

УДК 537.523

## ОБОБЩЕННАЯ ПЕРЕМЕННАЯ ЭЛЕКТРИЧЕСКОГО ПРОБОЯ В ГАЗАХ В ПОСТОЯННОМ ЭЛЕКТРИЧЕСКОМ ПОЛЕ

У. Юсупалиев

*Исходя из теории размерности и подобия, определена обобщенная переменная для электрического пробоя в газах в постоянном электрическом поле, учитывающая влияние потенциала ионизации газов и потери энергии электроном при упругих и неупругих столкновениях с частицами газа. На этой основе найдена зависимость значения произведения давления на расстояние между электродами, при котором напряжение пробоя минимально, от параметров газа.*

При разработке различных устройств, связанных с применением газовых разрядов, необходимо знать значение напряжения пробоя, определяемое из многопараметрического трансцендентного уравнения, которое приходится решать численно [1, 2]. При отсутствии аналитических зависимостей напряжения пробоя от определяющих параметров газа и разряда установление обобщенных переменных позволило бы понять многие закономерности электрического пробоя. В рамках феноменологической модели Таунсенда для пробоя в газах известна следующая обобщенная переменная [3]:

$$\Xi_{BT} = \frac{A_P p d}{2.72 \ln \left(1 + \frac{1}{\gamma}\right)} = \frac{p d}{(p d)_{MIN}}, \quad (1)$$

где  $p$  – давление газа,  $d$  – расстояние между анодом и катодом,  $(p d)_{MIN}$  – произведение этих параметров, соответствующее минимальному напряжению пробоя  $U_{MIN} = \frac{2.72 \cdot B_P}{A_P} \times \ln \left(1 + \frac{1}{\gamma}\right)$ ,  $A_P \left[\frac{1}{\text{м} \cdot \text{Па}}\right]$  и  $B_P \left[\frac{B}{\text{м} \cdot \text{Па}}\right]$  – размерные эмпирические константы, зависящие от рода газа и входящие в формулу для первого ионизационного коэффициента Таунсенда  $\alpha$ :

$$\frac{\alpha}{p} = A_P \exp\left(-\frac{B_P}{E/p}\right)$$

( $E$  – напряженность электрического поля),  $\gamma$  – коэффициент вторичной эмиссии с катода [2 – 7]. Было показано [3], что отношение напряжения пробоя  $U_B$  к  $U_{MIN}$  определяется обобщенной переменной  $\Xi_{BT}$  по формуле:

$$\frac{U_B}{U_{MIN}} = \frac{\Xi_{BT}}{1 + \ln \Xi_{BT}}. \quad (2)$$

Из общих соображений ясно, что величина  $\Xi_{BT}$  должна зависеть от потенциала ионизации  $I$  и параметров газа, характеризующих потери энергии электронов при упругих и неупругих столкновениях с тяжелыми частицами газа (атомами и молекулами), что не отражено в выражении (1). В рамках модели Таунсенда это обстоятельство связано с определением постоянных  $A_P$  и  $B_P$ , значения которых находятся из опытных данных. Обобщенные переменные электрического пробоя, учитывающие влияние потенциала ионизации газа  $I$  и потери энергии электроном при упругих и неупругих столкновениях с тяжелыми частицами газа, неизвестны. Поэтому целью данного сообщения является установление обобщенной переменной для электрического пробоя, определяемой указанными факторами.

Анализ работ [1 – 8] по исследованию электрического пробоя газового промежутка в однородном постоянном электрическом поле показывает, что напряжение пробоя  $U_B$  определяется следующими параметрами: давлением газа  $p$ , расстоянием между электродами  $d$ , коэффициентом вторичной эмиссии  $\gamma$ , потенциалом ионизации  $I$  (либо эффективным потенциалом смеси газов  $I_{ef}$ ), частотой упругих столкновений электронов с тяжелыми частицами  $\nu_e$ , частотой возбуждения электронами атомов (молекул)  $\nu_{ie}$  (включая частоту ионизации), массой электрона  $m$ . Величины  $\nu_e$  и  $\nu_{ie}$ , помимо сечения упругого рассеяния электронов  $\delta_e$  и сечения возбуждения атомов (молекул) электронами  $\delta_{ie}$ , зависят от  $p$ , причем величины  $\xi_e(\delta_e) = \nu_e/p$  и  $\xi_{ie}(\delta_{ie}) = \nu_{ie}/p$  зависят от рода газа и экспериментально определены в [2, 4 – 8]. С целью установления обобщенной переменной для электрического пробоя независимые определяющие величины объединим в следующие комплексы:

$$\sqrt{\frac{I}{m}}, (\xi_e \cdot \xi_{ie}), (pd), \ln\left(1 + \frac{1}{\gamma}\right).$$

Здесь безразмерная величина  $\ln\left(1 + \frac{1}{\gamma}\right)$  следует из критерия электрического пробоя Таунсенда [2 – 8]. При заданном коэффициенте вторичной эмиссии  $\gamma$  для пробоя необходимо, чтобы электрон совершал на длине промежутка между электродами в электрическом поле количество актов размножения, равное  $\ln\left(1 + \frac{1}{\gamma}\right)$ . С другой стороны, это количество актов размножения равно  $\alpha d$  и пропорционально произведению частоты ионизации  $\nu_i$  и  $d$ . Учитывая зависимость  $\nu_i$  от давления  $p$  ( $\nu_i \sim p$ ), из условия пробоя  $\frac{\alpha \cdot d}{\ln\left(1 + \frac{1}{\gamma}\right)} = 1$  получим:  $\frac{\alpha \cdot d}{\ln\left(1 + \frac{1}{\gamma}\right)} \sim \frac{p \cdot d}{\ln\left(1 + \frac{1}{\gamma}\right)}$ . Поэтому вышеприведенный перечень независимых определяющих величин можно представить следующим образом:

$$\sqrt{\frac{I}{m}}, (\xi_e \cdot \xi_{ie}), \frac{p \cdot d}{\ln\left(1 + \frac{1}{\gamma}\right)}.$$

