

УДК 533.924

Е.П. ВАУЛИН<sup>1</sup>, В.А. ОБУХОВ<sup>2</sup>, М.В. ЧЕРКАСОВА<sup>1</sup><sup>1</sup>Московский авиационный институт (государственный технический университет) «МАИ», Россия<sup>2</sup>НИИ ПМЭ, Москва, Россия

## ТЕЧЕНИЕ ПЛАЗМЫ И ЭНЕРГООБМЕН В ПОЛЫХ КАТОДАХ

Рассмотрена замкнутая математическая модель полого катода в дуговом режиме, описывающая процессы переноса в плазме активной зоны полого катода, на границе плазмы с катодом и на катодной поверхности. Модель позволяет вычислять основные локальные и интегральные характеристики катода, исследовать характеристики катодных узлов из различных материалов с применением различных плазмообразующих газов. Приведены результаты исследований.

**полый катод, дуговой разряд, активная зона, плазмообразующий газ, неравновесная плазма**

## Введение

Разряд с полым катодом является специфической формой газового разряда, так как плазма из межэлектродного пространства может проникать в полый катод, вследствие чего возникает сильное взаимодействие между плазмой и внутренней поверхностью катода. Специфика процессов в ПК позволяет получать высокие плотности тока поверхности катода при низком давлении окружающей среды. Взаимодействие со стенкой катода ионов низких энергий обуславливает долговечность устройства и низкое содержание примесей в плазме. К настоящему времени полые катоды в дуговом режиме широко применяются в плазменных ускорителях, различных технологических устройствах (сварка, пайка и др.) и некоторых типах плазмотронов. Широкое распространение получили так называемые составные, многополостные или многоканальные катоды. Но, несмотря на многолетнюю практику использования полых катодов, отсутствует надежная замкнутая модель процессов, позволяющая создавать инженерные методики расчета и проектирования устройств с полым катодом, сравнивать эффективность различ-

ных типов катодов.

## 1. Математическая модель полого катода в дуговом режиме

Рассматривается установившийся дуговой разряд с классическим полым катодом в виде цилиндра. Входное сечение катода соединено с системой подачи рабочего вещества, а сам катод помещен в вакуумную камеру. В качестве плазмообразующего вещества рассматривается инертный газ. Задача решена в квазиодномерном приближении, поскольку для длинных тонкостенных катодов все параметры слабо изменяются по радиусу катода, за исключением области существенно неравновесной плазмы в активной зоне полого катода.

## 1.1. Модель состояния катодной стенки.

Уравнение теплопроводности для металлической стенки катода учитывает энергообмен стенки с электронами и ионами плазмы, джоулев разогрев и потери энергии излучением и записывается в виде:

$$\frac{h}{L_k} \frac{d}{dz} \left( \lambda_M \frac{dT}{dz} \right) + h \rho_M j_{MZ}^2 + q_P - q_a - q_{KH} = 0, \quad (1)$$

где  $h$  – толщина катодной стенки;

$L_k$  – длина катода;

$\bar{z}$  – безразмерная координата по длине катода;

$T$  – температура стенок катода;

$\lambda_M$  – коэффициент теплопроводности материала катода;

$\rho_M$  – удельное сопротивление материала катода;

$j_{MZ}$  – продольная плотность тока в катодной стенке;

$q_P$  – плотность потока тепла за счет энергообмена с плазмой;

$q_a$  – плотность потоков тепла за счет энергообмена с атомами газа поверхности катода;

$q_{KH}$  – плотность потока тепла теряемого излучением.

Интегральный закон непрерывности тока:

$$\frac{I}{S_M} = \frac{L_k}{h} \int_0^1 j_n d\bar{z}, \quad (2)$$

где  $I$  – сила тока катода;

$S_M$  – площадь поперечного сечения катодной стенки;

$j_n$  – полная плотность тока в плазме.

Принято, что плотность тока на катоде определяется термоэмиссией.

$$j_{ek} \approx j_{\varepsilon} = AT^2 \cdot \exp\left(-\frac{e\varphi_{\varepsilon\phi\phi}}{kT}\right),$$

где  $j_{\varepsilon}$  – плотность тока эмиссии;

$A$  – постоянная в законе Ричардсона–Дешмана;

$e$  – заряд электрона;

$\varphi_{\varepsilon\phi\phi}$  – эффективная работа выхода материала катода;

$k$  – постоянная Больцмана.

