

Частные обобщения вольт-амперных характеристик коронного разряда в газах

Ф. П. Гросу^а, Ан. М. Болога^б, М. К. Болога^а, О. В. Моторин^а

^аИнститут прикладной физики АН Молдовы,

ул. Академическая, 5, г. Кишинев, MD-2028, Республика Молдова, e-mail: mbologa@phys.asm.md

^бТехнологический институт Карлсруэ, Институт технической химии,

Герман фон Гельмгольц Пл.1, Эггенштайн – Леопольдсхафен, 76344, Германия, e-mail: andrei.bologa@kit.edu

Приводятся обобщения экспериментальных вольт-амперных характеристик коронного разряда для гелия и синтетического воздуха при положительной и отрицательной полярностях коронирующего электрода сложной звездообразной формы при различных давлениях газов, а также обобщения характеристик, для сухого воздуха при различных температурах и нормальном давлении (коаксиальная система электродов). При обобщении отдельные семейства характеристик сводятся к единой зависимости, описываемой обобщающим уравнением подобия, представляющего отрезок биссектрисы. Рассмотрены отдельные аспекты прикладного характера методов подобия в вопросах коронного разряда. Подтвердилась таунсендовская структура характеристик, что может служить основой ее широкого применения.

Ключевые слова: коронный разряд, вольт-амперные характеристики, гелий, воздух, обобщение, критерии подобия.

УДК 537.527.3

ВВЕДЕНИЕ

Коронный разряд занимает особое место среди газовых электрических разрядов. Исследования в этой области ведутся под разными научно-техническими аспектами в различных условиях с использованием как традиционных электродных систем типа «игла – плоскость» [1], так и сложных конфигураций электродных систем типа «звездочек» внутри цилиндрических электродов [2]. Изучаются закономерности разряда при высоких давлениях и температурах в зависимости от ряда факторов, таких как тип газа, электрическое напряжение, его полярность, силы электрического тока, а в случае смесей газов – их концентраций, и т.д. Расширяется область исследований путем охвата новых смежных областей физики, например спектрометрического изучения подвижностей ионов в смеси кислорода и азота [3]. Разнообразны и цели исследований: определяются вольт-амперные характеристики (ВАХ) коронного разряда в гелии применительно к изучению подвижностей ионов [4], рассматриваются вопросы моделирования микроплазменного разряда в гелии [5], численного моделирования разряда в кислороде при различных давлениях [6], влияние температуры на ВАХ в воздухе для системы «игла–плоскость» [7] и численным анализом установлены закономерности этого влияния.

Коронный разряд довольно часто встречается в природе, а также находит широкое практическое применение в различных технологических процессах, в частности в газовых рентгеновских

счетчиках [8], при электрофильтрации [9], охлаждении лазерной техники [10, 11], интенсификации тепломассообменных процессов [12], прокачке диэлектрических жидкостей [13], генерировании электроэнергии [14] и др. Интенсивность коронного разряда определяется условиями его реализации и зависит от величины и полярности приложенного напряжения, геометрии электродной системы, температуры, давления, влажности и химического состава газов и т.д. В отличие от других газовых разрядов специфика коронного состоит в том, что он сопровождается электрогидродинамическими (ЭГД) явлениями, известными под названием «электрический (или «ионный») ветер», которые позволяют как измерять подвижность газовых ионов [8], так и создавать различные преобразователи энергии, ЭГД генераторы, ЭГД насосы [15] и т.п. Несмотря на то, что коронный разряд изучается на протяжении многих десятилетий, исследования в этой области не потеряли своей актуальности и сегодня. Одним из основных вопросов, с которым приходится сталкиваться при этом, являются вольт-амперные характеристики – зависимости тока коронного разряда I от величины приложенного напряжения U . В этом плане в предлагаемой работе анализируются ВАХ коронного разряда в гелии, синтетическом и обычном воздухе под углом зрения их критериального обобщения в целях проведения в последующем необходимых инженерных расчетов. Обсуждаются вопросы подобия коронных разрядов под аспектом их практического применения.

