

МОДИФИЦИРОВАННЫЙ ЗАКОН ПАШЕНА ДЛЯ ЗАЖИГАНИЯ РАЗРЯДА ПОСТОЯННОГО ТОКА

В.А. Лисовский^{*,**}, В.А. Коваль^{*}

**Харьковский национальный университет*

Украина

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

Украина

Поступила в редакцию 04.11.2008

Экспериментально исследован пробой газа в однородном постоянном электрическом поле. Найдено, что с увеличением расстояния между электродами кривые зажигания $U_{dc}(pL)$ смещаются в область более высоких напряжений пробоя U_{dc} и больших значений произведения давления газа на межэлектродное расстояние pL . При этом минимумы кривых зажигания лежат на одной прямой. На основании проведенных экспериментов показано, что обычный закон Пашена выполняется для коротких разрядных трубок, у которых отношение межэлектродного промежутка к радиусу трубки $L/R \leq 1$. Для больших значений L/R нужно пользоваться модифицированным законом $U_{dc} = f(pL, L/R)$. Эксперименты выполнены в цилиндрической разрядной камере с $L/R \leq 9$.

ВВЕДЕНИЕ

Последние несколько десятков лет тлеющий разряд постоянного тока низкого давления широко применяется в разных технологических процессах: в плазменных источниках ионов, при травлении полупроводниковых материалов, очистке поверхности материалов, получении тонких полимерных и оксидных пленок, в приборах тлеющего разряда (стабилитронах, неоновых и газосветных лампах, цифровых индикаторных лампах, некоторых типах разрядников, тиратронах, декатронах), для накачки газоразрядных лазеров, в плазменных дисплейных панелях, для плазменной стерилизации медицинского инструмента и оборудования и т.д.

Широкое использование тлеющего разряда в технологии требует более полного понимания физических процессов, происходящих в разряде. Вследствие этого в последнее время появилось большое число работ, посвященных исследованию тлеющего разряда постоянного тока. Однако, хотя тлеющий разряд постоянного тока достаточно хорошо изучен, имеется ряд вопросов, требующих дополнительных исследований.

Изучение пробоя газа в однородном постоянном электрическом поле является одной из старейших проблем физики газового разряда. Как известно [1 – 25], кривые зажигания тлеющего разряда постоянного тока описыва-

ются законом Пашена $U_{dc} = f(pL)$, т.е. напряжение пробоя U_{dc} является функцией произведения давления газа p и расстояния 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 в ряде работ экспериментально было обнаружено, что при одинаковых значениях произведения pL напряжение пробоя в случае большего разрядного промежутка с плоскими электродами оказывалось заметно выше, чем в случае короткого промежутка [5, 10 – 18]. Исследованию пробоя газа в постоянном поле посвящено множество экспериментальных и теоретических работ, а также ряд монографий [3 – 25]. Однако в этих работах чаще всего основное внимание уделялось исследованию, например, только правой или только левой ветви кривой Пашена, или же кривые зажигания были измерены в узком диапазоне расстояний между электродами с фиксированным радиусом разрядной трубки. Поэтому построить какую-либо целостную картину зажигания тлеющего разряда постоянного тока при низких давлениях газа было довольно сложно.

Изучение зажигания тлеющего разряда постоянного тока является одной из старейших задач в физике газового разряда низкого давления. Зависимость напряжения пробоя U_{dc} от произведения давления газа p и межэлект-

родного расстояния L впервые предсказали Де Ла Ру и Мюллер [26]. В 1889 году Пашен измерил правые ветви кривых зажигания тлеющего разряда постоянного тока между двумя металлическими шарами в воздухе, CO_2 и H_2 в широком диапазоне значений pL и пришел к выводу, что напряжение пробоя U_{dc} является функцией только произведения pL [1]. Закон Пашена означает, что кривые зажигания $U_{dc}(p)$, измеренные для различных расстояний L , должны наложиться друг на друга, если их построить как функцию $U_{dc}(pL)$.

Экспериментальные зависимости кривых зажигания от материала катода измерила Эренкранц [19]. Автор провела измерения в аргоне, азоте и водороде с катодами из платины и натрия справа от минимума кривой Пашена. Во всем исследованном диапазоне давлений газа напряжение пробоя в случае катода, покрытого натрием, было заметно ниже, чем в случае платинового катода. Зависимости кривых зажигания от коэффициента эмиссии γ для различных материалов катода приведены в обзорной статье Дрюйвестейна и Пеннинга [3] и книге Брауна [6] (по результатам измерений различных авторов).

