

УДК .353.5

ЧИСЛЕННОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ВОЛЬТ-АМПЕРНОЙ ХАРАКТЕРИСТИКИ ОДНОРОДНОГО ПОВЕРХНОСТНОГО РАЗРЯДА

© 2005 А.П. Заикин¹, А.В. Ивченко², О.А. Журавлев²

¹ Самарский филиал Физического института им. П.Н. Лебедева РАН

² Самарский государственный аэрокосмический университет

Выполнен анализ основных каналов переноса зарядов в однородном поверхностном разряде, формируемом в воздухе атмосферного давления между двумя ножевыми электродами на движущемся диэлектрическом барьере. Для электронной проводимости и квазиодномерного приближения разработана систем уравнений для численного моделирования вольт-амперной характеристики разряда. Полученные результаты качественно согласуются с экспериментом. Работа поддержана грантом РФФИ №02-02-17172.

Однородный поверхностный разряд (ОПР), как разновидность биполярного коронного разряда (КР) [1], получен в электромеханическом устройстве (рис.1) между двумя протяженными ножевыми электродами 1,2, установленными с минимальным зазором δ относительно диэлектрической подложки 3 подвижного электрода (ПЭ), перемещающегося со скоростью V [2]. Перенос зарядов в промежутке L происходит по нескольким каналам: посредством распределенной емкости ПЭ; при конвективном движении газа вдоль поверхности ПЭ от высоковольтного электрода (ВВЭ) к токосъемному электроду (ТСЭ); путем дрейфа зарядов в электрическом поле.

Применение ОПР в высоковольтной электротехнологии [3] требует разработки метода расчета вольтамперной характери-

ки (ВАХ) разряда. Сложность задачи связана с необходимостью выделения основного механизма протекания тока.

Оценим роль движения газа в переносе тока. Если процессы прилипания электронов быстры и перенос тока в основном осуществляется ионами, то их скорость $v_i = \mu_i E$. Здесь μ_i – подвижность ионов, E – напряженность электрического поля. Для воздуха атмосферного давления при $\mu_i = 2 \text{ см}^2/\text{В}^*\text{с}$ и $E = 10^3 \text{ В/см}$ имеем $v_i = 20 \text{ м/с}$, что много больше, чем скорость V поверхности ПЭ, составляющая 1-5 м/с. Движение газа не может быть больше чем V , поэтому конвекция переносит заряды в десятки раз медленнее, чем дрейф. Поскольку есть перенос тока также и электронами, то относительная роль движения зарядов с газом еще уменьшается. Поэтому конвекцию можно не учитывать.

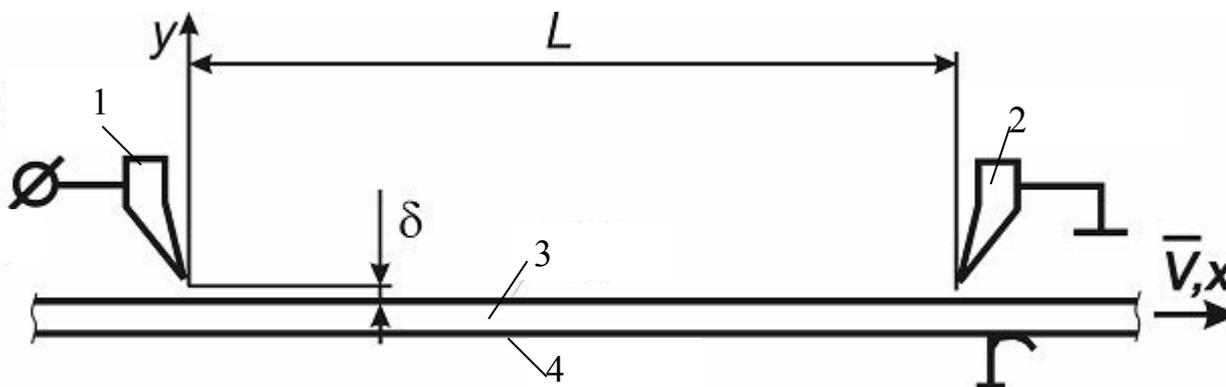


Рис. 1. Схема электродной системы однородного поверхностного разряда:

