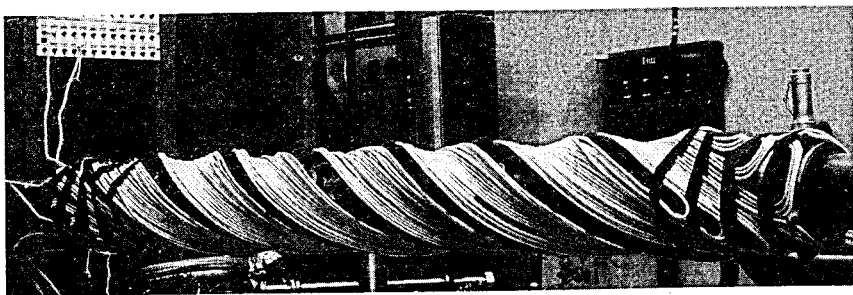


Рис. 10. Спиральный квадруполь, собранный на вакуумной камере. Длина квадруполя $L = 2h$ и составляет 1.6 м, где $h = 0.8$ м – шаг спиральности. В поперечном сечении квадруполь – квадрат со стороной 12 см. В каждой из четырех обмоток по 10 витков, диаметр медной шины 3.5 мм.

При соответствующих настройках инжекции пучка наблюдается сигнал небольшой амплитуды и с частотой меньше частоты обращения (рис. 11.). 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 подтверждает вращение пучка как целого.

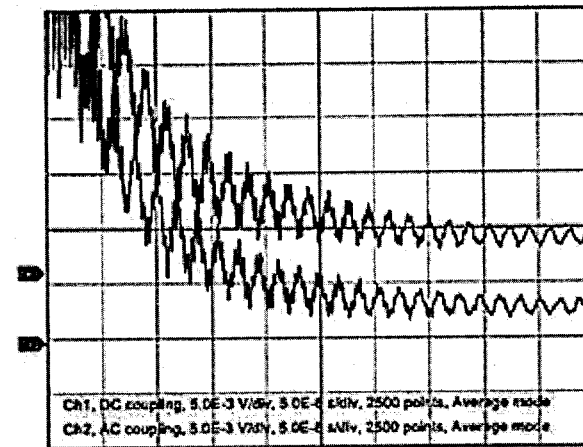


Рис. 11. Сигналы с электродов пикап-станции: медленное вращение пучка, развертка 5 мкс/дел.

Угол поворота пучка, как целого, за один оборот, фактически, является «медленным» бетатронным числом Q_{slow} :

$$Q_{slow} = \frac{f_{slow}}{f_{revolution}}, \quad (13)$$

Для измерения времени жизни циркулирующего пучка на одну из пластин кикера подавалось импульсное напряжение, которое сбрасывало пучок за апертуру (рис. 12.). Сразу после выключения кикера (момент времени a) начинается циркуляция и на протяжении примерно 10 мкс наблюдаются сигналы от отдельных оборотов пучка. Затем пучок расплывается и занимает весь периметр накопителя, и поэтому он не наблюдается пикап-электродами. Затем выключается пушка (момент времени b) на сигнале с пикап-электрода присутствует наводка длительность примерно 8 мкс, а после нее до подачи импульса, «убивающего» пучок (момент времени c), наблюдаются сигналы от медленной моды. Одновременно с подачей импульса на пластину кикера, с пикап-электрода наблюдается сигнал, амплитуда которого пропорциональна току пучка, циркулирующего в этот момент.

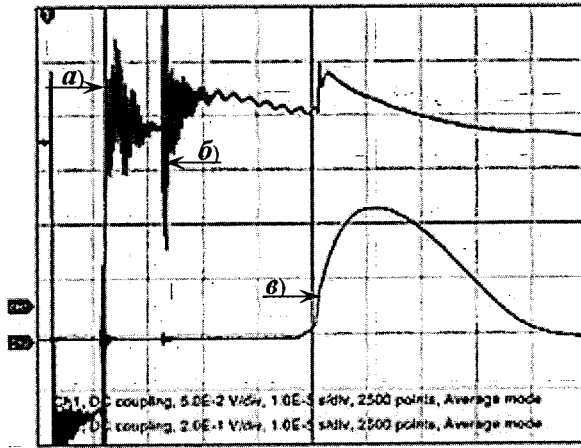


Рис. 12. Импульс напряжения на пластине кикера, «убывающий» пучок (нижняя кривая) и сигнал с пикап-электрода (верхняя кривая). Момент времени *a* – выключение кикера, *b* – выключение пушки, *v* – подача импульсного сигнала на пластину кикера. Развертка 10 мкс/дел.

Параметры пучка и накопителя, достигнутые в результате физического пуска, приведены в таб. 2.

Таблица 2. Результаты физического пуска накопителя LEPTA.

