

34

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

И Я Ф 109 - 70

С.Г.Константинов, О.К.Мыскин, А.Ф.Сорокин

Ф.А.Цельник

**РАЗРЕЖЕННАЯ ВРАЩАЮЩАЯСЯ ПЛАЗМА
В ЛОВУШКЕ С МАГНИТНЫМИ ПРОБКАМИ**

Новосибирск

1970

РАЗРЕЖЕННАЯ ВРАЩАЮЩАЯСЯ ПЛАЗМА В ЛОВУШКЕ
С МАГНИТНЫМИ ПРОБКАМИ

С.Г.Константинов, О.К.Мыскин, А.Ф.Сорокин,
Ф.А.Цельник

А Н Н О Т А Ц И Я

Исследовался разряд типа Пеннинга в ловушке с магнитными пробками. Показано, что при определенных условиях колебания в плазме могут подавляться. Время жизни плазмы в режиме устойчивого удержания составляет несколько миллисекунд и примерно равно времени перезарядки ионов на остаточном газе. Измерены энергетические спектры нейтральных атомов, образующихся при перезарядке, и радиальное распределение электрического потенциала в центральной плоскости ловушки.

Сильное радиальное электрическое поле существенно изменяет условия удержания плазмы в ловушке с магнитными пробками. Вращение плазмы в скрещенных полях приводит к уменьшению анизотропии функции распределения ионов в пространстве скоростей. Если электрическое поле E/H достаточно велико, следует ожидать подавления наиболее опасных для ловушки с магнитными пробками "анизотропных" неустойчивостей /1/. Кроме того, как отмечалось еще в /2/, в системе со скрещенными полями уменьшается поток тепла на торцы установки, обусловленный кулоновскими соударениями. Анализ кинетического уравнения показывает, что при

$$\alpha = v_g / v_{Ti} \approx 2 \quad (\text{здесь } v_g = cE/H \text{ - скорость}$$

вращения плазмы, а v_{Ti} - средняя тепловая скорость ионов) время удержания энергии в ловушке с вращающейся плазмой может быть сделано, по крайней мере, в $\frac{\sqrt{5}}{16} \alpha^2 \exp \alpha^2$ раз больше, чем в обычной пробочной геометрии.

С другой стороны, вращение плазмы может привести к появлению колебаний типа дрейфовых с выносом частиц поперек магнитного поля. Эти неустойчивости представляются менее опасными, чем анизотропные, т.к., во-первых, связанные с ними потери тепла уменьшаются с ростом магнитного поля, а, во-вторых, можно ожидать, что их вовсе не будет, если ловушка не слишком длинная, а ларморовский радиус ионов достаточно мал по сравнению с характерным размером изменения плотности и температуры плазмы.

Экспериментальные исследования пробочных ловушек с вращающейся плазмой /2, 3, 4, 5/ не позволяют сделать определенных заключений об её устойчивости. Результаты описываемых ниже опытов, хотя и относятся лишь к случаю сравнительно редкой ($\sim 10^9 - 10^{10}$ 1/см³) плазмы, в некоторых отношениях дополняют указанные работы.

1. Экспериментальная установка

Схема установки приведена на рис.1. Магнитное поле в центре ловушки достигает 7 кэ при пробочном отношении, равном 2.

Электрическое поле на торцах создаётся с помощью систем

коаксиальных колец с нарастающим к оси отрицательным потенциалом. Расстояние между соседними кольцами должно быть меньше ларморовского радиуса ионов, чтобы торцевые электроды создавали в плазме принудительное распределение потенциала (/6/). Кроме того, проводящие по азимуту электроды должны обеспечить подавление первой моды желобковой неустойчивости (/7/).

В наших опытах расстояние между кольцами по радиусу составляло 0,5 см (десять колец из нержавеющей стали с диаметрами от 2 до 11 см). Конфигурация колец такова, что частицы из плазмы не могут попадать на торцевые изоляторы. Максимальная напряженность электрического поля на торцах — около 5 кв/см при полном потенциале 20 кв. Разности потенциалов между соседними кольцами могли изменяться независимо.

Расстояние между торцевыми поверхностями (длина ловушки) — 60 см при диаметре камеры 18 см.

Установка откачивается до давления $3 \cdot 10^{-6}$ мм рт.ст. Импульсным клапаном в камеру подается газ (в опытах использовались водород и дейтерий). Плазма образуется в камере при подаче напряжения на торцевые электроды — разряд типа Пеннинга.

II. Методика измерений

1. Средняя по объёму плотность электронов n_e измерялась по сдвигу собственной частоты открытого резонатора на длине волны 3,2 см. В качестве резонатора использовался лайнер (см.рис.1), изготовленный из нержавеющей стали. Возбуждались колебания "неизлучающего" типа с вектором электрического поля, параллельным оси установки. Добротность резонатора около 1500. При помещении лайнера в металлическую камеру резонансная частота не смещалась и новых резонансов в окрестности выбранного не появлялось. Диапазон измеряемых значений n_e — $3 \cdot 10^6 - 10^{10}$ 1/см³. На нижнем пределе измерения производились по фазовой характеристике резонатора.

2. Радиальный профиль электрического потенциала в центральной плоскости определялся по зависимости времени пролёта через плазму ионов SFe^+ от их начальной скорости (/8/). Для вы-

деления сигнала на фоне шумов плазмы применялось синхронное накопление, что давало значения потенциала, усредненные по времени измерения (около 1 мсек).

3. Распределение ионов по поперечным скоростям определялось из анализа нейтральных атомов перезарядки. Для обдирки атомов использовалась импульсная газовая мишень. Принцип работы прибора изложен в /9/. В качестве рабочего газа мишени применялся гелий. При перемещении анализатора снимались зависимости величины потока и энергетического спектра атомов от радиуса.

4. Колебания плазмы и потоки частиц на боковую поверхность камеры регистрировались пробниками, установленными на лайнере. Пробники монтировались на одном уровне с внутренней поверхностью лайнера, т.к. любые азимутальные неоднородности существенно влияют на устойчивость плазмы.

5. Время жизни частиц в плазме не может быть в нашем случае измерено по изменению плотности во времени, т.к. при наличии внешнего электрического поля плазма непрерывно воссоздается за счёт ионизации остаточного газа. "Время жизни энергии" в плазме определялось по формуле

$$\tau_s = \frac{n \epsilon V}{P}$$

где: n — плотность частиц, измеренная по смещению резонансной частоты; V — объём плазмы (СВЧ методом измеряется по существу именно nV); ϵ — средняя энергия ионов (сумма тепловой и вращательной), определенная по нейтральным атомам перезарядки; P — мощность, поступающая в разряд от внешних источников.

III. Результаты измерений

В работе установки можно отчетливо различить два режима. Переходы между ними носят скачкообразный характер. Разряд на остаточном газе зажигается при напряжении торцов 3-5 кв. При дальнейшем увеличении напряжения плотность плазмы монотонно растёт. Когда n_e достигает некоторого критического значения ($\sim 5 \cdot 10^7$ 1/см³), наблюдается резкий переход в неустойчивое со-

стояние. Плотность падает до $(1 - 2) \cdot 10^7$ $1/\text{см}^3$. На пробниках видны интенсивные колебания желобкового типа (рис. 2а): фаза колебаний постоянна вдоль оси установки, а зависимость фазы от азимута соответствует угловому сдвигу пробников. При изменении напряженностей электрического и магнитного полей частота колебаний изменяется $\sim E/H$. Потенциал в центральной плоскости, измеренный во времени пролёта SF_6^- , равен нескольким десяткам вольт и все анодное падение сосредоточено в узком ($\sim 0,5$ см) пристеночном слое.

