

ОБЪЕДИНЕННЫЙ ИНСТИТУТ ЯДЕРНЫХ ИССЛЕДОВАНИЙ

9-96-137

На правах рукописи

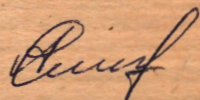
C-506

СМИРНОВ
Александр Валентинович

НЕЙТРАЛИЗАЦИЯ ПРОСТРАНСТВЕННОГО ЗАРЯДА
ИНТЕНСИВНОГО ЭЛЕКТРОННОГО ПУЧКА
В СИСТЕМЕ ЭЛЕКТРОННОГО ОХЛАЖДЕНИЯ

Специальность: 01.04.20 — физика пучков заряженных частиц
и ускорительная техника

Автореферат диссертация на соискание ученой степени
кандидата физико-математических наук



26.04.96

Дубна 1996

Работа выполнена в Объединенном институте ядерных исследований

НАУЧНЫЙ РУКОВОДИТЕЛЬ:

СЫРЕСИН Евгений Михайлович кандидат физико-математических наук,
Объединенный институт ядерных исследований, г.Дубна

ОФИЦИАЛЬНЫЕ ОЦЕНОЧНЫЕ:

ЗАВЬЯЛОВ Михаил Александрович доктор технических наук,
Всероссийский электротехнический институт, г.Москва

ПЕРЕЛЬШТЕЙН Элжумо Аврумович доктор физико-математических наук,
Объединенный институт ядерных исследований, г.Дубна

ВЕДУЩАЯ ОРГАНИЗАЦИЯ: Институт теоретической и экспериментальной физики, г.Москва

Защита диссертации состоится «_____» Июль 1996 г. в «_____» часов на заседании Диссертационного совета Д-047.01.03 при Лаборатории ядерных проблем Объединенного института ядерных исследований.

Адрес: 141980, г.Дубна Московской обл., ул.Жолио-Кюри, 6.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке ОИЯИ.

Автореферат разослан «26» 07 1996 г.

Ученый секретарь Диссертационного совета Д-047.01.03 доктор физико-математических наук, профессор Ю.А.Батусов

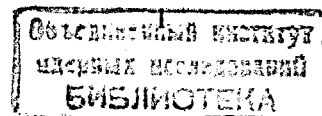
ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы. Накопительные кольца тяжелых заряженных частиц - протонов, антипротонов, ионов с электронным охлаждением представляют новое средство физического эксперимента с широкими применениями в физике высоких энергий, ядерной и атомной физике, физике пучков. Девять таких накопителей, так называемых кулеров - один антипротонный и восемь ионных, действуют в различных лабораториях мира.

С появлением кулеров в ядерно-физических исследованиях открылись новые возможности по проведению прецизионных экспериментов на пучках с малым разбросом по энергии (до 10^{-6}) на сверхтонких внутренних мишенях, по разделению и накоплению долгоживущих изотопов и изомеров, по масспектрометрии предельно высокого разрешения. Стал доступен качественно новый уровень исследований процессов перезарядки, радиационной и диэлектронной рекомбинаций. Благодаря развитию электронного охлаждения, появился еще один метод в физике ускорителей - так называемое "лазерное охлаждение". Возникло целое направление физики пучков - кристаллические пучки, которое представляет большой интерес для физики твердого тела.

Ионный пучок, инжектируемый в накопитель, имеет начальный разброс скоростей и большой поперечный размер. Для накопления ионных пучков с малым разбросом скоростей и малым эмиттансом Г.И.Буджером 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 электронный пучок, обладающий малым разбросом скоростей. За счет кулоновского взаимодействия между частицами температура электронов и ионов выравнивается, в результате чего уменьшается разброс продольных скоростей ионов и пучок сжимается.

