

УДК 537.525.99

## О влиянии растекания тока в дрейфовой области разряда на вольт-амперную характеристику отрицательной короны в аргоне

Б.Б. Балданов

*С использованием секционированного анода в геометрии острие-плоскость исследован радиальный профиль плотности тока отрицательной короны в аргоне. Экспериментально обнаружено сужение радиального распределения тока по аноду и уменьшение светового диаметра у анода с ростом тока короны. Получена параболическая аппроксимация для вольтамперной характеристики отрицательной короны в аргоне, с учетом экспериментально обнаруженного сужения токового сечения на аноде с ростом тока короны.*

PACS: 52.80.Nc

*Ключевые слова:* коронный разряд, тлеющий разряд, аргон, токовая трубка, острие-плоскость, секционированный анод.

### Введение

Отрицательная диффузная корона как один из эффективных способов генерации неравновесной плазмы атмосферного давления находит широкое применение в различных областях науки и техники. К настоящему времени разработано большое число математических методов расчета усредненной во времени вольт-амперной характеристики (ВАХ) отрицательной короны в воздухе. Как показали динамические расчеты [1–3] для отрицательной короны, учет реальной зарядовой кинетики, а также сложная геометрия электродной системы значительно усложняет и делает трудоемкими такие расчеты, что затрудняет их широкое использование во многих практических приложениях коронного разряда. В [4] показано, что расчеты усредненной ВАХ отрицательной короны можно существенно упростить, используя понятие об усредненной по времени и по радиусу эффективной трубке тока. В основе упрощенных расчетов ВАХ короны с использованием понятия эффективной токовой трубки лежит свойство отрицательной короны в воздухе, заключающееся в сохранении ее поперечной структуры на аноде при варьировании тока [5]. При этом радиальный профиль плотности тока на аноде не зависит от структуры силовых линий вблизи коронирующего острия и величины тока короны, а зависит лишь от текущего радиуса на аноде.

В работах [6–9] впервые сообщается об обнаружении импульсно-периодического режима отрицательной короны в электроположительных газах (азот, аргон) в геометрии острие-плоскость в широкой области экспериментальных условий. Сравнение динамических характеристик отрицательной короны в электроположительных газах позволило выявить ряд существенных отличий от свойств короны в воздухе. Установлено, что на ВАХ отрицательной короны в электроположительных газах выделяются три разные стадии развития коронного разряда (гистерезисная область, импульсно-периодический режим, режим тлеющего разряда), характеризующиеся своими пороговыми напряжениями и скоростями роста тока [6, 7]. Следует ожидать, что наличие различных токовых режимов горения коронного разряда в электроположительных газах должно приводить к изменению формы токовой трубки с ростом тока. В экспериментах с отрицательной короной в воздухе обнаружено, что при переходе отрицательной короны в режим тлеющего разряда наблюдается сужение радиального распределения тока по аноду и увеличение светового диаметра короны с ростом тока короны [10]. В [6] при исследовании отрицательной короны в электроположительном газе (азоте) обнаружено влияние немонотонного радиального распределения тока на аноде на форму токовой трубки коронного разряда.

Таким образом, для корректного расчета усредненной ВАХ отрицательной короны в аргоне с использованием понятия эффективной токовой трубки необходима априорная информация о характере растекания тока по поверхности плоского анода. Особенно важен учет данного обстоятельства при расчетах отрицательной короны в коротких (сантиметровых) промежутках, поскольку

Балданов Баир Батович, ст. научн. сотрудник.  
Институт физического материаловедения  
Сибирского отделения РАН.  
Россия, 670047, Республика Бурятия,  
г. Улан-Удэ, ул. Сахьяновой, 8  
Тел.: (3012) 43–91–23. E-mail: baibat@mail.ru

Статья поступила в редакцию 20 сентября 2013 г.

© Балданов Б.Б., 2013

с уменьшением межэлектродного промежутка переходная область с сильно нестационарным полем составляет заметную долю от длины межэлектродного промежутка.

Целью данной работы являлся расчет вольт-амперной характеристики отрицательной короны в геометрии острие-плоскость в аргоне на основе экспериментально измеренного радиального профиля тока на аноде.

