

71-389

10/x-69

ОБЪЕДИНЕННЫЙ
ИНСТИТУТ
ЯДЕРНЫХ
ИССЛЕДОВАНИЙ

Дубна.

P9 - 4653



Ю.А.Плис, Л.М.Сороко

ИОНИЗАЦИЯ АТОМНЫХ ПУЧКОВ В РАЗРЯДЕ
ПЕННИНГА С ГОРЯЧИМ КАТОДОМ

Представлено на IX международную конференцию
по явлениям в ионизированных газах, Бухарест,
СРР, 1-7 сентября 1969 года.

ЛАБОРАТОРИЯ ЯДЕРНЫХ ПРОБЛЕМ

1969

P9 - 4653

Ю.А.Плис, Л.М.Сороко

**ИОНИЗАЦИЯ АТОМНЫХ ПУЧКОВ В РАЗРЯДЕ
ПЕННИНГА С ГОРЯЧИМ КАТОДОМ**

Представлено на IX международную конференцию
по явлениям в ионизированных газах, Бухарест,
СРР, 1-7 сентября 1969 года.

8065/2 чр.



Плис Ю.А., Сороко Л.М.

P9-4653

Ионизация атомных пучков в разряде Пеннинга с горячим катодом

Исследованы характеристики разряда Пеннинга с горячим катодом в режиме высокого вакуума и условиях ионизации атомного пучка. Приведены параметры установки, на которой производились измерения: геометрические размеры, напряженность магнитного поля, анодное напряжение, разрядный ток, давление газа в области разряда, величина ионного тока на выходе. Исследован состав пучка, выходящего из разряда вдоль направления магнитного поля, разделены электронная и ионная компоненты. Приводится оценка эффективности ионизации атомных пучков в разряде.

**Препринт Объединенного института ядерных исследований.
Дубна, 1969**

Plis Yu.A., Soroko L.M.

P9-4653

Ionization of Atomic Beams in the Penning Discharge
with a Hot Cathode

The characteristics of the Penning discharge with a hot cathode were investigated in the high vacuum regime and in conditions of the atomic beam ionization. The parameters of the apparatus are given which was used for the measurements of: geometrical dimensions, magnetic field strength, anode voltage, discharge current, gas pressure in the discharge region, the value of the output ion current. Constitution of the beam from the discharge passing along the magnetic field was investigated; the electron and ion components are separated. The efficiency of atomic beam ionization in the discharge is estimated.

**Preprint. Joint Institute for Nuclear Research.
Dubna, 1969**

§1. Схема установки

Исследование разряда Пеннинга производилось на установке, которая представляла собой узел источника поляризованных ионов, предназначенного для получения первично поляризованных протонов методом ионизации пучка атомов водорода (рис. 1). Электрический разряд при высоком вакууме заполнял пространство, ограниченное тонкостенной цилиндрической трубкой (анод) диаметром 20 мм и длиной 200 мм из нержавеющей стали, отражательной латунной сеткой слева и цилиндрическим электродом E_1 с отверстием диаметром 10 мм, затянутым сеткой из вольфрамовой проволоки диаметром 0,1 мм. Нить накала в виде петли из вольфрамовой проволоки диаметром 0,3 мм находилась внутри анодного цилиндра. Величина тока накала менялась от 6 до 7,5 а, мощность достигала 30 вт. В цепи анода, на который подавалось напряжение до 4 кв от стабилизированного выпрямителя ВС-22, было включено ограничивающее сопротивление $R_a = 1$ мом. Часть измерений проводилась при $R_a = 0$.

Цилиндрические электроды E_1 , E_2 и E_3 образовывали трехэлектродную электростатическую линзу. Внешние электроды находились под потенциалом земли, а на средний подавалось напряжение от -2,5 кв до