Интенсивный электронный пучок в методе электронного охлаждения имеет зависимость продольных скоростей электронов от радиуса пучка, что вызвано действием собственного пространственного заряда пучка. В процессе охлаждения скорости ионов подстраиваются под скорости электронов. Вследствие бетатронных колебаний, ионы при каждом пролете через участок охлаждения взаимодействуют с электронами пучка на разных радиусах, в результате эффективность охлаждения уменьшается. При этом возможна ситуация, когда часть ионного пучка может быть даже потеряна в ходе охлаждения.



Для уменьшения влияния пространственного заряда электронного пучка применяется метод нейтрализации. Для этого используются электростатические пробки, которые устанавливаются в системе электронного охлаждения после электронной пушки и перед коллектором электронов. Электростатические пробки предотвращают уход заряженных ионов вдоль оси пучка, а их уход поперек пучка затруднен вследствие объемного 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.

Основные цели работы. Данная работа посвящена проблеме нейтрализации и устойчивости интенсивного электронного пучка, а также развитию методов подавления его неустойчивости. В ходе экспериментов с нейтрализованным электронным пучком особое внимание уделялось следующим положениям:

- исследование нейтрализованного состояния интенсивного электронного пучка;
- изучение пучково-дрейфовой неустойчивости при различных параметрах системы;
- подавление неустойчивости и повышение порогового тока с помощью активных методов воздействия на пучок, нагруженный медленными ионами;
- развитие методов диагностики для измерения степени нейтрализации и контроля за устойчивостью электронного пучка.

Научная новизна и значимость работы. Нейтрализация пространственного заряда электронного пучка, наряду с перечисленными выше, дает качественно новые возможности в работе системы электронного охлаждения:

- существенное снижение времени охлаждения ионных пучков;
- возможность изменения тока электронного пучка в процессе охлаждения без изменения энергии электронов;
- снижение провисания потенциала в электронном пучке;
- уменьшение дрейфовой скорости электронов, что улучшает качество электронного пучка.

Практическая ценность работы. Эксперименты по изучению нейтрализованного электронного пучка были проведены на стенде "Рекуператор" (ЛЯП ОИЯИ) и в системе электронного охлаждения накопителя LEAR (CERN). На обоих устройствах установлены электростатические пробки. Система электронного охлаждения LEAR, по сравнению со стендом, имеет ряд особенностей: ультравысокий вакуум $\sim 10^{-11}$ Торр (на стенде $\sim 10^{-9}$ Торр), два поворотных тороидальных магнита, радиус электронного пучка 2.5 см (на стенде 1.5 см).

Электростатические пробки для нейтрализации пространственного заряда электронного пучка в настоящее время используются как штатный элемент системы электронного охлаждения LEAR. Использование нейтрализованного пучка для охлаждения ионов свинца Pb^{54+} с энергией 4.2 МэВ/н позволило уменьшить время охлаждения накапливаемых ионов в полтора раза и составило 200 мс при токе пучка 150 мА и энергии электронов 2.5 кэВ. Охлажденные ионы свинца предполагается использовать в проекте LHC.

Апробация работы. Материалы диссертации представлялись на Международном совещании по методам охлаждения пучков, Монтре, Швейцария, 1993; Европейской ускорительной конференции, Лондон, 1994; 14 (1-м Всероссийском) совещании по ускорителям, Протвино, 1994; Международной ускорительной конференции, Даллас, США, 1995; а также обсуждались на научных семинарах в Физико-технологическом центре Института ядерной физики ИЯФ СО РАН (Липецк); Объединенном Институте ядерных исследований (Дубна); Европейском центре ядерных исследований (Женева).

Структура и объем работы. Диссертация состоит из Введения, четырех глав, Заключение, трех приложений, списка литературы. Текст диссертации изложен на 126 страницах, включая 66 рисунков и 9 таблиц. Список литературы содержит 63 наименования.

СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во Введении дается краткое описание метода электронного охлаждения и определяются проблемы, возникающие при охлаждении пучков заряженных частиц. Формулируются задачи исследований, вошедших в диссертацию, обсуждаются новые возможности электронного охлаждения при использовании нейтрализованного пучка.

В первой главе обсуждаются положения физики электронного охлаждения и требования к параметрам охлаждающего электронного пучка. Дается качественное объяснение преимуществ использования нейтрализованных электронных пучков, по сравнению с заряженными пучками. Численное моделирование процесса электронного охлаждения для ионов Pb^{54+} на LEAR показывает, что нейтрализация пространственного заряда пучка делает процесс охлаждения в несколько раз быстрее (рис.1).

Приводится теоретическое описание пучково-дрейфовой неустойчивости, приводящей к разрушению нейтрализации электронного пучка, пороговое значение плотности тока которой j_{th} описывается следующим выражением:

$$j_{th} = \frac{2\epsilon_0 V_e^2 B}{k L}, \quad k = \frac{\eta}{\epsilon_{\perp} \ln K}, \quad (1)$$

где V_e - скорость электронов, B - продольное магнитное поле, L - длина участка нейтрализации, ϵ_{\perp} - мнимая часть диэлектрической проницаемости электронного пучка, нагруженного ионами, K - коэффициент усиления поперечных волн.

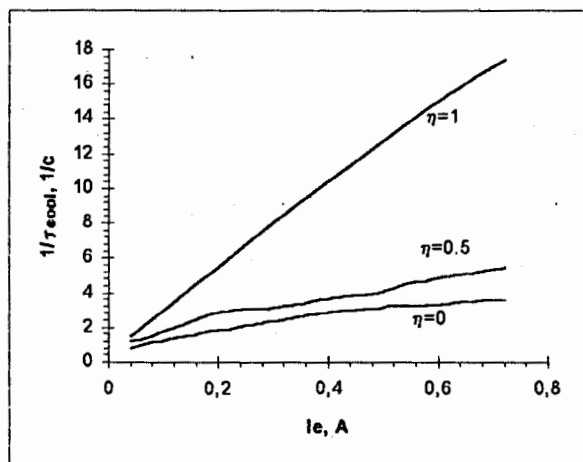


Рис.1. Расчетная зависимость обратного значения времени охлаждения от тока электронного пучка для иона Pb^{54+} с энергией 4.2 МэВ/н, $\eta = Z n_i / n_e$ - степень нейтрализации электронного пучка

Необходимо заметить, что пучково-дрейфовая неустойчивость в отсутствие обратной связи является конвективной (сносовой), то есть любое возмущение на входе пучка в участок с нейтрализованным

пространственным зарядом, экспоненциально усиливаясь по длине, остается ограниченным во времени в данной точке. Абсолютная неустойчивость реализуется лишь при наличии обратной связи достаточной величины, когда колебания ионов на выходе пучка передаются на вход. Обратная связь может осуществляться электронами, отраженными от коллектора, количество которых и определяет в значительной мере порог неустойчивости.

Приведены результаты исследований с нейтрализованными пучками, выполненными до настоящего времени.

Во второй главе дано описание стенда "Рекуператор" и системы электронного охлаждения LEAR, на которых проводились исследования нейтрализованного электронного пучка. Описана система нейтрализации пространственного заряда пучка - электростатические пробки, представляющие собой два полуцилиндра с высокоомными проводящими стеклами между ними. На электроды пробки подается положительное напряжение (0-6 кВ), различное для каждого электрода, что создает поперечное электрическое поле внутри пробки. Пробки располагаются после электронной пушки и перед коллектором электронов. Нейтрализация осуществляется за счет ионизации атомов и молекул остаточного газа. Ионы отражаются от положительного потенциального барьера электростатических пробок и накапливаются на участке между пробками, а вторичные электроны дрейфуют внутри пробок по эквипотенциальным линиям электрического поля на проводящее стекло и удаляются из системы.