ОБЩАЯ СХЕМА МЕТОДА

Типичные вольт-амперные характеристики коронного разряда $I(U)$ в газах описываются уравнением вида [8, 9, 16–18]:

$$I = A \cdot U(U - U_c), \quad (1)$$

где A и U_c – параметры характеристики, причем U_c – начальное (критическое) напряжение зажигания коронного разряда. В работе [19] приводится общая схема обобщения этих характеристик, суть которого состоит в том, что семейство кривых I , отличающихся указанными параметрами, сводится к одной зависимости, представленной единой формулой и единым графиком. В отличие от метода «редуцированных» характеристик [8, 9, 16–18], параметры A и U_c находятся статистическим методом наименьших квадратов (МНК):

$$A = \frac{\bar{I} - \bar{U} \cdot (\bar{I}/\bar{U})}{\bar{U}^2 - \bar{U}^2}; \quad U_c = \frac{\bar{U} \cdot \bar{I} - \bar{U}^2 \cdot (\bar{I}/\bar{U})}{\bar{I} - \bar{U} \cdot (\bar{I}/\bar{U})}, \quad (2)$$

где черта означает средние арифметические значения, определяемые по эмпирическим рядам распределения.

Введя безразмерные напряжение U_* и ток I_* согласно формулам

$$U_* \equiv U/U_c; \quad I_* \equiv I/I_0, \quad (3)$$

где в качестве масштаба для силы тока (единицы измерения) принято

$$I_0 \equiv A \cdot U_c^2, \quad (4)$$

зависимости (1) придаем безразмерный, единый для всех ВАХ, вид уравнений параболы или биссектрисы:

$$I_* = U_* \cdot (U_* - 1) \Rightarrow Y_* = U_*, \quad (5)$$

причем во втором случае через Y_* обозначено выражение, откладываемое на ось ординат и имеющее смысл обобщенной (безразмерной) редуцированной характеристики:

$$Y_* \equiv (I_* / U_*) + 1. \quad (6)$$

Независимая безразмерная переменная заключена в пределах:

$$1 \leq U_* \leq U_{*k}, \quad U_{*k} \equiv U_k / U_c, \quad (7)$$

а звездочки (*) означают безразмерные величины. В формуле (7) введено обозначение U_k для «конечного» на данной характеристике значения напряжения, а U_{*k} представляет собой верхний предел области задания функций (5). Из соображений стабильности протекания разрядного процесса должно соблюдаться условие $U_k \leq U_u$ предельно допустимого значения, не превышающего напряжения искрового пробоя (U_u) [11].

Откладывая на оси координат U_* и Y_* , согласно выражениям (5) и (6), получаем ВАХ в виде

отрезков параболы или биссектрисы для всех газов и систем электродов, в которых коронный разряд описывается зависимостью (1). В дальнейшем ограничимся рассмотрением зависимости в виде биссектрисы, график которой исходит из точки с координатами (1; 1) и заканчивается точкой ($U_{*k}; U_{*k}$).

Согласно предложенной методике, ранее [19] были обобщены 4 вольт-амперные характеристики для гелия из общего семейства 9 зависимостей при положительной полярности коронного разряда, комнатной температуре и различных давлениях (рис. 1). В этой работе предусматривается дальнейшее обобщение семейства ВАХ, в том числе вольт-амперных характеристик, снятых в синтетическом воздухе при различных давлениях, а также в обычном воздухе [17] при различных температурах.

ЧАСТНЫЕ ОБОБЩЕНИЯ

Ниже приводятся обобщенные данные для коронного разряда в электродной системе, включающей полый цилиндрический заземленный электрод, в котором расположены два коронирующих электрода, имеющих форму звездочки. Высоковольтные электроды установлены с интервалом друг относительно друга, равным диаметру коронирующего электрода. Межэлектродное расстояние между заземленным и коронирующими электродами составляет 15 мм. Коронный разряд зажигается на остриях звездочных электродов. Детальное описание экспериментальной установки и методики экспериментов приведено в [20].

На рис. 1а представлены графики экспериментальных вольт-амперных характеристик, полученных в гелии. В соответствии с формулами (2) найдены параметры A и U_c , затем с помощью формул (3), (4) и (6) определяются графики биссектрис (5). Полученные зависимости отличаются только обозначениями самих точек, а также координатами концов отрезков биссектрис ($U_{*k}, Y_{*k} = U_{*k}$). Степень близости точек к прямой характеризует степень адекватности обобщения зависимости (1). Откладывая на ось абсцисс безразмерное напряжение U_* , а на ось ординат – выражение (6), в соответствии с зависимостью (5) для экспериментальных кривых получаем график обобщенной зависимости, приведенный на рис. 1б.

