

40

ИНСТИТУТ ЯДЕРНОЙ ФИЗИКИ
СО АН СССР

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

**ИЗУЧЕНИЕ БЫСТРОГО
ЭЛЕКТРОННОГО ОХЛАЖДЕНИЯ**

ПРЕПРИНТ ИЯФ 79 - 56

Новосибирск

ИЗУЧЕНИЕ БЫСТРОГО ЭЛЕКТРОННОГО ОХЛАЖДЕНИЯ

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

АННОТАЦИЯ

В работе приведены данные по экспериментальному изучению эффекта быстрого электронного охлаждения на установке НАП-М. Эксперименты проводились в области энергий протонов 1,5-65 МэВ. Полученные экспериментальные данные объединены в две эмпирические формулы для декремента затухания поперечных колебаний и продольной силы трения. Обсуждаются результаты экспериментов по компенсации электронного пучка ионами.

Исследования электронного охлаждения, проводившиеся в последние пять лет, позволили накопить богатый экспериментальный материал и существенно развили первоначальные теоретические представления, базировавшиеся на модели изотропной и однородной электрон-ионной плазмы с максвелловским распределением по скоростям /1/. Были поняты существование резкой анизотропной функции распределения электронов по скоростям в пучке при электростатическом ускорении /2,3/, роль сильного магнитного поля в установке с электронным пучком /4/, эффекты пространственного заряда в электронном охлаждении /5/.

Соответствующие теоретические описания, основанные на детальном учете микроскопической картины столкновений частиц, позволяют понять физику отдельных явлений, когда какой-либо эффект или параметр играют определяющую роль. В реальных ситуациях мы, как правило, имеем дело с наложением ряда эффектов, так что попытки применения подобных расчетов для описания экспериментальных данных наталкиваются на значительные вычислительные трудности. В этой связи целесообразно представить полученные экспериментальные данные в виде эмпирических формул, которые, с одной стороны, отвечали бы основным особенностям столкновений в магнитном поле, а с другой достаточно простых и удобных для конкретных оценок различных характеристик процесса охлаждения.

К настоящему времени получены данные об электронном охлаждении протонов на энергии 65, 35 и 1,5 МэВ при значениях тока в электронном пучке 2 + 500 мА. Методика экспериментов описана в работах /2,3,5/.

I. Эффективность взаимодействия протонов и электронов при охлаждении существенно зависит от плотности электронного пучка и разности скоростей протонов и электронов. Анализируя последнюю зависимость, следует различать поперечную скорость ларморовского вращения электронов v_L в сопровождающем продольном магнитном поле установки с электронным пучком /2/ и разность средних скоростей протонов и электронов $\Delta \vec{v} = \vec{v}_p - \langle \vec{v}_e \rangle$. Символом $\langle \rangle$ обозначена операция усреднения по ларморовскому вращению.

В экспериментах разность поперечных средних скоростей $\Delta \vec{v}_\perp$ вносилась принудительно ударным возбуждением бетатронных колебаний (Δv_p) или изменением угла наклона оси электронного пучка (Δv_e) /6/.

Результаты измерений декремента затухания бетатронных колебаний во всем диапазоне энергий объединяются общей зависимостью (рис.1) $\lambda/n_e = 10^6/\Delta v_L^2$ см³/сек.

В этих измерениях значения Δv_L лежат в пределах $\Delta v_L \ll \Delta v_{\parallel} \ll v_L$, кроме этого v_L практически не изменялась при вариациях энергии. При нормальных условиях v_L определяется разбросом скоростей на катоде электронной пушки. Более подробно область применимости этой зависимости обсуждается в пункте 5.

2. Декремент λ быстро уменьшается с ростом разброса продольных скоростей электронов Δv_{\parallel} (рис.2), причем это уменьшение начинается уже при $\Delta v_{\parallel} \approx 10^{-4} v_0$ (v_0 - средняя скорость протонов и электронов), что значительно меньше разности поперечных скоростей $\Delta v_{\rho} \approx 4 \cdot 10^{-4} v_0$, при которых производились эти измерения.