Колебания глубоко промодулированы по амплитуде, причём наблюдается определенное соответствие между изменениями амплитуды колебаний и плотности плазмы (рис. 3). С увеличением частота модуляции увеличивается, а с ростом H — уменьшается. При достаточно малых E/H модуляция пропадает совсем и колебания становятся стационарными.

Колебания срываются при напуске в камеру достаточного количества газа (рис. 4). Плотность плазмы резко возрастает. Амплитуда напряжения на пробниках уменьшается, причём остаточный сигнал имеет нерегулярный характер (рис. 2б). На рис. 2 сигналы, относящиеся к разным режимам, записаны (для сравнения) на одном кадре с одинаковыми масштабами.

Уменьшение временного масштаба колебаний указывает на соответствующее увеличение скорости вращения пристеночного слоя плазмы. При этом, разумеется, любые азимутальные флуктуации заряда с достаточно низкой частотой наводят (из-за вращения плазмы) на неподвижном пробнике сигнал с периодом, равным периоду вращения. Корреляция между сигналами с различных пробников исчезает.

Существенно, что этот режим разряда сохраняется и после откачки газа (рис. 5).

При достаточно высоком давлении остаточного газа колебания вообще не развиваются, и после зажигания разряда плазма остается устойчивой во всем диапазоне изменения напряжения на торцах. Существует определенная связь между количеством газа, необходимым для срыва колебаний и значениями E и H . График на рис. 6 даёт представление о границе области подавления колебаний в координатах (E, H) .

На осциллограмме рис. 4 в видно изменение тока торца (разрядного тока) при срыве колебаний (величина тока представлена огибающей высокочастотного сигнала на осциллограмме). Графики на рис. 7-10 относятся к режиму устойчивого удержания плазмы.

Из данных рис. 7 следует, что плазма (по крайней мере её высокотемпературная компонента) заполняет цилиндрический слой. В действительности внутренний радиус слоя несколько больше, чем показано на рис. 7, так как при фиксированном положении анализатора в него попадает часть нейтральных атомов, образовавшихся во внешних слоях плазмы.

Время жизни энергии в устойчивом режиме составляет 8 мсек при $P = 1,5 \cdot 10^{-5}$ мм рт.ст. (что по порядку величины совпадает со временем перезарядки) и уменьшается линейно с давлением. Величина τ_2 определяется довольно грубо, так как: 1. Не учитывается энергия электронов; 2. Предполагается, что функция распределения ионов по скоростям сферически симметрична во вращающейся системе координат; 3. Объём плазмы (вне резонатора) определен с точностью $\sim 20\%$; 4. Плотность ионов может отличаться от плотности электронов (но не более, чем на 10% при плотности плазмы $\sim 3 \cdot 10^9$ $1/\text{см}^3$).

1У. Обсуждение результатов измерений

Основной факт, следующий из проведенных измерений — существование режима устойчивого удержания вращающейся плазмы. В этом режиме наблюдаемая величина τ_2 согласуется с предположением о том, что плазма теряет энергию за счет перезарядки ионов на остаточном газе (по крайней мере нет колебаний, приводящих к распаду плазмы за времена, меньшие нескольких миллисекунд).

Стабилизация желобковых колебаний связана с эффектами, обусловленными наличием торцовых электродов. В контрольном опыте эти электроды снимались, и потенциал для зажигания разряда подавался на металлический стержень диаметром 1,5 см, расположенный на оси разрядной камеры. Наблюдались точно такие же колебания, как и описанные в разделе III, но стабилизации не было ни при каком давлении газа (вплоть до 10^{-4} мм рт.ст.).

На эффект стабилизации не влияет вид радиального распределения потенциала на торцах. Следовательно, механизмы стабилизации желобковой неустойчивости, рассмотренные в работах /6,10/ не имеют определяющего значения в нашем случае. С другой стороны, вывод о возможности подавления колебаний за счёт контакта с проводящими торцами (/7/) в принципе согласуется с наблюдаемыми явлениями.

Из измерений следует, что плазма стабилизируется, если её плотность превышает некоторое критическое значение. Сам по себе факт устойчивости не связан (см.рис.5) с большой плотностью газа. Роль последнего заключается, по-видимому, лишь в том, чтобы обеспечить достаточно высокую скорость нарастания плотности плазмы - превышающую скорость её распада из-за неустойчивости.

С этой точки зрения характер кривой на рис.6 определяется зависимостью скорости распада плазмы от E и H и зависимостью от E скорости процесса ионизации.

При некотором значении n_e контакт с торцами достаточен для подавления первой моды желобковой неустойчивости. Что же касается высших мод, то условие их стабилизации ($r_{\lambda_i}/r_g > 1$) примерно соответствует наблюдаемой величине критического значения $n_e \sim 10^9$ 1/см³.

При низком давлении газа эволюция колебаний также связана с конкуренцией процессов образования и разрушения плазмы (рис.3). Модуляция сигнала объясняется тем, что при быстром распаде плотность плазмы падает до уровня, при котором сами колебания уже не могут поддерживаться. n_e уменьшается до величины, меньшей порога возникновения неустойчивости, т.к. релаксация происходит из состояния с уже развивавшимися колебаниями. После их затухания плотность вновь нарастает до пороговой.

Таким образом, подавление колебаний связано, по-видимому, с комбинированным действием контакта с торцами и эффекта конечного ларморовского радиуса. Подчеркнем однако, что существенен не факт стабилизации желобковых колебаний, а отсутствие всяких колебаний (по крайней мере с измеренными τ_{Σ}) при наличии вращения. Конечно, при низкой точности измерения τ_{Σ} и малом времени

перезарядки можно говорить лишь об отсутствии "сильных" неустойчивостей.

Из кривых на рис.8, 9 и 10 видно, однако, что напряженность электрического поля в центральной плоскости намного меньше той, которая соответствовала бы эквипотенциальности силовых линий магнитного поля. Контакт с торцами (достаточный для срыва колебаний) все же мал для обеспечения низкого катодного падения потенциала в разряде. Роста скорости вращения можно, очевидно, добиться, увеличив поток электронов с торцовых электродов.

