

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

И Я Ф 38 - 70

В.В.Кузнецов, А.М.Оришич

ИССЛЕДОВАНИЕ ТРАНСПОРТИРОВКИ В ГАЗЕ
МОЩНОГО ЭЛЕКТРОННОГО ПУЧКА
ИЗ УСКОРИТЕЛЯ РИУС - 5

Новосибирск

1970

В.В.Кузнецов, А.М.Оришич

ИССЛЕДОВАНИЕ ТРАНСПОРТИРОВКИ В ГАЗЕ МОЩНОГО ЭЛЕКТРОННОГО ПУЧКА ИЗ УСКОРИТЕЛЯ РИУС - 5

А Н Н О Т А Ц И Я

В работе экспериментально исследуется транспортировка в газе релятивистского электронного пучка, выпущенного из ускорителя РИУС-5 в кварцевую трубку при изменении давления от 10^{-8} тор до атмосферного. Обнаружено аномальное поглощение энергии электронного пучка при давлении газа 0,5-1 тор. Предлагается две модели для объяснения этого поглощения. Во-первых, омическая диссипация энергии обратным током, во-вторых, - раскачка плазменно-пучковой неустойчивости.

Исследование транспортировки мощных электронных пучков в газе и плазме и возникающие при этом эффекты в последнее время приобрели особый интерес в связи с созданием импульсных сильноточных ускорителей на токи до сотни килоампер, энергию электронов в несколько Мэв при длительности импульса десятки наносекунд. Наиболее эффективно подобные работы ведутся в США в трех группах: в фирме *Jon Physics*

Corporation /1 - 5/, университете штата Северная Каролина /6, 7/ и Корнельском университете /8 - 19/. В работах /2, 3/ наблюдалось, что электронный пучок с током, большим чем $17000 \beta \gamma$ ампер /21/, действительно останавливается за счет магнитной самофокусировки, в работах /8, 14/ показано, что в некоторых условиях возможно существование пучка с значительно большим током. При этом средняя скорость распространения пучка вдоль оси падает. Магнитная самофокусировка пучка приводит к модуляции плотности пучка вдоль оси распространения, в работах /1, 15/ наблюдались перетяжки пучка при прохождении его через газ.

При распространении быстронарастающего тока пучка в заранее приготовленной плазме или газе за счет законов индукции возникает электродвижущая сила, вызывающая появление обратных токов /4, 6, 7, 11, 19/. Мощный релятивистский электронный пучок движется сквозь плазму более эффективно и без потерь, чем через газ низкого давления /18/. При движении электронного пучка через газ в области давлений, при котором концентрация электронов в пучке сравнивается с концентрацией ионов, образованной за счет ионизации плазмы, наблюдается провал на кривой, характеризующей переносимую пучком энергию /1/. При этом же давлении (около 0,1 - 0,3 тора) наблюдается очень сильное СВЧ излучение из плазмы, образованной пучком, причем максимум излучения приходится на давление 0,1 тор и уменьшается на 30 дБ при давлении 0,6 тор /12, 17/. Исследование концентрации плазмы, образованной электронным пучком в диапазоне давлений 0,15 - 0,3 тор проводилось в работе /5/. Было обнаружено, что электронная концентрация продолжает возрастать в течение 2 микросекунд после окончания импульса тока.

Перечисленные выше работы, посвященные исследованию эффектов, возникающих при транспортировке мощного электронного пучка в газе в узком диапазоне давлений, не дают более

или менее удовлетворительного объяснения экспериментальным фактам. По-видимому, имеющиеся результаты экспериментов могли бы быть объяснены аномальным поглощением энергии электронного пучка при транспортировке его в газе. Подобное предположение послужило основой для данной работы.

Результаты эксперимента

Эксперименты по исследованию транспортировки мощного пучка релятивистских электронов в газе проводились с пучком ускорителя РИУС-5 /20/, выведенного через титановую фольгу ($\delta = 50$ мкм) в кварцевую трубку длиной около полуметра и диаметром 6 см. Энергия пучка измерялась калориметром, расположенным \sim в 50 см от разделяющей фольги ускорителя. Калориметр (медный цилиндр весом 40 г) служил одновременно цилиндром Фарадея. Магнитная составляющая тока пучка измерялась поясом Роговского, который можно было перемещать вдоль трубки. На выходе ускорителя был расположен пояс Роговского, фиксировавший ток ускорителя. В наших экспериментах ток на выходе ускорителя поддерживался на одном уровне и был равен 3,5 кА, длительность тока по основанию ~ 100 нс (см. осциллограмму "а" рис.1).