В 1928 году Таунсенд и Мак Келлум измерили кривые зажигания тлеющего разряда постоянного тока в неоне [10] и обнаружили отклонение от закона Пашена. Авторы нашли, что при одинаковых значениях произведения pL напряжение пробоя в случае большего разрядного промежутка с плоскими электродами заметно выше, чем в случае короткого промежутка. Более поздние исследования подтвердили этот вывод для ряда газов (неон, аргон, азот, водород и другие). Миллер провел ряд экспериментов по исследованию пробоя газа в неоне с медными электродами, при этом значения pL изменялись в диапазоне 0,2 – 15 Торр см [14]. Он получил, что при увеличении межэлектродного расстояния L кривые зажигания смещаются в область больших напряжений пробоя. В работах [30, 31] были определены первый α и второй γ коэффициенты Таунсенда для разряда в криптоне и ксеноне, с покрытыми золотом электродами. Авторы измерили кривые зажигания и нашли, что напряжение пробоя не подчиняется закону Пашена, поскольку с увеличе-

нием межэлектродного расстояния потенциал зажигания растет. Зависимости напряжения пробоя от значения pL для небольших межэлектродных расстояний (15–25 мм) и при низких давлениях были измерены в работе [17]. Эксперименты проводились в азоте, воздухе, SF_6 и парах воды. В работе [18] представлены кривые зажигания для разряда в аргоне. Из полученных авторами данных видно, что для большего расстояния между электродами напряжение пробоя выше.

Из приведенных выше работ видно, что при больших расстояниях между электродами для описания экспериментальных кривых зажигания тлеющего разряда постоянного тока закон Пашена использовать нельзя. Как будет показано ниже, область применимости закона Пашена ограничена случаем $L/R \rightarrow 0$ (плоские бесконечные электроды), где L – межэлектродное расстояние, а R – радиус электродов. До появления статей [27–29] этот вопрос оставался открытым, т.к. не было удовлетворительного описания кривых зажигания тлеющего разряда при отношении L/R , не равном нулю. Несмотря на большое количество экспериментальных и теоретических работ, посвященных пробоям газа низкого давления в однородном постоянном электрическом поле, отсутствовал метод, позволяющий предсказать кривую зажигания при произвольных значениях расстояния между электродами L и радиуса разрядной камеры R .

В работах [27–29] авторы исследовали пробой газа низкого давления в ряде газов при различных материалах электродов в цилиндрических трубках в широком диапазоне расстояний между электродами L и радиусов разрядных камер R . Они показали, что пробой газа в постоянном электрическом поле описывается модифицированным законом $U_{dc} = f(pL, L/R)$, т.е. напряжение пробоя U_{dc} оказалось как функцией произведения давления газа и величины зазора pL , так и функцией отношения величины зазора к радиусу разрядной камеры L/R . Эксперименты [27–29] были выполнены в диапазоне $L/R \leq 3$.

Авторы [30] исследовали экспериментально и теоретически пробой гелия низкого давления. Они получили, что несколько процессов дают вклад в особый профиль в кри-

вой зажигания в гелии: 1) зависимость ион-электронной эмиссии от энергии ионов, 2) появление ионизации атомов газа ионным ударом при высоких электрических полях и 3) вторичная электронная эмиссия из катода из-за бомбардировки быстрыми нейтральными атомами. В работе [31] авторы определили коэффициент эффективной вторичной эмиссии в азоте из кривых зажигания разряда постоянного тока. Авторы работы [32] исследовали зажигание разряда в аргоне в микроплазменном устройстве (с зазорами между электродами от 0,1 мм до 0,5 мм).

В работе [33] разработана гидродинамическая модель пробоя газа в постоянном электрическом поле. Показано, что при давлениях газа справа от минимума кривой зажигания нужно учитывать изменение эффективного коэффициента вторичной эмиссии поверхности катода, вызванное эффектом обратного рассеяния электронов при столкновениях с молекулами газа. Пробой аргона низкого давления экспериментально исследован с помощью визуализации эмиссии света из зазора между электродами с временным разрешением в работе [34]. Авторы работы [35] теоретически исследовали распространение ионизационной волны при пробое аргона в цилиндрической трубке. Их гидродинамическая модель включала уравнение непрерывности и импульса для электронов, ионов и нескольких возбужденных состояний атомов аргона, уравнение баланса и уравнение Пуассона.

Авторы работы [36] представили обзор результатов исследования пробоя газа низкого давления в постоянном электрическом поле, когда вторичная эмиссия электронов из катода играет важную роль в развитии пробоя. В работе [37] выполнен статистический анализ динамического напряжения зажигания разряда в азоте. Автор работы [38] исследовал механизм пробоя газа низкого давления (от 10^{-4} до 10^5 Па) и узких зазорах между электродами (от 0,1 до 1 мм). Показано существование “краевого пробоя”, который происходит при низких давлениях (слева от минимума кривой зажигания) вблизи краев электродов. В работе [39] исследована применимость закона подобия в случаях пробоя газа в по-

стоянном и пульсирующем электрическом поле между плоскими электродами, а также двумя острями. В работах [40, 41] исследовано влияние радиоактивного облучения разрядного промежутка на пробой газа в постоянном электрическом поле. Показано, что наличие радиоактивного облучения облегчает зажигание разряда.

