ТЕПЛОФИЗИКА ВЫСОКИХ ТЕМПЕРАТУР
Том 17 1979 № 5

УДК 621.325

РАСПРЕДЕЛЕНИЕ ТЕМПЕРАТУРЫ ПО ДЛИНЕ ЭЛЕКТРОДА ДУГОВОЙ ЛАМПЫ

Белоусова Л. Е., Бородин К. С., Гайдуков Е. Н., Леонов Г. С., Щербаков А. А.

Получена система уравнений для определения стационарного распределения температуры по длине электрода. Проведен расчет распределения температуры по длине анода дуговой криптоновой водоохлаждаемой лампы. Рассмотрено влияние геометрии анода на его температурный режим.

Расчет распределения температуры по длине электрода проводился в [1, 2], где электрод представлен в виде полубесконечного [1] или ограниченного [2] цилиндрического стержня. В [3] рассчитан градиент температуры на конце полубесконечного цилиндрического стержня с концом в виде усеченного конуса. В предлагаемой работе решается более общая задача о распределении температуры по длине многозвенного электрода.

Представим электрод в виде системы нескольких стержней произвольной формы. На рабочий торец ($x=0$) первого стержня воздействует стационарный поток тепла плотностью q. Торцевая поверхность последнего, n-го, стержня предполагается теплоизолированной. В местах стыковки первого стержня со вторым, второго с третьим и т. д. температуры и тепловые потоки непрерывны. Температура по сечению каждого стержня, перпендикулярному его оси, считается постоянной. Учитывается джоулев нагрев током I. С боковых поверхностей стержней происходит теплоотдача излучением и конвекцией.

Определение стационарного распределения температуры $T_k(x)$ в k-м стержне системы, состоящей из n стержней, сводится к решению системы уравнений теплопроводности

$$\Phi_k=0, \qquad k=1, 2, \ldots, n, \tag{1}$$

где

$$\Phi_k=\frac{d^2T_k}{dx^2}+\frac{2\operatorname{tg}\varphi_k}{y_k}\frac{dT_k}{dx}-\frac{2[\varepsilon_k\sigma_0(T_k^4-T_0^4)+\alpha_k(T_k-T_0)]}{\varkappa_k y_k\cos\varphi_k}+\frac{\rho_k I^2}{\varkappa_k S_k^2} \tag{2}$$

— для стержня в виде круглого усеченного конуса;

$$\Phi_k=\frac{d^2T_k}{dx^2}-\frac{U_k}{\varkappa_k S_k}[\varepsilon_k\sigma_0(T^4-T_0^4)+\alpha_k(T_k-T_0)]+\frac{\rho_k I^2}{\varkappa_k S_k^2} \tag{3}$$

— для стержня произвольного, но постоянного по длине сечения.

Граничные условия имеют вид

$$-\varkappa_1\frac{dT_1(0)}{dx}=q; \quad T_1(l_1)=T_2(l_1), \quad \varkappa_1 S_1(l_1)\frac{dT_1(l_1)}{dx}=\varkappa_2 S_2(l_1)\frac{dT_2(l_1)}{dx},$$

$$T_{k-1}(l_{k-1})=T_k(l_{k-1}),$$

$$\varkappa_{k-1}S_{k-1}(l_{k-1})\frac{dT_{k-1}(l_{k-1})}{dx}=\varkappa_k S_k(l_{k-1})\frac{dT_k(l_{k-1})}{dx},\quad 2\leqslant k\leqslant n, \tag{4}$$

$$\frac{dT_k(l_k)}{dx}=0.$$

Здесь l_k — расстояние от рабочего торца первого стержня ($x=l_0=0$) до конца k-го стержня; S_k — площадь сечения k-го стержня; $y_k=r_k+(x-l_{k-1})\operatorname{tg}\varphi_k$ — радиус сечения стержня в виде усеченного конуса; r_k — радиус основания усеченного конуса, обращенного к тепловому потоку; φ_k — угол наклона образующей конуса к оси, который берется со знаком плюс, если конус обращен к тепловому потоку меньшим основанием, и со знаком минус, если бо́льшим; U_k — охлаждаемый периметр сечения стержня; $\varkappa_k$, ε_k, α_k, ρ_k — коэффициент теплопроводности, интегральная степень черноты, коэффициент конвективного теплообмена и удельное сопротивление k-го стержня соответственно; σ_0 — постоянная Стефана — Больцмана; T_0 — температура окружающей среды.

Схема анода представлена на рис. 1. Участки *I*, *III* и *II*, *IV* рассматривались соответственно как усеченные конусы и круглые стержни. Следующий за участком *IV* фольговый токоввод *V* (на рис. 1 не показан) рассматривался как полый цилиндрический стержень. Участок анода *IV* обжат кварцевой оболочкой, а токоввод *V* сварен с нею.

