

Б.90

5

**И Н С Т И Т У Т
ЯДЕРНОЙ ФИЗИКИ СОАН С С С Р**

ПРЕПРИНТ И Я Ф 74 - 87

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

**ПЕРВЫЕ ЭКСПЕРИМЕНТЫ ПО ЭЛЕКТРОННОМУ
ОХЛАЖДЕНИЮ**

**Новосибирск
1974**

ПЕРВЫЕ ЭКСПЕРИМЕНТЫ ПО ЭЛЕКТРОННОМУ ОХЛАЖДЕНИЮ

Г.И.Будкер, Н.С.Диканский, 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

Описаны первые эксперименты по электронному охлаждению, проводившиеся при энергии протонов - около 65 МэВ, электронов - около 35 КэВ. Показано, что при сведении скоростей протонов и электронов с точностью $1 \cdot 10^{-3}$ наблюдается: затухание бетатронных колебаний; уменьшение энергетического разброса в протонном пучке и увлечение (ускорение или замедление) протонов электронами; возрастание времени жизни протонного пучка; образование нейтральных атомов водорода с энергией 65 МэВ.

БИБЛИОТЕКА
Института ядерной
Физики СО АН СССР
ИНВ. № _____

Новосибирск

1974

THE FIRST EXPERIMENTS ON ELECTRON COOLING

G.I. BUDKER, N.S. DIKANSKY, V.I. KUDELAINEN, I.N. MESHKOV,
V.V. PARCHOMCHUK, D.V. PESTRIKOV, A.N. SKRINSKY, B.N. SUCHINA

ABSTRACT

All the measurements and observations reported below were made during may - june 1974 with 65-MeV protons and 35-keV electrons energy. It was observed: the damping of betatron oscillations, decreasing of energy spread, slowing (acceleration or deceleration) of proton by electron stream and increasing protons beam life time.

Первая серия экспериментов по электронному охлаждению (май-июнь 1974 г.) проводилась при энергии протонов 65 МэВ, электронов - около 35 КэВ на установке, описанной в работе /1/. Основные результаты состоят в следующем: при сведении скоростей протонов и электронов с точностью $\leq 10^{-3}$ наблюдается - увеличение времени жизни протонов τ_p , - затухание бетатронных колебаний, - уменьшение энергетического разброса в протонном пучке и увлечение (ускорение или замедление) протонов электронами. При разведении скоростей до $\approx 2 \cdot 10^{-3}$ перечисленные эффекты исчезают.

В этих экспериментах после ускорения до заданной энергии ускоряющее напряжение выключалось и протоны свободно циркулировали в постоянном магнитном поле. После этого включалась установка с электронным пучком. Сведение пучков в пространстве и по скоростям, необходимое для оптимального демпфирования /2/, производилось по настройке на максимум выхода атомов водорода (нейтралов), образующихся при рекомбинации во взаимодействующих пучках (рис.1,а).

1. Время жизни протонов измерялось как функция энергии протонов при постоянной энергии электронов (рис.1,б) и как функция энергии электронов при фиксированной энергии протонов. (В обоих случаях под энергией протонов понимается их энергия в конце цикла ускорения). Обе зависимости имеют острый максимум вблизи равенства средних скоростей частиц и полушириной $\Delta E/E \approx \pm 8 \cdot 10^{-4}$. За время жизни принималось время уменьшения тока протонов в e раз.

Зависимость тока протонов J от времени (рис.2) имеет характерное плато (кривая 1), которое исчезает в режиме охлаждения (кривая 2), так что остается только экспоненциальный спад. При сильном разведении средних скоростей зависимость тока от времени вновь приобретает участок с плато, тогда как τ_p уменьшается.

Присутствие острого максимума на кривой $\tau_p(E)$ и исчезновение плато на кривой $J(t)$ можно объяснить подавлением многократного рассеяния протонов на остаточном газе, в результате чего исчезает диффузное расширение пучка. При этом время жизни определяется однократным рассеянием, что дает увеличение τ_p примерно в $en(183Z^{-1/3}) \sim 5$ раз /2/.