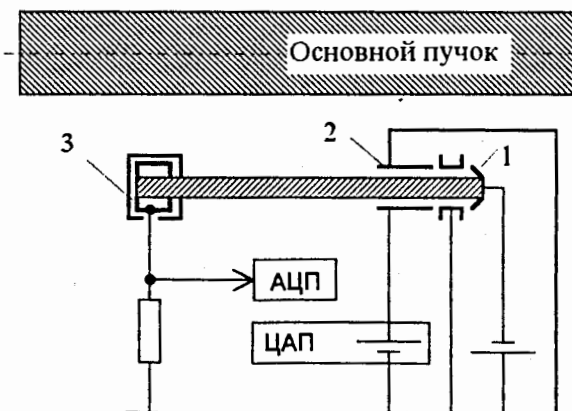


Рис.2. Схема измерения степени нейтрализации с помощью диагностического электронного пучка. 1 - пушка диагностического пучка, 2 - электроды компенсирующего поля, 3 - коллектор.

Для диагностики электронного пучка на стенде применяется метод диагностического электронного пучка (рис.2). Идея диагностического электронного пучка основана на измерении азимутального смещения низкоэнергетичного электронного пучка, распространяющегося в продольном магнитном поле системы и поперечном электрическом поле основного пучка параллельно его оси. Для улучшения точности измерений используется так называемый "нуль-метод".

Дается описание методов диагностики нейтрализованного электронного пучка, использующихся на накопителе LEAR: время-пролетный метод, основанный на измерении скорости электронов в зависимости от собственного пространственного заряда пучка; диагностика с помощью охлажденного ионного пучка, когда измеряется распределение потенциала электронного пучка по его радиусу. Обсуждается точность методов диагностики, используемых в экспериментах с нейтрализованным электронным пучком.

В третьей главе приводятся результаты экспериментов по измерению степени нейтрализации и определению пороговых токов пучково-дрейфовой неустойчивости, проведенных на стенде "Рекуператор" и в системе электронного охлаждения LEAR. На стенде проведено изучение нейтрализации электронного пучка с энергией электронов 2-10 кэВ и током пучка 100 мА - 2 А в магнитном поле 500 Гс. На накопителе LEAR выполнены эксперименты по нейтрализации электронных пучков с энергией электронов 2.5-27 кэВ, током пучка 100 мА - 2.8 А в магнитном поле 600 Гс. Дано теоретическое описание происходящих процессов. Приведены зависимости степени нейтрализации и пороговых токов пучково-дрейфовой неустойчивости от различных параметров системы. Степень нейтрализации уменьшается с ростом тока электронного пучка и снижением энергии электронов, и увеличивается с ростом магнитного поля системы и давления остаточного газа.

Метод с использованием охлажденного протонного пучка применялся для измерения радиальной зависимости потенциала в электронном пучке на LEAR. Когда пробка выключена, наблюдается параболическое распределение потенциала (рис.3а). При этом дополнительно используется так называемый "шейкер" - конденсатор с высокочастотным поперечным электрическим полем, позволяющий получить заряженный пучок, свободный от накопленных ионов. При включенных пробках (рис.3б) распределение изменяет свой вид: степень нейтрализации η стремится к 1 в центральной части электронного пучка ($r \leq 20$ мм) и резко падает на краю пучка ($20 < r < 25$ мм).

