

Б. 90

59

И Н С Т И Т У Т
ЯДЕРНОЙ ФИЗИКИ СОАН СССР

ПРЕПРИНТ И Я Ф 76 - 92

Г.И.Будкер, А.Ф.Булусhev, Н.С.Диканский
В.И.Кононов, В.И.Куделайнен, И.Н.Мешков,
В.В.Пархомчук, Д.В.Пестриков, А.Н.Скринский
Б.Н.Сушина

НОВЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЙ
ПО ЭЛЕКТРОННОМУ ОХЛАЖДЕНИЮ

БИБЛИОТЕКА
Института ядерной
физики СО АН СССР
ИНВ. № _____

Новосибирск

1976

НОВЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЙ ПО ЭЛЕКТРОННОМУ
ОХЛАЖДЕНИЮ

Г.И.Будкер, А.Ф.Булусев, Н.С.Диканский, В.И.Кононов,
В.И.Куделайнен, И.Н.Мешков, В.В.Пархомчук, Д.В.Пестриков,
А.Н.Скринский, Б.Н.Сухина

А Н Н О Т А Ц И Я

Описываются эксперименты по электронному охлаждению, проведенные после модернизации установки НАП-М. Измерения показали, что время затухания бетатронных колебаний уменьшалось обратно пропорционально электронному току и при токе 0,8 А составило в 3 мсек (энергия протонов 65 МэВ). Обсуждаются возможные причины неожиданно малого значения времени затухания. Приведены результаты экспериментов по охлаждению сгруппированного протонного пучка. Кратко описаны эксперименты по электронному охлаждению протонного пучка низкой энергии (1,5 МэВ).

Первый цикл исследований по электронному охлаждению был закончен в ИЯФ СО АН СССР в мае 1975 г. Основные результаты, полученные к этому времени /1-3/, оказались в хорошем согласии с теоретическими представлениями, развитыми в работах /4,5/. В январе 1976 г. закончена модернизация экспериментальной установки и начат следующий этап исследований.

Модернизация накопителя НАП-М была направлена в первую очередь на улучшение вакуумных условий. В вакуумных камерах квадрантов магнитной системы были смонтированы испарители сорбционных насосов, позволившие производить распыление титана по всей длине камер. В установке с электронным пучком введены прогревная вакуумная камера, сорбционные насосы на участке охлаждения и в "плечах" установки, где расположены электронная пушка и коллектор, а также значительно увеличена скорость откачки в электронной пушке и введено масляное охлаждение катодного узла пушки, что уменьшило гажение её "теплых" элементов. Диаметр катода был увеличен до 20 мм, из-за чего импрегнированный катод заменен оксидным. По-прежнему использован электронный подогрев катода. Введение дополнительного запирающего электрода в коллекторе позволило сохранить высокую эффективность рекуперации ($\Delta T_e/T_e \leq 5 \cdot 10^{-5}$, $U_{\text{колл}} \approx -2$ кВ) при увеличенном до 40 мм диаметре входного отверстия коллектора. На концах участка охлаждения были помещены две пикап-станции, позволившие измерять координаты центра тяжести сгруппированного протонного и модулированного электронного пучков с точностью лучше 0,5 мм. В середине участка охлаждения были установлены сетки очистки электронного пучка от ионов и измерительные пластины, позволившие контролировать ионный ток и, следовательно, вакуум на участке встречи. При токе электронов 400 мА ионный ток насыщения составлял 20 нА, что соответствует вакууму на участке встречи $7 \cdot 10^{-9}$ торр и среднему вакууму в накопителе около $5 \cdot 10^{-10}$ торр. Система индикации протонного пучка была дополнена измерителем распределения плотности протонного пучка по радиальной координате (метод магнетиной струи /3/).

Типичные параметры эксперимента приведены в таблице I.

Установившийся размер протонного пучка был измерен наиболее надежно по размеру пучка нейтральных атомов водорода, образующихся на участке охлаждения в результате радиационной рекомбинации

протонов с электронами /1-3/. Атомы водорода, выведенные через ашпендикс вакуумной камеры, регистрировались ядерной фотоэмульсией. Размеры "изображения" на фотоэмульсии a_N и протонного пучка a_p на участке охлаждения однозначно связаны через геометрические размеры и β - функцию накопителя. Пересчетом a_N в a_p и получено приведенное в табл. I.