2. Подавление диффузного расширения подтверждается прямыми измерениями вертикального размера (рис.3). Измерения проводились с помощью сцинтилляционного счетчика, который пересекал протонный пучок со скоростью 0.3 см/сек /1/. Измерения показали, что без электронного пучка квадрат вертикального размера линейно растет со временем (прямая 4), а в присутствии электронного пучка квадрат вертикального размера в пределах разрешения остается постоянным (прямая 1). Пучок, принудительно расширенный с помощью внешней раскачки, уменьшает свои размеры до установившегося значения $\Delta z \approx 6$ мм (точки 2,3). Размеры протонного пучка контролировались сбросом пучка на пробник с люминофором. Визуальные наблюдения дали качественное согласие с этими измерениями: $\Delta z \approx 6$ мм.

3. Измерение радиального положения протонов апертурными пробниками показало, что положение охлажденного протонного пучка (при заданной энергии протонов в начале охлаждения) зависит от энергии электронов. На осциллограммах (рис.4) показана зависимость интенсивности рассеянных протонов от положения радиального пробника, пересекающего пучок. Наглядно видно радиальное смещение протонного пучка при различных энергиях электронов. Нижняя осциллограмма демонстрирует частичное увлечение протонов при быстром изменении энергии электронов. Полученная зависимость радиального положения протонного пучка от энергии электронов приведена на рис.5. Радиальное смещение при постоянном ведущем поле и выключенном ускоряющем напряжении соответствует изменению энергии протонов. Видно, что внутри электронного пучка радиальное смещение протонов линейно зависит от отстройки энергии электронов и согласуется с известным значением $\Psi \approx 0.8$ ($\Psi = d \ln r / d \ln p$). Этот результат стимулировал попытку произвести ускорение протонов электронным пучком. Для этого после включения режима охлаждения энергия электронов E_e и магнитное поле накопителя B медленно увеличивались согласованным образом (управление от ЭВМ), так что орбита протонов не сдвигалась. Как и следовало ожидать, приращение энергии, максимально достижимое в цикле такого ускорения, зависит от отношения $(\dot{E}_e / E_e) / (\dot{B} / B)$, причем в оптимуме время ускорения до

$\Delta E_p / E_p = 1,2\%$ составляло 200 сек, что дает $dE_p / dt \approx 4$ КэВ/сек. Если принять, что при таком ускорении пучки не могут разойтись больше, чем на полуразмер электронного пучка, то можно оценить характерное время уменьшения энергетического разброса протонов τ_E :

$$\frac{d \Delta E}{dt} \approx \frac{\Delta E_p}{\tau_E} \approx \frac{2 E_p}{\tau_E} \Psi^{-1} \frac{\Delta r}{r}$$

что дает $\tau_E \approx 20$ сек.

Заметим, что характер кривой выхода нейтралов (рис.1,а) также можно объяснить эффектом увлечения протонов электронным пучком в постоянном магнитном поле накопителя). Два минимума, сопровождающие острый пик, возникают вследствие подстройки средней скорости протонов к средней скорости электронов и выхода протонов из электронного пучка по радиусу. При большой отстройке скоростей эффект увлечения исчезает и протонный пучок остается внутри электронного. Коэффициент рекомбинации в оптимуме подстройки по скоростям равен $\alpha = 1,5 \cdot 10^{-13}$ см³/сек.

Время затухания бетатронных колебаний можно оценить из сравнения скорости диффузии (рис.3 прямая 4) с установившимся размером (прямая 1)

$$\tau_{\text{зет}} = \frac{2 a_0^2}{d a^2 / dt} \approx 17 \pm 4 \text{ сек}$$

Из декремента бетатронных колебаний, предполагая максвелловское распределение по скоростям электронов, можно оценить температуру T_{\perp} электронного пучка /2/. Она оказалась равной $T_{\perp} \approx 0.6$ эВ, что соответствует $\theta_e = (v_{\perp} / v_{\parallel}) = 4 \cdot 10^{-3}$.

Полученные результаты следует рассматривать как качественное доказательство возможности демпфирования колебаний методом электронного охлаждения.

