

57

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

ПРЕПРИНТ И Я Ф 77 - 70

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

СОСТОЯНИЕ РАБОТ ПО ЭЛЕКТРОН -
НОМУ ОХЛАЖДЕНИЮ

Новосибирск

1977

СОСТОЯНИЕ РАБОТ ПО ЭЛЕКТРОННОМУ ОХЛАЖДЕНИЮ

Г.И. Будкер, А.Ф. Будушев, 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

А Н Н О Т А Ц И Я

Описываемая в докладе серия экспериментов по электронному охлаждению была посвящена выяснению механизма быстрого затухания протонного пучка, обнаруженного в предыдущих экспериментах. Исследовались зависимости декрементов колебаний и продольной компоненты силы трения от модуляции энергии и углов электронного пучка. Измерено максимальное значение продольной силы трения и разброс по импульсам в охлажденном протонном пучке. Получены зависимости выхода атомов водорода от модуляции энергии и углов электронного пучка.

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 $H_0 \approx 1000$ эрстед. 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 сек при плотности тока электронов 0.13 А/см^2 и поперечной температуре электронов 0.25 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 в работе /6/, вызывала

большие затруднения.

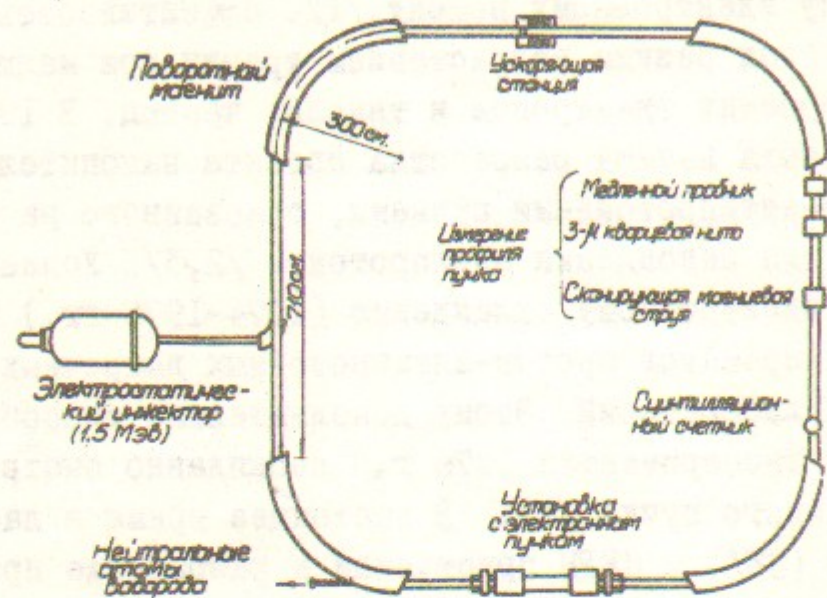


Рис. 1. Схема накопителя протонов НАУ-М.

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 ($\Delta v/v \leq 10^{-2} - 10^{-3}$). Вследствие этого большую роль могут играть эффекты, связанные с наличием сопровождающего магнитного поля, а также эффекты перераспределения декрементов по степеням свободы, за счет 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 идет через продольную (по отношению к магнитному полю) степень свободы электрона.

Взаимодействие выглядит таким образом, как если бы поперечная температура электронов стала нулевой. Характерной чертой 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 скоростей электронов, вклады далеких и близких столкновений одного порядка, поэтому "замороженность" электронов не приводит к существенному увеличению скорости охлаждения. Для выяснения вклада далеких столкновений в эффект быстрого затухания были проведены измерения зависимостей декрементов поперечных колебаний и продольной компоненты силы трения от величины 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 ($\nu_z = 1,24$, $\nu_r = 1,34$).

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 приведенных 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, помещенные на выходе из пушки и максимально приближенные к электронному пучку. Длина пластин вдоль траектории электронов составляла 10 мм, а расстояние между пластинами 20 мм. Поперечное электрическое поле, приложенное на таком коротком участке траектории вызывает неадиабатическое изменение скорости ларморовского вращения электронов. Расчет и измерение траектории электронов дали хорошо совпадающие результаты: при разности потенциалов на пластинах 2 кВ возбуждаются поперечные скорости вращения $\Delta v_{\perp} \approx 10^{-2} v_z$. На Рис. 2 кривая δ показывает зависимость декремента от модуляции поперечных скоростей ларморовских кружков (частота модуляции 20 Гц), а кривая ϵ от величины скорости

