

УДК 539.219.3

С.Ю. НЕСТЕРЕНКО, С.А. ЛОБОВ, А.И. ОРАНСКИЙ

Национальный аэрокосмический университет им. Н.Е. Жуковского "ХАИ", Украина

## РАСЧЕТ ПРОБОЙНЫХ ХАРАКТЕРИСТИК ГАЗОРАЗРЯДНЫХ ПОЛЫХ ВЫСОКОЭМИССИОННЫХ КАТОДОВ С ВНЕШНИМ БЕЗНАКАЛЬНЫМ ПОДЖИГОМ

Получено математическое выражение для расчета напряжения пробоя при безнакальном запуске газоразрядных полых высокоэмиссионных катодов (ГПВК) с внешним поджигом. Показано, что существуют оптимальные соотношения между диаметром диафрагмы, отверстием поджигного электрода и расстоянием, между поджигным электродом и диафрагмой, которые обеспечивают минимальные значения напряжения пробоя при различных значениях массового расхода плазмообразующего газа ( $X_e$ ) через катод.

**газоразрядный полый высокоэмиссионный катод, внешний поджиг, напряжение пробоя, математическое выражение, расчет**

### Введение

В наши дни для электроракетных двигателей наиболее перспективными, благодаря высоким техническим параметрам, являются газоразрядные полые высокоэмиссионные катоды (ГПВК) [1]. Такие катоды позволяют получать большие плотности электронного тока (до  $10^7$  А/м<sup>2</sup> в выходном отверстии) с относительно небольшими затратами энергии (10...25 Вт/А) и способны работать в режиме самоподогрева не только в стационарном режиме, но и в режиме запуска.

Наиболее перспективной с точки зрения энергозатрат и ресурса является схема ГПВК, совмещающая следующие свойства:

- расход плазмообразующего газа через рабочую полость с образованием положительного (по отношению к эмиссионной поверхности) столба плазмы, в результате чего снижается разрядное напряжение и улучшаются эмиссионные свойства поверхности, благодаря эффекту Шоттки в термоэлектронной эмиссии;

- наличие диафрагмы, при котором требуемое давление плазмообразующего газа в рабочей полости достигается при меньшем его расходе;

- использование активирующих веществ либо эффективных термоэммиттеров для улучшения эмиссионных свойств рабочей поверхности в результате снижения работы выхода электронов.

Существует 2 основных типа ГПВК с безнакальным поджигом. 1-й тип – это ГПВК с внутренним поджигом (рис. 1), в котором корпус с диафрагмой играет роль поджигного электрода и первичные электроны формируются за счет пробоя промежутка  $L$  между термоэммиттером и диафрагмой.

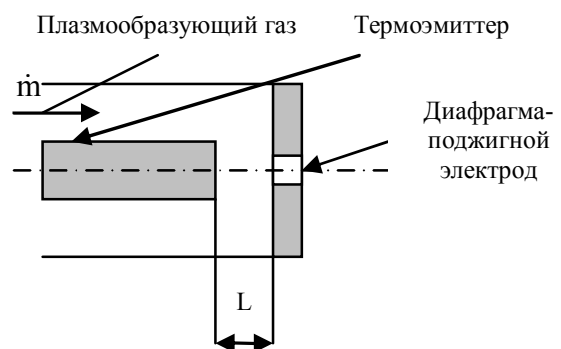


Рис. 1. Схема ГПВК с внутренним безнакальным поджигом

2-й тип – это ГПВК с внешним безнакальным поджигом (рис. 2). Как видно из рисунка, функцию поджигного электрода выполняет дополнительный

корпус с отверстием радиусом  $R$ . Пробой в этом случае (обеспечивающий первичные электроны в разрядном промежутке) осуществляется между поджигающим электродом и диафрагмой, радиусом  $R_0$ .