Экспериментальные точки весьма плотно укладываются на биссектрису (5), что свидетельствует о хорошем описании данных эксперимента размерным уравнением (1) и эквивалентным ему безразмерным (5). На рис. 1а указаны параметры A , U_c и I_0 , по которым можно рассчитать интересующие нас величины тока коронного разряда по известному уравнению (1).

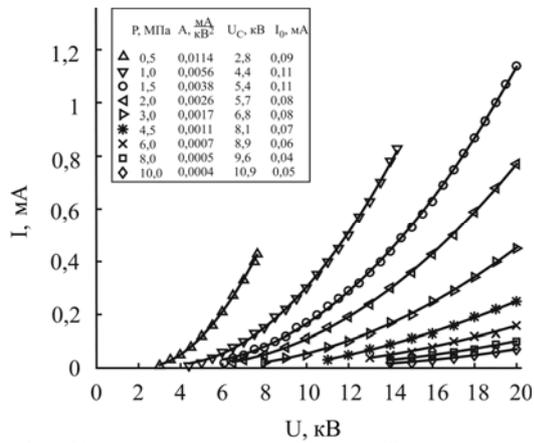


Рис. 1а. Исходные зависимости: гелий, положительная корона, различные давления.

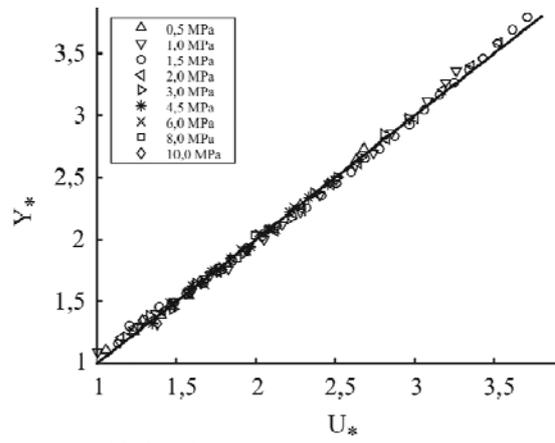


Рис. 16. Обобщенная зависимость для рис. 1а.

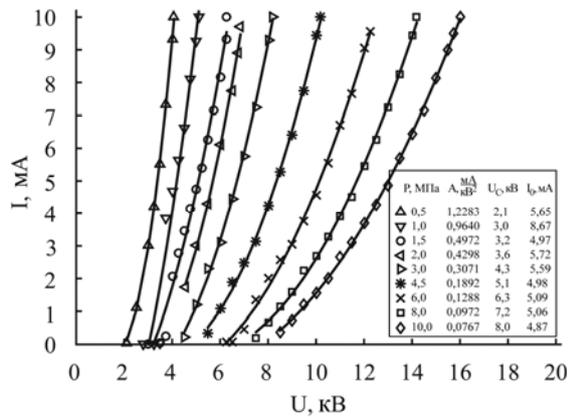


Рис. 2а. Исходные зависимости: гелий, отрицательная корона, различные давления.

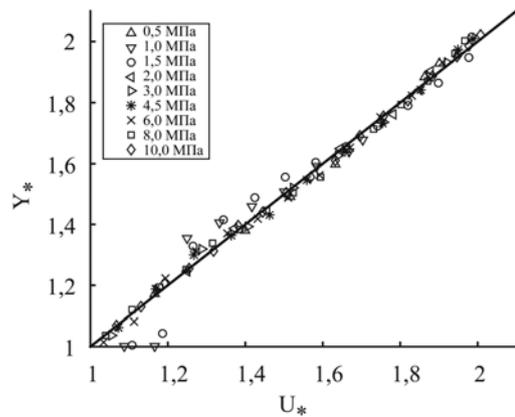


Рис. 26. Обобщенная зависимость для рис. 2а.

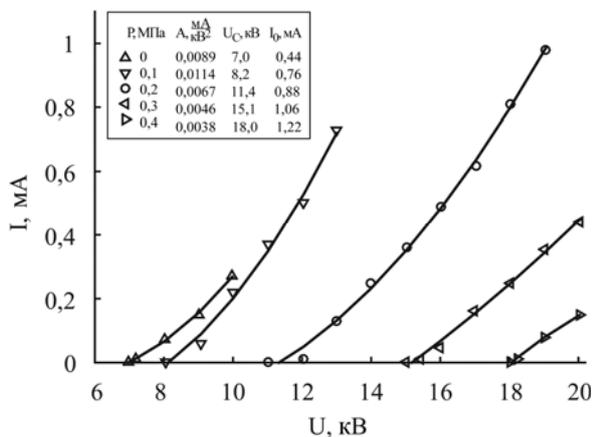


Рис. 3а. ВАХ: синтетический воздух, положительная корона, различные давления.