В настоящей работе экспериментально исследовано зажигание разряда в постоянном электрическом поле. Подтверждена применимость модифицированного закона пробоя газа в постоянном электрическом поле $U_{dc} = f(pL, L/R)$, т.е. напряжение пробоя U_{dc} оказывается как функцией произведения давления газа и величины зазора pL , так и функцией отношения величины зазора к радиусу разрядной камеры L/R . Эксперименты выполнены в цилиндрической разрядной камере с $L/R \leq 9$.

Модифицированный закон Пашена имеет большое значение для дальнейшего экспериментального изучения тлеющего разряда постоянного тока и для построения теоретических моделей пробоя газа низкого давления в постоянном электрическом поле.

ОПИСАНИЕ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЙ УСТАНОВКИ И МЕТОДИКА ЭКСПЕРИМЕНТА

Для изучения характеристик тлеющего разряда постоянного тока низкого давления использовался экспериментальный комплекс, блок-схема которого показана на рис. 1.

Вакуумная камера 1 представляет собой отрезок цилиндрической трубы из стекла с внутренним диаметром 8 мм, вакуумно-уп-

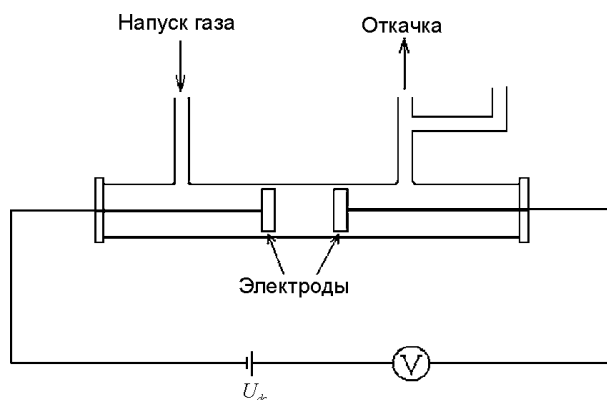


Рис. 1. Блок-схема экспериментальной установки для исследования тлеющего разряда постоянного тока.

лотненный с торцов фланцами. Эксперименты проводились с внутренними цилиндрическими электродами с плоскими торцами, изготовленными из алюминия. Внешний диаметр электродов равен 7 мм, т.е. немного меньше внутреннего диаметра разрядной трубки. Расстояние между катодом и анодом можно было изменять, передвигая один из электродов. Измерения проведены в диапазоне расстояний между электродами $L = 2 - 35$ мм.

Исследования проводились в азоте в диапазоне давлений $p = 0,04 - 10$ Торр. Камера откачивалась форвакуумным насосом до предельного вакуума ($1 \cdot 10^{-3}$ Торр). Рабочий газ напускался при помощи системы напуска СНА-1, давление газа контролировалось вакуумным теплоэлектрическим реле РВТ-2М. Погрешность измерения давления составляла 10 – 15 %. Давление газа в камере устанавливалось путем изменения сечения вакуумпровода регулируемым вакуумным клапаном, что обеспечивало постоянство скорости потока газа в камере при различных давлениях. Постоянный поток газа нужен, чтобы уменьшить влияние на параметры пробоя метастабильных атомов или молекул.

При исследовании зажигания тлеющего разряда постоянного тока на катод подавалось постоянное напряжение $U_{dc} \leq 3000$ В от блока питания БП-67. В разрядную цепь между катодом и источником постоянного напряжения последовательно подключался резистор сопротивлением 1,5 кОм.

Перед выполнением измерений проводили очистку поверхности катода, зажигая тлеющий разряд в азоте при давлении $p \approx 0,5$ Торр и разрядном токе $I_{dc} = 5$ мА в течение 10 мин. При этих условиях поток ионов на катод достаточно велик для удаления монослоев газов, оставшихся на поверхности катода после проведения механической шлифовки и полировки, но разрядный ток еще недостаточен для появления катодных пятен, приводящих к эрозии поверхности катода. Какие-либо внешние источники ионизации не использовались, исследовалось исключительно зажигание самостоятельного тлеющего разряда постоянного тока.

Измерения кривых зажигания проводились следующим способом. Сначала устанавливали

расстояние между электродами L , затем при различных фиксированных давлениях газа p измеряли напряжение пробоя U_{dc} . Точность измерения напряжения пробоя была ± 5 %.

РЕЗУЛЬТАТЫ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОГО ИССЛЕДОВАНИЯ ПРОБОЯ ГАЗА НИЗКОГО ДАВЛЕНИЯ В ПОСТОЯННОМ ЭЛЕКТРИЧЕСКОМ ПОЛЕ

Как известно, кривые зажигания тлеющего разряда постоянного тока описываются законом Пашена $U_{dc} = f(pL)$, т.е. напряжение пробоя U_{dc} является функцией произведения давления газа p и расстояния 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, как было показано во введении, в экспериментальных кривых зажигания наблюдается отклонение от закона Пашена: при одном и том же значении pL напряжение пробоя для больших межэлектродных расстояний L заметно выше, чем для коротких разрядных промежутков.

В настоящей работе представлены результаты экспериментального исследования пробоя газа низкого давления в постоянном электрическом поле. Эксперименты проводились в разрядных камерах с различными расстояниями между электродами L в азоте.

