

ОБЪЕДИНЕННЫЙ ИНСТИТУТ ЯДЕРНЫХ ИССЛЕДОВАНИЙ

9-97-321

На правах рукописи

М-917

МУСТАФИН
Едил Рафаэлович

ПОПЕРЕЧНЫЕ КОГЕРЕНТНЫЕ ЭФФЕКТЫ
В СИСТЕМЕ ЭЛЕКТРОННОГО ОХЛАЖДЕНИЯ
С НЕЙТРАЛИЗОВАННЫМ ЭЛЕКТРОННЫМ ПУЧКОМ

Специальность: 01.04.20 — физика пучков
заряженных частиц и ускорительная техника

Автореферат диссертации на соискание ученой степени
кандидата физико-математических наук

Дубна 1997



Работа выполнена в Институте Теоретической и Экспериментальной
Физики

НАУЧНЫЙ РУКОВОДИТЕЛЬ:

ЗЕНКЕВИЧ доктор физико-математических наук,
Павел Романович Институт Теоретической и Экспериментальной
Физики, г. Москва

ОФИЦИАЛЬНЫЕ ОППОНЕНТЫ:

КОШКАРЕВ доктор физико-математических наук,
Дмитрий Георгиевич Институт Теоретической и Экспериментальной
Физики, г. Москва

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

ВЕДУЩАЯ ОРГАНИЗАЦИЯ: ФИАН им. Лебедева, г. Москва

Защита диссертации состоится « » XII 1997 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 «14» XI 1997 г.

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

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы. Метод электронного охлаждения для накопления ионных пучков с малым разбросом скоростей был предложен Г.И. Будкером. Идея метода заключается в том, что на прямолинейном участке накопителя вводится интенсивный электронный пучок с малым разбросом скоростей. В результате кулоновского взаимодействия с электронами ионы охлаждаются до температуры электронов, и фазовый объем ионного пучка сжимается.

Первый накопитель НАП-М с установкой электронного охлаждения ЭПОХА был построен в 1974 г. Новосибирске. В конце 70-х – начале 80-х годов электронное охлаждение протонов было успешно продемонстрировано в CERN и FNAL.

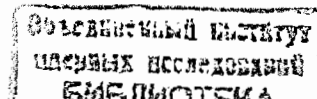
В настоящее время в различных лабораториях мира действуют девять накопителей тяжелых ионов с установкой электронного охлаждения, так называемых кулеров. С появлением кулеров стало возможно проведение прецизионных экспериментов с монохроматическими (с разбросом по энергиям до 10^{-6}) ионными пучками на сверхтонких внутренних мишенях, осуществление масс-спектропии сверхвысокого разрешения, накопление долгоживущих изомеров и изотопов. Стал доступен качественно новый уровень исследований процессов перезарядки, радиационной и диэлектронной рекомбинации, началось развитие лазерного охлаждения. Возникло новое направление в физике пучков – кристаллические пучки.

Техника электронного охлаждения развивается по нескольким направлениям, имеющим общей целью повышение его эффективности и расширение области применения. К ним относятся:

- генерация электронных пучков с предельной плотностью тока при минимально достижимой температуре электронов,
- формирование электронных пучков в устройствах с нейтрализацией пространственного заряда электронов,
- то же – в адиабатически медленно спадающем магнитном поле для снижения поперечной температуры электронов (за счет увеличения продольной),
- расширение диапазона энергий электронов в мегаэлектронвольтовую область,
- создание эффективных рекуператоров энергии электронов.

Нейтрализация пространственного заряда электронов применяется для снижения разброса скоростей в охлаждающем пучке, обусловленном собственным электромагнитным полем пучка.

Но еще экспериментальные работы Незлина и его коллег выявили, что в длинных компенсированных пучках электронов наступает неустойчивое состояние нейтрализованной системы из-за возбуждения



пучково-дрейфовой неустойчивости электрон-ионной плазмы с пороговой плотностью тока:

$$j_{th} = \frac{v_0^2 B}{8Lc} \left(1 + \frac{1}{\ln \sqrt{b/a}} \right), \quad \frac{a^2}{L} \ll \frac{mc v_0}{eB}, \quad (1)$$

где v_0 - скорость электронов, L - длина электронного пучка, B - фокусирующее магнитное поле.