Разброс продольных скоростей электронов создавался в этих экспериментах модуляцией энергии электронов с частотой $f \approx 200$ Гц $\gg \lambda$

3. При измерении зависимости декремента λ от скорости ларморовского вращения для управления величиной v_L на короткие пластины (длиной около четверти периода ларморовской спирали электронов) подавалось постоянное напряжение /6/. Результаты измерений представлены на рис.3 в виде зависимости произведения $\lambda \Delta v_{\rho}^2$ от радиуса ларморовского "кружка" ρ_L . В такой форме удобно сравнивать результаты при энергиях 65 и 1,5 МэВ, т.к. в этом случае исключается очевидный вклад разности скоростей Δv_{ρ} , вносимый, как сказано выше, при измерении декремента.

4. Скорость затухания энергетического разброса характеризуется продольной силой трения F_{\parallel} . Ее зависимость от относительных скоростей пучков и ларморовских скоростей электронов измерялась на энергии 65 МэВ (рис.4,5). Как и декремент, F_{\parallel} слабо зависит от скорости ларморовского вращения v_L , однако, в отличие от декремента λ , сила F_{\parallel} примерно одинаково зависит от разности как продольных, так и поперечных скоростей.

5. Экспериментальные данные, описанные в пп. 1-4, могут быть объединены двумя эмпирическими формулами:

$$\lambda = \frac{66 r_p r_e n_e' c^4 \zeta}{[(\alpha v_0)^2 + \Delta v_L^2 + 11 \Delta v_{\parallel}^2] \sqrt{v_L^2 + \Delta v_L^2 + \Delta v_{\parallel}^2}}, \quad (1)$$

4.

$$F_{\parallel} = - \frac{12 \pi r_e^2 n_e' m c^4 \zeta}{\sqrt{(\alpha v_0/2)^2 + \Delta v_L^2 + \Delta v_{\parallel}^2} \sqrt{(v_L/2)^2 + \Delta v_L^2 + \Delta v_{\parallel}^2}}, \quad (2)$$

где n_e' - плотность электронов в системе частиц; ζ - доля орбиты протонов, занятая участком охлаждения; α - коэффициент, учитывающий искажение силовых линий продольного магнитного поля (в экспериментах на энергии протонов 65 МэВ $\alpha \approx 4 \cdot 10^{-4}$); r_p, r_e - классические радиусы протона, электрона, соответственно; c - скорость света.

Подчеркнем, что приведенные эмпирические формулы (1), (2) экспериментально обоснованы лишь в области значений параметров, исследованной в экспериментах на установке НАИ-М. Так, разброс скоростей и плотность электронного пучка были ограничены диапазонами значений

$$\begin{aligned} 10^5 \text{ см/сек} < \Delta v_{\parallel} < 7 \cdot 10^6 \text{ см/сек} \\ 4 \cdot 10^5 \text{ см/сек} < \Delta v_L < 2 \cdot 10^7 \text{ см/сек} \\ 4 \cdot 10^7 \text{ см/сек} < \Delta v_{\rho} < 1 \cdot 10^8 \text{ см/сек} \\ 10^7 \frac{1}{\text{см}^3} < n_e' < 4,8 \cdot 10^8 \frac{1}{\text{см}^3} \end{aligned}$$

Экстраполяцию этих формул в более широкую область значений параметров следует производить с известной осторожностью. В указанной области согласие (1), (2) с экспериментом не хуже 20%.

Для относительных скоростей Δv_L в области $\alpha v_0 < \Delta v_L < v_L$ декремент λ пропорционален величине $(\Delta v_L^2 v_L)^{-1}$. Этот результат принципиально отличается от представлений, не учитывающих влияния продольного магнитного поля, где λ пропорционально $v_L^{-3}/1,7/$. В экспериментах на НАИ-М магнитное поле установки с электронным пучком составляет 10^3 Э, так что при энергии электронов 35 КэВ на длине участка охлаждения (1 метр) укладывается примерно 25 периодов ларморовской спирали.

