

УДК 537.523

DOI 10.18101/2306-2363-2018-4-63-68

## МОДЕЛИРОВАНИЕ ТЕПЛООВОГО СОСТОЯНИЯ КАТОДНЫХ УЗЛОВ СИЛЬНОТОЧНЫХ ПЛАЗМЕННЫХ СИСТЕМ

© **Т. А. Чимытов**

кандидат физико-математических наук, старший преподаватель  
кафедра экспериментальной и теоретической физики,  
Бурятский государственный университет  
E-mail: tchimytov@gmail.com

© **Б. Д. Цыдыпов**

доктор технических наук,  
Институт физического материаловедения СО РАН

Представлены результаты численного моделирования нелинейной тепловой задачи для составных катодных узлов сильноточных плазменных устройств. В двумерной постановке задачи учтены переменность тепло- и электрофизических свойств структурных элементов конструкции, объемные (джоулево тепловыделение) и поверхностные (воздействие плазмы разряда, конвективный и лучистый теплообмен) источники и стоки тепла, что существенно повысило точность расчета температурного поля катода.

**Ключевые слова:** катодный узел, джоулево тепловыделение, конвективный и лучистый теплообмен, математическое моделирование, плазменные устройства, плазма, уравнение теплопроводности

### Введение

Теплофизическое состояние термоэмиссионных катодов определяет работоспособность и ресурс их работы. Теоретический подход к решению тепловой задачи изложен в [1, 2]. В этих работах тепловая задача для термоэмиссионного электрода рассмотрена в постановках наиболее приближенных к реальным условиям. Решено уравнение теплопроводности для системы «вставка — обойма» в целом и показано, что механизм разрушения катода в значительной степени обусловлен неоднородностью тепловых потоков внутри электродного узла. Однако в работах не учтен ряд важных факторов, таких как зависимости теплоэлектрофизических характеристик материалов от температуры, распределения тока и джоулево тепловыделения в объеме электрода, нелинейность граничных условий задачи ввиду излучения и теплообмена с плазмообразующим газом. В работе [3] решена задача о протекании тока в системе двух сопряженных элементов.

В данной работе представлены результаты численного моделирования теплового состояния составного катодного узла с учетом джоулево тепловыделения, конвективного и лучистого теплообмена.

### Постановка задачи

Теоретическое исследование стационарного теплового состояния катодного узла состоит в совместном решении уравнения теплопроводности и уравнения неразрывности тока (уравнения Лапласа) с учетом джоулево нагрева:

$$\frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left[ r \lambda(T) \frac{\partial T}{\partial r} \right] + \frac{\partial}{\partial z} \left[ \lambda(T) \frac{\partial T}{\partial z} \right] + \frac{1}{\rho} \left( \frac{\partial U}{\partial r} \right)^2 + \frac{1}{\rho} \left( \frac{\partial U}{\partial z} \right)^2 = 0,$$

$$\frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left[ \frac{r}{\rho(T)} \frac{\partial U}{\partial r} \right] + \frac{\partial}{\partial z} \left[ \frac{1}{\rho(T)} \frac{\partial U}{\partial z} \right] = 0.$$

Уравнения решаются для системы из двух сопряженных элементов (катода и обоймы). На рис. 1 показана расчетная модель катодного узла. Катодный узел обладает цилиндрической симметрией и состоит из вольфрамовой катодной вставки (I) и медной обоймы (II). В работе расчет проводился для следующей геометрии:

$L_1 = 3$  см,  $L_h = 1$  см,  $L_c = 2$  см,  $R_1 = 0,25$  см,  $L_2 = 1,5$  см,  $R_2 = 1,5$  см.