Однако, эксперименты на НАП-М в условиях высокого вакуума и малого количества отраженных от коллектора вторичных электронов продемонстрировали значительное увеличение пороговых токов. Так, при энергии электронов 35 кэВ неустойчивость отсутствовала вплоть до максимально достижимой по первансу коллектора плотности тока равной 3 А/см^2 , что примерно в 4 раза превышает порог неустойчивости, определяемый Ур.(1). Но в этих экспериментах не проводились прямые измерения степени нейтрализации электронного пучка.

На установке "Модель соленоида", ИЯФ Новосибирск в 1984-1987 г.г. было проведено всестороннее экспериментальное исследование компенсированного состояния электронного пучка. Было выявлено, что хорошая нейтрализация существует в довольно узком диапазоне давлений остаточного газа, а именно при $P \approx 10^{-6} \div 10^{-8}$ Па; кроме верхнего порога по току, существует еще и нижний порог (отсутствие компенсации ниже некоторых величин токов); за порогом устойчивости возбуждаются поперечные электрон-ионные колебания, т.е. пучково-дрейфовая неустойчивость, которая сопровождается раскачкой продольных колебаний ионного столба. Следует отметить, что особенностью данной модельной установки является маленький радиус электронного пучка $a=1$ мм, при сравнительно большом радиусе вакуумной камеры $b=20$ мм.

Экспериментальные работы на ECOOL (система электронного охлаждения в накопителе LEAR, CERN) проведенные при более высоком вакууме $P \approx 10^{-10} \div 10^{-11}$ Па, с большим радиусом электронного пучка $a=25$ мм, при радиусе вакуумной камеры $b=70$ мм, показали, что высоко компенсированное состояние электронного пучка на этой установке менее стабильно, чем на "Модели соленоида". В частности, декремент затухания свободных поперечных колебаний компенсированного пучка на порядок ниже, чем в новосибирской установке.

Результаты настоящей работы во многом основаны на теоретическом осмыслении экспериментальных результатов коллаборации CERN (LEAR, руководитель J.Bosser) – Россия (ОИЯИ, ИТЭФ, руководитель И.Мешков) 1992-1996 г.г. по изучению нейтрализованного электронного пучка в системе электронного охлаждения LEAR (CERN) и на стенде "Рекуператор" (ЛЯП ОИЯИ) [1].

Основные цели работы. Данная работа посвящена теоретическому исследованию поперечных коллективных эффектов в нейтрализованном

пучке электронов. Особое внимание при этом уделялось следующим положениям:

- исследование взаимосвязи параметров нейтрализующего ионного пучка с параметрами самосогласованных эргодических распределений в фазовом пространстве;
- исследование поперечной сносовой и абсолютной неустойчивостей в линейном приближении в рамках феноменологической модели;
- исследование эволюции пучка нейтрализующих ионов в электрическом поле однородного электронного пучка численным моделированием поперечных колебаний с помощью метода крупных частиц.

Научная новизна и значимость работы. Проведенные теоретические исследования позволили выявить главные особенности нейтрализованного электронного пучка:

- самосогласованное распределение ионов в стационарном состоянии может быть описано эргодическим распределением, основные параметры пучка качественно не зависят от выбора "разумной" модели зависимости функции распределения от энергий;
- при не слишком больших значениях дебаевского радиуса значительная часть компенсирующих ионов находится в "ионной шубе" (за пределами электронного пучка в поперечном направлении) и, тем самым, не дают вклада в снижение разброса скоростей в охлаждающем электронном пучке;
- разброс продольных скоростей нейтрализующих ионов дает малый вклад в демпфирование свободных колебаний центра тяжести пучка;
- наиболее опасными, с точки зрения обратной связи, являются отраженные от коллектора и многократно циркулирующие в системе вторичные электроны с "памятью";
- применение сосредоточенной электронной (радиотехнической) обратной связи для подавления абсолютной неустойчивости поперечных колебаний, вызванных вторичными электронами, неэффективно;
- как показали теоретический анализ и численное моделирование двумерных поперечных колебаний ионов во внешнем поле, образованным постоянным по плотности электронным пучком, источником затухания свободных колебаний нейтрализующего пучка могут быть только нейтрализующие ионы с энергией достаточной для того, чтобы выйти в нелинейное поле электронов за пределами электронного пучка в поперечном направлении;
- анализ уравнения баланса числа частиц и уравнения баланса энергии позволил качественно согласовать феноменологическую теорию с результатами экспериментов на LEAR и на стенде "Рекуператор".

