

ИССЛЕДОВАНИЕ ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ ХАРАКТЕРИСТИК ПРИЭЛЕКТРОДНЫХ СЛОЕВ ЕМКОСТНОГО ВЧ РАЗРЯДА С ВНЕШНИМИ ЭЛЕКТРОДАМИ

А. В. Калмыков, А. С. Смирнов

Экспериментально исследованы основные характеристики плазмы положительного столба и слоев разряда в диэлектрическом капилляре. Получены зависимости выделяемой в приэлектродных слоях мощности от средней плотности тока на электроде. Приведенное сравнение с имеющимися в настоящее время теоретическими моделями показало, что последние позволяют по порядку величины оценить характеристики слоев разряда.

В последние годы появилось большое количество работ, посвященных теоретическому и экспериментальному исследованиям явлений в приэлектродных областях емкостного высокочастотного (ВЧ) разряда [1-6]. Это связано как с попытками создать аналитические модели, позволяющие описать основные свойства слоев ВЧ разряда [2, 3], так и с необходимостью получения экспериментальных данных о характеристиках приэлектродных слоев, требующихся в различных приложениях. Однако в силу сложности явлений полного понимания процессов, происходящих в приэлектродных слоях, к настоящему времени нет. Имеющиеся экспериментальные данные получены лишь в ограниченном диапазоне условий для простейшего случая плоской геометрии разрядного прибора с металлическими или покрытыми тонким слоем диэлектрика электродами [5, 6]. При увеличении толщины диэлектрического покрытия эксперименты резко усложняются, так как в этом случае становятся невозможными прямые измерения падения напряжения на разряде. Практически важный случай разряда в диэлектрических трубках малого (порядка миллиметра) диаметра [7] требует применения совершенно иной методики измерений характеристик высокочастотного разряда, например на основе анализа комплексного сопротивления нагрузки источника ВЧ мощности [8].

Целью настоящей работы являлось исследование характеристик приэлектродных областей ВЧ разряда на частотах в единицы мегагерц. Эксперименты проводились в газовой смеси $\text{CO}_2 : \text{N}_2 : \text{O}_2 : \text{He} : \text{Xe} = 1.2 : 0.8 : 0.2 : 7 : 0.3$, использованной в работе [7], и в чистом гелии.

Конструкция экспериментальной установки показана на рис. 1. Продольный ВЧ разряд создавался в капилляре 1 с внутренним диаметром 1.9 мм, изготовленном из Al_2O_3 . Электродная система состояла из трех внешних кольцевых электродов 2, ширина центрального электрода была равна удвоенной ширине боковых S. Это обеспечивало равенство средней плотности тока на всех электродах. Для уменьшения утечки высокочастотного тока на элементы конструкции крайние электроды заземлялись. Расстояние между центральными и боковыми электродами изменялось в пределах от 1.2 до 4.6 см. Эксперименты проводились при ширине электродов S=1.5, 3 и 6 мм. ВЧ напряжение частотой 1—2 МГц подводилось от транзисторного генератора 3. Генератор позволял получать мощность до 100 Вт при работе на активную нагрузку 5 Ом. Характеристики используемого ключевого генератора подробно описаны в [9, 10]. Согласование высокого сопротивления разряда с низким выходным сопроти-

влением генератора обеспечивалось с помощью последовательного колебательного контура, включающего в себя катушку индуктивности L и конденсатор C_1 , а также емкости с электрода на плазму и паразитные емкости конструкции. Изменение вкладываемой в разряд мощности достигалось изменением величины C_1 или напряжения питания выходного каскада генератора.

Электрические характеристики разряда определялись в результате анализа линейной схемы замещения нагрузки генератора. Измеряемыми величинами являлись частота резонанса колебательного контура, эквивалентное активное сопротивление нагрузки генератора R и вкладываемая в разряд мощность. Определение вкладываемой мощности и R производилось с помощью градуировочных измерений при работе генератора на известное активное сопротивление R^* . Сопротивление R^* включалось в состав колебательного контура (рис. 1). Такое включение позволяло избежать ошибок, связанных с потерями в катушке индуктивности и других подводящих цепях, а также с наличием гармоник тока и напряжения при работе генератора в ключевом режиме. При фиксированном значении напряжения источника питания снимались зависимости потребляемого окончательным каскадом генератора тока и мощности, выделяемой в сопротивлении R^* , от величины этого сопротивления. Градуировочные измерения производились при настройке колебательного контура в резонанс и при повышенном давлении газа в капилляре, что исключало возникновение разряда. С целью учета частотной зависимости КПД генератора измерения проводились при различной величине емкости C_1 . Используя полученные при градуировке зависимости, можно при настройке в резонанс колебательного контура определить по потребляемому окончательным каскадом току сопротивление нагрузки генератора и вкладываемую в разряд мощность.