Таблица I. Типичные параметры эксперимента и результаты по охлаждению протонов

Энергия протонов	- 65 МэВ
Энергия электронов	- 35 КэВ
Диаметр катода электронной пушки	- 20 мм
Ток электронов J_e	- 0,1 + 0,8 А
Ток протонов J_p	- 20 + 100 мкА
Средний вакуум	- $5 \cdot 10^{-10}$ Торр
Установившийся размер (диаметр) протонного пучка в середине промежутка	- 0,47 мм
Время охлаждения ($J_e = 0,8$ А) τ_e	- 83 мсек
Время жизни протонов в режиме охлаждения	- более 8 часов
Эффективная температура электронов	- 0,25 эВ
Удельный поток нейтральных атомов водорода $J_e^{-1} J_p^{-1} (dN/dt)$	- $80 \text{ А}^{-1} \text{ мкА}^{-1} \text{ сек}^{-1}$

значение диаметра протонного пучка. Ему соответствует температура электронов в системе частиц /3,4/.

$$T_e = 0,23 \pm 0,07 \text{ эВ}$$

Поток нейтральных атомов водорода составлял $2 \cdot 10^3 \text{ сек}^{-1}$ при $J_e = 0,4$ А и $J_p = 80$ мкА. Такой скорости рекомбинации соответствует температура электронов в системе частиц /6/

$$T_e = 0,24 \pm 0,06 \text{ эВ}$$

(При оценке T_e по скорости рекомбинации учтена несимметрия функции распределения электронов: $T_{||} \ll T_e$ см. ниже).

Продольная сила трения $F_{||}$ измерялась с помощью методики, применявшейся в работе /3/ - по скорости изменения среднего радиуса орбиты протонов R_o в охлажденном пучке после малого скачкообразного изменения энергии электронов:

$$\frac{dz}{dt} = \frac{\psi R_o}{R_e} \eta F_{||} \quad (1)$$

где ρ_s - импульс протона, ψR_o - искажение орбиты при единичном отклонении импульса от равновесного значения, η - доля орбиты, занятая электронным пучком. В данной работе подобные измерения производились с помощью датчика радиального распределения плотности (вертикальная магниевая струя). Зависимость $F_{||}$ от разности средних скоростей протонов и электронов Δv_e (вносимой скачком энергии) подтвердила представления о "сплюсненном" распределении электронов по скоростям /3/: экспериментальные значения $F_{||}(\Delta v_e)$ хорошо совпадают с расчетными (рис. I, сплошная кривая), полученными для распределения электронов по скоростям в системе частиц в форме тонкого диска с размерами

$$\begin{aligned} \text{"радиус диска"} \quad \Delta v_{\perp} &\sim \sqrt{T_e/m}, \\ \text{"толщина диска"} \quad 2\Delta v_{||} &\sim 2\sqrt{T_{||}/m}, \quad \frac{T_{||}^2}{T_e^2} \Big|_{\beta \ll 1} \\ T_{||} &= \frac{T_e}{2\gamma^2\beta^2 mc^2} \rightarrow \frac{T_e^2}{4W} \Big|_{\beta \ll 1} \end{aligned} \quad (2)$$

Здесь $T_{||}, T_e$ - "продольная" и "поперечная" температуры электронов в системе частиц, $W, \beta c$ - кинетическая энергия и скорость электронов в лабораторной системе, T_k - эффективная температура катода, включающая кроме истинной температуры термоэмиссионного катода T_k^0 также пульсации и шумы источника напряжения, наводки и т.п. /3/:

$$T_k = T_k^0 + e\Delta U \quad (3)$$

Выражение для силы трения /5/

$$\vec{F} = - \frac{4\pi e^4 L n_e}{m} \int d^3 v_e \frac{(\vec{v} - \vec{v}_e) f(v_e)}{|\vec{v} - \vec{v}_e|^3} \quad (4)$$

содержит два свободных параметра: температуру электронов T_e , характеризующую функцию распределения $f(v_e)$, и произведение кулоновского логарифма столкновений L на плотность электронов n_e . Подгонкой по методу наименьших квадратов для

$$f(v_e) = \delta(v_{||}) \begin{cases} 1/\pi(\Delta v_{\perp})^2, & v_{\perp} \leq \Delta v_{\perp} \\ 0, & v_{\perp} > \Delta v_{\perp} \end{cases} \quad (5)$$

получено:

$$T_e = 0,28 \pm 0,06 \text{ эВ}, \quad L_{||} n_e = 2,2 \cdot 10^9 \text{ см}^{-3}$$

Для $j_e = 0,3 \text{ А/см}^2$ это дает $n_e \approx 2 \cdot 10^8 \text{ см}^{-3}$, $L_{||} = 11$.

