

## УСЛОВИЯ ПОЯВЛЕНИЯ НОРМАЛЬНОГО РЕЖИМА РАЗРЯДА ПОСТОЯННОГО ТОКА НИЗКОГО ДАВЛЕНИЯ

В.А. Лисовский\*, Н.Д. Харченко\*\*

\*Харьковский национальный университет имени В.Н. Каразина  
Украина

\*\*Научный физико-технологический центр МОН и НАН Украины (Харьков)  
Украина

Поступила в редакцию 22.11.2006

В данной работе с помощью простой модели объясняется, почему нормальный режим в коротких разрядных трубках появляется при условиях вблизи и справа от точки перегиба кривой зажигания разряда постоянного тока.

Как известно [1 – 9], тлеющий разряд постоянного тока может гореть в двух режимах – нормальном и аномальном. В аномальном режиме увеличение разрядного тока  $I_{dc}$  сопровождается ростом напряжения на катодном слое  $U_c$  (и напряжения на электродах  $U_{dc}$ ) и уменьшением толщины катодного слоя  $d_c$ , при этом весь катод покрыт разрядом. В нормальном режиме только часть поверхности катода покрыта разрядом. При уменьшении разрядного тока катодное падение напряжения и толщина катодного слоя сохраняются постоянными ( $U_c = U_n$ ,  $pd_c = (pd_c)_n$ , где  $p$  – давление газа), занимаемая разрядом на катоде площадь  $S$  уменьшается, при этом плотность тока  $j = I/S$  сохраняется также постоянной ( $j = j_n$ ). В работах [3, 10, 11] утверждается, что нормальный режим горения может наблюдаться только справа от минимума кривой зажигания тлеющего разряда (т.е. при  $pL \geq (pL)_{min}$ , где  $L$  – расстояние между электродами), а при меньших давлениях газа тлеющий разряд горит только в аномальном режиме.

В то же время авторы работы [12] измерили характеристики катодного слоя (катодное падение напряжения  $U_c$ , толщина катодного слоя  $d_c$ , отношение плотности тока к квадрату давления газа  $j/p^2$ ) тлеющего разряда низкого давления в аргоне и азоте и получили, что нормальный режим горения может наблюдаться только справа от точки перегиба кривой зажигания тлеющего разряда.

На рис.1 показаны измеренные авторами [12] кривые зажигания тлеющего разряда  $U_{br}(p)$ , а также зависимости наименьшего ка-

тодного падения напряжения  $U_{cmin}$  от давления газа  $p$ . Наименьшим катодным падением авторы [12] назвали падение напряжения на катодном слое перед погасанием разряда.

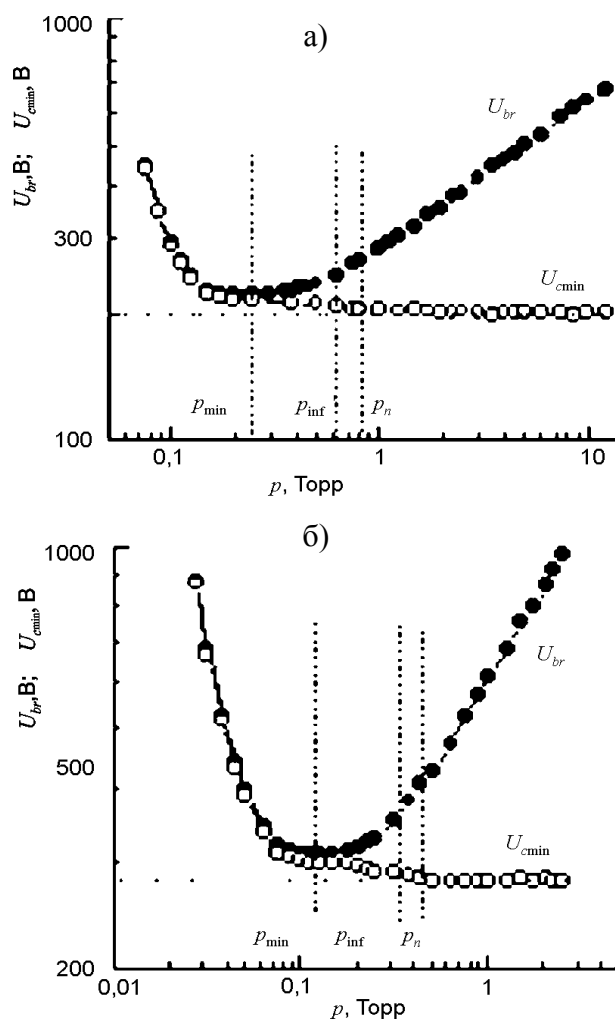


Рис. 1. Кривая зажигания тлеющего разряда  $U_{br}$  и зависимость наименьшего катодного падения напряжения  $U_{cmin}$  от давления аргона (а) и азота (б), измеренные в [12].