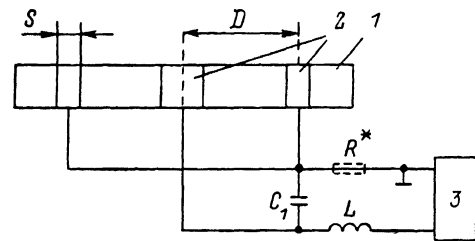


Рис. 1.

Для расчета сопротивления разряда необходимо воспользоваться эквивалентной схемой нагрузки (рис. 2, а). Здесь L — индуктивность катушки колебательного контура, C_L — ее паразитная емкость, R_L — сопротивление потерь. Величина C_1^* определяется суммой емкостей C_1 и паразитной емкости межэлектродных промежутков. C_E — емкость с электрода на плазму через диэлектрик, Z — комплексное сопротивление разрядного промежутка.

Комплексное сопротивление разряда Z может быть представлено в простейшем случае эквивалентной схемой (рис. 2, б). Здесь R_{PL} — активное сопротивление плазмы разряда. Током смещения в наших условиях ($p \sim 50$ Тор, $\omega \sim 10^7$ с $^{-1}$, $n_e \sim 10^{10}$ – 10^{11} см $^{-3}$) можно пренебречь. R_{SH} и C_{SH} — сопротивление и емкость приэлектродных слоев.

В нашем случае величина L составляла 190 мкГн, $C_L=9.7$ пФ, сопротивление потерь на частоте 2 МГц $R_L=2.8$ Ом. В экспериментах значение C_1 менялось в пределах 35–100 пФ, паразитная емкость составляла единицы пикофарад. Значения C_E рассчитывались по формулам для цилиндрического конденсатора и измерялись при заполнении капилляра жидким металлом. Величина C_E была пропорциональна ширине электродов и составляла 2.2 пФ при $S=3$ мм.

На резонансной частоте представленная на рис. 2, а схема является чисто активным сопротивлением, величина которого определялась по нагрузочным характеристикам генератора. Эквивалентная емкость колебательного контура рассчитывалась из условия резонанса по величине L . Если известны величины всей эквивалентной схемы рис. 2, а, то по величине эквивалентной емкости можно рассчитать емкостную составляющую Z . Необходимые для вычислений значения емкости C_1^* определялись из измерений резонансной частоты при отсутствии разряда.

Как следует из рис. 2, б, эквивалентная схема разрядного промежутка содержит даже в простейшем случае три элемента: R_{PL} , R_{SH} , C_{SH} . Определяемые же в результате эксперимента значения компонент Z позволяют найти лишь две составляющие импеданса разряда. Для определения всех входящих в эквива-

лентную схему элементов производились измерения Z в приборе с различным межэлектродным расстоянием. При этом предполагалось, что значение R_{PL} пропорционально длине плазменного столба D' , а описывающие слой элементы R_{SH} , C_{SH} определяются только средней плотностью тока на электродах и их шириной и не зависят от D' . Для удобства вычислений поля в положительном столбе и выделяемой в слоях мощности использовалась несколько модифицированная схема разряда (рис. 2, в). Здесь

$$R_{SH}^* = \frac{R_{SH}}{1 + (\omega R_{SH} C_{SH})^2}, \quad (1)$$

$$C_{SH}^* = \frac{1 + (\omega R_{SH} C_{SH})^2}{R_{SH}^2 \omega^2 C_{SH}} \quad (2)$$

— приведенное сопротивление и емкость слоев. При этом экспериментально определяемые компоненты Z соответствуют C_{SH}^* и сопротивлению разряда $(R_{PL} + R_{SH}^*)$. Значения разрядного тока (I и падения напряжения на этом сопротивлении U^* могут быть вычислены по известной величине, вкладываемой в разряд мощности Q

$$U^* = \sqrt{Q(R_{PL} + R_{SH}^*)}, \quad (3)$$

$$I = \sqrt{Q/(R_{PL} + R_{SH}^*)}. \quad (4)$$

Величина U^* складывается из величин падения напряжения на плазменном столбе и на приведенном активном сопротивлении слоя U_{SH}^*

$$U^* = IR_{PL} + IR_{SH}^* = (E/p) pD' + U_{SH}^*, \quad (5)$$

где E — поле в плазме, p — давление газа, D' — длина плазменного столба.

