

СОСТОЯНИЕ РАБОТ ПО ЭЛЕКТРОННОМУ ОХЛАЖДЕНИЮ

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

Институт ядерной физики СО АН СССР, г. Новосибирск

В методе электронного охлаждения уменьшение фазового объема пучка тяжелых частиц связано с передачей энергии частиц сопутствующему электронному потоку^{/1/}. Эффективность этого метода определяется резким возрастанием трения при малых относительных скоростях электронов и тяжелых частиц. В 1966 г. в ИЯФ СО АН СССР была начата разработка проекта накопителя со встречными протон-антипротонными пучками, основанного на использовании метода для накопления антипротонов^{/2,3/}. Успешные эксперименты по электронному охлаждению (1974-1976 гг.) стимулировали развитие проектов протон-антипротонных встречных пучков в ряде других лабораторий. Этому дополнительно способствовало обнаружение в экспериментах 1976 г. неожиданно быстрого охлаждения протонного пучка^{/4/}. В настоящее время в лабораториях им. Э.Ферми (США) и ЦЕРН приступили к разработке проектов и экспериментальных установок с использованием электронного охлаждения.

Эксперименты по изучению электронного охлаждения проводились на накопителе протонов НАП-М, специально разработанном для этих целей^{/5/}.

Накопитель типа рейстрек (рис.1) с нулевым градиентом и краевой фокусировкой содержит 4 поворотных магнита с радиусом кривизны 3 м и 4 прямолинейных промежутка длиной 7,1 м. В одном из прямолинейных промежутков расположена установка с электронным пучком. Для формирования и транспортировки электронного пучка используется сопровождающее однородное магнитное поле $H_0 \approx 1000$ Э. Длина участка охлаждения 1 м.

После модернизации установки с электронным пучком, проведенной в 1976 г., заключавшейся в улучшении электронно-оптического тракта, систем стабилизации энергии электронного пучка и постановки катода диаметром 20 мм, было установлено, что время затухания бетатронных колебаний уменьшилось с 5 до 0,4 с при плотности тока электронов $0,13 \text{ A/cm}^2$ и поперечной температуре электронов $0,25 \text{ eV}$. В той же работе ^{/4/} отмечалось сильное влияние разброса продольных скоростей электронов Δv на величину декремента затухания. Интерпретация этих результатов в рамках простой модели, использовавшейся

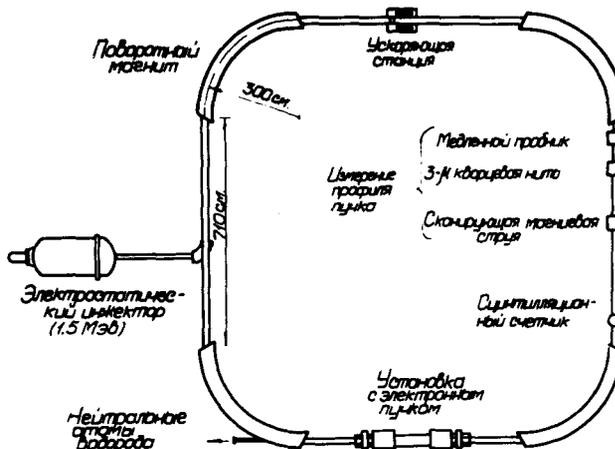


Рис. 1. Схема накопителя протонов НАИП-М.

в работе ^{/6/}, вызывала большие затруднения.

В настоящем докладе обсуждаются эксперименты, посвященные детальному изучению свойств обнаруженного быстрого затухания. Результаты изучения распределения плотности тока в электронном пучке с 20-мм катодом показали ^{/4/},

что распределение тока в пучке сильно неоднородно и основная доля тока сосредоточена в области диаметром 10 мм. Желание исследовать быстрое затухание с такой же плотностью тока, но с однородным распределением, побудило поставить 10-мм катод.

Движение электронов в магнитном поле в дрейфовом приближении представляется как движение по окружности и движение центра этой окружности; в соответствии с этим скорость электрона можно разложить на скорость ларморовского вращения и скорость движения центра ларморовского кружка.