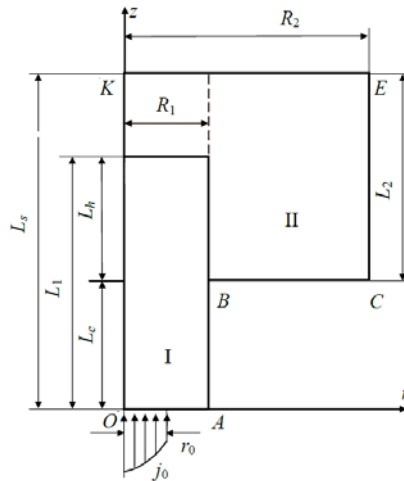


Рис. 1. Модель катодного узла. I — катод, II — обойма.

Дуговой разряд горит в атмосфере аргона при давлении  $P = 10^5$  Па и токовой нагрузке  $I = 300$  А, интегральный тепловой поток  $Q = 340$  Вт, радиус катодного пятна  $r_0 = 0,1$  см.

Граничные условия для уравнения теплопроводности на рабочем торце катода (OA) с учетом конвективных и радиационных составляющих теплообмена с окружающим газом выглядит следующим образом:

$$\lambda_1(T) \frac{\partial T(r,0)}{\partial z} = \begin{cases} \varepsilon_1 \sigma T^4 - q_0, & 0 \leq r \leq r_0 \\ \varepsilon_1 \sigma T^4 + \alpha_g (T - T_g), & r_0 < r \leq R_1 \end{cases}$$

Граничные условия для уравнения неразрывности тока на том же торце принимают следующий вид:

$$\frac{1}{\rho_1(T)} \frac{\partial U(r,0)}{\partial z} = \begin{cases} -\frac{I}{\pi r_0^2}, & 0 \leq r \leq r_0 \\ 0, & r_0 < r \leq R_1 \end{cases}$$

Граничные условия на остальных поверхностях катодного узла представлены в таблице:

Таблица

Граничные условия к уравнениям теплопроводности и неразрывности тока

	Уравнение теплопроводности	Уравнение неразрывности
<i>AB</i>	$\lambda_1(T) \frac{\partial T(R_1, z)}{\partial r} = -\alpha_g (T - T_g) - \varepsilon_1 \sigma T^4$	$\frac{\partial U(R_1, z)}{\partial r} = 0$
<i>BC</i>	$\lambda_2(T) \frac{\partial T(r, L_c)}{\partial z} = \alpha_g (T - T_g)$	$\frac{\partial U(r, L_c)}{\partial z} = 0$
<i>CE</i>	$\lambda_2(T) \frac{\partial T(R_2, z)}{\partial r} = -\alpha_g (T - T_g)$	$U(R_2, z) = 0$
<i>EK</i>	$T(r, L_s) = T_0$	$U(r, L_s) = 0$
<i>KO</i>	$\frac{\partial T(0, z)}{\partial r} = 0$	$\frac{\partial U(0, z)}{\partial r} = 0$

В таблице приняты обозначения:  $\varepsilon_1$  — степень черноты (равный 0,3);  $\lambda_{1,2}(T)$  — коэффициент теплопроводности;  $\rho_{1,2}(T)$  — удельное электросопротивление вольфрама и меди;  $U$  — потенциал электрического поля;  $I$  — разрядный ток (300 А);  $\sigma$  — постоянная Стефана-Больцмана ( $5,67 \cdot 10^{-12}$  Вт/см<sup>2</sup>К<sup>4</sup>);  $\alpha_g$  — коэффициент теплоотдачи газу (3700 Вт/м<sup>2</sup>К);  $T_0$  — начальная температура катода (300 К);  $T_g$  — температура газа (300 К).

