

ИНСТИТУТ ЯДЕРНОЙ ФИЗИКИ СО АН СССР

Н.С. Диканский, Н.Х. Кот, В.И. Куделайнен,
В.А. Лебедев, В.В. Пархомчук, А.А. Серый,
А.Н. Скринский, Б.Н. Сухина

ВЛИЯНИЕ ЗНАКА ЗАРЯДА ИОНА
НА СИЛУ ТРЕНИЯ
ПРИ ЭЛЕКТРОННОМ ОХЛАЖДЕНИИ

ПРЕПРИНТ 87-102

НОВОСИБИРСК
1987

Влияние знака заряда нона на силу трения
при электронном охлаждении

Н.С. Лукацкий, Н.Х. Кот, В.И. Кудеалкин,
В.А. Лебедев, В.В. Пархомчук, А.А. Серый,
А.Н. Скрипский, Б.Н. Сухина

Институт ядерной физики
630090, Новосибирск 90, СССР

АННОТАЦИЯ

Проведены эксперименты по измерению силы трения, действующей на нонь при их движении в холодном заматниченном электронном пучке. Обнаружено, что существует заметная разница в силах трения для положительных и отрицательных нонов. Дано качественное объяснение наблюдаемой разнице в силах трения.

© Институт ядерной физики СО АН СССР

ВВЕДЕНИЕ

Электронное охлаждение было предложено Г.И. Будаковым в 1966 г. Экспериментальное исследование метода электронного охлаждения впервые было проведено в Новосибирске на накопительных протонов НАТИ-M. Минимальное достигнутое время охлаждения составляло 0.083 с, что было примерно на порядок меньше, чем теоретически ожидаемое время охлаждения. Это отличие было обусловлено заматниченностью поперечного движения электронов, что приводит к снижению их эффективной температуры [2] и возрастанию силы трения при малых скоростях частиц («быстрое электронное охлаждение»). В экспериментах на НАТИ-M пучок протонов охлаждался до очень малых температур, на несколько порядков меньших поперечной температуры электронов. Кроме того, было замечено, что поперечный угловой разброс в охлажденном пучке был на порядок больше продольного разброса. Это объяснялось тем, что протон при входе в электронный пучок притягивается ближайшим электром, который в течение всего времени взаимодействия колеблется в продольном направлении около протонов, приводя к сильному увеличению поперечной диффузии [5]. В случае охлаждения отрицательных частиц такой электрон отталкивается и этот эффект наблюдаться не должен.

Быстрое электронное охлаждение, позволяя эффективно охлаждать пучки тяжелых частиц до уникально малых температур, отдало бы возможность новые эксперименты в эксперименте по физике элементарных частиц и атомного ядра [2, 12]. Многие уско-

Рительные лаборатории мира приступили к освоению и реализации возможностей электронного охлаждения. Были проведены успешные эксперименты по электронному охлаждению в ЦЕРН и Фермилаб [13]. Дальнейшее исследование физики быстрого электронного охлаждения было проведено в Новосибирске на установке «Модель соленоида» [7], параметры которой позволили исследовать охлаждение в полнотью заматниченном случае. На этой установке была достигнута сила трения, близкая к теоретически возможной $F_{\text{max}}^{\text{max}} \approx e^2 n^{2/3}$. В данной работе описаны эксперименты по изучению заматниченной силы трения как для положительных, так и для отрицательных охлаждаемых частиц. Важность охлаждения отрицательных частиц определяется возможностью применения по-лученных результатов к охлаждению антипротонов.

1. КАРТИНА ВЗАИМОДЕЙСТВИЯ

Основой метода электронного охлаждения является теплообмен между пучком тяжелых заряженных частиц и электронным пучком, движущимся с той же средней скоростью [1, 2]. При уменьшении относительных скоростей электронов и ионов эффективность взаимодействия возрастает, что приводит к возрастанию скорости охлаждения. При электростатическом ускорении электронного пучка продольная температура электронов будет много меньше поперечной [6]. Поперечное магнитное поле, удерживающее электронный пучок, «заматничивает» поперечное движение электронов, что при малой продольной температуре электронов вызывает рост вклада в охлаждение столкновений с большими прицельными параметрами [3, 4].

Здесь n — плотность электронов; e , m — заряд и масса электронов; v_{\perp} и v_{\parallel} — продольная и поперечная к магнитному полю компоненты

$$F_{\parallel} = -\frac{2\pi n e^4 L_e}{m v^2} \frac{v_{\parallel}}{2 v_{\perp}^2}, \quad F_{\perp} = -\frac{2\pi n e^4 L_e}{m v^2} \frac{v_{\perp}}{v^2 (v_{\parallel}^2 + v_{\perp}^2)}.$$

4

ты скорости иона; $L_e = \ln \frac{r_{\text{max}}}{r_{\text{min}}}$ — кулоновский логарифм, r_{max} и r_{min} — прицельные параметры столкновений:

$$r_{\text{max}} = v \sqrt{\frac{m}{4\pi e^2}}, \quad r_{\text{min}} = \frac{2e^2}{mv^2}.$$

Условие применимости выражения (1) заключается в достаточно большом значении L_e , а значит

$$r_{\text{max}} \gg r_{\text{min}}.$$

Однако в процессе охлаждения скорость тяжелой частицы v уменьшается и условие (2) нарушается уже при

$$v \approx \sqrt{\frac{m}{e^2 n}}.$$

(3)