### 1.2. Модель состояния плазмы активной зоны.

Состояние плазмы в активной зоне полого катода определяется следующей системой независимых уравнений:

уравнением баланса электронов:

$$\frac{dj_{ez}}{dz} = -\frac{L_v}{S_p} j_{ek} - eW_e, \quad (3)$$

уравнением баланса ионов:

$$\frac{dj_{iz}}{dz} = -\frac{L_v}{S_p} j_{ik} + eW_e, \quad (4)$$

уравнение баланса энергии электронов:

$$\frac{k}{e} C^* j_{ez} \frac{dT_e}{dz} = -\frac{L_v}{S_p} j_{ek} \left( \frac{k}{e} C^* T_e - \Delta\varphi_k \right) + eW_e \left( \alpha_i V_i + \frac{k}{e} C^* T_e \right) - j_{ez} E_z, \quad (5)$$

где

$$j_{ez}(\bar{z}) = -\int_0^{\bar{z}} (j_{ek} + j_{ik}) d\bar{z}, \quad (6)$$

с краевым условием  $j_{ez}(0) = j_{ez0}$ , а также, обобщенным законом Ома

$$j_{ez} \approx \frac{\sigma_e}{1 + \frac{v_{ea}}{v_{ei}}} \left( E_z + \frac{1}{eN_e} \cdot \frac{dP_e}{d\bar{z}} \right),$$

где  $j_{ez}$ ,  $j_{iz}$  – продольные плотности электронного и ионного токов в плазме;

$j_{ek}$ ,  $j_{ik}$  – плотности электронного и ионного токов из плазмы на катод;

$W_e$  – функция скорости ионизации;

$L_v$  – периметр канала катода, смачиваемый плазмой;

$S_p$  – площадь поперечного сечения плазмы в канале;

$C^*$  – коэффициент подобия между плотностью потока энергии электронов и электронным током;

$T_e$  – температура электронов в плазме;

$\Delta\varphi_k$  – прикатодный скачок потенциала;

$V_i$  – потенциал ионизации атомов плазмообразующего газа;

$\alpha_i$  – константа скорости ионизации;

$\sigma_e$  – удельная электропроводность плазмы;

$v_{ei}$ ,  $v_{ea}$  – частоты столкновений электрон-ион и электрон-атом;

$E_z$  – продольная напряженность электрического поля в плазме;

$N_e$  – концентрация электронов в плазме;

$dP_g/dz$  – градиент электронного давления в плазме активной зоны.

Распределение давления  $P_g$  находится из уравнения движения ионизованного газа в целом

$$\frac{dP_g^2}{dz} = -C_0 \frac{G \cdot R \cdot a^* \cdot \eta \cdot T}{M_a \cdot S_p^2} \left( 1 + X_i \frac{T_e}{T} \right), \quad (7)$$

где  $P_g$  – давление газа;

$C_0, a^*$  – коэффициенты, учитывающие форму профиля при истечении плазмы в вакуум;

$G$  – расход плазмообразующего газа;

$\eta$  – вязкость плазмообразующего газа;

$R$  – универсальная газовая постоянная;

$M_a$  – молярная масса плазмообразующего газа;

$X_i$  – степень ионизации плазмы.

Предполагается, что в активной зоне полого катода можно пренебречь нарушением ионизационного равновесия за счет конвективного переноса атомов и ионов, и объемной рекомбинацией ионов и электронов. В таком случае локальное по сечению канала уравнение ионизационного равновесия в активной зоне полого катода может быть представлено в виде

$$(1 - R) \frac{L_v}{S_p} j_{ik} = eW_e, \quad (8)$$

где  $R$  – коэффициент отражения ионов.

Скорость ионизации, согласно [1], можно представить в виде

$$W_e = \alpha_i \left( \frac{P_g}{kT} \right)^2 \frac{X_i(1 - X_i)}{\left( 1 + X_i \frac{T_e}{T} \right)^2}, \quad (9)$$

где учтено, что в активной зоне полого катода происходят преимущественно ионизационные процессы, и для не слишком плотной плазмы рассматривается фотообмен только с основным состоянием атома.

Плотность ионного тока на катоде определяется из баланса потока ионов на границе плазмы и двойного слоя [2]:

$$j_{ik} = j_{iD} = j_{i\Lambda}, \quad (10)$$

где для ламинарного течения плазмы принято

$$j_{iD} = e \frac{D_a}{2r_k} Nu_D (\langle N_i \rangle - N_{iW}) \quad (11)$$

и согласно Бому

$$j_{i\Lambda} = 0,38 \left( \frac{T_e}{T} \right)^2 e \cdot u_i \cdot N_{iW}; \quad (12)$$

$\langle N_i \rangle$  – концентрация ионов в плазме;

$N_{iW}$  – концентрация ионов на границе плазмы и двойного слоя;

$D_a$  – коэффициент амбиполярной диффузии,

$Nu_D$  – диффузионное число Нуссельта;

$u_i$  – средняя скорость потока ионов.