### Результаты и их обсуждение

На рис. 2 слева показаны эквипотенциали и линии тока в объеме катодного узла. Моделирование проводилось в среде Comsol Multiphysics. Распределение плотностей тока во вставке неоднородно. Большие градиенты плотности тока локализованы в области катодного пятна. В той части вставки, которая находится в обойме, происходит существенное уменьшение плотности тока, что связано с уходом тока через боковую поверхность электрода. На рис. 2 справа показаны изотермы. В области катодного пятна электрод нагревается до максимальной температуры приблизительно 2890 К. На изотермах, также как и на эквипотенциалах, видны резкие разрывы производных соответствующих величин в области контакта сопряженных элементов, состоящих из разных металлов. В выступающей части вставки изотермы достаточно быстро выравниваются по поперечному сечению, поэтому можно предположить, что для длинных и тонких катодов ( $L_c \gg R_1, r_0 \approx R_1$ ) тепловую задачу можно рассматривать в одномерном приближении.

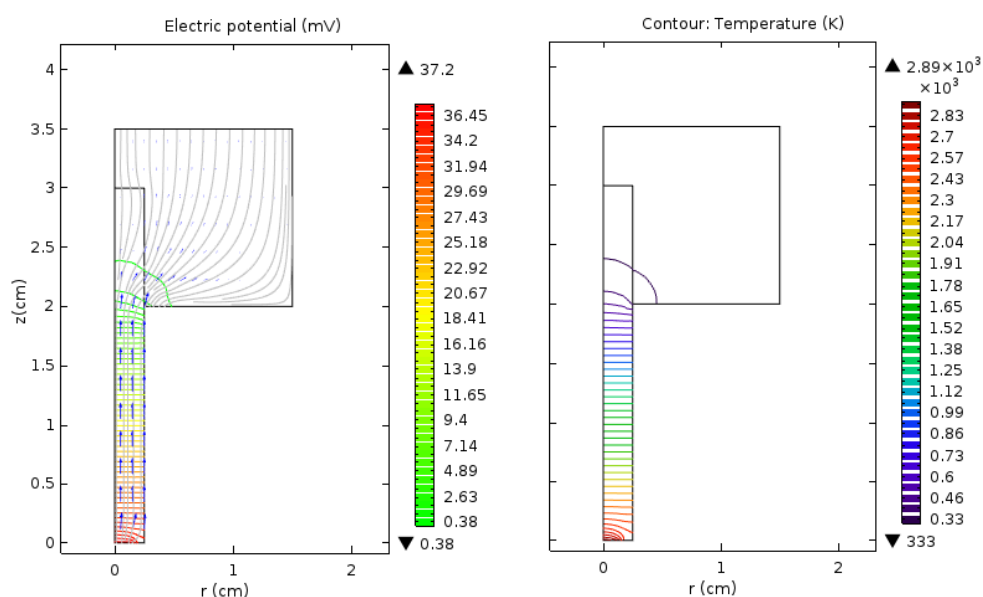


Рис. 2. Эквипотенциалы и линии тока — слева; изотермы — изотермы.

На рис. 3 показаны осевые распределения температур, полученные варьированием коэффициентов  $\rho_1$ ,  $\varepsilon_1$ ,  $\alpha_g$  в уравнениях, указанных при постановке задачи. Распределение температуры на кривой 1 соответствует исходной постановке задачи: с учетом джоулева тепловыделения и теплообмена путем конвекции и излучения. Температурное поле, рассчитанное таким образом, согласуется с экспериментальными данными [4]. Остальные распределения получены при упрощенной постановке задачи. Кривая 2 получена при расчете без учета джоулева тепловыделения ( $\rho_1 = 0$ ), а также без учета тепловых потерь за счет излучения ( $\varepsilon_1 = 0$ ) и конвекции ( $\alpha_g = 0$ ). Видно, что профиль распределения сильно отличается от предыдущего случая. Максимальная температура в области катодного пятна при такой постановке существенно выше — около 3600 К.