Основной трудностью, встретившейся в этой серии экспериментов, было ухудшение вакуума при включении электронного пучка. Измерения по времени жизни показали, что давление в камере было пропорционально электронному току и при токе $J_e = 100$ мА составляло $P = 5 \cdot 10^{-8}$ торр. Одновременное включение электронного пучка и распределенных магниторазрядных насосов, встроенных в промежутке встречи /1/ приводило к гибели

протонов. Исследования показали, что при токе электронов, большем 10 мА, в промежутке встречи накапливается заряд, создающий электрическое поле с напряженностью $\mathcal{E} \approx 300$ В/см, так как участок охлаждения представляет собой ловушку с продольным магнитным полем и электростатическими пробками на концах. Накопление заряда связано, по-видимому, с потоком быстрых атомов, возникающих при работе магниторазрядного насоса; при выключении насосов накопления заряда не происходило.

В следующей серии экспериментов предполагается усовершенствовать методики измерения параметров протонного и электронного пучков /1/, улучшить вакуум и ввести отсос ионов в месте встречи. В дальнейшем предполагается провести исследование нелинейных режимов затухания (большие амплитуды колебаний, углы и ошибки по скоростям).

Л и т е р а т у р а

1. В.В.Анашин, Г.И.Будкер, Н.С.Диканский, В.И.Куделайнен, А.С.Медведко, И.Н.Мешков, В.В.Пархомчук, Д.В.Пестриков, В.Г.Пономаренко, Р.А.Салимов, А.Н.Скринский, Б.Н.Сухина. "Установка для экспериментов по электронному охлаждению", доклад на IV Всесоюзном сов.по уск.заряженных частиц (1974).
2. Г.И.Будкер, Я.С.Дербенев, Н.С.Диканский, В.В.Пархомчук, Д.В.Пестриков, А.Н.Скринский. "Кинетика электронного охлаждения", доклад на IV Всесоюзном сов.по уск. заряженных частиц, (1974).