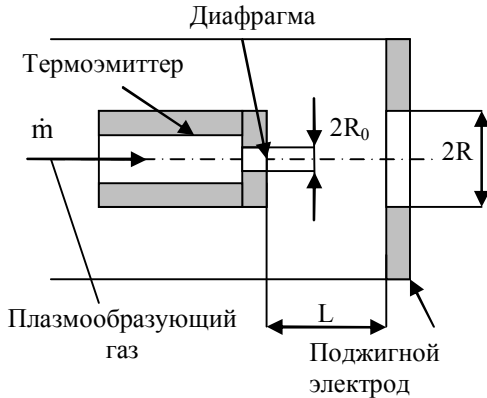


Рис. 2. Схема ГПВК с внешним безнакальным поджигом

Основное различие в условиях пробоя для вышеприведенных типов ГПВК – это распределение давления плазмообразующего газа по длине промежутка  $L$ . Так, в случае ГПВК с внутренним безнакальным поджигом давление можно считать постоянным, а в случае ГПВК с внешним безнакальным поджигом давление по длине промежутка  $L$  меняется нелинейно. И если для первого случая расчет пробойных характеристик не представляет особых трудностей и уже нашел свое применение в проектировании систем электропитания для поджигающего электрода ГПВК с внутренним поджигом, то для ГПВК с внешним безнакальным поджигом такой расчет до сих пор в литературе не приведен.

### Расчетные зависимости

В соответствии с теорией Таунсенда [2], выражение для напряжения пробоя имеет вид:

$$U_{np} = \frac{PL}{\left\{ \frac{1}{D} \ln \left[ \frac{CPL}{\ln \left( \frac{1}{\gamma} + 1 \right)} \right] \right\}^2}, \quad (1)$$

где  $P$  – давление в разрядном промежутке ГПВК;

$L$  – соответственно длина пробойного промежутка;

$C, D$  – константы в уравнении коэффициента ударной ионизации (для ксенона  $C=49,6$  (Па·м)<sup>-1</sup>,  $D=31,5$  (В/(Па·м))<sup>-1/2</sup>);

$\gamma$  – коэффициент вторичной ионизации.

Для ГПВК с внутренним безнакальным поджигом расчетные зависимости по формуле (1) совпадают с экспериментальными данными с точностью 10 % [3], что говорит о применимости предположений теории Таунсенда для расчета пробойных характеристик ГПВК.

Течение нейтральной компоненты плазмообразующего газа в отверстии диафрагмы катода является критическим и, ввиду больших длин свободных пробегов и высокой теплопроводности, изотермическим. Для этого случая скорость течения плазмообразующего газа в отверстии равна

$$V = \sqrt{\frac{kT}{M}}, \quad (2)$$

где  $M$  – масса атома.

Массовый расход через отверстие диафрагмы определяется следующей зависимостью

$$\dot{m} = nVS_0, \quad (3)$$

где  $n$  – концентрация атомов в отверстии диафрагмы;

$S_0$  – площадь сечения отверстия диафрагмы.

Для критического (и сверхкритического) режимов течения плазмообразующего газа давление внутри диафрагмы пропорционально массовому расходу:

$$P_0 \sim \frac{\dot{m}}{S_0} \sqrt{\frac{kT}{M}}, \quad (4)$$

В пространстве, между диафрагмой и поджигающим электродом давление газа является переменным и вместо произведения  $P \cdot L$  в уравнение (1) необходимо

поставлять интеграл  $\int_0^L P dx$ :

$$U_{np} = \frac{\int_0^L P dx}{\left[ \frac{1}{D} \ln \left[ \frac{C \int_0^L P dx}{\ln \left( \frac{1}{\gamma} + 1 \right)} \right] \right]^2}, \quad (5)$$

Зависимость давления от расстояния до диафрагмы можно найти, решая совместно уравнение неразрывности

$$\nabla \cdot (n\vec{V}) = 0 \quad (6)$$

и уравнение движения

$$m \cdot n \cdot (\vec{V} \cdot \nabla) \cdot \vec{V} + \nabla P = 0, \quad (7)$$

причем, при изотермическом течении

$$\nabla P = k \cdot T \cdot \nabla n. \quad (8)$$

При квазиодномерном течении в плавно расширяющемся канале, в таком случае, имеем:

$$\frac{1}{S} \frac{d}{dx} (nVS) = 0 \quad (9)$$

и

$$m \frac{VdV}{dx} + \frac{kT}{n} \frac{dn}{dt} = 0, \quad (10)$$

где  $S=S(x)$  – площадь сечения струи плазмообразующего газа.