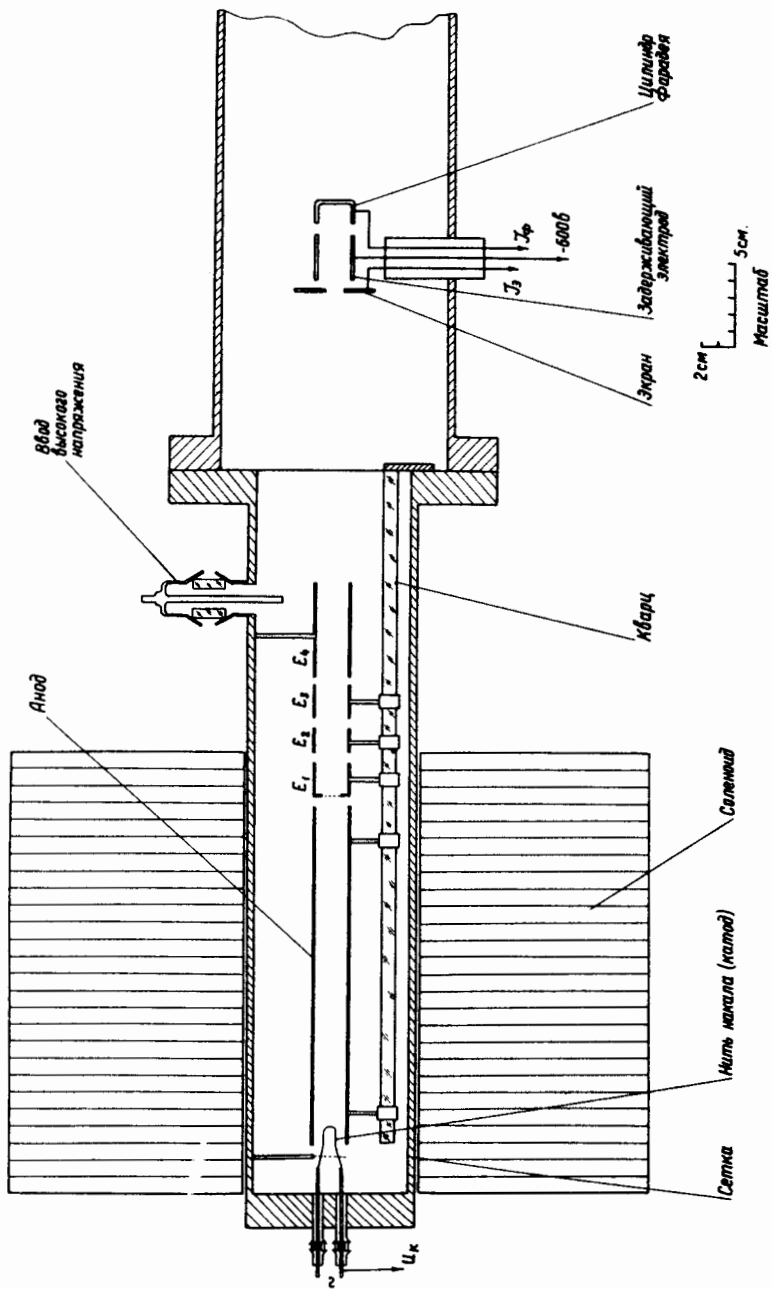


Рис.1. Схема установки.

+2,5 кв. Соседние электроды изолировались друг от друга трубками из кварцевого стекла. Цилиндрический электрод E_4 , находившийся под потенциалом земли, экранировал пучок, выходящий из разряда, от электрических полей подводющих проводников.

Безжелезный соленоид создавал магнитное поле, направленное вдоль оси анода. При токе возбуждения в 200 а напряженность поля на оси в центре анода составляла 3800 э, а на краях анода – 3200 э. Охлаждение обмоток – водяное.

На расстоянии 36 см от правого края анода располагался измеритель тока пучка, состоящий из цилиндра Фарадея диаметром 20 мм цилиндрического задерживающего электрода диаметром 20 мм и плоского экрана в виде шайбы с наружным диаметром 48 мм и внутренним 10 мм. При измерении полного тока пучка, выходящего из разряда, электрод E_4 заменялся цилиндром Фарадея.

Область разряда откачивалась паромаслянным агрегатом ВА-2-3 с азотной ловушкой и расположенным вблизи разряда медным экраном, который охлаждался снаружи жидким азотом. Вакуум в области разряда составлял $5 \cdot 10^{-7}$ торр. Газообразный водород, вводимый в область разряда, имел парциальное давление от $1 \cdot 10^{-7}$ до $1 \cdot 10^{-6}$ торр. Регулировка малых потоков газа осуществлялась с помощью редуктора в виде стеклянной трубки, внутрь которой впаивалась масса из толченого стекла, запекавшегося в графитовой форме.

§2. Результаты измерений

Процессы в разряде Пеннинга изучались путем измерения: 1) ионно-эмиссионной характеристики – зависимости интенсивности пучка на цилиндр Фарадея J_ϕ , на экран J_ε от величины тока эмиссии J_k ; 2) анодной характеристики – зависимости токов J_ϕ , J_ε и J_k от

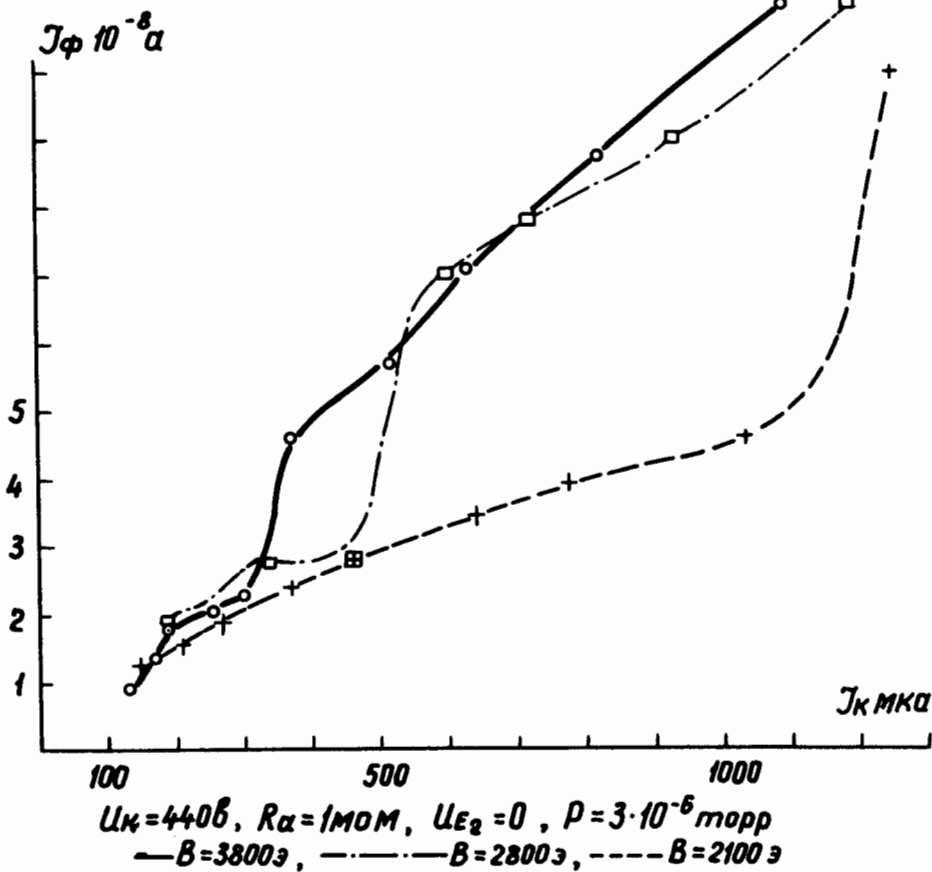


Рис.2. Зависимость тока J_{ϕ} от тока эмиссии J_k при разных значениях магнитного поля B .

напряжения анодного питания U_a ; 3) ионно-сеточной характеристики - зависимости токов J_ϕ и J_\ominus от потенциала электрода E_2 ; а также 4) магнитной характеристики - зависимости токов J_ϕ , J_\ominus и J_k от напряженности магнитного поля.