То, что экспериментальные данные описываются формулами (1), (2), повидимому, подтверждает сильное влияние продольного магнитного поля на процессы передачи в столкновениях частиц /4/. Это влияние характеризуется числом ларморовских циклов $\Omega_L T$ за время столкновения T . Если $\Omega_L T \ll 1$, то влияние магнитного поля пренебрежимо мало и трудно ожидать, что формулы (1), (2) останутся справедливыми. Максимальное время столкновения T может оп-

5.

ределяться либо временем пролета участка охлаждения l/v_0 , либо временем установления дебаевского экранирования $T \sim \omega_e^{-1}$, где ω_e — частота плазменных колебаний электронов. С увеличением плотности n_e' частота ω_e возрастает, и отношение Ω_L/ω_e уменьшается, что также может нарушить справедливость (1), (2).

6. Естественное стремление увеличить эффективность электронного охлаждения путем наращивания плотности электронного пучка ограничено эффектами пространственного заряда электронов, среди которых наиболее существенны два.

1). Провисание потенциала в электронном пучке /2/ приводит к возникновению поперечного градиента продольных скоростей $dv_{||}^e/dr$. Для устойчивости продольного движения протонов необходимо чтобы /7/

$$\text{или} \quad \frac{dv_{||}^e}{dr} < \frac{v_0}{R_0 \psi \gamma^2} \quad (3)$$

$$n_e < \frac{1}{R_0 \psi} \frac{\beta^2 \gamma}{2\pi r_e X}$$

где $R_0 \psi$ — значение дисперсионной функции накопителя на участке охлаждения, R_0 — средний радиус орбиты протонов, X — смещение протонного пучка относительно оси электронного. Это ограничение плотности электронов можно уменьшить несколькими способами:

- уменьшением ψ (в специальных структурах можно иметь $\psi = 0$),
- введением на участке охлаждения поперечных электростатических полей квадрупольного типа, компенсирующих радиальную компоненту поля пространственного заряда электронов и соответствующую компоненту $dv_{||}^e/dr$,

— нейтрализацией пространственного заряда электронов ионами. Экспериментально изучался только третий из перечисленных методов (см. п. 7).

2. Пространственный заряд электронов действует своими полями на протоны аналогично аксиальной линзе, что приводит к возмущению фокусирующей системы накопителя. Соответственно, допустимый сдвиг частот бетатронных колебаний $\Delta \nu_e$ определяет ограничение плотности электронов:

$$\psi n_e \leq \frac{\nu \Delta \nu_e \gamma^3 \beta^2}{\pi r_p R_0^2} \quad (4)$$

где $\beta = v_0/c$, $\gamma = (1-\beta^2)^{-1/2}$. Это ограничение скорее относится к пространственно неоднородным электронным пучкам, когда допустимое значение $\Delta \nu_e$ задано расстоянием до ближайшего резонанса и нелинейностью $\partial \nu / \partial a^2$, определяющей сдвиг бетатронных частот на размере электронного пучка a^2 .

Конечно, само получение предельных плотностей электронного тока в свою очередь связано с определенными трудностями, подробно рассмотренными в работе /8/.

7. Нейтрализация пространственного заряда электронного пучка изучалась с точки зрения повышения эффективности электронного охлаждения. В описываемых экспериментах компенсация достигалась подачей положительного потенциала на разрезные кольцевые пикап-электроды, окружающие электронный пучок на входе и выходе участка охлаждения. При этом, однако, в образующихся электростатических пробках накапливались электроны и отрицательные ионы, что приводило к возникновению сильных колебаний потенциала, вызывавших сброс ионов из электронного пучка. Для создания устойчивой компенсации потребовалась очистка пробок поперечным электрическим полем, для чего между полукольцами пикап-электродов прикладывалась разность потенциалов.