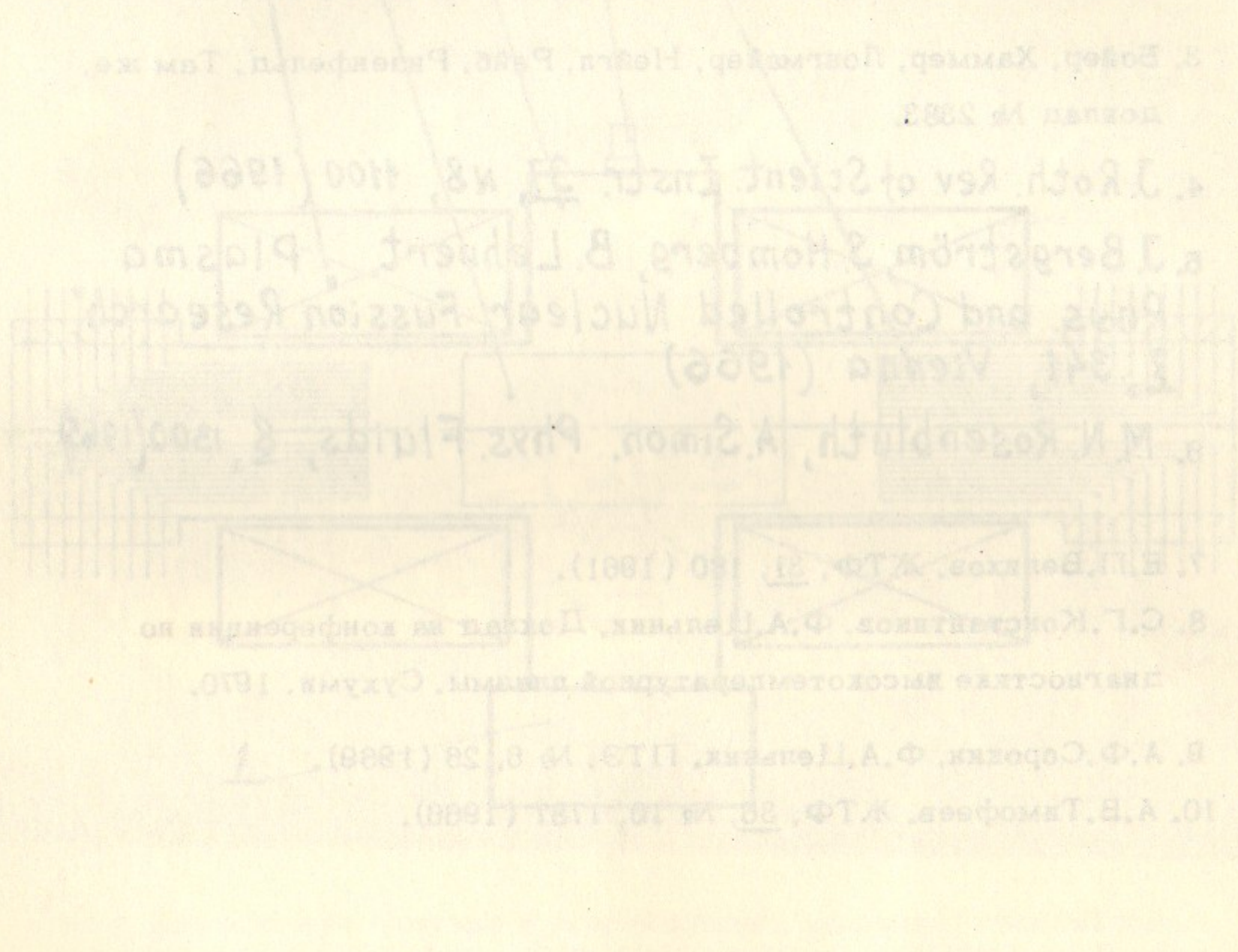


Рис.1. Схема установки. 1 - вакуумный насос, 2 - вакуумная камера - центральный разряд, 3 - лазер, 4 - вакуумная камера - разрядная камера, 5 - вакуумная камера - защитная камера, 6 - торцевой электрод.

Л и т е р а т у р а

1. В.И.Волосов, В.Е.Пальчиков, Ф.А.Цельник. ДАН, 131, № 3, 575 (1968).
2. Андерсон, Бейкер, Братенал, Фэрт, Айз, Качкел, Стоун. Труды II Международной конференции по мирному использованию атомной энергии. Женева, 1958. Доклад № 373.
3. Бойер, Хаммер, Лонгмайер, Нейгл, Райб, Ризенфельд. Там же, доклад № 2383.
4. J. Roth. Rev. of Scient. Instr. 37, № 8, 1100 (1966)
5. J. Bergström, S. Homberg, B. Lehnert. "Plasma Phys. and Controlled Nuclear Fusion Research", 1, 341, Vienna (1966)
6. M. N. Rosenbluth, A. Simon. Phys. Fluids, 8, 1300 (1965)
7. Е.П.Велихов. ЖТФ, 31, 180 (1961).
8. С.Г.Константинов, Ф.А.Цельник. Доклад на конференции по диагностике высокотемпературной плазмы. Сухуми, 1970.
9. А.Ф.Сорокин, Ф.А.Цельник. ПТЭ, № 6, 26 (1969).
10. А.В.Тимофеев. ЖТФ, 36, № 10, 1787 (1966).

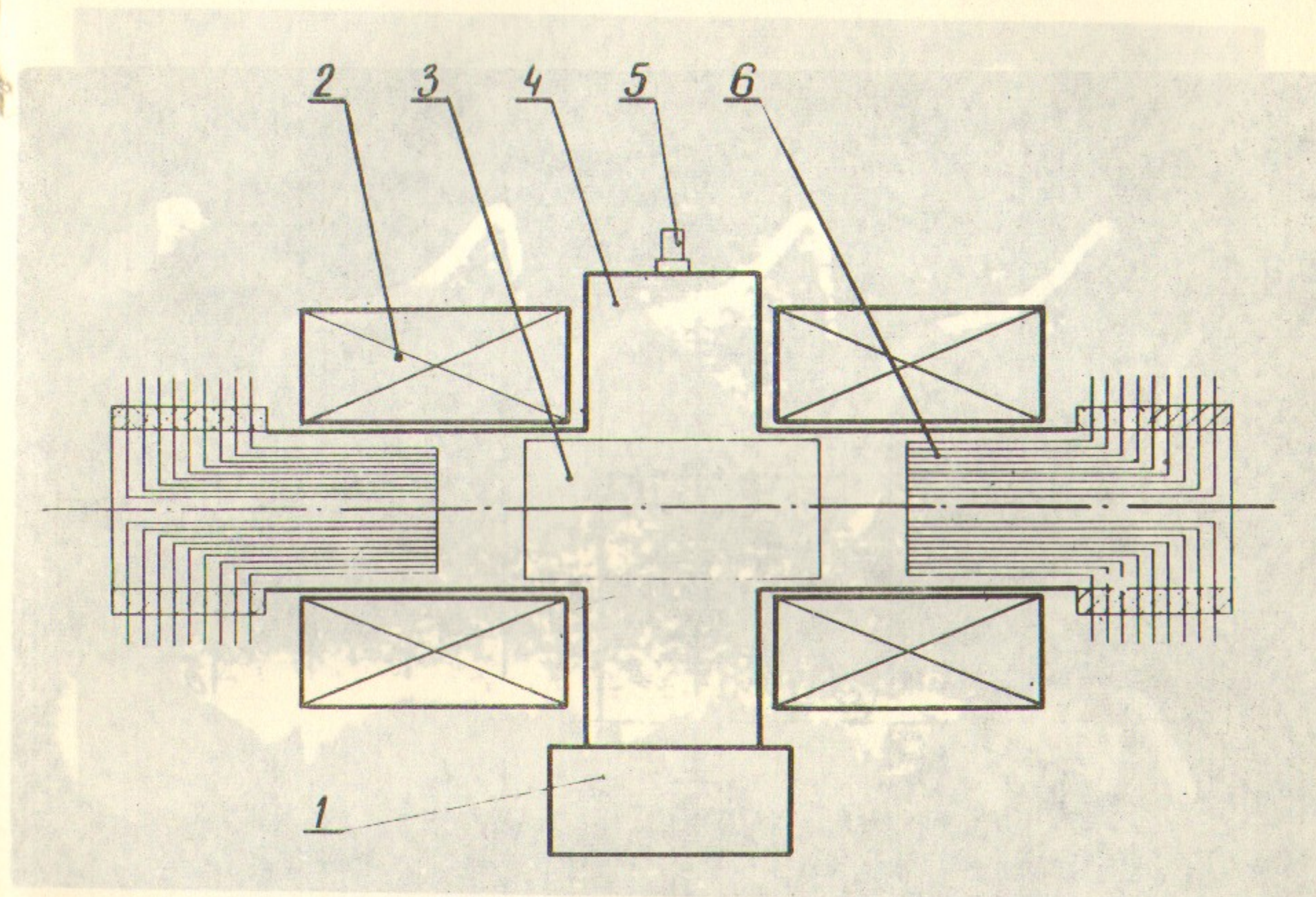


Рис.1. Схема установки. 1 - вакуумный насос, 2 - катушки магнитного поля, 3 - лайнер, 4 - вакуумная камера, 5 - импульсный плапан, 6 - торцевой электрод.

