УДК 537.538

**А.А.КУДРЯВЦЕВ**
*НИИ Физики Санкт-Петербургского государственного университета*
**А.В.МОРИН**
*аспирант кафедры общей и технической физики*
**А.С.МУСТАФАЕВ**
*профессор кафедры общей и технической физики*

# ЧИСЛЕННЫЕ ЭКСПЕРИМЕНТЫ ПО ИССЛЕДОВАНИЮ ПРОСТРАНСТВЕННО-ЭНЕРГЕТИЧЕСКИХ ПАРАМЕТРОВ ТЛЕЮЩИХ РАЗРЯДОВ НИЗКОГО ДАВЛЕНИЯ

Описана простая модель, позволяющая получить вольт-амперную характеристику для затрудненных тлеющих разрядов, учитывающая нелокальную ионизацию в плазме отрицательного свечения. Получены соотношения подобия, позволяющие прогнозировать основные параметры затрудненных тлеющих разрядов. Кроме вольтамперной характеристики, представлены также основные соотношения для расчета распределения концентрации электронов вдоль разрядного промежутка в плазме отрицательного свечения, распределения потенциала и напряженности электрического поля (включая точку обращения электрического поля).

The simple model which allows to make volt-ampere characteristic for the obstructed negative glows, considering non-local ionization in negative glow is developed. Scaling relationship which allow to predict key parameters obstructed glow discharges are received. The basic expressions for calculation of distribution of electrons density along a gap in plasma of a negative glow, distribution of potential and intensity of an electric field (including a point of the electric field reversal) are also presented. Comparison of the received results with data of full-scale modeling has shown the satisfactory consent. Carrying out of preliminary estimations by means of the presented model based on reliable physical principles, allows formulate better a problem for full-scale modeling.

Вычислительный эксперимент имеет много общего с физическим экспериментом. Проверка достоверности результатов вычислительного эксперимента предусматривает исследования упрощенных или предельных режимов, результаты которых известны заранее, сходимость и устойчивость решения при различных начальных условиях, величине шага по времени и пространству и параметрах численной модели. Проведено сравнение с имеющимися результатами других авторов, проводящими физические и вычислительные эксперименты. Исследованы зависимости решения от характерных параметров задачи.

Вычислительный эксперимент имеет и отличия от физического. Например, в вычислительном эксперименте можно исследовать влияние на решение задачи любого параметра, в то время как в физическом эксперименте, как правило, не удается зафиксировать все параметры. С экономической точки зрения вычислительные эксперименты обходятся существенно дешевле физических. Они не требуют создания экспериментальных стендов, большой энергетической базы, измерительных приборов, соблюдения специальной техники безопасности и т.д. В некоторых случаях физические эксперименты носят уникальный, единичный характер, в то время как вычислительный эксперимент допускает любое количество повторений. Поэтому обшир-

ные вычислительные эксперименты обычно предшествуют проведению физических экспериментов. В современной науке и технике вычислительные и физические эксперименты дополняют и взаимно обогащают друг друга.

Тлеющим разрядом называется самоподдерживающийся разряд с холодным катодом, испускающим электроны в результате вторичной эмиссии, главным образом под действием положительных ионов. В силу ряда полезных свойств (неравновесность образующейся плазмы, низкое тепловыделение) разряды, принадлежащие к этому классу, находят сегодня широкое применение и в научных исследованиях, и в производственных процессах.

На технологическую и энергетическую целесообразность применения того или иного типа тлеющего разряда влияют множество параметров, основными из которых являются вольт-амперная характеристика, потенциал зажигания, концентрация электронов в используемых областях разряда. Поскольку из всех инертных газов для создания инертной среды в технологических и научно-исследовательских установках чаще всего применяют аргон, будем рассматривать газоразрядные явления применительно именно к аргону. Этот газ является и наиболее исследованным.

Работа посвящена построению надежных законов подобия, пригодных для предварительной оценки целесообразности проведения трудоемких и дорогостоящих численных расчетов на начальной стадии исследований. Рассматриваются тлеющие разряды, параметры которых соответствуют левой ветви кривой Пашена. Разряды, которые возникают при малых межэлектродных расстояниях и низких давлениях газа, называются затрудненными [2].