Степень компенсации пространственного заряда электронного пучка измерялась по "эффекту увлечения" протонов /2/: если изменить энергию электронов (потенциал катода электронной пушки U_e), то скорость протонов под действием охлаждения подстраивается к скорости электронов, и орбита протонного пучка сжимается или расширяется, пучок смещается. То же самое происходит при компенсации пространственного заряда электронов: потенциал внутри электронного пучка и, соответственно, энергия электронов возрастают. В экспериментах снималась зависимость между запирающим потенциалом пробок U и изменением потенциала катода ΔU_e , при котором равновесная орбита не расширяется (протонный пучок остается на месте). При токе электронов 300 мА (энергия протонов 65 МэВ) компенсация наступала, когда потенциал U достигал значения +450 В (рис. 6) — начиная с этого момента, протонный пучок не смещался с ростом потенциала запираения.

При охлаждении протонов закомпенсированным электронным пучком наблюдались биения размера протонного пучка, сопровождавшиеся

сбросом части ионов из электронного пучка. Небольшая раскачка ионного шнура поперечным электрическим полем с частотой порядка 1 МГц устраняла эту неустойчивость. В этом случае декременты затухания совпадали с измеренными в отсутствие компенсации. Следует отметить, что при компенсации пространственного заряда ионами нельзя одновременно скомпенсировать электрическое и магнитное поля электронного пучка особенно для релятивистских энергий. Кроме того, при таком способе компенсации, необходимы дополнительные усилия для обеспечения коллективной устойчивости пучка тяжелых частиц в присутствии ионов и электронов.

Эмпирические формулы (1), (2), фактически, выражены через параметры пучков в сопутствующей системе. Поэтому описываемые ими экспериментальные данные могут быть использованы и для других энергий, если параметры пучков в сопутствующей системе находятся внутри экспериментально исследованной области.

Воздействие электронов на устойчивость движения протонов в накопителе удобно характеризовать сдвигом частоты $\Delta \nu_e$. Как показали эксперименты, предельное значение тока электронов на энергии 1,5 МэВ составляло 2 мА, а на энергии 65 МэВ — 600 мА, что отвечает примерно одинаковому значению $\Delta \nu_e \approx 10^{-2}$ при $\gamma_x \approx 1.15$, $\gamma_z = 1.35$.

В этой связи полезно записать соотношения (1,2) через допустимое значение сдвига бетатронных частот $\Delta \nu_e$. Используя принятые ранее обозначения:

$$\theta_L = \Delta p_L / p_0, \theta_{II} = \Delta p_{II} / p_0, \theta_I = p_L / p_0 \quad (5)$$

с учетом преобразования в лабораторную систему из (1,2) получим:

$$\lambda = \frac{21 r_e c \gamma \Delta \nu_e}{\beta \gamma^2 R_0^2 [\alpha^2 + \theta_L^2 + 11(\theta_{II}^2 / \gamma^2)] \sqrt{\theta_L^2 + \theta_I^2 + (\theta_{II}^2 / \gamma^2)}}, \quad (6)$$

$$F_{II} = - \frac{12 M c^2 r_e \gamma \Delta \nu_e}{R_0^2 \sqrt{(\alpha/2)^2 + \theta_L^2 + (\theta_{II}^2 / \gamma^2)} \sqrt{(\theta_L/2)^2 + \theta_I^2 + (\theta_{II}^2 / \gamma^2)}} \quad (7)$$

где M — масса протона.

Выпишем следующее из (7) выражение для времени затухания энергетического разброса:

$$\tau^{-1} \approx \frac{F_{II}}{\Delta p_{II}} = \frac{12 r_e c \gamma \Delta \nu_e}{\beta \gamma R_0^2 \theta_{II} \sqrt{(\alpha/2)^2 + \theta_L^2 + (\theta_{II}^2 / \gamma^2)} \sqrt{(\theta_L/2)^2 + \theta_I^2 + (\theta_{II}^2 / \gamma^2)}} \quad (8)$$

Эта формула дает оценку τ сверху, т.к. сила F_{II} в процессе охлаждения возрастает.

