

# О зависимости параметров вольт-амперных характеристик коронного разряда от температуры

Ф. П. Гросу<sup>а</sup>, Ан. М. Болога<sup>б</sup>, М. К. Болога<sup>а</sup>, О. В. Моторин<sup>а</sup>

<sup>а</sup>Институт прикладной физики АН Молдовы,

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

<sup>б</sup>Технологический институт Карлсруэ, Институт технической химии,

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

Анализируются зависимости параметров вольт-амперных характеристик коронного разряда от температуры газа. Показано, что напряжение зажигания коронного разряда  $U_c(T)$  для гелия и азота убывает с ростом температуры. Для гелия зависимость параметра  $A(T)$  носит сложный характер, возрастающий на начальном и конечном участках исследуемого интервала температур ( $20^\circ\text{C} \div 369^\circ\text{C}$ ) и убывающий в средней его части с двумя экстремумами. Ввиду нестабильности разряда в азоте определенной закономерности получить не удалось. Представлены обобщенные зависимости, позволяющие судить о наличии того или иного типа разряда, отличающегося от коронного. Выдвинуто предположение о существенной роли в наблюдаемых процессах двух эффектов: абсорбции ионов поверхностью электродов и непрерывного изменения подвижности ионов из-за изменения массы в связи с процессами кластеризации и декластеризации ионов, между которыми в стационарном состоянии предположительно существует динамическое равновесие.

*Ключевые слова:* коронный разряд, вольт-амперные характеристики, напряжение, ток, подвижность, ионы, температура, давление, кластеры.

УДК 537.527.3

## ВВЕДЕНИЕ

Таунсендовский тип уравнения вольт-амперных характеристик (ВАХ) коронного разряда (КР) имеет вид [1–3]:

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

где коэффициент пропорциональности

$$A = a \cdot \varepsilon \cdot k, \quad (2)$$

$\varepsilon$  и  $k$  – относительная диэлектрическая проницаемость газа и подвижность ионов знака коронирующего электрода; величина  $a$  зависит от геометрии электродов и их размеров;  $U_c$  – напряжение зажигания коронного разряда. Для цилиндрической коаксиальной системы электродов (ЦСЭ) известно теоретическое значение  $a$  [2]:

$$a = \frac{8\pi\varepsilon_0}{R^2 \cdot \ln(R/r_0)}, \quad (3)$$

где  $r_0$ ,  $R$  – радиусы коронирующего и заземленного электродов.

Вольт-амперные характеристики коронного разряда зависят от параметров  $A$  и  $U_c$ , которые можно определить на основе статистической обработки экспериментальных ВАХ, например методом наименьших квадратов [4]:

$$A = \frac{\bar{I} - \bar{U} \cdot \bar{Y}}{\bar{U}^2 - \bar{U}^2}; U_c = \frac{\bar{I} \cdot \bar{U} - \bar{Y} \cdot \bar{U}^2}{\bar{I} - \bar{U} \cdot \bar{Y}}; I/U \equiv Y. \quad (4)$$

В случае практического применения, связанного с охлаждением узлов радиоэлектронной аппара-

туры за счет электрического ветра [5] или использованием КР в лазерной технике [6, 7], коронный разряд часто протекает в условиях широкого варьирования давления  $p$  и температуры  $T$  газа. Поэтому важным представляется знание зависимости указанных выше параметров от этих термодинамических величин, то есть  $A(p, T)$  и  $U_c(p, T)$ . Решение задач предполагает нахождение параметров  $A$  и  $U_c$  статистическим путем. Первоначально устанавливаются вариационные ряды  $I(U)$  при различных фиксированных давлениях и температурах и рассчитываются  $A(p, T)$  и  $U_c(p, T)$  по формулам (4). Далее находят непосредственно сами зависимости по соответствующим уравнениям регрессии.

Ранее [8] была исследована зависимость параметров  $A(p)$  и  $U_c(p)$  от давления при заданных значениях температуры для гелия и азота. Установлено, что в гелии зависимость  $A(p)$  соответствует классическим представлениям об обратной пропорциональной зависимости коэффициента подвижности ионов от давления. Для напряжения зажигания короны  $U_c$  подтвердилась формула Пика. В случае азота исследования показали наличие минимума в зависимости  $A(p)$ , который можно предположительно конкретно объяснить на основе гипотезы о применимости уравнения Клаузиуса-Мосотти для диэлектрической проницаемости азота.

Цель данной работы – проведение аналогичных исследований применительно к определению соответствующих зависимостей  $A(T)$  и

$U_c(T)$ , к тем же газам и, по возможности, при аналогичных условиях.

