

## **Минимизация времени формирования тлеющего разряда самонагревных газоразрядных полых высокоэмиссионных катодов с внутренним поджигом электрореактивных двигателей**

*Национальный аэрокосмический университет им. Н.Е. Жуковского «ХАИ»*

Предложена математическая модель формирования тлеющего разряда в самонагревных газоразрядных полых высокоэмиссионных катодах (СГПВК) с внутренним поджигом электрореактивных двигателей. Приведены основные параметры запуска, схемы СГПВК и системы энергоснабжения. Исследован первый этап запуска СГПВК – в режиме тлеющего разряда. Предложены зависимости времени формирования и плотности тока тлеющего разряда в СГПВК от основных параметров источника электропитания (индуктивности  $L$ , электрической емкости  $C$  и балластного сопротивления  $R_B$ ). Это позволит обеспечить минимальное время формирования квазистационарного тлеющего разряда и получить максимальную плотность тока, что является одной из стадий решения большой научно-прикладной задачи – обеспечению полного гарантированного запуска СГПВК в минимально возможный период. Эта проблема важна для задач применения СГПВК в системах успокоения, ориентации и стабилизации (СУОС) космических летательных аппаратов (КЛА).

**Ключевые слова:** газоразрядные полые высокоэмиссионные катоды, электроракетные (электрореактивные) двигатели, газоразрядные процессы.

### **Введение**

Среди разрабатываемых типов катодов наиболее перспективным видом являются газоразрядные полые высокоэмиссионные катоды (ГПВК), относящиеся к классу плазменных эмиттеров электронов. Источником электронов в таких устройствах служит плазма газового разряда, горящего в проточном полой катоде, обычно выполненном из высокоэффективного термоэмиссионного материала, через который осуществляется непрерывная прокачка газа (ксенона, аргона и др.). Они позволяют получать большие плотности электронного тока (до  $10^6 \dots 10^7$  А/м<sup>2</sup> в выходном отверстии) со сравнительно малыми затратами энергии (10...25 Вт/А).

В зависимости от характера нагрева в период запуска ГПВК разделяют на два типа. К первому виду относятся ГПВК, которые перед запуском предварительно нагревают до рабочих температур с помощью специального стартового нагревателя – «накала». Благодаря этому они получили второе название – накальные катоды (НК). К НК относятся практически все современные летные образцы ГПВК. Известен и второй вид ГПВК, в которых зажигание разряда проводится с холодного состояния катода, а его дальнейший разогрев до рабочих температур осуществляется самим разрядом в процессе его развития. Катоды такого типа получили название – самонагревные газоразрядные полые высокоэмиссионные катоды (СГПВК). Отличительным признаком таких катодов является отсутствие нагревателя (накала) в их конструкции. По этому признаку их еще называют безнакальными катодами (БНК).

Исторически сложилось [1-3], что первыми были доведены до требуемых параметров и прошли весь цикл необходимой для космических изделий

отработки, включая квалификационные ресурсные испытания, и стали летными образцами накальные ГПВК (например катоды-компенсаторы СПД КЭ-2, основной катод и нейтрализатор плазменно-ионного двигателя SERT-II и т.д.). В настоящее время накальные ГПВК удовлетворяют практически всем требованиям, необходимым для решения большинства ближайших задач, кроме использования в СУОС.

Накальные ГПВК являются самыми инерционными элементами практически всех современных ЭРД, работающих на инертных газах, и они имеют три основных недостатка, негативное влияние которых увеличивается больше из-за усиления предъявляемых к работе ЭРД требований [3].

Во-первых, время функционального запуска НК со стартовым элементом накала составляет до 2,5 минуты, что уже не удовлетворяет современным требованиям, предъявляемым к ЭРД СУОС.

Во-вторых, для работы стартового элемента накала необходимо обеспечивать дополнительную мощность, величина которой при увеличении ресурса ЭРД становится значительной, поскольку затраты мощности на стартовый элемент накала могут достигать сотен ватт в момент запуска и десятков ватт в режиме «ожидания» [3,4].

В-третьих, стартовые элементы накала (нагреватели) высокотемпературных НК, какими являются все катоды-компенсаторы разработки ОКБ «Факел», Россия, а также сильноточные НК, отличаются сложностью конструкции и требуют трудоемкой технологической подготовки для обеспечения заданной надежности.