Это значение скорости соответствует характерной скорости, возникшей в электронном пучке при взаимном растаивании первоначально хаотически расположенных электронов. Примерно такие значения разброса продольных скоростей и получаются в электронном пучке после быстрого ускорения в сильном магнитном поле [6, 7]. Установившиеся же значения разброса скоростей тяжелых частиц в процессе охлаждения в $\sqrt{\frac{m}{M}}$ раз меньше, и поэтому близки равновесия условия (2) нарушены. В этих условиях неизбежно возникает разность в силе трения положительных и отрицательных заряженных частиц, движущихся в электронном потоке. В системе отсчета охлаждаемой частицы в случае ее отрицательного заряда она отталкивает электроны, налетающие на нее с прицельными параметрами $r > r_{\text{min}}$. Импульс электронов при этом изменяется на $2mv$. В случае же положительных заряженных частиц такие электроны будут проталкиваться мимо нее без изменения своего импульса. Этот эффект приводит к появлению дополнительного вклада в силу трения для отрицательно заряженных частиц:

$$\Delta F_{\parallel} = -\pi r_{\text{min}}^2 \cdot n v \cdot 2mv = -\frac{2\pi n e^4}{m v^2} \cdot 4,$$

что в условиях $L_e \sim 1$ заметно повышает силу трения. Расчеты силы трения с учетом следующих приближений по теории возмущений

(4)

5

ний довольно громоздки, поэтому проводились численные моделирование силы трения при скоростях движения частицы $v \geq \left(e^2 n^{1/3} \right)^{1/2}$. На рис. 1 показаны результаты численных расчетов

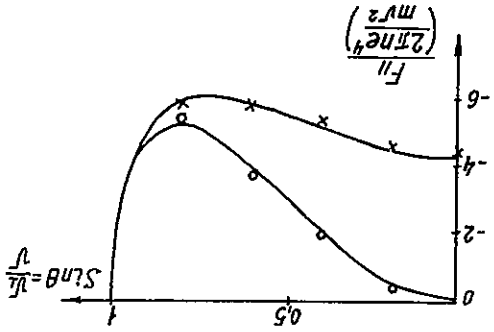


Рис. 1. Продольная сила трения для положительно и отрицательно заряженных частиц при скоростях движения $v = 5 \left(\frac{m}{e^2 n^{1/3}} \right)^{1/2}$. Кривые проведены в соответствии с выражением (5).

продольной силы трения при различных углах движения частицы относительно магнитного поля θ и для разного знака заряда. Кривые на рисунке проведены в соответствии с выражением

$$F_{\parallel} = -\frac{2\pi n e^2 Q^2}{mv^2} \left(4.5 \cos \theta \cdot Z(Q) + 2 \cos \theta \cdot \sin^2 \theta \cdot \ln \left(\frac{m}{e^2 n^{1/3}} \right)^{3/2} \right), \quad (5)$$

где

$$Z(Q) = \begin{cases} 1, & Q < 0 \\ 0, & Q \geq 0 \end{cases}$$

Q — заряд частицы. Это выражение является просто некоторой комбинацией выражений (1) и (2), описывающей результаты численного моделирования. Поскольку при численном моделировании пренебрегалось взаимодействием электронов между собой, его результаты справедливы только при $v > \left(\frac{m}{e^2 n^{1/3}} \right)^{1/2}$.
Определяющее значение в кинетике охлаждения при сильной

поперечной заматниченности имеет продольная температура электронного пучка в соприкасающейся системе. Сразу после ускорения температура определяется температурой катода и взаимным растакиванием электронов [7]:

$$T_{\parallel} = \frac{T_c}{4W} + e^2 n^{1/3}, \quad (6)$$

(где W — энергия электронов после ускорения) и составляет в условиях, характерных для электронного охлаждения не менее $T_{\parallel} \approx 10^{-4}$ эВ = 1 К. Поперечная температура при ускорении не меняется и равна $T_{\perp} = T_c \gg T_{\parallel}$. При движении пучка на участке охлаждения происходит передача энергии поперечного движения в продольное за счет взаимного рассеяния электронов, и продольная температура электронов T_{\parallel} возрастает. Однако большое магнитное поле, делая радиус Ларморовского вращения $r_L = \sqrt{2T_c mc^2 / eB_0}$ меньше расстояния между электронами $n^{-1/3}$, заметно подавляет этот процесс [6].

Из выражения (1) видно, что сила трения F_{\parallel} растет при возрастании v_{\parallel} до некоторого максимума, зависящего от v_{\perp} и разброса скоростей электронного пучка, а затем быстро падает. В случае, если характерный разброс продольных скоростей электронов составляет $v_{\parallel} \ll \left(\frac{m}{e^2 n^{1/3}} \right)^{1/2}$, максимальная сила трения будет равна

$$F_{\max} = c e^2 n^{2/3}, \quad (7)$$

где c — константа порядка единицы.