Характерным свойством охлаждающего электронного пучка, как указывалось ранее ^{/5/}, является малая величина разброса продольных скоростей ($\Delta_{||}/\Delta_{\perp} \sim 10^{-2} + 10^{-3}$). Вследствие этого большую роль могут играть эффекты, связанные с наличием сопровождающего магнитного поля, а также эффекты перераспределения декрементов по степеням свободы за счёт радиально-продольной связи при наличии пространственного заряда электронного пучка. В присутствии магнитного поля повышается вклад столкновений с прицельными параметрами большими или порядка ларморовского радиуса электронов ^{/7/}. При малых относительных скоростях протона и ларморовского кружка столкновения происходят адиабатически по отношению к быстрому ларморовскому вращению, и передача энергии идёт через продольную (по отношению к магнитному полю) степень свободы электрона.

Взаимодействие выглядит таким образом, как если бы поперечная температура электронов стала нулевой. Характерной чертой такого механизма является слабая зависимость силы трения и декрементов от величин скоростей ларморовского вращения и резкая зависимость от скоростей ларморовских кружков и протона.

При скоростях протонов, больших, чем скорости электронов, вклады далёких и близких столкновений будут одного порядка, поэтому "замороженность" электронов не приводит к существенному увеличению скорости охлаждения. Для выяснения вклада далёких столкновений в эффект быстрого затухания были проведены измерения зависимостей декрементов поперечных колебаний и продольной компоненты силы трения от величин скоростей ларморовского вращения и разброса скоростей

ларморовских кружков (поперечных и продольных). Декременты колебаний протонов измерялись методом, описанным в работах ^{4,5/}. Отметим, что измерения показали равенство декрементов затухания радиальных и вертикальных колебаний, что обусловлено наличием связи бетатронных колебаний и близостью их частот ($\nu_x = 1,24$, $\nu_z = 1,34$).

Влияние относительных продольных скоростей протонов и электронов на декремент затухания изучалось при помощи модуляции энергии электронного пучка. Для того чтобы такая модуляция эффективно расширяла распределение электронов по продольным скоростям, необходима достаточно высокая частота модуляции, такая, чтобы средние скорости протонов не успевали подстраиваться под средние скорости электронов. В приведённых измерениях частота модуляции энергии электронов составляла 200 Гц. На рис. 2 кривая "а" показывает зависимость декремента затухания от амплитуды модуляции продольных скоростей электронного пучка. Видно, что при амплитуде модуляции продольной скорости $\Delta v_z = 3,6 \cdot 10^{-4} v_z$ (v_z - средняя скорость электронов) величина декремента уменьшается в два раза.

При изучении влияния поперечных скоростей электронов на декременты затухания было необходимо раздельное управление величинами скоростей ларморовских кружков и скоростью ларморовского вращения электронов. Изменение поперечной скорости центров ларморовских кружков производилось магнитным полем, создаваемым специальными витками, наложенными на участке охлаждения. При этом поперечные скорости ларморовских кружков равны $\Delta v_{\perp} \sim v_z H_{\perp} / H_0$, где H_{\perp} - величина поперечного магнитного поля, а H_0 - величина продольного магнитного поля установки с электронным пучком. Скорость ларморовского вращения изменяется мало, так как корректирующие витки наложены достаточно далеко от электронного пучка и возмущающее поле H_{\perp} медленно нарастает на длине траектории электронов, существенно большей шага ларморовской спирали (~ 40 мм). Для изменения скорости ларморовского вращения применялись специальные электроды, помещённые на выходе из пушки и максимально приближённые к электронному пучку. Длина пластины вдоль траектории электронов составляла 10 мм, а рас-

стояние между пластинами – 20 мм. Поперечное электрическое поле, приложенное на таком коротком участке траектории, вызывает неадиабатическое изменение скорости ларморовского вращения электронов. Расчёт и измерение траектории электронов дали хорошо совпадающие результаты: при разности потенциалов на пластинах 2 кВ возбуждаются поперечные скорости вращения $\Delta U \approx 10^{-2} U_z$. На рис.2 кривая "б" показывает (даёт зависимость декремента от модуляции поперечных скоростей ларморовских кружков (частота модуляции 20 Гц), а кривая "в" – от величины скорости.