Существующие в настоящий момент модели описаны в работах [1, 4-6]. Наиболее современные модели, применимые для симуляции рассматриваемых процессов, рассмотрены в работе [4].

Необходимо заметить, что для таких разрядов результаты численного моделирования, приведенные в ряде зарубежных публикаций, очень чувствительны к входным параметрам, например незначительные изменения коэффициента вторичной эмиссии приводили к большим изменениям напряжения [4]. Таким образом, возникает вопрос о допустимости использования коэффициента вторичной эмиссии в качестве входного параметра и о способах его более точного определения.

Незначительное изменение температуры плазменных электронов при фиксированном токе и напряжении приводит к сильным изменениям рассчитанной величины концентрации [4], что не позволяет без достаточно точного знания температуры электронов достоверно определить их концентрацию. Эти факты ставят под сомнение соответствие численной модели протекающим в реальности физическим процессам, а следовательно, и надежность результатов моделирования.

Перечисленные выше проблемы крупномасштабного моделирования, делают актуальной задачу нахождения основных функциональных связей между параметрами разряда для прогнозирования и оценки адекватности результатов численных расчетов.

Для затрудненного разряда постоянного тока характерно наличие всего двух структурных областей: катодного слоя и области квазинейтральной плазмы отрицательного свечения. Катодный слой имеет большой положительный объемный заряд, сильное поле у поверхности катода и значительное падение потенциала.

Результаты эксперимента (рис.1) ап-

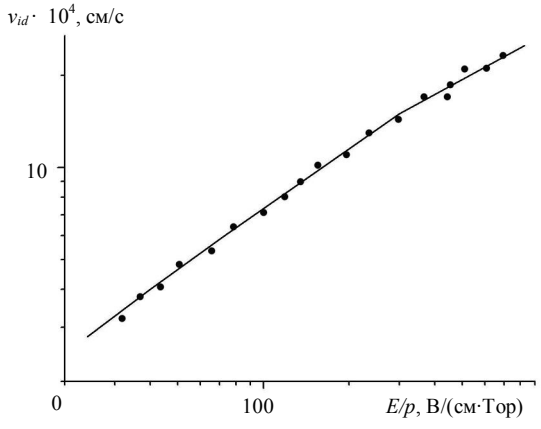



Рис.1. Экспериментальные зависимости скорости дрейфа $v_{id}$ от отношения напряженности электрического поля $E$ к давлению газа $p$

проксимированы следующими соотношениями: для $E/p < 5\div10$ В/(см·Тор) и $E/p > 10\div100$ В/(см·Тор) соответственно

$$v_{id} = E/p;\ v_{id} = \sqrt{E/p}\ .$$

Переход между этими двумя зависимостями происходит постепенно, что видно из графика. В нашем случае величина $E/p$ соответствует второму соотношению. Выберем коэффициент пропорциональности в соотношении так, чтобы он более точно соответствовал экспериментальным данным и не противоречил данным других авторов: $K_i = 8000$.

Известно, что для нахождения концентрации плазменных электронов $n$ в области квазинейтральной плазмы отрицательного свечения при невысоких давлениях, можно воспользоваться уравнением амбиполярной диффузии

$$-D_{\text{a}}\frac{d^2}{dx^2}n = S\text{e}^{-\frac{\text{x}}{\lambda}},$$

решение которого имеет вид

$$n(x) = \frac{S\lambda^2}{D_{\text{a}}}\left(1-\text{e}^{-\frac{L-d_{\text{c}}}{\lambda}}\right)\left(\frac{1-\text{e}^{-\frac{x-d_{\text{c}}}{\lambda}}}{1-\text{e}^{-\frac{L-d_{\text{c}}}{\lambda}}}-\frac{x-d_{\text{c}}}{L-d_{\text{c}}}\right) \quad (1)$$

и описывает распределение концентрации электронов в плазме отрицательного свечения (рис.2). Здесь $D_{\text{a}}$ – коэффициент амбиполярной диффузии; $S$ – источник ионизации; $x$ – текущая координата; $\lambda$ – постоянная спада; $L$ – размер разрядного промежутка; $d_{\text{c}}$ – толщина катодного слоя.