2. УСТАНОВКА

Схема установки для изучения электронного охлаждения [7, 8] представлена на рис. 2. Использование инжектора отрицательных ионов водорода позволяет проводить эксперименты как с отрицательными, так и с положительными заряженными ионами. Изменение знака заряда ионов осуществляется включением на входе в соленоид специальной параматричной мишени, на которой происходит двойная ионизация отрицательных ионов водорода. Затем пучок ионов направляется в соленоид, где сводится (совмещается в

пространстве, а также по направлению и величине скорости) с электронным пучком. Электронный пучок формируется электронной пушкой [9], поруженной в магнитное поле соленоида [10], и транспортируется вдоль магнитного поля соленоида до коллектора электронов. Для локального изменения магнитного поля в области пушки внутри основного соленоида располагается короткий допол-

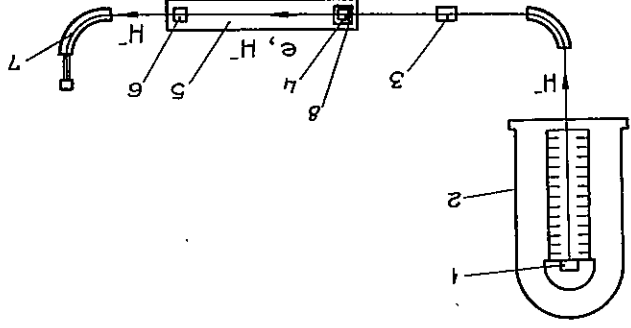


Рис. 2. Схема установки: 1 - источник ионов H^- , 2 - электростатический ускоритель, 3 - параматневая мишень, 4 - электронная пушка, 5 - соленоид, 6 - коллектор электронов, 7 - спектрометр, 8 - дополнительный соленоид.

нительный соленоид, что позволяет регулировать размер электронного пучка на участке охлаждения. Взаимодействие ионов с электронным пучком приводит к изменению их энергии и поперечных углов. После выхода из соленоида ионы попадают в электростатический спектрометр, предназначенный для измерения продольной силы трения. Основные параметры эксперимента приведены в следующей таблице.

Энергия ионов водорода	850 кэВ
Стабильность энергии инжектора ионов H^-	$5 \cdot 10^{-5}$
Ток ионов водорода	~ 1 нА
Угловая расходимость и радиус пучка ионов на участке охлаждения	$\sim 0,7$ мрад $\times 0,5$ мм
Энергия электронов	470 эВ
Ток электронного пучка	1 - 15 мА
Радиус электронного пучка	1 мм
Магнитное поле соленоида	1 - 4 кГс
Магнитное поле дополнительного соленоида	$-2 - +2$ кГс
Непараметричность магнитного поля соленоида	$B_L/B_0 \approx 5 \cdot 10^{-5}$
Длина соленоида	2,88 м
Длина участка охлаждения	2,4 м

Проведение эксперимента с пучками низкой энергии позволяло достигать очень малых как поперечных, так и продольных относительных скоростей частиц. Так поперечная скорость, обусловленная искажениями магнитного поля $v_{\perp n} = v_B L/B_0$, составляет порядка $5 \cdot 10^4$ см/с, что на порядок меньше характерной скорости $v_e = \left(\frac{e^2 n^{1/3}}{m} \right)^{1/2} \approx 5 \cdot 10^5$ см/с. Большая величина силы трения позволила при относительно низкой энергии ионов использовать однотипную схему измерений.

Выбор типа обдирочной мишени определялся следующими требованиями:

1. Толщина мишени должна быть $10^{15} - 10^{17}$ ат/см². При этом достигается практически полная обдирка, а изменение скорости иона за счет рассеяния в мишени еще достаточно малы $\frac{\partial v}{\partial x} < 10^{-4}$.
2. Мишень должна работать в непрерывном режиме и иметь срок службы не менее нескольких сотен часов.
3. Мишень находится в непосредственной близости от высоковакуумной прорезной установки с электронным пучком ($P = 10^{-10}$ мм рт. ст.), поэтому она должна выдерживать прорез и иметь минимально возможный газовый поток в высоковакуумную часть.

Эксперименты, проведенные с тонкими пленками из формара (0,07 - 0,1 мкм), продемонстрировали неоднородность мишени такого типа (несколько часов при плотности тока ~ 5 мкА/см²). Использование в качестве обдирочной мишени газов вылетает сложности по поддержанию достаточно высокого вакуума в установке с электронным пучком. Перечисленным требованиям удовлетворяет разрабатываемая нами параматневая мишень. Мишень выполнена в виде длинной тонкой трубки заполненной парами магния (см. рис. 3). При выбранных параметрах (длина трубки 150 мм, диаметр 2 мм, толщина мишени $5 \cdot 10^{15}$ ат/см²) расход магния составляет 15 мг/час, что в 10^3 раз меньше расхода для стандартной мишени, выполненной в виде струи [11]. Мишень состоит из контеинера с магнем, на оси которого расположена центральная трубка для прохождения пучка. Параметрически центральная трубка для прохождения пучка. Параметрически центральная трубка для прохождения пучка. Параметрически центральная трубка для прохождения пучка.