Учет по отдельности только джоулева тепловыделения ( $\rho_1 \neq 0$ ,  $\varepsilon_1 = 0$ ,  $\alpha_g = 0$ ; кривая 3), или же конвективного и лучистого теплообменов с поверхности катода ( $\rho_1 = 0$ ,  $\varepsilon_1 \neq 0$ ,  $\alpha_g \neq 0$ ; кривая 4), приводит к еще большим отклонениям в распределении температуры. Так, например, максимальные температуры на кривых 1 и 3 отличаются на  $\sim 1700$  К. Таким образом распределения 3 и 4 наглядно показывают сильное влияние джоулева нагрева и комбинированного теплообмена с поверхностью на тепловое состояние катода. При этом вклад каждого из упомянутых выше факторов в энергобаланс зависит от величины разрядного тока. При токовой нагрузке  $I < 300$  А заметно больше влияния джоулева тепловыделения. При увеличении тока доля джоулева тепловыделения в энергобалансе повышается и при  $I > 500$  А объемный источник тепла преобладает над энергией, рассеиваемой излучением и конвекцией.

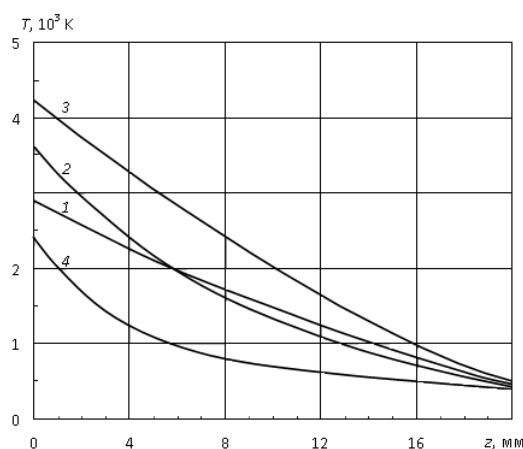


Рис. 3. Распределение температур вдоль оси катодного узла.

### Заключение

Проведено численное моделирование тепловых процессов в катодном узле цилиндрической симметрии. В постановке задачи для катода, как системы двух сопряженных элементов (электродной вставки и обоймы), учтены локальное джоулево тепловыделение, конвективная и лучистая составляющие комбинированного теплообмена, нелинейные зависимости тепло- и электрофизических свойств от температуры. Показано, что пренебрежение джоулевым тепловыделением в энергобалансе катода приводит к большим погрешностям в определении температурного поля катодного узла.

### Литература

1. Жуков М. Ф., Никифоровский В. С. Особенности теплового и механического состояния составных катодов // Экспериментальные исследования плазмотронов. — Новосибирск: Наука, 1977. — С. 292-314
2. Зимин А.М., Козлов Н.П., Хвесюк В.И. О катодных процессах электрических дуг // ЖТФ. — 1973. — Т. 43, Вып. 6. — С. 1248-1254.
3. Цыдыпов Б.Д., Чимытов Т.А. Моделирование электрофизических процессов в сильнотоочных катодных узлах генераторов низкотемпературной плазмы // Вестник ВСГУТУ. — 2018. — № 1. — С. 5-10.
4. Аньшаков А. С., Урбах Э. К., Цыдыпов Б. Д. Оптимизация теплового состояния и ресурса стержневого термокатаода // Теплофизика и аэромеханика. -1995. — Т. 2, № 2. — С. 167-171

SIMULATION OF THERMAL STATE OF CATHODE ASSEMBLIES  
IN HIGH-SPEED PLASMA SYSTEMS

*T. A. Chimytov*

Candidate of Physics and Mathematics, Senior Lecturer  
Department of Experimental and Theoretical Physics  
Buryat State University

*B. D. Tsydyrov*

Doctor of Technical Sciences  
Institute of Physical Materials Science SB RAS

The paper presents the results of numerical simulation of the nonlinear thermal problem for composite cathode assemblies of high-speed plasma devices. The two-dimensional analysis takes into account the variability of heat and electrical properties, the volume (joule heat release) and surface (discharge plasma, convective and radiant heat exchange) sources and heat sinks, which significantly increased the accuracy of temperature measurement of cathode assemblies.

*Keywords:* cathode node, Joule heat generation, convective and radiant heat transfer, mathematical modeling, plasma devices, plasma, heat conduction equation.