1. В.И. Волосов, В.Б. Пельцман, Ф.А. Шендеров, ДАН, 161, № 3, 375 (1968)

2. Андерсон, Бейкер, Братенда, Ферт, Аба, Калман, Стоун.

Труды II Международной конференции по ядерной физике

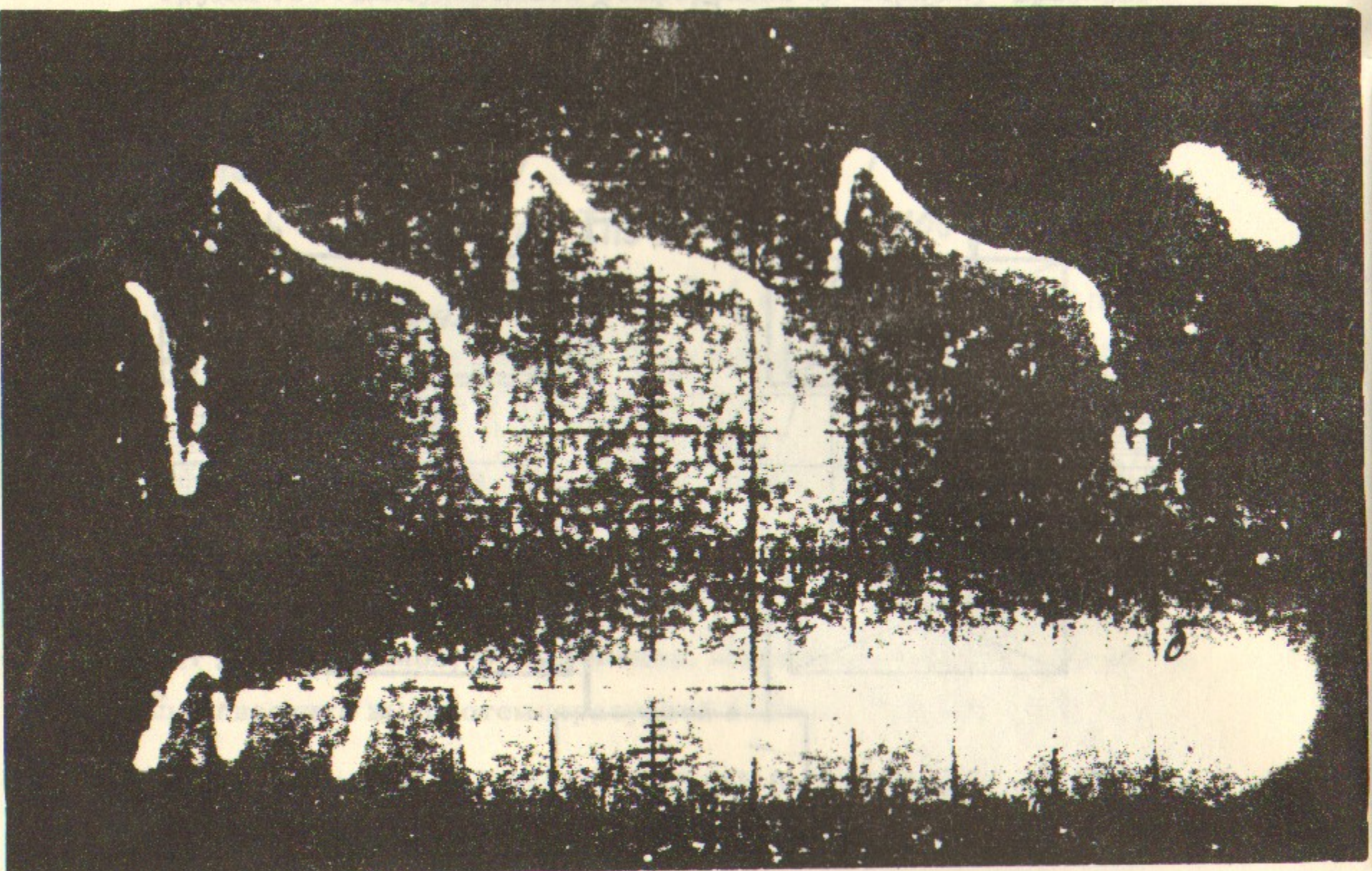


Рис. 2. Сигнал с пристеночного пробника. Скорость развертки - 2,5 мсек/см, а - неустойчивый режим; б - устойчивый режим.

