

ОБЪЕДИНЕННЫЙ ИНСТИТУТ ЯДЕРНЫХ ИССЛЕДОВАНИЙ

9-2005-153

На правах рукописи
УДК 621.384.633

КОРОТАЕВ
Юрий Владимирович

**ВЛИЯНИЕ ИОНОВ ОСТАТОЧНОГО ГАЗА
НА ПРОЦЕСС ЭЛЕКТРОННОГО ОХЛАЖДЕНИЯ**

Специальность: 01.04.20 — физика пучков заряженных частиц
и ускорительная техника

Автореферат диссертации на соискание ученой степени
кандидата физико-математических наук

Дубна 2005

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

Научные руководители:

доктор физико-математических наук, профессор,
член-корреспондент РАН
кандидат физико-математических наук

И.Н.Мешков
А.О.Сидорин

Официальные оппоненты:

член-корреспондент РАН,
доктор физико-математических наук

доктор физико-математических наук

Г.Д.Ширков

М.А.Завьялов

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

Накопительные кольца тяжелых заряженных частиц - протонов, антипротонов, ионов с электронным охлаждением представляют новое средство физического эксперимента в физике высоких энергий, ядерной и атомной физике, физике пучков.

Ионный пучок, инжектируемый в накопитель, имеет начальный разброс скоростей и большой поперечный размер. Для накопления и формирования ионных пучков с малым разбросом скоростей и малым эмиттансом Г.И.Будкером был предложен метод электронного охлаждения. Метод позволяет создать в пучке ионов эффективное трение, уменьшающее его фазовый объем (эмиттанс) и разброс его частиц по энергии. Идея метода заключается в том, что на прямолинейном участке накопителя вводится интенсивный пучок электронов, имеющих ту же среднюю скорость, что и пучок тяжелых частиц, и малый разброс по скоростям. За счет кулоновского взаимодействия между частицами температура электронов и ионов выравнивается, в результате чего уменьшается разброс продольных скоростей ионов и пучок сжимается.

Транспортировка электронного пучка в системе электронного охлаждения сопровождается ионизацией остаточного газа в вакуумной камере. В результате возможно накопление в электронном пучке образующихся при этом ионов. Их присутствие существенно влияет на процесс электронного охлаждения. С одной стороны, ионы нейтрализуют собственный пространственный заряд электронного пучка, что приводит к уменьшению разброса продольных скоростей электронов по сечению пучка и значительно повышает эффект охлаждения (сокращается время охлаждения). С другой стороны, в трехкомпонентной системе (охлажденные быстрые ионы + охлаждающие электроны + медленные ионы остаточного газа) возможно развитие различного рода «плазменных» неустойчивостей, вызывающих нагрев охлажденных ионов и подавляющих тем самым эффект охлаждения.

Уровень нейтрализации можно регулировать искусственно. Для этого используются электростатические «пробки», которые устанавливаются на входе и выходе участка охлаждения. Электростатические пробки предотвращают уход ионов остаточного газа вдоль оси пучка, а их уход поперек пучка затруднен полем пространственного заряда электронного пучка.

Главной проблемой при формировании нейтрализованного интенсивного электронного пучка является возникновение так называемой *пучково-дрейфовой неустойчивости*. Неустойчивость приводит к разрушению нейтрализации и, соответственно, к резкому изменению потенциала пучка, что делает невозможным эффективное охлаждение ионных пучков. Однако, при устойчивом нейтрализованном состоянии электронного пучка время охлаждения пучков ионов низкой интенсивности существенно уменьшается. Например, на накопителе LEAR (ЦЕРН) было экспериментально продемонстрировано, что время охлаждения ионов свинца при нейтрализации электронного пучка может быть уменьшено примерно в два раза.

С другой стороны, при накоплении интенсивных ионных пучков наличие в электронном пучке облака ионов остаточного газа может приводить к неустойчивости циркулирующего пучка ионов, что впервые было обнаружено на накопителе HIMAC (NIRS, Япония). Ионы остаточного газа могут накапливаться в электронном пучке и без специальных мер его нейтрализации. Например, изменение диаметра вакуумной камеры вдоль оси системы электронного охлаждения приводит к изменению потенциала на оси электронного пучка и запираению ионов в продольном направлении. Это так называемая «естественная нейтрализация». При накоплении интенсивных ионных пучков необходимо принимать специальные меры по снижению уровня естественной нейтрализации ниже порога развития неустойчивостей.

Для управления уровнем нейтрализации в системах электронного охлаждения нужно использовать специальные средства, позволяющие активно регулировать плотность накопленных ионов остаточного газа на участке охлаждения.

Таким образом, экспериментальные исследования нейтрализованного состояния электронного пучка в системах электронного охлаждения и влияния нейтрализации на устойчивость охлаждаемого пучка ионов, а также разработка специальных средств по контролю и управлению уровня нейтрализации являются *актуальной задачей*.

Основные цели работы

Данная работа имела следующие цели:

экспериментальное исследование процесса нейтрализации пространственного заряда электронного пучка ионами остаточного газа в системах электронного охлаждения: исследование влияния масс-спектрального состава накопленных ионов на устойчивость нейтрализованного электронного пучка;

разработка средств диагностики и управления нейтрализацией;

исследование влияния ионов, накопленных в электронном пучке, на процесс охлаждения интенсивного протонного пучка в накопителе с электронным охлаждением;

разработка технического предложения конструкции системы электронного охлаждения для накопителя ТВН (ИТЭФ, Москва);

анализ влияния нейтрализации на процесс генерации позитрония в накопителе LEPТА (ОИЯИ, Дубна).

Научная новизна

Впервые экспериментально показано, что состав ионов остаточного газа влияет на устойчивость нейтрализованного состояния электронного пучка: порог развития неустойчивостей возрастает при увеличении атомного номера нейтрализующих ионов.

Впервые экспериментально исследовано влияние состава ионов остаточного газа в нейтрализованном электронном пучке на устойчивость циркулирующего протонного пучка в накопителе-синхротроне COSY (исследовательский центр Юлих, Германия): наличие ионов остаточного газа в

электронном пучке существенно снижает порог развития когерентной неустойчивости в циркулирующем пучке протонов.

Впервые определены требования к степени нейтрализации пространственного заряда электронных пучков и способы управления ею в системах электронного охлаждения накопителей ТВН и LEPTA.

Практическая ценность работы

Полученные результаты позволяют оптимизировать работу систем электронного охлаждения в накопителях заряженных частиц.