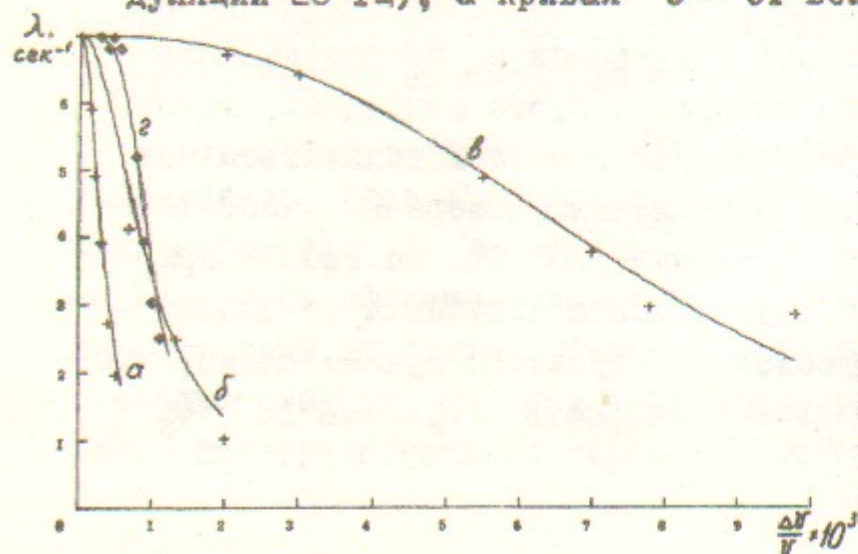


Рис. 2. Зависимость декремента затухания поперечных колебаний от:
 а - амплитуды модуляции энергии электронов,
 б - амплитуды модуляции поперечных скоростей ларморовских кружков,
 в - скоростей ларморовского вращения, г - поперечных

скоростей протонов.

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

Кривая "г" рисунка 2 демонстрирует зависимость декремента от амплитуды бетатронных колебаний протонов, возбуждаемых ударом инфлектора. Как видно из кривых δ , ϵ , изменения декремента вдвое не зависят 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 ($\beta/l \sim 5$). Отметим, что при поперечных скоростях протонов $\Delta v_{\perp} = 10^{-3} v_z$ 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.

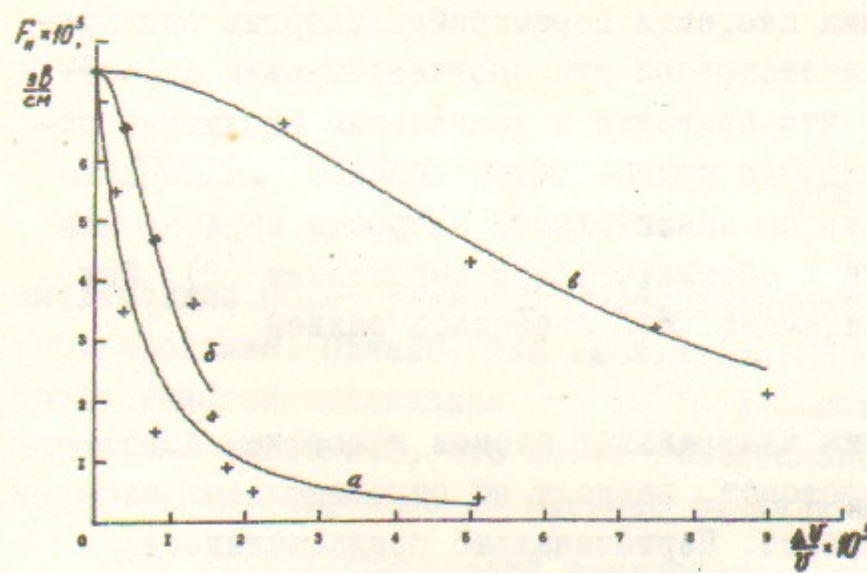


Рис. 3. Зависимость продольной компоненты силы трения от:
 а - разности продольных скоростей протонов (а) и электронов, б - амплитуды модуляции поперечных скоростей ларморовских кружков (б), в - скоростей ларморовского вращения.

Как видно из кривой а, Рис. 3, $F_{||}$ монотонно возрастает при уменьшении отстройки продольных скоростей пучков. При от-

стройках, меньших $1.5 \cdot 10^{-4}$, возникают трудности в измерении F_{\parallel} , связанные с конечностью поперечного размера протонного пучка. Поэтому для измерения максимального значения F_{\parallel} 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:

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

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

$$F_{\parallel} = \frac{P_s}{R_0 \psi} \dot{r}(t) = \frac{M v_s \gamma^2 \Delta U \Omega \cos(\Omega t + \varphi)}{(1 + \gamma) U_0} \quad (2)$$