На рис. 3 представлена типичная зависимость U^* от межэлектродного расстояния D . Видно, что она в пределах погрешности измерений представляет собой прямую, следовательно, по величине ее наклона, согласно (5), можно определить электрическое поле в плазме. При вычислении E/p предполагалось, что длина плазменного столба равна длине разрядного промежутка. Справедливость данного предположения подтверждалась визуальными наблюдениями разряда, которые показали, что его свечение является однородным во всем столбе, кроме тонких (~долей миллиметра) приэлектродных слоев. Полученные таким образом значения E/p в газовой смеси при различных величинах разрядного тока и ширины электродов приведены на рис. 4. Как видно, величина E/p составляет ~ 2 В/см·Тор и слабо зависит от параметров разряда. Для He величина E/p при давлении 10 Тор составляет ~ 8 и ~ 3 В/см·Тор при давлении 30 Тор. Эффективные значения E/p в He несколько превышали полученные в разряде постоянного тока [11] в сходных по параметру pr условиях (r — внутренний радиус капилляра). В пределах погрешности измерений величина E/p не зависит от ширины электродов и плотности разрядного тока. Влияние нагрева газа на величину E/p не учитывалось в силу невысокой точности измерений. Погрешности в определении E/p определялись в основном температурным уходом параметров элементов согласующей цепи, который ограничивает точность измерения частоты значением ~ 1 кГц.

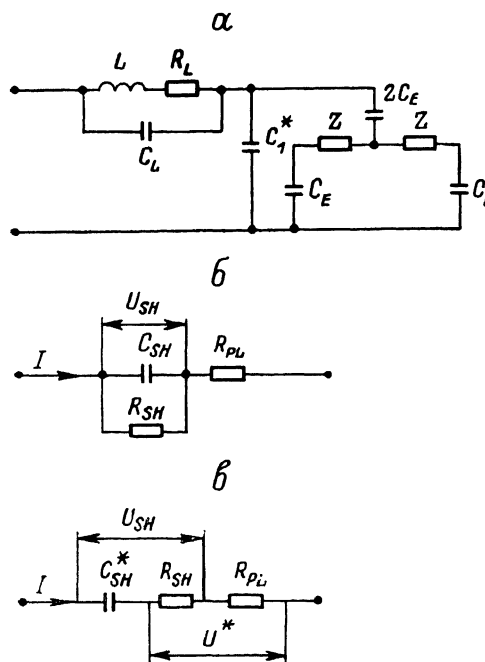


Рис. 2. Используемые при определении характеристик разряда эквивалентные схемы.

а — нагрузки генератора, б — разряда, в — модифицированная нагрузка разряда.

а — нагрузки генератора, б — разряда, в — модифицированная нагрузка разряда.

Важным в практических приложениях является мощность, выделяемая в приэлектродных слоях Q_{SH} . Как следует из выражения (5), при уменьшении межэлектродного расстояния до нуля величина U^* стремится к падению напряжения на приведенном активном сопротивлении слоя U_{SH}^* . Поэтому величину мощности, выделяемой в слоях, можно рассчитать как произведение напряжения «отсечки» зависимости U^* от D при $D=0$ на значение разрядного тока. Полученные таким образом значения Q_{SH} для газовой смеси при давлении 60 Тор составляли величину ~ 3 Вт и возрастали с увеличением разрядного тока. Они были близки к значениям Q_{SH} , полученным путем вычитания из полной вкладываемой в разряд мощности Q мощности Q_{PL} , рассеиваемой в положительном столбе. Последняя определялась произведением разрядного тока и падения напряжения на плазменном столбе $Q_{PL}=I(E/p)pD$. Аналогичный характер поведения Q_{SH} наблюдался и для разряда в гелии.