Разработаны элементы систем электронного охлаждения накопителей ТВН и LEPTA, позволяющие осуществить контроль и управление нейтрализацией пространственного заряда электронного пучка: электростатические пробки и экраны.

Разработана система возбуждения колебаний ионов для их очистки в охлаждающем электронном пучке ТВН.

На защиту выносятся:

1. Устройство для измерения зарядово-массового состава ионов, накопленных в нейтрализованном замагниченном электронном пучке.
2. Результаты экспериментальных исследований зависимости порога развития неустойчивости нейтрализованного состояния электронного пучка от состава ионов остаточного газа на стенде «Рекуператор» (ОИЯИ, Дубна).
3. Результаты экспериментальных исследований влияния состава ионов остаточного газа на процесс электронного охлаждения пучка протонов в синхротроне COSY.
4. Требования к конструкциям систем электронного охлаждения для оптимального использования нейтрализации.
5. Техническое предложение конструкции системы электронного охлаждения накопителя ТВН.

Апробация работы

Материалы диссертации докладывались на XV Совещании по ускорителям заряженных частиц (г. Протвино, 1996), международных совещаниях МЕЕС'98 (г. Дубна, 1998г.), Space charge effect (г. Дубна, 1999), STORI'2002 (г. Упсала, 2002), Европейской конференции по ускорителям EPAC'2002 (г. Париж, 2002 г.), XVIII Всероссийской конференции по ускорителям заряженных частиц RUPAC'2002 (г. Обнинск, 2002 г.), 33rd ICFA Advanced Beam Dynamics Workshop on High Intensity and High Brightness Hadron Beams (Беншейм, 2004), на международных совещаниях по электронному охлаждению ECOOL (г. Дубна, 1996 г., г. Упсала, 1998 г., г. Бад Хоннеф, 2000 г., г. Игл Ридж, 2005), неоднократно обсуждались на научных семинарах в исследовательском центре Юлих (г.Юлих, Германия) и ОИЯИ (г.Дубна).

Публикации

Результаты исследований, составивших основу диссертации, опубликованы в 15 печатных работах.

Структура и объем диссертации

Диссертация состоит из введения, трех глав, заключения и списка литературы из 70 наименований. Общий объем: 91 страниц.

Содержание диссертационной работы

Содержание работы изложено в трех главах.

Во **Введении** дается краткое описание метода электронного охлаждения и определяются проблемы, возникающие при охлаждении пучков заряженных частиц интенсивными пучками электронов. Формулируются задачи исследований, вошедших в диссертацию, обсуждаются возможный характер влияния ионов остаточного газа на процесс электронного охлаждения.

Глава 1 содержит описание стенда «Рекуператор», описания средств, специально разработанных для диагностики и управления нейтрализацией

пространственного заряда электронного пучка. В ней представлены также методики и результаты экспериментальных исследований устойчивости нейтрализованного состояния электронного пучка с использованием этих средств.

Стенд "Рекуператор", на котором проводилось исследование нейтрализованного пучка, является моделью системы электронного охлаждения. Он имеет прямолинейную вакуумную камеру длиной около 4 м и диаметром от 10 до 30 см, погруженную в продольное магнитное поле. Электронный пучок формируется электронной пушкой с регулируемым первеансом, проходит участок дрейфа (модель участка охлаждения) и поступает в коллектор, потенциал которого на 1-2 кВ превышает потенциал катода (режим рекуперации энергии электронов). Для удаления из системы электронов, не захваченных коллектором, применяются специальные чистящие электроды, размещенные в дрейфовой камере. Основные параметры стенда приведены в Таблице 1.

Таблица 1. Основные параметры стенда "Рекуператор"

Энергия электронов, кэВ	2.5	7	10
Ток пучка, А	0.01÷0.7	0.07÷1.8	0.35÷2.0
Диаметр катода, мм	30		
Вакуум, Торр	$1 \times 10^{-9} \div 1 \times 10^{-7}$		
Магнитное поле, Гс	300 - 600		

Для управления уровнем нейтрализации электронного пучка используются две электростатические "пробки Пархомчука", расположенные на расстоянии около 2 м друг от друга и формирующие участок нейтрализации, а также устройство возбуждения ионных колебаний (УВИК). Пробки запирают на участке нейтрализации положительно заряженные ионы и используются для повышения степени нейтрализации, УВИК – для ее снижения.

Принцип действия УВИК состоит в возбуждении колебаний ионов переменным электрическим полем. Если его частота совпадает с собственной частотой колебаний ионов

$$\Omega = \sqrt{\omega_i^2(1-\eta) + \omega_B^2/4} \pm \omega_B/2, \quad (1)$$

то происходит резонансное увеличение амплитуды колебаний. Это приводит к уходу ионов соответствующего сорта из участка нейтрализации. В формуле 1 $\omega_i^2 = Ze^2 n_e / 2\epsilon_0 Am_p$ и $\omega_B = ZeB / Am_p$ соответственно плазменная и циклотронная частоты ионов. Нагрев ионов с помощью УВИК стабилизирует нейтрализованный электронный пучок, но при этом увеличивается уход ионов из пучка, что приводит к снижению степени нейтрализации.

Для диагностики степени нейтрализации электронного пучка на стенде «Рекуператор» применяются два устройства: диагностический электронный пучок и времяпролетный анализатор.

Измерение степени нейтрализации диагностическим электронным пучком производится по величине азимутального смещения низко-энергичного тонкого электронного пучка, распространяющегося в продольном магнитном поле системы и поперечном электрическом и магнитных полях основного пучка параллельно его оси.

Определение степени нейтрализации времяпролетным анализатором основано на том, что средняя скорость электронов в пучке зависит от величины его пространственного заряда. Изменение сдвига фазы между сигналом возбуждения продольной модуляции электронного пучка на входе участка нейтрализации и откликом этого сигнала, измеренным на его выходе, позволяет найти значение степени нейтрализации электронного пучка.

Для диагностики устойчивости электронного пучка применяются электростатические электроды – «пикап-электроды». При развитии пучково-дрейфовой неустойчивости с пикап-электродов наблюдаются сигналы, наведенные изменяющимся зарядом электронов и ионов. Развитие неустойчивости можно также наблюдать по колебаниям уровня нейтрализации, измеряемого диагностическим пучком.