где $R_0 \psi$ - дисперсионная функция накопителя, Ω - частота модуляции, $\gamma = (1 - v_s^2/c^2)^{-1/2}$ релятивистский фактор, $e U_0$ - кинетическая энергия электронов, M - масса протона. При дальнейшем увеличении скорости перестройки энергии электронов F_{\parallel} оказывается недостаточной для соответствующей перестройки энергии протонов, что приводит к уменьшению амплитуды радиального смещения протонного пучка. Таким образом, максимальную силу можно определить по максимальной скорости перестройки энергии протонного пучка в соответствии с выражением (2). При токе электронов 0,3 А величина F_{\parallel} 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. что скорость рекомбинации определяется только относительными скоростями электронов и протонов и не зависит от характера движения электрона в этом поле. Однако, изме-

рения 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 б), что соответствует ларморовским радиусам $\rho_{\text{max}} \approx 5 \cdot 10^{-3} \text{ см}$. При плотности электронов $2.4 \cdot 10^8 \text{ 1/см}^3$ в сфере радиуса ρ_{max} в среднем находится 120 электронов. Из-за малого разброса продольных скоростей электронов такое большое число частиц в области вза-

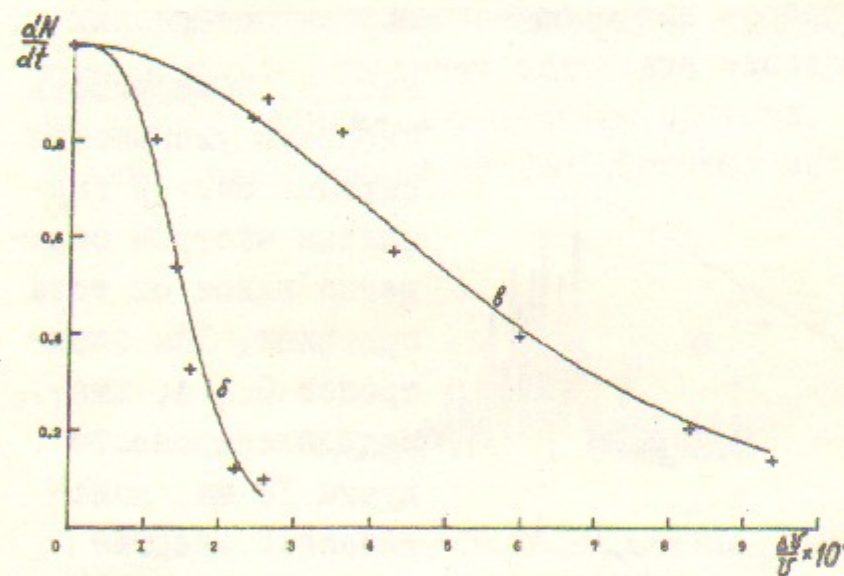


Рис. 4. Зависимость выхода атомов водорода от б-амплитуды модуляции поперечных скоростей ларморовских кружков, в - скоростей ларморовского вращения. Кривые на Рис. 2-4 снимались при токе электронов 0,3 А, диаметре электронного пучка 10 мм, кинетической энергии протонов 62,5 МэВ.

имдействия может уменьшить эффективность столкновений за счет экранирования. Однако, для параметров НАП-М время пролета протоном участка охлаждения $\sim 10^{-8}$ сек сравнимо с периодом ларморовских 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:

$$\frac{\Delta W_p}{W_p} = \frac{1}{\tau \omega_s} \cdot \frac{\gamma(1+\delta)}{\alpha \delta^2 - 1} \approx \frac{1.45 \cdot 10^{-6}}{\tau} \quad (3)$$

где τ - время уменьшения сигнала в e раз, ω_s - частота обращения, α - коэффициент уплотнения орбит, W_p - кинетическая энергия протона.

Результаты измерений показали, что величины относительно энергетического разброса линейно зависят от тока протонов I_p и при токе 5 мкА составляет $2.9 \cdot 10^{-6}$, а при токе 40 мкА - $2.6 \cdot 10^{-5}$. Такое поведение, по-видимому, связано с эффектами внутреннего рассеяния протонов и передачей энергии поперечных