Практическая ценность работы. С улучшением вакуума и приближением поперечных размеров электронного пучка к размеру вакуумной камеры уменьшается количество нейтрализующих ионов в "ионной шубе", что ведет к ухудшению стабильности компенсированного состояния. Это дает качественное объяснение различию условий стабильности для LEAR и для "Модели соленоида".

Установившееся стационарное состояние ионного пучка зависит от темпа нагрева ионов. Для установок с большим радиусом электронного пучка, таких как в LEAR, определяющим источником нагрева являются неупругие столкновения ионов с электронами, а когерентные колебания ион-электронной системы, возбуждаемые стохастическими шумами.

Теоретическое исследование показало, что практически наиболее опасными переносчиками обратной связи с системе электронного охлаждения являются вторичные электроны с "памятью". Причем, введение сосредоточенной электронной (радиотехнической) обратной связи для подавления абсолютной неустойчивости когерентных поперечных колебаний, возбуждаемой циркулирующими в системе вторичными электронами, является мало эффективным. Для повышения порогового тока необходимо применение рассредоточенной системы обратной связи, а также очищение системы от вторичных электронов.

Частота когерентных дипольных колебаний нейтрализованной системы зависит от степени нейтрализации, и при факторе нейтрализации близкой к единице может быть существенно (на 20÷25 %) ниже, чем при слабой нейтрализации. В частности, этот факт указывает на то, что данную зависимость необходимо учитывать при определении отношения заряд/масса нейтрализующих ионов из экспериментальных спектров свободных колебаний нейтрализованного пучка.

Апробация работы. Материалы диссертации представлялись на Европейской ускорительной конференции, Лондон, 1994; Международной ускорительной конференции, Даллас, США, 1995; Международной конференции "Beam Cooling and Damping", Дубна, 1996; Международном семинаре "New Ideas for Particle Accelerators", Санта-Барбара, США, 1996; а также обсуждались на научных семинарах в Европейском центре ядерных исследований (Женева).

Структура и объем работы. Диссертация состоит из Введения, четырех глав, Заключения, списка литературы. Текст диссертации изложен на 81 страницах, включая 27 рисунков и 4 таблицы. Список литературы содержит 42 наименования.

СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во Введении обоснована актуальность темы диссертации, дан краткий анализ проблем, решаемых в диссертации, и сформулированы цели исследований, вошедших в работу.

В первой главе обсуждается процесс нейтрализации электронного пучка и установившееся самосогласованное распределение ионного сгустка. Электронный пучок нейтрализуется ионами, которые образуются из атомов остаточного газа в результате неупругого соударения этих атомов с быстрыми электронами, с последующим захватом ионов полем пространственного заряда интенсивного электронного пучка. Важную роль в установлении самосогласованного распределения ионов играют упругие и неупругие кулоновские соударения в ион-электронной системе:

- неупругие столкновения приводят, при большом времени жизни ионов, к появлению ионов с высокой зарядностью Q (последовательная ионизация), что резко увеличивает частоту ион-ионных столкновений ($\nu_{ii} \sim Q^4$);
- упругие столкновения быстрых электронов с ионами ведет к нагреву ионного сгустка;
- ион-ионные упругие соударения ведут к "эргодизации" установившегося распределения ионов в фазовом пространстве, т.е. единственным инвариантом движения, от которого может зависеть стационарная функция распределения, является интеграл энергии;
- ион-ионные столкновения ведут также к "максвеллизации" стационарного распределения ионов, т.е. к появлению длинного высокоэнергетического хвоста распределения;
- уход ионов из системы на стенки вакуумной камеры происходит именно через высокоэнергетичный хвост распределения ионов, при этом температура установившегося распределения может быть значительно ниже, чем поперечный потенциальный барьер, образованный пространственным зарядом ион-электронной системы (т.н. "подбарьерный" уход ионов);
- выравнивание температур различных ионных компонент ведет к вымыванию из системы легких малозарядных ионов, т.к. при одинаковой кинетической энергии потенциальный барьер для них ниже, чем для многозарядных ионов;