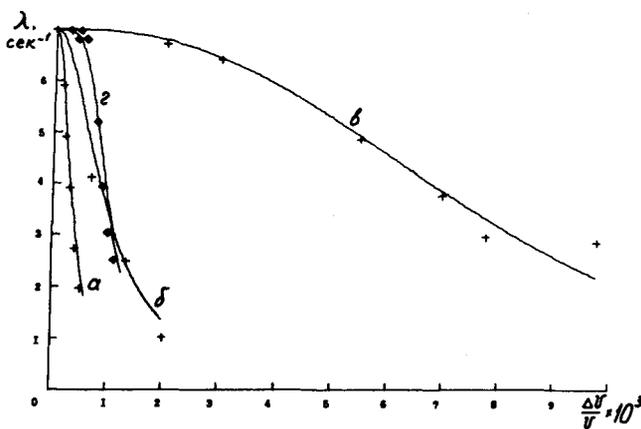


Рис.2. Зависимость декремента затухания поперечных колебаний: (а) – от амплитуды модуляции энергии электронов; (б) – от амплитуды модуляции поперечных скоростей ларморовских кружков; (в) – от скоростей ларморовского вращения; (г) – от поперечных скоростей протонов.

Хорошо видно, что декремент значительно резче зависит от поперечных скоростей центров ларморовских кружков, чем от скорости вращения.

Кривая "г" рис.2 демонстрирует зависимость декремента от амплитуды бетатронных колебаний протонов, возбуждаемых ударом инфлектора. Как видно из кривых "б", "г", изменение декремента вдвое не зависит от способа создания относительной поперечной скорости ларморовских кружков и протонов. Некоторое отличие кривых, по-видимому, связано с влиянием пространственной неоднородности, так как при одинаковых относительных скоростях величины пространственного смещения отличаются в отношении значений β – функции к длине участка охлаждения ($\beta/c \sim 5$). Отметим, что при

поперечных скоростях протонов $\Delta U_{\perp} = 10^{-3} \mathcal{U}$ размер протонного пучка совпадает с размером электронного пучка и равен 10 мм.

Скорость затухания энергетического разброса зависит от величины продольной силы трения, измерения которой проводились по скорости изменения радиального положения центра протонного пучка после скачкообразного изменения энергии электронов ^{/4/}. Результаты приведены на рис.3.

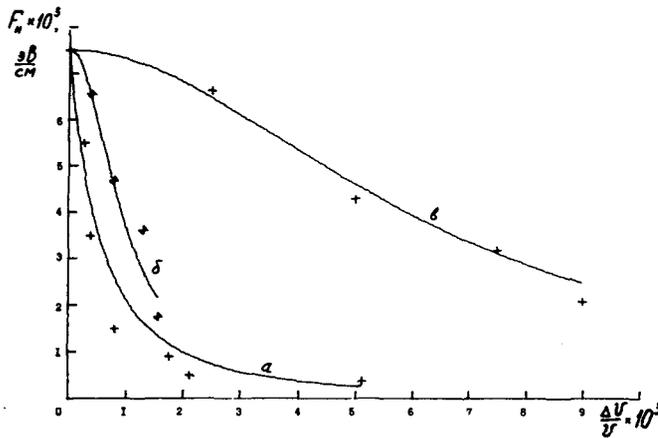


Рис.3. Зависимость продольной компоненты силы трения: (а) — от разности продольных скоростей протонов и электронов; (б) — от амплитуды модуляции поперечных скоростей лармовского вращения.

Как видно из кривой "а" рис.3, $F_{||}$ монотонно возрастает при уменьшении отстройки продольных скоростей пучков. При отстройках, меньших $1,5 \cdot 10^{-4}$, возникают трудности в измерении $F_{||}$, связанные с конечностью поперечного размера протонного пучка. Поэтому для измерения максимального значения $F_{||}$ использовалась методика, связанная с наблюдением колебаний положения протонного пучка при модуляции энергии электронов. При увеличении амплитуды модуляции ΔU амплитуда колебаний центра протонного пучка увеличивается до тех пор, пока величина продольной силы трения достаточна для подстройки средней скорости протонов к средней скорости электронов. Если энергия протонов успевает перестраиваться в соответствии с изменениями энергии электронов, то радиальное положение протонного пучка выражается соотношением

$$z(t) = R_0 \psi \frac{\Delta p(t)}{P_s} = R_0 \psi \frac{\gamma \Delta U \sin(\Omega t + \varphi)}{(1 + \gamma) U_0}. \quad (1)$$