Продольное магнитное поле, Гс	300 – 500
Энергия циркулирующего пучка, кэВ	1- 9
Ток квадруполя, А	32 – 57
«Медленное» бетатронное число	0.1 – 0.47
Ток инжектируемого пучка, мА	10
Коэффициент захвата	0.5
Число циркулирующих частиц	$3 \cdot 10^{10}$
Время жизни для электронов с энергией 4 кэВ, мс	22
Давление остаточного газа, Торр	$7 \cdot 10^{-8}$

Методика сброса циркулирующего пучка на апертуру позволяет не только измерить зависимость амплитуды сигналов с пикап-электродов от времени и, тем самым, определить время жизни, но также определить положение равновесной орбиты по отношению к пикап-электродам. Для измерения влияния коррекций на положение равновесной орбиты использовалась коррекция, расположенная на выходе из прямолинейной секции, в которой установлен квадруполь. В этом случае изменение тока коррекции не приводит к изменению положения инжектируемого пучка в квадруполе.

Результаты, полученные в процессе одновременного измерения сигналов с двух пар пикап-электродов (вертикальной и горизонтальной) при фиксированном токе квадруполя (таб. 3.), показывают, что квадруполь вращает пучок на разный угол в зависимости от положения точки входа пучка в него.

Независимое измерение угла поворота пучка относительно оси квадруполя среднего за несколько оборотов пучка в накопителе по методике, основанной на формуле (13), при тех же параметрах дает величину $\varphi = 90^\circ$. Связь между углами φ_x , φ_y и φ описывается равенством:

$$\varphi = \frac{1}{2}(\varphi_x + \varphi_y). \quad (14)$$

Таблица 3. Измеренные и рассчитанные углы поворотов пучка.

	Экспериментальные данные	Результаты моделирования
α_x	53°	59°
φ_x	74°	62°
α_y	36°	31°
φ_y	108°	118°
$\varphi = (\varphi_x + \varphi_y)/2$	91°	90°

Хорошее совпадение экспериментально измеренного и рассчитанного в рамках дрейфового приближения перемещения равновесной орбиты под влиянием коррекций подтверждает справедливость этой модели. Также эти

измерения позволяют независимо определять медленное бетатронное число и определять ориентацию эллипса поперечного сечения пучка.

В заключении изложены основные результаты диссертационной работы.

Выводы

1. Сооружен накопитель LEPTA, представляющий собой секционированный стеллатрон, в котором спиральная квадрупольная обмотка покрывает часть орбиты. Такая схема реализована впервые.
2. Разработан и протестирован септум, впервые реализующий схему ввода в накопитель с продольным магнитным полем пучков электронов без возмущения пучка, циркулирующего на равновесной орбите.
3. Разработан и реализован безжелезный спиральный квадруполь, формирующий постоянный градиент в пределах апертуры и обеспечивающий устойчивость движения частиц пучка, циркулирующего в накопителе.
4. Произведен физический пуск накопителя LEPTA с циркулирующим электронным пучком.
5. Впервые на накопителе с продольным магнитным полем экспериментально подтвержден принцип совмещения двух «замагниченных» пучков, основанный на центробежном дрейфе частиц в тороидальных соленоидах. В экспериментах движение позитронного пучка моделировалось пучком электронов, циркулирующих в накопителе, а орбита однопролетного пучка электронов формировалась при изменении направления поворотного поля в торах на противоположное.
6. На основе предложенной модели динамики частиц в дрейфовом приближении для накопителей с продольным магнитным полем выработаны методики настройки основных оптических элементов накопителя, формирования замкнутой орбиты циркулирующих частиц, получения устойчиво циркулирующего пучка, измерения бетатронного числа.

7. Выработанные методики реализованы при пуске накопителя LEPTA и экспериментально подтверждена их эффективность.

Основные результаты диссертации опубликованы в рецензируемых журналах (пп. 1,2, 3, 4, 5), трудах конференций (пп. 6, 7, 8):

1. Антропов В.К., Болтушкин Е.В., Иванов А.В., Ивашкевич С.А., Калининченко 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), Атомная энергия, т. 94, вып. 1, 2003, 54-57.
2. 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.
3. 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, Письма в ЭЧАЯ, № 3(126), 2005, стр 19-24.
4. 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.
5. 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) 186-190.
6. Антропов В.К., Болтушкин Е.В., Иванов А.В., Ивашкевич С.А., Калининченко 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), Труды RUPAC'2002, Обнинск, т. 1, 395.

7. V. Antropov, E. Boltushkin, A. Ivanov, Y. Korotaev, V. Lohmatov, I. Meshkov, V. Pavlov, I. Seleznev, A. Sidorin, A. Smirnov, E. Syresin, G. Trubnikov, S. Yakovenko, The Low Energy Positron Storage Ring for Positronium Generation: Status and Developments, Proceedings of EPAC2002, Paris, p.1103
8. 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.