

# Вестник МОСКОВСКОГО УНИВЕРСИТЕТА

№ 1 — 1972

УДК 537.525

Т. И. ИВАНОВА, Г. Е. ПУСТОВАЛОВ

## ИЗМЕРЕНИЕ УГЛОВОГО И ЭНЕРГЕТИЧЕСКОГО РАСПРЕДЕЛЕНИЯ ИОНОВ ПО КАТОДУ ЯЧЕЙКИ ПЕННИНГА

Получено угловое и одновременно энергетическое распределение ионов по катоду ячейки Пеннинга при разных режимах работы разряда.

При изучении явлений, происходящих в газовом разряде в ячейке Пеннинга, а также для разработки технических приложений такого разряда важно знать угловое и энергетическое распределение ионов, приходящих в различные точки катодов ячейки. В последнее время появились экспериментальные и теоретические работы в этом направлении.

В работе [1] описывается измерение зависимости средней энергии ионов, проходящих через отверстие в центре катода ячейки Пеннинга, от величины анодного напряжения и давления при постоянном магнитном поле. Найденные значения энергии авторы связывали с падением потенциала вдоль оси ячейки и потенциалом в центре ее симметрии. В [2] производились измерения энергии ионов, проходящих через отверстие в центре катода в двух направлениях: по оси ячейки и по линии отверстие—край анода. Исследовалась ячейка Пеннинга с длинным анодом (зазоры между анодом и катодами малы по сравнению с длиной ячейки). Показано, что полное падение напряжения является практически радиальным и происходит вблизи анода.

Результаты измерений зависимости ионного тока через отверстие в центре катода от величины магнитного поля для ячейки с коротким анодом приведены в работе [3]. Там же измерялась величина ионного тока, проходящего через отверстие в катоде, в зависимости от расстояния этого отверстия до центра катода.

Картина катодного распыления при различных режимах работы ячейки Пеннинга была рассмотрена в работе [4]. Автор связывает (качественно) полученные результаты с распределением ионного тока по катоду.

Угловое и энергетическое распределение ионов по катоду ячейки Пеннинга с анодом квадратного сечения получено в работе [5]. Приемное устройство позволяло выделить узкий пучок ионов. Получены энергетические спектры для ионов, падающих в центр катода под небольшими углами к оси ячейки.

Работы [6] посвящены исследованию энергетического и углового распределения ионов, проходящих через отверстие в центре катода. По максимальной энергии ионов, идущих под определенными углами к оси ячейки, авторы делают выводы о распределении потенциала в плоскости симметрии ячейки. Однако интерпретация полученных результатов сомнительна, поскольку авторы, во-первых, не приняли мер для отделения ионной составляющей тока от электронной составляющей и, во-вторых, использовали плоский (состоящий из ряда концентрических колец) коллектор. В электрическом поле между катодом и таким коллектором угловое распределение частиц может быть значительно искажено.

В работе [7] измерено распределение плотности тока по катоду ячейки Пеннинга, работающей в режиме магнитоэридного насоса. При этом электронная составляющая тока также не отделялась.

Мавляновым [8] предложена методика отделения ионной составляющей эридного тока в ячейке Пеннинга от электронной путем создания в различных комбинациях небольших добавочных напряжений (до 75 в) между электродами ячейки и коллектором. Эта методика была использована для изучения распределения ионного тока по катоду ячейки.

Теоретическая оценка распределения плотности ионного тока по поверхности катода проведена в работе [9]. Вызывают недоумение положенные в основу расчета две различные формулы, одновременно описывающие распределение потенциала внутри ячейки, одна из которых соответствует положительному пространственному заряду внутри ячейки, а другая — отрицательному.

В работе [10] с использованием той же методики, что и в работах [6], измерялось угловое распределение ионов, проходящих через отверстие в центре катода ячейки с длинным анодом, в различных магнитных полях.

В настоящей работе описываются измерения одновременного углового и энергетического распределения ионов, проходящих через отверстие в катоде, расположенное на различных расстояниях от оси ячейки, при разных режимах работы эрида Пеннинга.