Замечательным свойством СГПВК является то, что они способны работать в режиме самоподогрева (авторегиме) не только в стационарном режиме, но и в период запуска.

Современные экспериментальные модели СГПВК обеспечивают функциональный запуск серийно выпускаемых летных образцов СПД-70 и СПД-100 за время менее 25 мс. Они позволяют сократить время функционального запуска на 4 порядка, мощность, потребляемую катодом при запуске, и пусковой расход плазмообразующего газа (ксенона) – в 2-3 раза [1,2].

Однако до настоящего времени не решена задача обеспечения полного гарантированного запуска СГПВК в минимально возможный период. Эта проблема является важной как для задач применения СГПВК в СУОС и нейтрализации поверхностного заряда КЛА, так и для важной научно-прикладной работы, связанной с обеспечением безотказности запуска (требуется  $\sim 0.999$ ) при длительности запуска  $10^{-1} \dots 10^{-2}$  с, и ресурса стационарной работы  $\sim 10\,000$  ч. Решение этих проблемных вопросов является первоочередной задачей сегодняшнего дня.

## **1 Постановка задачи исследования**

Основной задачей работы являются численные исследования и минимизация времени переходных газоразрядных процессов при запуске СГПВК на базе разработанной математической модели. Для ее решения было выполнено следующее:

1. Разработка математической модели развития разряда в рабочей полости СГПВК ЭРД от таунсендовского и до самостоятельного тлеющего режима горения разряда.

2. Оптимизация по времени развития и плотности тока тлеющего разряда как функций от параметров цепи электропитания основного разряда (электрической емкости, индуктивности, балластного сопротивления).

## 2 Решение поставленной задачи

Предлагаемая схема расчетной модели СГПВК показана на рис. 1. Для предложенной схемы СГПВК характерны три существенно различные области давления газа рабочего тела: от эмиттера до диафрагмы – практически постоянное:  $P_1 = \text{const}$ , далее резкий переход со сверхкритическим перепадом давления на диафрагме (обусловленный сверхкритическим перепадом давлений [5]) и затем свободное молекулярное истечение трехкомпонентной плазмы в окружающую среду (ограниченное только производительностью откачной системы вакуумного оборудования).

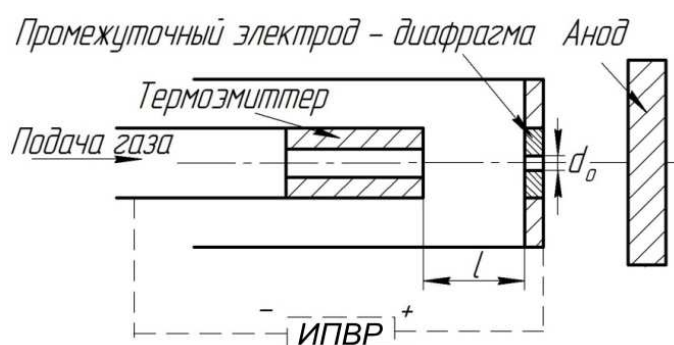


Рис. 1. СГПВК с внутренним поджигом:  
ИПВР – источник электропитания вспомогательного (поддерживающего) разряда

Принципиальная схема электрического питания для исследуемого СГПВК изображена рис. 2. В общей схеме разрядный промежуток СГПВК показан как переменное омическое сопротивление, зависящее от изменения тока в разрядном промежутке и напряжения на электродах СГПВК ( $r_p = U_p(t)/I_p(t)$  – «плазменное» сопротивление, которое определяли из системы уравнений на каждом шаге итераций).