Было найдено, что с увеличением разрядного промежутка кривые зажигания смещаются не только в область более высоких напряжений пробоя U_{dc} , но также в сторону больших значений pL . При этом минимумы кривых зажигания лежат на одной прямой, т.е. $U_{min} \propto (pL)_{min}$. Экспериментально и теоретически найдено, что напряжение пробоя U_{dc} в однородном постоянном электрическом поле является функцией не только произведения pL , но и отношения L/R , т.е. $U_{dc} = f(pL, L/R)$. Показано, что обычный закон Пашена справедлив только для тех разрядных трубок, у которых отношение $L/R \leq 1$.

На рис. 2 представлены экспериментальные кривые зажигания тлеющего разряда постоянного тока в азоте, измеренные нами для различных расстояний L между электродами.

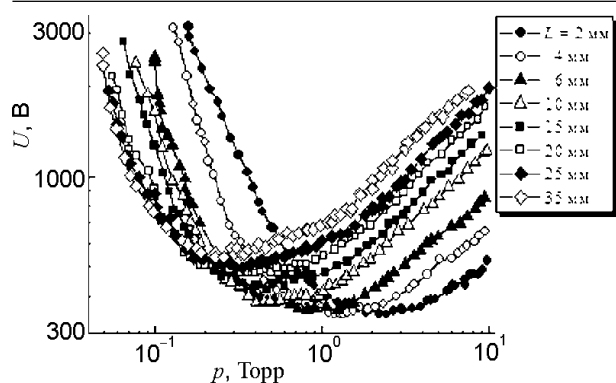


Рис. 2. Экспериментальные кривые зажигания тлеющего разряда постоянного тока в азоте для различных расстояний L между электродами.

Из рис. 2 видно, при небольших расстояниях между электродами (до 4 мм) увеличение зазора L приводит к смещению кривых зажигания в область более низких значений давления, при этом напряжение зажигания U_{dc} в минимуме остается практически неизменным. Минимумы измеренных кривых зажигания удовлетворительно укладываются на одну прямую линию. Однако при дальнейшем увеличении расстояния между электродами наблюдается повышение минимального напряжения зажигания разряда. То есть кривые зажигания при увеличении зазора смещаются не только в область более низких давлений, но и в область более высоких постоянных напряжений.

Подобный вывод можно сделать и из экспериментальных результатов, представленных на рис. 3 в работе [14] для неона.

Автор [14] измерил кривые зажигания вблизи и слева от минимума и отметил, что

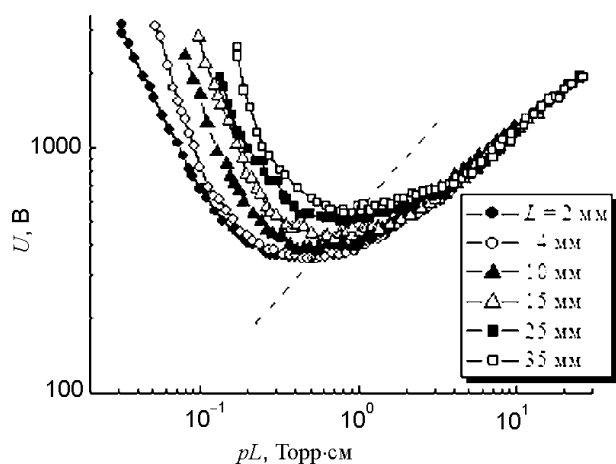


Рис. 3. Зависимость напряжения зажигания тлеющего разряда постоянного тока в азоте от величины произведения pL для различных расстояний L между электродами.

увеличение расстояния между электродами L приводит к повышению напряжения пробоя U_{dc} . Однако из его результатов видно, что с ростом расстояния L кривые зажигания смещаются также в область более высоких значений pL (чему в [14] совершенно не было уделено внимания). Следовательно, наблюдаемое в настоящей работе отклонение от закона Пашена хорошо подтверждается измерениями других авторов. Такое смещение кривых зажигания в область более высоких значений 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.

Построим полученные кривые зажигания в масштабе $U_{dc} = f(pL)$. На рис. 3 показаны зависимости напряжения зажигания тлеющего разряда постоянного тока от величины произведения pL для различных расстояний L между электродами. Из рис. 3 видно, что при небольших расстояниях L (до 4 мм) кривые зажигания вблизи и справа от минимумов практически наложился. Однако при увеличении зазора между электродами наблюдается смещение кривых зажигания в область более высоких пробойных напряжений и величин произведения pL . При этом минимумы кривых зажигания лежат на одной прямой линии.

Из наших экспериментальных кривых зажигания тлеющего разряда постоянного тока в азоте при различных межэлектродных расстояниях L были получены зависимости U_{min} от величины $(pL)_{min}$ (рис. 4).