### Экспериментальная техника и методика

Для измерения радиального распределения тока  $j(r)$  использовался плоский секционированный анод большого диаметра, набранный из металлических колец [3]. Концентрические кольца разделены между собой тонкими диэлектрическими зазорами (рис. 1, а). Для измерения плотности тока в центре анода использовался плоский анод с небольшим отверстием, в которое через тонкую диэлектрическую трубку вставляется проволока диаметром  $D = 3$  мм (эффективная площадь собирающей поверхности зонда составляет  $\sim 7$  мм<sup>2</sup>). Торцевая проволока-зонд заделана заподлицо с поверхностью анода. В эксперименте регистрировался ток с каждого кольца, а также суммарный ток разряда. Корректность измерений проверялась совпадением суммарного тока разряда с суммой токов всех колец. В качестве коронирующего электрода использовался металлический стержень с радиусом закругления вершины конуса  $r = 25$  мкм. Схема измерения распределения тока по анодным секциям отрицательной короны представлена на рис. 1, б.

Электрическое питание коронного разряда осуществлялось от выпрямительной установки ВС-20–10. Величина регулируемого напряжения  $U$  изменяется до 20 кВ. Источник питания подключался к электродам через балластное сопротивление  $R_6$ . Усредненный ток отрицательного коронного разряда измерялся стрелочным микроамперметром, напряжение на разрядном промежутке измерялось универсальным вольтметром с помощью калиброванного высоковольтного делителя с соотношением плеч 1:1000. В экспериментах использовался особо чистый аргон Ar (ГОСТ 10157–79), где содержание примесей находилось на уровне 0,01%. Для поддержания паспортной чистоты аргона и удаления из зоны разряда возможных продуктов плазмохимических реакций газ непрерывно прокачивался через разрядную камеру. Расход аргона измерялся с помощью ротаметра РМ-А-0.16 ГУЗ до  $28 \cdot 10^{-3}$  кг/с.

### Результаты эксперимента и их обсуждение

Экспериментально измеренные ВАХ отрицательной короны атмосферного давления аппрок-

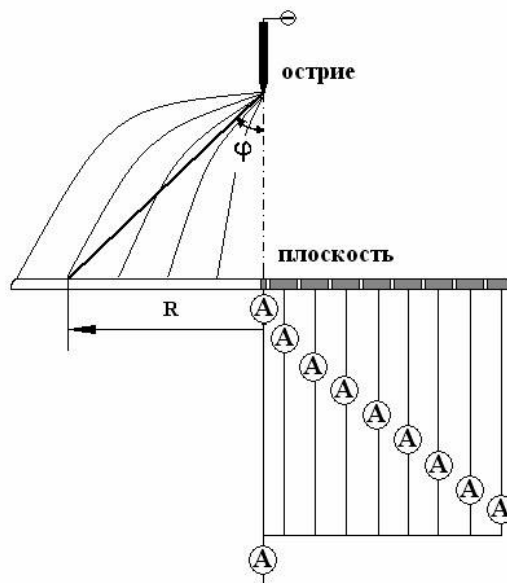


Рис. 1. Схема измерений распределения тока отрицательной короны по анодным секциям.

симируются параболической зависимостью вида [4]:

$$I = kU(U - U_0) \cong \frac{\mu_i \epsilon_0 S_a}{d^3} U(U - U_0), \quad (1)$$

где  $\mu_i$  — подвижность ионов;  $\epsilon_0$  — электрическая постоянная;  $d$  — межэлектродный промежуток;  $U_0$  — начальное напряжение;  $S_a$  — эффективная площадь токовой трубки на аноде.

В отличие от короны в воздухе, для которой  $U_0$  соответствует напряжению зажигания короны  $U^*$ , в случае аргона  $U_0$  соответствует напряжению погасания короны (в аргоне  $U^* > U_0$ ) [7]. Отмеченное обстоятельство обусловлено тем, что для ВАХ отрицательной короны в электроположительных газах (азот, аргон) характерен гистерезис [6, 7].