1 – высоковольтный электрод, 2 – токосъемный электрод, 3 – диэлектрический слой, 4 – экран, V – скорость перемещения подвижного электрода, δ – ширина межэлектродных зазоров, L – ширина рабочего промежутка

Сделаем оценку вероятности гибели электронов в процессах прилипания для наших условий. Диссоциативное прилипание в воздухе в типичных разрядных условиях имеет константу скорости $k_a = (0,5 - 2) 10^{-12} \text{ см}^3/\text{с}$ [4]. Поэтому средняя длина, которую электрон пролетает за время жизни, равна $l_a = \tau v_e = (0,5 - 2) \text{ см}$, что не превышает ширину межэлектродного промежутка в [1]. Кроме такого процесса, электроны гибнут и в реакции трехчастичного прилипания, которое при давлениях $p \cong 1 \text{ атм}$ слабее двухчастичного [4], но также уменьшает число электронов. Следовательно в описываемой установке существенная часть электронов превращается в отрицательные ионы. Необходимо учитывать также то, что отрицательные ионы разрушаются, освобождая электрон в процессах столкновений с электронами или возбужденными частицами. В конечном итоге требуется выполнить расчет концентраций возбужденных частиц и провести оценку их роли в динамике зарядов.

Для моделирования процессов в разряде используются уравнения для электрического поля и заряженных частиц, которые для стационарной задачи записываются в виде:

$$\begin{aligned} \operatorname{div} E &= e (n_+ - n_- - n_e) / \varepsilon_0, \\ \operatorname{div}(n_e v_e) &= (v_i - v_a) n_e + v_d n_- - \beta n_e n_+, \\ \operatorname{div}(n_+ v_+) &= v_i n_e - \beta n_e n_+, \\ \operatorname{div}(n_- v_-) &= v_a n_e - v_d n_-. \end{aligned} \quad (1)$$

Здесь v_i – частота ионизации; β – коэффициент рекомбинации; n_e , n_+ и n_- – концентрации электронов, положительных и отрицательных ионов; m_a и m_d – параметры, характеризующие процессы прилипания и отлипания электронов.

Плотности положительных и отрицательных ионов равны нулю на аноде и катоде соответственно.

Рассмотрим более детально протекание тока через газ. При решении такой многофакторной задачи необходимо построение ряда упрощенных моделей, которые отражают наиболее важные черты устройства. Представляется логичным взять за исходную следующую простейшую модель.

Вблизи ВВЭ и ТСЭ происходит горение разряда в виде чехла короны. В осталь-

ном промежутке размножение зарядов мало-значительно, они дрейфуют и образуют пространственный заряд, искажающий поле. Судя по результатам экспериментов вблизи ПЭ возникает сравнительно однородный слой ионизованного газа толщиной $h \cong 1 \text{ мм}$. Это позволяет представить схему эксперимента в квазиодномерном виде. Пусть на рис. 1 координата $x=0$ совпадает с краем разрядного чехла на ВВЭ; а при $x=L$ рассматривается край чехла короны на ТСЭ. Через квазиплоский слой $0 < x < L$ происходит дрейф зарядов. Наиболее эффективно ток переносят электроны ($n = n_e$). Их наличие искажает поле согласно уравнению

$$dE/dx = -en/\varepsilon_0. \quad (2)$$

Для плотности тока электронов в промежутке L запишем:

$$j = en\mu E. \quad (3)$$

Подставив (3) в (2), получим:

$$dE/dx = -j/(\mu\varepsilon_0 E). \quad (4)$$

Решение дифференциального уравнения (4) дает

$$E(x) = E_0 (1 + x/d)^{1/2}, \quad (5)$$

где параметр $d = E_0^2 \mu\varepsilon_0 / (2\pi j)$, а E_0 – величина поля при $x = 0$.

Оценим разность потенциалов, соответствующую этой модели. Интегрирование (5) дает

$$U_L = \frac{2}{3} E_0 d [(1 + \frac{L}{d})^{3/2} - 1]. \quad (6)$$

На ВВЭ имеется пробойное напряжение $-U_p$, которое для определения напряжения U_L необходимо вычесть из полного U . Отсюда для воздушного канала ОПР получим уравнение, связывающее U_L с плотностью тока j , как:

$$U_L = \frac{\varepsilon_0 \mu E_0^3}{3\pi j} [(1 + \frac{2\pi j L}{\varepsilon_0 \mu E_0^2})^{3/2} - 1]. \quad (7)$$

Выражение (7) характеризует ВАХ воздушного канала ОПР. Величину E_0 можно найти из того условия, что при $U = U_p$ ток $j = 0$.