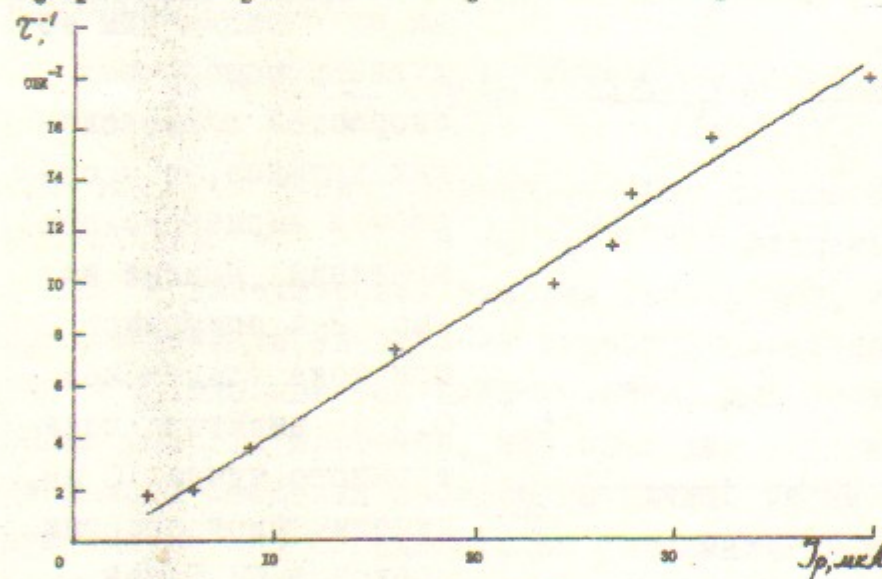


Рис. 5. Зависимость скорости уменьшения сигнала первой гармоники частоты обращения вдвое от тока протонов. Ток электронов 0,3 А, диаметр электронного пучка 10 мм, кинетическая энергия протонов 62,5 МэВ.

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 $\sim 0.7 \cdot 10^{-6}$.

Еще одним способом получения информации о величине энергетического разброса является наблюдение спектра частот в интегральном сигнале с пикап электрода, возникающем за счет тепловых флуктуаций плотности азимутально-однородного протонного пучка /9/. На Рис. 6 кривая а показывает спектр шумов неохла-

жденного протонного пучка ($I_p = 15$ мкА). После охлаждения сигнал, наведенный на электродах, резко уменьшается (кривая б на рис. 6). Сильное уменьшение температуры протонного пучка после охлаждения 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, не дают полного описания затухания протона, взаимодействующего с реальным электронным пучком. Поэтому необходима дальнейшая раз-

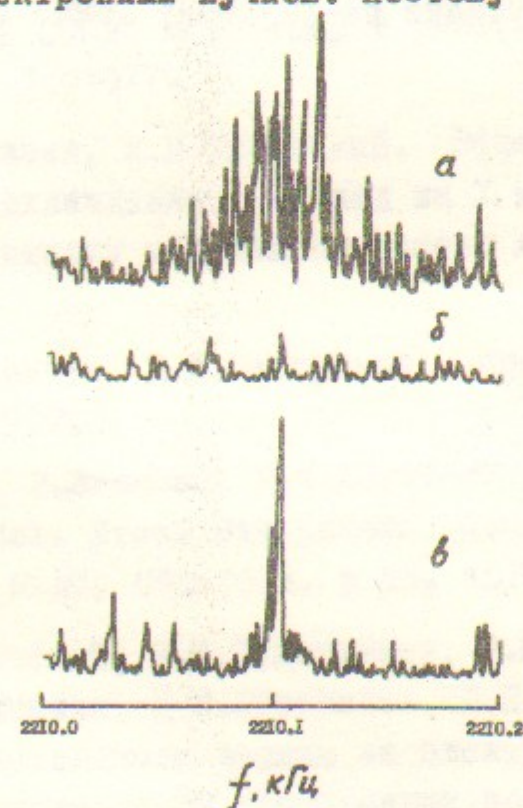


Рис. 6. Спектр тепловых шумов: а - неохлажденного протонного пучка, б - охлажденного пучка, в - охлажденного пучка при подаче шумового напряжения на резонатор. Кинетическая энергия протонов 62,5 МэВ, ток протонов 15 мкА.

работка теории, более полно учитывающей особенности распределения электронов по скоростям, влияние магнитного поля на столкновения протона с электронами, роль многочастичных эффектов.

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 ($\Delta v_e \ll 10^{-4} v_e$), искажения силовой линии сопровождающего магнитного поля установки не должны превышать $\Delta H_L \sim 10^{-4} H_0$. Можно использовать большую величину продольной силы трения для увеличения средней скорости охлаждения, за счет 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 $2 \cdot 10^{-3} v_e$). При накоплении антипротонов с большим разбросом поперечных скоростей, для оценки скорости затухания по-видимому можно использовать результаты работы /6/.

Л и т е р а т у р а

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.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. 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.Дербенев, А.Н.Скринский. Кинетика электронного охлаждения пучков в накопителях тяжелых частиц. Препринт 255, ИЯФ СО АН СССР, Новосибирск 1968, Particles Accelerators, Vol Vol 8, N 1, 1977.
7. Я.С.Дербенев, 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.Snell, 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.

Работа поступила - 15 июня 1977 г.

Ответственный за выпуск - С.Г.ПОПОВ

Подписано к печати 12.УШ-1977 г. МН 02918

Усл. 0,8 печ.л., 0,7 учетно-изд.л.

Тираж 250 экз. Бесплатно

Заказ № 70.

Отпечатано на ротационной ИЯФ СО АН СССР