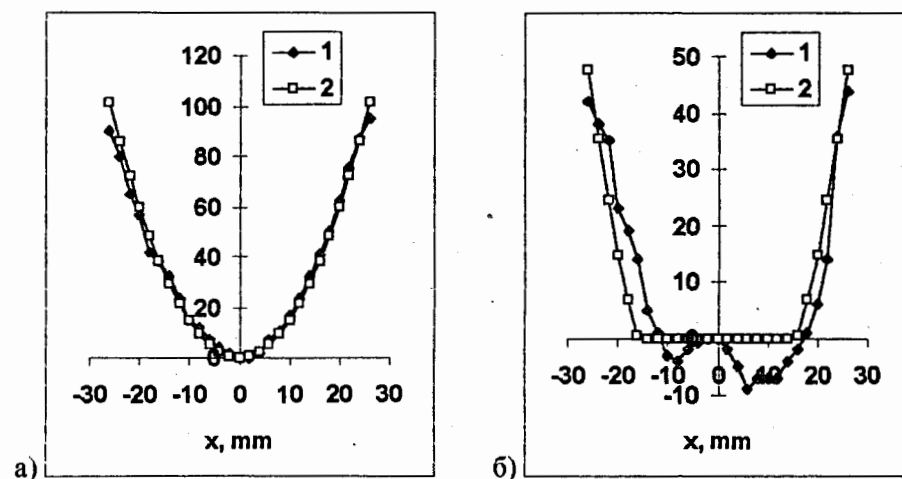


Рис.3. Распределение потенциала электронного пучка по радиусу. 1 - эксперимент, 2 - расчет, а) пробки выключены, б) пробки включены. $E_e=27$ кэВ, $I_e=1.0$ А, $P=10$ пТорр.

На стенде и в системе электронного охлаждения LEAR проведено изучение свободных поперечных электрон-ионных колебаний. Как показали эксперименты, резонансная частота колебаний связана с низшей частотой когерентных колебаний ионов:

$$f = \sqrt{f_p^2 + \frac{f_B^2}{4}} - \frac{f_B}{2} \quad (2)$$

где f_B - циклотронная частота ионов, f_p - плазменная частота. Отношение атомной массы ионов к их заряду на стенде равно $A/Z=12 \div 14$, на LEAR - $A/Z=2 \div 4$. Резонансная частота колебаний понижается в течение развития пучково-дрейфовой неустойчивости, что можно объяснить уходом легких ионов из пучка.

В экспериментах по определению пороговых токов пучково-дрейфовой неустойчивости было получено соответствие с формулой (1) (Таблица 1). Коэффициент усиления поперечных волн K на стенде получен порядка $10 \div 15$.

Следует отметить, что k в формуле (1) также зависит от давления остаточного газа. С уменьшением давления пороговая плотность тока снижается. Качественные результаты на стенде "Рекуператор" и в системе электронного охлаждения LEAR находятся в хорошем согласии.

Таблица 1
Критические параметры нейтрализованного электронного пучка с высокой степенью нейтрализации в системе электронного охлаждения LEAR

| | | | |
|--|------|------|------|
| Энергия электронов, кэВ | 27.5 | 11.5 | 3.2 |
| Ток пучка, А | 1.5 | 0.5 | 0.1 |
| Степень нейтрализации η | 0.9 | 0.85 | 0.75 |
| Переванс пучка, $\mu\text{A}/\text{B}^{3/2}$ | 0.32 | 0.41 | 0.55 |
| Магнитное поле, Гс | 600 | | |

В четвертой главе дается описание активных методов подавления пучково-дрейфовой неустойчивости. Основными причинами ее развития являются существование эффективной обратной связи и низкий уровень температуры ионов (благодаря слабому нагреву основным электронным пучком).

Идею активного подавления неустойчивости можно описать следующим образом. Равновесное значение температуры ионов T_i в зависимости от степени нейтрализации электронного пучка η можно представить в виде некоторой функции T_i^0 (рис.4). Температура ионов монотонно растет в процессе нагрева их электронами основного пучка. При достижении некоторого порогового значения $\eta_{unstable}$ определяемого порогом пучково-дрейфовой неустойчивости, происходит вспышка денейтрализации. Часть ионов при этом покидает пучок и степень нейтрализации скачком уменьшается.