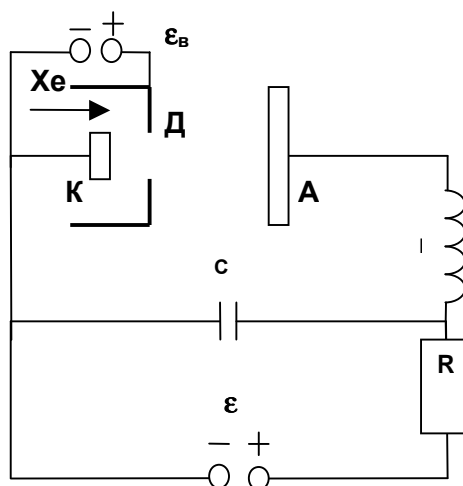


Рис. 2. Принципиальная электрическая схема экспериментальной установки для питания разряда СГПВК

На рис. 2 обозначены: К – катод; А – анод; Д – диафрагма СГПВК с диаметром  $d$ , выполняющая роль вспомогательного электрода;  $\varepsilon$  – ЭДС источника питания основного разряда;  $\varepsilon_B$  – ЭДС вспомогательного разряда (ИПВР),  $R$  – балластное сопротивление;  $L$  – индуктивность;  $C$  – емкость. Характерные расстояния соответственно равны: расстояние от катода (термоэммитера) до диафрагмы – 5 мм; расстояние от диафрагмы до поверхности анода – 10 мм. Рабочее тело – Хе подается через рабочую полость СГПВК, созданную корпусом и диафрагмой катода в разрядный промежуток.

Для описания объемного газового разряда для СГПВК исследуемой расчетной схемы предложена исходная система уравнений, в которую входили: 1 – уравнение сохранения зарядов (уравнение неразрывности [6,7]), 2 – уравнение Пуассона [6,7], отличающиеся тем, что в рассматриваемом случае в правой части уравнений будет не 0 (как в случае квазинейтральной плазмы), а слагаемые, отвечающие за ударную ионизацию, рекомбинацию и поступление электрон-ионных пар от источника внешней ионизации; 3 – уравнение напряженности электрического поля:

$$\left\{ \begin{array}{l} \frac{dc}{dt} + \operatorname{div}(\vec{J}) = \beta \cdot J - v \cdot c_e \cdot c_i / e + Q(x, y, z, \varphi) \quad (1); \\ \nabla^2(\varphi) = -\frac{c}{\varepsilon_0} \quad (2); \\ \vec{E} = -\nabla(\varphi) \quad (3). \end{array} \right.$$

В этой системе уравнений приведены следующие обозначения:  $\rho$  – плотность зарядов электронов и ионов;  $E$  – напряженность электрического поля;  $\varphi$  – разность потенциалов между электродами;  $Q$  – скорость ионизации газа внешним источником;  $\alpha$ ,  $\beta$  – коэффициенты ударной ионизации и рекомбинации (коэффициенты Таунсенда);  $\varepsilon_0$  – диэлектрическая постоянная;  $e$  – заряд электрона.

Аналогичный подход был описан в работах [8,9], где исследовали развитие тлеющего разряда в газовых лазерах и импульсного пробоя в газах. Было показано, что в одномерном приближении исходную систему уравнений можно записать в виде

$$\left\{ \begin{array}{l} \frac{dq_e}{dt} + \frac{dJ_e}{dx} = \beta \cdot J_e - v \cdot q_e \cdot q_i / e + Q; \\ \frac{dq_i}{dt} - \frac{dJ_i}{dx} = \beta \cdot J_e - v \cdot q_e \cdot q_i / e + Q; \\ \frac{dE}{dx} = \frac{1}{e \cdot \varepsilon_0} \cdot (q_e - q_i); \\ \int_0^L E dx = U_p(t); \\ v_e = M_e \cdot \left( \frac{E}{P} \right)^a; \\ v_i = M_i \cdot \left( \frac{E}{P} \right)^b. \end{array} \right.$$

В системе уравнений приведены следующие обозначения:  $q_e, q_i$  – плотности зарядов электронов и ионов;  $v_e, v_i, \mu_e, \mu_i$  – скорости дрейфа (диффузия вдоль электрического поля) и коэффициенты подвижности электронов и ионов соответственно;  $U_p(t)$  – разность потенциалов между электродами;  $L$  – длина разрядного промежутка.

Значения приведённых выше коэффициентов: скоростей дрейфа; коэффициентов ударной ионизации, вторичной эмиссии, рекомбинации и т.д. подробно рассмотрены в работе [10], которая стала базовой для приведенного исследования.

### 3 Основные результаты численных исследований по минимизации времени формирования тлеющего разряда

Полученная система дифференциальных уравнений была дополнена начальными условиями.