Соотношения (6) + (8) позволяют экстраполировать экспериментальные данные, полученные в настоящей работе, в область высоких энергий и дать тем самым ответ на вопрос о зависимости эффективности электронного охлаждения от энергии частиц. Отметим, также, что ларморовская скорость электронов определяется, в основном, постоянным разбросом тепловых скоростей электронов на катоде, так как при ускорении θ_L падает с ростом энергии как $(\beta \gamma)^{-2}$. Поэтому, если разность скоростей $|\Delta v|$ мала по сравнению с v_L ($\theta_{II}, \theta_L \ll \theta_L$), что, в частности, реализовано в НАП-М, то время охлаждения бетатронных колебаний (λ^{-1}) растет с энергией только как γ , а время охлаждения энергетического разброса не изменяется. Так, в экспериментах на НАП-М получены примерно одинаковые декременты затухания как на энергии 1,5 МэВ, так и на энергии 65 МэВ, при одинаковых углах θ_L .

Полученные результаты показывают возможность получения достаточно высокой эффективности охлаждения в широкой области энергии охлаждаемых частиц. Необходимо, однако, заметить, что для получения предельно малых времен затухания требуется, согласно (4), увеличение тока электронов как $\gamma^3 \beta^3$. Поэтому в области больших энергий величина тока может ограничиваться техническими возможностями. В этом случае в качестве $\Delta \nu_e$ в (6) — (8) следует подставлять значение, отвечающее достигнутому току электронов, что означает быстрое убывание декремента с ростом энергии.

В заключение авторы считают приятным долгом выразить благодарность А.Ф.Булусеву, А.П.Кулакову, Н.Х.Коту, В.П.Останину за помощь в проведении экспериментов и Я.С.Дербеневу за плодотворные обсуждения результатов экспериментов.

Л и т е р а т у р а

1. Будкер Г.И. Атомная энергия, 1967; 22, с.346.
2. Будкер Г.И. и др. Part.Ass., 1976, 7, p.197.
3. Будкер Г.И. и др. Труды пятого Всесоюзного совещания по ускорению заряженных частиц. Дубна, 1976. М. : Наука, 1977, т.1, с.236.
4. Дербнев Я.С., Скринский А.Н. Труды десятой Международной конференции по ускорителям заряженных частиц высокой энергии. Протвино, 1977. Серпухов, 1977, т. I, с.516.
5. Диканский Н.С. и др. Труды десятой Международной конференции по ускорителям заряженных частиц высоких энергий. Протвино, 1977. Серпухов, 1977, т.1, с.510.
6. Будкер Г.И. и др. Труды десятой Международной конференции по ускорителям заряженных частиц высоких энергий. Протвино, 1977. Серпухов, 1977 т.1, с.498.
7. Дербнев Я.С. Скринский А.Н. Препринт ИЯФ СО АН СССР 255, Новосибирск, 1968; Part.Ass. 1977, 8, № I.
8. Куделайнен В.И. Мешков И.Н. Салимов Р.А. Препринт ИЯФ СО АН СССР 72-70, Новосибирск, 1970; CERN 77-08, pt.B, P.S.Division, Geneve, 13 April, 1977.