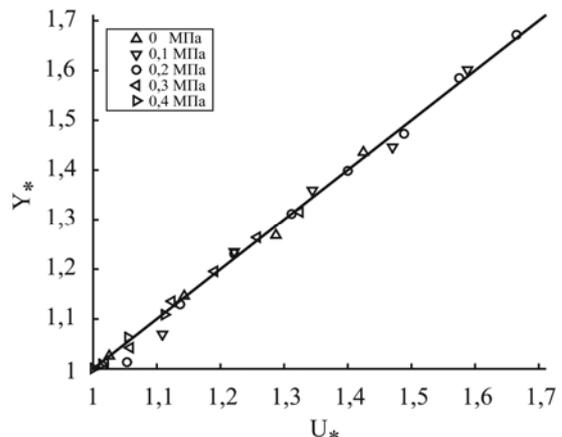


Рис. 36. Обобщенная зависимость для рис. 3а.

Аналогично обработаны экспериментальные ВАХ для гелия при отрицательной полярности приложенного напряжения для различных давлений газа. На рис. 2а даны исходные экспериментальные зависимости, а на рис. 2б – обобщенная.

В случае отрицательного коронного разряда ряд точек не ложится на расчетную зависимость. Заметен большой разброс экспериментальных точек и расчетных данных по сравнению со случаем положительной короны. Это может быть связано, в частности, с неустойчивым характером коронного разряда на начальных участках

вольт-амперных зависимостей, что характерно для отрицательной короны в условиях катодной эмиссии электронов и их дальнейшего дрейфового движения к аноду через электроположительный газ, каковым является гелий.

Следующее обобщение относится к синтетическому воздуху при положительной короне, температуре $T = (22-35)^\circ\text{C}$ и различных давлениях. На рис. 3а представлены исходные, а на рис. 3б – обобщенные зависимости.

Аналогично на рис. 4а и 4б даются соответственно исходные и обобщенные характеристики для синтетического воздуха при отрицательной

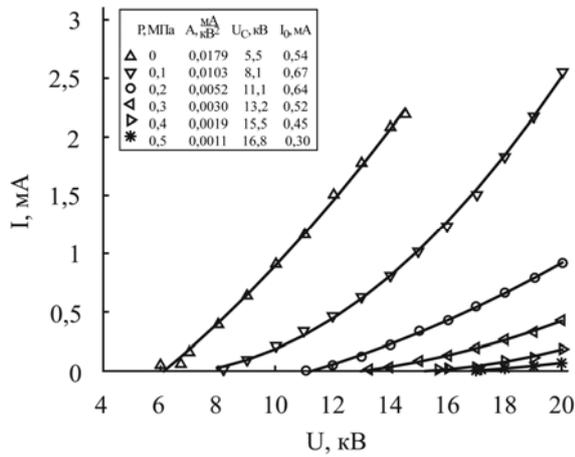


Рис. 4а. ВАХ: синтетический воздух, отрицательная корона при различных давлениях.

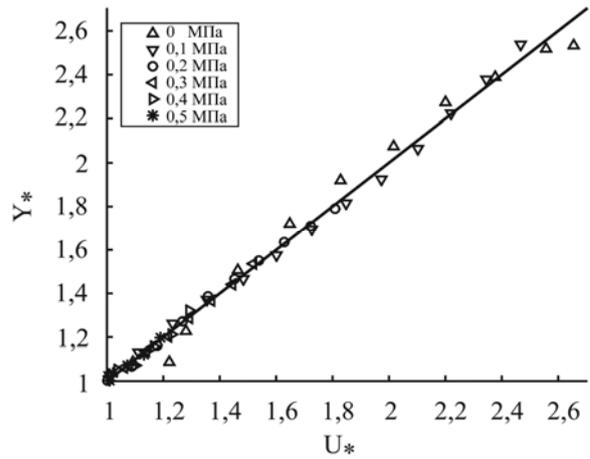


Рис. 4б. Обобщенная зависимость для рис. 4а.