Характеризующая потери в слоях удельная мощность W_{SH} определялась как отношение Q_{SH} к внутренней площади капилляра под электродом шириной

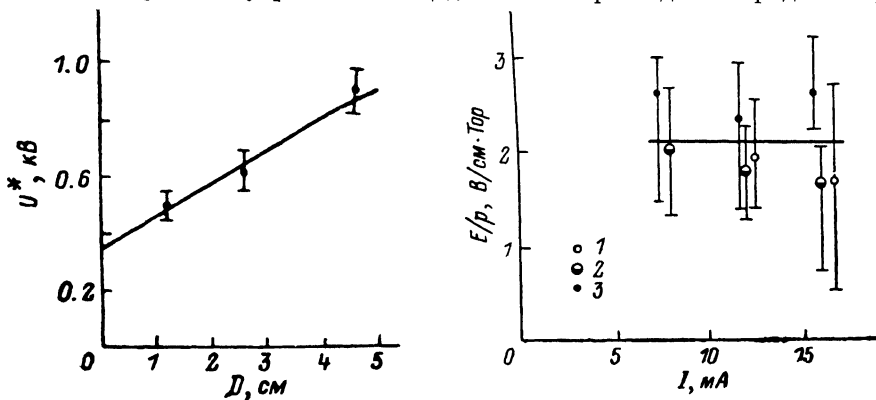


Рис. 3. Зависимость падения напряжения на активной компоненте комплексного сопротивления разряда в газовой смеси от межэлектродного расстояния.

$I - 12$ мА, $S = 1.5$ мм, $p = 60$ Тор.

Рис. 4. Измеренные величины E/p , разряд в газовой смеси при $p = 60$ Тор.

S , мм: 1 — 0.15, 2 — 0.3, 3 — 0.6.

S . Зависимости W_{SH} от плотности разрядного тока вблизи электрода в газовой смеси и в He приведены на рис. 5. При этом предполагалось, что толщина приэлектродных слоев значительно меньше радиуса капилляра, и поэтому плотность тока J , как и W_{SH} , вычислялась как отношение разрядного тока I к площади поверхности капилляра под электродом. Видно, что в газовой смеси W_{SH} возрастает с плотностью тока при $J > 20$ мА/см². При $J < 20$ мА/см² удельная мощность, выделяемая в слоях, практически не зависит от плотности тока. В условиях данных экспериментов это означает, что для уменьшения потерь в слоях увеличивать ширину электродов более чем до 3 мм не имеет смысла.

Значения описывающих слой элементов R_{SH} и C_{SH} рассчитывались по известным R_{SH}^* , C_{SH}^* с помощью соотношений (1), (2). Зная мощность, рассеиваемую в слое Q_{SH} и R_{SH} , можно по (3) вычислить падение напряжения в слое U_{SH} . Погрешность всех этих расчетов определяется неопределенностью, с которой известно электрическое поле в плазме (рис. 4). Напряжение в слоях слабо падает с ростом плотности тока. В гелии величина U_{SH} составляет в среднем 500 В и практически не зависит от давления. В используемой газовой смеси при плотности тока $J = 10$ мА/см² величина U_{SH} достигает 1500 В и с ростом J до 50—100 мА/см² падает до 1000 В. Толщина приэлектродных слоев H_{SH} оценивалась по значению C_{SH} из формулы для цилиндрического конденсатора с площадью обкладок равной площади поверхности капилляра под электродом. В газовой смеси при давлении 60 Тор и $J = 8$ мА/см² толщина слоя составляла 0.8 мм и уменьшалась до 0.12 мм с ростом плотности тока до 100 мА/см². Для разряда

в He толщина слоев составляла 0.5 мм при $J=10$ мА/см² как при давлении 10, так и 30 Тор. При этом она уменьшалась обратно пропорционально плотности тока.

В настоящее время отсутствует теория, адекватно описывающая процессы в приэлектродных слоях при различных режимах высокочастотного разряда. Тем не менее для лучшего понимания явлений представляет интерес сравнение полученных результатов с теоретическими предсказаниями. Теория [3] описы-