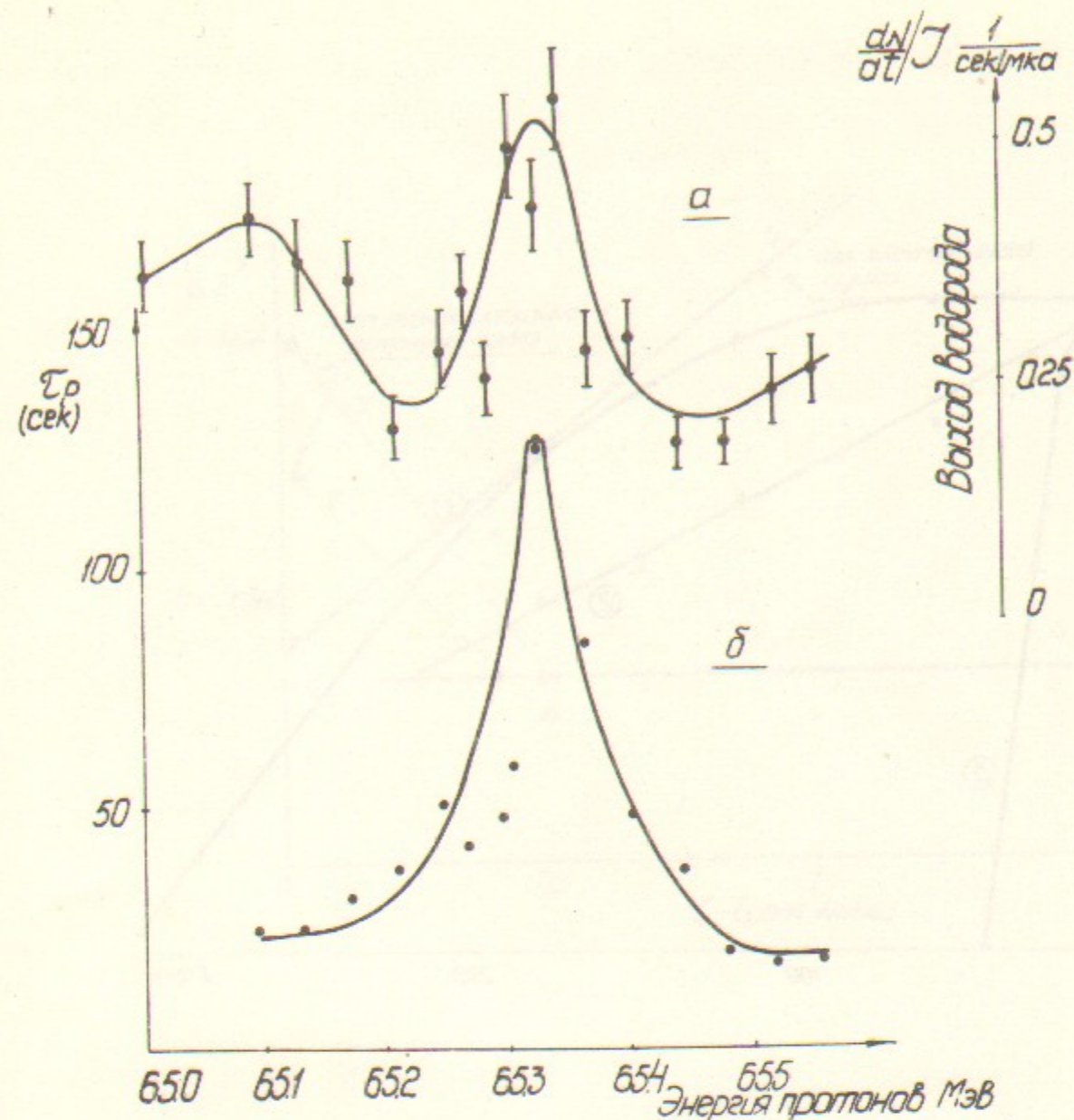


Рис.1. Зависимость от энергии протонов: а) выхода нейтральных атомов водорода и б) жизни протонного пучка при фиксированной энергии электронов и тока электронов 100 мА.