### Экспериментальная установка и методика измерений

Ячейка. Все измерения были проведены с ячейкой Пеннинга, представляющей собой цилиндрический анод  $A$  (немагнитная нержавеющая сталь), помещенный между двумя катодами  $K_1$  и  $K_2$ , изготовленными из молибдена (рис. 1). Расстояние между катодами  $2d = 30$  мм, радиус анода  $r_a = 15$  мм, длина анода  $2l$  — от 6 до 24 мм. Ячейка находилась в магнитном поле, направленном вдоль оси ячейки. Катод  $K_1$  состоял из плоского охранного кольца и пластины с отверстием, диаметр которого  $\delta = 3$  мм. Пластина могла перемещаться в направлении, перпендикулярном оси ячейки.

Коллекторное устройство. Вместе с пластиной перемещалось коллекторное устройство, электроды которого были сделаны из молибдена. Оно состояло из полуцилиндра  $\Pi$  с пятью отверстиями, расположенными через  $30^\circ$ , и фарадеевых цилиндров — коллекторов  $I-5$ , находящихся против каждого отверстия. Все отверстия, включая и отверстие в катодной пластине, находились в диаметральной плоскости анода и имели диаметры 3 мм. Перемещение всего устройства в вакууме осуществлялось механической системой, приводимой в движение вращением стеклянного шлифа колбы. Смещение отверстия в като-

де относительно оси ячейки фиксировалось специальным отсчетным приспособлением с точностью до  $0,1 \text{ мм}$ .

Электрическая схема. Выпрямитель  $B_1$  является источником анодного напряжения, величина которого измеряется электростатическим киловольтметром. С помощью выпрямителя  $B_2$  можно изменить потенциал катода  $K_1$  относительно катода  $K_2$ . Батарея  $B$  служит для создания разности потенциалов между катодом  $K_1$  и полуцилиндром. Наконец, выпрямитель  $B_3$  обеспечивает подачу задерживающего напряжения на коллекторы  $1-5$ . Токи, собираемые коллекторами, измеряются по отдельности многопредельным микроамперметром с наибольшей чувствительностью  $0,005 \text{ мка/дел}$ , который можно поочередно включать последовательно с каждым из коллекторов.

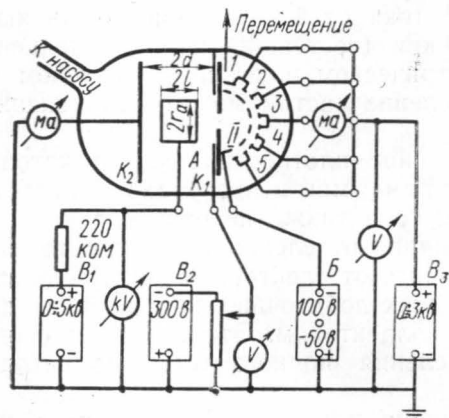


Рис. 1. Принципиальная схема установки

в себя ионную и электронную составляющие, обусловленные ионами и электронами, прошедшими через отверстие в катоде из разрядного промежутка. Кроме этой части тока, возникновение которой обязано явлениям в самом разряде, существенную долю вносят электроны вторичной эмиссии с краев отверстия в катоде и отверстий в электродах коллекторного устройства. Полное число электронов, пришедших на коллектор, иногда может превышать число ионов. Прибор в этом случае показывает отрицательный ток.

Отделение ионной составляющей тока от прочих и нахождение углового и энергетического распределения ионов, попадающих в различные точки катода, производилось следующим образом. При некотором фиксированном положении отверстия в катоде на коллекторы подавалось относительно катода положительное напряжение  $u$ , задерживающее ионы, и поочередно снимались кривые задержки для каждого коллектора, т. е. зависимости токов  $i$  на коллектор от  $u$ . Типичная кривая задержки показана на рис. 2. Эта кривая состоит из двух участков  $A$  и  $B$  с пологим наклоном и более или менее крутой ступеньки  $C$ . Высоту этой ступеньки мы и принимали за величину ионного тока, наклонный же ход кривой на остальных участках объясняли влиянием потенциала коллектора  $u$  на количество электронов, достигающих коллектора. В пользу такой интерпретации говорят следующие доводы.