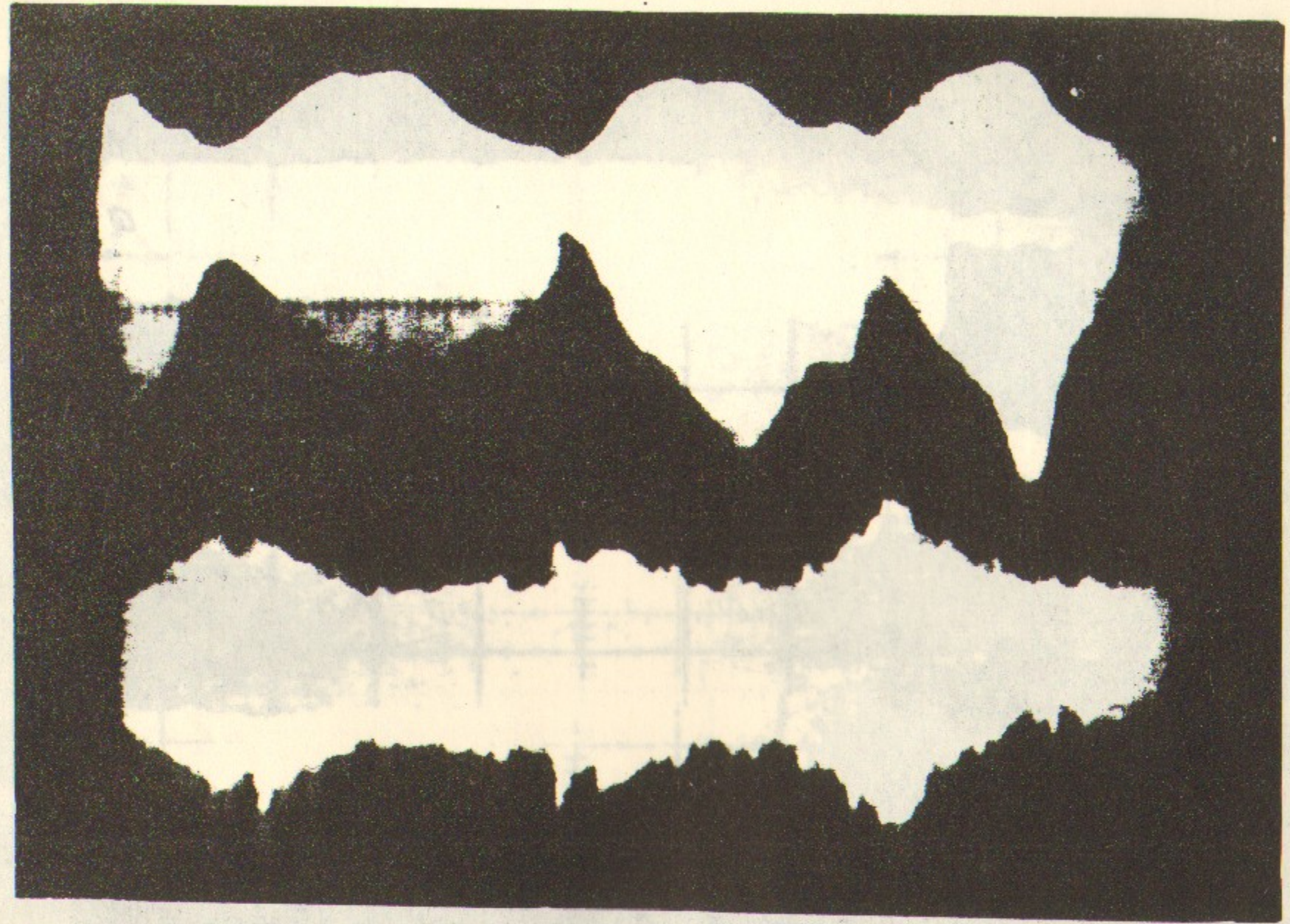


Рис. 3. Верхний луч - сигнал с пристеночного пробника. Нижний луч - плотность электронов (N_e пропорциональна огибающей сигнала на осциллограмме). Скорость развертки - 10 мсек/см.

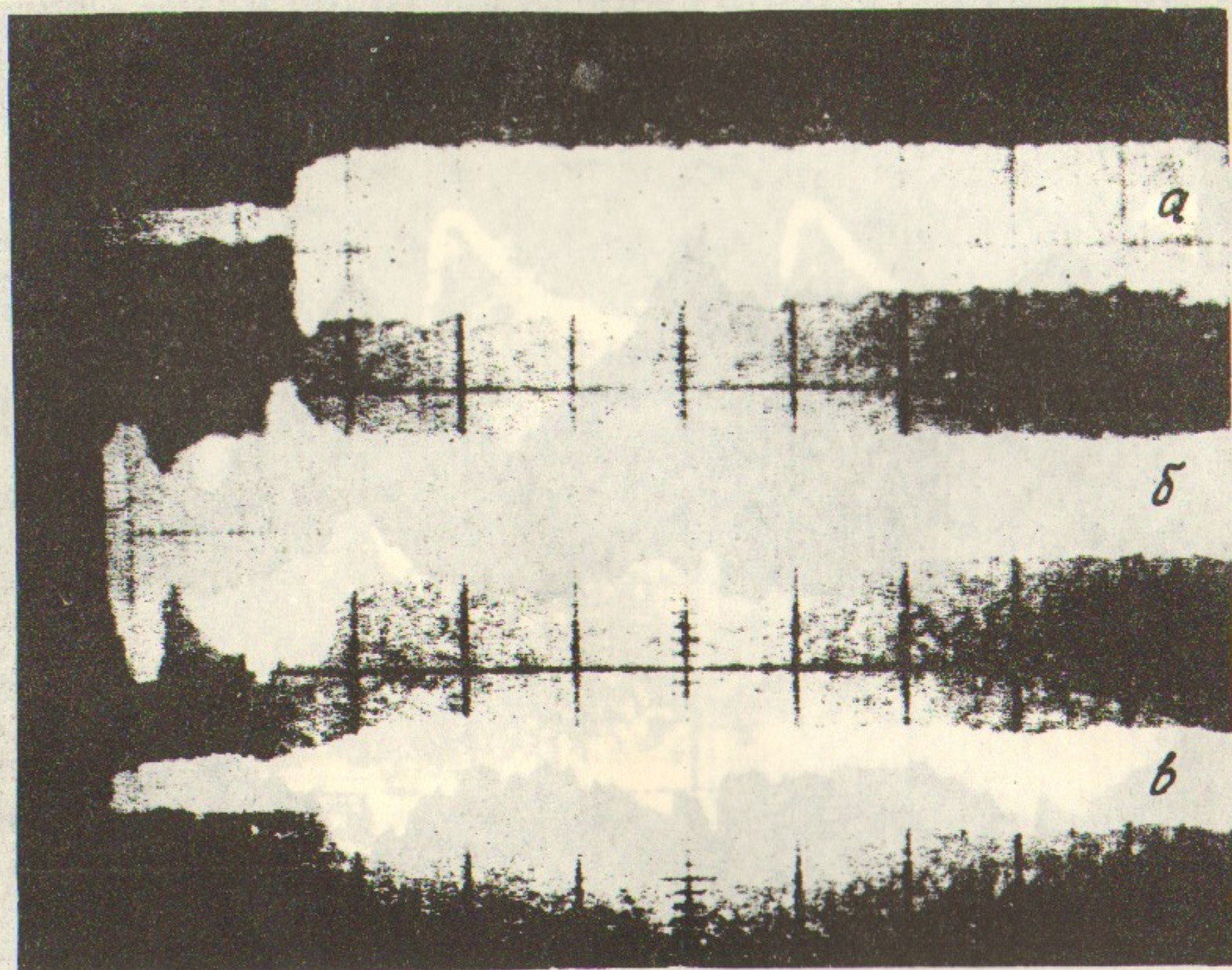


Рис. 4. а - плотность электронов; б - сигнал с пристеночного пробника; в - ток одного из торцевых колец. Скорость развертки - 10 мсек/см.