Измерения $F_{||}(\Delta v_e)$ были проведены также в условиях искусственно увеличенной "толщины диска", для чего энергия электронов модулировалась переменным напряжением $U_m = 30 \text{ В}$ с частотой 500 Гц . Результаты (рис.1, пунктирная кривая) показывают, что "толщина диска" действительно возрастает до значения

$$\Delta v_{||} \sim \sqrt{T_{||}/m} = \frac{e U_m}{m \nu c} \quad (6)$$

(сравни (2)). Здесь e, m - заряд и масса электрона.

Наиболее интересные экспериментальные результаты получены при измерении времени охлаждения τ_e (времени затухания бета-тронных колебаний протонов). Использовалась методика, описанная в /2,3/: в предварительно охлажденном пучке протонов ударом инфлектора возбуждались бетатронные колебания и регистрировалось (с помощью измерителя плотности) нарастание плотности пучка во времени под действием электронного охлаждения. Время охлаждения вычислялось ЭВМ, работавшей в режиме *on-line* с измерителем плотности. В диапазоне значений электронного тока $0,1 \div 0,8 \text{ А}$ время охлаждения уменьшалось пропорционально J_e^{-1} и составляло 83 мсек при $J_e = 0,8 \text{ А}$.

Полученные результаты оказались существенно лучше ожидаемых согласно /4,5/ для электронного пучка со средней плотностью тока порядка $0,1 \div 0,2 \text{ А/см}^2$. Поэтому были проведены измерения распределения плотности тока в электронном пучке по свечению газа под действием пучка. Результаты денситометрирования фотографий (атмосфера гелия, давление $3 \cdot 10^{-5} \text{ Торр}$, ток $0,4 \text{ А}$) представлены на рис.2. Там же показаны зависимости потока нейтральных атомов водорода и времени охлаждения от положения протонного пучка внутри электронного. Все три кривые имеют ярко выраженные максимумы с примерно совпадающей шириной. Плотность тока достигает значения $j_e = 0,3 \text{ А/см}^2$ при полном токе $0,4 \text{ А}$ (вместо ожидавшихся $0,13 \text{ А/см}^2$). Тем не менее, остается различие примерно на порядок с результатами предыдущих работ /2,3/ ($\tau_e \approx 5 \text{ сек}$ при $j_e = 0,13 \text{ А/см}^2$).

Оценки температуры электронов, приведенные выше, дают хорошо совпадающие результаты. Трудности возникают при попытке сопоставления экспериментального значения времени охлаждения с теоретическим, соответствующим температуре $T_e = 0,25 \text{ эВ}$. Единственный свободный параметр, содержащийся в выражении для $F_{||}$ /4,5/ - кулоновский логарифм столкновений для передачи импульса от протона электронам в поперечном направлении - пришлось бы принять равным, по порядку величины, 200 , что явно несостоятельно. Измерения зависимости времени охлаждения от толщины диска в экспериментах с модуляцией энергии электронов дали неожиданно резкую зависимость τ_e от $\Delta v_{||}$ (6). Оказалось, что τ_e возрастает вдвое при увеличении $T_{||}$ всего лишь до $2 \cdot 10^{-3} \text{ эВ}$ (рис.3). С ростом амплитуды модуляции и, соответственно, $\Delta v_{||}$ и $T_{||}$ значение τ_e приближается к расчетному значению τ_m , полученному для силы (4) и "сплюсненного" распределения $f(v_e)$. Это свидетельствует, по-видимому, о более сложном характере поведения силы трения в пучке с "замагниченными" электронами и весьма малым разбросом продольных скоростей частиц ($\Delta v_{||}/v_{||} \lesssim 10^{-3}$, см. (2)).

Эксперименты по ускорению протонов электронами, описанные в /1/, были повторены. Удалось достичь увеличения энергии протонов с 65 МэВ до 86 МэВ за время порядка 200 сек без существенной потери частиц.

При охлаждении сгруппированного пучка протонов наблюдалось сжатие сгустка до установившегося размера $\Delta \ell \approx 5 \text{ м}$ (периметр НАИ-М 47 м). Измеренное при этом время охлаждения τ_e оказалось равным $0,5 \text{ сек}$ при $J_e = 0,4 \text{ А}$. Более детальные исследования не проводились.

