

Критериальное обобщение вольт-амперной характеристики отрицательного коронного разряда в потоке аргона

© Г.-Н.Б. Дандарон,¹ В.Б. Шагдаров,² Б.Ц. Базарсадаев²

¹ Отдел физических проблем при Президиуме Бурятского научного центра СО РАН, 670047 Улан-Удэ, Россия

² Восточно-Сибирский государственный технологический университет, 670042 Улан-Удэ, Россия
e-mail: gndandaron@ofpsrv.bsc.buryatia.ru

(Поступило в Редакцию 13 июня 2006 г.)

Проведено обобщение вольт-амперных характеристик разряда по энергетическим и газодинамическим критериям, характеризующим влияние столба коронного разряда на режим его существования.

PACS: 52.80.Nc

Неравновесная низкотемпературная плазма в настоящее время широко используется в различных технологических процессах и газоразрядных приборах: плазмохимическое травление и очистка материалов в микроэлектронике, модификация поверхностей тканей и полимерных пленок, возбуждение активной среды в приборах лазерной техники и светотехнике. Коронный разряд как один из способов создания неравновесной низкотемпературной плазмы нашел широкое технологическое применение.

Связь усредненного во времени тока короны с приложенным напряжением, т. е. стационарная вольт-амперная характеристика (ВАХ), представляет собой интегральный закон Ома для разрядного промежутка, являющегося с электротехнической точки зрения неоднородным и нелинейным проводником. Знание усредненной во времени ВАХ нужно, например, при инженерных расчетах газоразрядных устройств, использующих отрицательную корону.

Теория отрицательного коронного разряда не в состоянии дать точную методику расчета ВАХ коронного разряда в аргоне. В этой связи представляет интерес получение обобщенной ВАХ с использованием методов моделирования на основе теории подобия и размерностей [1]. Несмотря на указания о подобии газовых разрядов [2–4] до сих пор нет подобных исследований по коронному разряду. По нашему мнению, такая ситуация в определенной мере является тормозом в использовании коронного разряда в технологических целях.

Таким образом, целью данной работы было экспериментальное исследование ВАХ коронного разряда при различных внешних условиях и критериальное обобщение полученных данных.

Экспериментальные исследования проведены на конфигурации электродов острие–плоскость. Установка (рис. 1) представляет собой систему электродов (катод 1 и анод 2), заключенных в стеклянную колбу (3). Межэлектродное расстояние d изменялось от 1 до 5 см, диаметр колбы D варьировался в пределах 5–20 см.

Катод (1) представляет собой вольфрамовый стержень диаметром 0.3 см, заточенный на конце в конус, с углом между осью и образующей 15° и радиусом закругления на острие $25 \mu\text{m}$. В качестве плоского электрода использованы стальные пластины разных диаметров, соответствующие диаметру колбы. Через штуцера (5), расположенные на крышке (4), производится ввод и вывод аргона. Источником питания (6) для разрядного промежутка служит высоковольтный выпрямитель ВС-20-10, позволяющий плавно регулировать напряжение от 0 до 20 кВ. Расход аргона регулируется с помощью ротаметра РМ-А-0.16 ГУЗ в пределах от 0–100 л/ч. В экспериментах использован аргон с содержанием примесей 0.007% (ГОСТ 10157-79).

Для стабилизации отрицательного коронного разряда в цепи установлено балластное сопротивление $R_1 = 37 \text{ M}\Omega$. Напряжение между электродами измеряется с помощью универсального вольтметра (7) (тип В7-21А), подключенного к делителю напряжения (R_2, R_3), который откалиброван соотношением плеч 1 : 1000. Сила тока в коронном разряде измеряется с помощью микроамперметра (8) (тип М 906).

Временные характеристики развития разряда ($U(t), I(t)$) регистрируются двулучевым осциллографом (9) (тип С1-65), который подключен к омическим малоиндуктивным токовым шунтам R_3 и R_4 .

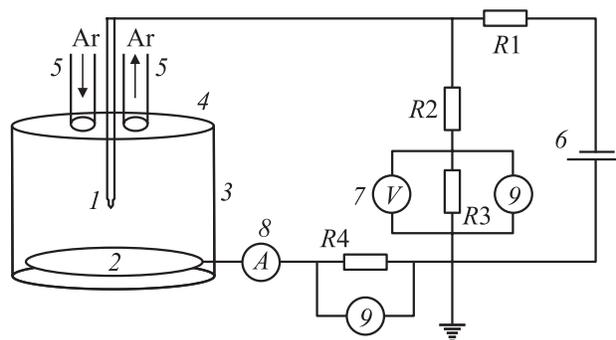


Рис. 1. Экспериментальная установка.