Совместное решение (9) и (10) дает следующую связь между давлением и сечением струи:

$$\frac{P_0^2 S_0^2}{P^2 S^2} + 2 \ln \frac{P}{P_0} = 1. \quad (11)$$

Форму струи при радиусе отверстия диафрагмы  $R_0$ , радиусе отверстия поджигного электрода  $R$  и расстояния между диафрагмой и поджигным электродом  $L$  можно оценочно считать конической. Тогда

$$S(x) = \pi \left[ R_0 + (R - R_0) \frac{x}{L} \right]^2. \quad (12)$$

## 2. Пробойные характеристики ГПВК с внешним поджигом

Основная серия расчетных зависимости напряжения пробоя плазмообразующего газа  $U_{np}$  от ра-

диуса отверстия диафрагмы  $R_0$ , радиуса отверстия поджигного электрода  $R$  и расстояния между диафрагмой и поджигным электродом  $L$  получена для следующих диапазонов варьирования:

- $R_0 = 0,1 \dots 0,3$  мм;
- $R = 0,1 \dots 1$  мм;
- $L = 0,5 \dots 5$  мм;
- $\dot{m} = 0,1 \dots 1$  мг/с.

Для примера на рис. 3 и 4 показаны фрагменты расчетных зависимостей напряжения пробоя от расхода при различных значениях радиуса отверстия диафрагмы  $R_0$ , радиуса отверстия поджигного электрода  $R$  и расстояния между диафрагмой и поджигным электродом  $L$

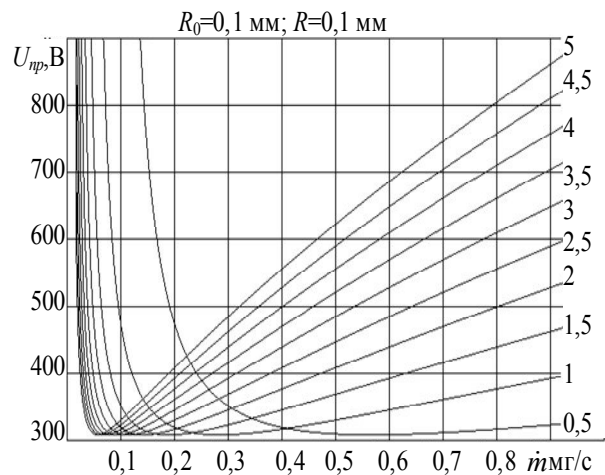


Рис. 3. Расчетные зависимости напряжения пробоя ГПВК с внешним поджигом от расхода плазмообразующего газа при  $R_0=0,1$  мм,  $R=0,1$  мм

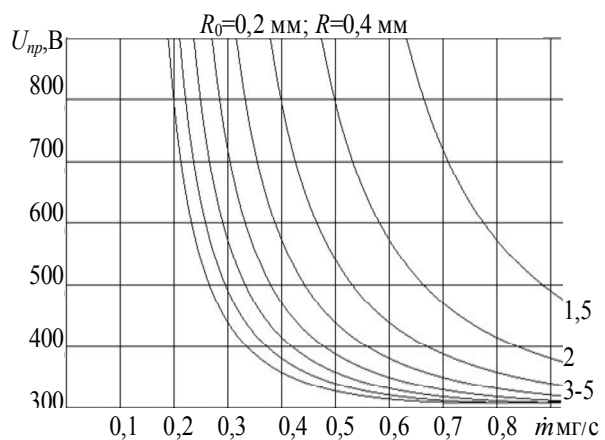


Рис. 4. Расчетные зависимости напряжения пробоя ГПВК с внешним поджигом от расхода плазмообразующего газа при  $R_0=0,2$  мм,  $R=0,4$  мм

Очевидно наличие минимума характеристики во всех приведенных случаях, однако, при увеличении  $R$  оптимальное (минимум) значение напряжения пробоя заметно смещается в сторону больших расходов практически для всех значений расстояния между диафрагмой и поджигным электродом  $L$ .