В экспериментах были обнаружены эффекты, носящие, по-видимому, коллективный характер. При возбуждении бетатронных колебаний протонов предварительно охлажденного пучка сразу же после удара инфлектора происходило быстрое (с характерным временем, меньшим времени разрешения измерителя плотности $0,015 \text{ сек}$) затухание колебаний до некоторого промежуточного значения амплитуды, а затем медленное, с характерным временем τ_e , затухание до установившегося значения. С ростом протонного и электронного токов значение промежуточной амплитуды (при фиксированной начальной) уменьшалось. Так, при $J_e = 400 \text{ мА}$, $J_p = 50 \text{ мкА}$ промежуточная амплитуда

да составляла 1/3 начальной, равной 3 мм, а время τ_e составляло 0,17 сек.

К этому же кругу явлений следует, видимо, отнести наблюдавшуюся неустойчивость протонного пучка в режиме охлаждения: при $I_p > 60$ мкА, $I_e > 200$ мА с характерным временем порядка 50 мсек возникла и исчезала самопроизвольная бунчировка пучка, сопровождавшаяся увеличением его поперечного размера. Неустойчивость исчезала при уменьшении протонного тока до уровня 40 мкА.

Специальный интерес для приложений представляет электронное охлаждение тяжелых частиц низких энергий (порядка МэВ) /2,3/. При этом, однако, может оказаться, что температура катода принципиально не позволяет получить достаточно "холодный" электронный пучок:

$$\frac{\Delta v_{\perp}}{v_c} \sim \sqrt{\frac{T_k}{2W}} \sim 10^{-2} \quad (7)$$

Были проведены пробные эксперименты по охлаждению протонов низкой энергии на установке НАП-М при следующих значениях параметров: $W_p = 1,4$ МэВ (энергия инжекции), $W_e = 760$ эВ, $I_e = 4$ мА. Наблюдались все основные эффекты электронного охлаждения: уменьшение поперечных размеров протонного пучка, резонансное увеличение его времени жизни, увлечение протонов электронами при изменении энергии последних.

Л и т е р а т у р а

1. Г.И.Будкер, Н.С.Диканский, В.М.Куделайнен, И.Н.Мешков, В.В.Пархомчук, Д.В.Пестриков, А.Н.Скринский, Б.Н.Сухина. В сб. "Труды IV Всесоюзного сов.по уск. заряженных частиц", т.2, 309 (1975).
2. G.I. Budker, Ya.S. Derbenev, et al. IEEE Trans. on Nucl. Sci. NS-22, N5, 2093 (1975)
3. G.I. Budker, N.S. Dikansky, et al. "Experimental study of electron cooling" Particle Accelerators

4. Г.И.Будкер, АЭ 22, 346 (1967).

5. Ya. S. Derbenev, A.N. Skrinsky. "Kinetics of electron cooling." Particle Accelerators

6. И.Мак-Даниель. "Процессы столкновений в ионизованных газах". "Мир" (1967).