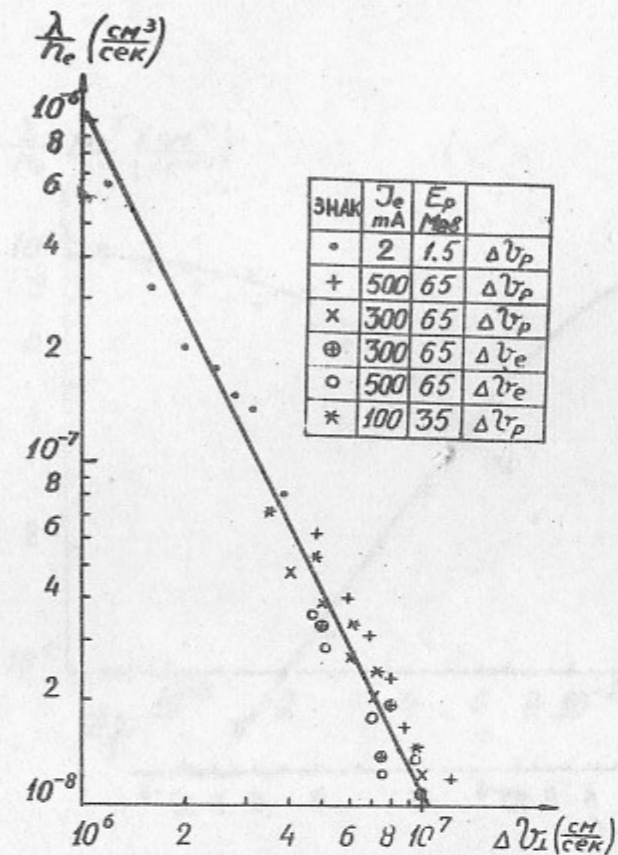


Рис.1. Зависимость декремента затухания поперечных колебаний (λ) от относительной скорости протонов и электронов при различной энергии протонов. Относительная поперечная скорость создавалась: возбуждением бетатронных колебаний протонов (Δv_p) либо наклоном электронного пучка относительно протонной траектории (Δv_e). (n_e - плотность электронов).

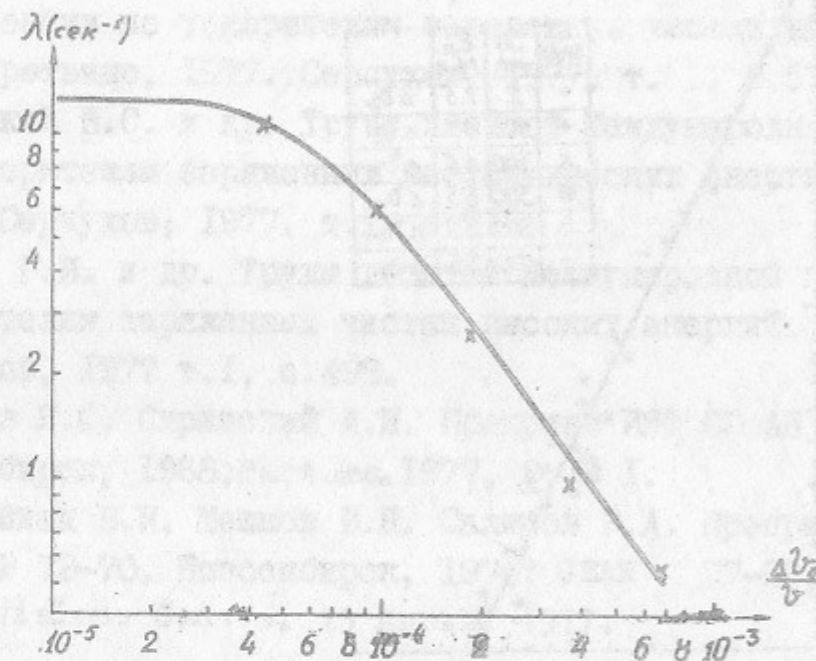


Рис. 2. Зависимость декремента затухания поперечных колебаний протонов от амплитуды модуляции продольной скорости электронов (электронный ток 300 мА, энергия протонов 65 МэВ).