В табл. 1 приведены основные соотношения радиуса отверстия диафрагмы  $R_0$ , радиуса отверстия поджигного электрода  $R$  и расстояния между диафрагмой и поджигным электродом  $L$ , при которых уровень пробойного напряжения для различных массовых расходов  $\dot{m}$  является минимальным, принимаемая значение, не превышающее 310 В.

Таблица 1

Оптимальные соотношения  $L, R_0, R$   
для различных  $\dot{m}$

$\dot{m}$ , мг/с	$R_0$ , мм	$R$ , мм	$L$ , мм
0,10	0,1..0,3	0,10	2,5...2
0,20	0,1..0,3	0,10	1,50
	0,1..0,3	0,20	4...5
0,30	0,1..0,3	0,10	1,00
	0,1..0,3	0,20	2,5...3
	0,1..0,3	0,30	4...5
0,40	0,1..0,3	0,20	2,00
	0,1..0,15	0,30	3,50
	0,10	0,40	4,5...5
0,5	0,1..0,3	0,20	2,00
	0,1..0,15	0,30	2,5...2
	0,10	0,40	3,5...4
	0,1...0,15	0,50	4...5
0,60	0,1..0,3	0,10	0,50
	0,1..0,3	0,20	1,5...2
	0,1..0,15	0,30	1,50
	0,1..0,15	0,40	3,00
0,7	0,1..0,15	0,30	2,00
	0,15...0,2	0,40	4...5
0,8	0,20	0,40	4,5..5
	0,15	0,50	5,00
	0,15	0,6	5
	0,1..0,3	0,20	1,00
	0,1..0,15	0,30	1,50
0,9	0,15..0,3	0,30	2,50
	0,15..0,3	0,40	5
	0,1...0,15	0,70	5,00
	0,10	0,80	5,00
	0,1..0,15	0,40	2,00
	0,30	0,40	5,00

## Заключение

Впервые получена расчетная зависимость напряжения пробоя газоразрядных полых высокоэмиссионных катодов с внешним безнакальным поджигом, позволяющая засчитать для заданной величины массового расхода плазмообразующего газа  $\dot{m}$  оптимальные значения радиуса диафрагмы  $R_0$ , радиуса отверстия поджигного электрода  $R$  и расстояния между поджигным электродом и диафрагмой  $L$ , обеспечивающих минимальное значение пробойного напряжения  $U_{пр} \sim 310$  В.

## Литература

1. Оранский А.И. Перспективные катоды электроракетных двигателей // *Авіаційно-космічна техніка і технологія: Зб. наук. праць.* – Х.: Нац. аерокосмічний ун-т “Харк. авіац. ін-т”; Миколаїв: Вид-во МФ НаУКМА, 2002. – Вип. 31. Двигуни та энергоустановки. – С. 257-259.
2. Райзер Ю.П. Физика газового разряда. – М.: Наука, 1987. – 237 с.
3. Оранський А.І. Вирішення проблеми швидкого та надійного запуску електроракетних двигунів // *Авиационно-космическая техника и технология: Сб. науч. тр. Гос. аэрокосм. ун-та им. Н.Е. Жуковского “ХАИ”.* – Х.: Гос. аэрокосм. ун-т “ХАИ”, 1999. – Вип. 9. Тепловые двигатели и энергоустановки. – С. 491-494.

Поступила в редакцию 7.03.2007

**Рецензент:** д-р техн. наук, проф. Ю.С. Васильев, зам. директора по научной работе Украинского научно-исследовательского угле-химического института, Харьков.