Для обеспечения перестройки энергии протонов требуемая $F_{||}$ определяется скоростью перестройки радиального положения центра протонного пучка:

$$F_{||} = \frac{P_s}{R_0 \psi} \dot{z}(t) = \frac{M U_s \gamma^2 \Omega \Delta U \cos(\Omega t + \varphi)}{(1 + \gamma) U_0}, \quad (2)$$

где $R_0 \psi$ - дисперсионная функция накопителя; Ω - частота модуляции; $\gamma = (1 - v^2/c^2)^{-1/2}$ - релятивистский фактор; $e U_0$ - кинетическая энергия электронов; M - масса протона. При дальнейшем увеличении скорости перестройки энергии электронов $F_{||}$ оказывается недостаточной для соответствующей перестройки энергии протонов, что приводит к уменьшению амплитуды радиального смещения протонного пучка. Таким образом, максимальную $F_{||}$ можно определить по максимальной скорости перестройки энергии протонного пучка в соответствии с выражением (2). При токе электронов 0,3 А величина $F_{||}$ оказалась равной $7,5 \cdot 10^{-3} \text{ eV/cm}$.

Скорость образования нейтральных атомов водорода, сопровождающего охлаждение протонов, зависит от относительных скоростей протонов и электронов. Первоначально предполагалось, что сопровождающее магнитное поле должно слабо сказываться на этом процессе, т.е. скорость рекомбинации определяется только относительными скоростями электронов и протонов и не зависит от характера движения электрона в этом поле. Однако измерения показали, что и скорость рекомбинации существенно медленнее зависит от скорости ларморовского вращения, чем от скоростей ларморовских кружков (кривые "б" и "в" на рис.4).

Слабая зависимость декрементов и продольной силы трения от скоростей ларморовского вращения указывает, по-видимому, на заметное влияние столкновений с большими прицельными параметрами на передачу энергии протона электронам. Уменьшение передачи энергии примерно в два раза происходит при скоростях ларморовского вращения порядка $10^{-2} v_s$ (рис.2,3, кривая "в"), что соответствует ларморовским радиусам $\rho_{\text{max}} \approx 5 \cdot 10^{-3} \text{ см}$. При плотности электронов

$2,4 \cdot 10^8$ $1/\text{см}^3$ в сфере радиуса ρ_{max} в среднем находится 120 электронов. Из-за малого разброса продольных скоростей электронов такое большое число частиц в области взаимодействия может уменьшить эффективность столкновений за счет экранирования.

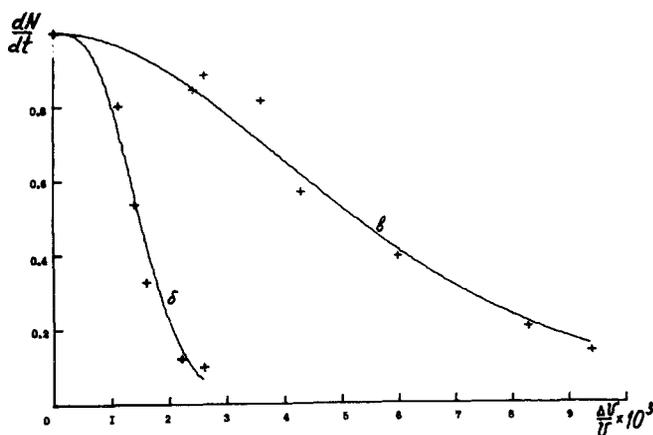


Рис.4. Зависимость выхода атомов водорода от (б) – амплитуды модуляции поперечных скоростей ларморовских кружков; (в) – скоростей ларморовского вращения. Кривые на рис.2–4 снимались при токе электронов 0,3 А, диаметре электронного пучка 10 мм, кинетической энергии протонов 62,5 МэВ.

Однако для параметров НАИ М время пролета протоном участка охлаждения $\sim 10^{-8}$ с сравнимо с периодом ленгмюровских колебаний, что может значительно осложнить влияние коллективных эффектов на процесс охлаждения.