В начальный момент времени,  $t=0$  между эмиттером и диафрагмой (вспомогательным электродом) инициирован пробой и в промежутке (эмиттер - диафрагма) находится  $Q$  заряженных частиц. В электрическую цепь включены соответственно ЭДС источника, индуктивность и сопротивление. Между эмиттером и анодом приложено стартовое напряжение пробоя. Через СГПВК происходит истечение плазмообразующего газа (рабочего тела) – Хе с массовым расходом  $\dot{m}$ .

Численные расчеты нестационарной задачи в газовом разряде проводились в многочисленных работах Девиса, Ворда и других авторов [11,12]. Наличие объемных зарядов, плотности которых превосходят плотности зарядов, рассматриваемые в этих работах, вызывает сильное искажение поля. Большие значения  $\text{div} \vec{E}$  вблизи катода приводят к необходимости сильного измельчения пространственной сетки, что в соответствии с условием Куранта для явных схем влечет за собой ограничение шага по времени  $\tau < h/v$ . ( $\tau$  – шаг по времени,  $h$  – шаг по пространству для явных разностных схем).

Расчеты проводили по явной схеме, аппроксимирующей исходную систему уравнений, благодаря чему были получены зависимости времени формирования и плотности тока тлеющего разряда в СГПВК от независимых факторов: индуктивности  $L$ , электрической емкости  $C$  и балластного сопротивления  $R_B$ :

$$\begin{aligned} \tau(L, C, R_B) = & 1,57731 - 0,232879 \cdot L - 0,165002 \cdot C - 0,188089 \cdot R_B + 0,01 \cdot L \cdot C - \\ & - 0,0475 \cdot L \cdot R_B - 0,02 \cdot R_B \cdot C - 0,306756 \cdot L^2 - 0,4353 \cdot C^2 \\ & + 0,278457 \cdot R_B^2; \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} J(L, C, R_B) = & 8,09746 + 0,479031 \cdot L - 0,324335 \cdot C + 0,200102 \cdot R_B + 0,54 \cdot L \cdot C + \\ & + 0,1675 \cdot L \cdot R_B - 0,0725 \cdot R_B \cdot C + 0,113439 \cdot L^2 - 0,184242 \cdot C^2 - \\ & - 0,867554 \cdot R_B^2. \end{aligned}$$

Проверка полученных зависимостей с помощью оценки индекса корреляции показала, что точность совпадения данных не хуже 5%:

$$R = \sqrt{1 - \frac{\sum_{i=1}^n (y_i - Y_i)^2}{\sum_{i=1}^n (y_i - \bar{y}_i)^2}} \approx 0,96$$
, т.е. полученные зависимости  $\tau(L, C, R_B)$  и  $J(L, C, R_B)$  адекватно описывают зависимости времени развития и плотности тока тлеющего разряда как функции от параметров внешней цепи (электрической емкости, индуктивности, балластного сопротивления).

На рис. 3 показаны основные обобщенные результаты расчетов по полученным зависимостям.

Очевидно наличие областей минимальных значений времени развития тлеющего разряда как функции от параметров внешней цепи в исследуемом интервале варьирования. При этом на графиках зависимости плотности тока тлеющего разряда как функции от параметров внешней цепи присутствует максимум функции.