Наклон участков  $A$  и  $B$  остается практически постоянным как до, так и после ступеньки, в том числе и для значений  $u$ , превышающих анодное напряжение, когда ионы уже наверняка не доходят до коллектора.

Наклон этих участков существенно уменьшается, если между полуцилиндром и катодом приложить отрицательное напряжение ( $50-100 \text{ в}$ ), задерживающее электроны, идущие из разряда, и электроны вторичной эмиссии с краев отверстия в катоде. В то же время в пре-

делах точности измерений ( $\sim 5\%$ ) величина ступеньки и ее положение в зависимости от  $u$  при этом не меняется.

Согласно результатам расчета, проведенного авторами [11], траектории ионов при тех величинах параметров, которые мы использовали (индукция магнитного поля до 1000 гс, анодное напряжение 1000—2000 в, газовый разряд в воздухе, длина ячейки 3 см), можно считать

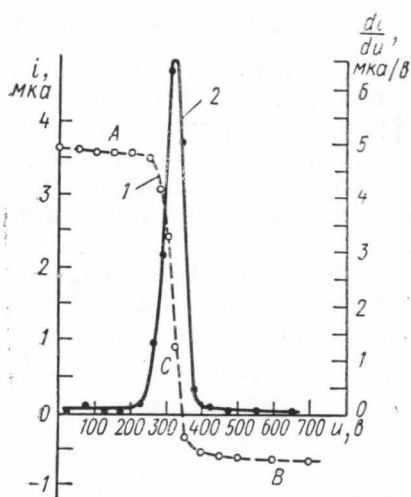


Рис. 2. Кривая задержки (1) и энергетическое распределение ионов (2). Анодное напряжение 2 кв; давление  $6 \cdot 10^{-5}$  мм рт. ст.; магнитная индукция 220 гс; 3-й коллектор; отверстие в центре катода

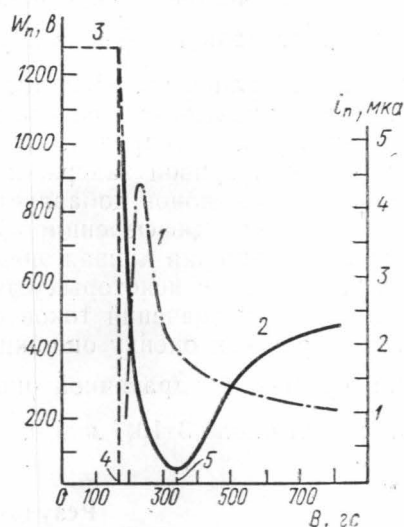


Рис. 3. Зависимость от магнитной индукции  $B$  энергии  $W_n$  нормальных ионов и тока  $i_n$  на 3-й коллектор при положении отверстия в центре катода. 1 — ток; 2 — энергия ионов (равная потенциалу центра ячейки); 3 — потенциал центра ячейки до зажигания разряда (теоретическое значение); 4 — магнитная индукция зажигания; 5 — переходное значение магнитной индукции. Давление  $6 \cdot 10^{-5}$  мм рт. ст., анодное напряжение 2 кв

практически плоскими, что оправдывает размещение всех отверстий в коллекторном устройстве в одной плоскости.

Обработка результатов измерений. После тренировки системы, когда разрядный ток стабилизировался, снимались по несколько раз кривые задержки. По средним значениям  $i(u)$  строился график, из которого определялось, как сказано выше, по величине ступеньки значение ионного тока  $i(r, a)$ , проходящего через отверстие в катоде на коллектор, расположенный под углом  $a$  к оси ячейки, когда центр отверстия находится на расстоянии  $r$  от центра катода.