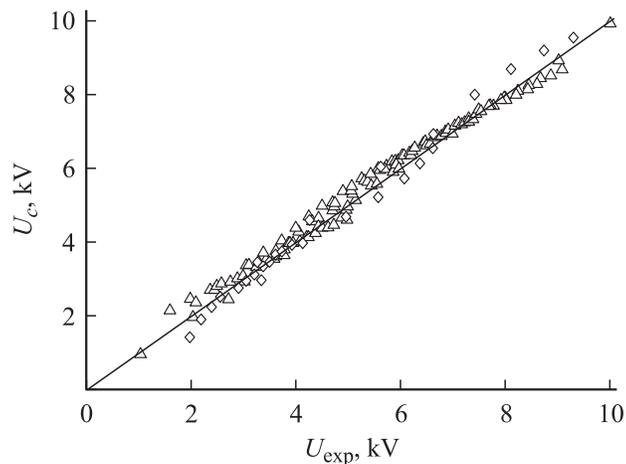


Рис. 2. Сравнение расчетного значения напряжения U_c с экспериментальными данными.

На данной экспериментальной установке был получен ряд ВАХ при различных значениях варьируемых параметров, таких как расход газа, межэлектродное расстояние, диаметр стеклянной колбы.

Для определения возможностей моделирования использованы известные критерии подобия [5]: $\frac{U_d}{I}$, $\frac{I}{GD}$, $\frac{G}{d}$, pd и $\frac{D}{d}$, представляющие собой закон Ома, энергетический критерий, числа Рейнольдса и Кнудсена, а также критерий, учитывающий геометрические размеры установки, где U — напряжение на разрядном промежутке; d — межэлектродное расстояние; I — сила тока; G — расход газа; p — давление; D — диаметр колбы.

Как известно, $\frac{U_d}{I}$ является определяемым критерием подобия, а остальные являются определяющими, поэтому можно определить его как функцию от определяющих параметров.

Обобщение экспериментальных данных по критериям, указанным выше, приводит к следующему выражению:

$$\frac{U_d}{I} = 0.038 \left(\frac{I^2}{GD} \right)^{-0.37} \left(\frac{G}{D} \right)^{-0.68} (pd)^{1.17} \left(\frac{D}{d} \right)^{-0.8}, \quad (1)$$

где I в μA , ввиду того что в коронном разряде разности потенциалов между электродами достигают нескольких киловольт, при обобщении принято напряжение U измерять в kV , межэлектродное расстояние d в cm , расход аргона G в kg/s , диаметр колбы D в cm , $p = 1 \text{ atm}$.

Следует сказать, что экспериментальные данные были получены для всей области существования разряда, вплоть до искры, и расход газа в пересчете на kg/s варьировался в пределах $(9.4-47) \cdot 10^{-5} \text{ kg/s}$.

Для сравнения расчетного значения напряжения U_c и экспериментального U_{exp} выражение (1) можно записать в следующем виде:

$$U_c = 0.038 \left(\frac{I}{d} \right) \left(\frac{I^2}{GD} \right)^{-0.37} \left(\frac{G}{D} \right)^{-0.68} (pd)^{1.17} \left(\frac{D}{d} \right)^{-0.8}. \quad (2)$$

На рис. 2 показана зависимость U_c , рассчитанная по формуле (2), от экспериментального значения U_{exp} . Оцененная погрешность не превышает $\sim 10\%$.

В результате проведенной работы показана возможность моделирования коронного разряда с помощью критериев подобия и впервые получена обобщенная ВАХ разряда. Полученный результат также показывает, что на формирование и существование коронного разряда оказывают существенное влияние процессы, происходящие в положительном столбе коронного разряда.

Список литературы

- [1] Седов Л.И. Методы подобия и размерностей в механике. М.: Наука, 1977. 439 с.
- [2] Энгель А., Штенбек М. Физика и техника электрического разряда в газах. 1935–1936.
- [3] Капцов Н.А. Коронный разряд. М.: Гостехиздат, 1947.
- [4] Грановский Н.А. Электрический ток в газе. М.: Гостехиздат, 1952.
- [5] Жуков М.Ф., Засыпкин И.М., Тимошевский А.Н. и др. Электродуговые генераторы термической плазмы. Новосибирск: Наука, 1999. 712 с.