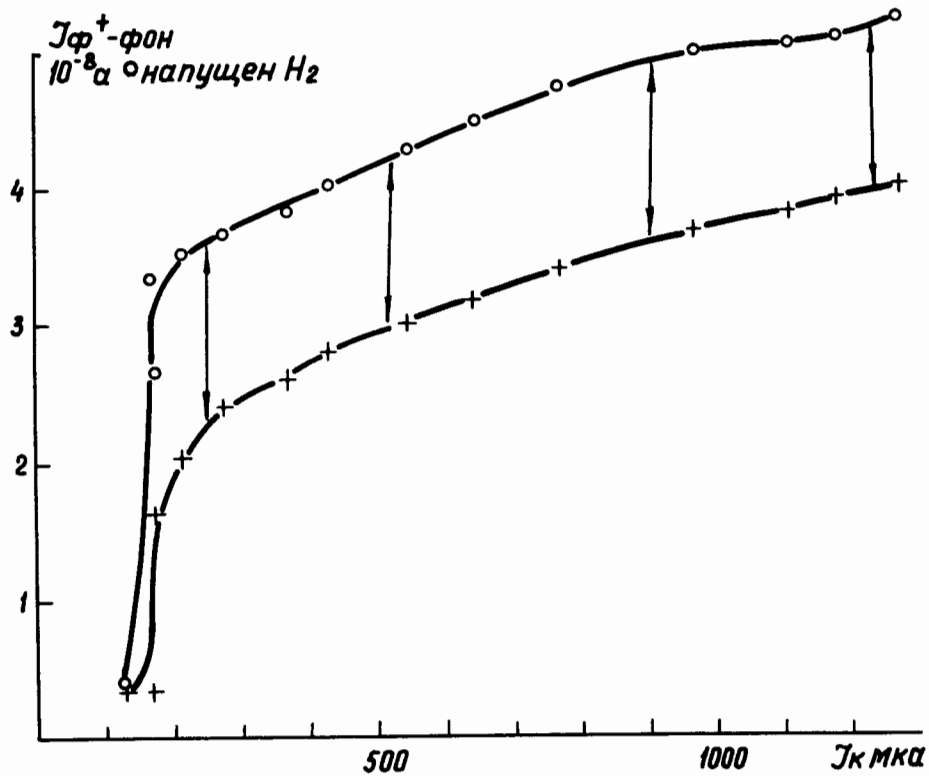
Ионно-эмиссионные характеристики (рис. 2) указывают на существование двух видов разрядов: слабого и сильного. Переход из одной формы разряда в другую наблюдается при токе эмиссии J_k , равном

$$J_k^{\text{гран.}} \approx \frac{4 \cdot 10^9}{B^2} \text{ мка,} \quad (1)$$

где B - в эрстедах. Эта зависимость от напряженности магнитного поля находится в согласии с магнетронным механизмом зажигания разряда. Ионно-эмиссионные характеристики прироста тока ΔJ_ϕ при напуске газообразного водорода до парциального давления ΔP_{H_2} указывают на то, что после перехода разряда в сильную форму эффективность ионизации водорода слабо зависит от величины тока эмиссии (рис. 3).

Анодные характеристики имеют почти линейные участки от 2,6 до 3,8 кв (рис. 4). Рабочее напряжение источника питания было выбрано равным $E_a = 4$ кв.

Кроме ионной компоненты из разряда выходит также интенсивная электронная компонента с энергиями электронов до 60 эв (рис. 5). Подобное явление наблюдается и в других системах со скрещенными электрическими и магнитными полями при высоком вакууме ^{/1,2/}. Чтобы воспрепятствовать выходу электронной компоненты из разряда, на задерживающий электрод измерителя интенсивности пучка подавалось запирающее напряжение - 600 в. Выход электронов из разряда практически прекращался, если на катод подать потенциал U_k более 100 в. В то же время при повышении напряжения на катоде наблюдается своеобразный эффект увеличения максимальной энергии электронов ^{/1/}, в резуль-



$B = 3800 \text{ э}$, $U_k = 0$, $R_o = 1 \text{ мом}$, $U_{E_2} = -100 \text{ В}$
 $P = 1 \cdot 10^{-6} \text{ торр}$, $\Delta P_{H_2} = 8 \cdot 10^{-7} \text{ торр}$

Рис.3. Зависимость J_{ϕ} от J_k при разных парциальных давлениях водорода для $B=3800$ э и $U_k=0$.