Оказалось, что в центр катода вдоль оси ячейки попадает интенсивный пучок ионов, диаметр которого в некоторых случаях заметно меньше диаметра отверстия в катоде. Чтобы исключить влияние размеров отверстия, по значениям тока  $i_n$ , идущего на 3-й коллектор, была рассчитана плотность тока  $j_n$  ионов, падающих на катод нормально его поверхности, как функция расстояния  $r$  от центра катода. Для этого были численно найдены решения интегрального уравнения типа Вольтерра 1-го рода

$$i_n(r) = \int_S j_n(x) dS = 2 \int_{r-\delta/2}^{r+\delta/2} x \arccos \frac{x^2 + r^2 - (\delta/2)^2}{2rx} j_n(x) dx, \quad (r > \delta/2),$$

где интеграл берется по площади отверстия,  $\delta$  — диаметр отверстия,  $x$  — текущая координата.

Энергетическое распределение ионов, как известно, представляет собой производную  $\frac{di}{du}$ , взятую по задерживающему потенциалу от тока  $i$  на коллектор. Наличие электронной составляющей в токе на коллектор практически не сказывается на положении и форме кривой энергетического распределения, так как при более или менее постоянном наклоне кривой задержки на участках  $A$  и  $B$  к энергетическому распределению ионов добавляется лишь некоторая небольшая постоянная величина. Дифференцирование кривой задержки производилось численно. Типичная кривая энергетического распределения показана на рис. 2. Так как в некоторых случаях при дифференцировании разность двух соседних значений токов была очень мала, то оказалось необходимым провести оценку ошибки измерений. В наихудшем случае величина средней квадратичной ошибки для отдельной точки кривой  $\frac{di}{du}$  составляет около  $3 \cdot 10^{-4}$  мка/в.

### Результаты измерений

Хотя измерения проводились при разных давлениях, анодных напряжениях и для ячеек с длиной анода от 6 мм до 24 мм, здесь мы приводим лишь данные, полученные для средней ячейки с длиной анода 15 мм при давлении  $6 \cdot 10^{-5}$  мм рт. ст. и анодном напряжении 2000 в. При этих значениях параметров исследовались пучки ионов, выходящих из разрядного промежутка через отверстие в катоде, в зависимости от величины магнитной индукции  $B$  от значения  $B_{зак} \approx 180$  гс, соответствующего зажиганию разряда, до приблизительно 1000 гс. Основные результаты измерений приведены на рис. 3—5.

На рис. 3 показана зависимость от величины  $B$  энергии  $W_n$  ионов центрального пучка, возникающего вблизи оси ячейки и попадающего на 3-й коллектор, когда отверстие находится в центре катода (энергия нормальных приосевых ионов). Есть все основания считать, что энергия этих ионов соответствует потенциалу центра симметрии ячейки. Как видно из рисунка,  $W_n$  резко падает с возрастанием магнитного поля от величины, соответствующей теоретическому значению потенциала центра ячейки в отсутствие пространственного заряда (см., например, [12]), до 50—70 в. В этой области значений  $B$ , которую обычно называют областью I режима работы разряда, происходит быстрое нарастание пространственного заряда внутри ячейки. В этой же области лежит максимум тока  $i_n$  центрального пучка ионов, а также максимум полного разрядного тока ячейки.

При дальнейшем увеличении магнитной индукции потенциал центра ячейки повышается, ток центрального пучка ионов и разрядный ток ячейки уменьшается. Эта область значений  $B$  соответствует II режиму работы разряда. Области I и II режимов отделены сравнительно узкой областью переходных значений индукции магнитного поля, зависящей, вообще говоря, от геометрических размеров разряда и рабочих параметров. В данном случае  $B_{перех} \approx 350$  гс.