Распределение напряженности электрического поля в области отрицательного свечения [5]

$$E(x) = -\frac{T_{\text{e}}}{n}\frac{dn}{dx}, \quad (2)$$

где $T_{\text{e}}$ – температура электронов, эВ.

Из графика (рис.3) видно, что в области плазмы отрицательного свечения электрическое поле мало и направлено в противоположную сторону, что приводит к торможению электронов. На электронах, попавших в область отрицательного свечения из катодного слоя, этот эффект практически не сказывается ввиду их высокой энергии, равной величине падения потенциала в катодном слое.

Для нахождения положения точки обращения знака электрического поля, находящейся вблизи точки максимума концентрации электронов, приравняем нулю выражение (1) и учитывая малую величину концентрации электронов в катодном слое получим

$$X = -\lambda\ln\left[\lambda\left(1-\text{e}^{-\frac{d_{\text{c}}}{\lambda}}\right)\right].$$

Учитывая обязательное наличие максимума концентрации электронов в разрядном промежутке, предлагается использовать в качестве постоянной спада $\lambda$ величину, равную половине длины релаксации энергии, поскольку значения, полученные с использованием такого подхода удовлетвори-

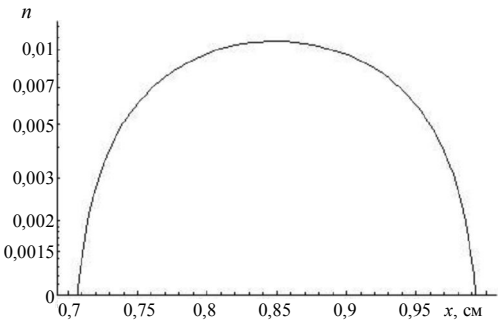



Рис.2. Концентрация электронов в плазме отрицательного свечения

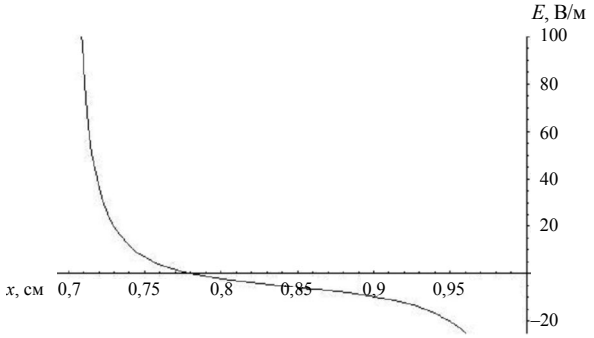



Рис.3. Распределение напряженности электрического поля

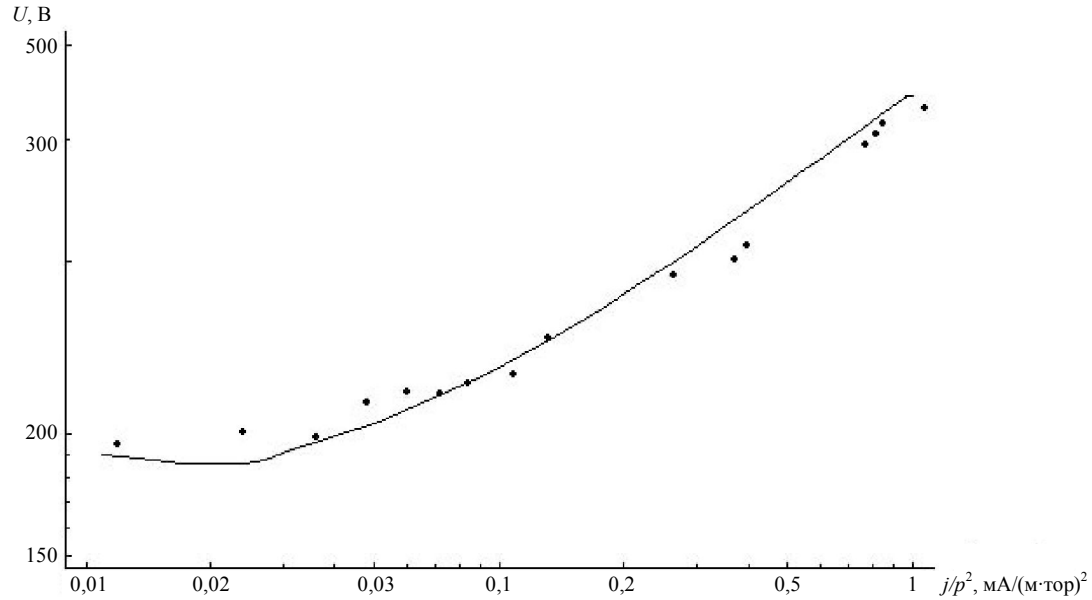



Рис.4. Вольт-амперная характеристика газового разряда

тельно соответствуют результатам других авторов [3]. Нужно подчеркнуть, что найденная точка обращения наблюдается в тлеющем разряде любого типа, что непосредственно следует из выражения для поля (2).

Распределение напряженности электрического поля в разрядном промежутке $0 < x < L$ описывается уравнением Пуассона, которое в пренебрежении малой электронной концентрацией имеет вид

$$\frac{dE}{dx} = -4\pi n_i ; \qquad (3)$$

$$E_{x=0} = E_0 ; \; E_{x=d} = 0 . \qquad (4)$$

Решая уравнение (3) с учетом граничных условий (4), получим уравнение для плотности тока с тремя неизвестными:

$$j = \frac{\sqrt{2}}{3\pi} \frac{K_i}{(1+\gamma)\sqrt{p}} \frac{U^{\frac{3}{2}}}{d_c^{\frac{5}{2}}} , \qquad (5)$$