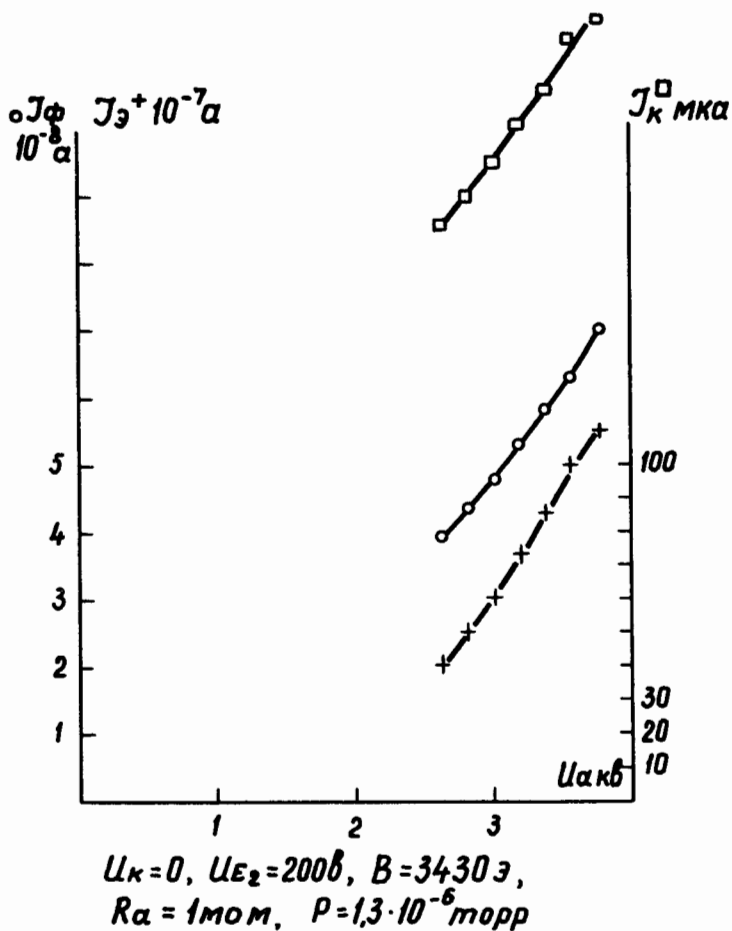
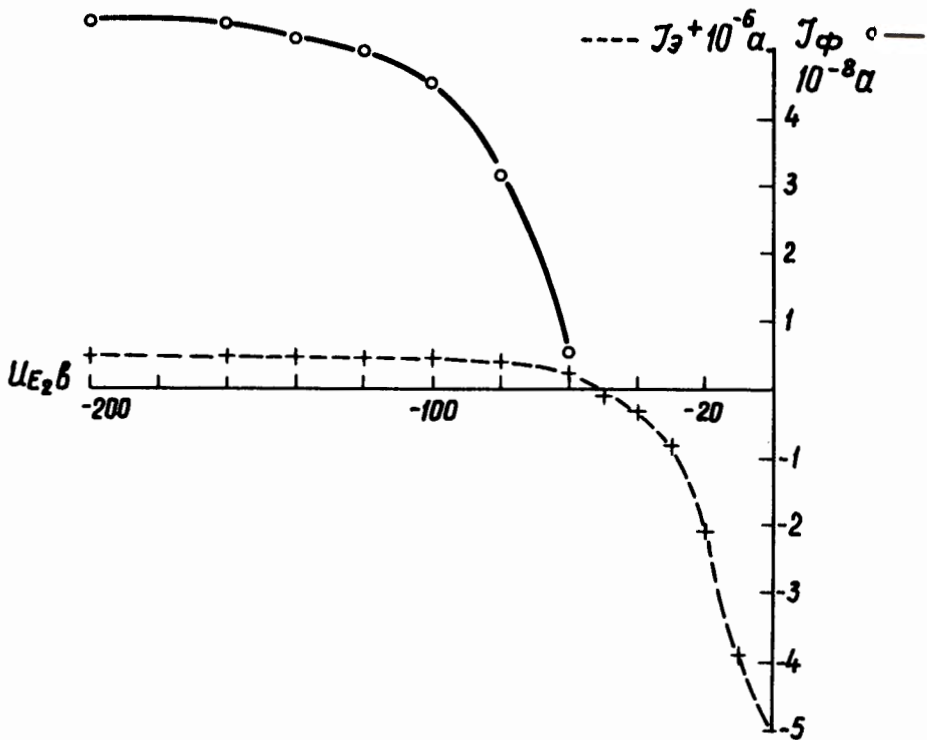


Рис.4. Зависимость J_{ϕ} , J_3 и J_k от напряжения U_a .



$U_k = 0$, $B = 3800$ э, $J_k = 940$ мка, $R_a = 1$ мом
 $\rho = 1 \cdot 10^{-6}$ торр $U_{\text{задерж. эл.}} = 0$

Рис.5. Зависимость $J_{э}$ и $J_{φ}$ от задерживающего потенциала $U_{э2}$ при $U_k = 0$.



Рис.6. Зависимость J_{θ} от U_{E2} при $U_k = 440$ в, $J_k = 95$ мка, $B=3780$ э.

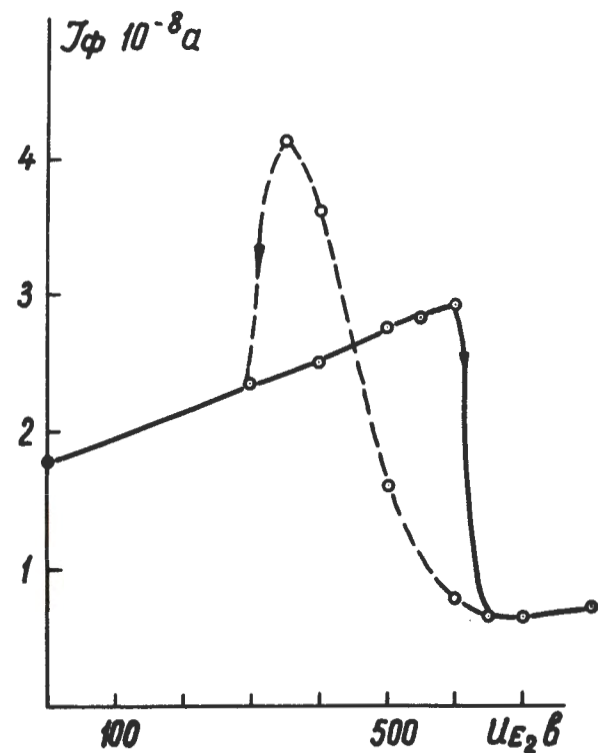


Рис.7. Зависимость J_{ϕ} от U_{E_2} .

тате чего возникает просачивание быстрых электронов из разряда. Эти быстрые электроны, достигнув трехэлектродной линзы, вызывают в ней автономный разряд. Как правило, возникновение такого разряда происходит при потенциалах среднего электрода линзы, превышающих 300 в (рис. 6, 7). Момент возникновения и гашения разряда зависит от того, повышается или понижается потенциал на среднем электроде линзы. Это приводит к гистерезисным явлениям в упомянутых выше характеристиках. Если потенциал на нити накала равен нулю, то электронная компонента становится весьма интенсивной, а гистерезисные явления пропадают (рис. 8).

Увеличение напряженности магнитного поля от 1800 до 3800 э сопровождается почти линейным ростом ионного тока (рис.9). Однако при малых токах эмиссии, близких к граничному току $J_k^{\text{гран}}$ (1), кривые зависимости ионного тока от магнитного поля выходят на плато (рис.10). Аналогичное насыщение наблюдается при повышенном давлении в области разряда (рис. 11). Зависимость экранного тока J_{\ominus} от магнитного поля при потенциале катода $U_k = 440$ в подобна зависимости для J_{ϕ} (рис. 12, 13). При $U_k = 0$ экраный ток принимает отрицательные значения (рис.10,11). Электронный ток, измеренный электродом E_4 , который включался как цилиндр Фарадея, достигал 50 мка.