### ПАРАМЕТР $U_c(T)$

*Теоретические предпосылки.* Зависимость начального напряжения зажигания коронного разряда от давления и температуры качественно можно объяснить на основе формулы Пика, которая с точностью до числовых коэффициентов предположительно соблюдается не только для ЦСЭ, но и для ряда других электродных систем [1, 2]. Полагаем:

$$U_c \sim E_c \sim \delta \cdot \left( b + \frac{c}{\sqrt{\delta}} \right) = b \cdot \delta + c \cdot \sqrt{\delta}, \quad (5)$$

где  $b$  и  $c$  – числовые коэффициенты, зависящие от геометрии электродов.

Далее

$$\delta \equiv \frac{\gamma}{\gamma_0}; \quad p = \frac{\gamma RT}{M} \Rightarrow \delta = \frac{T_0 \cdot p}{p_0 \cdot T}, \quad (6)$$

здесь  $\gamma$  и  $p$  – плотность и давление газа;  $R$  – универсальная газовая постоянная;  $T$  – абсолютная температура;  $M$  – молярная масса газа; индекс «0» указывает на состояние газа, близкое к нормальному ( $T_0 = 25^\circ\text{C}$ ;  $p_0 = 1$  атм) [2]. В результате с точностью до постоянных коэффициентов получим зависимость

$$U_c = b \cdot (pT_0/Tp_0) + c \cdot \sqrt{(pT_0/Tp_0)}. \quad (7)$$

При  $p = \text{const}$  зависимость от температуры приобретает вид:

$$U_c = b_1/T + c_1/\sqrt{T}, \quad (8)$$

где коэффициенты обозначены как  $b_1$  и  $c_1$ . Уравнение (8) представляет собой искомую зависимость  $U_c(T)$ , в которой необходимо определить указанные выше коэффициенты по ранее предложенной схеме.

*Обсуждение экспериментальных данных.* Применительно к гелию исходим из экспериментальной выборки ВАХ для различных температур при постоянном давлении в 20 бар, представленной на рис. 1. На рис. 2 приведено соответствующее обобщение согласно формулам [4]:

$$Y_3 \equiv I / (A \cdot U_* \cdot U_c^2) + 1 = U_*; \quad U_* \equiv U/U_c. \quad (9)$$

Целый ряд точек выходит за пределы ошибок эксперимента ( $\pm 20\%$ ) относительно обобщающей зависимости. С целью более наглядного представления этих точек построены обобщенные графики (рис. 3) для каждой зависимости в отдельности, которые, включая общий (рис. 2), могут служить критериями принадлежности разряда к типу коронного. Исключая точки, не подчиняющиеся закономерностям коронного разря-

да, отраженным формулой (1) и биссектрисой на рис. 2, сужаем диапазон ВАХ. Это, однако, не означает, что рассматриваемые точки являются следствиями ошибок экспериментов. Просто разрядные явления могут носить «специфический» характер, а характеризующие их экспериментальные точки могут не укладываться в общую закономерность (1). В этом отношении особенно «чувствителен» коронный разряд в азоте и его смесях с гелием.

Так, при комнатной температуре (рис. 3а) коронный разряд проявляет себя в интервале безразмерных напряжений  $U_* \in (1; 2)$ , а при температуре  $100^\circ\text{C}$  (рис. 3б) – в интервале  $U_* \in (1, 1; 2, 8)$ . Для температуры  $369^\circ\text{C}$  (рис. 3з) можно прогнозировать интервал коронного разряда  $U_* \in (2; 3, 5)$ . Если, например, технологический процесс охватывает диапазон температур от  $20^\circ\text{C}$  до  $369^\circ\text{C}$ , то следует ориентироваться на обобщающую зависимость, представленную на рис. 2, из которой следует  $U_* \in (1, 8; 2, 4)$ . Близость точек к отрезку прямой является признаком наличия коронного разряда, подчиняющегося формуле (1). По обобщенной зависимости на рис. 2 можно предсказать, что в пределах ошибок эксперимента в интервале  $U_* \in (1, 8; 2, 4)$  будет иметь коронный разряд. Там, где зависимость (1) не подтверждается, имеют место иные формы газового разряда. Графические зависимости на рис. 3 могут рассматриваться как «идентификаторы» коронного разряда. В подрисуночных данных рис. 3 указаны параметры  $A$  и  $U_c$ , по которым можно найти их аппроксимации  $U_c(T)$  и  $A(T)$ .