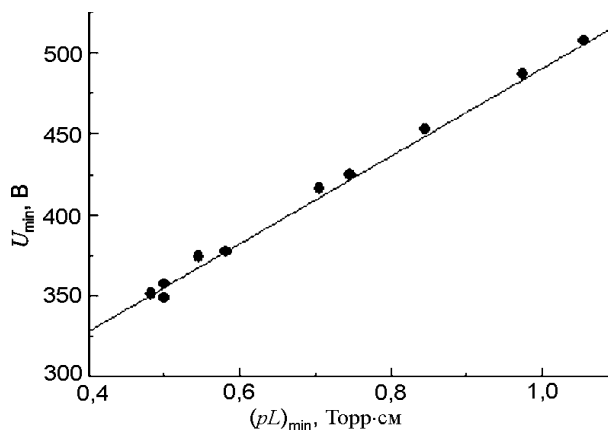


Рис. 4. Зависимость U_{min} и от $(pL)_{min}$ для тлеющего разряда постоянного тока в азоте.

Как видно из этого рис. 4, для измеренных координат минимумов кривых зажигания имеем $U_{\min} (pL)_{\min}$.

На рис. 5 показана зависимость U_{\min} от отношения L/R . Из рисунка следует, что U_{\min} с ростом L/R сохраняется постоянной только при $L/R \leq 1$. При дальнейшем увеличении расстояния между электродами L (следовательно, и величины L/R) наблюдается рост U_{\min} .

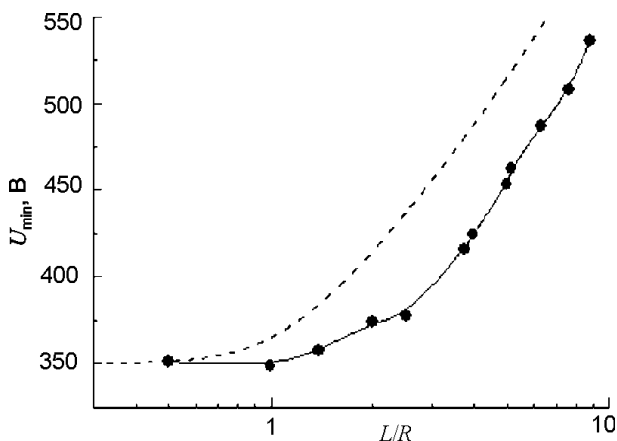


Рис. 5. Зависимость U_{\min} от отношения L/R для тлеющего разряда постоянного тока в азоте.

Подобная зависимость произведения $(pL)_{\min}$ в минимуме кривой зажигания от L/R представлена на рис. 6. Для справедливости закона Пашена нужно, чтобы U_{\min} и $(pL)_{\min}$ не зависели от зазора L (величины отношения L/R).

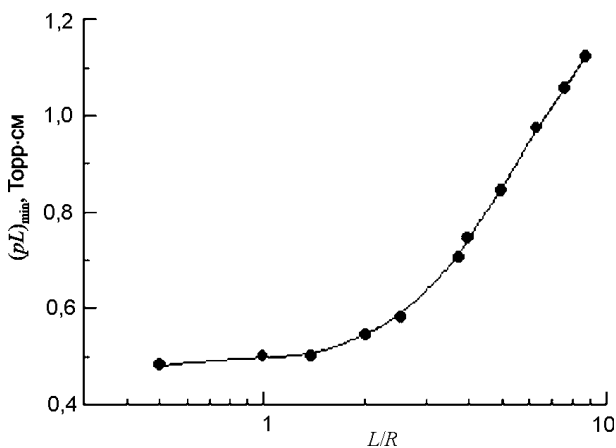


Рис. 6. Зависимость произведения $(pL)_{\min}$ от отношения L/R .

Из рис. 5 и 6 следует, что такое возможно только при $L/R < 1$, когда U_{\min} и $(pL)_{\min}$ остаются постоянными. Следовательно, закон Пашена справедлив для зажигания разряда постоянного тока в цилиндрических камерах, длина которых не превышает радиуса трубки.

В случае $L/R > 1$ необходимо пользоваться модифицированным законом Пашена.

Для того, чтобы объяснить полученные экспериментальные результаты, рассмотрим уравнение пробоя газа в однородном постоянном электрическом поле.

В настоящее время для теоретического описания пробоя газа в однородном постоянном электрическом поле широко используется уравнение, полученное еще Таунсендом [2]:

$$\gamma[\exp(\alpha L)] = 1, \quad (1)$$

где α и γ – первый и второй коэффициенты Таунсенда. Это простое уравнение было выведено для случая плоских электродов с бесконечно большим радиусом R , т.е. $L/R = 0$. Однако в реальных газоразрядных установках (технологических и исследовательских) радиус электродов, может быть, сравним с расстоянием между электродами. Такая ситуация, в частности, имеет место в некоторых конструкциях плазменных дисплейных панелей [42]. В этом случае, как видно из приведенных выше экспериментальных кривых зажигания, уход заряженных частиц на боковые стенки камеры играет существенную роль.