В случае отрицательной короны в воздухе плотность тока на аноде монотонно падает от центра по закону Варбурга [11]:

$$j(\vartheta) \cong j_0 \cos^n \vartheta \cong j_0 (1 + \operatorname{tg} \vartheta)^{-n/2}, \quad (2)$$

где  $j_0$  — плотность тока в центре анода, которая линейно растет с ростом тока короны  $I$ ;  $\vartheta$  — угол с вершиной на острие иглы и отсчитываемый от оси симметрии короны;  $\operatorname{tg} \vartheta = r/d$ , где  $r$  — текущий радиус на аноде;  $d$  — межэлектродное расстояние.

Величину эффективного сечения токового канала отрицательной короны на аноде по приведенному выше выражению можно оценить как [3]:

$$S_a \cong I / j_0 = \pi d^2 / j_0 \int j(\vartheta) d(\operatorname{tg} \vartheta)^2 \cong (2 \pm 0,2) d^2 \quad (\text{мм}^2), \quad (3)$$

где  $I$  — полный ток короны.

Установлено, что для отрицательной короны в воздухе свойственна независимость эффектив-

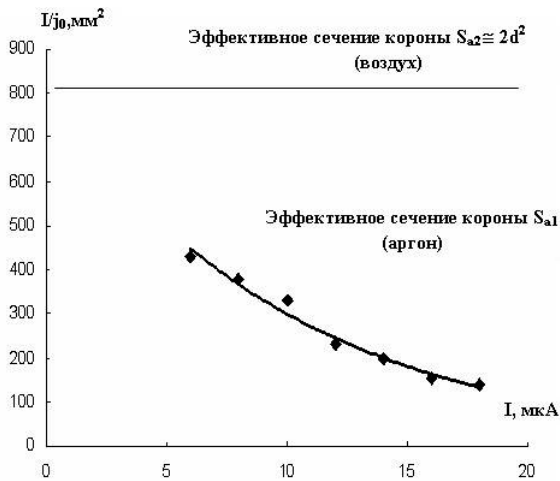


Рис. 2. Зависимость эффективного сечения токового канала  $S_{a1}$  на аноде от полного тока короны в аргоне. Межэлектродное расстояние  $d = 2$  см. Сплошная горизонтальная линия эффективное токовое сечение короны в воздухе  $S_{a2} \cong 2d^2$ .

ного сечения  $S_a$  токового канала на аноде от полного тока короны [5].

На рис. 2 представлена зависимость эффективного сечения токовой трубки  $S_{a1}$  отрицательной короны на аноде от полного тока короны в аргоне. Как видно, токовое сечение  $S_{a1}$  осесимметричной короны в аргоне (Рис. 2) значительно меньше (~ в 2 раза) эффективного сечения короны определяемого из распределения Варбурга (сплошная горизонтальная линия  $S_{a2} \cong 2d^2$ ). При дальнейшем увеличении полного тока  $I$  короны наблюдается сужение токового канала.

Как следует из зондовых измерений распределения потенциала на аноде (рис. 3), уменьшение токового сечения  $S_{eff}$  на аноде в аргоне связано с характером распределения электрического поля и потенциала по поверхности анода до и после зажигания коронного разряда. После зажигания короны конфигурация силовых линий поля в разрядном промежутке резко отличается от исходного вакуумного, сильные электрические поля локализуются непосредственно у оси симметрии разряда.

Исследования с секционированным анодом показывают, что такая конфигурация осевого электрического поля  $E$  в разрядном промежутке, приводит к немонотонному характеру растекания тока на плоском аноде (рис. 4). Из представленных результатов видно, что увеличение напряжения  $U$  приводит к изменению темпов нарастания плотностей тока в центре короны и на периферийных секциях. В области начальных токов отрицательной короны в аргоне плотность тока на секциях линейно увеличивается с увеличением полного тока короны. При дальнейшем повышении полного тока короны  $I$  плотность тока на центральной секции начинает увеличиваться резче линейного