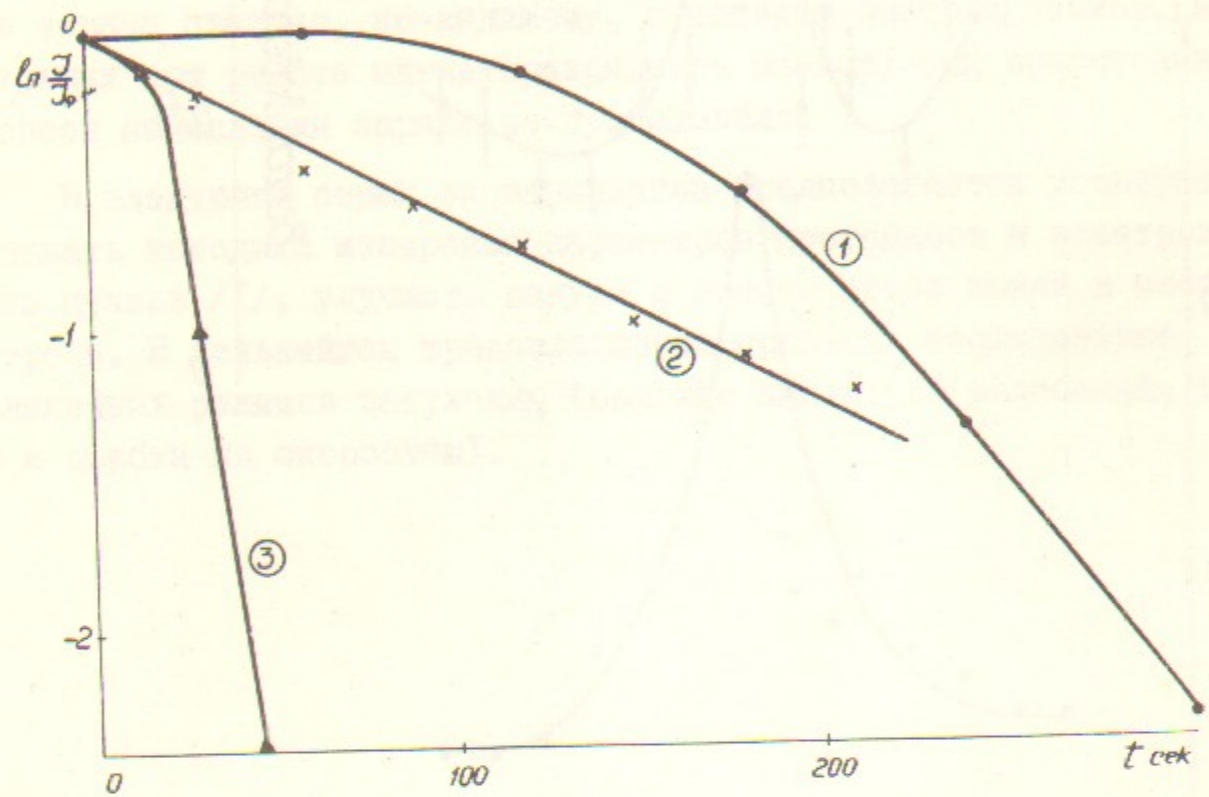


Рис.2. Зависимость тока протонов от времени $J_e = 0$; $J_e = 100$ мА; энергия электронов оптимальная $J_e = 100$ мА энергия электронов отстроена на $\Delta E/E \approx 5 \cdot 10^{-3}$.