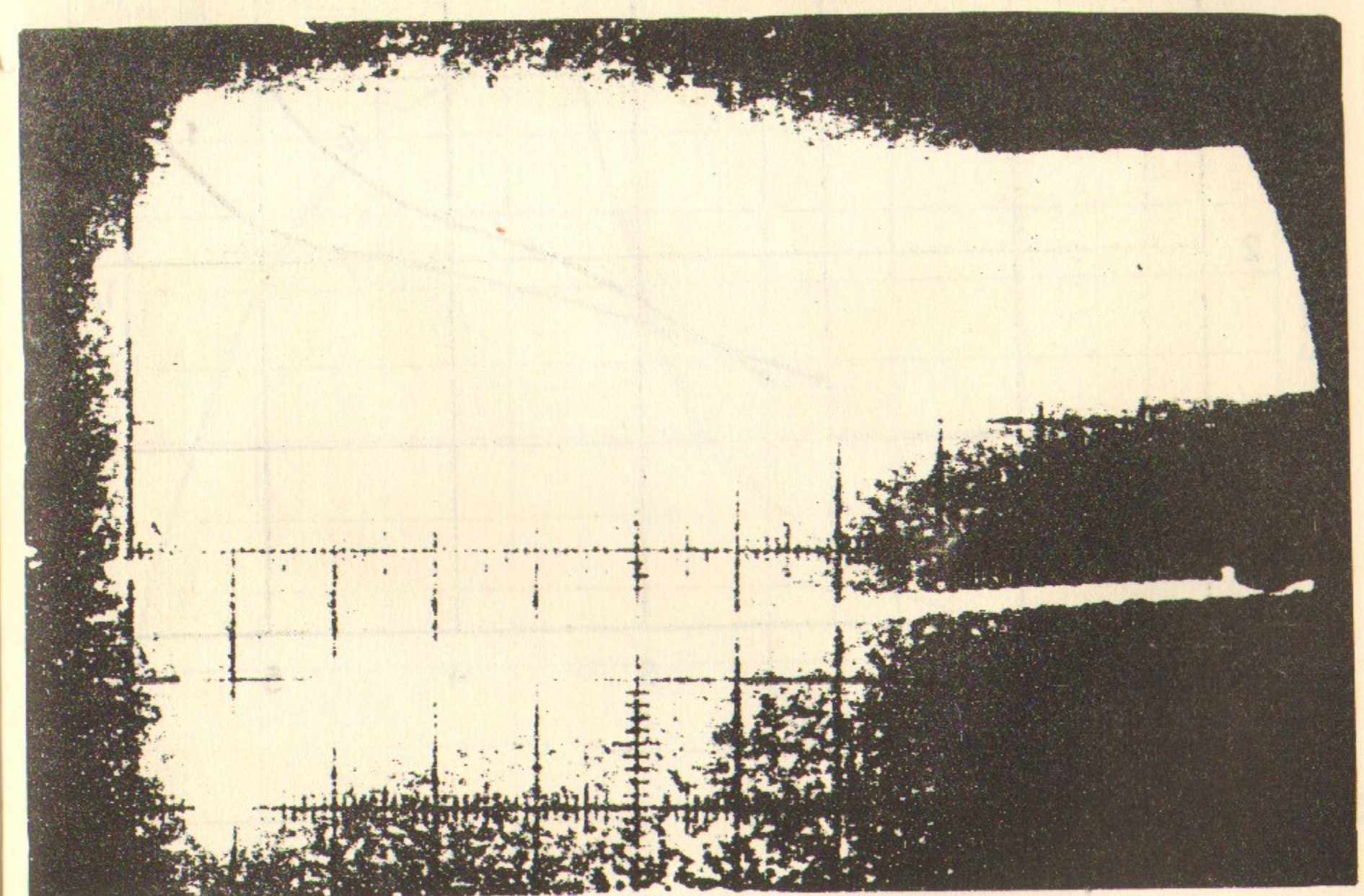


Рис. 5. Верхний луч - плотность электронов; нижний луч - давление газа (дейтерий). Скорость развертки - 100 мсек/см.

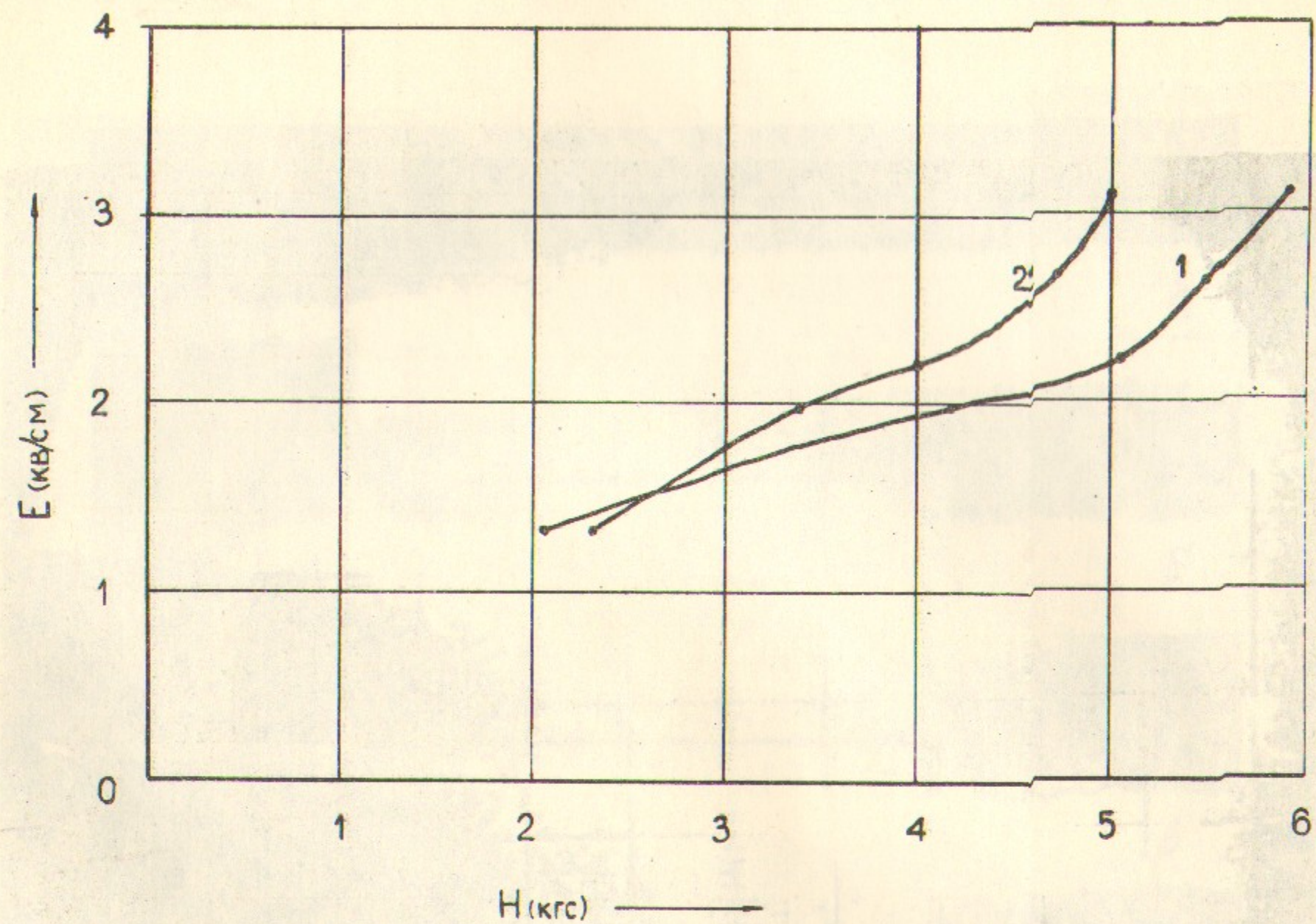


Рис.6. E - напряженность электрического поля у поверхности торцевого электрода. При значениях E и H , соответствующих области ниже кривой плазма устойчива. Давление газа (водород): 1 - $3 \cdot 10^{-6}$ мм рт.ст., 2 - $1,5 \cdot 10^{-5}$ мм рт.ст.