В предварительных экспериментах по исследованию пучка, выпущенного из ускорителя РИУС-5, было обнаружено, что пучок состоит из быстрых электронов, достигающих по энергии 2,5-3 Мэв и довольно значительного количества электронов с энергией меньше одного Мэв. Максимальное количество быстрых электронов во время тока приходится на максимум тока пучка. Сигнал с пояса Роговского, расположенного на трубке, по форме соответствовал форме тока ускорителя, хотя по амплитуде был обычно в 3-5 раз меньше первого (см. осциллограмму "б" рис.1). Цилиндр Фарадея, в зависимости от условий эксперимента, фиксировал либо короткий импульс тока (длительность $\sim 10^{-8}$ сек), либо тот же импульс с последующим за ним длинным "хвостом" (см. осциллограммы "в" и "г" рис.1).

При изменении давления в трубке от 10^{-3} тор до атмосферного существенным образом меняется энергия, переносимая пучком электронов. Результаты калориметрических измерений энергии пучка при изменении давления газа (воздуха) приведены на рисунке 2 "а". Полученные результаты хорошо совпадают

с экспериментом, приведенным в работе /1/. Одновременно с этими измерениями фиксировался ток с цилиндра Фарадея и ток с пояса Роговского. Изменение амплитуды тока с цилиндра в зависимости от давления приведено на рисунке 2 "б". При давлении газа, меньшем чем 10^{-2} тор, импульс тока с цилиндра - короткий (рис.1 "в"). По мере возрастания давления ($p > 10^{-2}$ тор) вслед за коротким импульсом появляется длинный (приближающийся по длительности к длительности тока ускорителя) "хвост", который исчезает при давлении в трубке, превышающем 10-20 тор. Производя графическое интегрирование тока по времени определяем заряд пучка, который есть ни что иное, как полное количество электронов за импульс, которые попадают на цилиндр Фарадея (он же калориметр). Концентрация электронов пучка, полученная таким образом, в относительных единицах, приведена на рисунке 2 "в". Аналогичные измерения тока пучка проводились поясом Роговского (рис.2 "г"). При малых давлениях ($p < 1$ тор) величина тока с пояса незначительно меняется при перемещении его вдоль трубки, при давлениях больше одного тора поведение кривых для различных положений пояса относительно трубки - заметно различаются.

Для того, чтобы выяснить не являются ли образованные первичным пучком вторичные электроны и ионы ответственными за характер кривой, полученной при калориметрических измерениях (рис.2а), перед калориметром устанавливалась алюминиевая фольга толщиной 50 мкм. Постановка фольги практически никоим образом не изменяет приведенных выше результатов. В других опытах, внутри кварцевой трубки помещалась вдоль по стенке алюминиевая фольга той же толщины. Это приводило к некоторому увеличению тока на цилиндре Фарадея (характер кривой в зависимости от давления оставался тот-же, что и на рис.2 "б"). Заметно возрастала энергия пучка при калориметрических измерениях, пропадал провал на кривой зависимости энергии пучка от давления. Результаты этих экспериментов приведены на рисунке 2 "д"; ход кривой (рис.2 "д") практически не менялся и не зависел от того, была-ли электрически связана внутренняя фольга с цилиндром Фарадея или нет.

Обсуждение результатов

Электроны пучка, выпущенные из ускорителя РИУС-5, об -

падают, как уже говорилось выше, широким спектром энергий (по оценкам: от 250 кэв до 3 Мэв в режиме, на котором проводился эксперимент). Средняя энергия электронов пучка, переносимого на калориметр, при изменении давления меняется. На рисунке 3 "а" представлена кривая, характеризующая это изменение, полученная делением величины энергии пучка, измеренной калориметром, на заряд пучка ($\int i dt$). Как видно из рисунка, по мере увеличения давления газа в трубке, средняя энергия электронов в пучке падает, хотя величина тока растёт. Очевидно, это связано с тем, что магнитная и ионная самофокусировка пучка существенным образом зависят от энергии электронов в пучке. По мере возрастания давления газа и, соответственно, увеличения концентрации ионов область ионной фокусировки электронного пучка, которая, согласно [21]:

$$\frac{1}{f_2} < k < 1 \quad (k = n_e/n_i)$$

n_e - концентрация электронов в пучке, n_i - концентрация ионов образованной пучком плазмы) сдвигается в сторону меньших энергий электронов пучка. В нашем случае, при давлении

$\sim 3 \cdot 10^{-2}$ тор транспортируется максимальное количество самых низкоэнергичных электронов пучка. Как следует из рисунка 3 "а", средняя энергия электронов при этом давлении - минимальна.