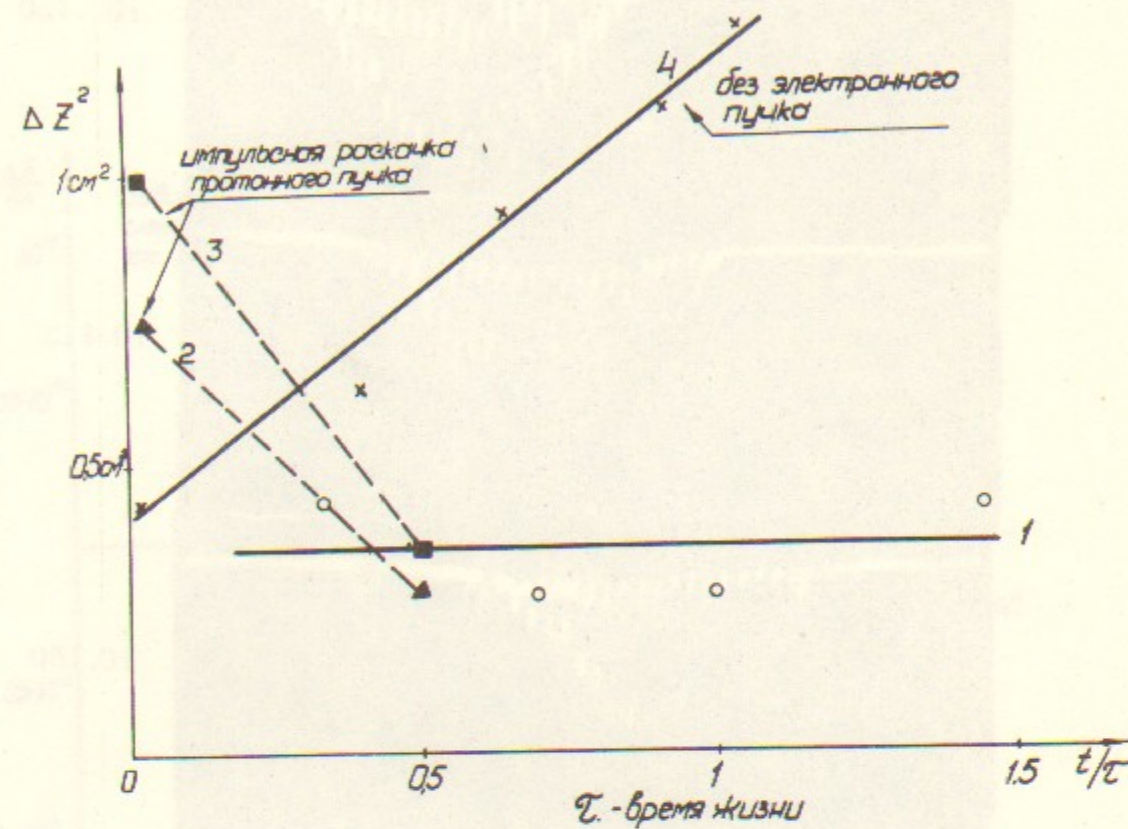
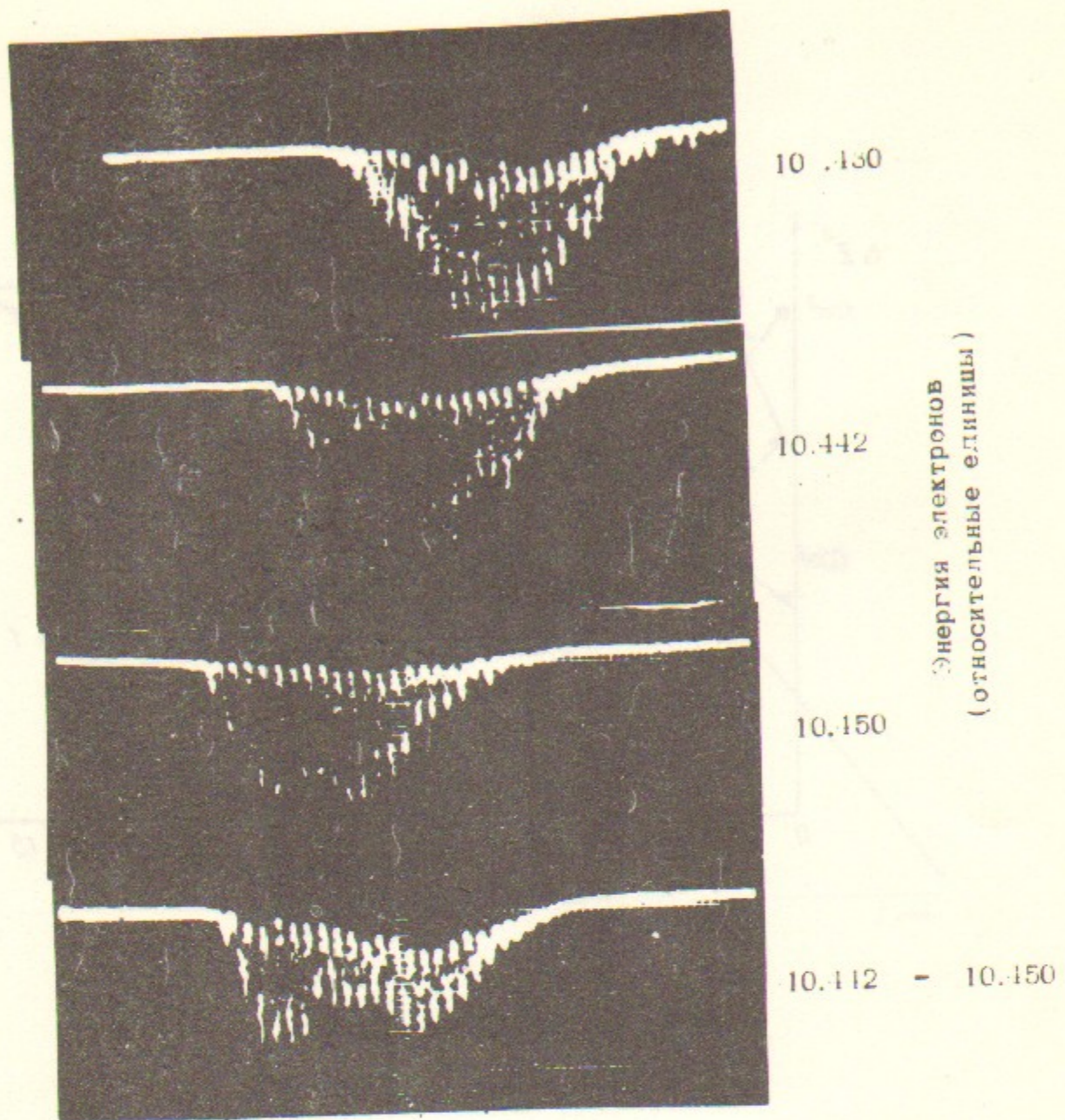


Рис.3. Зависимость от времени вертикального размера протонного пучка: 1) $J_e = 100$ мА; 2), 3) $J_e = 100$ мА; предварительно включена внешняя раскачка протонного пучка; 4) $J_e = 0$.