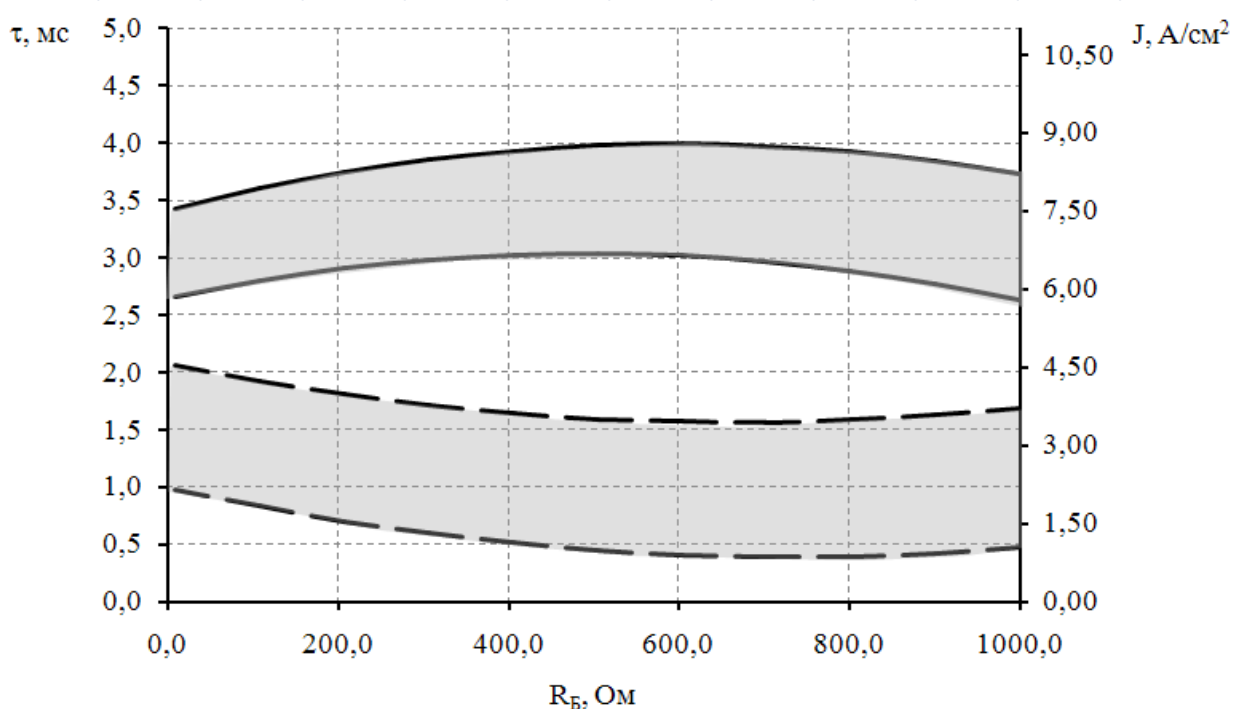


Рис. 3. Зависимость времени развития и величины плотности тока основного тлеющего разряда как функции от  $L$ ,  $C$  и  $R_B$  электрической цепи питания основного разряда: пунктирная линия – время, сплошная линия – плотность тока; затененные области – исследуемый диапазон с различными сочетаниями  $L$  и  $C$

По полученным зависимостям можно определить минимальные значения времени развития основного тлеющего разряда как функции от  $L$ ,  $C$  и  $R_B$  электрической цепи питания основного разряда. В результате расчетов при различных сочетаниях независимых факторов минимум времени развития тлеющего разряда составлял от 0,4 до 1,6 мкс. В то же время максимум плотности тока тлеющего разряда изменяется в пределах от 7 до 9 А/см<sup>2</sup>.

На рис 4. показаны графики зависимостей, соответствующие наиболее благоприятным сочетаниям независимых факторов ( $L$ ,  $C$  и  $R_B$ ) для времени развития и плотности тока тлеющего разряда.