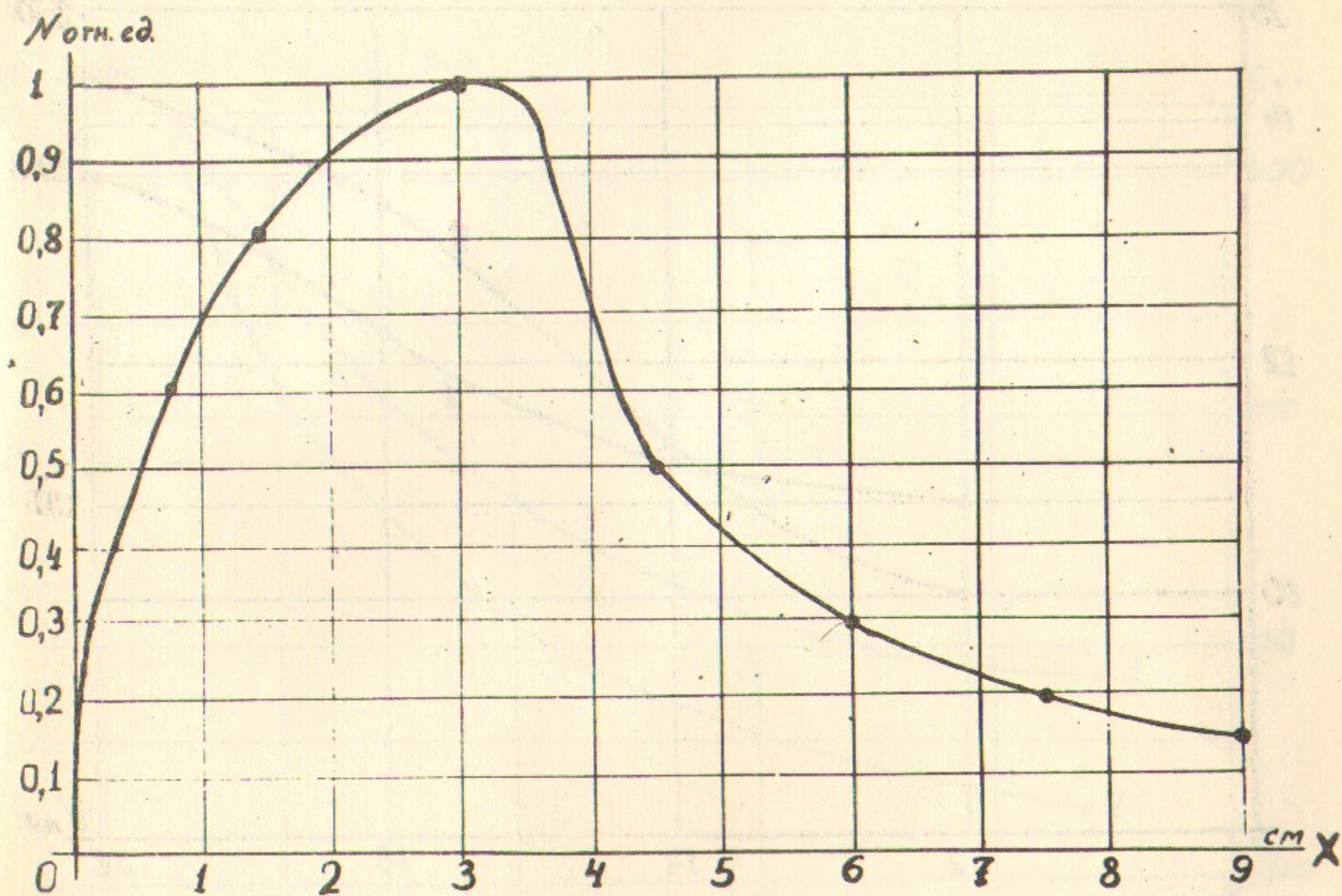


Рис.7. Зависимость потока нейтральных атомов от радиуса. Координата X отсчитывается от стенки камеры.

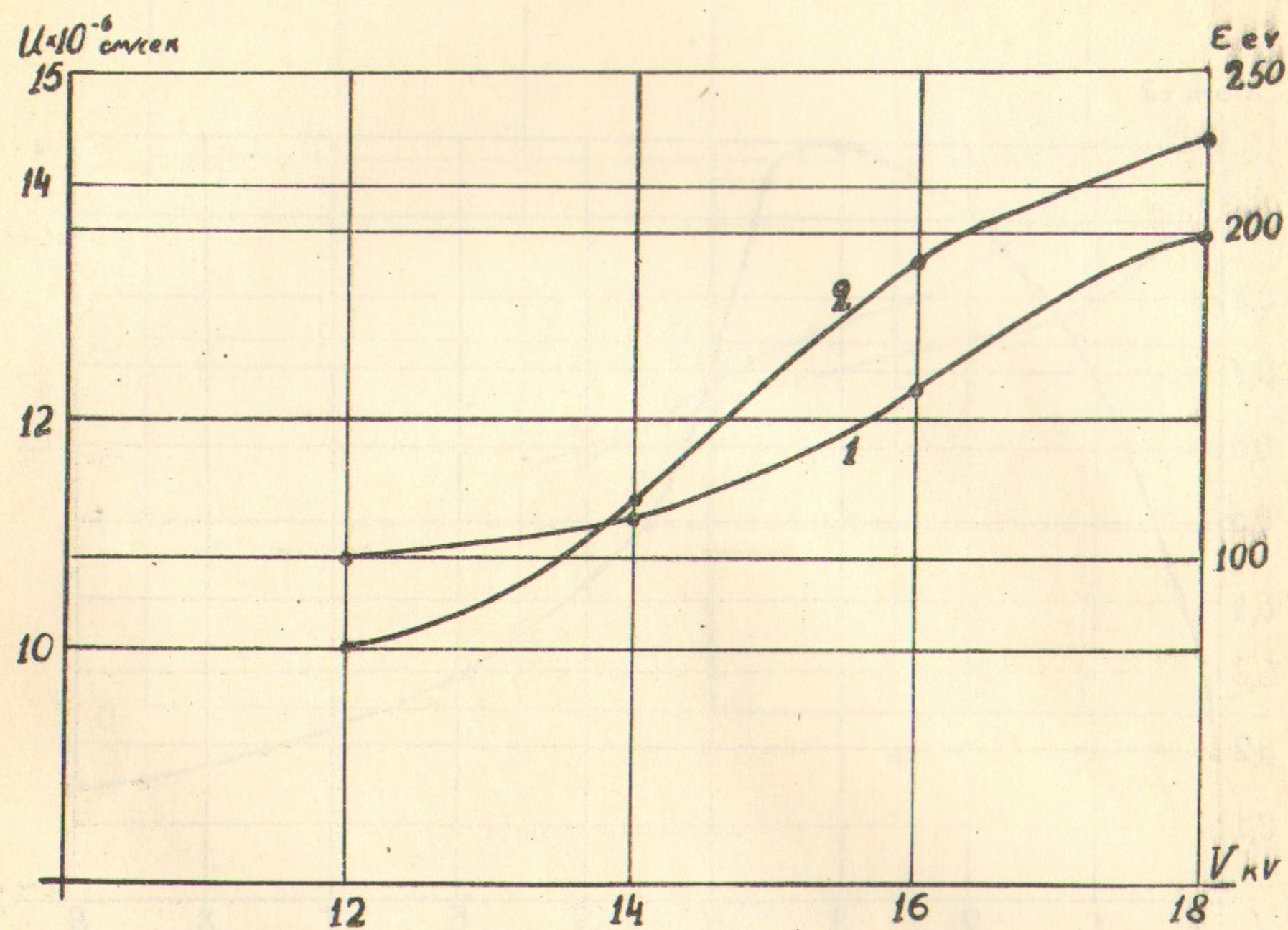


Рис.8. Зависимость средней энергии ионов (1) и скорости вращения плазмы (2) от напряжения на торце. $H = 5,4$ кэ; $R = 3,5 \cdot 10^{-5}$ мм рт.ст. (дейтерий).