"Увлечение" протонного пучка электронным

Рис.4. "Увлечение" протонного пучка электронным: смещение протонного пучка в зависимости от энергии электронов (сигнал сцинтилляционного счетчика).

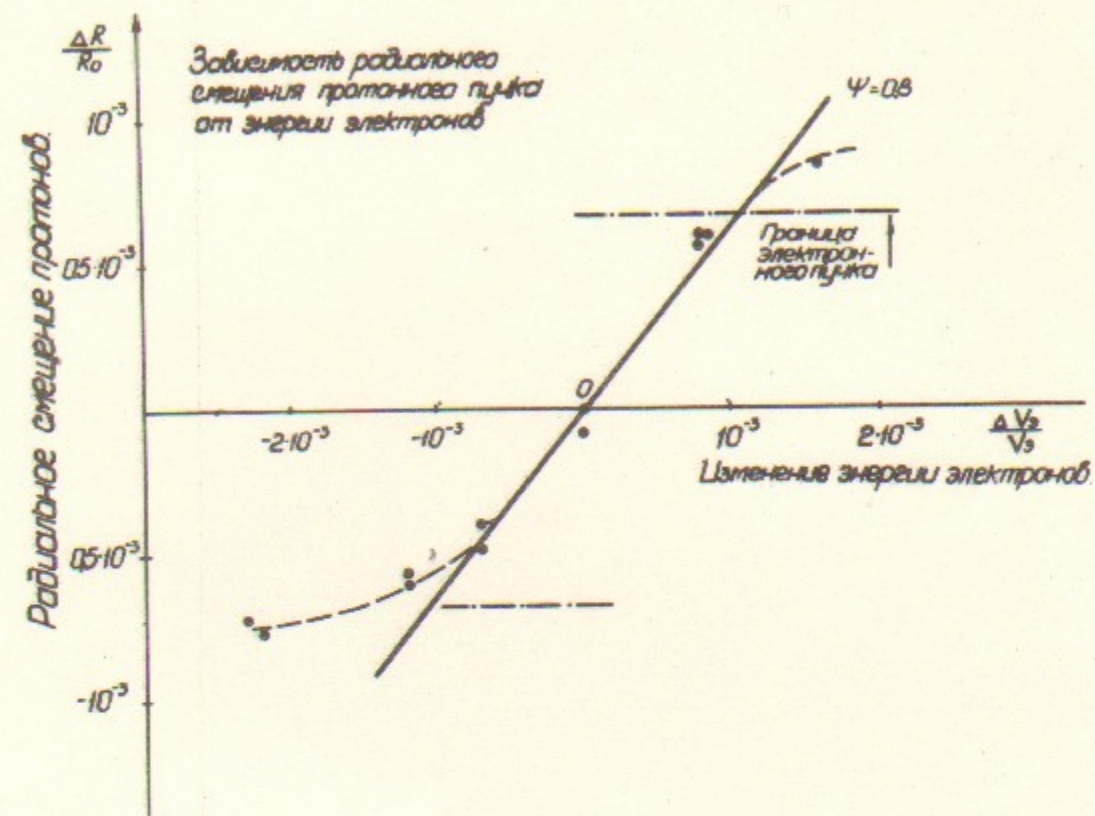


Рис.5. Зависимость радиального смещения протонного пучка от энергии электронов.

Ответственный за выпуск Г.А.СПИРИДОНОВ
Подписано к печати 28.X-1974г. МН 08542
Усл. 0,4печ.л., тираж 300 экз. Бесплатно
Заказ № 87

Отпечатано на ротапринтере в ИЯФ СО АН СССР, вт