При изменении энергии электронов от 250 кэв до 3 Мэв, γ (релятивистский фактор) изменяется от 1,5 до 7, область устойчивости пучка при $E = 250$ кэв: $0,4 < k < 1$, при $E = 3$ Мэв:

$$0,02 < k < 1 \quad . \quad k = 1 \text{ в том случае, когда } \sigma N_0 \tau c = 1$$

/1/ (σ - сечение ионизации быстрыми электронами,

$\sigma \approx 10^{-18}$ см²; N_0 - плотность газа; τ - время ионизации, $\tau \sim 10^{-8}$ сек; c - скорость света). Концентрации электронов в пучке и ионов в плазме сравниваются обычно при давлении порядка $\sim 0,1$ тор.

По мере увеличения давления в трубке электроны пучка начинают упруго рассеиваться на газе и не попадают на приёмник. Убытие тока пучка (т.е. количества электронов) пропорционально квадрату угла рассеяния (ϑ), который зависит от геометрии опыта, сорта газа и энергии электронов [22]:

$$\vartheta^2 \approx \left(\frac{Z}{E}\right)^2 \frac{q \chi}{A}$$

E - энергия электронов в Мэв, Z и A - заряд и атомный номер, q - удельный вес, χ - толщина газовой мишени. В условиях нашего эксперимента рассеяние пучка на газе приводит к уменьшению тока пучка в 2 раза при энергии электронов ~ 3 Мэв и давлении в трубке ~ 10 тор. При энергии электронов ~ 250 кэв рассеяние на газе сказывается уже при давлении $\sim 0,05 - 0,1$ тор. По мере увеличения давления газа, т.к.

$\vartheta^2 \sim \frac{v p^2}{E^2}$, из транспортировки выбывают электроны все большей и большей энергии и, таким образом, средняя энергия электронов в пучке возрастает как $\sim \sqrt{p}$. В данном рассуждении мы пренебрегаем ионизационными потерями, считая их равными для всех энергий электронов.

Предположим, что средняя энергия электронов будет возрастать монотонно с ростом давления в интервале от $3 \cdot 10^{-2}$ тор до 20 тор (как показано на кривой 2 рис. 3 "а" - пунктиром). В этом случае, произведение средней энергии на количество электронов (рис. 2 "в") даст кривую, характеризующую энергию пучка, которую бы чувствовал калориметр (пунктирная часть кривой 1 рис. 3 "а"). Сравнивая построенную таким образом зависимость энергии пучка от давления с измеренной (приведенной на рисунке 2 "д") убеждаемся, что они более или менее идентичны. Таким образом, мы считаем, что электронный пучок проходя сквозь газ в кварцевой трубке без металлического экрана теряет часть своей энергии. Потерянную пучком энергию можно представить как разность между пунктирной частью и сплошной частью кривой 1 рис. 3 "а". Определенная таким образом потерянная пучком энергия представлена на рис. 3 "б". Особым образом следует подчеркнуть, что если пучок действительно теряет часть своей энергии проходя сквозь газ, то тот же пучок, проходя сквозь металлическую трубку (экран из фольги в наших экспериментах) энергии не теряет.

Из рисунков 2 "в", 2 "д" и 3 "а" следует, что максимумы тока и энергии по давлению не соответствуют друг другу. Представим себе, что электронный пучок состоит из "быстрых" и "медленных" электронов. (Подобное распределение электронов

по энергиям было действительно обнаружено на ускорителе, по добном РИУС-5 /2/). Будем считать, что в области давлений

$\rho = 3 \cdot 10^{-2}$ тор быстрых электронов практически нет. Тогда, пользуясь законом сохранения заряда, можно представить каким образом при изменении давления происходит транспортировка "быстрых" и "медленных" электронов. Количество "медленных" электронов примерно в 3 раза больше чем "быстрых" (см. рис. 3 "г"), энергия быстрых электронов раз в 10 выше, чем медленных. Поэтому можно считать, что ток переносится довольно большим количеством "медленных" электронов, а энергия пучка транспортируется, в основном, за счет "быстрых" электронов.