Тогда безразмерное напряжение пробоя является функцией указанных размерных комплексов:

$$\frac{U_B}{U_{MIN}} = f \left[ \sqrt{\frac{I}{m}}, (\xi_e \cdot \xi_{ie}), \left( \frac{pd}{\ln\left(1 + \frac{1}{\gamma}\right)} \right) \right]. \quad (3)$$

На основе теории размерности и подобия (т.е. повторяя те же процедуры определения обобщенных переменных для импульсного сильноточного разряда в неограниченном плотном газе, что и в работе [9]) получим следующую обобщенную переменную для электрического пробоя в постоянном электрическом поле:

$$\Xi_{BI} = \sqrt{\frac{m \cdot \xi_e \cdot \xi_{ie}}{I}} \cdot \left[ \frac{pd}{\ln\left(1 + \frac{1}{\gamma}\right)} \right]. \quad (4)$$

Заметим, что выражение  $\sqrt{\frac{I}{m \cdot \xi_e \cdot \xi_{ie}}} \ln\left(1 + \frac{1}{\gamma}\right)$  имеет размерность величины  $pd$  и можно предположить, что:

$$(pd)_{MIN} = k_0 \sqrt{\frac{I}{m \cdot \xi_e \cdot \xi_{ie}}} \ln\left(1 + \frac{1}{\gamma}\right), \quad (5)$$

где  $k_0$  – безразмерное число, которое необходимо определить из опытных данных. Выражение (5) показывает, что величина  $(pd)_{MIN}$  зависит от потенциала ионизации газа  $I$ , сечения упругого рассеяния электронов  $\delta_e$  и сечения возбуждения атомов (молекул)  $\delta_{ie}$ . В таблице приведены экспериментальные данные величины  $(pd)_{MIN}$  и эмпирической постоянной  $A_p$  для железного катода, заимствованные из работ [2 – 8] при разных значениях потенциала ионизации  $I$  благородных газов и вычисленные по формуле (5)

значения коэффициента  $k_0$ . Данные по сечениям возбуждения атомов ударом электронов взяты из работ [2 – 8, 10, 11]. Среднее значение безразмерного коэффициента  $k_0$  для благородных газов составляет 2.73. Из таблицы также видно, что с ростом потенциала ионизации  $I$  увеличивается и величина  $(pd)_{MIN}$ , что подтверждается опытными данными работ [2 – 8]. Особенно ярко эта закономерность проявляется для благородных газов.

Т а б л и ц а

Газы	$I$ , эВ	$(pd)_{MIN}$ , м · Па	$A_P$ , м <sup>-1</sup> Па <sup>-1</sup>	$k_0$
He	24.5	3.32	1.36	2.90
Ne	21.5	3.99	3.01	3.02
Ar	15.7	1.99	9.02	2.63
Kr	14.0	1.15	10.90	2.51
Xe	12.13	0.75	16.69	2.61

Формула (5) также позволяет определить константу  $A_P$  и минимальное напряжение пробоя газа  $U_{MIN}$  через величины  $I$ ,  $\xi_e$  и  $\xi_{ie}$ :

$$A_P = \left( \frac{2.72}{k_0} \right) \cdot \sqrt{\frac{m \cdot \xi_e \cdot \xi_{ie}}{I}}, \quad U_{MIN} = B_P \cdot k_0 \sqrt{\frac{I}{m \xi_e \xi_{ie}}}. \quad (6)$$

Итак, на основе обобщенной переменной удалось установить зависимость величин  $(pd)_{MIN}$  и  $U_{MIN}$  от потенциала ионизации  $I$ , величин  $\xi_e$  и  $\xi_{ie}$ , характеризующих потери энергии электронами при упругих и неупругих столкновениях с тяжелыми частицами газа. Это позволяет эффективно оптимизировать параметры газовых разрядов в различных приложениях.

## Л И Т Е Р А Т У Р А

- [1] Райзер Ю. П. Лазерная искра и распространение разряда, М., Наука, 1974.
- [2] Райзер Ю. П. Физика газового разряда, М., Наука, 1987.
- [3] Князев Б. А. Низкотемпературная плазма и газовый разряд, Новосибирск, НГУ, 2002.
- [4] Капцов Н. А. Электроника, М., ГИТЛ, 1953.
- [5] Грановский В. Л. Электрический ток в газах, М., Гостехиздат, 1952.

- [6] von Engel A. Ionized gases. Oxford, Clarendon press, 1955.
- [7] Браун С. Элементарные процессы в плазме газового разряда, М., Госатомиздат, 1961.
- [8] Gordon Francis. Ionization phenomena in gases. London, Butterworths scientific publications, 1960.
- [9] Юсупалиев У. Краткие сообщения по физике, N 9, 42 (2005).
- [10] Хастед Дж. Физика атомных столкновений, М., Мир, 1965.
- [11] Мак-Даниель И. Процессы столкновений в ионизованных газах, М., Мир, 1967.

Институт общей физики

им. А. М. Прохорова РАН

Поступила в редакцию 25 января 2006 г.