Самосогласованное распределение ионов в поле однородного электронного пучка может быть описано функцией Максвелла-Больцмана. При этом все интересные физические параметры системы будут зависеть от одного свободного параметра (например, от температуры ионов). Указанная зависимость была численно исследована для распределения Максвелла-Больцмана, кроме того удалось построить аналитическое решение для

распределения “водяной мешок” в фазовом пространстве (в нелинейном поле электронов) [2,3]. Сравнение результатов вычислений показывает, что физические параметры слабо зависят от вида функции распределения. Из Рис.1 видно, что даже при степенях нейтрализации, близких к 100%, существует “ионная шуба” – некоторое количество ионов за пределами электронного пучка. Экспериментальные данные на ECOOL свидетельствуют о наличии такой “ионной шубы” в частично компенсированном электронном пучке [4].

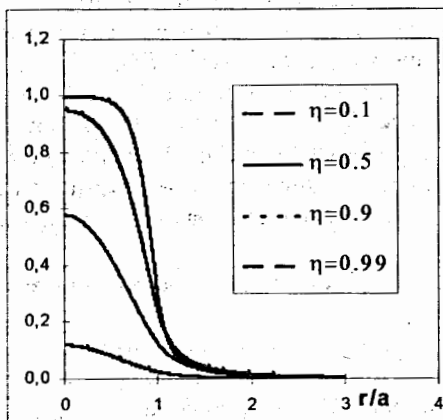


Рис.1 Зависимость отношения плотности заряда ионов к плотности заряда электронов от радиуса. $\eta = Q_i N_i / N_e$, $N_{e,i}$ – количество электронов и ионов внутри вакуумной камеры, a – радиус электронного пучка.

Во второй главе исследована пучково-дрейфовая неустойчивость нейтрализованного электронного пучка в рамках гидродинамической модели, когда в линеаризованные уравнения для движения центра тяжести пучка вводится, как феноменологический параметр, декремент затухания свободных колебаний ионов [5-7]. Поперечная неустойчивость когерентных колебаний центра тяжести нейтрализованного пучка имеет сносный характер, если в системе отсутствует обратная связь, которая может переносить информацию в направлении, обратном к движению электронов. Сносная неустойчивость характеризуется ростом амплитуды колебаний в продольном направлении, при отсутствии затухания во времени. Наличие обратной связи в системе может привести к возникновению абсолютной неустойчивости поперечных колебаний центра тяжести пучка, т.е. к росту амплитуды колебаний во времени.

Одним из наиболее важных источников обратной связи являются отраженные от коллектора вторичные электроны. Анализ дисперсионного уравнения, выведенного с учетом наличия в системе вторичных

электронов, показывает, что наиболее опасными являются те вторичные электроны, которые могут многократно циркулировать в системе электронного охлаждения. Порог возникновения абсолютной неустойчивости для этих электронов на порядок ниже, для однопролетных электронов. Показано также, что введение системы сосредоточенной радиотехнической обратной связи, которая состоит из точечного пикапа в конце пучка и точечного кикера в начале, является малоэффективным в борьбе с абсолютной неустойчивостью. Пороговый ток может быть, возможно, улучшен при наличии нескольких пикапов и кикеров по длине пучка, а также при эффективной очистке системы от вторичных электронов.

В рамках гидродинамических уравнений исследовано влияние разброса продольных скоростей ионов на демпфирование поперечных колебаний центра тяжести ион-электронного пучка. Показано, что данный механизм практически не дает вклада в стабилизацию поперечных колебаний.