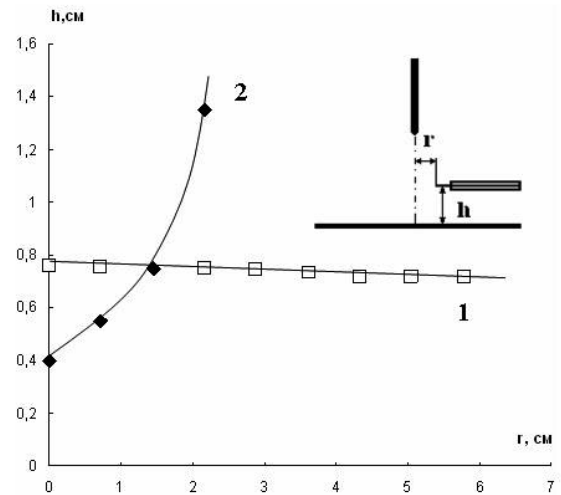


Рис. 3. Распределение потенциала  $\phi$  на поверхности анода в зависимости от расстояния  $r$  до оси разряда. 1 —  $\phi_0 = 700$  В — до зажигания коронного разряда; 2 —  $\phi_1 = 1,81$  кВ — после зажигания коронного разряда. Межэлектродное расстояние  $d = 2$  см.

закона, а на периферийной секции темп нарастания плотности тока резко снижается, т.е. наблюдается перераспределение тока на аноде в пользу его центральной части.

Эволюция радиального распределения плотности тока на аноде, возникающего в короне с нарастанием тока, коррелирует с профилем радиального распределения свечения короны с ростом тока. Структура коронного свечения в аргоне, существенно отличается от той, что наблюдается в отрицательной короне воздухе в области начальных токов короны, при которых существуют импульсы Тричела. В основной части межэлектродного промежутка отрицательной короны в воздухе свечение практически отсутствует, а свечение сосредоточено в миллиметровой области вблизи коронирующего

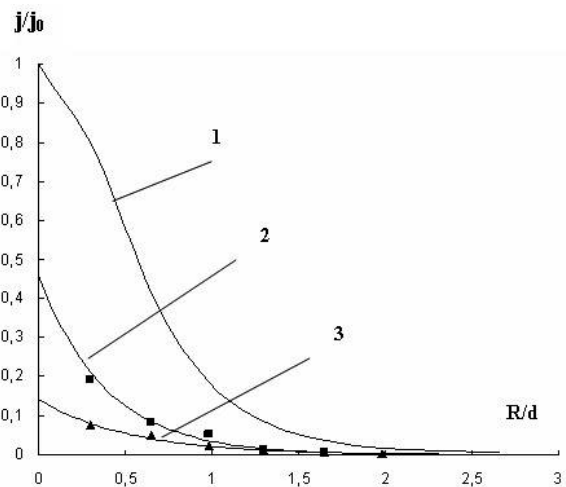


Рис. 4. Распределение плотности тока по аноду отрицательной короны. 1 — распределение плотности тока на аноде согласно закону Варбурга. Экспериментальные значения плотности тока на аноде для короны в аргоне: 2 —  $I = 8$  мкА, 3 —  $I = 22$  мкА. Межэлектродное расстояние  $d = 2$  см.

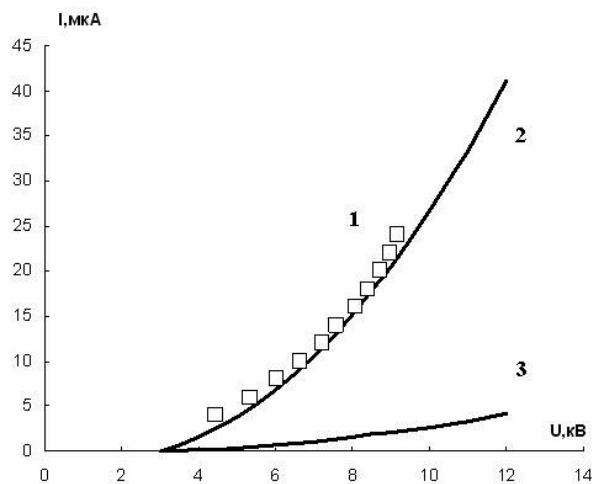


Рис. 5. Экспериментальная (1) и расчетные (2, 3) ВАХ отрицательной короны в геометрии острие-плоскость в аргоне. Межэлектродное расстояние  $d = 2$  см.