На рис. 4 показана зависимость плотности тока  $j_n$  нормальных ионов и их энергии  $W_n$  от расстояния  $r$  до центра катода. Здесь же показана полуширина энергетического распределения, которая харак-

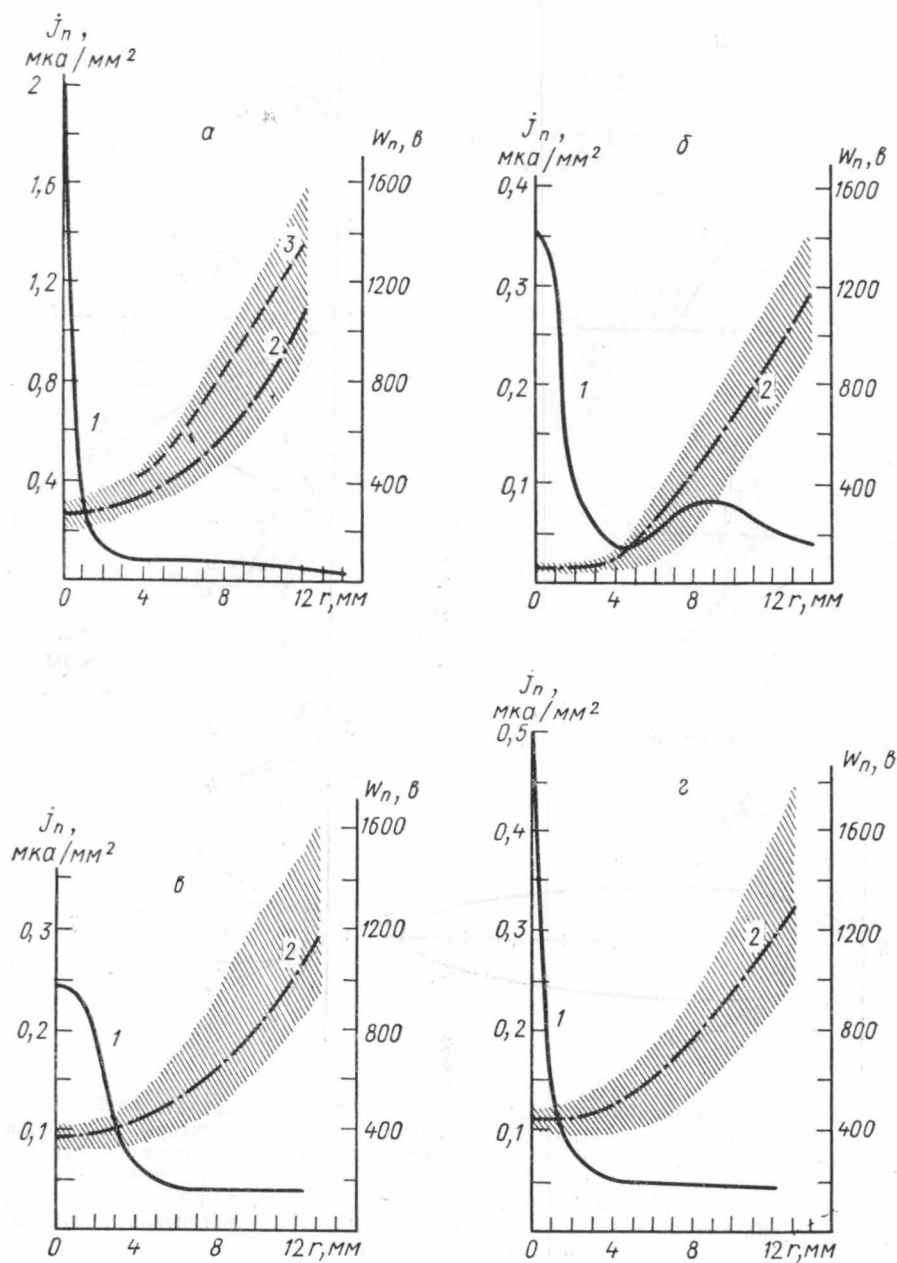


Рис. 4. Распределение по катоду плотности тока  $j_n$  нормальных ионов и их энергия  $W_n$ . 1 — плотность тока, 2 — максимум кривой энергетического распределения, 3 — слабо выраженный второй максимум (штриховкой показана полуширина энергетического распределения),  $r$  — расстояние до центра катода. Анодное напряжение 2 кв, давление  $6 \cdot 10^{-5}$  мм рт. ст., индукция магнитного поля: а — 220, б — 357, в — 495 и г — 825 гс