Для многих приложений электронного охлаждения важной величиной является установившееся значение энергетического разброса протонного пучка. Измерение энергетического разброса проводилось по времени исчезновения азимутальной неоднородности протонного пучка. В первоначально однородном пучке коротким импульсом дефлектора выбивалась часть протонов и наблюдалось затухание сигнала с интегрального пикап-электрода. На рис.5 приведена зависимость от тока протонов времени уменьшения вдвое сигнала первой гармоники частоты обращения. Пересчет времени затухания в разброс по энергии производился по формуле

$$\frac{\Delta W_p}{W_p} = \frac{1}{\tilde{\tau} \omega_c} \cdot \frac{\gamma(1+\beta)}{\alpha \gamma^2 - 1} = \frac{1,45 \cdot 10^{-6}}{\tilde{\tau}}, \quad (3)$$

где $\tilde{\tau}$ – время уменьшения сигнала в е раз; ω_c – частота об-

ращения; α - коэффициент уплотнения орбит; W_p - кинетическая энергия протона.

Результаты измерений показали, что величины относительного энергетического разброса линейно зависят от тока протонов I_p и при токе 5 мкА составляют $2,9 \cdot 10^{-6}$, а при токе 40 мкА - $2,6 \cdot 10^{-5}$. Такое поведение, по-видимому, связано с эффектами внутреннего рассеяния протонов и передачей энергии поперечных колебаний в продольное движение. Подробное рассмотрение этого эффекта проведено в работе /8/, где для величины установившегося энергетического разброса получено выражение, дающее при токе протонов 40 мкА значение $\sim 1,5 \cdot 10^{-5}$, а при нулевом протонном токе $\sim 0,7 \cdot 10^{-6}$.

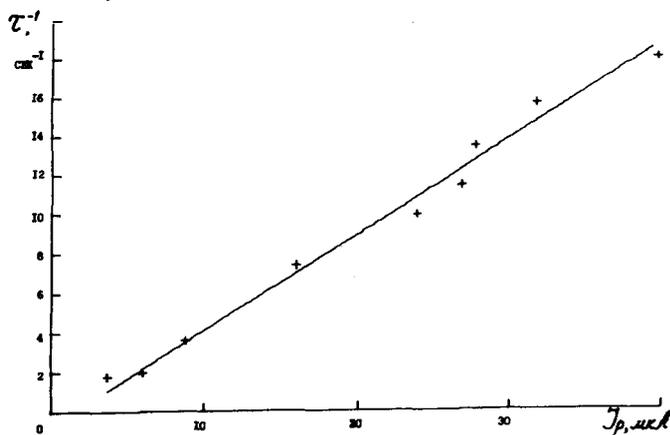


Рис.5. Зависимость скорости уменьшения вдвое сигнала первой гармоники частоты обращения от тока протонов. Ток электронов 0,3 А, диаметр электронного пучка 10 мм, кинетическая энергия протонов 62,5 МэВ.

Ещё одним способом получения информации о величине энергетического разброса является наблюдение спектра частот в интегральном сигнале с пикап-электрода, возникающем за счёт тепловых флуктуаций плотности азимутально-однородного протонного пучка /9/. На рис.6 кривая "а" показывает спектр шумов неохлажденного протонного пучка ($I_p = 15$ мкА). После охлаждения сигнал, наведенный на электродах, резко уменьшается (кривая "б" на рис.6). Это связано с сильным уменьшением температуры протонного пучка после охлаждения, что приводит к возрастанию роли электростатического взаимодействия между протонами, препятствующего образованию флуктуаций плотности, так как энергия флуктуаций не может

превышать продольную температуру протонов. Для наблюдения сигнала в режиме охлаждения использовалась принудительная малая раскачка шумовым напряжением, подаваемым на резонатор (кривая "в" на рис.6). Видно существенное уменьшение энергетического разброса после охлаждения пучка.

При токе протонов 15 мкА ширина спектра неохлажденного пучка ≈ 60 Гц, а охлажденного - ≈ 6 Гц, что согласуется с измерениями по времени расфазировки (см. рис.5).

Известные в настоящее время модели электронного охлаждения, хотя и могут объяснить отдельные экспериментальные факты, но не дают полного описания затухания протона, взаимодействующего с реальным электронным пучком. Поэтому необходима дальнейшая разработка теории, более полно учитывающей особенности распределения электронов по скоростям, влияние магнитного поля на столкновения протона с электронами, роль многочастичных эффектов.