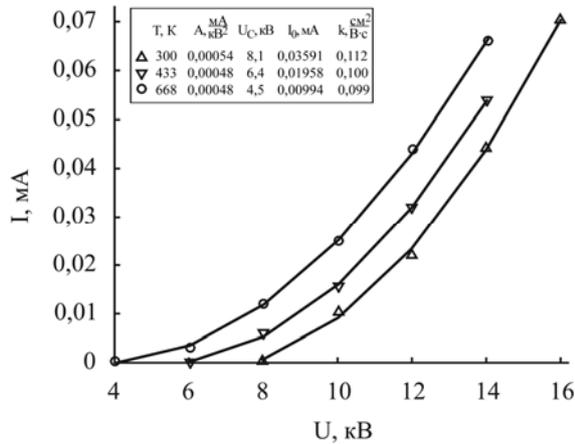


Рис. 5а. ВАХ [17]: воздух, нормальное давление, положительная корона при различных температурах нагрева коронирующей проволоки.

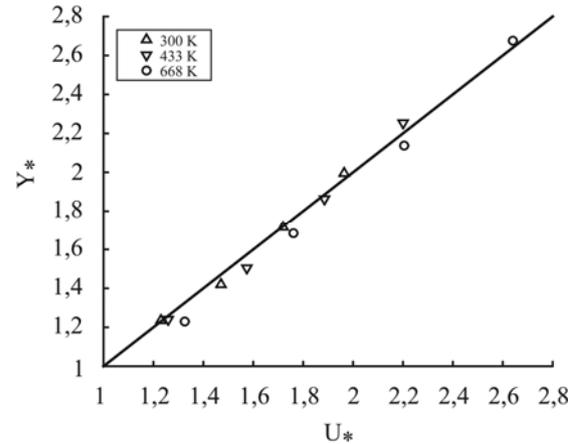


Рис. 5б. Обобщенная зависимость для рис. 5а.

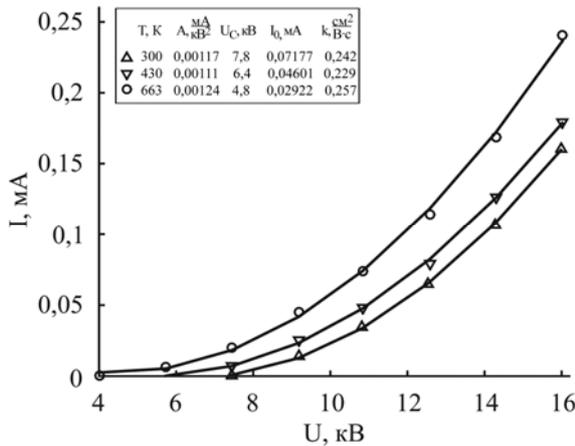


Рис. 6а. ВАХ [17]: воздух, нормальное давление, отрицательная корона при различных температурах нагрева коронирующей проволоки.

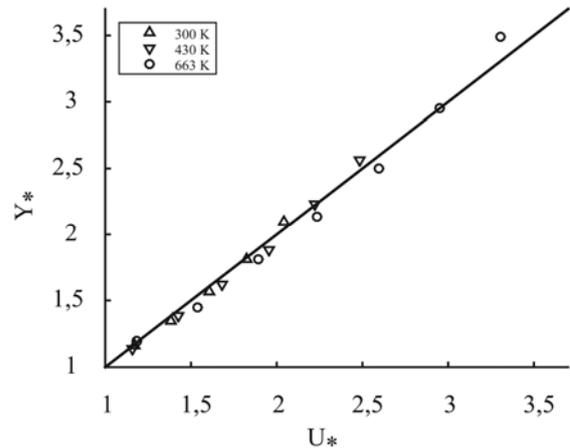


Рис. 6б. Обобщенная зависимость для рис. 6а.

короне, температуре $T = (22-35)^\circ\text{C}$ и различных давлениях. Во всех рассмотренных случаях имеется весьма удовлетворительное обобщение экспериментальных данных биссектрисой (5).