Из рис. 1 видно, что с ростом давления газа наименьшее катодное падение напряжения уменьшается и при  $p = p_n$  достигает минимальной величины  $U_{cmin} = U_n$  (для аргона  $U_n = 200 \pm 3$  В, для азота  $U_n = 280 \pm 3$  В).

В работе [13] показано, что на кривых зажигания справа от минимума существует точка перегиба с координатами  $p = p_{inf}$  и  $U_{br} = U_{br,inf}$  для которой справедливы соотношения:

$$\frac{U_{br,inf}}{U_{br,min}} = \frac{e}{2}, \quad \frac{p_{inf}}{p_{min}} = e, \quad (1)$$

где  $e$  – основание натуральных логарифмов,  $p_{min}$  и  $U_{br,min}$  – координаты минимума кривой зажигания. Авторы [12] заметили, что пороговое давление  $p_n$  для появления нормального режима горения находится справа от точки перегиба. Этот вывод они подтвердили измерениями вольт-амперных характеристик разряда, а также визуальными наблюдениями свечения разряда вблизи катода.

Авторы [12] объясняют полученный результат тем, что переход из таунсендовского разряда в тлеющий происходит таким образом, что слева от точки перегиба перераспределение потенциала (вызванное возмущением вакуумного поля  $E_{dc}$  возникающим пространственным зарядом) приводит к затруднению размножения электронов, в то время как справа от точки перегиба размножение электронов облегчается благодаря перераспределению потенциала и разряд может гореть при меньших напряжениях. Следовательно, нормальный режим горения может наблюдаться только вблизи и справа от точки перегиба. Однако теоретическими выкладками этот вывод не был подтвержден. Поэтому в данной работе представлено простое теоретическое объяснение, почему нормальный режим появляется именно при условиях вблизи точки перегиба кривой зажигания разряда постоянного тока.

При пробое газа зажигается самостоятельный таунсендовский разряд, который характеризуется низкой плотностью заряженных частиц и малыми токами. Образовавшиеся заряженные частицы возмущают вакуумное распределение электрического поля. Таким образом, величина тока заряженных частиц, которая определяет величину пространствен-

ного заряда, влияет на разность потенциалов между электродами [14]. Представим разность потенциалов между электродами в виде

$$U = U_{br} + \Delta U, \quad (2)$$

где  $U_{br}$  – напряжение пробоя газа,  $\Delta U$  – изменение потенциала. Для  $\Delta U$  в [14] получено выражение

$$\Delta U = U_{br} - U = \frac{\pi^2 \alpha''}{6\alpha'} j^2 L^3, \quad (3)$$

где  $\alpha$  – первый коэффициент Таунсенда,  $\alpha' = d\alpha/dE$ ,  $\alpha'' = d^2\alpha/dE^2$  – первая и вторая производные по напряженности электрического поля, соответственно. Запишем первый коэффициент Таунсенда в виде

$$\alpha = Ap \exp\left(-\frac{Bp}{E}\right), \quad (4)$$

тогда первая и вторая производные  $\alpha'$  и  $\alpha''$  будут

$$\alpha' = ABp^2 \frac{1}{E^2} \exp\left(-\frac{Bp}{E}\right), \quad (5)$$

$$\alpha'' = -2ABp^2 \frac{1}{E^3} \exp\left(-\frac{Bp}{E}\right) + \frac{Ap(Bp)^2}{E^4} \exp\left(-\frac{Bp}{E}\right). \quad (6)$$

Отношение  $\alpha''/\alpha'$  дает

$$\frac{\alpha''}{\alpha'} = -\frac{2}{E} \left(1 - \frac{Bp}{2E}\right). \quad (7)$$

Подставим (7) в (3) и выразим разность потенциалов между электродами  $U$ :

$$U = U_{br} - \frac{\pi^2}{3} \cdot j^2 \cdot \frac{L^3}{E} \cdot \left(\frac{Bp}{2E} - 1\right). \quad (8)$$

Здесь под напряженностью электрического поля  $E$  подразумевается пробойное поле  $E_{br} = U_{br}/L$ . Как было показано в [13], в точке перегиба кривой зажигания разряда постоянного тока выполняется соотношение:

$$\frac{E_{br}}{p} = \frac{B}{2}. \quad (9)$$

Тогда из (8) и (9) следует, что при пробое, происходящем левее точки перегиба ( $p < p_{inf}$ ), напряженность приведенного электрического поля  $E_{br}/p > B/2$ . Следовательно, в этом диапазоне давления газа с ростом плотности тока

$j$  напряжение на электродах увеличивается. Разряд при этих условиях горит в аномальном режиме, полностью покрывая поверхность катода. При этих условиях перераспределение потенциала, вызванное искажением вакуумного пробойного поля накапливающимся пространственным зарядом, затрудняет размножение электронов [4]. Однако в случае пробоя справа от точки перегиба ( $p > p_{inf}$ ) напряженность приведенного электрического поля  $E_{br}/p < B/2$ . При этом перераспределение потенциала облегчает условия для размножения заряженных частиц. Вольт-амперная характеристика становится падающей, горение разряда в этих условиях неустойчиво, и наблюдается резкий переход из таунсендовского в нормальный режим. Этот нормальный режим с ростом тока занимает все большую часть поверхности катода. После полного заполнения поверхности катода разряд переходит в аномальный режим.