На рис. 4 приведен график экспериментальной зависимости  $U_c(T)$  для обобщенных частных зависимостей от температуры, представленных на рис. 3, которая качественно соответствует уменьшению напряжения зажигания короны с ростом температуры. Однако в области  $T = 500\text{K}$  наблюдается «аномалия» этой зависимости по сравнению с ожидаемой (8): появляется перегиб зависимости, не соответствующий формуле (8). В окрестности предполагаемой точки перегиба параметр  $U_c$  почти не меняется с ростом температуры, после чего при температуре около  $600\text{K}$  следует его спад (рис. 4). Можно предположить, что в основе данного физического явления лежит способность поглощения газов электродами, особенно таких легких газов, как водород и гелий [9]. Однако ограничимся констатацией экспериментальных фактов, когда наблюдаются уменьшение напряжения зажигания короны с ростом температуры и наличие плато в этой зависимости, после которого следует быстрый спад  $U_c(T)$  (рис. 4). Чтобы наглядно представить, насколько экспериментальные данные отклоня-

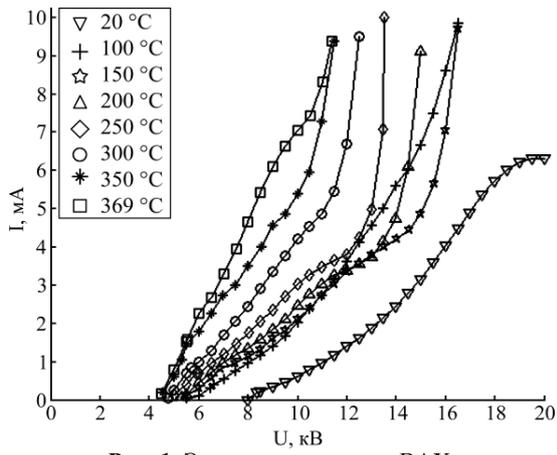


Рис. 1. Экспериментальные ВАХ.

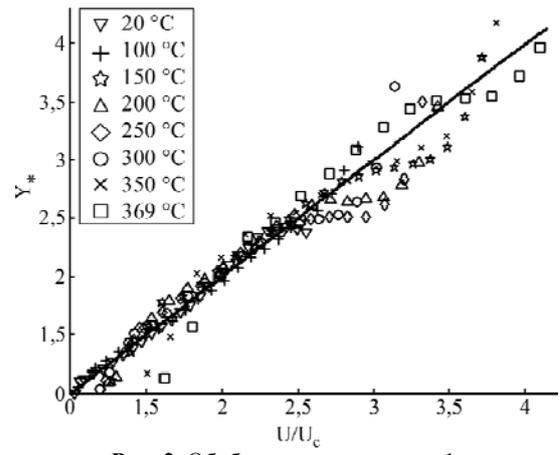
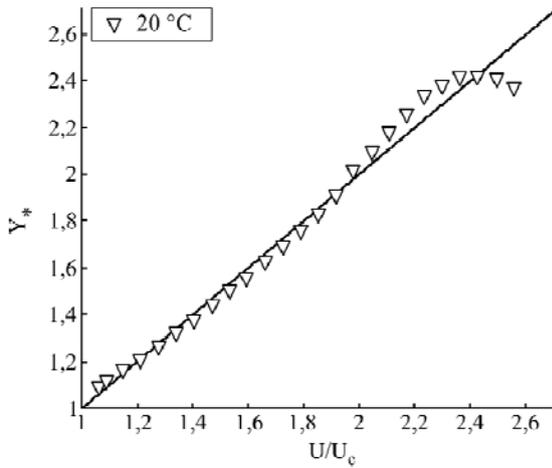
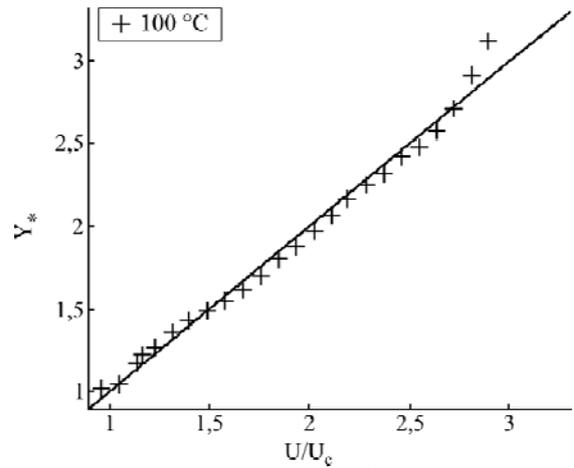
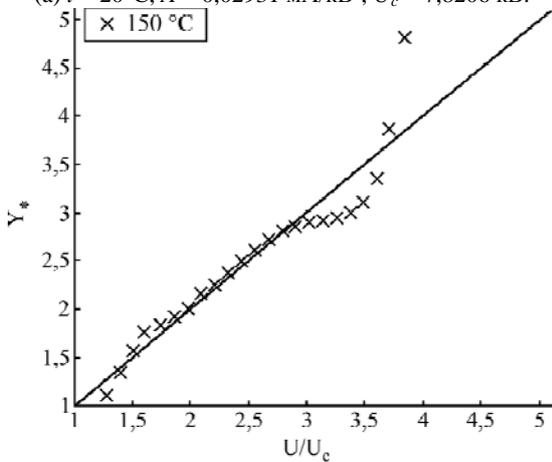
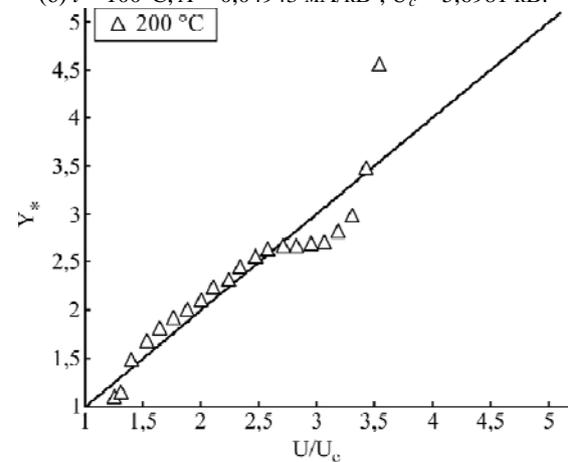
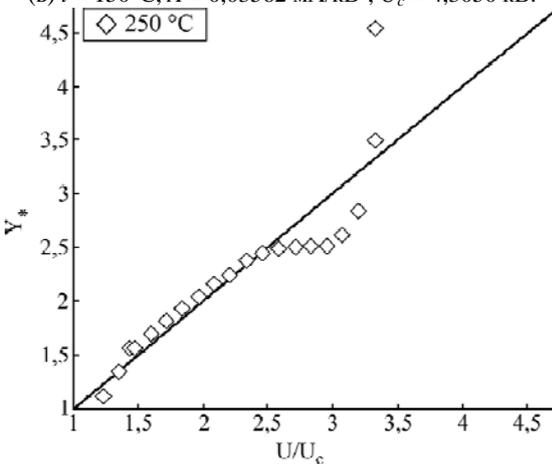
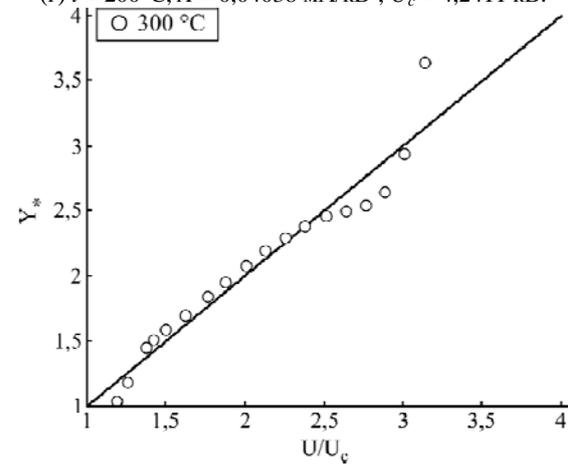