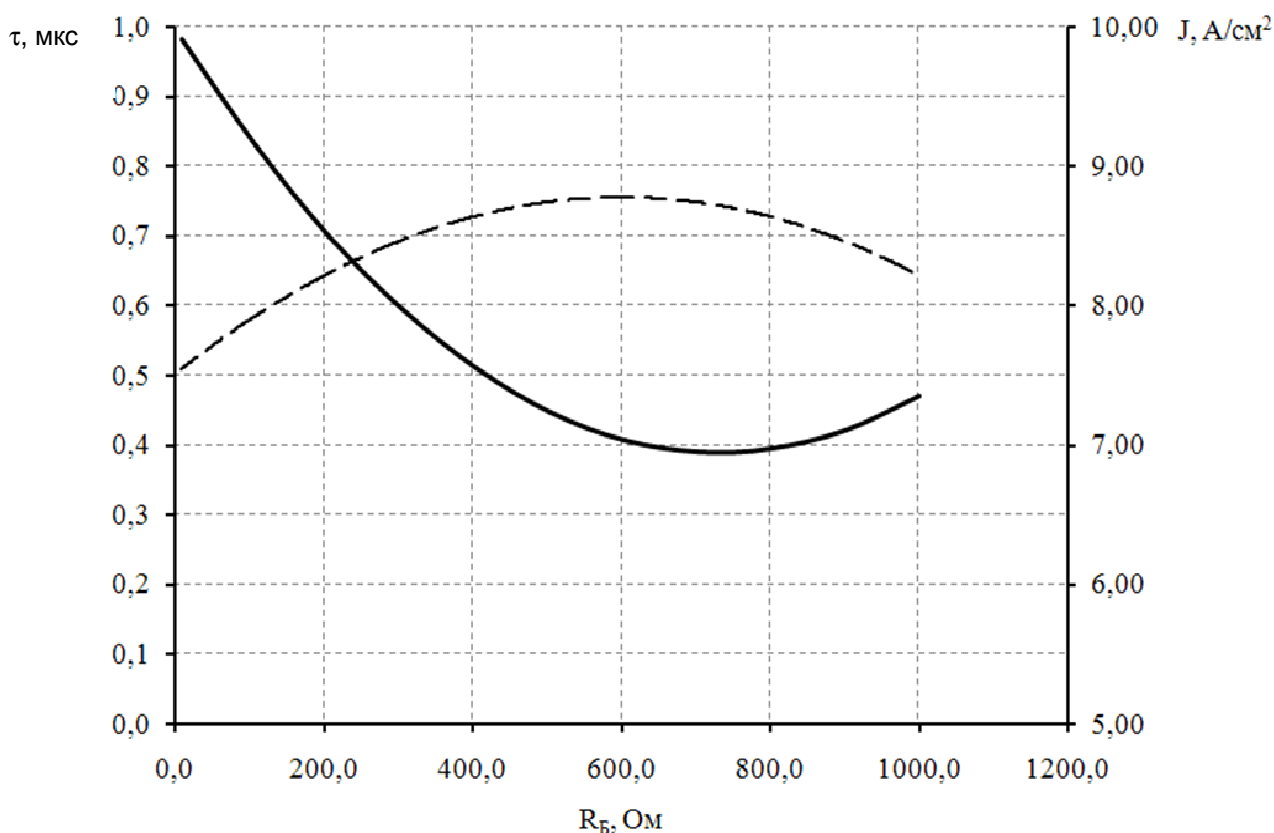


Рис. 4. Графики зависимостей времени развития (сплошная линия) и плотности тока тлеющего разряда (пунктир) при наиболее благоприятных сочетаниях независимых факторов при  $L = 0,1$  Гн и  $C=1 \cdot 10^{-4}$  Ф

Таким образом, предлагаемая математическая модель и полученные регрессионные характеристические уравнения позволяют решить задачу минимизации времени процесса развития максимальной величины плотности тока тлеющего разряда как функцию от параметров предложенной внешней цепи электропитания (электрической емкости, индуктивности, балластного сопротивления).

### Выводы

Сформулированы требования к параметрам внешней электрической цепи питания основного разряда (индуктивность ( $L$ ), электрическая емкость ( $C$ ) и балластное сопротивление ( $R_B$ )) для обеспечения минимального времени развития квазистационарного тлеющего разряда 0,4 мкс и получения максимальной плотности тока 9 A/cm<sup>2</sup>.