Поэтому очевидно из приведенных здесь формул, что нормальный режим может наблюдаться только в диапазоне давлений справа от точки перегиба кривой зажигания разряда постоянного тока (что и было экспериментально показано в работе [12]).

Таким образом, в настоящей работе с помощью простых формул было объяснен экспериментальный факт (полученный в работе [12]), что нормальный режим горения может существовать только в диапазоне давления газа справа от точки перегиба кривой зажигания разряда постоянного тока.

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Druyvesteyn M.J., Penning F.M. The Mechanism of Electrical Discharges in Gases of Low Pressure // Rev. Modern Phys. – 1940. – Vol. 12, № 2. – P. 87-174.

#### УМОВИ ПОЯВИ НОРМАЛЬНОГО РЕЖИМУ РОЗРЯДУ СТАЛОГО СТРУМУ ЗА НИЗЬКОГО ТИСКУ

**В.О. Лісовський, Н.Д. Харченко**

У цій роботі за допомогою простої моделі пояснюється, чому нормальний режим у коротких розрядних трубках з'являється за умов поблизу та праворуч від точки перегибу кривої запалювання розряду сталого струму.

2. Francis G. The Glow Discharge at Low Pressure//Handbuch der Physik/ed. S. Flugge/Berlin: Springer. – 1956.– Vol 22.– P. 53-208.
3. Грановский В.Л. Электрический ток в газе. Установившийся ток.– М.: Наука, 1971.– 544с.
4. Райзер Ю.П. Физика газового разряда. – М.: Наука, 1987. – 592 с.
5. Мелехин В.Н., Наумов Н.Ю. О природе катодного пятна нормального тлеющего разряда // Письма в ЖТФ. – 1986. – Т. 12, № 2. – С. 99-103.
6. Королев Ю.Д. Интерпретация явления постоянства плотности тока в нормальном тлеющем разряде//ЖТФ. – 1987. – Т. 57, № 2. – С. 380-382.
7. Райзер Ю.П., Суржиков С.Т. Еще раз о природе эффекта нормальной плотности тока на катоде тлеющего разряда//Письма в ЖТФ. – 1987. – Т. 13, № 8. – С. 452-456.
8. Lister G.G. Low-pressure gas discharge modeling//J. Phys. D: Appl. Phys. – 1992. – Vol. 25, № 12. – P. 1649-1680.
9. Goto M., Kondoh Y. Monte Carlo Simulation of Normal and Abnormal Glow Discharge Plasmas Using the Limited Weight Probability Method// Jpn. J. Appl. Phys.– 1998.– Vol. 37, Pt. 1, № 1.– P. 308-312.
10. Клярфельд Б.Н., Гусева Л.Г., Покровская-Соболева А.С. Тлеющий разряд при низких давлениях и плотностях тока до  $0.1 \text{ a/cm}^2$ //ЖТФ. – 1966. – Т. 36, № 4. – С. 704-713.
11. Vlasov V.V., Guseva L.G., Klarfeld B.N. Transition of one type glow discharge into another// Proc. X Intern. Conf. On Phenomena in Ionized Gases. Contrib. Pap. 1 – Oxford. – 1971. – P. 98.
12. Лисовский В.А., Яковин С.Д. Характеристики катодного слоя тлеющего разряда низкого давления в аргоне и азоте//Письма в ЖТФ. – 2000. – Т. 26, Вып. 19. – С. 88-94.
13. Lisovskiy V.A., Yegorenkov V.D. Low-pressure gas breakdown in combined fields//J. Phys. D: Appl. Phys. – 1994. – Vol. 27, No. 11. – P. 2340-2348.
14. Смирнов Б.М. Физика слабоионизованного газа. – М.: Наука, 1972. – 416 с.

#### CONDITIONS OF THE NORMAL MODE APPEARANCE IN THE DC GLOW DISCHARGE

**V.A. Lisovskiy, N.D. Kharchenko**

In this work with the help of the simple mathematical model reasons of normal mode appearance in short discharge chambers under the conditions close and to the right from the extreme point of the DC breakdown curve are explained.