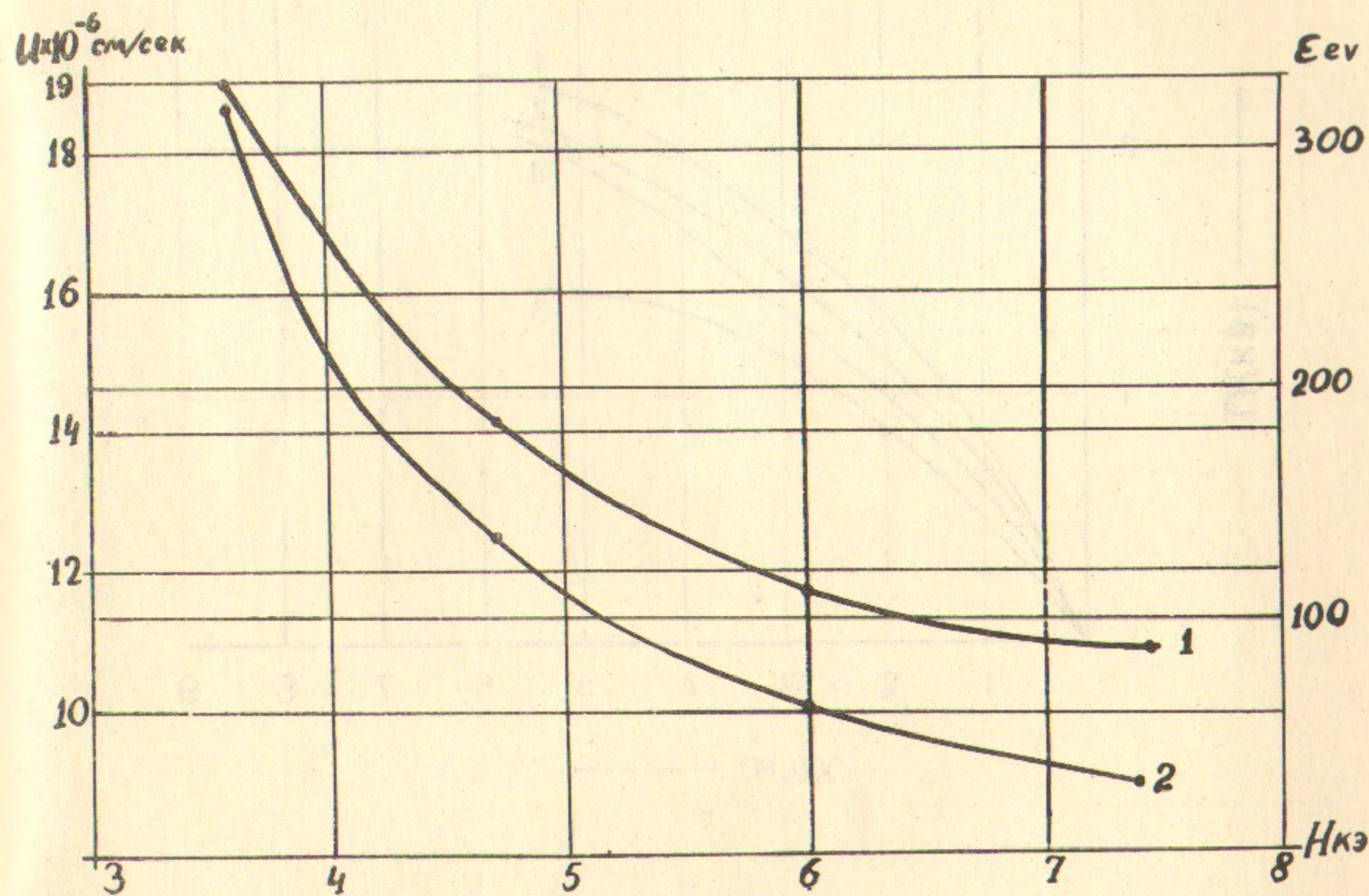


Рис.9. Зависимость средней энергии ионов (1) и скорости вращения плазмы (2) от магнитного поля. Напряжение на торце - 16 кВ; $R = 3,5$ мм рт.ст.

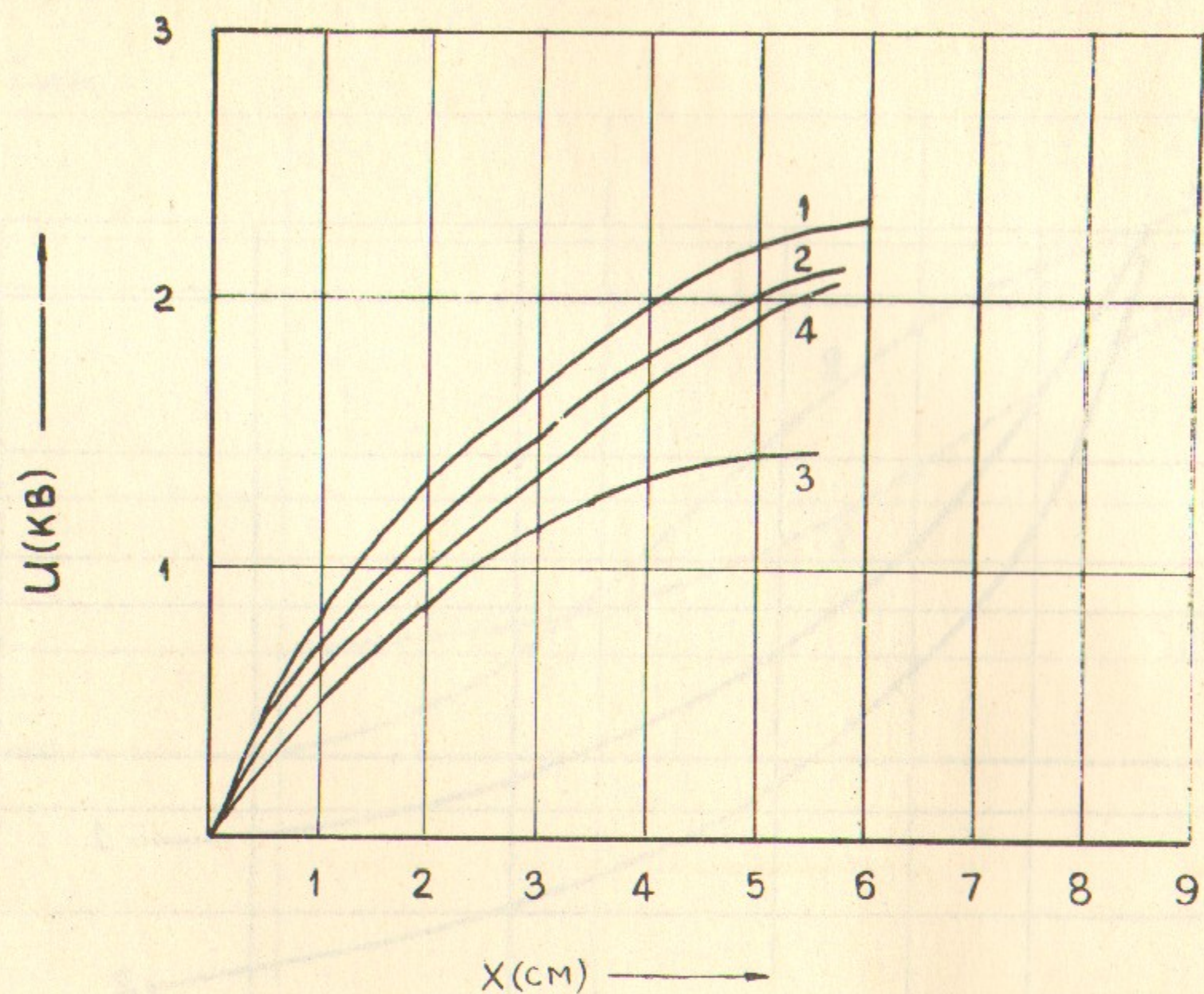


Рис.10. Распределение потенциала в центральной плоскости. Координата X отсчитывается от стенки камеры.
 $R - 2,5 \cdot 10^{-5}$ мм рт.ст. (дейтерий). 1 - $U = 14$ кВ; $N = 5$ кэ;
 2 - $U = 10$ кВ; $N = 5$ кэ; 3 - $U = 10$ кВ; $N = 4,2$ кэ;
 4 - $U = 10$ кВ; $N = 5,4$ кэ.

Ответственный за выпуск С.Г.Константинов
 Подписано к печати 10.12.70
 Усл. 1 печ.л., тираж 150 экз. Бесплатно.
 Заказ № 108 . ПРЕПРИНТ

Отпечатано на ротационте в ИЯФ СО АН СССР, мв.