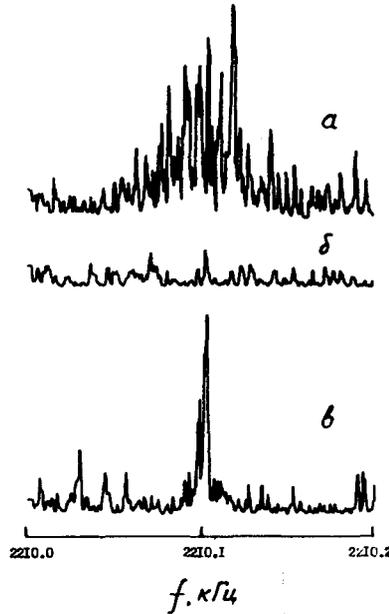


Рис.6. Спектр тепловых шумов: а - неохлажденного протонного пучка, б - охлажденного пучка, в - охлажденного пучка при подаче шумового напряжения на резонатор. Кинетическая энергия протонов 62,5 МэВ, ток протонов 15 мкА.

Нет также полной ясности в понимании деталей распределения электронов в охлаждающем пучке, необходимой для строгого сравнения с теорией. При больших электронных токах наблюдается не вполне понятное ограничение декрементов /10/.

Однако существующие экспериментальные факты позволяют сформулировать ряд требований к свойствам электронного пучка, используемого для быстрого охлаждения антипротонов. Электронный пучок должен обладать достаточно высокой стабильностью энергии ($\Delta U_e \lesssim 10^{-4} U_e$), искажения силовой линии сопровождающего магнитного поля установки не должны превышать $\Delta H_z \sim 10^{-4} H_0$. Можно использовать большую величину продольной силы трения для увеличения средней скорости охлаждения за счёт быстрого уменьшения энергетического разброса при сканировании энергией электронов и последующего охлаждения поперечных колебаний. Нужно, однако, иметь в виду, что быстрое затухание имеет место при поперечных скоростях антипротонов меньших или порядка разброса поперечных скоростей электронов (для НАП-М $\approx 2 \cdot 10^{-3} v_e$). При накоплении антипротонов с большим разбросом поперечных скоростей для оценки скорости затухания, по-видимому, можно использовать результаты работы /6/.

Литература

1. Г.И.Будкер. Атомная энергия, 22, 346, 1967.
2. G.I.Budker. Proc.Intern. Symp. on Electron and Positron Storage rings, Saclay, 1966.
3. Report of VAPP-NAP Group. Proc. 8th. Intern. Conf. on High-Energy Accelerators, CERN, Geneva, p.72, 1971.
4. Г.И.Будкер, А.Ф.Будушев, Н.С.Диканский, В.И.Кононов, В.И.Куделайнен, И.Н.Мешков, В.В.Пархомчук, Д.В.Пестриков, А.Н.Скринский, Б.Н.Сухина. Доклад на У Всесоюзном совещании по ускорителям заряженных частиц, Дубна, 1976, препринт ИЯФ 76-92, Новосибирск, 1976.
5. G.I.Budker, N.S.Dikansky, V.I.Kudelainen, I.N.Meshkov, V.V.Parkhomchuk, D.V.Pestrikov, A.N.Skrinsky, B.N.Sukhina. Particles Accelerators, Vol.7, 197, 1976.
6. Я.С.Дербенёв, А.Н.Скринский. Кинетика электронного охлаждения пучков в накопителях тяжелых частиц. Препринт 255, ИЯФ СО АН СССР, Новосибирск, 1968; Particles Accelerators, Vol.8, N 1, 1977.
7. Я.С.Дербенёв, А.Н.Скринский. Эффекты замагниченности в электронном охлаждении. Доклад на X Международной конференции по ускорителям заряженных частиц высоких энергий, Серпухов, 1977.

8. В.В.Пархомчук, Д.В.Пестриков. Препринт ИЯФ 77-37, Новосибирск, 1977.
9. J.Borer, P.Bramham, H.G.Hereward, K.Hübner, W.Shnell, L.Thorndal. Proc. 9th.Intern.Conf. on High Energy Accelerators, SLAC, Stanford, p.53, 1974.
10. Н.С.Диканский, В.И.Куделайнен, В.И.Кононов, И.Н.Мешков, В.В.Пархомчук, Д.В.Пестриков, Б.Н.Сухина. Влияние эффектов пространственного заряда на электронное охлаждение. Доклад на X Международной конференции по ускорителям заряженных частиц высоких энергий, Серпухов, 1977.