При парциальном давлении газообразного водорода $\Delta P_{H_2} = 8 \cdot 10^{-7}$ торр наблюдались следующие значения токов:

$$\begin{aligned} \Delta J_{\phi} &= 1,3 \cdot 10^{-8} \text{ а} & , & \quad \Delta J_{\ominus} = 1 \cdot 10^{-7} \text{ а} & \quad \text{при } R_a = 1 \text{ мом} \\ \Delta J_{\phi} &= 1,5 \cdot 10^{-8} \text{ а} & , & \quad \Delta J_{\ominus} = 1,5 \cdot 10^{-7} \text{ а} & \quad \text{при } R_a = 0 \end{aligned} \quad (2)$$

$$B = 3800 \text{ э}, \quad U_{E_2} = 0, \quad U_k = 440 \text{ в.}$$

Оценку эффективности ионизации водорода в разряде Пеннинга можно получить, исходя из наблюдаемых величин

$$\frac{\Delta J_{\phi}}{\Delta P} = 2 \cdot 10^{-3} \frac{a}{\text{горр}}, \quad \frac{\Delta J_{\varepsilon}}{\Delta P} = 0,2 \frac{a}{\text{горр}}, \quad (3)$$

и полного тока

$$\frac{\Delta J}{\Delta P} = 3 \frac{a}{\text{горр}}. \quad (4)$$

§3. Обсуждение результатов измерений

Найдем расчетные значения $\frac{\Delta J}{\Delta P}$, приняв сечение ионизации водорода при энергии 4 кэВ равным σ (H_2) = $1,5 \cdot 10^{-17}$ см², а длину области ионизации равной половине длины анода, т.е. 10 см. Тогда

$$\left(\frac{\Delta J}{\Delta P} \right)_{\text{расч.}} = 3,55 \cdot 10^{16} \sigma \cdot \ell \cdot J_e, \quad (5)$$

где J_e - электронный ток, накопленный внутри анода. Из измеренного значения $\frac{\Delta J}{\Delta P}$ получаем $J_e = 0,57$ а. Предельное значение тока, которое можно удержать внутри цилиндра, находящегося под потенциалом U_a и помещаемого в магнитное поле, равно

$$J_e^{\text{max}} = 1,96 \cdot \pi \cdot \epsilon_0 \left(\frac{2e}{m} \right)^{1/2} U_a^{3/2} \quad (6)$$

при условии, что магнитное поле превышает величину

$$B_m = 168 \frac{\sqrt{U_a}}{r_a}. \quad (7)$$

Для $U_a = 4$ кВ находим: $J_e^{\text{max}} = 8$ а, а $B_m = 1060$ э при $r = 1$ см.

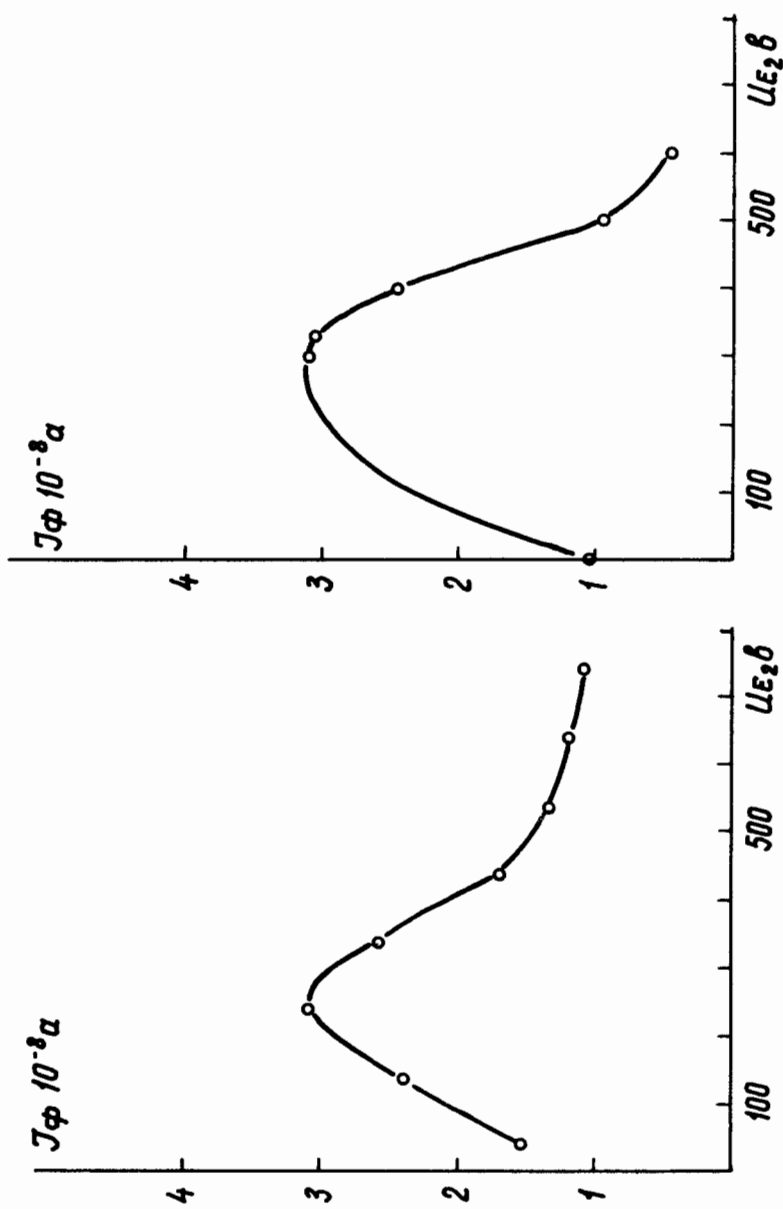


Рис.8. Зависимость J_{ϕ} от U_{E_2} при $U_k = 0$.