Рис. 2. Обобщение данных рис. 1.

(a)  $t = 20^\circ\text{C}$ ,  $A = 0,02931 \text{ mA/kB}^2$ ,  $U_c = 7,8206 \text{ kB}$ .(б)  $t = 100^\circ\text{C}$ ,  $A = 0,04943 \text{ mA/kB}^2$ ,  $U_c = 5,6981 \text{ kB}$ .(в)  $t = 150^\circ\text{C}$ ,  $A = 0,03562 \text{ mA/kB}^2$ ,  $U_c = 4,3050 \text{ kB}$ .(г)  $t = 200^\circ\text{C}$ ,  $A = 0,04038 \text{ mA/kB}^2$ ,  $U_c = 4,2411 \text{ kB}$ .(д)  $t = 250^\circ\text{C}$ ,  $A = 0,05142 \text{ mA/kB}^2$ ,  $U_c = 4,0655 \text{ kB}$ .(е)  $t = 300^\circ\text{C}$ ,  $A = 0,07246 \text{ mA/kB}^2$ ,  $U_c = 3,9796 \text{ kB}$ .

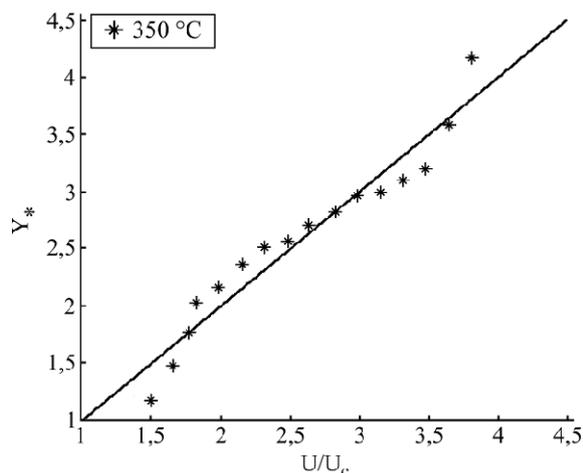
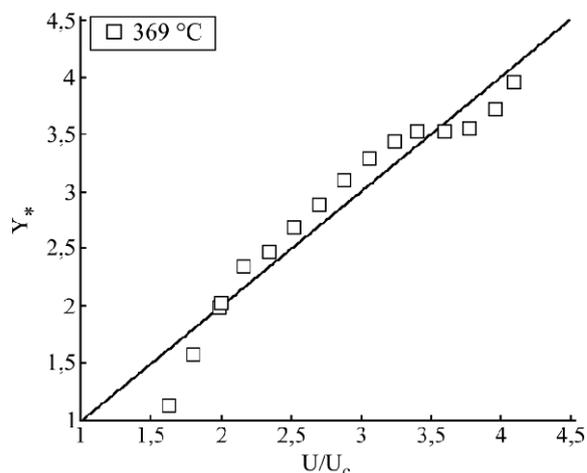
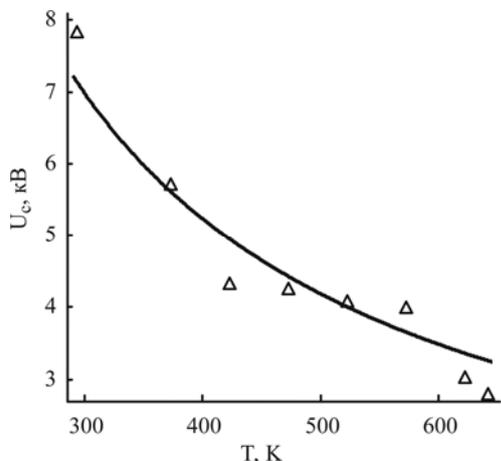
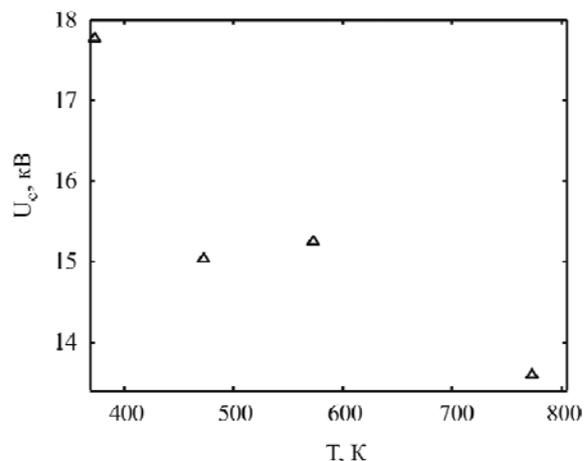
(ж)  $t = 350^\circ\text{C}$ ,  $A = 0,08511 \text{ mA/kB}^2$ ,  $U_c = 3,0158 \text{ kB}$ .(з)  $t = 369^\circ\text{C}$ ,  $A = 0,09990 \text{ mA/kB}^2$ ,  $U_c = 2,7816 \text{ kB}$ .

Рис. 3. Обобщающие графики для различных температур.

Рис. 4. Зависимость  $U_c(T)$ . Не,  $p = 20 \text{ бар}$ .Рис. 5. Зависимость  $U_c(T)$ . Азот  $p = 7 \text{ бар}$ .

ются от зависимости типа Пика, на рис. 4 приведена кривая регрессии, аппроксимирующая опытные данные, согласно формуле:

$$U_c = \frac{2,094 \cdot 10^3}{T} + \frac{2,613 \cdot 10^{-8}}{\sqrt{T}} \approx \frac{2,094 \cdot 10^3}{T}. \quad (10)$$

Исследования, проведенные в азоте, показывают нестабильность протекания коронного разряда. На рис. 5 приведена зависимость, которая имеет преимущественно качественный характер. Наблюдается определенное сходство с коронным разрядом в гелии (плато на рис. 4), однако в азоте вблизи точки 470K наблюдается не плато, а локальный минимум. Что же касается воздуха, то, согласно данным [10], наблюдаемые зависимости хорошо согласуются с формулой Пика.

На рис. 6 приведены вольт-амперные характеристики, снятые при КР в коаксиальной модели электродов [10], а на рис. 7 – обобщения по предлагаемой методике аналогично рис. 1 и 2. «Критерий» (рис. 7) принадлежности к разряду типа КР соблюдается с высокой точностью. Следует ожидать и соблюдения формулы Пика (8), о чем свидетельствует график (рис. 8), построенный согласно уравнению регрессии, аналогичному (8):

$$U_c = \frac{1,175 \cdot 10^3}{T} + \frac{73,86}{\sqrt{T}}.$$

Обработка опытных данных для отрицательной короны [10] также привела к хорошим результатам.

Неотъемлемой частью КР является электрический ветер (ЭВ), как следствие наличия в разряде свободных нескомпенсированных зарядов объемной плотностью  $\rho$ , которые, будучи обусловлены [11] множителем  $(U-U_c) \sim \rho$  в (1), отражены в вольт-амперных характеристиках (в виде биссектрис). Следовательно, эти характеристики содержат информацию и об электрическом ветре.

