

ЗАКОН ПОДОБИЯ ПРИ ПРОБОЕ ГАЗА НИЗКОГО ДАВЛЕНИЯ В ОДНОРОДНОМ ПОСТОЯННОМ ЭЛЕКТРИЧЕСКОМ ПОЛЕ

В.А.Лисовский¹⁾, С.Д.Яковин*

Харьковский национальный университет
310077 Харьков, Украина

* Научный физико-технологический центр НАН и Министерства образования Украины
310145 Харьков, Украина

Поступила в редакцию 15 марта 2000 г.

После переработки 5 июня 2000 г.

Экспериментально исследован пробой азота, воздуха и кислорода в однородном постоянном электрическом поле при различных расстояниях между электродами L . Получен закон подобия при пробое газа низкого давления $U_{dc} = f(pL, L/R)$, то есть пробойное напряжение U_{dc} является функцией не только произведения давления газа p и величины зазора L , но и функцией отношения величины зазора L к радиусу камеры R . Показано, что при любых геометрических размерах цилиндрической разрядной камеры (в исследованном нами диапазоне L/R) в минимуме кривых зажигания отношение пробойного электрического поля к давлению газа p сохраняется как постоянная величина: $(E_{dc}/p)_{\min} \approx \text{const}$. Представлен метод, позволяющий предсказать кривую зажигания в цилиндрической разрядной камере при произвольных значениях L и R .

PACS: 52.80.-s

Как известно [1–7], кривые зажигания тлеющего разряда описываются законом Пашена $U_{dc} = f(pL)$, то есть пробойное напряжение U_{dc} является функцией произведения давления газа p на расстояние между электродами L . Закон Пашена означает, что кривые зажигания $U_{dc}(p)$, измеренные для различных расстояний L , должны наложиться друг на друга, если их построить как функцию $U_{dc}(pL)$. Однако авторы [8] измерили кривые зажигания тлеющего разряда в неоне и обнаружили, что при одинаковых значениях произведения pL пробойное напряжение в случае большого разрядного промежутка с плоскими электродами заметно выше, чем в случае короткого промежутка. Более поздние исследования [9–14] подтвердили этот вывод для ряда газов (неон, аргон, азот, водород и другие). Несмотря на большое количество экспериментальных и теоретических работ, посвященных пробое газа низкого давления в постоянном электрическом поле, до сих пор отсутствует метод, позволяющий предсказать кривую зажигания при произвольных значениях расстояния между электродами L и радиуса разрядной камеры R .

В настоящей работе экспериментально исследован пробой азота, воздуха и кислорода в постоянном электрическом поле в разрядной камере с различными расстояниями между электродами L . Показано, что в исследованном нами диапазоне L/R при увеличении величины промежутка L кривые зажигания смещаются в область более высоких значений произведения pL и пробойных напряжений U_{dc} . При этом в минимуме кривой зажигания при любых значениях зазора L отношение пробойного электрического поля к давлению газа $(E_{dc}/p)_{\min}$ сохраняется постоянным. Получен обобщенный закон подобия при пробое газа низкого давления $U_{dc} = f(pL, L/R)$.

¹⁾ e-mail: lisovskiy@ftf.univer.kipt.kharkov.ua

Описан метод предсказания кривой зажигания тлеющего разряда в цилиндрической камере с произвольными геометрическими размерами из кривой зажигания для узкого разрядного промежутка (при $L/R \rightarrow 0$), то есть из обычной кривой Пашена.

Мы измерили кривые зажигания тлеющего разряда в диапазоне постоянных напряжений $U_{dc} \leq 1000$ В и давлений $p \approx 10^{-2} - 10$ торр. Использовалась разрядная трубка с внутренним диаметром 63 мм. Расстояние между электродами L было равно 0.5 – 10 см, поэтому исследованный нами диапазон $L/R = 0.16 - 3.2$. Плоские параллельные электроды занимали все поперечное сечение разрядной трубки. Анод и катод были изготовлены из нержавеющей стали. Точность измерения пробойного напряжения была ± 2 В. Скорость нарастания напряжения при определении потенциала зажигания разряда не превышала 1 В/с. Во всех случаях наша методика измерения кривых зажигания была следующей. Мы устанавливали определенное расстояние между электродами L и затем при различных давлениях газа p измеряли пробойное напряжение U_{dc} . Ниже мы объясним, почему именно этот способ измерения кривых зажигания тлеющего разряда является правильным.