Для описания зажигания тлеющего разряда постоянного тока в таких устройствах необходимо получить критерий пробоя газа, учитывающий уход заряженных частиц на боковые стенки разрядной трубки (ячейки в плазменной дисплейной панели и т.п.). Уравнение пробоя газа в однородном постоянном электрическом поле, которое учитывает как ионизацию молекул газа электронным ударом и дрейф электронов и ионов вдоль поля, так и диффузионный уход электронов по радиусу разрядной трубки, было получено в книге Смирнова [43] и в работе Колобова и Фиала

$$[44]: \quad \frac{\alpha}{\alpha'} [\exp(\alpha' L) - 1] = \frac{1}{\gamma},$$

$$\alpha' = \alpha - \left(\frac{D_e}{V_e} - \frac{D_i}{V_i} \right) \left(\frac{2,4}{R} \right)^2, \quad (2)$$

где V_e и V_i – дрейфовые скорости электронов и ионов, соответственно, D_e и D_i – коэффициенты поперечной диффузии электронов и ионов.

Из рис. 5 и 6 можно сделать вывод, что при описании кривых зажигания тлеющего разряда постоянного тока параметр L/R является таким же важным, как и параметр pL . Следовательно, закон пробоя газа в однородном постоянном электрическом поле нужно записывать в следующем виде:

$$U_{dc} = f\left(pL, \frac{L}{R}\right). \quad (3)$$

На основе анализа большого числа экспериментальных кривых зажигания авторы [29] получили эмпирические формулы, хорошо описывающие зависимость кривых зажигания от отношения L/R .

При соответствующем выборе координатных осей можно добиться того, что все измеренные в настоящей работе кривые зажигания практически совпадут. В работе [29] показано, что если по оси абсцисс отложить

$$(pL)^* = pL / \left(1 + \left(\frac{L}{R}\right)^2\right)^a, \quad (4)$$

а по оси ординат

$$U_{dc}^* = U_{dc} / \left(1 + \left(\frac{L}{R}\right)^2\right)^a, \quad (5)$$

где a – константа, зависящая от сорта газа, то все экспериментальные кривые зажигания с хорошей точностью накладываются друг на друга. Для азота авторами [29] получено значение $a \approx 0,12$. Очевидно, что при $L/R \rightarrow 0$ из формул (4) и (5) мы имеем обычную кривую Пашена $U_{dc} = f(pL)$.

На рис. 5 пунктирной кривой показана зависимость напряжения в минимуме кривой зажигания от L/R , рассчитанная по формуле (5). Из рис. 6 видно, что результаты расчетов с помощью формулы (5) качественно хорошо согласуются с результатами наших измерений, но смещены относительно наших данных в область более низких L/R . Формула (5) получена авторами [29] феноменологическим путем и, по-видимому, нуждается в уточнении.

ВЫВОДЫ

В настоящей работе было экспериментально исследовано зажигание тлеющего разряда постоянного тока в азоте при различных меж-

электродных расстояниях между электродами. Экспериментально подтверждена справедливость модифицированного закона Пашена для пробоя газа низкого давления в постоянном электрическом поле $U_{dc} = f(pL, L/R)$, т.е. напряжение пробоя U_{dc} оказывается как функцией произведения давления газа и величины зазора pL , так и функцией отношения величины зазора к радиусу разрядной камеры L/R . Найдено, что с увеличением межэлектродного промежутка кривые зажигания смещаются в область более высоких напряжений пробоя U_{dc} и больших значений произведения pL , при этом их минимумы лежат на одной прямой ($U_{min} \propto (pL)_{min}$). Экспериментально показано, что обычный закон Пашена $U_{dc} = f(pL)$ справедлив для тех разрядных трубок, у которых отношение расстояния между электродами к радиусу трубки $L/R \leq 1$. Для больших значений L/R нужно пользоваться модифицированным законом $U_{dc} = f(pL, L/R)$. Эксперименты выполнены в цилиндрической разрядной камере с $L/R \leq 9$.

ЛИТЕРАТУРА

1. Paschen F. Veber die zum Funkenubergang in Luft, Wasserstoff und Kohlensaure bei verschiedenen Drucken erforderliche Potentialdifferenz // Annalen der Physik und Chemie. – 1889. – Vol. 37, № 5. – P. 69-96.
2. Townsend J.S. Electricity in Gases. – Oxford: Clarendon Press, 1915. – 496 p.
3. 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.
4. Энгель А. Ионизованные газы/Пер. с англ. – М.: Физматгиз, 1959. – 332 с.
5. Мик Дж., Крэгс Дж. Электрический пробой в газах/Пер. с англ. – М.: ИЛ, 1960. – 605 с.
6. Браун С. Элементарные процессы в плазме газового разряда/Пер. с англ. – М.: Атомиздат, 1961. – 324 с.
7. Llewellyn Jones M.A. Ionization Growth and Breakdown // Handbuch der Physik/ed S Flugge. – Berlin: Springer. – 1956. – Vol. 22. – P. 1-52.
8. Loeb L.B. Electrical Breakdown of Gases with Steady or Direct Current Impulse Potentials // Handbuch der Physik/ed S Flugge. – Berlin: Springer. – 1956. – Vol. 22. – P. 445-530.
9. Phelps A.V., Petrovic Z.Lj. Cold cathode discharges and breakdown in argon: surface and gas phase production of secondary electrons // Plasma