В более ранних исследовательских работах с использованием устройства возбуждения ионных колебаний, диагностического электронного пучка и времяпролетного анализатора степени нейтрализации было показано, что порог

развития неустойчивости нейтрализованного пучка зависит от частоты сигнала УВИК. Было сделано предположение, что воздействие УВИК на пучок изменяет состав ионов, нейтрализующих электронный пучок. Для прямого измерения состава ионов, накопленных в электронном пучке, был разработан времяпролетный ионный масс-анализатор (ВПМА). Прибор позволяет определить отношение A/Z для ионов, извлекаемых из электронного пучка, по времени пролета ионами участка дрейфа фиксированной длины (до точки их регистрации). ВПМА (рис.1) установлен на участке нейтрализации электронного пучка и находится в продольном магнитном поле. Он состоит из экстрактора 1 и ионного коллектора 2. Расстояние между ними около 40 см. Экстрактор (рис.2) представляет собой короб с открытыми торцами, через которые проходит электронный пучок 3. Потенциал корпуса экстрактора равен потенциалу вакуумной камеры 4. Периодичность подачи импульсов экстракции ограничен снизу временем нейтрализации электронного пучка. В эксперименте этот период определялся в основном временем готовности высоковольтных генераторов 5 и 6 и составлял 0,5 сек. Заряд ионов, поступивших на коллектор, измеряется диагностической электроникой 7. Компьютер 8 осуществляет управление и контроль электроники ВПМА.

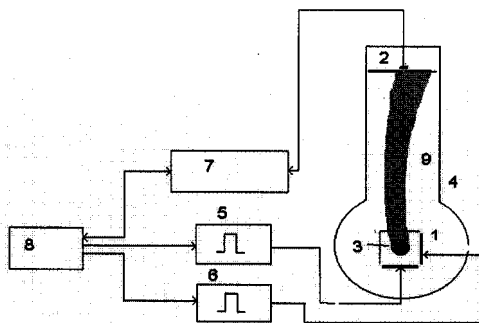
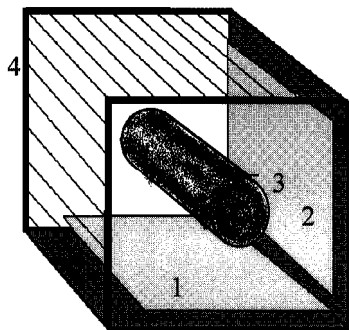
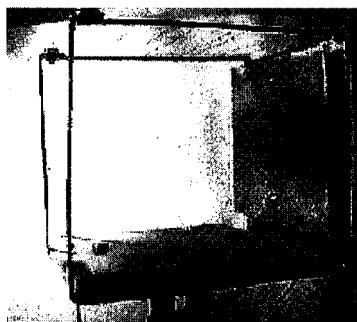


Рис.1. Структурная схема времяпролетного ионного масс-анализатора: 1- экстрактор, 2 – ионный коллектор, 3- электронный пучок, нагруженный ионами, в поперечном сечении, 4 – вакуумная камера, 5 и 6 – генераторы высоковольтных импульсов, 7 – система сбора информации, 8 – компьютер, 9 – траектория вытолкнутых ионов.

Экстрактор имеет две потенциальные пластины: горизонтальную 1 и вертикальную 2, к которым одновременно прикладываются высоковольтные импульсы положительной полярности и длительностью 5 мкс. Амплитуды напряжений импульсов регулируются независимо в диапазоне от 0 до 3 кВ, тем самым формируется угол наклона вектора электрического поля, выталкивающего ионы из электронного пучка 3. Через проволочную сетку 4, которая находится под потенциалом вакуумной камеры, ионы поступают на измерительный коллектор.



А



Б

Рис.2. А - Конструкция экстрактора: 1 и 2 - потенциальные пластины, 3 – электронный пучок, нагруженный ионами, 4 – проволочная сетка, имеющая потенциал вакуумной камеры; Б – экстрактор в сборе.

Ионный коллектор представляет собой медную пластину, перед которой на пути полета ионов установлена медная диафрагма со щелью, шириной около 2 мм. К диафрагме приложено напряжение +6 В для предотвращения попадания в ионный коллектор электронов вторичной эмиссии, родившихся на поверхности щели диафрагмы.

Определение состава ионов состоит из серии измерений, в которых к горизонтальной пластине прикладываются высоковольтные импульсы напряжения постоянной амплитудой, а к вертикальной - импульсы амплитудой, возрастающей от 0 до 3 кВ с определенным шагом. Результатом одного измерения является двумерный график зависимости заряда ионов, поступивших на коллектор, от

времени их пролета. Результатом же определения состава ионов является трехмерная диаграмма (рис.3 и рис.5). Изменение угла наклона выталкивающего электрического поля позволило повысить разрешение анализатора и дало возможность определить в составе ионов ионы с малым отношением A/Z , например, ионы водорода.

Калибровка ВПМА (рис.3) проводилась по гелию, с напуском его через накататель в вакуумную камеру. Состав ионов определялся по методике описанной выше. Состав ионов, измеренный ВПМА, находится в хорошем соответствии с результатами программы, симулирующей работу анализатора.



Рис.3. Калибровка ВПМА гелием: А – без калибровочного газа, Б – с калибровочным газом. Ось X – время пролета ионов $0 \div 25.6$ мкс, Y – амплитуда импульса напряжения, приложенного к вертикальной пластине экстрактора, $0 \div 2300$ В. Амплитуда выталкивающего импульса напряжения, приложенного к горизонтальной пластине экстрактора, постоянна и равна 2584 В. Ток электронного пучка 200 мА, энергия электронов 5 кВ.

Рис.3. позволяет качественно различить легкие и тяжелые ионы. Первые дают сигнал в области малых значений времени пролета, тяжелые – в области больших. Это следует из простой оценки времени пролета ионов, извлеченных с помощью экстрактора из пучка:

$$\tau(x_i) \approx \frac{L}{c} \sqrt{\frac{A}{Z}} \cdot \sqrt{\frac{m_p c^2}{2eU(0)} \cdot \frac{2h}{2h - x_i}},$$

где h – расстояние от центра экстрактора до его стенки, c – скорость света, A – атомный вес иона, Ze – его заряд, $U(x_i) \rightarrow 0$ – потенциал в точке рождения иона x_i при включенном экстракторе. Отсюда можно получить оценку разброса времени прихода на коллектор ионов с заданным A/Z : $\Delta\tau_x \sim \tau(0) \cdot \frac{a}{h}$, где $2h$ – размер вертикальной пластины экстрактора. И разрешение по A/Z :

$$\Delta\left(\frac{A}{Z}\right) \sim \frac{A}{Z} \cdot \frac{2a}{h}.$$

Таким образом, наилучшее разрешение достигается для легких ионов. Более точный расчет проводился методом численного моделирования движения ионов с учетом собственного поля электронного пучка и магнитного поля соленоидов.