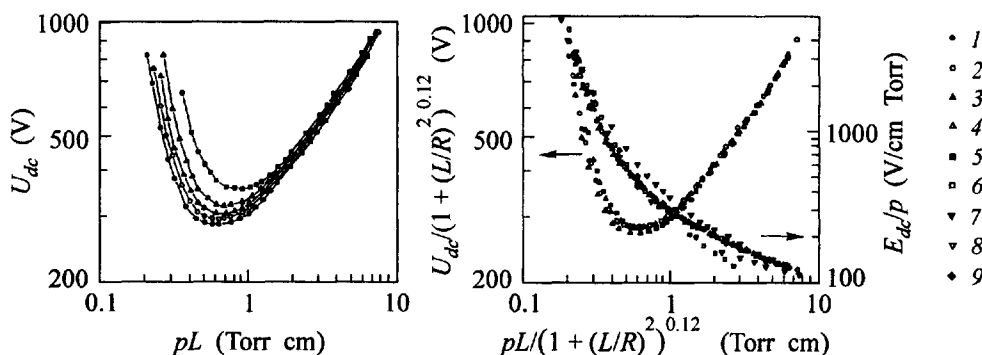


Рис.1. а) Экспериментальные кривые зажигания тлеющего разряда в азоте при расстояниях между электродами (см.): 1 - $L = 0.5$, 2 - 2, 3 - 4, 4 - 6, 5 - 8; б) зависимости U_{dc}^* и E_{dc}/p от $(pL)^*$: 1 - 5 - кривые зажигания из рисунка а, 6 - данные [11], 7 - данные [15], 8 - данные [16], 9 - данные [18]

На рис.1 показаны измеренные нами кривые зажигания для азота при различных расстояниях между электродами L . Из рисунка следует, что при увеличении L кривые зажигания смещаются не только в область более высоких пробойных напряжений U_{dc} (как это было получено в [9–14]), но одновременно и в область более высоких значений pL . По-видимому, такое смещение кривых зажигания в область более высоких U_{dc} и pL при увеличении расстояния между электродами L связано с возрастанием потерь заряженных частиц на боковых стенках разрядной трубки из-за диффузии поперек электрического поля.

На рис.2 показаны зависимости U_{min} и $(E_{dc}/p)_{min}$ от величины $(pL)_{min}$, полученные из наших экспериментальных кривых зажигания разряда в азоте для различных расстояний L . Сплошная линия на этом рисунке $U_{min} = 407(pL)_{min}$ и пунктирная линия $(E_{dc}/p)_{min} = 407 \pm 5$ В/см·торр удовлетворительно описывают полученные нами результаты. Следовательно, как бы мы ни изменяли расстояние между электродами L , в минимуме кривой зажигания отношение $(E_{dc}/p)_{min}$ остается постоянной величиной. Это же правило выполняется, если изменять величину коэффициента ион-электронной эмиссии γ материала катода (что отмечено в [2, 3]).

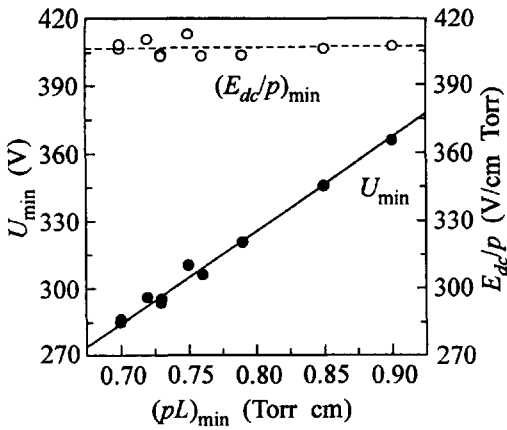


Рис.2. Зависимости U_{\min} и $(E_{dc}/p)_{\min}$ от $(pL)_{\min}$ для азота; сплошная кривая - $U_{\min} = 407(pL)_{\min}$, пунктирная кривая - $(E_{dc}/p)_{\min} = 407 \text{ В/см}\cdot\text{торр}$

Отметим, что при соответствующем выборе координатных осей можно добиться того, что все измеренные нами кривые зажигания практически совпадут. Например, если по осям абсцисс и ординат отложить, соответственно,

$$(pL)^* = pL / (1 + (L/R)^2)^a, \quad (1)$$

$$U_{dc}^* = U_{dc} / (1 + (L/R)^2)^a, \quad (2)$$

где для азота $a \approx 0.12$, то приведенные на рис.1а кривые зажигания накладываются друг на друга с точностью $\pm 5 \text{ В}$ (рис.1б). Очевидно, что при $L/R \rightarrow 0$ мы имеем обычную кривую Пашена $U_{dc} = f(pL)$. Из (1) и (2) видно, что $U_{dc}^*/(pL)^* = U_{dc}/pL = E_{dc}/p$, то есть зависимости $E_{dc}/p = f((pL)^*)$ для различных кривых зажигания также должны совпадать (что мы и видим на рис.1б). Здесь же мы видим разумное согласие наших данных с результатами работ [11, 15-18]. Для воздуха мы имеем $a \approx 0.09$ (рис.3), для кислорода - $a \approx 0.03$ (рис.4). При этом приведенные на рис.3 и 4