#### ПАРАМЕТР $A(T)$

*Теоретические предпосылки.* Считаем диэлектрическую проницаемость гелия постоянной. Тогда, согласно формуле (2), следует ожидать, что зависимость параметра  $A$  от температуры можно объяснить зависимостью подвижности активных ионов от температуры  $k = k(T)$ . Обратимся к классическим зависимостям подвижности газовых ионов от температуры (давление газа считаем постоянным). Так, согласно теории Ланжевена, подвижность ионов должна быть обратно пропорциональной среднеквадратичной

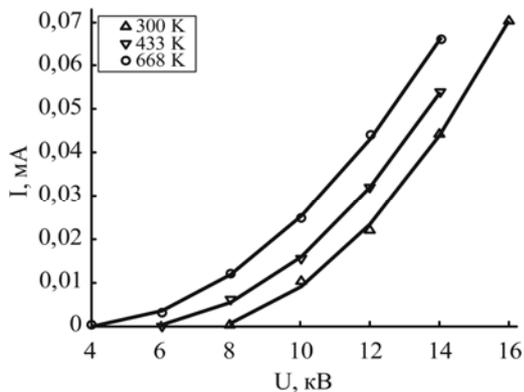


Рис. 6. Исходные ВАХ для воздуха; «+» корона.

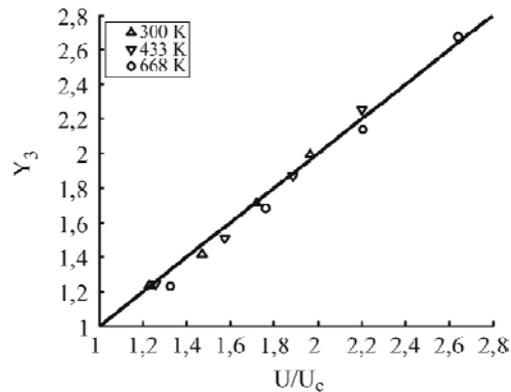


Рис. 7. Обобщающая ВАХ.

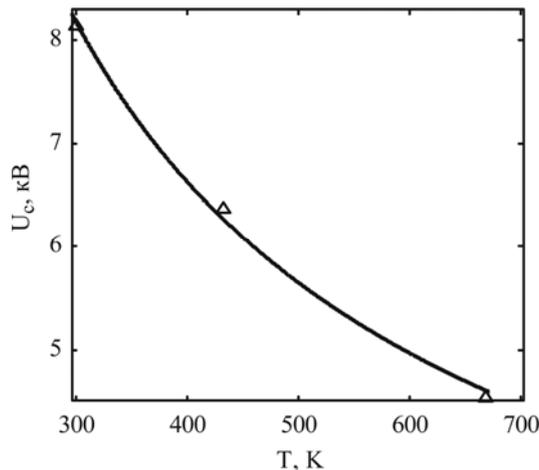


Рис. 8. Зависимость  $U_c(T)$ . Воздух  $p=1$  бар.

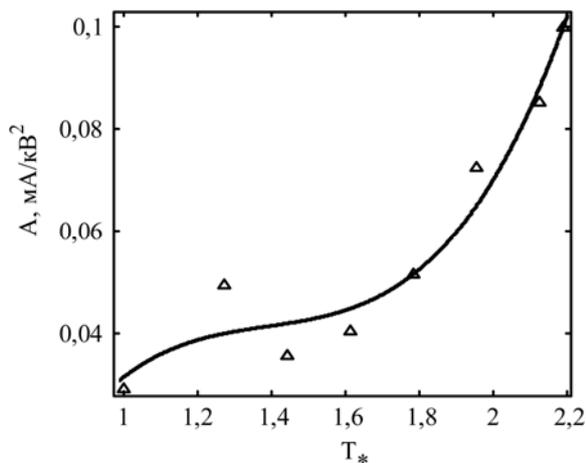


Рис. 9. Аппроксимация экспериментальных данных  $A(T)$  полиномом третьего порядка. Точки – эксперимент.

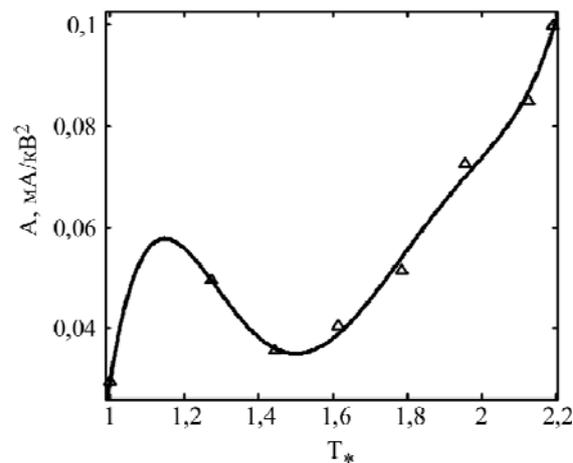


Рис. 10. Аппроксимация данных эксперимента  $A(T)$  полиномом пятого порядка (11). Точки – эксперимент.