Рассмотрим пример практического применения результатов приведенных обобщений. Пусть в случае коронного разряда в гелии необходимо получить ток $I = 0,2$ mA при напряжении $U = 5$ кВ, а также найти характеристику, обеспе-

чивающую эти показатели. Задача сводится к нахождению параметров U_c и A . Считаем, например, что $U/U_c \equiv m = 2$. Следовательно, $U_c = 5/2 = 2,5$ кВ. Зная I , находим величину масштабной единицы для силы тока: $I_0 = I/[m(m-1)] = 0,2/2 = 0,1$ mA. Далее, согласно (4), находим параметр $A = 0,1/2,5^2 = 0,016$ mA/kV². Расчетная вольт-амперная характеристика имеет вид (ток измеряется в mA, напряжение – в кВ):

$$I = 0,016 \cdot U \cdot (U - 2,5).$$

Эта характеристика близка к первой слева на рис. 1а. Приняв значение напряжения $U = 8$ кВ, при том же значении $m = 2$ получим $U_c = 4$ кВ $\Rightarrow A = 0,1/4^2 = 0,00625$ (мА/кВ²) и характеристику

$$I = 0,00625 \cdot U \cdot (U - 4),$$

близкую ко второй слева на рис. 1а.

Следовательно, задавшись тремя параметрами I , U и m , по приведенной схеме можно рассчитать уравнение вольт-амперной характеристики, которая будет достаточно точно предсказывать экспериментальные данные.

ОТДЕЛЬНЫЙ СЛУЧАЙ

На рис. 5а и 6а даны вольт-амперные характеристики для воздуха при положительной и отрицательной короне соответственно и нормальном давлении в зависимости от температуры коронирующей проволоки в коаксиальной системе электродов [17]. На рис. 5б и 6б приведены обобщенные зависимости, построенные согласно изложенной выше методике. Для коаксиальной системы электродов, наряду с параметрами A , U_c и I_0 , приводится и величина коэффициента подвижности ионов k , теоретически рассчитанная, исходя из соображений точного соблюдения формулы Таунсенда (8) (см. ниже), которую можно сопоставить с известными табличными значениями ($k \approx 2$ см²/(В·с)). Сравнение экспериментальных и расчетных кривых показывает, что обобщения биссектрисой можно считать удовлетворительными. Однако эти эксперименты отличаются тем, что параметр A для коаксиальной системы электродов, в отличие от ранее рассмотренной, может быть рассчитан теоретически, исходя из формулы Таунсенда [16]:

$$I = \frac{8\pi\epsilon_0 \cdot \epsilon k \cdot U(U - U_c)}{R^2 \cdot \ln(R/r_0)} \Rightarrow$$

$$\Rightarrow A = \frac{8\pi\epsilon_0}{R^2 \ln(R/r_0)} \cdot \epsilon k \equiv \alpha_0 \cdot \epsilon k,$$

где

$$\alpha_0 \equiv \frac{8\pi\epsilon_0}{R^2 \ln(R/r_0)}. \quad (9)$$

Параметр A с точностью до постоянной α_0 , зависящей от геометрии системы электродов, определяется произведением относительной диэлектрической проницаемости ϵ на подвижность активных ионов k (знака коронирующего электрода). Согласно [17], радиусы цилиндрических электродов составляют: $R = 28,5$ мм и $r_0 = 0,1$ мм; $\epsilon_0 \approx 8,85 \cdot 10^{-12}$ Ф/м, следовательно, константа $\alpha_0 \approx 4,84 \cdot 10^{-8}$ Ф/м³. С другой стороны,

значения A известны из обработки ВАХ (см., например, таблицы к рис. 5а и 6а), а это значит, что по последней формуле (8) можно косвенным путем найти произведение ϵk . Полагая для воздуха $\epsilon \approx 1$, находим

$$\epsilon k = A / \alpha_0 \approx k. \quad (10)$$

По этой формуле рассчитаны значения подвижностей ионов при коронном разряде в воздухе и, как следует из полученных результатов (таблицы рис. 5а и рис. 6а), расхождения между данными по формуле (10) и известными значениями подвижностей ионов в воздухе при коронном разряде ~ 2 см²/(В·с) [16] весьма существенны. Следовательно, коэффициент ϵk в формуле Таунсенда (8) носит эмпирический характер, требующий дополнительных уточнений. Однако эти несоответствия для рассматриваемых обобщений не имеют особого значения, поскольку параметр A рассчитывается непосредственно по исходным ВАХ без привлечения указанного коэффициента.

Экспериментальные данные не всегда одинаково успешно обобщаются универсальными зависимостями (5) и (6). Но практически во всех случаях соблюдается математическая структура закономерности (1), что служит основанием для ее широкого использования.