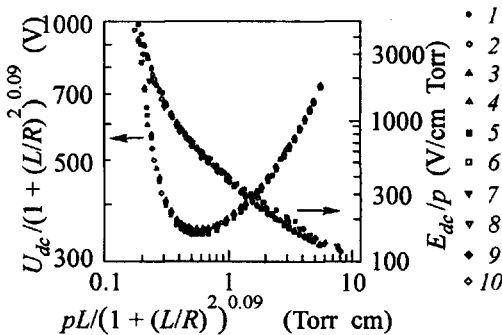


Рис.3. Зависимости U_{dc}^* и E_{dc}/p от $(pL)^*$ для воздуха (см.): 1 - $L = 0.5$, 2 - 1, 3 - 2, 4 - 5, 5 - 10, 6 - данные [15], 7 - данные [19], 8 - данные [16], 9 - данные [20], 10 - данные [21]

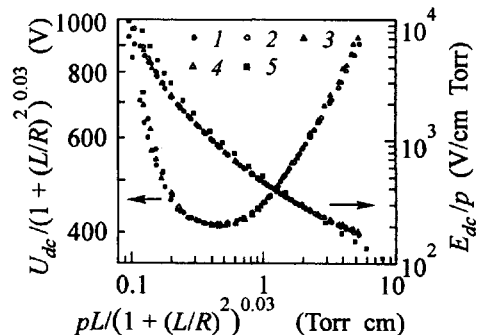


Рис.4. Зависимости U_{dc}^* и E_{dc}/p от $(pL)^*$ для кислорода (см.): 1 - $L = 0.5$, 2 - 2, 3 - 6, 4 - 8, 5 - данные [15]

зависимости $E_{dc}/p = f((pL)^*)$, полученные нами из экспериментальных результатов [2, 9, 15, 16, 19], удовлетворительно согласуются с нашими данными. Из наших результатов следует, что закон подобия при пробое газа можно записать в виде $U_{dc} = f((pL, L/R))$, или же $U_{dc}^* = f((pL)^*)$.

С помощью соотношений (1), (2) и приведенных на рисунках значений пробойных напряжений мы можем с хорошей точностью предсказать кривые зажигания в любой цилиндрической разрядной камере при произвольных величинах расстояния L и радиуса R . Например, определим положение минимума кривой зажигания разряда в азоте при $R = 3.15$ см и $L = 5$ см для катода из нержавеющей стали. Из рис.1б видно, что $U_{min}^* \approx 280$ В, $(pL)_{min}^* \approx 0.6$ торр·см. Из соотношений (1) и (2) получим

$$(pL)_{min} = (pL)_{min}^*[1 + (L/R)^2]^{0.12}, \quad (3)$$

$$U_{min} = U_{min}^*[1 + (L/R)^2]^{0.12}. \quad (4)$$

Для $L/R = 1.59$ имеем $U_{min} \approx 323$ В, $(pL)_{min} \approx 0.7$ торр·см. Из наших экспериментальных результатов следует, что $U_{min} \approx 320$ В, $(pL)_{min} \approx 0.73$ торр·см, то есть наблюдается удовлетворительное согласие между координатами минимума кривой зажигания, полученными экспериментально, и предсказанными из соотношений (1) – (4). Для предсказания любой другой точки на кривой зажигания U_1^* и $(pL)_1^*$ поступаем аналогичным образом. В общем случае для предсказания кривой зажигания в цилиндрической разрядной камере с произвольными геометрическими размерами нужно иметь кривую Пашена (то есть кривую зажигания, измеренную в разрядной камере с $L/R \rightarrow 0$ с катодом из нужного материала) и затем с помощью соотношений (1) и (2) определить искомые значения U_{dc} и pL . Если же первоначальная кривая зажигания была измерена в разрядной камере с L_0 и R_0 , для которой условие $L_0/R_0 \rightarrow 0$ не справедливо, то сначала нужно с помощью соотношений (1), (2) построить зависимость $U_{dc}^* = f((pL)^*)$, а затем рассчитать с ее помощью из тех же соотношений (1), (2) искомую кривую зажигания в разрядной камере с заданными размерами L_1 и R_1 . Более коротко это можно выразить так:

$$(pL)_1 = pL_0 \left[\frac{1 + (L_1/R_1)^2}{1 + (L_0/R_0)^2} \right]^a, \quad (5)$$

$$U_{dc1} = U_{dc0} \left[\frac{1 + (L_1/R_1)^2}{1 + (L_0/R_0)^2} \right]^a, \quad (6)$$

где индексы 1 относятся к искомой кривой зажигания, а индексы 0 – к первоначальной известной кривой зажигания.