Проведено сравнение широкого спектра экспериментальных данных на установке электронного охлаждения LEAR с выводами гидродинамического подхода с целью определения феноменологически введенного параметра декремента затухания свободных колебаний ионов [7]. Полученные из различных экспериментальных зависимостей значения декремента затухания γ_L хорошо согласуются друг с другом и равны приблизительно 5 % от резонансной частоты ω^{coh} . Т.е. величина мнимой части диэлектрической проницаемости для нейтрализованного электронного пучка LEAR равна:

$$\epsilon_1'' \approx \gamma_L \omega^{coh} \approx 0.05 \quad (2)$$

Этот результат значительно отличается от данных на установке “Модель соленоида”, где $\epsilon_1'' \approx 0.3$.

Для объяснения данного расхождения была выдвинута гипотеза, что затухание свободных колебаний системы определяется наличием в системе ионов, которые могут в своем движении выходить за пределы линейной части электрического поля внутри электронного пучка и часть времени двигаться в сильно нелинейном поле за пределами электронного пучка. Эта гипотеза объясняет экспериментальную зависимость порогового тока нейтрализованного пучка от давления – при улучшении вакуума пороговый ток хорошо скомпенсированного пучка падает. Более высокий вакуум не только увеличивает время жизни ионов, но ведет также к смещению ионного состава нейтрализующего пучка в сторону многозарядных частиц, а это значительно увеличивает частоту парных столкновений ($\nu_{ii} \sim Q^4$). Поэтому установившееся самосогласованное распределение ионов будет иметь более низкую температуру (см. Ур.(3)), т.е. меньше частиц в хвосте распределения, что ведет к ухудшению стабильности системы. Кроме более низкого вакуума (10^{-6} – 10^{-8} Па по сравнению 10^{-10} – 10^{-11} Па для

LEAR), установка “Модель соленоида” имеет большее отношение размера вакуумной камеры к размеру электронного пучка: $r_w/a = 20$ для “Модели соленоида”, $r_w/a = 3$ для LEAR. Это тоже приводит к более длинному ионному хвосту и более стабильному нейтрализованному пучку, по сравнению с установкой электронного охлаждения на LEAR.

В третьей главе изложены результаты численного моделирования двумерных колебаний ионов в поле однородного электронного пучка [3]. Цель численного моделирования методом макрочастиц заключалась в том, чтобы подтвердить, что механизм затухания свободных колебаний ионов связан с высокоэнергетическим хвостом распределения ионов по энергиям. Была разработана компьютерная программа на языке Фортран со следующими данными.

Модель:

- электронный пучок неподвижен в поперечном направлении, а его электрическое поле (не меняющееся во времени) играет роль внешнего фокусирующего поля для ионов, которые описываются макрочастицами;
- ионы неподвижны в продольном направлении;
- функция распределения ионов в поперечном фазовом пространстве в стационарном состоянии является эргодической.

Алгоритм:

- макрочастицы моделируются методом “облако в ячейке”;
- потенциал вычисляется методом быстрого преобразования Фурье;
- круглое сечение камеры заменяется квадратным с “невязкой” $\approx (b/r_w)^4$;
- схема распределения заряда на узлы сетки обеспечивает сохранение импульса.

Компьютер:

- PC с процессором Pentium;
- тактовая частота 90 Меггерц;
- оперативная память 16 Мегабайт.

Типичные параметры программы:

- количество макрочастиц 500÷800 тысяч;
- количество узлов в сетке 257×257 и 513×513 ($2^n + 1 \times 2^n + 1$, с $n = 8$ и 9);
- время счета одного шага интегрирования 10÷20 секунд.

Программа была протестирована на микроканоническом распределении ионов по энергиям, для которого имеются аналитические решения Глюкстерна. Результаты теста с хорошей точностью совпали с выводами Глюкстерна: колебания центра тяжести ионного пучка являются чисто синусоидальными (не затухают и не растут во времени), квадрат частоты двух низших квадрупольных мод линейно зависит от степени нейтрализации.