которое не позволяет построить вольт-амперную характеристику (зависимость напряжения $U$ от плотности тока $j$), поскольку содержит в качестве неизвестной величины, размер катодного слоя $d_c$. Поэтому привлечем условие поддержания разряда, учитывающее нелокальную ионизацию в прикатодной области, в качестве второго уравнения

$$e^{ad}\left[1 + \alpha\lambda - \alpha\lambda\Lambda\left(1 - e^{-\frac{1}{\Lambda}}\right)\right] = \frac{1}{\gamma} , \qquad (6)$$

где

$$\lambda = \frac{\frac{U}{pB} - d_c}{\alpha d_c} ; \; \Lambda = \frac{\lambda}{L - d_c} ; \; \alpha = Ape^{-\frac{Bpd_c}{U}} .$$

Уравнения (5) и (6) образуют систему уравнений с тремя неизвестными, что позволяет получить графическую зависимость тока от напряжения, т.е. вольт-амперную характеристику (рис.4).

Предложен простой способ отыскания ВАХ для затрудненных газовых разрядов, основанный на решении одномерного уравнения Пуассона и условия поддержания разряда. Сравнение полученных данных с результатами других авторов [3] показало соответствие предложенной модели в пределах точности исходных данных с результатами полномасштабного моделирования при помощи обобщенной (гибридной) модели, использующей метод Монте-Карло [4]. Выполненные оценки позволяют рекомен-

довать полученные результаты для расчетов на начальном этапе детального моделирования, требующего больших вычислительных ресурсов, а также на завершающем этапе с целью проверки корректности данных.

**ЛИТЕРАТУРА**

1. *Котельников В.А.* Процессы переноса в пристеночных слоях плазмы / В.А.Котельников, С.В.Ульданов, М.В.Котельников. М.: Наука, 2004.

2. *Райзер Ю.П.* Физика газового разряда: Учеб. руководство. М.: Наука, 1987.

3. Axial emission profiles and apparent secondary electron yield in abnormal glow discharges in argon / D.Maric, K.Kutasi, G.Malovic, Z.Donko, Z.Lj. Petrovic // European Physical Journal D. 2001. Vol.21.

4. *Donko Z.* On the reliability of low-pressure DC glow discharge modeling / Z.Donko, P.Hartmann, K.Kutasi // Plasma Sources Sci. Technol. 2006. Vol.15.

5. *Kolobov V.I.* Analytic model of the cathode region of a short glow discharge in light gases / V.I.Kolobov, L.D.Tsendin // Physical Review A. 1992. Vol.46. № 12.

6. *Phelps A.V.* Abnormal glow discharges in Ar: experiments and models // Plasma Sources Sci. Technol. 2001. Vol.10.