В работах /6, 7/ показано теоретически и подтверждено экспериментально, что при инжекции релятивистского электронного пучка в плазму за счет закона индукции возникает противо-ЭДС, которая приводит к появлению обратного тока. Если концентрация плазмы достаточно велика по ней течет ток, обратный по направлению релятивистскому и равный ему по величине. При этом пояс Роговского, фиксирующий магнитную составляющую тока, должен показывать нулевой сигнал, что и было обнаружено в наших экспериментах (см. рис. 2 "д"). Сигнал с пояса Роговского можно рассматривать как сумму токов: прямого - релятивистского и обратного. Вычитая из него величину тока, измеренного цилиндром Фарадея, получаем обратный ток как функцию давления в трубке (см. рис. 3 "д"). Форма кривой обратного тока хорошо соответствует кривой, потерянной пучком энергии (для сравнения см. рис. 3 "б" и 3 "д"). Получаем важный вывод: обратный ток течет лишь в том случае, когда пучок теряет свою энергию.

На наш взгляд можно предложить две модели, в какой-то степени объясняющие потерю энергии электронами пучка.

Во первых, это предложенный в работе /23/ механизм омической диссипации энергии обратным током. В нашем случае концентрация плазмы, созданная пучком быстрых электронов, приблизительно равна концентрации электронов в пучке. Противо-ЭДС, которая может составить несколько десятков киловольт, будет ускорять медленные электроны плазмы, созданные фронтом быстрого электронного тока. Ионизация газа ускоренными электронами приведет к резкому увеличению концентрации электронов в плазме, что, в общем, эквивалентно обыкновенному пробою в газе. Носи-

телей становится достаточно для протекания обратного тока, равного по величине прямому. Энергия, потерянная релятивистским током может быть оценена как $\Delta W \approx J_1 \cdot U_1 \cdot \tau$. В пользу этой модели говорит тот факт, что, помещая пучок в металлический экран, обратный ток, если он возникает, закорачивается через проводящие стенки, а не через плазму и, таким образом, диссипации энергии не происходит.

Однако оценка возможной величины потери энергии, учитывая, что $J_1 = J_0$, $U_1 \sim 10^2 U_0$, показывает, что пучок может потерять при омической диссипации энергии обратным током на 2 - 3 порядка меньше энергии, чем это наблюдается в эксперименте.

Во-вторых, это модель потери пучком энергии за счет раскачки плазменно-пучковой неустойчивости. Взаимодействие электронов пучка с плазмой, образованной самим пучком, и потеря энергии электронами подробно описано в многочисленных работах /24, 25/. Если подобный механизм (имеется в виду раскачка неустойчивости на механизме Вавилова-Черенкова) действительно имеет место в нашем случае, то при значительном разбросе электронов по скоростям, как наблюдалось в эксперименте, следует пользоваться квазилинейной теорией /26/.

Инкремент раскачки неустойчивости для нерелятивистских скоростей электронов из квазилинейной теории, следует /26/:

$$\delta \sim \pi \frac{n_e}{n_0} \omega_0 \left(\frac{V_1}{\Delta V} \right)^2,$$

n_0 , ω_0 - концентрация и плазменная частота образованной пучком плазмы, V , ΔV - скорость электронов в пучке и разброс скоростей.

Заменяя в релятивистском случае $\frac{V}{\Delta V}$ через $\frac{E}{\Delta E}$

инкремент раскачки плазменно-пучковой неустойчивости:

$$\delta \sim \pi \frac{n_e}{n_0} \omega_0 \left(\frac{E}{\Delta E} \right)^2 \gamma$$

Отсюда следует, что в квазилинейной стадии раскачка пучковой неустойчивости при одинаковом $E/\Delta E$ происходит предпочтительней на более "быстрых" электронах пучка.

Воспользуемся для определения зависимости инкремента развития неустойчивости в нашем случае кривой 3 рисунка 3 "г", которая характеризует концентрацию быстрых электронов, и кривой 2 рисунка 3 "в" - характеризующей рассчитанную по ионизации концентрацию плазмы. В первом приближении будем считать, что $(E/\Delta E)^2 \gamma$ не изменяются в интересующем нас диапазоне давлений.