Кривую зажигания тлеющего разряда, как правило, измеряют двумя методами: 1) фиксируют расстояние L и затем с изменением давления газа p измеряют пробойные напряжения U_{dc} ; 2) устанавливают фиксированное значение p и измеряют пробойные напряжения при различных расстояниях L . Однако из полученных в настоящей работе результатов следует, что второй метод измерения кривой зажигания (при фиксированном p и переменном L) является некорректным. Полученная таким образом “кривая зажигания” будет представлять собой некоторую кривую, которая при небольших L близка к кривой Пашена, но по мере увеличения L смещается в область более высоких пробойных напряжений. Поэтому нужно измерять кривую зажигания тлеющего разряда, установив фиксированное расстояние между электродами L и затем изменяя давление газа p .

Таким образом, в настоящей работе экспериментально исследовано зажигание тлеющего разряда в азоте, воздухе и кислороде при различных межэлектродных зазорах. Показано, что в минимуме кривых зажигания при произвольных значениях

расстояния между электродами L отношение $(E_{dc}/p)_{min}$ сохраняется постоянным. Получено, что в исследованном нами диапазоне L/R выполняется закон подобия при пробое газа $U_{dc} = f(pL, L/R)$, то есть пробойное напряжение U_{dc} является как функцией произведения давления газа p и величины зазора L , так и функцией отношения L/R . Представлен метод, позволяющий предсказать кривую зажигания в цилиндрической разрядной камере при произвольных значениях L и R .

-
1. F.Paschen, *Annalen der Physik und Chemie (Wiedemanns Annalen)* **37**, Ser. 3, 69 (1889).
 2. M.J.Druyvesteyn and F.M.Penning, *Rev. Modern Phys.* **12**, 87 (1940).
 3. Дж.Мик, Дж.Крэгс, *Электрический пробой в газах*, ИИЛ, Москва, 1960, с.128.
 4. Ю.П.Райзер, *Физика газового разряда*, Наука, Москва, 1987, с.316.
 5. V.A.Lisovsky and V.D.Yegorenkov, *J. Phys. D: Appl. Phys.* **27**, 2340 (1994).
 6. A.V.Phelps and Z.Lj.Petrovic, *Plasma Sources Sci. Technol.* **8**, R21 (1999).
 7. M.Sato, *Bull. Yamagata Univ.* **25**, 119 (1999).
 8. J.S.Townsend and S.P.McCallum, *Phil. Mag.* **6**, 857 (1928).
 9. H.Fricke, *Zs. f. Phys.* **86**, 464 (1933).
 10. S.P.McCallum and L.Klatzow, *Phil. Mag.* **17**, 279 (1934).
 11. H.C.Miller, *Physica* **30**, 2059 (1964).
 12. L.Jacques, W.Bruynooghe, R.Boucique, and W.Wieme, *J. Phys. D: Appl. Phys.* **19**, 1731 (1986).
 13. M.Yumoto, T.Sakai, Y.Ebinuma et al., *Proc. 8th Int. Symp. on High Voltage Engineering*, Yokohama, 1993, p. 409.
 14. G.Auday, P.Guillot, J.Galy, and H.Brunet, *J. Appl. Phys.* **83**, 5917 (1998).
 15. M.J.Schonhuber, *IEEE Trans. on Power Apparatus and Systems* **88**, 100 (1969).
 16. T.W.Dakin, J.Gerhold, Z.Krasucki et al., *Proc. Intern. Conf. on Large High Voltage Electric Systems*, Paris, 1977, p.1.
 17. B.Held, N.Soulem, R.Peyrous, and N.Spyrou, *Trans. IEE of Japan* **A116**, 925 (1996).
 18. B.Held, N.Soulem, R.Peyrous, and N.Spyrou, *J. Phys. III France* **7**, 2059 (1997).
 19. J.A.Pim, *Proc. IEE P3* **96**, 117 (1949).
 20. S.C.Brown, *Basic Data of Plasma Physics*, Wiley, New York 1959, p.240.
 21. H.Ritz, *Arch. F. Electrotech.* **26**, 219 (1937).