Далее исследовались колебания центра тяжести и формы пучка ионов с распределением “водяной мешок” в фазовом пространстве для чисто линейного внешнего поля. Результаты расчетов показали, что частота колебаний центра тяжести ступка макрочастиц не зависит от степени нейтрализации, а определяется только внешним полем, что полностью соответствует общей теореме о том, что нелинейность собственного поля ступка не ведет к стабилизации дипольных колебаний если внешнее поле не имеет нелинейности.

Далее рассматривались колебания ионов с распределением “водяной мешок” для случая, когда ионный ступок превышает по радиусу электронный. В такой модели только центральная часть ионного пучка (в пределах однородного электронного пучка) находится в линейном внешнем поле. За пределами электронного пучка ионы двигаются в сильно нелинейном поле электронов. Показано, что в колебаниях центра тяжести ступка макрочастиц при нейтрализации 10÷70 % присутствует по крайней мере две моды: одна мода очень быстро (в течении нескольких периодов колебаний) затухает, ей соответствует широкий пик в спектре колебаний, другая мода не затухает (или затухает очень слабо – за пределами точности счета), ей в спектре соответствует линия без ширины. При увеличении степени нейтрализации амплитуда широкополосной моды падает, по сравнению с узкополосной. Кроме того, при нейтрализации 80÷90 % наблюдается слабое затухание узкополосной моды с шириной пика в спектре $\Delta\omega/\omega \approx 0.02$. На Рис.2 представлены колебания центра тяжести ионного пучка и соответствующий спектр для степени нейтрализации 80%.

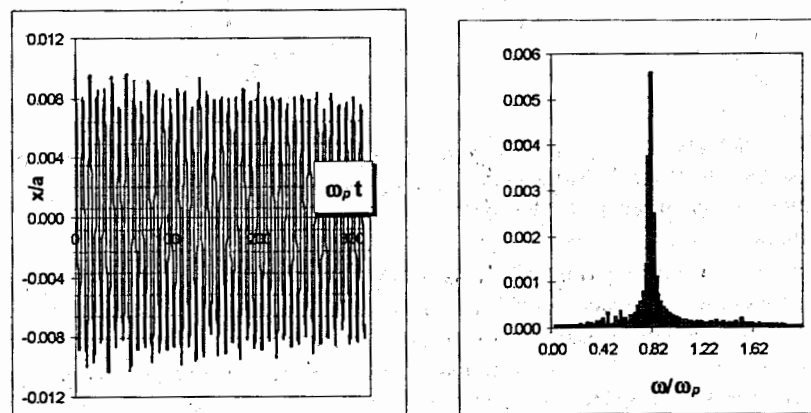


Рис.2 Колебания центра тяжести пучка макрочастиц и соответствующий спектр (нейтрализация 80%, ω_p – плазменная частота).

Другой особенностью колебаний центра тяжести является зависимость частоты колебаний от степени нейтрализации – частота падает с ростом нейтрализации. Так при степени нейтрализации 90 % частота колебаний центра тяжести ионов может отличаться на 25 % от частоты пучка со слабой кулоновской нагрузкой. Это необходимо учитывать при определении отношения заряд/масса иона из экспериментальных спектров колебаний ионов.

Из Рис.3 видно, что максимальное количество частиц в хвосте распределения (за пределами электронного пучка) для модели “водяной мешок” приходится именно на степени нейтрализации 80÷90 %, поэтому можно сделать вывод, что численный счет подтверждает гипотезу о том, что механизмом демпфирования свободных колебаний ионов в поле однородного электронного пучка является наличие ионов, которые в своем движении могут проводить часть времени в сильно нелинейном поле за пределами электронного сгустка.

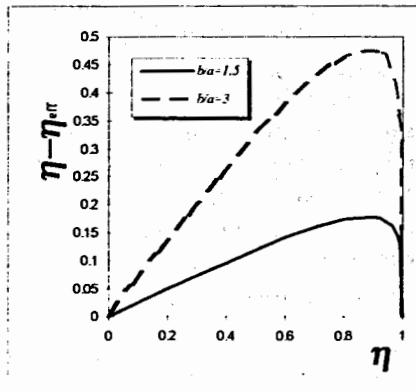


Рис.3 Зависимость количества ионов в “ионной шубе” от степени нейтрализации. $\eta_{\text{эф}} = Q_i N_{\text{эф}}/N_e$, $N_{\text{эф}}$ – количество ионов внутри электронного пучка, b/a – отношение радиусов ионного и электронного пучков.