теризует разброс по энергиям ионов, приходящих на коллектор. Следует заметить, что такой разброс, по крайней мере отчасти, можно объяснить довольно большим диаметром отверстий коллекторного

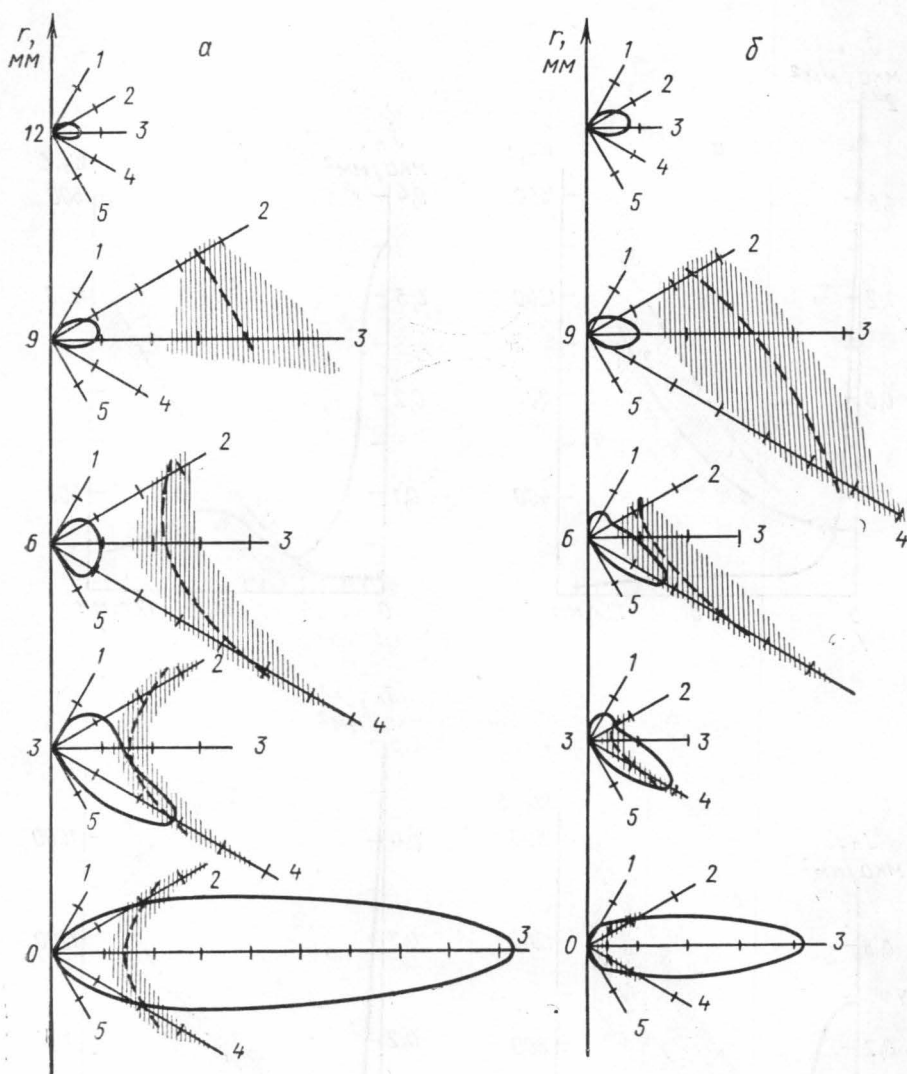


Рис. 5. Угловое и энергетическое распределение ионов по катоду. 1—5 — номера коллекторов (см. рис. 1), сплошная линия — ток на коллекторы, штриховая линия — максимум кривой энергетического распределения; штриховкой показана полуширина энергетического распределения,  $r$  — расстояние от центра катода до центра отверстия. Цена деления: для тока —  $0,5 \text{ мкА}$ , для энергии —  $200 \text{ в}$ . Анодное напряжение  $2 \text{ кВ}$ , давление  $6 \cdot 10^{-5} \text{ мм рт. ст.}$ , магнитная индукция: а —  $220 \text{ гс}$ , б —  $357 \text{ гс}$

устройства, благодаря чему на 3-й коллектор попадают ионы из телесного угла, ограниченного углами падения около  $12^\circ$ .