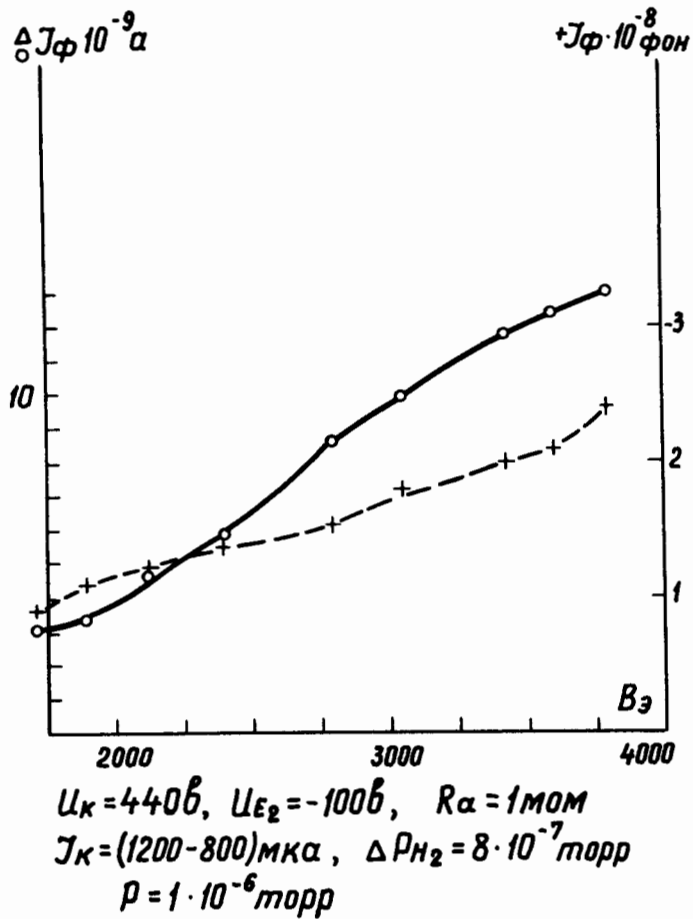
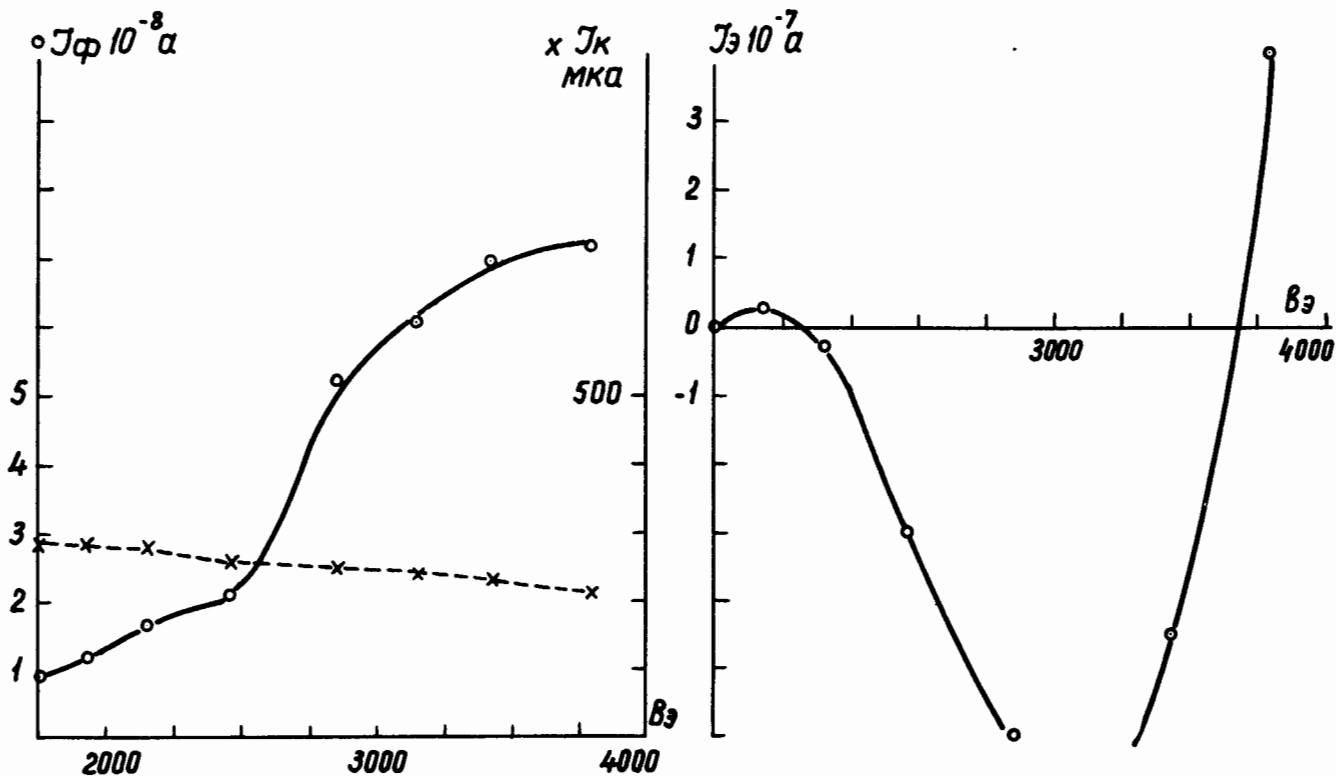
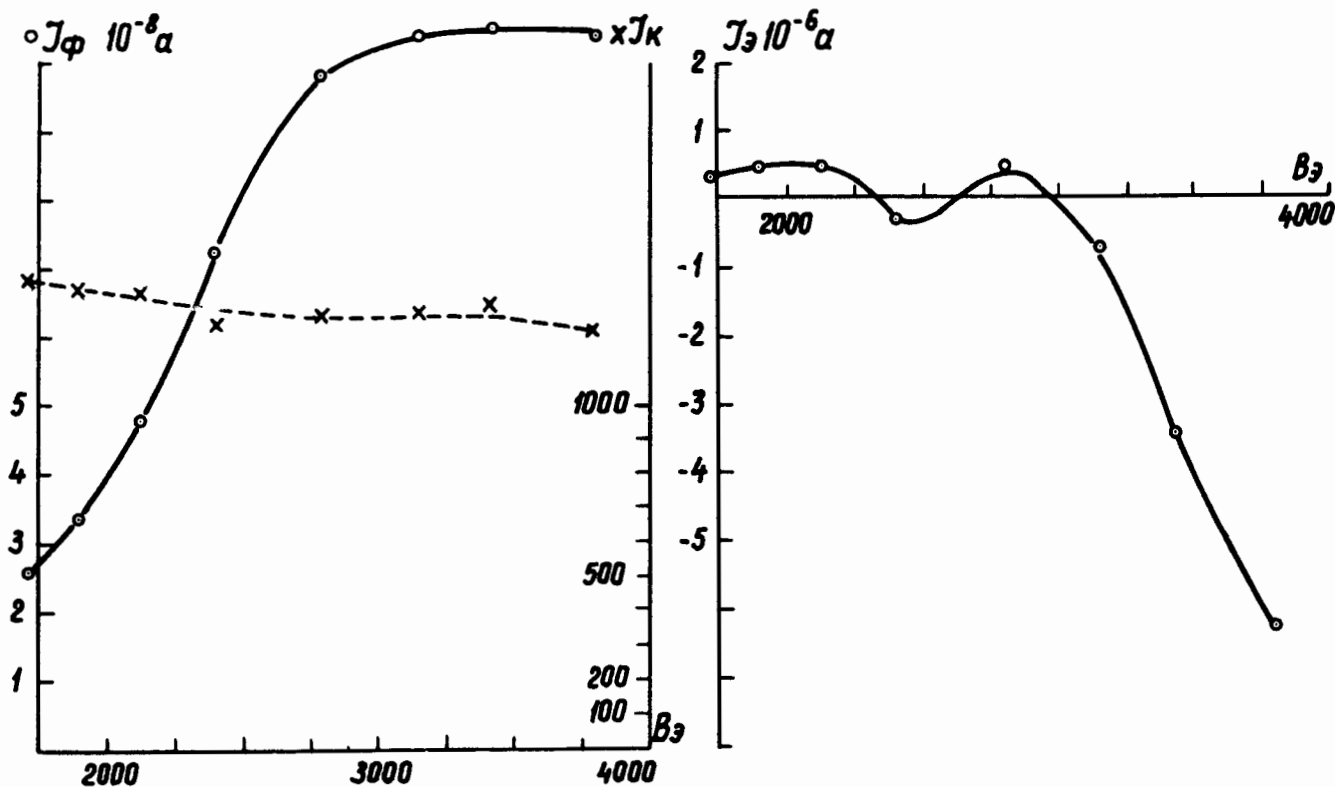