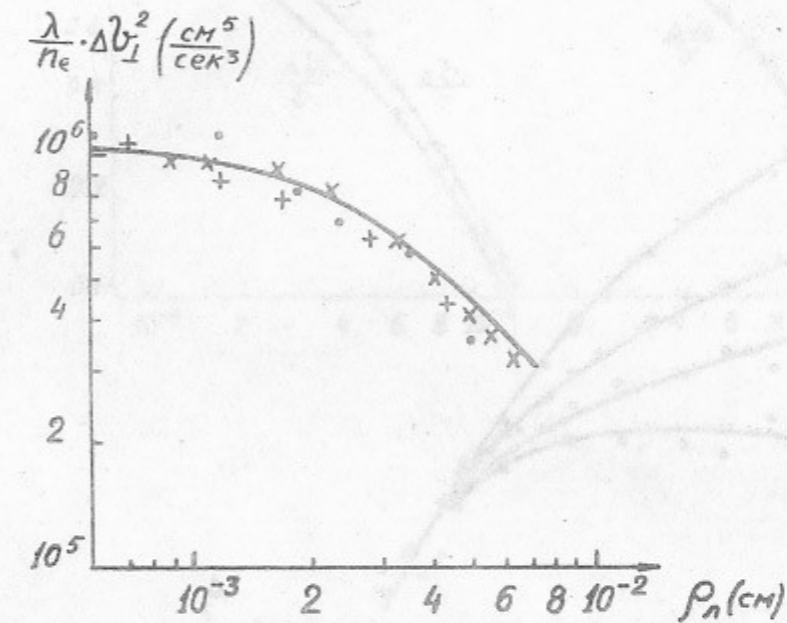


Рис. 3. Влияние ларморовского вращения электронов на значение декремента затухания поперечных колебаний (значение значков такое же, как на рис. 1).

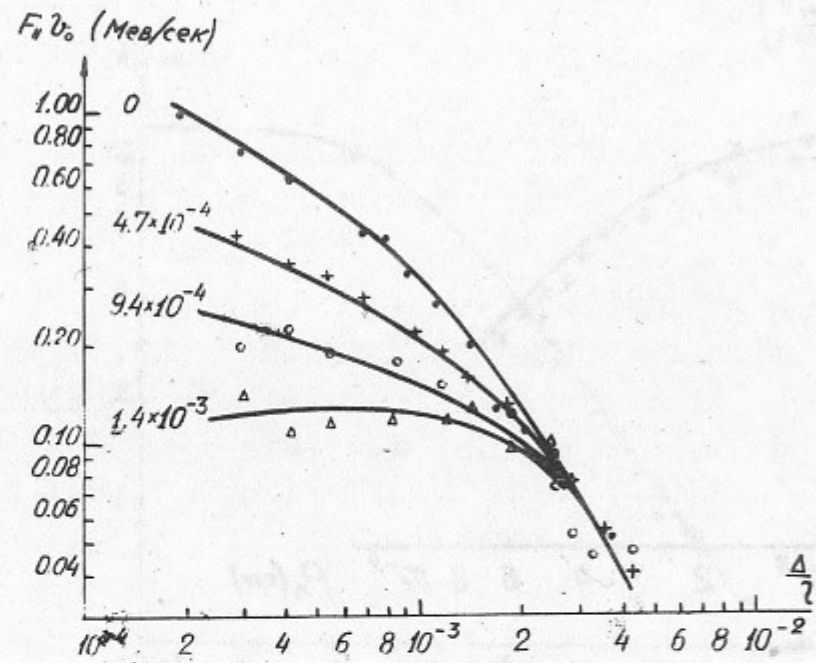


Рис.4. Зависимость продольной силы трения от отстройки скорости протонов от средней скорости электронов ($\Delta v_{||}$) при различных относительных поперечных скоростях ($\Delta v_{\perp} / v_0$). Ток электронов 300 мА, энергия протонов 65 МэВ.