Тогда начальный инкремент раскачки неустойчивости изображен кривой 3 рисунка 3 "г". Считаем, что потерянная электронами энергия пропорциональна инкременту развития неустойчивости. В этом случае имеется хорошее качественное совпадение экспериментальных данных с предложенной моделью. Согласно этой модели процессы, происходящие при транспортировке пучка в газе, можно охарактеризовать следующим образом. Электронный пучок, проходя сквозь газ, ионизует его и образует плазму. В плазме возникают волны, фазовая скорость которых равна скорости электронов в пучке. В результате черенковского взаимодействия происходит эффективная передача энергии "быстрых" электронов пучка в плазму приводящая к нагреву электронов плазмы. Горячие электроны плазмы эффективно ионизуют газ, концентрация плазмы, таким образом, возрастает намного больше первоначальной. За счёт быстрого нарастания тока на плазме возникает противо-ЭДС, приводящая к появлению обратного тока. В этом случае концентрации носителей уже достаточно, чтобы обеспечить обратный ток, равный релятивистскому, при напряженности поля, возникающего на плазме.

Предложенные модели в некоторой степени объясняют полученные экспериментальные результаты. Очевидно, что обнаруженный в работе эффект поглощения энергии электронного пучка при транспортировке в газе требует дальнейшего изучения.

В заключение авторы приносят глубокую благодарность Е.А.Абрамяну и С.Б.Вассерману за любезно предоставленную возможность провести эту работу на ускорителе РИУС-5, а также Б.Г.Шкляеву и В.И.Майорову за существенную помощь в работе.

Л и т е р а т у р а

1. S.E.Graybill, S.V.Nablo. *Appl. Phys. Lett.* **8**, 18 (1966)
2. J.R.Uglum, W.H.McNeill, S.E.Graybill, S.V.Nablo. "Proceeding of IX International Conference in Ionization Phenomena in Gases. Доклад на IX Международной конференции по явлениям в ионизованных газах. Бухарест (1969).
3. S.E.Graybill, J.R.Uglum, S.V.Nablo. *Bull. Am. Phys. Soc.* **13**, 56 (1968)
4. W.H.McNeill, J.R.Uglum, S.E.Graybill. *Bull. Am. Phys. Soc.* **14**, 1012 (1969)
5. J.E.Rizzo. *Bull. Am. Phys. Soc.* **14**, 1013 (1969)
6. T.G.Roberts, W.H.Bennet. *Plasma Physics* **10**, 381 (1968)
7. J.B.Cox, W.H.Bennet. *Phys. Fluids* **13**, 182 (1970)
8. D.A.Hammer, N.Rostoker. *Bull. Am. Phys. Soc.* **13**, 1571 (1968)
9. J.J.Clark, D.A.Hammer, S.Linke, M.Vry. *Bull. Am. Phys. Soc.* **13**, 1571 (1968)
10. M.L.Andrews, J.J.Bzura, H.E.Davitian et al. *Bull. Am. Phys. Soc.* **13**, 1572 (1968)
11. L.S.Levine, I.M.Vitkovsky, M.L.Andrews, D.A.Hammer. *Bull. Am. Phys. Soc.* **13**, 1572 (1968)
12. J.A.Nation. *Bull. Am. Phys. Soc. (BASP)* **13**, 1572 (1968).

13. M. Andrews, H. Davitian, D. Hammer et al. "Propagation of high-current relativistic electron beams in gases and plasma."

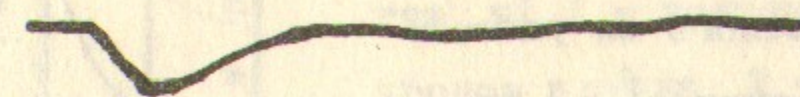
Доклад на 1У Международной конференции по явлениям в ионизованных газах, Бухарест (1969).

14. M. L. Andrews, H. Davitian, D. A. Hammer, H. H. Fleischmann, J. A. Nation. *Appl. Phys. Lett.* 16, 98 (1970)
15. H. H. Fleischmann, M. L. Andrews, J. A. Nation. *BAPS* 14, 1006 (1969)
16. M. L. Andrews, H. H. Fleischmann. *BAPS* 14, 1007 (1969)
17. J. A. Nation, W. Garden. *BAPS* 14, 1012 (1969)
18. R. Kouzes, L. S. Levine et al. *BAPS*? 14, 1002 (1969)
19. R. Lee, R. N. Sudan. *BAPS* 14, 1012 (1969)
20. Е.А.Абрамян, С.Б.Вассерман, В.М.Долгушин, Л.А.Моркин, О.П.Печерский, В.А.Шукерман. *ДАН СССР* т.192, № 1, 76 (1970).
21. Г.И.Будкер. *Атомная энергия* 5, 9 (1956).
22. В.В.Кузнецов. "О прохождении пучка электронов с энергией 0,3 - 5 Мэв сквозь инертные газы". Препринт 308, ИЯФ Новосибирск (1969).
23. А.А.Иванов, Л.И.Рудаков. *ЖЭТФ*, 58, 1332 (1970).
24. Я.Б.Файнберг. *Атомная энергия* 11, 313 (1961).
25. J. V. Fainberg. *Czechoslovak J. Phys.* 18, 658 (1969)
26. В.Н.Цытович. *Нелинейные эффекты в плазме*. Наука (1967).