## 2. Результаты моделирования

В результате решения уравнений (1) – (10) при фиксированных длине и радиусе катода для различных плазмообразующих газов была получены распределения параметров плазмы и катода по длине канала (температуры стенки, давления газа, плотностей токов, степени ионизации плазмы, прикатодного скачка потенциала, температуры электронов, концентраций частиц).

На рис. 1 приведены результаты исследования зависимости степени ионизации плазмы в активной зоне полого катода от температуры электронов для различных плазмообразующих газов.

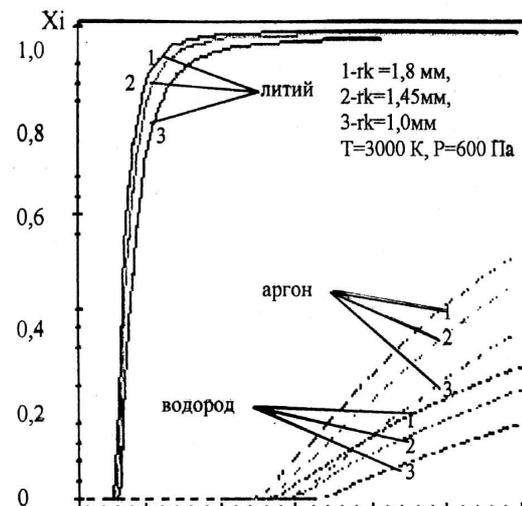


Рис. 1. Зависимость степени ионизации

от температуры электронов

В неравновесном случае ионизация начинается при намного большей температуре, чем в равновесном (формуле Саха.). Кроме этого, при снижении температуры в неравновесном случае степень ионизации не стремится асимптотически к нулю, а претерпевает разрыв первого рода. Используя эту особенность можно определять в самосогласованном решении задачи положение границы активной зоны в полом катоде. Этот эффект универсален для различных газов.

Результаты моделирования распределения температуры стенки катода в частном случае для аргона и танталового катода представлены на рис. 2 в сравнении с результатами натурных экспериментов [3].

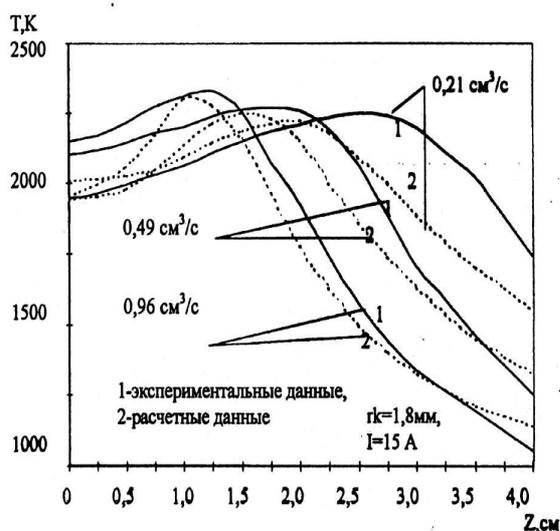


Рис. 2. Распределение температуры стенки полого катода

Следует отметить удовлетворительное согласие экспериментальных данных и данных численного моделирования. Для этих же материала катода и газа приведены расчетные профили давления газа в канале полого катода (рис. 3). Сравнение с экспериментом по давлению рабочего тела возможно лишь на входе и выходе. Для давления характерен резкий рост в области активной зоны за счет электронного давления.

На рис. 4 приведены результаты моделирования течения газа для некоторых других материалов катода при тех же силе тока разряда и расходе плазмообразующего газа.