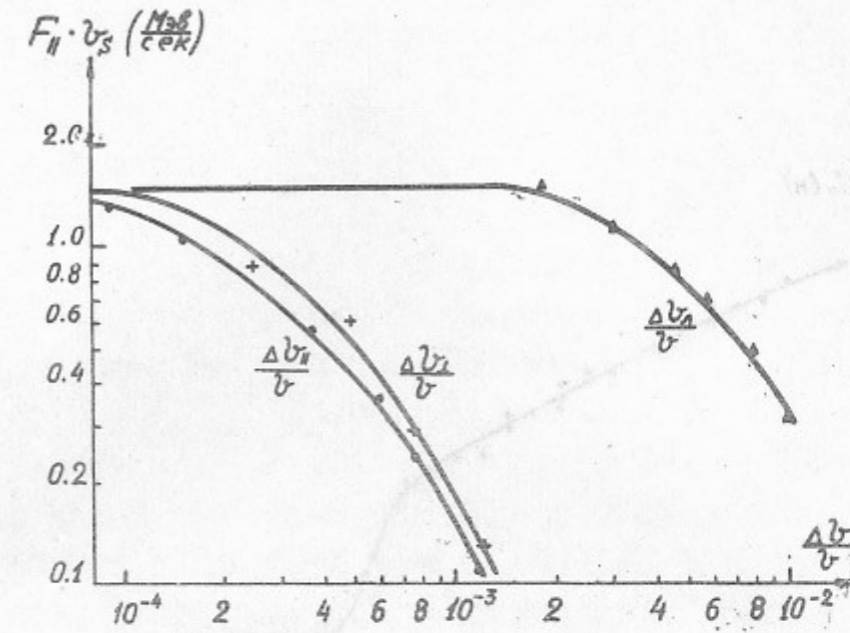


Рис.5. Зависимость продольной силы трения от отстройки продольных скоростей $\Delta v_{||}$, поперечных скоростей Δv_{\perp} и скорости ларморовского вращения Δv_L . (Ток электронов 300 мА, энергия протонов 65 МэВ).

Работа выполнена 15 мая 1979 г.

Выполненой за выпуск - С.Г. ДУНОВ

Подписано и печать 22.06.1979 г. № 00557

Усл. 1,0 печ.л., 0,8 учётно-изд.л.

Тираж 200 экз. Бесплатно

Зал № 56

Отпечатано на ротационной КИИ СО АН СССР

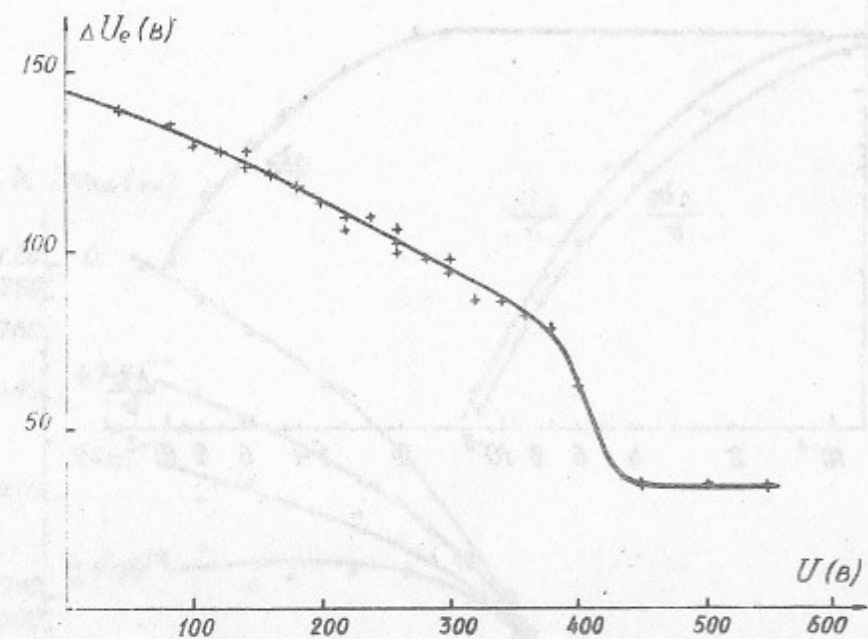


Рис. 6. Зависимость изменения потенциала пушки от запирающего потенциала.

Работа поступила - 15 июня 1979 г.

Ответственный за выпуск - С.Г. ПОПОВ
 Подписано к печати 22.06.1979 г. МН 00557
 Усл. 1,0 печ.л., 0,8 учетно-изд.л.
 Тираж 200 экз. Бесплатно
 Заказ № 56

Отпечатано на роталпринте ИЯФ СО АН СССР