скорости  $u$  и прямо пропорциональной длине свободного пробега иона  $\lambda$ , которая, в свою очередь, обратно пропорциональна плотности газа. Следовательно, подвижность ионов должна быть пропорциональна корню квадратному из температуры, в то время как, согласно другим исследованиям, в частности теоретическим, температурная зависимость подвижности обратно пропорциональна корню квадратному из температуры [12]. Учет зависимости эффективного поперечного сечения столкновений частиц от температуры, по формуле Сюзерленда, также не привел к достаточной ясности [13] в рассматриваемом вопросе. Согласно работам [14, 15],

подвижность убывает с понижением температуры, как  $T^{-1/2}$  в случае малых ионов, например для гелия, что качественно согласуется со справочными и экспериментальными данными [16], но возрастает с повышением температуры для крупных ионов кластерной структуры. В этих случаях проявляются две противоположные тенденции: кластеризации и декластеризации ионов, что может приводить к росту подвижности с температурой, убыванию или постоянству подвижности [14].

*Обсуждение экспериментальных данных.* Рассмотрим аппроксимацию экспериментальных зависимостей  $A(T)$  от температуры для гелия и

воздуха, согласно [10]. В случае гелия исходим из обобщающих зависимостей на рис. 1 и 2 и отдельных характеристик на рис. 3. Исходный график этой зависимости и ее аппроксимация полиномом третьего порядка представлены на рис. 9. Аппроксимирующая зависимость не охватывает характерные особенности экспериментальных точек, в частности, утеряны экстремумы. С точностью до среднеквадратичной ошибки 0,0032 в качестве приемлемой принята аппроксимация (рис. 10) полиномом пятой степени:

$$A(T_*) = 1,131 \cdot T_*^5 - 9,504 \cdot T_*^4 + 31,48 \cdot T_*^3 - 51,2 \cdot T_*^2 + 40,78 \cdot T_* - 12,66, \quad (11)$$

где температура нормирована на  $T_0 = 293\text{K}$  ( $20^\circ\text{C}$ ), то есть  $T_* = T/T_0$ . Что касается зависимости  $A(T)$  для азота, то в данном случае возникли определенные проблемы с воспроизводимостью опытных данных, что свидетельствует о необходимости проведения дополнительных экспериментальных исследований. Применительно к обобщениям на рис. 6–7 для воздуха, по данным работы [10], укажем на их хорошую воспроизводимость. Соответствующий график  $A(T)$  приведен на рис. 11 (положительная полярность коронного разряда).

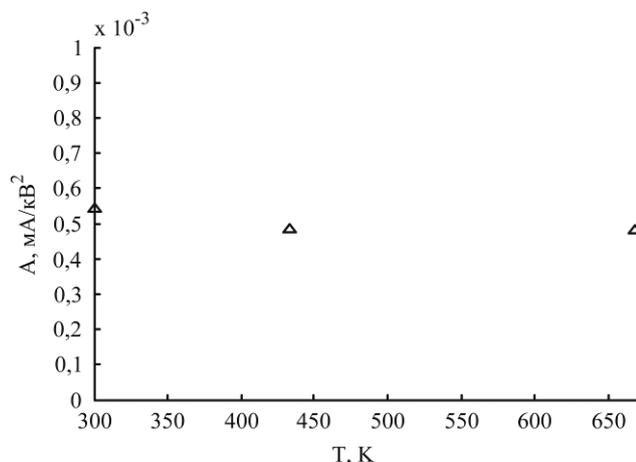


Рис. 11. Экспериментальная зависимость  $A(T)$  для воздуха при атмосферном давлении.

Экспериментальные точки практически ложатся на горизонтальный отрезок, что свидетельствует о возможно слабой зависимости параметра  $A$  от температуры  $T$ . Аналогичный результат характерен и для отрицательной короны.

## ВЫВОДЫ

1. В работе приведены общие и отдельные обобщения ВАХ КР при различных температурах газа, позволяющие «идентифицировать» коронный разряд.

2. Зависимость  $U_c(T)$  для гелия и азота носит сложно убывающий характер. Для воздуха соблюдается монотонно убывающий характер зависимости в соответствии с формулой Пика.

3. В зависимости  $A(T)$  для гелия в интервале температур от  $20$  до  $369^\circ\text{C}$  наблюдается возрастающая ветвь до максимума, затем спад до минимума с дальнейшим подъемом. Эта зависимость хорошо аппроксимируется полиномом пятой степени. Для азота такая зависимость не установлена. В случае воздуха наблюдается слабая зависимость рассматриваемого параметра от температуры.