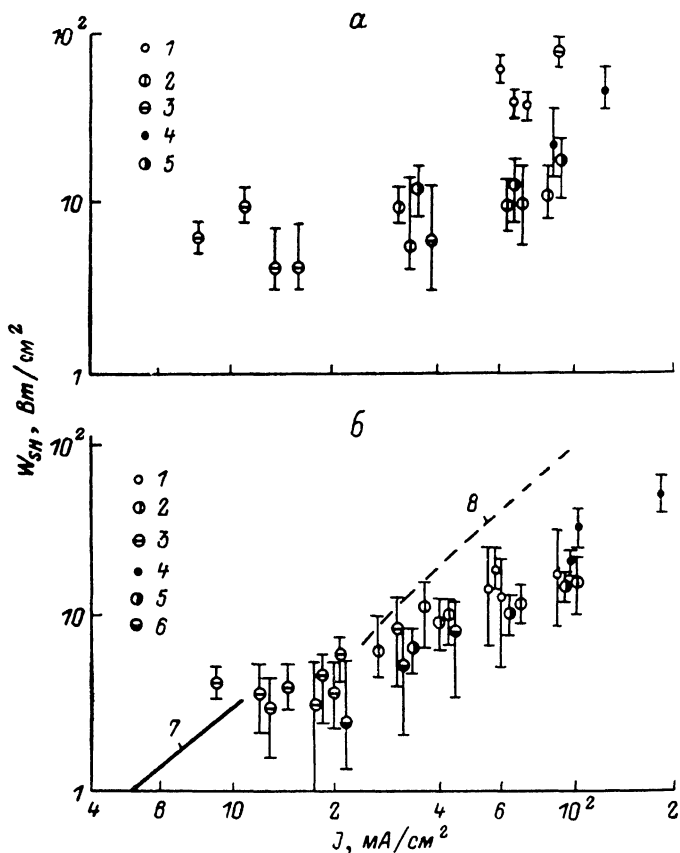


Рис. 5. Зависимости удельной мощности, выделяемой в слоях, от плотности тока вблизи электродов для разряда в газовой смеси при $p=60$ Тор (а) и для разряда в гелии при $p=10$ Тор (б). 1-6 — эксперимент при S , мм: 1, 4 — 0.15; 2, 5 — 0.3; 3, 6 — 0.6 (1-3 — по мощности, 4-6 — по «отсечке»); 7, 8 — расчет по [3] и [13] соответственно.

вает явления в слоях, характеризующихся емкостной проводимостью, т. е. при выполнении условия

$$J_e \gg J_i, \quad (6)$$

где J_e и J_i — плотности тока смещения и ионного тока соответственно.

При этом считается, что концентрация ионов в слое постоянна, а электрическое поле задается током смещения, величина которого является заданной. Размер слоев и падение напряжения на них определяются из условия баланса ионов в слое, которые образуются за счет ионизации электронами, выбитыми из электрода, и теряются за счет выноса на электрод в постоянной составляющей электрического поля. При расчете задавались величина плотности тока смещения и коэффициент электронно-ионной эмиссии γ . Константы A и B , аппроксимирующие коэффициент Таусенда, и значения подвижности ионов брались из [12]. Параметром при сравнении с экспериментом служила величина суммарной плотности тока, вычисляемая из выражения

$$J = \sqrt{J_e^2 + J_i^2}, \quad (7)$$

которое справедливо при выполнении условия (6). Результаты расчета выделяемой в слое мощности для разряда в гелии приведены на рис. 5, б сплошной линией. При $J \approx 20$ мА/см² ионный ток, согласно [3], уже в несколько раз превышает ток смещения. Тем не менее, как видно из рисунка, рассчитанные для $\gamma = 0.1$ при $J < 20$ мА/см² величины W_{SH} оказались близкими к экспериментально полученным. Измеренные значения толщины слоя не более чем в два раза превышают расчетные. Напряжение на слоях также оказывается близким к измеренному экспериментально. Следует отметить, что в [3] предполагалось, что концентрация ионов в слое не зависит от координаты, в то время как численный расчет [4] дает достаточно плавный спад концентрации ионов при подходе к электроду. Допущенное в расчетах предположение приводит к завышению значений ионного тока на электрод. Таким образом, область значений плотности разрядного тока, в которой справедливы основные предположения [3] и условие (6), может выполняться в более широком диапазоне условий, чем это следует из оценок [3].