Несмотря на невысокую разрешающую способность ВПМА, его использование позволило получить важные физические результаты. Первым из них стало объяснение эффекта увеличения порога развития неустойчивости с уменьшением тока накала катода, обнаруженного в системе электронного охлаждения накопителя LEAR. Подобные же результаты были получены затем на стенде «Рекуператор» (Рис.4), а позднее этот эффект был обнаружен на накопителе HIMAC.

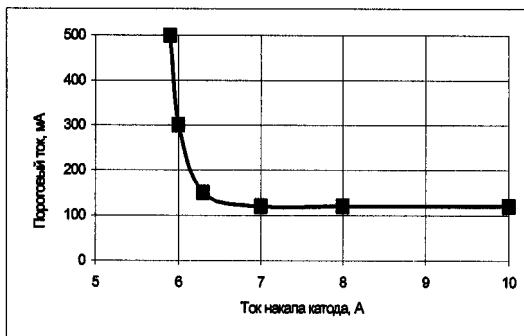


Рис.4. Зависимость порогового тока развития неустойчивости нейтрализованного состояния электронного пучка от тока накала катода на стенде «Рекуператор».

С использованием ВПМА на стенде «Рекуператор» было проведено измерение состава ионов нейтрализующих электронный пучок при разных токах накала катода и при примерном равенстве степени нейтрализации. Степень нейтрализации измерялась времяпролетным анализатором и составляла около 30% при разных токах накала катода. Оказалось, что при увеличении тока накала от 6 А (рис.5А) до 10 А (рис.5Б) на масс-спектрограмме появляется отчетливо выраженный пик, соответствующий ионам с $A/Z = 2$. Это молекулярные ионы водорода H_2^+ . С увеличением тока накала катода их относительное содержание в электронном пучке увеличивается (рис.6). Это происходит потому, что при большей температуре катода (при большем токе накала) из него выделяется больше метана, при ионизации которого образуются ионы водорода. Таким образом, результаты эксперимента показали, что увеличение числа легких ионов в электронном пучке, снижает пороговый ток развития неустойчивости в нем.

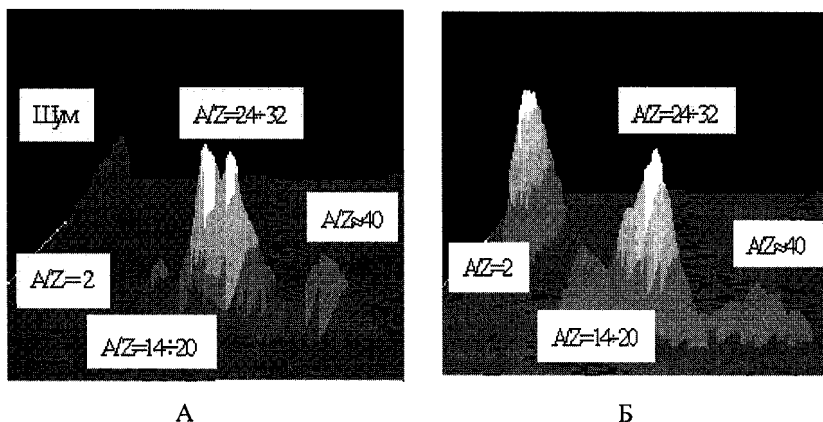


Рис.5. Трехмерная диаграмма состава ионов, нейтрализующих электронный пучок: А - ток накала катода 6 А, Б – 10 А. Ось X – время пролета ионов $0 \div 25.6$ мкс, Y – амплитуда импульса напряжения, приложенного к вертикальной пластине экстрактора, от $0 \div 2300$ В. Амплитуда выталкивающего импульса напряжения, приложенного к горизонтальной пластине экстрактора 2584 В. Ток электронного пучка 200 мА, энергия электронов 5 кВ.

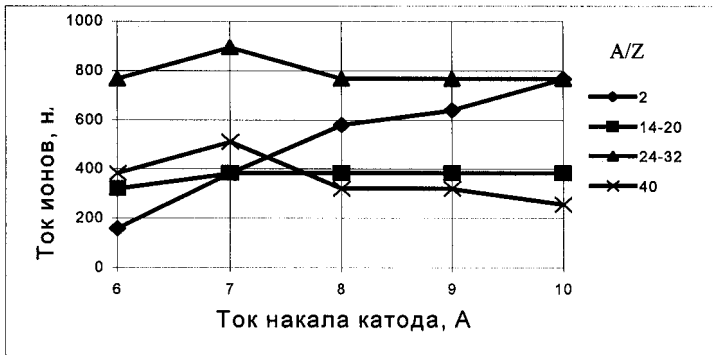


Рис.6. Зависимость тока сортов ионов, измеренных на коллекторе ионов, от тока накала катода.

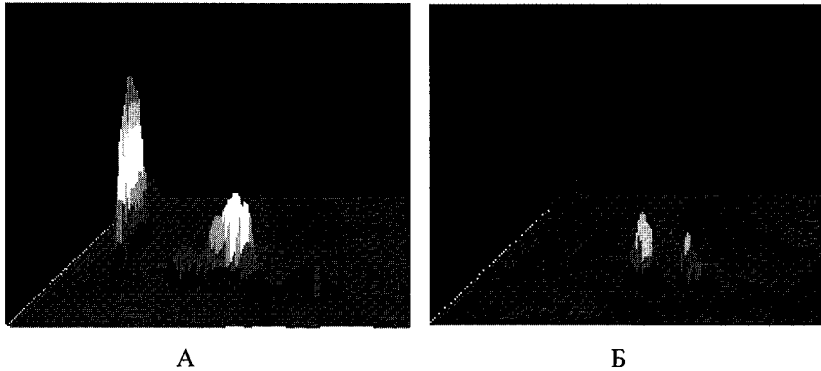


Рис.7. Влияние УВИК на состав ионов, измеренный с ВПМА: А – УВИК выключен, Б – УВИК настроен на резонансную частоту 150 кГц. Ось X – время пролета ионов $0 \div 25.6$ мкс, Y – амплитуда высоковольтного импульса, приложенного к вертикальной пластине экстрактора, от $0 \div 2300$ В. Амплитуда выталкивающего импульса напряжения, приложенного к горизонтальной пластине экстрактора 2584 В. Ток электронного пучка 200 мА, энергия электронов 5 кВ.