- Sources Sci. Technol. – 1999. – Vol. 8. – P. R21-R44.
10. Townsend J.S., McCallum S.P. Electrical properties of Neon//Phil. Mag.– 1928.– Vol. 6, № 38. – P. 857-878.
 11. Fricke H. Die Durchschlagsspannung von extrem reinem und trockenem Wasserstoff und Sauerstoff bei Drucken von 1 bis 60 Tor und Abstanden von 1 bis 35 mm und ihre Abweichung vom Paschenschen Gesetz//Zeitschrift fur Physik.– 1933. – Vol. 86, № 11. – P. 464-478.
 12. McCallum S.P., Klatzow L. Deviations from Paschen's Law//Phil. Mag. – 1934. – Vol. 17. – P. 279-297.
 13. Buttner H. Die Anfangscharakteristik der Townsend-Entladung in Edelgasen//Zeitschrift fur Physik. – 1939. – Vol. 111, № 11. – P. 750-769.
 14. Miller H.C. Breakdown potential of neon below the Pashen minimum//Physica.– 1964.– Vol. 30.– P. 2059-2067.
 15. Jacques L., Bruynooghe W. Measurement of townsend ionization coefficients and the breakdown potentials in krypton//Proc. 15th Int. Conf. on Phenomena in Ionized Gases.– Minsk. – 1981.– P. 609-610.
 16. Jacques L., Bruynooghe W., Boucique R., Wieme W.J. Experimental determination of the primary and secondary ionization coefficients in krypton and xenon//J. Phys. D: Appl. Phys. – 1986. –Vol. 19. – P. 1731-1739.
 17. Yumoto M., Sakai T., Ebinuma Y., Fujiwara Y., Aihara M. Measurement of breakdown voltage of electro-negative gas in the left region of the pashen minimum//Proc. 8th Int. Symp. on High Voltage Engineering. – Yokohama. – 1993. – P. 409-412.
 18. Auday G., Guillot P., Galy J., Brunet H.J. Experimental study of the effective secondary emission coefficient for rare gases and copper electrodes //J. Appl. Phys.– 1998. – Vol. 83, № 11.– P. 5917-5921.
 19. Ehrenkranz F. Spark Breakdown Potentials as a Function of the Pressure by the Plate Separation in A, N₂ and H₂ for Pt and Na Cathodes//Phys. Rev. – 1939. –Vol. 55. – P. 219-227.
 20. Ульянов К.Н. К лавинной теории пробоя в газе//ЖТФ. – 1970. – Т. 15, № 10. – С. 2138-2146.
 21. Johnson P.C., Parker A.B. A new theory for breakdown to the left of Pashen minimum//Letters to the/ Ed. J. Phys. D: Appl. Phys. – 1971. – Vol. 4. – P. L8-L10.
 22. Ворончев Т.А., Жданова Г.В. К вопросу о переходе темного разряда в тлеющий (левая ветвь кривой Пашена)//ЖТФ. – 1973. – Т. 43, № 6. – С. 1212-1216.
 23. Ворончев Т.А., Жданова Г.В. К вопросу о переходе темного разряда в тлеющий (правая ветвь кривой Пашена)//ЖТФ. – 1973. – Т. 45, № 7. – С. 1427-1433.
 24. Pace J.D., Parker A.B. The breakdown of argon at low pressure//J. Phys. D: Appl. Phys. – 1973. – Vol. 6. – P. 1525-1536.
 25. Phelps A.V., Jelenkovic B.M. Excitation and breakdown of Ar at very high ratios of electric field to gas density//Phys. Rev. A. – 1988. – Vol. 38. – P. 2975-2990.
 26. De La Rue W., Muller H.W. Experimental Researches on the Electric Discharge with the Chloride of Silver Battery//Phil. Trans. Roy. Soc. – Lond. – 1880. – Vol. 171, Pt 1. – P. 65-116.
 27. Лисовский В.А., Яковин С.Д. Модифицированный закон Пашена для зажигания тлеющего разряда в инертных газах//Журнал технической физики.– 2000.– Т. 70, № 6.– С. 58-62.
 28. Лисовский В.А., Яковин С.Д. Закон подобия при пробое газа низкого давления в однородном постоянном электрическом поле//Письма в ЖЭТФ. – 2000. – Т. 72, № 2. – С. 49-53.
 29. Lisovskiy V.A., Yakovin S.D., Yegorenkov V.D. Low-pressure gas breakdown in uniform dc electric field//J. Phys. D: Appl. Phys. – 2000. – Vol. 33, No. 21. – P. 2722-2730.
 30. Hartmann P., Donko Z., Bano G., Szalai L., Rozsa K. Effect of different elementary processes on the breakdown in low-pressure helium gas// Plasma Sources Sci. Technol. – 2000. – Vol. 9, No. 2. – P. 183-190.
 31. Markovic V.Lj., Gocic S.R., Stamenkovic S.N., Petrovic Z.Lj., Radmilovic M. Determination of effective electron yield from swarm and time delay measurements//Eur. Phys. J. AP. – 2001.– Vol. 14. – P. 171-176.
 32. Mariotti D., McLaughlin J.A., Maguire P. Experimental study of breakdown and effective secondary electron emission coefficient for micro-plasma device//Plasma Sources Sci. Technol. – 2004. – Vol. 13, No. 2. – P. 207-212.
 33. Kudryavtsev A.A., Tsandin L.D. Cathode Boundary Conditions for Fluid Model Discharges on the Right-Hand Branch of the Paschen Curve// Techn. Phys. Let. – 2002. – Vol. 28, No. 8. – P. 621-624.
 34. Wagenaars E., Bowden M.D., Kroesen G.M.W. Plasma emission imagine of a low-pressure argon breakdown//Plasma Sources Sci. Technol. – 2005. – Vol. 14, No. 2. – P. 342-350.
 35. Brok W.J., van Dijk J., Bowden M.D., van der Mullen J.J.A.M. A model study of propagation of the first ionization wave during breakdown in