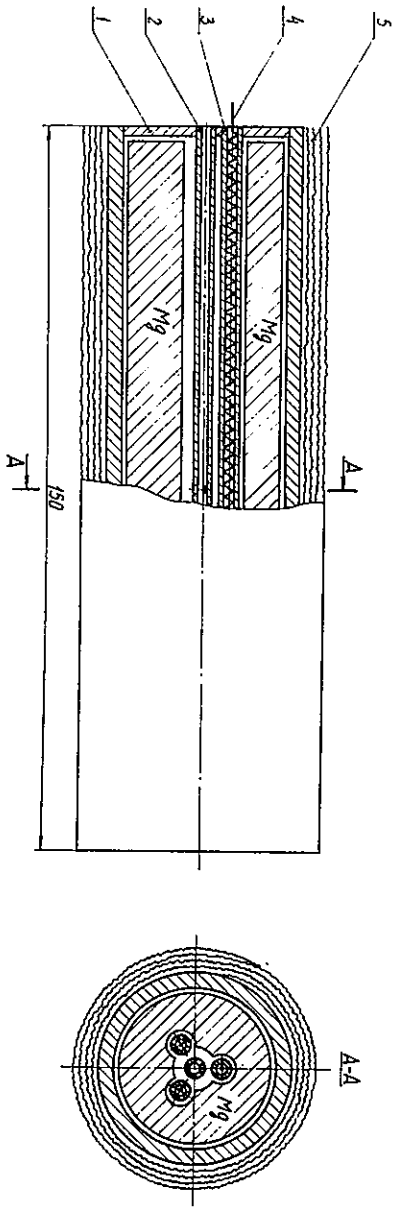


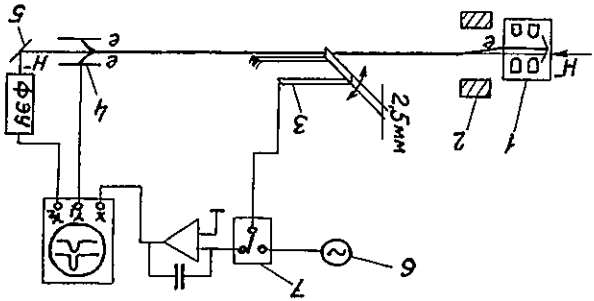
Рис. 3. Паромагнетический мишень:
1 — контейнер с магнитом, 2 — трубка для прохождения пучка ионов, 3 — трубка для нагревателя, 4 — нагреватель, 5 — тепловой экран.

10

11

оси солониды на 3,5 мм. Вывод электронного пучка на ось солониды, где находится пучок ионов, производится корпектором свечения, создавая поперечное магнитное поле, которое искажает силовые линии ведущего магнитного поля солониды и выводит электронный пучок на ось. Измерение относительно положения пучков осуществляется теневым способом при помощи колеблющейся в магнитном поле солонида рамки с током, закрепленной на одном конце. Рамка была изготовлена из тантала-ловый фольги, изогнутой как показано на рис. 4. Возбужденные колебаний рамки производятся пропусканием через нее переменного тока с частотой, равной собственной частоте механических колебаний ~12 Гц. При движении рамки прерывается пучки, что приводит к исчезновению тока электронов в коллекторе и сигнала ФЭУ, служащего для регистрации ионного тока. Сведение пучков определяется одновременным исчезновением электронного и ионного токов при колебаниях рамки. Для сведения пучков используется

Рис. 4. Схема свечения пучков:
1 — электронная пушка, 2 — корпектор свечения, 3 — рамка с током, 4 — коллектор электронов, 5 — люминесцентный экран, 6 — генератор переменного тока, 7 — ключ с высокой частотой переключения.



Трубка паров магния. Для уменьшения мощности, требуемой для нагрева мишени, она окружена тепловым радиационным экраном, уменьшающим мощность, излучаемую с поверхности мишени. Экран выполнен в виде 12 слоев алюминированной фольги, деформированной таким образом, чтобы тепловой контакт соседних слоев был минимальным. Мощность, необходимая для поддержания постоянной температуры мишени ~400° С, составляет 30 Вт. Схема свечения пучков показана на рис. 4. Ввод пучка ионов на участок охлаждения производится через небольшое отверстие в прикатодном электроде электронной пушки. Пушка смещена от

лось три пары рамок, измеряющих вертикальное и горизонтальное сведение пучков в начале, середине и конце участка охлаждения. Для визуальной регистрации сведения на входы V_1 , V_2 двухлучевое осциллограмма подаются сигналы, пропорциональные токам электронного и ионного пучков, а на вход X сигнал, пропорциональный отклонению рамки от положения равновесия. Этот сигнал получается при помощи аналогового интегрирования э.д.с., наведенной в рамке при ее движении поперек магнитного поля. При амплитуде колебаний рамки 1 см ($B_0 = 3$ кГс) величина этого сигнала будет 6 мВ. Возбуждение колебаний рамки внешним генератором и интегрирование э.д.с. производится «одновременное» при помощи ключа с высокой частотой переключения (25 кГц). Этот ключ попеременно подключает рамку к генератору возбуждения и интегратору. Точность сведения пучков составляет 0.1—0.2 мм и определяется в основном неравномерностью плотности тока по сечению пучка ионов.