Для активного влияния на состав ионов в исследованиях использовался УВИК. Прямое измерение состава ионов при воздействии на пучок УВИК проводилось с ВПМА. Оказалось, что при выключенном УВИК или его настройке

на нерезонансную частоту (Рис.7А) пики, соответствующие ионам водорода и другим более тяжелым ионам, имеют максимальную амплитуду. При частотах УВИК в диапазоне 140-180 кГц (Рис.7Б) пик, соответствующий ионам водорода, полностью исчезает, а пики, соответствующие более тяжелым ионам, уменьшаются.

В исследованиях было установлено, что УВИК позволяет управлять нейтрализацией - не только уменьшать ее степень, но также изменять состав ионов, нейтрализующих электронный пучок. Эксперименты с помощью УВИК и ВПМА показали, что накопление легких ионов в электронном пучке снижает пороговый ток развития неустойчивости.

Глава 2 посвящена экспериментальным исследованиям влияния нейтрализации электронного пучка на процесс охлаждения в накопителе COSY.

Протонный накопитель-синхротрон COSY (COoler SYnchrotron), оборудованный системами электронного и стохастического охлаждения, предназначен для исследований в области физики частиц и ядерной физики. Основной его особенностью является возможность формирования интенсивных пучков протонов и дейтронов (поляризованных и неполяризованных) с высокой плотностью в шестимерном фазовом пространстве – т.е. с малым эмиттансом и разбросом частиц по импульсу.

Накопитель COSY оборудован набором устройств диагностики пучка: электростатические пикап-станции (мониторы положения пучка), позволяющие регистрировать когерентные колебания частиц; анализаторы Шоттки-шума циркулирующего пучка, служащие для регистрации спектров колебаний и разброса частиц по импульсу; монитор интенсивности циркулирующего пучка (трансформатор тока с чувствительностью лучше 10^8 частиц в пучке); детекторы горизонтального и вертикального профилей потока нейтральных атомов, возникающих при рекомбинации протонов (дейтронов) с электронами охлаждающего пучка.

Система электронного охлаждения (таблица 2) используется на энергии инжекции протонного пучка 45 МэВ (энергия электронов в системе охлаждения – 24.5 кэВ).

Таблица 2. Параметры системы электронного охлаждения накопителя COSY.

Энергия электронов, кэВ	24.5
Ток электронов, А	0,05 – 0,6
Радиус пучка, см	1.27
Степень естественной нейтрализации, %	37
Длина участка электронного охлаждения, м	2.0
Напряжённость магнитного поля, Гс	800
Относительный ток потерь	$<5 \cdot 10^{-4}$

Интенсивность накопленного пучка протонов в COSY ограничена когерентной дипольной неустойчивостью, развивающейся в циркулирующем пучке при электронном охлаждении. Одна из причин этой неустойчивости - накопление ионов остаточного газа в электронном пучке.

В секции электронного охлаждения COSY присутствует так называемая "естественная" нейтрализация, степень которой практически не зависит от параметров электронного пучка при существующих вакуумных условиях в секции охлаждения и составляет 33 – 37%. Наличие постоянного уровня нейтрализации объясняется геометрией вакуумной камеры. Радиус вакуумной камеры в секции охлаждения равен 7.5 см, а в области пушки и коллектора – 3.25 см. Соответственно, потенциал собственного поля на оси электронного пучка изменяется вдоль системы. Поэтому в секции охлаждения существует потенциальная яма, препятствующая уходу вдоль электронного пучка ионов, образующихся при ионизации остаточного газа. Ионы накапливаются до уровня, соответствующего равенству потенциалов на оси пучка в секции охлаждения и в области пушки и коллектора.

При расположении электронного пучка на оси вакуумной камеры и при

равномерном распределении ионов остаточного газа по сечению электронного пучка потенциал его собственного поля на оси камеры равен:

$$U = (1 - \eta_{neutr}) \frac{I}{\beta c} \left(1 + 2 \ln \frac{b}{a} \right), \quad (2)$$

где η_{neutr} – степень нейтрализации, I – ток электронного пучка, βc – скорость электронов, a и b – радиусы электронного пучка и вакуумной камеры соответственно. Из условия равенства потенциалов на оси пучка в секции охлаждения и в области пушки и коллектора степень естественной нейтрализации может быть рассчитана из геометрических параметров системы охлаждения:

$$\eta_{neutr} = \frac{2 \ln \frac{b_2}{b_1}}{1 + 2 \ln \frac{b_2}{a}}, \quad (3)$$

где b_1 , b_2 – меньший и больший радиусы вакуумной камеры. Для параметров системы охлаждения COSY расчетная величина естественной нейтрализации составляет примерно 37%.

Для измерения степени нейтрализации в COSY применяются две независимые методики, основанные на измерении частоты обращения охлажденного пучка, циркулирующего в накопителе.

Из-за провисания потенциала внутри электронного пучка, вызванного его собственным полем, энергия электронов возрастает пропорционально квадрату их расстояния от оси пучка. Протоны в результате электронного охлаждения имеют энергию, соответствующую энергии электронов в том месте, где расположена равновесная орбита протонного пучка. С помощью дипольных корректоров можно параллельно смещать электронный пучок в секции охлаждения. В эксперименте измеренная зависимость частоты обращения от положения электронного пучка оказалась близкой к квадратичной. Это свидетельствует о том, что ионы остаточного газа распределены равномерно по сечению пучка. Фитируя зависимость частоты обращения протонов от поперечных координат X , Y электронного пучка в обеих плоскостях параболой, можно оценить степень нейтрализации электронного пучка.

Вторая методика заключается в следующем. Ток электронного пучка изменяется на некоторую величину, а его энергия подбирается так, чтобы частота обращения протонов осталась неизменной. Таким способом можно получить зависимость потенциала на оси электронного пучка от его тока и определить степень нейтрализации. Результаты измерения нейтрализации обоими способами находятся в хорошем соответствии друг с другом и с оценкой по формуле 3.

Для определения состава ионов, нейтрализующих электронный пучок в системе электронного охлаждения накопителя COSY, применялся УВИК. Напряжение, возбуждающее ионные колебания, прикладывалось к электродам одной из пикап-станций, расположенной в секции охлаждения. Его размах составлял 60 В. При совпадении частот колебаний ионов и сигнала возбуждения степень нейтрализации изменялась, что приводило к изменению частоты обращения охлажденного протонного пучка. Это изменение компенсировали изменением энергии электронного пучка (потенциала катода электронной пушки), что и давало значение изменения концентрации ионов с данным A/Z (формула 1).