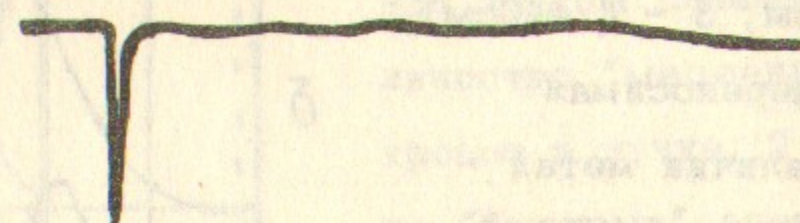
α



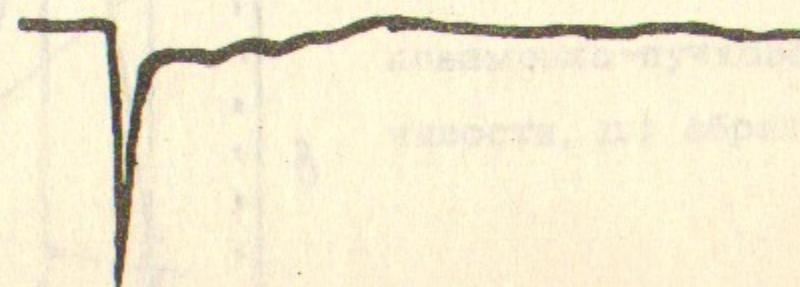
δ



β



ϵ



∂

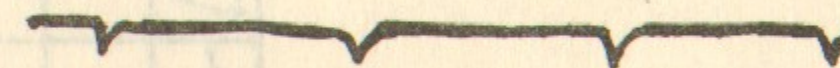


Рис.1. Осциллограммы: а) ток на выходе ускорителя, б) ток с пояса Роговского, в) ток с цилиндра Фарадея (10^{-2} тор $> p > 20$ тор), г) ток с цилиндра Фарадея ($10^{-2} < p < 20$ тор), д) метки 10 мггц.

Рис.2. а) Энергия, переносимая пучком, б) ток пучка, в) заряд переносимой пучком ($\int i dt$), г) ток с пояса Роговского на различном расстоянии l от ускорителя (1 - $l = 0$, 2 - $l = 20$ см, 3 - $l = 40$ см), д) энергия, переносимая пучком при наличии металлического экрана.