О ПОДОБИИ КОРОННЫХ РАЗРЯДОВ И ЕГО ПРИМЕНЕНИИ

Анализ вольт-амперных характеристик предопределяет постановку вопроса относительно возможности расчета параметров различных ВАХ на основе ограниченного числа экспериментальных данных. С позиций методов подобия такого рода задачи представляются решаемыми, и мы кратко остановимся на этом.

Основными критериальными уравнениями подобия коронных разрядов являются уравнения (5), инвариантные относительно вольт-амперных характеристик. В качестве определяющего критерия подобия здесь выступает

$$U_* \equiv U / U_c = \text{idem}, \quad (11)$$

а определяемого –

$$Y_* \Rightarrow I_* \equiv I / I_0 = \text{idem}. \quad (12)$$

На основании этих соотношений можно получить другие выражения, например отношение размерных токов:

$$\frac{I^{(2)}}{I^{(1)}} = \frac{I_0^{(2)} \cdot U_*^{(2)} \cdot (U_*^{(2)} - 1)}{I_0^{(1)} \cdot U_*^{(1)} \cdot (U_*^{(1)} - 1)}. \quad (13)$$

Если точки «(1)» и «(2)» принадлежат одной и той же характеристике, то формула (13) представляет собой обычное отношение токов в пределах рассматриваемой характеристики. Однако

ЛИТЕРАТУРА

если точки относятся к различным характеристикам, то ситуация меняется. Например, для двух подобных безразмерных напряжений $U_*^{(1)} = U_*^{(2)}$ размерные токи второй характеристики в $I_0^{(2)} / I_0^{(1)}$ раз больше, чем для первой:

$$I^{(2)} = \frac{I_{(0)}^{(2)}}{I_0^{(1)}} \cdot I^{(1)}. \quad (14)$$

Так, согласно таблице рис. 1а, для первых двух характеристик по формуле (14) имеем

$$I^{(2)} = (0,11/0,09) \cdot I^{(1)} = 1,22 \cdot I^{(1)}$$

для любой пары безразмерных напряжений ($U_*^{(1)} = U_*^{(2)}$).

Пусть далее для подобных напряжений ток второй характеристики в m раз больше, чем первой:

$$I^{(2)} / I^{(1)} = m. \quad (15)$$

Тогда из (14) с учетом явных выражений (4) для масштабных токов получим соотношение между параметрами ВАХ:

$$A^{(2)} = m \cdot A^{(1)} \cdot [U_c^{(1)} / U_c^{(2)}]^2. \quad (16)$$

Следовательно, зная одну из характеристик, то есть ее параметры ($A^{(1)}$, $U_c^{(1)}$), и один из параметров второй ВАХ ($U_c^{(2)}$), можно найти другой параметр неизвестной вольт-амперной характеристики ($A^{(2)}$). В свою очередь основные параметры ВАХ (A и U_c) зависят от геометрических размеров системы электродов, давления, температуры и других величин, учитывая которые с помощью (16), можно установить новые соотношения.

В заключение заметим, что для подобия двух процессов коронного разряда необходимо равенство попарно всех критериев подобия, начиная с геометрических симплексов типа $R/r_0 = \text{idem}$, и т.д. В этой связи возникает вопрос, а не следует ли отнести симплекс U_i/U_c , где U_i – напряжение искрового пробоя межэлектродного промежутка, к совокупности критериев подобия коронного разряда. И тогда симплекс в виде $U_i/U_c = \text{idem}$ может привести к новым закономерностям. Анализ таких возможностей является предметом дальнейших исследований.

Авторы выражают благодарность Klaus Woletz (Karlsruhe Institute of Technology) за плодотворное участие в проведении экспериментальных исследований.

Работа выполнена при финансовой поддержке по двустороннему проекту АŞМ–ВМБФ: АŞМ: 13.823.15.09/GA, Институциональному проекту: 11.817.05.04A и ВМБФ:FKZ-Nr. 01DK13014.