Проведенный в [3] анализ показал, что при высокой плотности тока, когда не выполняется условие (6), концентрация в слое не является стационарной во времени и слой формируется за времена меньше периода ВЧ напряжения. В предельном случае большой плотности тока или малой частоты можно, следуя [5], оценить характеристики слоев, используя теорию прикатодной области тлеющего разряда постоянного тока [13]. При этом задается величина ионного тока на электрод и, согласно [13], рассчитывается падение напряжения в слое и электрическое поле у катода E_0 . Величину плотности тока смещения можно оценить по формуле

$$J_c = \frac{\omega}{4\pi} E_0, \quad (8)$$

а полного тока согласно (7). Рассчитанные таким образом значения W_{SH} представлены на рис. 5, б штриховой линией, откуда видно, что такие оценки дают правильные по порядку величины значения W_{SH} при $J < 100$ мА/см². Следует отметить, что оба расчета дают слабый рост падения напряжения в слоях с плотностью тока, в то время как экспериментальная вольт-амперная характеристика слоя является падающей. Причиной этого может быть, в частности, нагрев в приэлектродных слоях, которые приводят к уменьшению плотности газа вблизи электродов и, следовательно, к росту толщины слоя и падения напряжения на нем. Кроме того, следует отметить, что при малых значениях плотности тока в наших экспериментах толщина слоя ~ 0.5 мм была сравнима с внутренним радиусом капилляра (~ 1 мм) и, следовательно, могли быть существенны эффекты полого катода [14].

Таким образом, на основе анализа линейной электротехнической модели емкостного ВЧ разряда, учитывающей емкость и сопротивление приэлектродных слоев, получены основные характеристики плазмы положительного столба в слое разряда в диэлектрическом капилляре. Исследования, проведенные в гелии и газовой смеси, содержащей углекислый газ, показали следующее. Измеренные величины (эффективные значения) электрического поля в плазме разряда в гелии оказались близкими к данным, полученным в разряде постоянного тока при сходных значениях произведения давления газа на внутренний радиус капилляра. Величина электрического поля в используемой газовой смеси при давлении 60 Тор $E/p \approx 2$ В/см·Тор. Измерения показали, что мощность, выделяемая вблизи электродов, составляет ~ 3 Вт. В условиях данного эксперимента минимальным потерям в слоях разряда в газовой смеси соответствует ширина электродов ~ 3 мм, что дает для плотности тока значение ~ 20 мА/см². Проведенное сравнение экспериментально измеренных характеристик слоев с имеющимися к настоящему времени теоретическими моделями показало, что теория позволяет по порядку величины оценить мощность, выделяемую в приэлектродных слоях, а также их толщину и падение напряжения.

Авторы выражают признательность С. В. Томашевичу и В. Г. Моисееву, изготовившим генератор для данной работы.

Литература

- [1] Левитский С. М. // ЖТФ. 1957. Т. 27. Вып. 5. С. 970—977.
- [2] Левитский С. М. // ЖТФ. 1957. Т. 27. Вып. 5. С. 1001—1009.
- [3] Смирнов А. С. // ЖТФ. 1984. Т. 54. Вып. 1. С. 61—65.
- [4] Райзер Ю. П., Шнейдер М. Н. // Физика плазмы. 1987. Т. 13. Вып. 4. С. 471—479.
- [5] Яценко Н. А. // ЖТФ. 1981. Т. 51. Вып. 6. С. 1195—1204.
- [6] Яценко Н. А. // ЖТФ. 1980. Т. 50. Вып. 11. С. 2480—2482.
- [7] Калмыков А. В., Моисеев В. Г., Смирнов А. С. и др. // Тез. докл. V Всесоюзн. конф. «Оптика лазеров». Л., 1986. С. 60.
- [8] Xin I. G., Allcock G., Hall D. R. // J. Phys. E. Sci. Instr. 1986. Vol. 19. N 3. P. 210—212.
- [9] Калмыков А. В., Моисеев В. Г., Сиверс М. А. и др. // Тез. докл. V Всесоюзн. конф. «Оптика лазеров». Л., 1986. С. 61.
- [10] Калмыков А. В., Моисеев В. Г., Смирнов А. С. и др. // Судостроительная промышленность. Сер. Сварка. 1987. Вып. 3. С. 28—33.
- [11] Karelina N. A. // J. of Phys. (USSR). 1942. Vol. 6. N 5. P. 218—223.
- [12] Грановский В. Л. Электрический ток в газе. Установившийся ток. М.: Наука, 1971. 544 с.
- [13] Энгель А., Штенбек М. Физика и техника электрического разряда в газах. М.; Л., 1936. 382 с.
- [14] Москалев Б. И. Разряд с полым катодом. М.: Энергия, 1969. 184 с.

Ленинградский политехнический
институт им. М. И. Калинина

Поступило в Редакцию
26 февраля 1988 г.