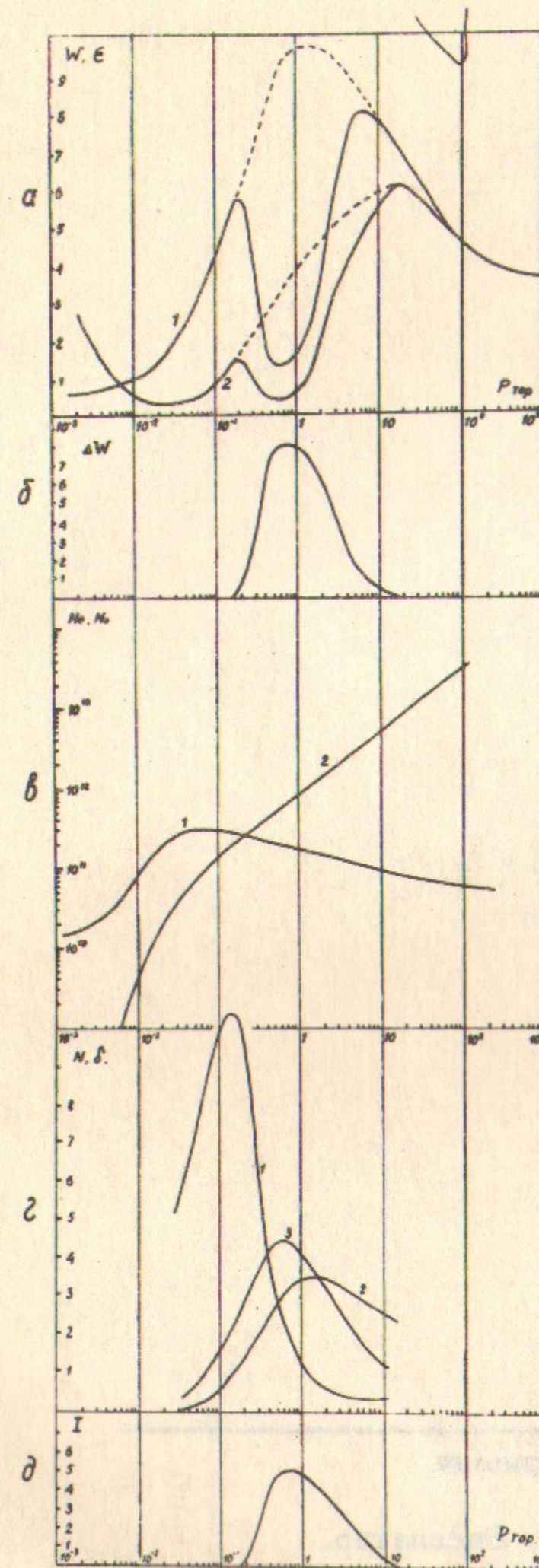
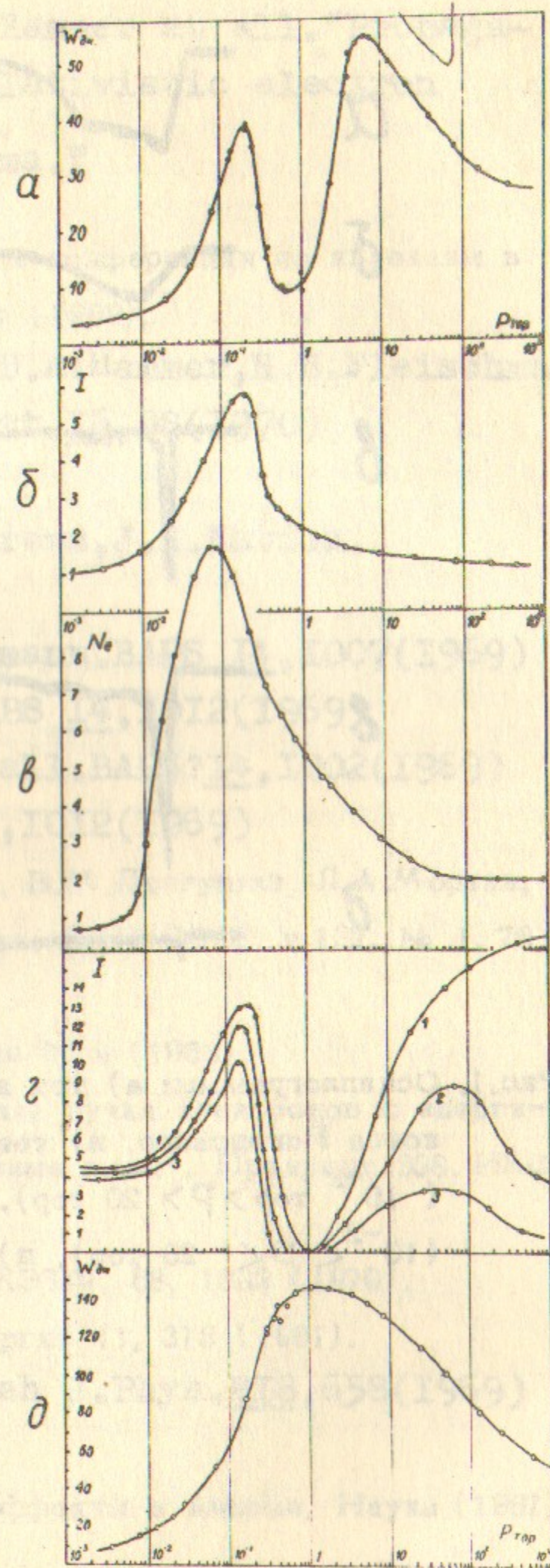
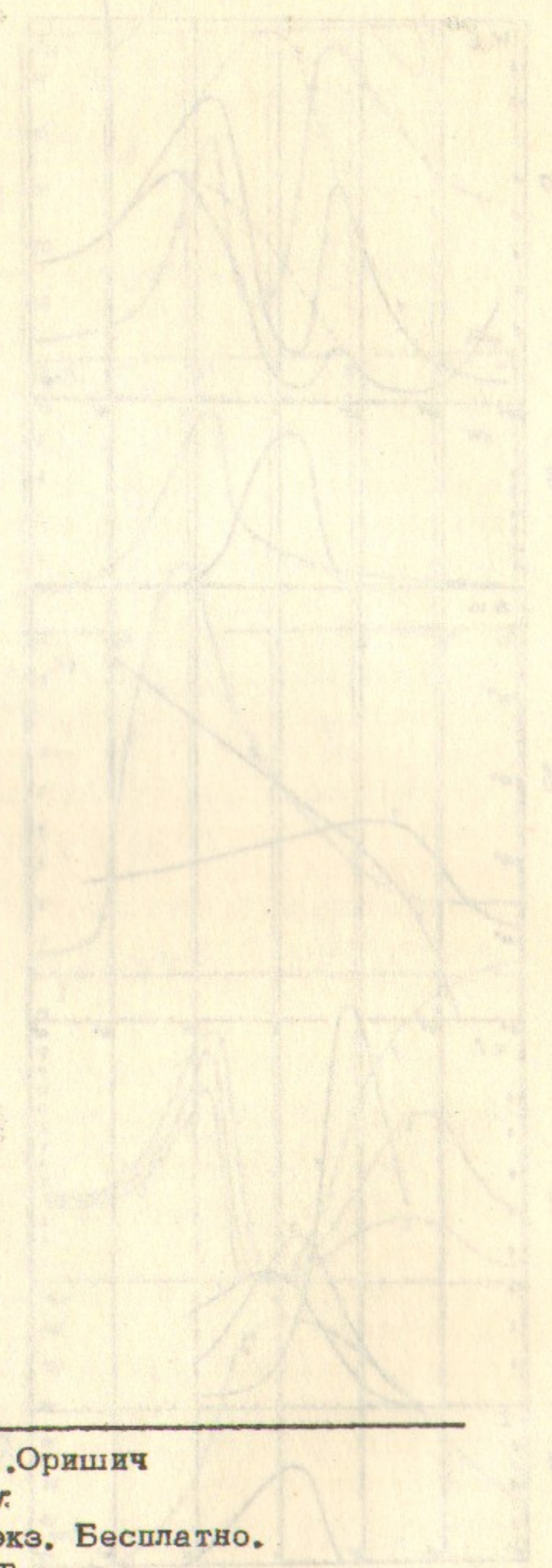