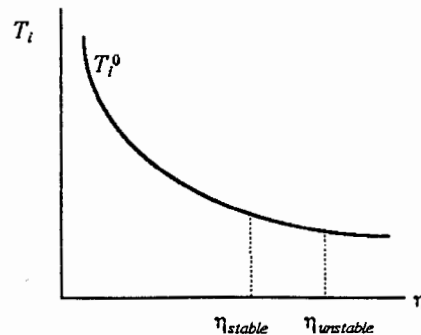


Рис.4. Диаграмма процесса нейтрализации: $T_i^0(\eta)$ - равновесное состояние температуры ионов в зависимости от степени нейтрализации. $\eta_{unstable}$ - пороговое значение степени нейтрализации.

Для стабилизации НЭП можно ввести дополнительный нагрев ионов. При этом степень нейтрализации не достигает порогового значения $\eta_{unstable}$ и пучок существует в стабильном состоянии достаточно длительное время (η_{stable} , рис.4). Уменьшение обратной связи приводит к сдвигу вправо порогового значения $\eta_{unstable}$, что позволяет увеличить степень нейтрализации пучка в стабильном состоянии.

Использование чистящих электродов (рис.5) уменьшает коэффициент обратной связи за счет очистки вторичных электронов, вылетающих из коллектора. Конструкция чистящих электродов аналогична конструкции электростатических пробок, но электроды имеют большую длину - 40 см (в пробке - 10 см) и имеется поперечное магнитное поле для компенсации дрейфа электронов основного пучка в поперечном электрическом поле чистящих электродов.

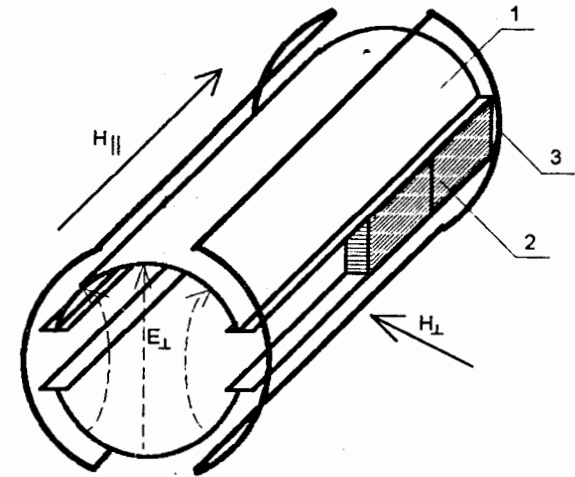


Рис.5. Чистящие электроды. 1 - электрод, 2 - проводящее стекло, 3 - катушка поперечного магнитного поля

Описаны эксперименты по подавлению неустойчивости нейтрализованного электронного пучка с применением шейкера, осуществляющего некогерентный нагрев ионов нейтрализации. Использование шейкера несколько уменьшает степень нейтрализации электронного пучка, но позволяет увеличить пороговый ток неустойчивости.

Обсуждается возможность совместного использования активных методов подавления пучково-дрейфовой неустойчивости, что приводит к повышению порогового тока в несколько раз (рис.6).

Рассматриваются спектральные характеристики электронного пучка в стабильном и нестабильном состоянии.

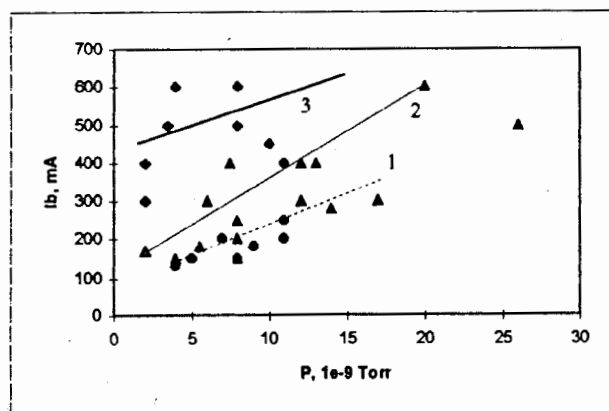


Рис. 6. Зависимость порогового тока от давления остаточного газа: 1 (●) - включены только пробки; 2 (▲) - пробки и чистящие электроды; 3 (◆) - пробки, чистящие электроды, шейкер.