Отклонение энергии ионов измеряется при помощи датчика, установленного на выходе спектрометра. Конструкция датчика, установленная на рис. 5. Ионный пучок 1 подается на металлический остроугольный клин 2. Вторичные электроны 3 доускоряются до 4 кВ и попадают на люминесцентные экраны 4. Световые сигналы усиливаются ФЭУ, выходы которых подключены к дифференциальному усилителю. Для получения сигнала, линейного по отношению к изменению энергии, а также для исключения зависимости выходного сигнала от тока ионов, система охвачена глубокой отрицательной обратной связью. Сигнал с выхода дифференциального усилителя подается на высоковольтный паразитный усилитель, к выходу которого подключены пластины 5, отклоняющие пучок. Описанная система работает на пучок таким образом, чтобы сигналы с обоих ФЭУ были одинаковы. В этом случае сигнал с датчика паразитного усилителя будет пропорционален отклонению энергии ионов. При уменьшении конверсии ионов во вторичные электроны существенно увеличивается срок службы датчика, так как раздувание люминофора под действием электронного пучка значительно меньше, чем под действием ионов H^- (порогов).

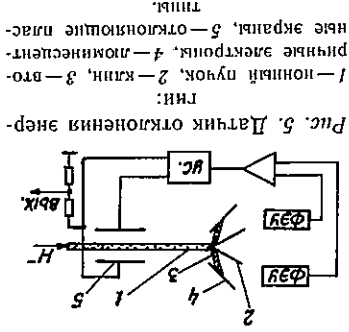


Рис. 5. Датчик отклонения энергии

ГЛН:
1 — ионный пучок, 2 — клин, 3 — вторичные электроны, 4 — люминесцентные экраны, 5 — отклоняющие пластины.

3. РЕЗУЛЬТАТЫ ИЗМЕРЕНИЙ

Величина продольной силы трения определялась при помощи электростатического спектрометра по изменению энергии ионов после прохождения участка охлаждения. Для этого при фиксированном значении энергии ионного пучка из соленоида, от энергии электронов. При совпадении скоростей ионного и электронного пучков сила трения равна нулю, и энергия ионов не изменяется. При отклонении энергии электронов от равновесной возникает сила трения, которая приводит к изменению энергии ионов. Величина изменения энергии δE_i будет пропорциональна величине силы трения $F_{||}$ и длине участка охлаждения ($\delta E_i = F_{||} \cdot l$). Относительная величина изменения энергии ионов мала ($\frac{\delta E_i}{E_i} \approx 5 \cdot 10^{-5}$) и сравнима со

стабильностью ускоряющего напряжения инжектора ионов. Для выделения полезного сигнала на фоне шумов ускоряющего напряжения проводились многократные измерения, результаты которых суммировались. Длительность одного измерения составляла 0.2 с, полное число измерений в цикле 1000. На рис. 6 приведен пример полученной таким образом зависимости изменения энергии ионов H^- и H^+ от энергии электронного пучка при магнитном поле 4 кГс и токе 3 мА. Видно, что величина силы трения для отрицательных ионов примерно в 2.5 раза больше, чем для положительных. Зависимость максимальной продольной силы трения от тока для магнитного поля 3 кГс для ионов разного знака заряда показана на рис. 7. При малых токах как для положительных, так и для отрицательных ионов сила трения растет в соответствии с законом $c \cdot e^2 n^{2/3}$. При увеличении тока сила трения выходит на насыщение и при токе выше 6 мА начинает уменьшаться. Уменьшение силы трения с ростом тока электронного пучка объясняется действием нескольких факторов, относительный вклад которых трудно определить. Первое — нарастание продольной температуры электронов по длине пучка, обусловленное внутренними столкновениями в электронном потоке. Второе — отсутствие полной компенсации просроченного заряда электронного пучка, что приводит к дефокусировке (фокусировке для H^+) пучка ионов радиальным электрическим полем и увеличению поперечных углов на участке охлаждения, а также возбуждение поперечных углов на участке ввода за счет действия на ионный пучок поля некомпенсированно-