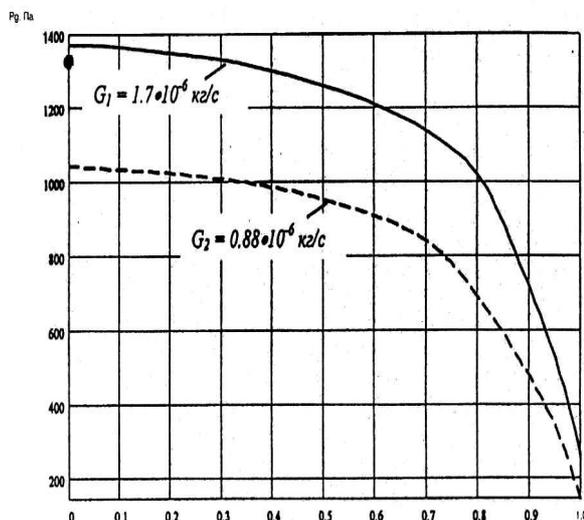


Рис. 3. Распределение давления газа в канале катода: газ – аргон (Ar), материал катода – тантал (Ta), радиус катода  $r_k = 1,8$  мм, длина катода  $L_k = 10$  см, сила тока  $I = 15$  А, • – экспериментальный результат

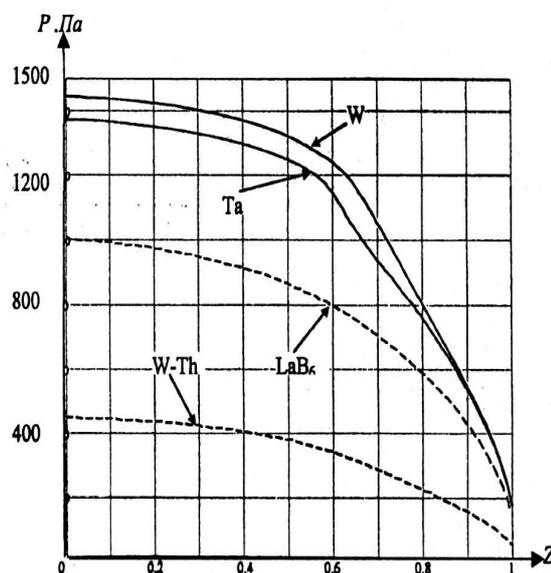


Рис. 4. Распределение давления газа в канале катода для различных катодных материалов. Рабочий газ – аргон (Ar)

### Заключение

Разработана замкнутая математическая модель полого катода в дуговом режиме. Модель позволяет

определять основные локальные и интегральные характеристики полого катода, особенно такой важнейший параметр, как границу активной зоны полого катода.

Значение длины активной зоны вырабатывается автоматически при решении системы уравнений, описывающих состояние плазмы, и согласуется с результатами экспериментов. Следует отметить, что активная зона простирается вглубь полости дальше, чем расположен максимум температуры стенки, положение которого часто принимают за границу активной зоны.

На основании разработанной модели могут быть проведены расчеты параметров рабочих режимов полых катодов, изготовленных из различных материалов: W, Ta, WTh, WLa и т.п. с различными рабочими газами – инертные газы, водород. Возможна настройка модели на металлы в качестве рабочего тела (например, Li – литий). Модель построена таким образом, что возможна проверка различных гипотез об основных процессах, протекающих в плазме активной зоны.

Исходя из всего сказанного, можно рекомендовать разрабатываемую модель для проведения численных экспериментов по проверке различных физических гипотез о влиянии различных факторов на работу катода. Кроме того, возможно численное моделирование процессов, определяющих ресурс катодов.

Дальнейшая отработка модели позволит перейти от классических полых катодов к многоканальным.

В квазиодномерном приближении уравнение теплопроводности может быть представлено в одинаковой форме (1) для большого класса катодов. Это позволяет создать единую программу численных исследований различных катодных систем. Однако, в случае многоканальных катодов следует различать «продольную» и «поперечную» теплопроводность, а также электропроводность и электрическое сопротивление. Причем перечисленные свойства могут быть определены лишь экспериментальным путем. Квазиодномерное приближение является лишь первым приближением в итеративном методе точного решения задачи.

### Литература

1. Зельдович Я.Б., Райзер Ю.П. Физика ударных волн и высокотемпературных гидродинамических явлений. – М.: Наука, 1966. – 686 с.
2. Ваулин Е.П. Некоторые вопросы теории и методика расчета параметров состояния и эрозии полых катодов // Сб. РК техника – Ракетные двигатели и энергетические установки. – Москва, НИИТП. – 1991. – Вып. 3 (31). – С. 108-143.
3. Delcroix J.L., Minoo H., Trindade A.R./ Etablissement d'une regle generale pour une decharge d'arc a cathode creuse // Journal de Physique. – 1968. – Т. 29. – Р. 605-610.

*Поступила в редакцию 9.06.2006*

**Рецензент:** д-р техн. наук, старш. научн. сотр. В. Ким, НИИ ПМЭ, Москва.