В четвертой главе рассматриваются и решаются уравнения баланса числа частиц и энергии. Как отмечалось, параметры ионного сгустка с самосогласованным распределением Максвелла-Больцмана зависят от одного свободного параметра, которым может быть, например, температура пучка. Известно, что если в системе нет нагрева ионов, то самосогласованное распределение может иметь только нулевую температуру при полной компенсации электронного пучка. Наличие нагрева в системе приводит к установлению стационарного состояния с

ненулевой энергией, значит и с неполной компенсацией. Проведенный анализ уравнения Фоккера-Планка с учетом ион-ионных столкновений показывает, что для стационарного распределения характерно следующее соотношение:

$$H_{\text{max}}/T \approx \ln(v_{ii} \tau_{\text{neutr}}), \quad (3)$$

где H_{max} – максимальная энергия, с которой ионы покидают систему, T – температура ионов, τ_{neutr} – время нейтрализации системы. Для системы электронного охлаждения LEAR это отношение может быть равно 5÷8, что говорит о том, что температура ионного сгустка может быть значительно ниже, чем потенциальный барьер, создаваемый пространственным зарядом нейтрализованной системы.

В уравнении баланса энергии учитывается как некогерентный нагрев ионов из-за кулоновских столкновений с быстрыми электронами, так и когерентный нагрев шумом Шоттки (который усиливается вдоль пучка из-за механизма сносовой неустойчивости). Численные оценки показывают, что в интенсивном электронном пучке ECOOL с большим диаметром основной вклад в нагрев дает когерентный член. Для решения уравнения баланса необходимо знать зависимость мнимой части диэлектрической проницаемости ϵ_1'' от температуры пучка T . На установке “Модель соленоида” была экспериментально проверена формула:

$$\epsilon_1'' = \sqrt{\frac{4Q_i \bar{T}}{\pi}} \quad (4)$$

где $\bar{T} = T/eQ_i U_0$ – температура ионов, нормализованная на U_0 – разность потенциалов некомпенсированного электронного пучка между центром и краем пучка.

В Таблице 1 приведены стационарные параметры компенсированного электронного пучка для режима LEAR, которое соответствует режиму охлаждения ионов свинца, а также вычисленные с применением Ур.(4) значения температуры ионов, отношения радиуса электронного пучка к дебаевскому радиусу a/r_D и ϵ_1'' . Видно, что вычисленные значения ϵ_1'' согласуются с экспериментальными данными на LEAR Ур.(2). Но значения a/r_D соответствуют слишком большим степеням нейтрализации 90÷100 %. Экспериментально установленные значения степени нейтрализации для LEAR в данном режиме составляют 70÷80 %. Данное расхождение связано, видимо, с неприменимостью для условий LEAR Ур.(4). Для корректного определения зависимости ϵ_1'' от температуры необходимо усовершенствовать модель описанную в Главе 3: во-первых, исследовать трехмерные колебания, во-вторых, включить колебания электронного пучка. Однако, в данный момент численное исследование такой модели находится за пределами наших вычислительных мощностей.

Таблица 1

| | | |
|--|-----------------------------------|---------|
| β , скорость электронов | 0.103 | |
| τ_{neut} , время нейтрализации | 3 сек | |
| a , радиус электронного пучка | 2.5 см | |
| b , радиус вакуумной камеры | 7 см | |
| A_i , атомный номер ионов | 14 | |
| Q , зарядовый номер ионов | 3 | |
| L , длина установки | 3 м | |
| I , ток электронного пучка | 0.13 А | |
| U_0 , потенциал электронов при $r=a$ | 38 В | |
| B , магнитное поле | 600 Гс | |
| n_e , концентрация электронов | $1.34 \cdot 10^7 \text{ см}^{-3}$ | |
| χ , коэффициент обратной связи | 0.1 | 0.02 |
| $\ln(v_{ii} \tau_{neut})$ | 4.3 | 5.7 |
| T , температура | 1.1 эВ | 0.42 эВ |
| $a r_D = \kappa a$ | 6.97 | 9.77 |
| ϵ_1'' | 0.078 | 0.048 |