Рис.9. Зависимость ΔJ_{ϕ} и J_{ϕ} от магнитного поля B при $J_k =$
 $= 1200 + 800$ мкА и $U_k = 440$ В.



$U_K = 0$, $U_{E2} = (340 \div 240)$, $R_a = 1 \text{ мом}$, $J_{\text{нак}} = 6,7 \text{ а}$, $\rho = 1,3 \cdot 10^{-6} \text{ торр}$

Рис.10. Зависимость J_{ϕ} , J_3 и J_k от магнитного поля B при $U_k = 0$.



$U_k = 0$, $U_{\epsilon_2} = 0$, $R\alpha = 0$, $\rho = 3 \cdot 10^{-6} \text{ мм}$, $J_{\text{нак}} = 7,3 \text{ а}$

Рис.11. Зависимость J_ϕ , J_ω и J_k от магнитного поля B при $U_k = 0$.

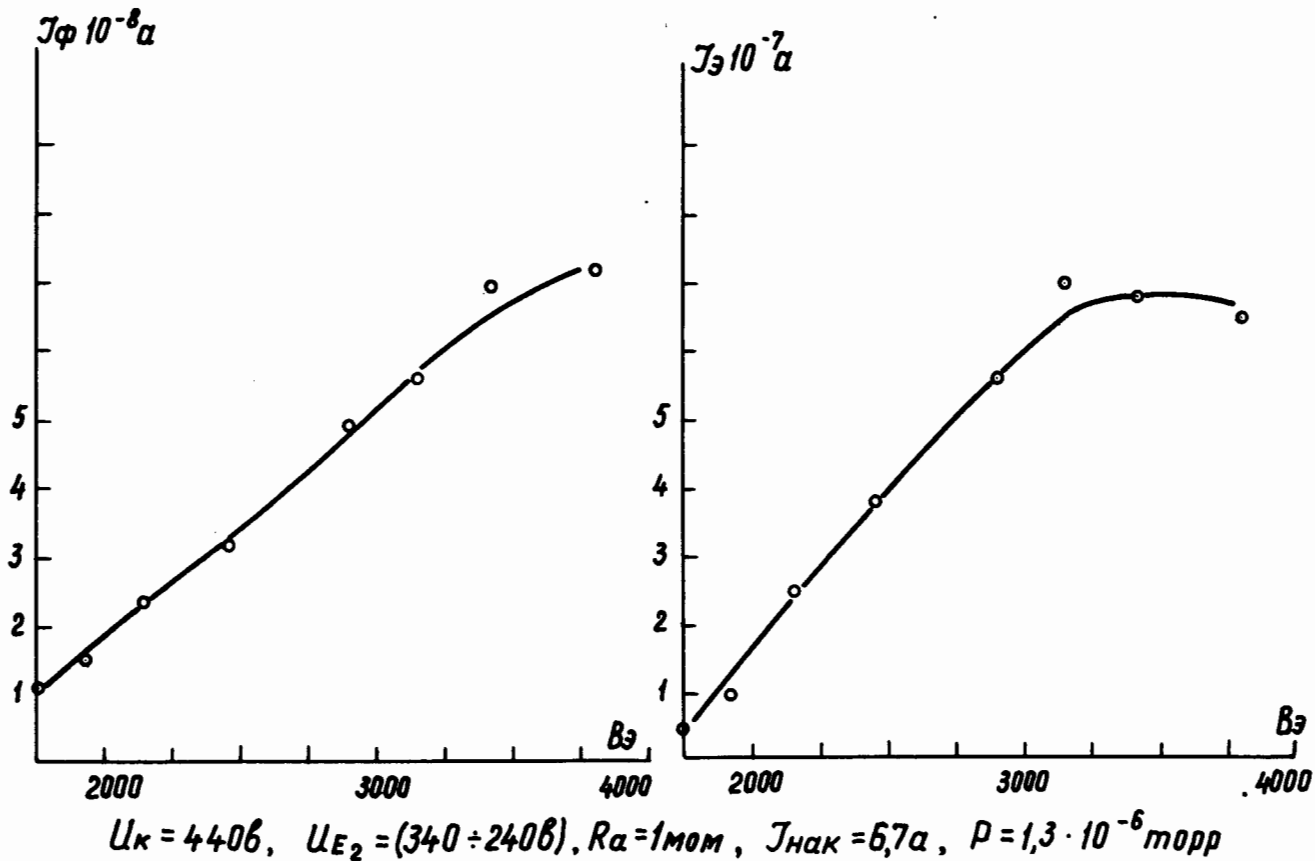
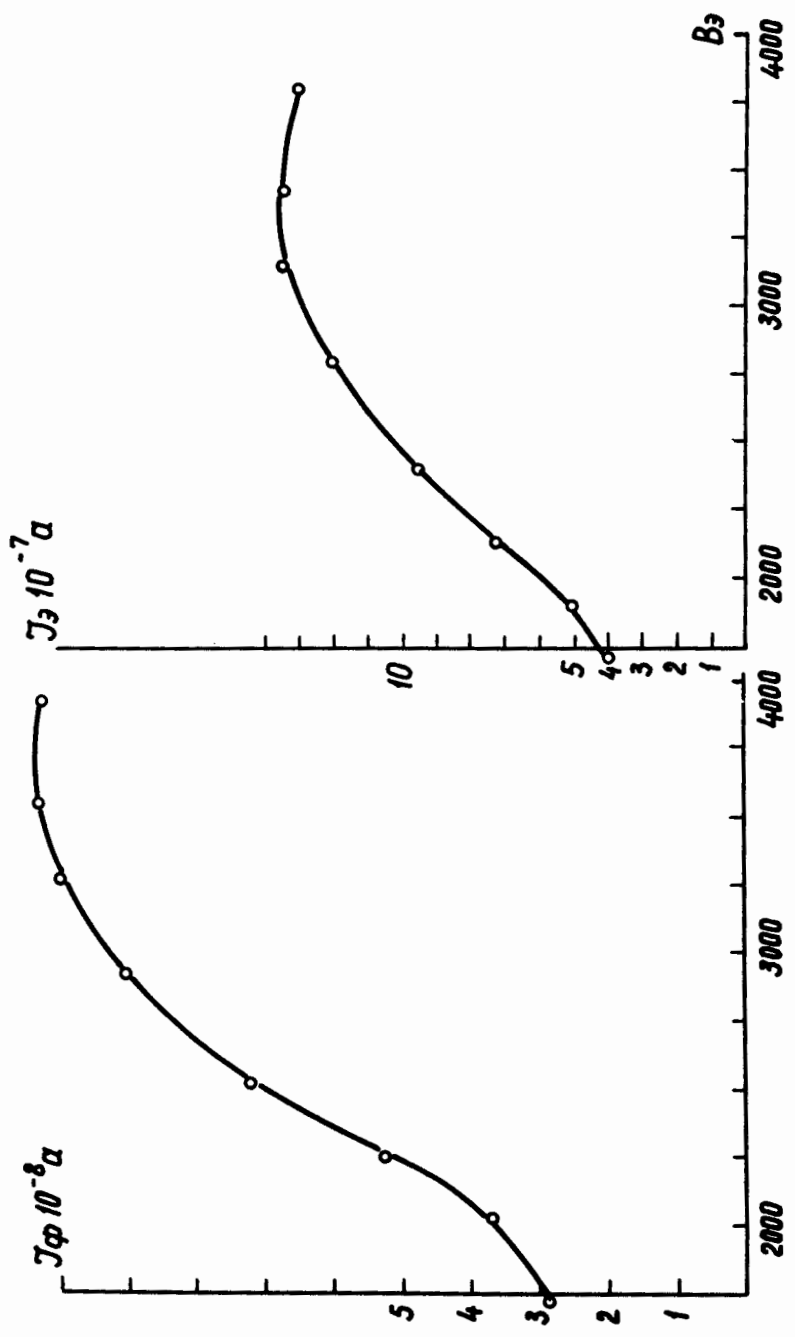


Рис.12. Зависимость \mathcal{J}_ϕ и \mathcal{J}_ε от магнитного поля B при $U_k = 440 \text{ в}$.



$\mathcal{U}_k = 440\text{В}$, $R_{\alpha} = 0$, $\mathcal{U}_{\text{э}2} = 0$, $\rho = 3 \cdot 10^{-6}$, $J_{\text{нак}} = 7,3 \text{ a}$

Рис.13. Зависимость J_{ϕ} и $J_{\text{э}}$ от магнитного поля B при $U_k = 440 \text{ в}$.

Полученные результаты измерений позволяют оценить эффективность ионизации пучка атомов водорода, если их пропустить через разряд Пеннинга ^{/3/}. Приближенно считая, что $\sigma_{\text{ион}}(\text{H}_2) = 7 \cdot 10^{-17} \text{ см}^2$ и $\sigma_{\text{ион}}(\text{H}) = 4 \cdot 10^{-17} \text{ см}^2$ при энергии электронов 200 эв, а также предполагая, что отношение эффективных сечений $\sigma(\text{H}_2)$ и $\sigma(\text{H})$ постоянно при высоких энергиях электронов, находим эффективность ионизации пучка атомов водорода, если последний полностью заполняет сечение анодного цилиндра. Эффективность ионизации равна $\eta = 3 \cdot 10^{-4}$.

Л и т е р а т у р а

1. E.N.Hirsch. Brit. J. Appl. Phys., 15, 909 (1964).
2. Ю.Е. Крейндель и др. ЖТФ, 38, 2042 (1968).
3. Ю.А. Плис и Л.М. Сороко. Препринт ОИЯИ, Р9-3589, Дубна 1967.

Рукопись поступила в издательский отдел
8 августа 1969 года.