Рис.3. а) 1 - энергия, переносимая пучком, 2 - средняя энергия электронов пучка, б) потерянная пучком энергия, в) 1 - концентрация электронов в пучке, 2 - концентрация электронов в образованной пучком плазме, г) 1 - количество "медленных" электронов в пучке, 2 - количество "быстрых" электронов, 3 - инкремент нарастания плазменно-пучковой неустойчивости, д) обратный ток.

Рис. 1. Зависимость...
номинального...
влияние...
1) потенциал...
2) ...
3) ...
4) ...
5) ...
6) ...
7) ...
8) ...
9) ...
10) ...
11) ...
12) ...
13) ...
14) ...
15) ...
16) ...
17) ...
18) ...
19) ...
20) ...
21) ...
22) ...
23) ...
24) ...
25) ...
26) ...
27) ...
28) ...
29) ...
30) ...
31) ...
32) ...
33) ...
34) ...
35) ...
36) ...
37) ...
38) ...
39) ...
40) ...
41) ...
42) ...
43) ...
44) ...
45) ...
46) ...
47) ...
48) ...
49) ...
50) ...
51) ...
52) ...
53) ...
54) ...
55) ...
56) ...
57) ...
58) ...
59) ...
60) ...
61) ...
62) ...
63) ...
64) ...
65) ...
66) ...
67) ...
68) ...
69) ...
70) ...
71) ...
72) ...
73) ...
74) ...
75) ...
76) ...
77) ...
78) ...
79) ...
80) ...
81) ...
82) ...
83) ...
84) ...
85) ...
86) ...
87) ...
88) ...
89) ...
90) ...
91) ...
92) ...
93) ...
94) ...
95) ...
96) ...
97) ...
98) ...
99) ...
100) ...



Ответственный за выпуск А.М.Оришич
Подписано к печати 17.VI.70г.
Усл. 0,8 печ.л., тираж 150 экз. Бесплатно.
Заказ № 38 . ПРЕПРИНТ

Отпечатано на ротапинтере в ИЯФ СО АН СССР, нв.