Описаны эксперименты по охлаждению ионов свинца Pb^{54+} с энергией 4.2 МэВ/н нейтрализованным электронным пучком, проведенные в декабре 1995 года на накопителе LEAR. Использование нейтрализованного пучка позволило уменьшить время охлаждения накапливаемых ионов в полтора раза и составило 200 мс при токе пучка 150 мА и энергии электронов 2.5 кэВ.

В **Заключении** приведены основные результаты диссертационной работы:

1. Создан стенд "Рекуператор" ЛЯП ОИЯИ для экспериментального изучения нейтрализованного электронного пучка. Разработаны и введены в действие на стенде и в системе электронного охлаждения LEAR устройства нейтрализации электронного пучка - электростатические пробки.

2. Разработан метод диагностики нейтрализации и устойчивости пучка - диагностический электронный пучок.

3. В системе электронного охлаждения LEAR при ультравысоком вакууме .20 пТорр и магнитном поле 600 Гс получен нейтрализованный электронный пучок с энергией 2.5-27 кэВ, первансом 0.3-0.55 $\mu A/V^{3/2}$ и степенью нейтрализации 0.75-0.9. На стенде "Рекуператор" получен нейтрализованный пучок при давлении

3-20 нТорр в магнитном поле 500 Гс с энергией 2-10 кэВ, первансом 1.5 $\mu A/V^{3/2}$ и степенью нейтрализации 0.6-0.9.

4. Разработаны активные методы подавления неустойчивости: нагрев ионов в поперечном высокочастотном электрическом поле ("шейкер") и путем возбуждения продольных колебаний пучка (модуляция потенциала управляющего электрода электронной пушки), очистка пучка от вторичных электронов с помощью специальных электродов. С использованием этих методов удалось в 2-3 раза повысить ток развития неустойчивости.

5. Результаты исследований были использованы в совместных экспериментах CERN - ОИЯИ по охлаждению ионов свинца Pb^{54+} с энергией 4.2 МэВ/н нейтрализованным электронным пучком на накопителе LEAR. Использование нейтрализованного пучка позволило уменьшить время охлаждения накапливаемых ионов в полтора раза и составило 200 мс при токе пучка 150 мА и энергии электронов 2.5 кэВ.

Основные результаты диссертационной работы излагались в следующих работах:

1. Bosser J., Ley R., Molinari G., Tranquille G., Varenne F., Meshkov I., Poljakov V., Smirnov A., Syresin E. *Electron Cooling With Neutralised Electron Beams*. Fourth European Particle Accelerator Conference. London, 1994, vol.1, p.1211-1213.
2. Bosser J., Caspers F., Chanel M., Ley R., Maccaferri R., Mauri S., Meshkov I., Poljakov V., Smirnov A., Stepashkin O., Syresin E., Tranquille G., Varenne F. *Neutralization of the LEAR Electron-cooling Beam: Experimental Results*. The Particle Accelerator Conference, Dallas, USA, 1995. Preprint CERN/PS 95-17(AR), Geneva, Switzerland, 1995.
3. Мешков И.Н., Поляков В.Н., Смирнов А.В., Степашкин О.Г., Сыресин Е.М. *Развитие техники электронного охлаждения*. Труды 14-ого совещания по ускорителям. Протвино, 1994, т.1, с.5.
4. Лапик Р.М., Мешков И.Н., Поляков В.Н., Селезнев И.А., Смирнов А.В., Сыресин Е.М., Боссер Ж., Лей Р., Транквиль Ж. *Электронная пушка с регулируемым током. Стендовые испытания и первые эксперименты*. Препринт Института ядерной физики СО РАН 93-78, Новосибирск, 1993.
5. Bosser J., Lapik R., Ley R., Meshkov I., Poljakov V., Seleznev I., Smirnov A., Syresin E., Zapunjako A., Zavrazhnov M. *The variable current gun: the parameter tests and the results of the first electron cooling experiments at LEAR*. Nucl. Instr. and Meth., A355, 1995, p.208-222.
6. Bosser J., Tranquille G., Meshkov I., Poljakov V., Seleznev I., Smirnov A., Syresin E., Zapunjako A. *Project for a Variable Current Electron Gun*