В эксперименте были обнаружены три отчетливых пика в частотных диапазонах 20 – 40 кГц, 90 – 120 кГц, 130 кГц (рис.8). Пик с частотой 130 кГц соответствует $A/Z = 7 - 8$, и, наиболее вероятно отвечает многозарядным ионам. Пик в диапазоне 90 – 120 кГц соответствует ионам с $A/Z = 16+18$. Заметен так же слабо выраженный пик с частотой 75 кГц, соответствующий $A/Z = 40$. Пик в диапазоне 20 – 40 кГц, в соответствии с формулой (1) должен отвечать ионам с $A/Z > 100$, которые в составе остаточного газа отсутствуют. Для выяснения природы этого пика измерения были повторены по измененной процедуре. Было выяснено, что пик в диапазоне 20 – 40 кГц соответствует частицам, совершающим колебания вдоль электронного пучка. Тот факт, что он наблюдается и при возбуждении поперечным полем, может объясняться смещением оси электронного пучка относительно оси электродов пикап-станции. Этот пик может соответствовать ионам водорода, имеющим энергию 30 – 40 эВ. При этом время пролета иона вдоль секции охлаждения и обратно соответствует частоте примерно 20 кГц

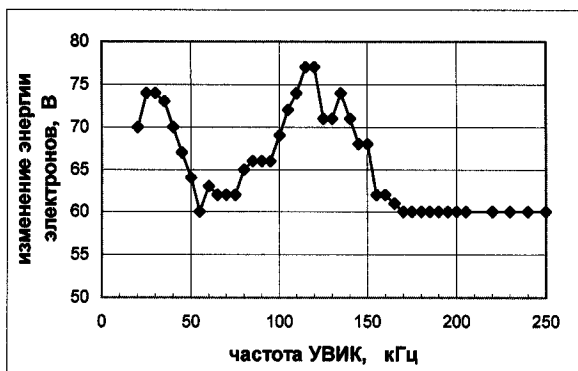


Рис.8. Зависимость изменения энергии электронного пучка от частоты УВИК. Ток электронного пучка 170 мА. Энергия электронного пучка без возбуждения УВИК 24460 эВ.

Для проверки влияния состава ионов, накопленных в электронном пучке, на устойчивость протонного пучка в COSY исследовалась динамика процесса охлаждения после однократной инжекции (рис.9). Сразу после импульса инжекции протонный пучок имеет интенсивность до $4 \cdot 10^{10}$ частиц и заполняет весь аксептанс накопителя. На начальном этапе охлаждения теряются частицы с большими амплитудами бетатронных колебаний. После этого время жизни протонов возрастает, идет процесс охлаждения и фазовая плотность увеличивается. При выключенном УВИК или при частотах не настроенных на частоты, соответствующие пикам ионов на рис.8, через некоторое время, примерно равное времени охлаждения (на Рис.9А – 12 сек после момента инжекции), развивается когерентная неустойчивость, приводящая к быстрой гибели охлаждаемых протонов. При сигналах возбуждения УВИК на частотах, соответствующих ионным пикам, время до развития неустойчивости существенно увеличивается. Например, при частотах в диапазоне 100 – 120 кГц оно возрастает не менее чем до 32 сек (Рис.9Б). В это время протонный пучок продолжает охлаждаться, сжимается еще больше (что видно по монитору нейтральных атомов) и неустойчивость развивается при большей фазовой плотности пучка протонов.

Темп потерь при неустойчивости снижается, что говорит об уменьшении ее инкремента.

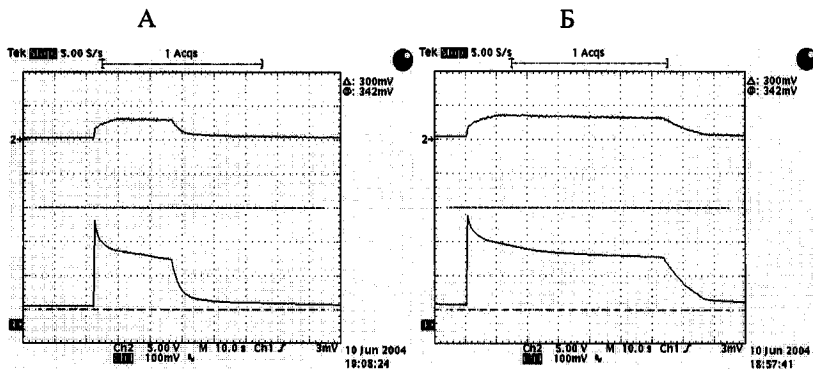


Рис.9. Зависимость интенсивности охлажденного протонного пучка от времени: А – УВИК выключен или настроен на нерезонансную частоту, Б – частота 100 – 120 кГц. Ток электронного пучка 170 мА. Энергия электронного пучка 24460 эВ. Верхние кривые – интенсивность потока атомов водорода, образующихся в секции охлаждения. Нижние кривые – показания датчика тока протонного пучка.. Масштаб по оси времени – 5 с/деление, ток протонов: 100 мВ/деление $\approx 1.25 \cdot 10^{10}$ протонов, темп счета H^0 : 1 В/деление = 3 кГц.

Таким образом, в исследованиях на COSY продемонстрировано, что наличие ионов остаточного газа в электронном пучке существенно снижает порог развития когерентной неустойчивости в охлаждаемом пучке. Следовательно, при накоплении интенсивных ионных пучков необходимо принимать меры по снижению уровня естественной нейтрализации ниже порога развития неустойчивостей.

В третьей главе сформулированы требования к конструкции систем электронного охлаждения для оптимального использования нейтрализации на примерах проектов систем электронного охлаждения ТВН (ИТЭФ) и ЛЕРТА (ОИЯИ).

В накопителе ТВН планируется получать ионные пучки с интенсивностью до 10^{13} частиц с энергией до 700 МэВ/нуклон. Основными задачами проекта являются выполнение экспериментов по нагреву мишени выведенным из ускорителя мощным ионным пучком, а также исследование коллективных эффектов, возникающих при накоплении интенсивного пучка ионов. Формирование требуемых параметров ионного пучка может быть эффективно осуществлено с помощью системы электронного охлаждения. Проект системы электронного охлаждения для накопителя ТВН был разработан в ОИЯИ в 2001 году (Табл.3).