Как видно из рисунка, при всех значениях магнитного поля существует центральный пучок ионов со сравнительно большой плотностью тока. Вне этого центрального пучка плотность тока мало зависит от

магнитного поля и составляет около  $0,05 \text{ мка/мм}^2$ . Плотность же тока в центральном пучке и его диаметр существенно зависят от магнитного поля.

В I режиме (рис. 4, а) центральный пучок очень узок (менее 2 мм диаметром), а плотность тока в нем наиболее высока. При  $V_{\text{перех}}$  (рис. 4, б) плотность тока в центральном пучке заметно падает. Как уже отмечалось выше, резко уменьшается также энергия ионов в нем, причем ионы одинаковой энергии ( $\sim 50 \text{ в}$ ) падают на катод внутри круга диаметром около 8 мм. Это можно интерпретировать как возникновение при  $V_{\text{перех}}$  плазменной области примерно с таким же диаметром, в которой отсутствует радиальное падение потенциала. При  $V_{\text{перех}}$  энергетический спектр ионов центрального пучка наиболее узок (полуширина порядка 20 в).

Во II режиме (рис. 4, в и г) по мере увеличения магнитной индукции снова происходит сужение пучка и некоторое увеличение плотности тока в нем. Энергия ионов центрального пучка и разброс по энергиям возрастают.

Угловое и энергетическое распределение ионов, приходящих на катод в различных его точках, показано на рис. 5 в виде полярных диаграмм. Хорошо видно, что наибольшую плотность и наименьшую энергию имеют ионы приосевого пучка. Следует, однако, отметить, что, хотя ионные пучки, приходящие в центр катода под углами падения более  $12^\circ$  и на периферию под любыми углами, имеют сравнительно малую плотность, они все же составляют основную долю полного ионного тока в разряде (более 90%), поскольку площадь, на которую они падают, значительно больше площади сечения приосевого пучка.

Обратим внимание на то, что для получения однозначных выводов о структуре разряда существенно проводить измерения одновременно возможно большего числа величин, характеризующих разряд. Например, при  $V=357 \text{ гс}$  полный ионный ток, проходящий через отверстие в катоде, и его угловое распределение одинаковы при  $r=3 \text{ мм}$  и  $6 \text{ мм}$ , в то время как по энергиям ионы различаются очень сильно (рис. 5, б).

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Helmer J. C., Jepsen R. L. Proc. IRE, **49**, 1920, 1961.
2. Кнауер W. J. Appl. Phys., **33**, 2093, 1962.
3. Крейндель Ю. Е., Ионов А. С. ЖТФ, **34**, 1199, 1964.
4. Крейндель Ю. Е. ЖТФ, **35**, 315, 1965.
5. Курбатов О. К. ЖТФ, **36**, 1665, 1966.
6. Рейхрудель Э. М., Смирницкая Г. В., Баберцян Р. П. ЖТФ, **36**, 1226, 1966; Смирницкая Г. В., Баберцян Р. П. «Вестн. Моск. ун-та», физ. астрон., № 3, 23, 1967.
7. Рудницкий Е. М. ЖТФ, **37**, 927, 1967.
8. Рейхрудель Э. М., Смирницкая Г. В., Мавлянов А. «Вестн. Моск. ун-та», физ., астрон., № 5, 49, 1969.
9. Смирницкая Г. В., Нгуен Хыу-Ти. ЖТФ, **39**, 1625, 1969.
10. Рейхрудель Э. М., Смирницкая Г. В., Нгуен Хыу-Ти. «Вестн. Моск. ун-та», физ., астрон., № 2, 52, 1969.
11. Иванова Т. И., Пустовалов Г. Е. «Вестн. Моск. ун-та», физ., астрон., **11**, № 5, 501, 1970.
12. Иванова Т. И., Пустовалов Г. Е. ЖТФ, **40**, 2112, 1970.

Поступила в редакцию  
5.1 1971 г.

Кафедра  
общей физики для биологов