Видно, что вычисленные значения ϵ_1'' согласуются с экспериментальными данными на LEAR Ур.(2). Но значения $a r_D$ соответствуют слишком большим степеням нейтрализации 90÷100 %. Экспериментально установленные значения степени нейтрализации для LEAR в данном режиме составляют 70÷80 %. Данное расхождение связано, видимо, с неприменимостью для условий LEAR Ур.(4). Для корректного определения зависимости ϵ_1'' от температуры необходимо усовершенствовать модель описанную в Главе 3: во-первых, исследовать трехмерные колебания, во-вторых, включить колебания электронного пучка. Однако, в данный момент численное исследование такой модели находится за пределами наших вычислительных мощностей.

В Заключении приведены основные результаты диссертационной работы:

1. Выдвинута и обоснована гипотеза о механизме демпфирования свободных колебаний нейтрализующих ионов высокоэнергетическим хвостом распределения ионов по энергиям за счет сильно нелинейного поля электронов за пределами электронного сгустка в поперечном направлении. Данная гипотеза качественно правильно объясняет экспериментальную зависимость порогового тока высококомпенсированного электронного пучка от давления остаточного газа, которая раньше не была объяснена теоретически.
2. Показано, что главным источником абсолютной неустойчивости в системе электронного охлаждения являются быстрые вторичные

электроны, отраженные от коллектора, которые могут многократно циркулировать в системе. Введение сосредоточенной системы радиотехнической обратной связи является неэффективным в борьбе против абсолютной неустойчивости. Необходима рассредоточенная система обратной связи и эффективная очистка вторичных электронов.

3. Создана компьютерная программа для моделирования методом макрочастиц двумерных колебаний ионов в поле электронного пучка. Программа была успешно протестирована на моделях для которых имеются аналитические решения. Проведенный численный расчет подтвердил выдвинутую в пункте 1. гипотезу. Установлена зависимость частоты когерентных дипольных колебаний от степени нейтрализации.
4. Выведены и решены уравнения баланса числа частиц и баланса энергии. Вычислены самосогласованные параметры установившегося стационарного распределения нейтрализующих ионов.
5. Результаты расчетов находятся в согласии с экспериментальными данными в системе электронного охлаждения LEAR, на установке "Рекуператор" и ранее опубликованными данными на установке "Модель соленоида".

Основные результаты диссертационной работы опубликованы в следующих работах:

1. J.Bosser, M.Chanel, R.Ley, I.Meshkov, D.Moehl, E.Mustafin, A.Smirnov, E.Syresin, F.Varenne, P.Zenkevich et al. *Report of CERN-PS/JINR 1994-1995 collaboration*. To be printed in 1997.
2. I.Meshkov, E.Syresin, E.Mustafin, P.Zenkevich *Stationary Parameters of Neutralized Electron Cooling System*, NIM, May 21, 1997, Vol.391, N 1, pp. 123-127
3. P.Zenkevich, E.Mustafin "Neutralized Beams: Landau Damping in System with Strong Nonlinearity", in *Proc. of "New Ideas for Particle Accelerators"*, Santa-Barbara, USA, 1996, to be printed in 1997.
4. E.Mustafin, D.Moehl *The Distribution of the Neutralising Ions in the LEAR Electron Cooling System*. CERN, PS/DI/Note 97-18, Geneva, 1997.
5. E.Mustafin, P.Zenkevich *Influence of Fast Secondary Electrons on the Dipole Oscillations in Neutralised Electron Beams*, NIM, May 21, 1997, Vol.391, N 1, pp. 107-109
6. E.Mustafin, P.Zenkevich *Generalized Theory of Dipole Electron-Ion Oscillations*. CERN, PS/AR Note, Geneva, 1995.
7. E.Mustafin *Influence of Reflected Electrons on the Stability of Neutralised Electron Beams*. CERN, PS/DI/Note 97-18, Geneva, 1997.

Рукопись поступила в издательский отдел
29 октября 1997 года.