4. Отмеченные закономерности еще не нашли полного теоретического объяснения, но в порядке обсуждения результатов можно предположить, что в условиях высоких температур и давлений следует учесть два эффекта: принципиальную возможность абсорбции ионов электродами и непрерывный характер изменения подвижности ионов вследствие изменения массы ввиду кластеризации и декластеризации ионов. Можно предположить, что в стационарном состоянии между этими процессами существует определенное динамическое равновесие.

*Работа выполнена при финансовой поддержке по двустороннему проекту АШМ–БМБФ: АШМ: 13.823.15.09/GA, Институциональному проекту: 15.817.02.07A и БМБФ:FKZ-Nr. 01DK13014.*

## ЛИТЕРАТУРА

1. Верещагин И.П., Левитов В.И., Мирзабекян Г.З., Пашин М. *Основы электродинамики дисперсных систем*. М.: Энергия, 1974. 420 с.
2. Райзер Ю.П. *Физика газового разряда*. М.: Наука, 1992. 536 с.
3. Самусенко А.В., Стишков Ю.К. *Электрофизические процессы в газах при воздействии сильных электрических полей*. Санкт-Петербург: Изд-во Госуниверситета, 2011. 567 с.
4. Grosu F.P., Bologa An.M., Bologa M.K., Motorin O.V. Similarity Methods and Generalizations in Study of Corona Discharge. *Proceedings of 11<sup>th</sup> International Conference on Modern Problems of Electrophysics and Electrohydrodynamics (MPEE-2015)*. June 29 – July 3, 2015, Peterhof, Russia, pp. 129–135.
5. Болога М.К., Гросу Ф.П., Кожухарь И.А. *Электроконвекция и теплообмен*. Кишинев: Штиинца, 1977. 320 с.
6. Salvermoser M., Murnick D.E. Efficient, Stable, Corona Discharge 172 nm Xenon Excimer Light Source. *J Appl Phys.* 2003, **94**(6), 3722.
7. 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.
8. Гросу Ф.П., Болога Ан.М., Болога М.К., Моторин О.В. Влияние давления газа на вольт-амперную характеристику коронного разряда. *Сборник докладов XI конференции «Волновая электрогидродинамика проводящей жидкости*. Долго-

- живущие плазменные образования и малоизученные формы естественных электрических разрядов в атмосфере». 04.07. – 07.07. 2015 года, Ярославль, Россия, с. 56–63.*
9. Черданцев Ю.П., Чернов И.П., Тюрин Ю.И. *Методы исследования систем металл-водород*. Учебное пособие. Томск: Из-во ТПУ, 2008. 286 с.
  10. Токарев А.В. *Коронный разряд и его применение*. Бишкек: КРСУ, 2009. 138 с.
  11. Гросу Ф.П., Болога Ан.М., Болога М.К., Моторин О.В. О моделировании коронного разряда методами теории подобия. *ЭОМ*. 2014, **50**(2), 41–48.
  12. Смирнов Б.М. Диффузия и подвижность ионов в газе. *УФН*. 1967, **92**(1), 75–103.
  13. Леб Л. *Основные процессы электрических разрядов в газах*. Москва–Ленинград: Госиздат технико-теоретической литературы, 1950. 672 с.
  14. Karpas Z., Eiceman G.A., Krylov E.V., Krylova N. Models on Ion Heating and Mobility in Linear Field Drift Tubes and in Differential Mobility Spectrometers. *Int J Ion Mobility Spectrom*. 2004, **7**, 8–18.
  15. Zeev Karpas, Zvi Berant, Oded Shahal. Effect of Temperature on the Mobility of Ions. *J Am Chem Soc*. 1989, **111**(16), 6015–6018.
  16. *Таблицы физических величин. Справочник*. Под ред. акад. И.К. Кикоина. М.: Атомиздат, 1976. 1008 с.

*Поступила 20.05.15*

### Summary

The dependences of parameters of current-voltage characteristics of corona discharge on temperature are analyzed. It is shown that the inception voltage  $U_c(T)$  for both helium and nitrogen decreases as the temperature increases. The dependence of the parameter  $A(T)$  for helium is of a complex character, it increases both in the initial and final parts of the investigated range of temperatures (20°C – 369°C) and decreases in its middle part with two extrema. It was not possible to receive such dependence for nitrogen due to the corona discharge instability. Presented generalized dependences give possibility to distinguish the corona discharge from other kinds of discharge. It is assumed that two factors play a significant role in the investigated process: ion absorption by the surface of electrodes and continuous change of ion mobility due to the ion mass change in the processes of ions clasterization and declasterization. In a steady slate there is a dynamic equilibrium between those processes.

*Keywords: corona discharge, current-voltage characteristics, current, voltage, ion mobility, temperature, pressure, cluster.*