7. Report of VAPP-NAP Group in Proceedings of 8-th Intern. Conf. on High-Energy Accelerators, CERN, p 72 (1971)

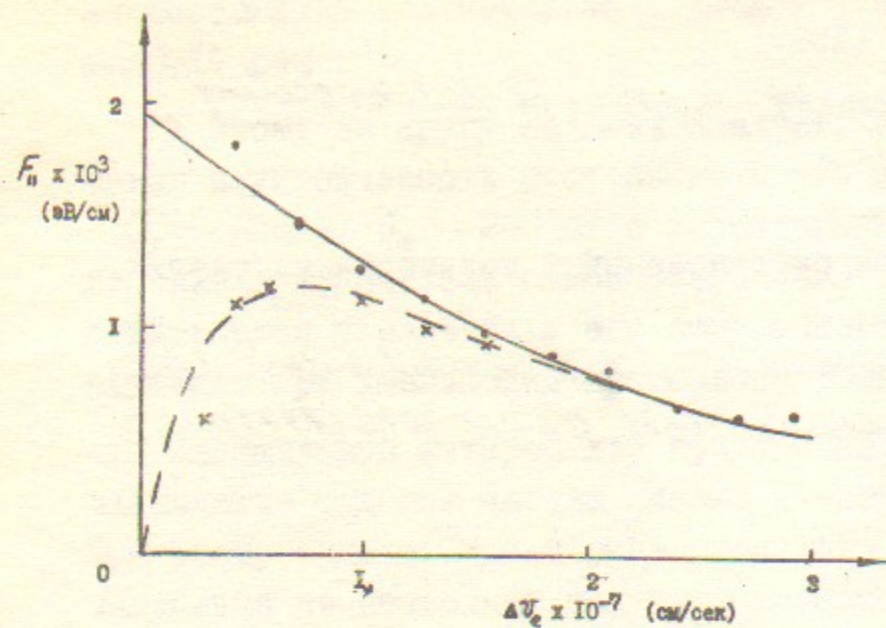


Рис.1. Зависимость продольной силы трения от разности средних скоростей протонов и электронов Δv_e , вносимой скачкообразным изменением энергии электронов. Сплошная кривая - расчетная
 - эксперимент,
 -x-x-x- - эксперимент с модуляцией энергии электронов.

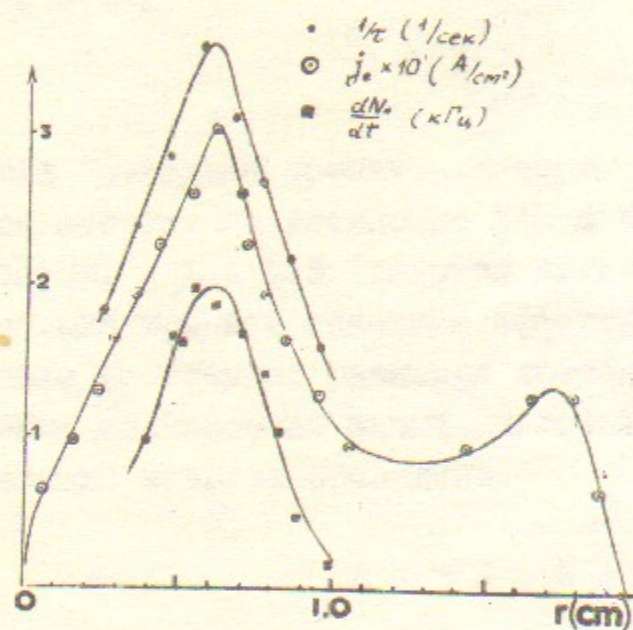


Рис.2. Сопоставление результатов измерений распределения плотности электронов j_e по радиусу и зависимости времени охлаждения τ_c и потока нейтральных атомов водорода dN/dt от положения протонного пучка внутри электронного.

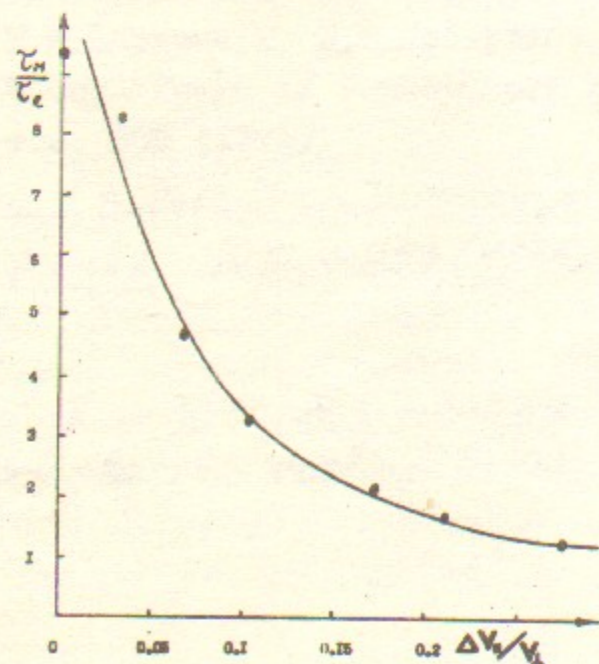


Рис.3. Зависимость отношения расчетного значения времени охлаждения τ_m к экспериментальному τ_e от разброса продольных скоростей электронов $\Delta v_{||}$ (в единицах разброса поперечных скоростей Δv_{\perp}).

Работа поступила - 26.7-1976г.

Ответственный за выпуск - С.Г.ПОПОВ
 Подписано к печати 28.9-1976г. МН 02986
 Усл. 0,6 печ.л., 0,5 учетно-изд.л.
 Тираж 200 экз. Бесплатно
 Заказ № 92.

Отпечатано на ротапринтере ИЯФ СО АН СССР