for The LEAR Electron Cooler. Preprint CERN/PC 92-03 (AR), Geneva, Switzerland, 1992.

7. Запуняко А.М., Мешков И.Н., Поляков В.Н., Селезнев И.А., Смирнов А.В., Сыресин Е.М., Боссер Ж., Транквиль Ж. *Электронная пушка с регулируемым током пучка для системы электронного охлаждения накопителя LEAR*. Препринт Института ядерной физики СО РАН 92-40, Новосибирск, 1992.
8. Завражнов М.А., Лапик Р.М., Мешков И.Н., Поляков В.Н., Селезнев И.А., Смирнов А.В., Сыресин Е.М., Боссер Ж., Транквиль Ж. *Измерение поперечной энергии электронов в интенсивных холодных пучках*. Препринт Института ядерной физики СО РАН 93-103, Новосибирск, 1993.
9. Golubev V., Meshkov I., Poljakov V., Seleznev I., Smirnov A., Syresin E. *The Optical Analysis of The Electron Beam Temperature*. Workshop on Beam Cooling and Related Topics, 1993, Montreux, Switzerland, p.159-163.
10. Lapik R., Meshkov I., Mozgunov V., Poljakov V., Seleznev I., Smirnov A., Syresin E., Zavrazhnov M. *The Measurement of Transversal and Longitudinal Velocities of an Electron Beam*. Workshop on Beam Cooling and Related Topics, 1993, Montreux, Switzerland, p.164-168.
11. Боссер Ж., Быковский В.Ф., Лей Р., Мешков И.Н., Рогозин А.И., Поляков В.Н., Селезнев И.А., Синицкий В.Б., Смирнов А.В., Сыресин Е.М., Транквиль Ж., Фунтиков В.П. *Новый коллектор для электронного охлаждения ЛИР*. Препринт ИЯФ СО АН СССР 91-25, Новосибирск.
12. Bosser J., Bykovski V., Ley R., Meshkov I., Rogozin A., Poljakov V., Seleznev I., Sinitcki V., Smirnov A., Syresin E., Tranquille J., Funtikov V. *The New Collector for The Electron Cooling Device at LEAR*. Nuclear Instrument and Methods in Physics Reserch, A311 (1992) Nort-Holland.
13. Быковский В.Ф., Мешков И.Н., Поляков В.Н., Селезнев И.А., Смирнов А.В., Сыресин Е.М. *Коллектор типа цилиндра Фарадея с транспортировочным электродом*. Препринт ИЯФ СО АН СССР 93-79, Новосибирск.
14. Агишев С.А., Быковский В.Ф., Завражнов М.А., Запуняко А.М., Лапик Р.М., Мешков И.Н., Пархомчук В.В., Поляков В.Н., Селезнев И.А., Смирнов А.В., Сыресин Е.М. *Система электронного охлаждения комплекса К4-К10*. В кн. "Накопительный комплекс тяжелых ионов К4-К10", Дубна, 1992 г., с.87-99.
15. Agishev S.A., Bykovsky V.F., Meshkov I.N., Poljakov V.N., Seleznev I.A., Smirnov A.V., Syresin E.M. *Electron cooling system of the K4-K10 complex*. Heavy ion Physics Scientific report 1991-1992, JINR Dubna, 1992.

Рукопись поступила в издательский отдел
18 апреля 1996 года.