- a straight tube containing argon//J. Phys. D: Appl. Phys. – 2003. – Vol. 36, No. 16. – P. 1967-1979.
36. Pejovic M.M., Ristic G.S., Karamarkovic J.P. Electrical breakdown in low pressure gases//J. Phys. D: Appl. Phys.– 2002. – Vol. 35, No. 10. – P. R91-R103.
 37. Radovic M.K., Maluckov C.A. Statistical Analysis of the Dynamic Voltage Electrical Breakdown in Nitrogen//IEEE Transactions on Plasma Science. – 2001. – Vol. 29, No. 5. – P. 832-836.
 38. Osmokrovic P.O. Mechanism of Electrical Breakdown of Gases at Very Low Pressure and Interelectrode Gap Values//IEEE Transactions on Plasma Science. – 1993. – Vol. 21, No. 6. – P. 645-653.
 39. Osmokrovic P., Zivic T., Loncar B., Vasic A. The validity of the general similarity law for electrical breakdown of gases//Plasma Sources Sci. Tech. – 2006. –Vol. 15, No. 4. – P. 703-713.
 40. Osmokrovic P., Loncar B., Stankovic S. Investigation of the Optimal Method for Improvement of the Protective Characteristics of Gas-Filled Surge Arresters – With/without the Built-In Radioactive Sources//IEEE Transactions on Plasma Science.– 2002. – Vol. 30, No. 5. – P. 1876-1880.
 41. Loncar B., Osmokrovic P., Stankovic S. Radioactive Reliability of Gas-Filled Surge Arresters //IEEE Transactions on Plasma Science.– 2003.– Vol. 31, No. 5. – P. 1725-1731.
 42. Meunier J., Belenguer Ph., Boeuf J.P. Numerical model of an ac display panel cell in neon-xenon mixtures//J. Appl. Phys.– 1995.– Vol. 78, № 2. – P. 731-745.
 43. Смирнов Б.М. Физика слабоионизованного газа. – М.: Наука, 1972. – 416 с.
 44. Kolobov V.I., Fiala A. Transition from a Townsend discharge to a normal discharge via two-dimensional modeling//Phys. Rev. E. – 1994. – Vol. 50, № 4. – P. 3018-3032.

МОДИФІКОВАНИЙ ЗАКОН ПАСЕНА ДЛЯ ЗАПАЛЮВАННЯ РОЗРЯДУ СТАЛОГО СТРУМУ

В.О. Лісовський, В.О. Коваль

Експериментально досліджено пробій газу в сталому електричному полі. Знайдено, що при збільшенні відстані між електродами криві запалювання $U_{dc}(pL)$ зсуваються в область більш високих напруг пробою U_{dc} та більших значень добутку тиску газу на відстань між електродами pL . При цьому мінімуми кривих запалювання лежать на одній прямій. На базі виконаних експериментів показано, що звичайний закон Пашена виконується для коротких розрядних трубок, для яких відношення відстані між електродами до радіуса трубки $L/R \leq 1$. Для більших значень L/R потрібно використовувати модифікований закон $U_{dc} = f(pL, L/R)$. Експерименти виконано в циліндричній розрядній камері з $L/R \leq 9$.

MODIFIED PASCHEN'S LAW FOR DC DISCHARGE IGNITION

V.A. Lisovskiy, V.A. Koval'

This paper is devoted to studying the breakdown of low-pressure DC glow discharge. A modified Paschen's law for gas breakdown in uniform direct current electric fields is experimentally confirmed: the breakdown voltage is the function of the product of the interelectrode gap and the gas pressure, as well as the ratio of interelectrode gap to electrode diameter $U_{dc} = f(pL, L/R)$. It is shown that conventional Paschen's law $U_{dc} = f(pL)$ is valid for tubes, in which a ratio of interelectrode gap to electrodes diameter less than one. The experiments were carried out in the cylindrical discharge tube with $L/R \leq 9$.