Разложив (7) в ряд Тэйлора до второго порядка малости с учетом условия $\Delta U = U - U_p \rightarrow 0$ при $j \rightarrow 0$, получим

$$E_0 L (1 + L/4d) = \Delta U. \quad (8)$$

Совместно с уравнением ВАХ соотно-

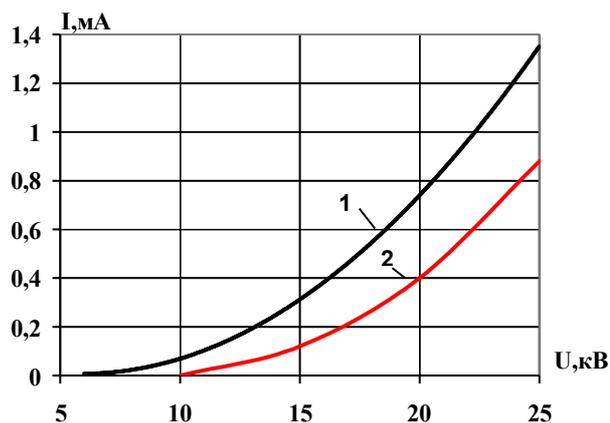


Рис. 2. Расчетные графики ВАХ однородного поверхностного разряда:
1 - $U_p = 6$ кВ; 2 - 10 кВ

шение (8) дает систему двух уравнений с параметром E_0 . Уравнения (7) и (9) были решены численно для условий, соответствующих экспериментальным данным работы [1]. При этом полагалось, что толщина проводящей зоны $h=1$ мм, а подвижность электронов в воздухе связана с давлением p , как $\mu_p = 0.45 \cdot 10^6 \text{ тор}/(\text{В} \cdot \text{с})$ [5].

Расчетные графики ВАХ приведены на рис. 2.

Полученные результаты качественно согласуются с экспериментом. Они предсказывают резкий рост ВАХ при высоких напряжениях. Более точное сопоставление с экспериментом требует дальнейшего развития модели ОПР с учетом влияния на ВАХ тока ионов,

скорости движения поверхности ПЭ, характеристик диэлектрического слоя, величины зазоров ВВЭ-ПЭ и ТСЭ-ПЭ, ширины рабочего промежутка ВВЭ-ТСЭ, а также материала и геометрии электродов.

Приведенная простая модель является основой для построения более точной расчетной модели ОПР.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Журавлев О.А., Федосов А.И., Шепеленко А.А. Однородный поверхностный разряд в воздухе атмосферного давления // Письма в ЖТФ. 1995. Т.21. Вып. 24.
2. Патент № 2106049 РФ, МКИ H01 S 3/0977. Устройство возбуждения однородного поверхностного разряда в плотных газах / О.А. Журавлев, А.О. Ситкин, А.И. Федосов. Бюл.№6 от 27.02.98.
3. Патент №2173666 МКИ C01 B 11/13. Устройство для электроразрядной обработки воздуха в малоразмерных замкнутых объемах / О.А. Журавлев, А.В. Ивченко. Бюл. №26 от 20.09.2001.
4. Мнацаканян А.Х., Найдис Г.В. Процессы образования и гибели заряженных частиц в азотно-кислородной плазме // Химия плазмы. М.: Энергоатомиздат, 1987. Вып. 14.
5. Райзер Ю.П. Физика газового разряда. М.: Наука, 1987.

NUMERICAL SIMULATION OF CURRENT-VOLTAGE CHARACTERISTIC OF UNIFORM SURFACE DISCHARGE

© 2005 A.P. Zaikin², A.V. Ivchenko¹, O.A. Zhuravlev¹

¹ Samara State Aerospace University

² Samara Branch of Physics Institute named for P.N. Lebedev of Russian Academy of Sciences

The analysis of main channels of carrying charges in uniform surface discharge, which formed between two knife-electrodes on movable dielectric barrier in air at atmospheric pressure, is executed. For electron conduction and quasi-one-dimensional approximation is solved system of equations for numerical simulation of current-voltage characteristic. The got results are qualitative with experiment. Scientific work is supported RBRF (project № 02-02-17172).