### Список литературы

1. Grubisic. Hollow cathodes as a plasma propulsion device [Text] / Grubisic, N. Angelo Gabriel, B. Stephen // Proc. of the 46-th AIAA Aerospace Sciences Meeting and Exhibition Reston. – USA, 2008. – P. 2008–2082.
2. Оранський, А. І. Вирішення проблеми швидкого та надійного запуску електроракетних двигунів [Текст] / А. І. Оранський // Авиационно-космическая техника и технология : тр. Гос. аэрокосм. ун-т им. Н. Е. Жуковского «ХАИ». – Х., 1999. – Вып. 9 : Тепловые двигатели и энергоустановки. – С. 491–494.
3. Michael J. Patterson. Recent Development Activities in Hollow Cathode Technology [Text] / Michael J. Patterson, Matthew T. Domonkos. // Proc. of the 27th Intern. Electric Propulsion Conf., Pasadena, CA, 2001, IEPС–01–270. – P. 15–19.
4. Архипов, Б. А. Опыт создания полых высокоэмиссионных катодов [Текст] / Б. А. Архипов, В. М. Мурашко, А. И. Оранский // Авиационно-космическая техника и технология : тр. Гос. аэрокосм. ун-та им. Н. Е. Жуковского «ХАИ». – Х., 1999. – Вып. 10. – С. 360–363.
5. Абрамович, Г.Н. Прикладная газовая динамика [Текст] / Г.Н. Абрамович. – М. : Наука, 1969. – 824 с.
6. Грановский, В. Л. Электрический ток в газе. Установившийся ток [Текст] / В. Л. Грановский ; под ред. Л. А. Сена, В. Е. Голанта. – М. : Наука, 1971. – 544 с.
7. Крэгс, Д. Электрический пробой в газах [Текст] / Д. Мик, Д. Крэгс. – М., 1960. – 600 с.
8. Лисенков, В. В. Формирование самостоятельного объемного газового разряда [Текст] / В. В. Осипов, В. В. Лисенков // Журн. техн. физики. – 2000. – Т. 70, № 10. – С. 27–33.
9. Райзер, Ю. П. Физика газового разряда [Текст] / Ю. П. Райзер. – М. : Наука, 1992. – 536 с.
10. Лобов, С. А. Формирование самостоятельного тлеющего разряда при безнакальном запуске газоразрядных полых высокоэмиссионных катодов электрореактивных двигателей [Текст] / С. А. Лобов, А. И. Оранский // Авиационно-космическая техника и технология. – 2006. – № 10 (36). – С. 67–73.
11. Захаров, В. В. Объемный разряд в азоте со стационарной внешней ионизацией [Текст] / В. В. Захаров, А. А. Карпиков, Е. В. Чехунов // Журн. техн. физики. – 1976. – Т. 46, № 9. – С. 1847–1856.
12. Гордеев, В. Ф. Термо-эмиссионные дуговые катоды [Текст] / В. Ф. Гордеев, А. В. Пустогаров. – М. : Энергоатомиздат, 1988. – 192 с.

**Рецензент:** д-р техн. наук, проф., зав. каф. В.Н. Кобрин, Национальный аэрокосмический университет им. Н.Е. Жуковского «ХАИ», Харьков.

Поступила в редакцию 28.09.12



## **Мінімізація часу формування тліючого розряду самонагравних газорозрядних порожнистих високоемісійних катодів з внутрішнім поджигом електрореактивних двигунів**

Запропоновано математичну модель формування тліючого розряду в самонагравних газорозрядних порожнистих високоемісійних катодах (СГПВК) з внутрішнім поджигом електрореактивних двигунів. Наведено основні параметри запуску, схеми СГПВК і системи енергоживлення. Досліджено перший етап запуску СГПВК - в режимі тліючого розряду. Запропоновано залежності часу формування і щільності струму тліючого розряду в СГПВК від основних параметрів джерела електроживлення (індуктивності  $L$ , електричної ємності  $C$  і баластного опору  $R_B$ ). Це дозволить забезпечити мінімальний час формування квазістаціонарного тліючого розряду і отримати максимальну щільність струму, що є однією із стадій вирішення великої науково-прикладної задачі - забезпечення повного гарантованого запуску СГПВК в мінімально можливий період. Ця проблема важлива для задач застосування СГПВК в системах заспокоєння, орієнтації і стабілізації (СУОС) космічних літальних апаратів (КЛА).

**Ключові слова:** газорозрядні порожнисті високоемісійні катоди, електроракетні (електрореактивні) двигуни, газорозрядні процеси.

## **Minimization of period of glow discharge development in self-heated gas-discharge hollow high-emission cathodes with the internal ignition of electric propulsion**

The mathematical model of a glow discharge development in self-heated gas-discharge hollow high-emission cathodes (SGHHC) with the internal ignition of electric propulsion is proposed. Main startup parameters, scheme of SGHHC and power system are presented. The first stage of SGHHC start in glow discharge regime was investigated. The dependence of period and electric current density of glow discharge in SGHHC from main parameters of the power supply (inductivity  $L$ , electric capacity  $C$  and ballast resistance  $R_b$ ) is proposed. This will ensure the minimum time of the quasi-stationary glow discharge development and the maximum electric current density. It is one of the stages of huge scientific problem - the full guaranteed SGHHC start at the minimum possible time. This problem is important for applications of SGHHC in damping, orientation and stabilization systems of spacecraft.

**Keywords:** self-heated gas-discharge hollow high-emission cathodes, electric propulsion.