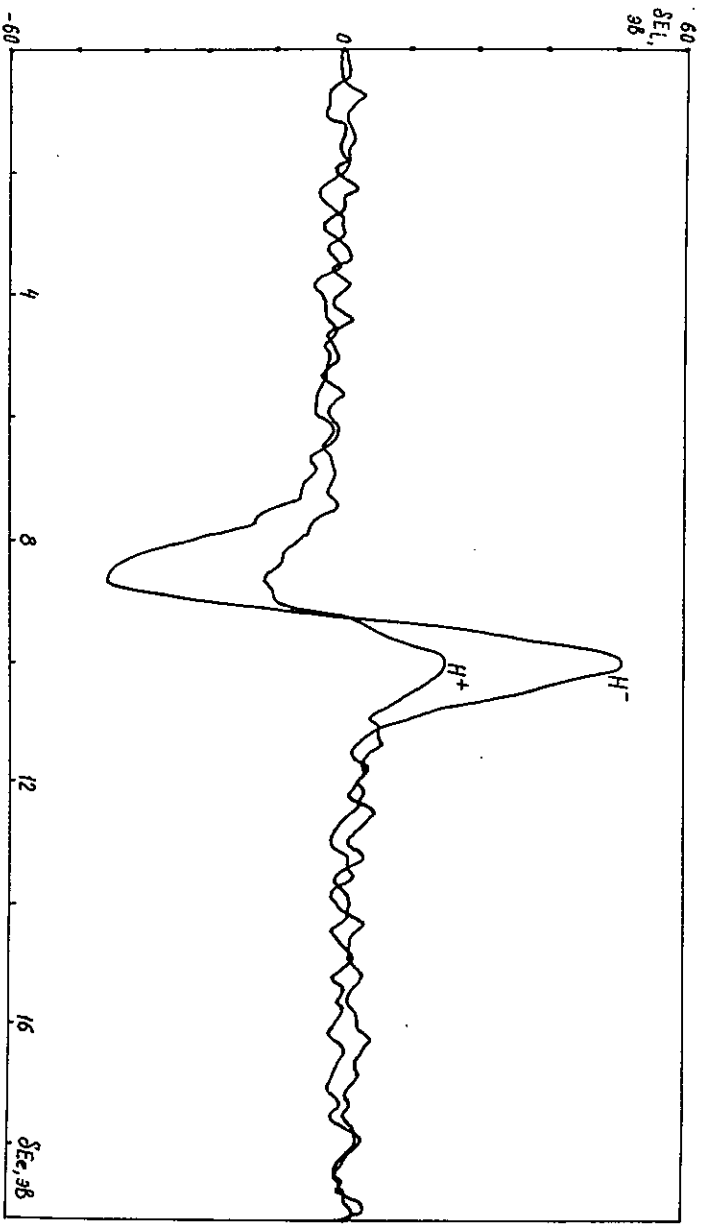


Рис. 6. Зависимость изменения энергии ионов разного знака заряда от энергии электронов.
 $B_0 = 4$ кГс, $I_e = 3$ мА.

14

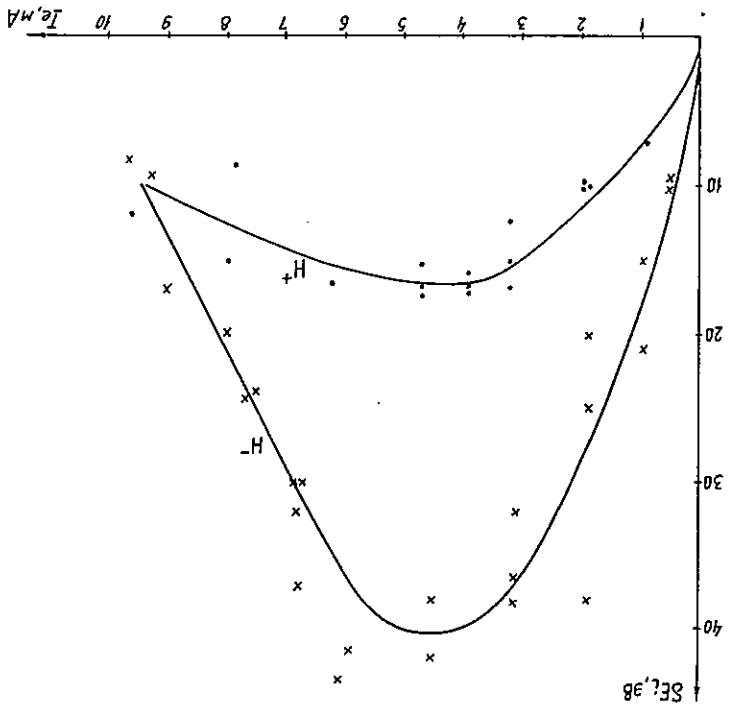


Рис. 7. Зависимость силы течения от тока электронов, $B_0 = 3$ кГс, $\times - H^+$, $\bullet - H^-$.

го электронного пучка в электронной пушке. Третье—влияние на силу течения неомонохроматичности электронного пучка по сечению, связанной с действием пространственного заряда пучка.

Измерения силы течения были проведены для магнитного поля от 1 до 4 кГс. На рис. 8 показана максимальная сила течения для положительных и отрицательных ионов, выраженная в единицах $e^2 n^{2/3}$, в зависимости от магнитного поля. Там же показан ток электронного пучка, при котором сила течения достигает максимума. Видно, что при поле 1 кГс силы течения для положительных и отрицательных частиц равны, и при увеличении магнитного поля сила течения для H^- сильно возрастает, тогда как для H^+ она остается почти постоянной.

Слабая зависимость от магнитного поля силы течения для положительных ионов означает уже достаточно сильную замативность столкновений и связана только с некоторым увеличением касательных ионов.

Отчетливо видно, что вклад

15

столкновений электронов с отражением их от движущегося отрицательного иона сильно возрастает с полем, что и обуславливает разницу в силах трения для H^+ и H^- при больших магнитных полях.

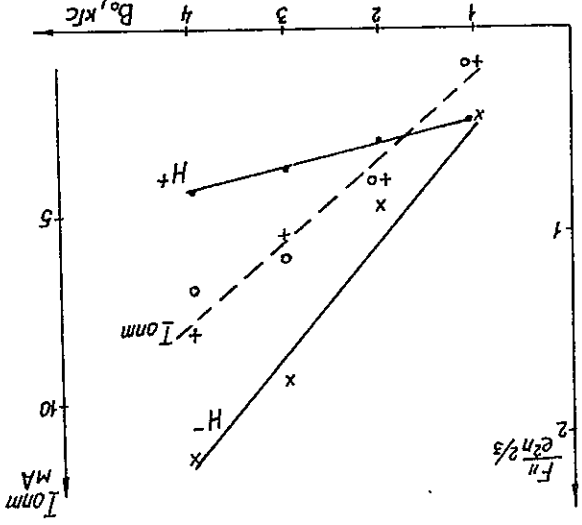


Рис. 8. Зависимость от магнитного поля максимальной силы трения ($\times - H^+$, $\circ - H^-$), выраженной в единицах $e^2 n^{2/3}$ и оптимального тока электрононого пучка ($\times - H^+$, $\circ - H^-$).