Таблица 3. Основные параметры системы электронного охлаждения ТВН.

Длина траектории электронного пучка	м	7
Эффективная длина секции охлаждения	м	0,55
Магнитное поле в секции охлаждения	кГс	1 – 1,2
Неоднородность поля в секции охлаждения		$2 \cdot 10^{-4}$
Радиус катода	см	0,75
Радиус пучка в секции охлаждения	см	1.1 – 1,5
Ток пучка	А	0 – 3
Максимальная энергия	кэВ	350
Степень нейтрализации		$\rightarrow 0$

При требуемой интенсивности ионного пучка естественная нейтрализация даже в несколько процентов может приводить к развитию неустойчивостей. В проекте системы охлаждения ТВН предложены три основные меры по снижению степени естественной нейтрализации: выравнивание потенциала на оси электронного пучка вдоль всей его траектории от пушки до коллектора, размещение в секции охлаждения электростатического экрана, использование УВИК.

Потенциал на оси электронного пучка вдоль всей его траектории выравнивается установкой дополнительных конструктивных элементов в виде

металлических сеток, имеющих потенциал вакуумной камеры и позволяющих сделать ее апертуру постоянной от выхода ускоряющей трубки системы формирования пучка до входа замедляющей трубки коллектора. В этом случае степень нейтрализации определяется балансом между образованием ионов в электронном пучке и их уходом вдоль пучка в направлениях пушки или коллектора.

Электростатический экран, размещенный в секции охлаждения, представляет собой цилиндр, разрезанный вдоль образующей на две половины. электрически изолированные от вакуумной камеры. Приложение к ним положительных потенциалов, отличающихся по величине, исключает как накопление ионов, так и медленных электронов вдоль электронного пучка.

Если этого будет недостаточно, то дальнейшее снижение нейтрализации предлагается достичь использованием УВИК, возбуждающее напряжение которого прикладывается к электродам одной из пикап-станций, расположенных в секции электронного охлаждения.

При охлаждении пучков низкой интенсивности (радиоактивных ионов, антипротонов) необходимо увеличивать степень нейтрализации электронного пучка, что приводит к уменьшению времени охлаждения. В некоторых случаях, высокая степень нейтрализации требуется для получения специфических параметров охлаждаемого пучка. Так, дополнительные требования к степени нейтрализации электронного пучка появляются при электронном охлаждении позитронов, циркулирующих в накопителе с фокусировкой продольным магнитным полем, как это имеет место в накопителе LEPTA (ОИЯИ, Дубна). Основное назначение накопителя LEPTA – генерация интенсивного потока позитрония для прецизионного измерения его характеристик. Накопитель LEPTA (Табл.4) представляет собой кольцевую систему соленоидов, помещенных в общий магнитный экран, состоящую из двух тороидальных и двух прямолинейных секций (секций инжекции и электронного охлаждения), с размещенной внутри вакуумной камерой. Позитроний образуется в результате рекомбинации позитронов с электронами в секции электронного охлаждения накопителя. Физический пуск накопителя с циркулирующим электронным пучком

был осуществлен в 2004 году. В настоящее время производится ввод в действие инжектора позитронов и подготовка накопителя к получению потока позитрония.

Таблица 4. Основные 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
Радиус циркулирующего позитронного пучка, см	0,6
Радиус электронного пучка, см	1,2
Давление остаточного газа, Торр	10^{-10}
Диаметры вакуумной камеры, см	
секция септума	5
тороидальные секции	13
секция электронного охлаждения	8

Для экспериментов по прецизионным измерениям характеристик позитрония требуется минимально возможный разброс по углу и скорости частиц его потока. Например, для измерения времени жизни парапозитрония с относительной погрешностью меньше $1 \cdot 10^{-4}$ (что вдвое меньше уровня, достигнутого в настоящее время) относительный разброс по скорости не должен превышать 10^{-4} .

Специфической особенностью накопителя с продольным магнитным полем является то, что электронное охлаждение циркулирующих позитронов уменьшает их температуру, но при этом не меняет поперечного размера пучка. Каждый позитрон охлаждается, оставаясь «привязанным» к своей силовой линии магнитного поля. Поэтому разброс позитронов по скоростям определяется перепадом потенциала собственного поля электронного пучка на радиусе пучка позитронов. Эта разность потенциалов определяется степенью естественной нейтрализации, зависящей от геометрии вакуумной камеры.

Диаметр вакуумной камеры различен на разных участках, что приводит к изменению потенциала на оси электронного пучка. Накопление ионов остаточного газа в электронном пучке вызовет выравнивание потенциала вдоль системы, и ожидаемый уровень естественной нейтрализации в секции охлаждения составит 40%. При этом перепад потенциала собственного поля нейтрализованного электронного пучка на радиусе пучка позитронов будет равен, примерно, 30 В, что соответствует разбросу по скоростям $1.5 \cdot 10^{-3}$.

Для снижения разброса по скоростям до уровня 10^{-4} требуется степень нейтрализации не менее 96%. Проектная интенсивность охлаждаемого позитронного пучка не превышает 50 мкА, что позволяет не опасаться развития неустойчивостей. Для увеличения степени нейтрализации в секции электронного охлаждения предлагается установить электростатические пробки на краях тороидальных секций. Такое их расположение позволяет к тому же исключить влияние собственного поля электронного пучка на движение циркулирующего пучка позитронов в тороидальных секциях. Для выравнивания степени нейтрализации на участке охлаждения и в тороидальных секциях предполагается использовать электростатический экран, на который подается отрицательный потенциал относительно вакуумной камеры. Для управления составом ионов, нейтрализующих электронный пучок, будет использован УВИК.

В заключении изложены основные результаты диссертационной работы.

Выводы

1. Разработано оригинальное устройство для измерения зарядо-массового состава ионов, нейтрализующих замагниченный электронный пучок. Принцип его работы основан на определении отношения A/Z ионов, извлеченных из области электронного пучка, по времени пролета участка дрейфа фиксированной длины (до точки их регистрации). Использование этого устройства на стенде «Рекуператор», являющемся моделью системы электронного охлаждения, позволило объяснить эффект увеличения порога

развития неустойчивости с уменьшением тока накала катода, обнаруженный в системе электронного охлаждения накопителя LEAR.

