

УДК 537.523

УНИВЕРСАЛЬНАЯ ЗАВИСИМОСТЬ ОТНОСИТЕЛЬНОГО НАПРЯЖЕНИЯ СТАТИЧЕСКОГО ЭЛЕКТРИЧЕСКОГО ПРОБОЯ В ГАЗАХ ОТ ЕГО ОБОБЩЕННОЙ ПЕРЕМЕННОЙ

У. Юсупалиев

(центр гидрофизических исследований)

E-mail: nesu@phys.msu.ru

В рамках модели Таунсенда — модели статического электрического пробоя в газах определена зависимость отношения напряжения пробоя U_B к минимальному напряжению пробоя U_{\min} от его обобщенной переменной $\Xi_B - f(\Xi_B)$. Показано, что эта функция не зависит от рода газа и материала катода.

Несмотря на большое количество работ по исследованию электрического пробоя в газах [1–6], до сих пор не определена закономерность, которая связывала бы между собой практически все его параметры и не зависела от рода газа и материала электродов. Цель настоящего сообщения состоит в определении именно такой зависимости.

Анализ экспериментальных результатов исследования электрического пробоя газового промежутка в однородном постоянном электрическом поле показывает [1–6], что отношение U_B/U_{\min} определяется следующими независимыми величинами: давлением газа p ; расстоянием между электродами d ; коэффициентом вторичной эмиссии электронов с катода γ ; потенциалом ионизации атома I ; потенциалом диссоциации молекулы D ; потенциалами возбуждения атомов и молекул E^* ; массой m_e и зарядом e электрона; частотой упругих столкновений электронов с тяжелыми частицами ν_e , частотой возбуждения электронами атомов (молекул) ν_{ue} (включая частоту ионизации ν_i). Величины ν_e и ν_{ue} помимо сечения упругого рассеяния электронов σ_e и сечения возбуждения атомов (молекул) электронами σ_{ue} зависят и от p , причем величины $\xi_e(\sigma_e) = \nu_e/p$ и $\xi_{ue}(\sigma_{ue}) = \nu_{ue}/p$ зависят только от рода газа. Поскольку процесс ионизации частиц газа сопровождается возбуждением атомов и молекул, диссоциацией молекул, ионизацией атомов, то энергия I_{eff} , затраченная на ионизацию одной частицы газа (молекулы или атома), является функцией от I , D и E^* : $I_{\text{eff}} = f(D, I, E^*)$.

Объединим указанные независимые и определяющие величины в следующие комплексы: I_{eff} , m_e , $(\xi_e \xi_{ue})$, (pd) , $\ln(1 + 1/\gamma)$. Здесь безразмерная величина $\ln(1 + 1/\gamma)$ следует из критерия электрического пробоя Таунсенда [1–6]: при заданном значении γ для пробоя необходимо, чтобы электрон совершал на длине промежутка между электродами в электрическом поле количество актов размножения, равное $\ln(1 + 1/\gamma)$. С другой стороны, это количество актов равно αd (α — первый коэффициент иони-

зации Таунсенда) и пропорционально произведению частоты ионизации ν_i и d . Учитывая зависимость ν_i от давления p ($\nu_i \sim p$), из условия пробоя $\frac{\alpha d}{\ln(1+1/\gamma)} = 1$ получим $\frac{\alpha d}{\ln(1+1/\gamma)} \sim \frac{pd}{\ln(1+1/\gamma)}$. Поэтому вышеприведенный перечень независимых определяющих величин можно представить в следующем виде:

$$I_{\text{eff}}, \quad m_e, \quad (\xi_e \xi_{ue}), \quad \frac{(pd)}{\ln(1 + 1/\gamma)}. \quad (1)$$

Тогда безразмерное напряжение пробоя является функцией указанных размерных комплексов (1)

$$\frac{U_B}{U_{\min}} = f \left[I_{\text{eff}}, m_e, (\xi_e \xi_{ue}), \left(\frac{pd}{\ln(1 + 1/\gamma)} \right) \right]. \quad (2)$$

В работе [7], применяя методы теории размерности (метод Рэлея), установлена следующая обобщенная переменная для электрического пробоя:

$$\Xi_B = \sqrt{\frac{m_e \xi_e \xi_{ue}}{I_{\text{eff}}}} \left[\frac{pd}{\ln(1 + 1/\gamma)} \right]. \quad (3)$$

Таким образом, безразмерное напряжение U_B/U_{\min} является функцией только переменной Ξ_B , т.е. искомая функция (2) сводится к виду $U_B/U_{\min} = f(\Xi_B)$.

Для определения конкретного вида функции $f(\Xi_B)$ необходимо определить зависимость эмпирических постоянных A_p и B_p в формуле Таунсенда от характеристик газа, так как, согласно данным работ [1–4], в рамках модели Таунсенда для электрического пробоя этими постоянными и коэффициентом γ определяются величины U_B , $U_{B \min}$ и $(pd)_{\min}$:

$$U_B = \frac{B_p (pd)}{\ln[A_p (pd) / \ln(1 + 1/\gamma)]}, \quad (4)$$

$$U_{B \min} = \frac{2.72 B_p}{A_p} \ln(1 + 1/\gamma), \quad (5)$$

$$(pd)_{\min} = \frac{2.72}{A_p} \ln(1 + 1/\gamma),$$

где $(pd)_{\min}$ — величина, соответствующая минимуму напряжения пробоя $U_{B\min}$. Применяя стандартные методы теории размерности, в работе [8] получены следующие формулы для размерных постоянных A_P и B_P :

$$A_P = a_P \sqrt{\frac{m_e \xi_e \xi_{ue}}{I_{\text{eff}}}}, \quad B_P = b_P \sqrt{\frac{m_e \xi_e \xi_{ue} I_{\text{eff}}}{e^2}}, \quad (6)$$