Одной из важных характеристик силы трения является характерная энергетическая ширина ΔE_0 , которая определяется при аппроксимации зависимости силы трения от энергии электронов выражением

$$F_{||}(\delta E_c) = \frac{F_0 \delta E_c}{(\delta E_c^2 + \Delta E_0^2)^{3/2}}. \quad (8)$$

В первом приближении величина ΔE_0 определяется продольной температурой электронов и угловой расходимостью нонного пучка [7]. В случае сильного магнитного поля и малого тока электронов продольная температура $T_{||} \approx e^2 n^{1/3}$ и слабо изменяется при изменении тока. В этом случае энергетическая ширина также слабо зависит от электрононого тока. На рис. 9 приведена зависимость ха-

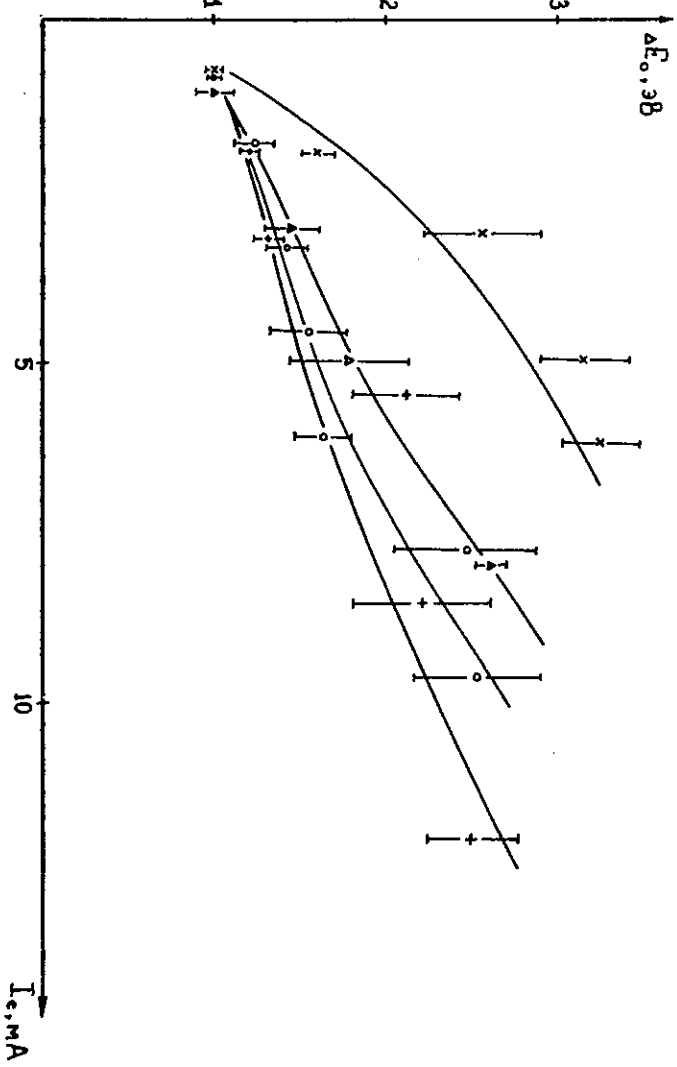


Рис. 9. Зависимость энергетической ширины ΔE_0 от тока электронов и для магнитного поля 4 (+), 3 (O), 2 (Delta) и 1 кГс (X).

ракторной энергетической ширины от тока электронов и для раз-
терная энергетическая ширина растет тем сильнее, чем меньше
магнитное поле. Это обусловлено усилением передачи энергии по-
перечного движения электронов в продольное, т. е. ростом по-
дольной температуры, которая определяет характерную энергию эне-
гетическую ширину.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Введенные эксперименты по измерению силы трения новых
при движениях их в холодном заматниченном электронном пучке
показали, что существенно заметная разница в силах трения для
положительно и отрицательно заряженных частиц. Теоретические
расчеты в этих условиях (малые относительные скорости частиц)
затруднены необходимостью учета следующих приближений по те-
ории возмущений. Обнаруженные эффекты весьма существенны
для понимания установившихся значений разбросов поперечных и
продольных скоростей на заключительной стадии электронного ох-
лаждения.