- Haidara M., Denat A., Atten P., Corona Discharge in High Pressure Air. *J Electrostat.* 1997, **40–41**, 61–66.
- Bologa A., Paur H.-R. Corona Discharge in Gaseous Phase – Study and Applications. *Abstracts of the 6th International Conference on Materials Science and Condensed matter Physics*, 11–14 September 2012, Chisinau, Moldova, p. 258.
- Stano M., Safonov E., Kučera M., Matejčík Š.T. Ion Mobility Spectrometry Study of Negative Corona Discharge in Oxygen/Nitrogen Mixtures. *Chemické Listy*. 2008, **102**, s1414–s1417.
- Bonifaci N., Denat A., Malraison B. Determination of Charge Mobility in He Gas from Current-Voltage Measurements in Point-Plane Geometry. *IEEE Transactions on Industry Applications*. 2001, **37**(6), 1634–1640.
- Wang Q., Economou D.J., Donnelly V.M. Simulation of a Direct Current Microplasma Discharge in Helium at Atmospheric Pressure. *J Appl Phys.* 2006, **100**, 023301.
- Zhang J., Adamiak K., Castle G.S.P. Numerical Modeling of Negative-Corona Discharge in Oxygen under Different Pressures. *J Electrostat.* 2007, **65**, 174–181.
- Abdel-Salam M., Allen N.L. Current-Voltage Characteristics of Corona in Rod-Plane Gaps as Influenced by Temperature. *IEE Proceedings – Science, Measurement and Technology*. 2003, **150**(3), 135–139.
- Леб Л. *Основные процессы электрических разрядов в газах*. Москва–Ленинград: Госиздат технико-теоретической литературы, 1950. 672 с.
- Верещагин И.П. *Коронный разряд в аппаратах электронно-ионной технологии*. М.: Энергоатомиздат, 1985. 160 с.
- Salvermoser M., Murnick D.E. Efficient, Stable, Corona Discharge 172 nm Xenon Excimer Light Source. *J Appl Phys.* 2003, **94**(6), 3722.
- Lo Shui-Yin, Lobo Julio D., Blumberg Seth, Dibble, Theodore S., Zhang Hu, Tsao Chun-Cheng, Okumura Mitchio. Generation of Energetic He Atom Beams by a Pulsed Positive Corona Discharge. *J Appl Phys.* 1997, **81**(9), 5896–5905.
- Болога М.К., Гросу Ф.П., Кожухарь И.А. *Электроконвекция и теплообмен*. Кишинев: Штиинца, 1977. 320 с.
- Bologa M.K., Grosu F.P., Kozhevnikov I.V., Polikarpov A.A., Mardarskii O.I. Characteristics of an Electrohydrodynamic Pump. *Surf Eng Appl Electrochem.* 2014, **50**(5), 414–418.
- Рубашов И.Б., Бортников Н.С. *Электрогазодинамика*. М.: Атомиздат, 1971. 219 с.
- Денисов А.А., Нагорный В.С. *Электрогидро- и электрогазодинамические устройства автоматики*. Л.: Машиностроение, 1979. 288 с.
- Райзер Ю.П. *Физика газового разряда*. М.: Наука, 1992. 536 с.

17. Токарев А.В. *Коронный разряд и его применение*. Бишкек. КРСУ, 2009. 138 с.
18. Капцов Н.А. *Коронный разряд и его применение в электрофильтрах*. М.: Огиз, 1947. 227 с.
19. Grosu F.P., Bologa An.M., Paur H.-R., Bologa M.K., Motorin O.V. Generalization of the Townsend Current-Voltage Characteristics of a Corona Discharge. *Surf Eng Appl Electrochem.* 2014, **50**(4), 306–310.
20. Bologa An., Paur H.-R., Seifert H., Woletz K. Influence of Gas Composition, Temperature and Pressure on Corona Discharge Characteristics. *Int J Plasma Environmental Science & Technology.* 2011, **5**(2), 110–116.

Поступила 21.05.14

После доработки 05.02.15

Summary

Generalizations of the experimental current-voltage characteristics of corona discharge for helium and the synthetic air at positive and negative polarities of the discharge electrode of a complex star-shaped form at different gas pressures are presented. Analogous generalizations are carried out for current-voltage characteristics obtained for the dried air and a coaxial system of electrodes at various temperatures and the atmospheric pressure. The generalization consists in reducing the family of current-voltage characteristics to a single generalized equation which geometrically represents a segment bisector. Some aspects of application of similarity methods at corona discharge are considered. Townsend's structure of characteristics is confirmed and this fact can serve as a prerequisite for its wide application.

Keywords: corona discharge, current-voltage characteristics, helium, air, generalization, similarity criteria.