где a_P и b_P — безразмерные коэффициенты, величины которых определяются из опытных данных для A_P и B_P . В [7] из сравнения с опытными данными работ [1–6] получено, что $a_P \approx 1.0$. Далее, используя соотношения (6), из (4) и (5) получим следующие уточненные формулы для напряжения пробоя U_B , минимального напряжения пробоя $U_{B\min}$ и $(pd)_{\min}$:

$$U_B = \frac{b_P \sqrt{\frac{m_e \xi_e \xi_{ue} I_{\text{eff}}}{e^2}} (pd)}{\ln \left[\sqrt{\frac{m_e \xi_e \xi_{ue}}{I_{\text{eff}}}} \left(\frac{pd}{\ln(1+\gamma)} \right) \right]}, \quad (7)$$

$$U_{B\min} = \frac{2.72 b_P I_{\text{eff}}}{e} \ln(1+\gamma), \quad (8)$$

$$(pd)_{\min} = 2.72 \sqrt{\frac{I_{\text{eff}}}{m_e \xi_e \xi_{ue}}} \ln(1+\gamma).$$

В работе [8] на основе рассмотрения элементарных процессов с участием метастабильных уровней молекул и атомов определено значение энергии $b_P I_{\text{eff}}$, затраченной электронами на ионизацию одной частицы газа.

Используя выражения (3), (7) и (8), получим следующий конкретный вид функции $f(\Xi_B)$:

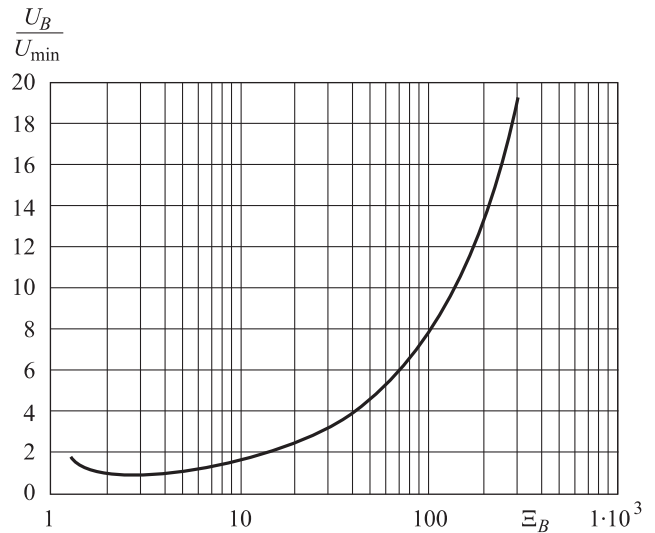
$$\frac{U_B}{U_{B\min}} = f(\Xi_B) = \frac{\Xi_B}{2.72 \ln \Xi_B}, \quad (9)$$

из которого видно, что выражение для безразмерного напряжения пробоя $U_B/U_{B\min}$ не зависит от рода газа и материала катода, т.е. в рамках модели Таунсенда функция $f(\Xi_B)$ является универсальной для пробоя в газах в постоянном электрическом поле. График этой универсальной кривой (9) приведен на рисунке. При $\Xi_B \rightarrow 1$ величина $U_B/U_{B\min} \rightarrow \infty$, т.е. функция $f(\Xi_B)$ имеет асимптотику при $\Xi_B = 1$. При $\Xi_B < 1$ безразмерное напряжение становится отрицательным, чего в действительности быть не должно, и поэтому $\Xi_B > 1$. Значение обобщенной переменной Ξ_B , при котором $U_B/U_{B\min} \rightarrow \infty$, назовем предельным $(\Xi_B)_{\text{lim}}$. Из условия $\Xi_B = 1$ най-

дем, что

$$(pd)_{\text{lim}} = \sqrt{\frac{I_{\text{eff}}}{m_e \xi_e \xi_{ue}}} \ln(1+1/\gamma). \quad (10)$$

Используя (6) и (10), получим известную связь между $(pd)_{\text{lim}}$ и $(pd)_{\min}$ [3, 4]: $(pd)_{\min}/(pd)_{\text{lim}} = 2.72$. Сравнивая (3) и (10), приходим к выводу о том, что обобщенная переменная электрического пробоя в газе представляет собой отношение величин (pd) и $(pd)_{\text{lim}}$: $\Xi_B = (pd)/(pd)_{\text{lim}}$.



Зависимость отношения напряжения электрического пробоя U_B к минимальному напряжению пробоя U_{\min} от обобщенной переменной Ξ_B

Основная ценность функции $f(\Xi_B)$ состоит в том, что она универсальна для газов, исследованных в работах [1–6].

Литература

1. Meek J.M., Craggs J.D. Electrical Breakdown of Gases. Oxford, 1953.
2. Капцов Н.А. Электроника. М., 1953.
3. Von Engel A. Ionized Gases. Oxford, 1955.
4. Райзер Ю.П. Физика газового разряда. М., 1987.
5. Королев Ю.Д., Месяц Г.А. Физика импульсного пробоя газов. М., 1991.
6. Месяц Г.А. // УФН. 2006. **176**, № 10. С. 1069.
7. Юсупалиев У. // Краткие сообщ. по физике. 2006. № 2. С. 35.
8. Юсупалиев У. // Краткие сообщ. по физике. 2007. № 11. С. 45.

Поступила в редакцию
23.11.2007