ЛИТЕРАТУРА

1. Бидкер Г.И. Эффективный метод демпфирования колебаний частиц в протон-
ных и антинейтральных накопителях. — Атомная энергия, 1967, т. 22, 5,
с. 346—248.
2. Бидкер Г.И., Скрипский А.Н. Электронное охлаждение и новые возможности в
физике элементарных частиц. — УФН, 1978, т. 124, 4, с. 561.
3. Бидкер Г.И., Видушев А.Ф., Диканский Н.С., Кононов В.И., Кудеайкин В.И.,
Мешков И.Н., Пархожич В.В., Пестриков Д.В., Скрипский А.Н., Сухина В.Н.
Новые результаты исследований по электронному охлаждению. — Труды В Се-
союзного совещания по ускорителям заряженных частиц. Дубна, октябрь
1976. — М.: Наука, 1977, т. 1, с. 236—239.
4. Лербенев Я.С., Скрипский А.Н. Эффекты заматниченности в электронном ох-
лаждении. — Физика плазмы, 1978, т. 4, 3, с. 492—500.
5. Пархожич В.В. Физика быстрого электронного охлаждения. — Proceedings of
Workshop on Electron Cooling and Related Applications, 1984, Karlsruhe.
Кудеайкин В.И., Ледеве В.А., Мешков И.Н., Пархожич В.В., Сухина В.Н.
Температурная релаксация в заматниченном электронном потоке. — ЖЭТФ,
1982, т. 83, вып. 6(12), с. 2056—2064.
7. Диканский Н.С., Кокоулин В.И., Кот Н.Х., Кудеайкин В.И., Ледеве В.А.,
Пархожич В.В., Скрипский А.Н., Сухина В.Н. Быстрое электронное охлажде-
ние в диапазоне малых относительных скоростей. — Труды Международного со-

8. Кот Н.Х., Сухина В.Н. Опыт эксплуатации и усовершенствования электростати-
ческих ускорителей ЭТ-1.5 и GEVW 0.5/2000. — Вопросы атомной науки и тех-
ники (серия техника физического эксперимента), 1985, вып. 1, 22, с. 7—9.
- Кот Н.Х., Овчар В.К., Останин В.И., Пархожич В.В., Сухи-
на В.Н. Контроль параметров и управление оборудованием, расположенным
внутри высоковольтного электрода нижнего сектора ЭТ-1.5 при помощи ЭВМ. — Во-
просы атомной науки и техники (серия техника физического эксперимента),
1985, вып. 1, 22, с. 59—61.
- Кот Н.Х., Пархожич В.В. Трехпучковый источник отрицательных ионов водо-
рода на парах воды. — Приборы и техника эксперимента, 1985, 1, с. 34—36.
9. Ледеве В.А., Шарана А.Н. Формирование электронного пучка с малыми попе-
речными скоростями в системах с продольным магнитным полем. — ЖЭТФ, 1987.
- Арапов Л.Н., Диканский Н.С., Кокоулин В.И., Кудеайкин В.И., Ледеве В.А.,
Пархожич В.В., Сухина В.Н. Препионный соленоид для
электронного охлаждения. — Труды Международного совещания по ускорителям
высоких энергий. Новосибирск, 1986.
11. Бидкер Г.И., Диканский Н.С., Кудеайкин В.И., Мешков И.Н., Пархо-
жич В.В., Пестриков Д.В., Скрипский А.Н., Сухина В.Н. Экспериментальное ис-
следование электронного охлаждения. — Part. Accel., 1976, v. 7, N 4, p. 197.
12. Бидкер Г.И., Диканский Н.С., Мешков И.Н., Пархожич В.В., Пестриков Д.В.,
Лонгов С.Г., Скрипский А.Н. Возможности спектрометрических экспериментов
на сверхтонких внутренних мишенях в накопительных частях с электрон-
ным охлаждением. — В кн.: Труды X Международной конференции по ускорите-
лям заряженных частиц высоких энергий (Протвин, июль, 1977). — Серпухов,
1977, с. 141—147.

13. Bell M., Chang J., Kriener F., Peterson P.M., Petrucci C. Electron Cooling in
ICF at CERN. — Nucl. Instr. and Meth., 1981, v. 190, 2, p. 237—255.
- Foster R., Hardek T., Johnson D.E., Kells W., Kerner V., Lai H., Lennox A.J.,
Mills F., Miyahara Y., Ollisluh L., Peter R., Rhoades T., Young D., McInty-
re P.M. Electron Cooling Experiments in Fermilab. — IEEE Trans. Nucl. Science,
1981, v. NS-28, N 3, p. 2386—2388.
- Ellison T., Kells W., Kerner V., Mills F., Peters R., Ruthbin T., Young D.
Electron Cooling and Accumulation of 200 MeV Protons at Fermilab. — IEEE
Trans. Nucl. Science, 1983, v. NS-30, N 4, p. 2370—2372.

Н.С. Луканский, Н.Х. Кот, В.И. Кудалайнен,
В.А. Лебедев, В.В. Пархоменко, А.А. Серый,
А.Н. Скрипский, В.Н. Сухина

Влияние знака заряда иона на силу трения
при электростатическом охлаждении

Ответственный за выпуск С.Г. Попов

Работа поступила 8 июня 1987 г.

Подписано в печать 24.07.1987 г. МН 08299

Формат бумаги 60×90 1/16 Объем 1,7 печ.л., 1,4 уч.-изд.л.

Тираж 200 экз. Бесплатно. Заказ № 102

Набрано в автоматизированной системе на базе фото-
наборного автомата ФА1000 и ЭВМ «Электроника» и
отпечатано на ротационной машине Института ядерной физики
СО АН СССР,
Новосибирск, 630090, пр. академическая Плеханова, 11.