2. Впервые на стенде «Рекуператор» исследовано влияние состава ионов, нейтрализующих электронный пучок, на порог развития двухпучковой неустойчивости. В экспериментах было установлено, что увеличение концентрации легких ионов в электронном пучке снижает пороговый ток развития неустойчивости.
3. Впервые на накопителе COSY исследовано влияние нейтрализации электронного пучка на процесс охлаждения интенсивного пучка протонов. Экспериментально установлено, что наличие ионов остаточного газа в электронном пучке существенно снижает порог развития когерентной неустойчивости в охлаждаемом циркулирующем пучке.
4. Выработаны основные требования к конструкциям систем охлаждения накопителей ТВН и LEPTA, определяющие степень нейтрализации электронного пучка. Предложенные решения позволяют в накопителе ТВН очистить электронный пучок от ионов остаточного газа, а в накопителе LEPTA увеличить степень нейтрализации до значения, необходимого для получения разброса по энергии электронов не превышающего 10^{-4} .
5. Разработано техническое предложение конструкции системы электронного охлаждения накопителя ТВН.

Основные результаты диссертации опубликованы в рецензируемых журналах (пп. 1 - 8), трудах конференций (пп. 9 - 14), в годовом отчете исследовательского центра Юлих (п.15):

1. Антропов В.К., Болтушкин Е.В., Иванов А.В., Ивашкевич С.А., Калининко 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. 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, 2005. Т.3, №3(126). С. 19-23.
3. И.Н. Мешков, П.Р. Зенкевич, Н.Н. Алексеев, А.В. Бархударян, А.Е. Большаков, Д.Г. Кошкарёв, Б.Ю. Шарков, В.Ф. Быковский, Ю.В.Короотаев, А.О. Сидорин, А.В. Смирнов, Е.М. Сыресин, И.В. Титкова, Перспективы применения электронного охлаждения в накопителе ионов ИТЭФ, Атомная энергия, т. 94, вып. 1, 2003.
 4. Ю.В. Короотаев, И.Н. Мешков, А.Л. Петров, А.О. Сидорин, А.В. Смирнов, Е.М. Сыресин, Эффекты пространственного заряда в интенсивных электронных пучках в методе электронного охлаждения, Прикладная физика, 2000, №2, 95-105.
 5. E. Syresin, N. Alekseev, V. Bykovsky, D. Koshkarev, Y. Korotaev, I. Meshkov, B. Sharkov, I. Selesnev, A. Smirnov, A. Sidorin, I. Titkova and P. Zenkevich, "Project of TWAC Electron Cooler", Physica Scripta., Vol. T104, 160–163, 2003
 6. I.Meshkov, Y.Korotaev, A.Sidorin, A.Smirnov, E.Syresin, "Experimental study of structure and stability of an intense neutralized electron beam", NIM A, v.441(2000), Nos 1-2, pp.96 - 99.
 7. Yu.V. Korotaev, I.N. Meshkov, A.L. Petrov, A. O. Sidorin, A.V. Smirnov, E.M. Syresin, Space-charge effects in intense electron beam related to electron cooling system, The international Society for optical Engineering, SPIE, v.4187, 2000, p.127-137.
 8. P.R. Zenkevich, N.N. Alexeev A.V. Barkhudaryan, A.Ye. Bolshakov D.G. Koshkarev, B.Yu. Sharkov, V.F. Bykovsky, Yu.V. Korotaev, I.N. Meshkov, A.O. Sidorin, A.V. Smirnov, Ye.M. Syresin, I.V. Titkova, Electron cooling system for ITEP ion storage ring, Laser and Particle Beams, Volume 20, Issue 03, 2002, pp 459-461.
 9. Yu. Korotaev, I. Meshkov, A. Sidorin, E. Syresin, J. Dietrich, V. Kamerdjiev, R. Maier, D. Prasuhn, H.J. Stein, H. Stockhorst, K. Noda, S. Sibuya, T. Uesugi,

Intensive Ion Beam in Storage Rings with Electron Cooling, Proc. of RUPAC'2004, Dubna 2004, <http://accelconf.web.cern.ch/accelconf/>.

10. Коротаев Ю. В., Мешков И. Н., Петров А. Л. и др. Методы подавления пучково-дрейфовой неустойчивости в нейтрализованном электронном пучке. XV Собрание по ускорителям заряженных частиц, с.64. Протвино, 1996.
11. Korotaev Yu., Meshkov I., Petrov A. et al. Neutralisation of the Electron Beam Space Charge in the Electron Cooling System. Workshop on Nonneutral Plasmas, Boulder, Colorado USA, 1997.
12. Yu.Korotaev, I. Meshkov, A.Sidorin, A. Smirnov, E. Syresin, Space-charge effects and virtual cathode problem at the recuperation of intense electron beam. Proc. of Int. Symp. On Space Charge Effects in Formation Intense Low Energy Beam, Dubna, 1999, 41.
13. Yu.Korotaev, I.Meshkov, A.Petrov, A.Sidorin, A.Smirnov, E.Syresin, The Neutralized Beam for Electron Cooling. Proc. of MEEC'98, E-9-99-92, p.297, Dubna, 1999.
14. Yu. Korotaev, Meshkov, A. Sidorin, E. Syresin, J. Dietrich, V. Kamerdjiev, R. Maier, D. Prasuhn, H.J. Stein, H. Stockhorst, K. Noda, S. Sibuya and T. Uesugi, Intensive Ion Beams in Storage Rings with Electron Cooling, 33rd ICFA Advanced Beam Dynamics Workshop on High Intensity and High Brightness Hadron Beams, Bensheim, Germany, 2004, AIP conference proceedings, volume 773, pp. 409-414.
15. J. Dietrich, V. Kamerzhiev, Yu. Korotaev, R. Maier, I.N. Meshkov, D. Prasuhn, A. Sidorin, H.J. Stein, H. Stockhorst, Influence of Electron Beam Neutralization on the Stability of Electron-Cooled Ion Beams, IKP Annual Report 2004, FZ Julich, set http://www.fz-juelich.de/ikp/publications/AR2004/documents/AR2004_Articles.pdf, p.78.

Получено 6 октября 2005 г.

Отпечатано методом прямого репродуцирования
с оригинала, предоставленного автором.

Макет *Н. А. Киселевой*

Подписано в печать 06.10.2005.

Формат 60 × 90/16. Бумага офсетная. Печать офсетная.

Усл. печ. л. 1,62. Уч.-изд. л. 1,8. Тираж 100 экз. Заказ № 55054.

Издательский отдел Объединенного института ядерных исследований
141980, г. Дубна, Московская обл., ул. Жолио-Кюри, 6.

E-mail: publish@pds.jinr.ru

www.jinr.ru/publish/