острия. В аргоне свечение отрицательной короны распространяется вдоль оси разряда и практически перекрывает разрядный промежуток, наиболее яркая область свечения сосредоточена возле коронирующего острия и занимает значительную область (примерно  $\frac{1}{4} d$ ) разрядного промежутка. С ростом полного тока короны интенсивность свечения вдоль оси разряда увеличивается, а световой диаметр короны сужается.

На рис. 5 представлена параболическая аппроксимация (2) для вольтамперной характеристики отрицательной короны в аргоне, полученная с учетом экспериментально обнаруженного сужения площади  $S_{a1}$  на аноде с ростом тока короны. Совпадение расчетной ВАХ (кривая 2) с экспериментально измеренной (кривая 1) достигается, если принять вместо общепринятой величины токового сечения  $S_{a2} \cong 2d^2$  (кривая 3), восстановленное из экспериментальных данных изменение величины сечения  $S_{a1}$  токовой трубки на аноде с ростом тока короны.

### Заключение

В данной работе с использованием секционированного анода в геометрии острие-плоскость исследован радиальный профиль плотности тока отрицательной короны в аргоне. Экспериментально обнаружено сужение радиального распределения тока по аноду и уменьшение светового диаметра у анода с ростом тока короны, приводящее к сужению эффективного сечения токового канала с ростом полного тока короны. Получена параболическая аппроксимация для вольтамперной характеристики отрицательной короны в аргоне, с учетом экспериментально обнаруженного сужения токового сечения на аноде с ростом тока короны.

### Литература

1. Акишев Ю.С., Кочетов И.В., Лобойко А.И., и др. // Физика плазмы. 2002. Т. 28. С. 1136.
2. Козлов Б.А., Соловьев В.И. // ЖТФ. 2009. Т. 79. Вып. 5. С. 18.
3. Болтачев Г.Ш., Зубарев Н.М. // ЖТФ. 2012. Т. 82. Вып. 11. С. 28.
4. Акишев Ю.С., Грушин М.Е., Каральник В.Б., и др. // Физика плазмы. 2003. Т. 29. № 8. С. 775.
5. Акишев Ю.С., Грушин М.Е., Каральник В.Б., и др. // Физика плазмы. 2003. Т. 29. № 2. С. 198.
6. Акишев Ю.С., Грушин М.Е., Каральник В.Б., Трушкин Н.И. // Физика плазмы. 2001. Т. 27. № 6. С. 550.
7. Дандарон Г.— Н.Б., Балданов Б.Б. // Физика плазмы, 2007. Т. 33. № 3. С. 273.
8. Zahoranova A., et. al. // Acta Phys. Slovaca. 2004.
9. Abolmasov S.N., et. al. // J. Phys. D: Appl. Phys. 2008.
10. Акишев Ю.С., Грушин М.Е., Каральник В.Б., и др. // Физика плазмы. 2003. Т. 29. № 2. С. 198.
11. Warburg E. Ueber die Spitzenentladung — Wied. Ann., 1899. V. 67. P. 69. Charakteristik des Spitzenstormes / Handbuch der Physik. V. 4. Berlin: Springer Verlag, 1927. P. 154.

**The effect of current spreading in the drift region  
of the discharge current-voltage characteristic  
of a negative corona in argon**

*B.B. Baldanov*

Institute of Physical Materials Science  
8 Sakhyanova str., Ulan-Ude, 670047, Russia  
E-mail: baibat@mail.ru

*With the use of sectioned anode in the tip-plane geometry, a radial density profile of the current negative corona has been investigated in argon. The narrowing of the radial distribution of current on the anode and reduction of the diameter of the light at the anode with increasing current crown have been observed. It is shown that a decrease in the effective cross section of the current channel with the growth of the total corona current is associated with non-monotonic radial distribution of current on the anode.*

PACS: 52.80.Hc

*Keywords:* corona discharge, glow discharge, argon, current tube, tip-plate, divided anode.

Bibliography — 11 references

*Received September 20, 2013*