При расчете конвективными потерями с боковых поверхностей участков *I*, *II*, *III* пренебрегали по сравнению с лучистыми. Потерями тепла излучением с участков *IV* и *V* пренебрегали по сравнению с конвективными. Коэффициент конвективного теплообмена α_k с обжатого участка анода рассчитывался как эффективный [4]

$$\frac{1}{\alpha_k}=\frac{\delta}{\varkappa_*}+\frac{\Delta}{\varkappa_*'}+\frac{1}{\alpha_*}, \tag{5}$$

где δ — толщина кварцевой стенки; Δ — толщина газовой прослойки* между электродом и кварцем; $\varkappa_*$, $\varkappa_*'$ — соответственно коэффициенты теплопроводности кварца и газа; α_* — коэффициент конвективного теплообмена на наружной поверхности кварцевой стенки. При выводе (5) обжатый участок анода рассматривался как изотермическая поверхность, размеры которой велики по сравнению с толщинами газовой прослойки и кварцевой стенки. В условиях принудительного охлаждения наружной поверхности кварцевой стенки водой считали $\alpha_*=1$ Вт/(см^2·град); $T_0=300$ К. Для $\varkappa_*$ и $\varkappa_*'$ использовались соответственно значения $1{,}7\cdot10^{-2}$ и $3\cdot10^{-4}$ Вт/(см·град). Для анода из торированного вольфрама считалось $\varkappa_1=\ldots=\varkappa_4=1$ Вт/(см·град); $\rho_1=\ldots=\rho_4=5\cdot10^{-5}$ Ом·см; $\varepsilon_1=\varepsilon_2=\varepsilon_3=0{,}3$. При расчете α_k на участке фольгового токоввода использовалось выражение (5) при $\Delta=0$. Для молибденового токоввода использовались значения $\varkappa_5=1{,}3$ Вт/см·град; $\rho_5=1{,}6\cdot10^{-5}$ Ом·см. Длина ввода равнялась 3 см, толщина фольги $5\cdot10^{-3}$ см.

Плотность теплового потока в анод q представлялась в виде $q=jV$, где $j=I/\pi r_1^2$ — плотность тока; V — вольтов эквивалент теплового потока в анод. Расчеты проведены для $I=35$ А, $V=8$ В [5, 6].

Система уравнений теплопроводности с граничными условиями интегрировалась на ЭВМ ЕС-1020 методом Рунге — Кутта. Граничное условие в конце последнего стержня удовлетворялось путем варьирования температуры в начале первого.

---

* Газовая прослойка возникает за счет того, что температура обжатой части анода при работе узла ниже температуры, при которой осуществляется технологическая операция обжатия электрода кварцевым стеклом.

Из решения поставленной задачи получено распределение температуры по длине анода [7] криптоновой кварцевой водоохлаждаемой лампы с фольговыми токовводами, работающей в стационарном режиме.

Результаты расчета температуры по длине анода и экспериментальные данные показаны на рис. 1. Температура измерялась яркостным методом [8] с помощью монохроматора ДМР-4, на входную щель которого фокусировался исследуемый участок электрода или участок тела накала эталонной лампы СИ-8. На выходной щели монохроматора устанавливался ФЭУ-62, сигнал с которого измерялся компенсационным методом с помощью осциллографа С8-11. Момент запуска осциллографа синхронизировался с моментом выключения лампы. Компенсирующий сигнал измерялся цифровым вольтметром Ф-4202. Ошибка в определении температуры не превышала 50°.

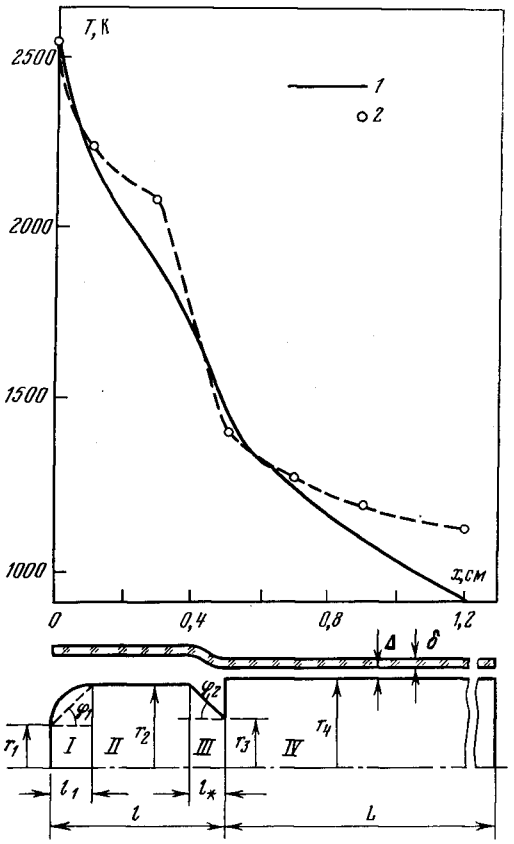

Рис. 1

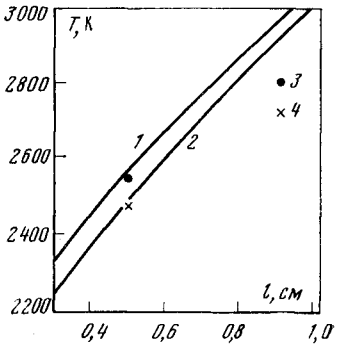

Рис. 2

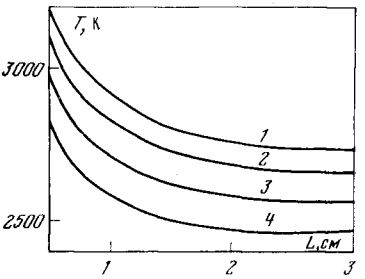

Рис. 3

Рис. 1. Распределение температуры по длине анода (r_1=0,12; r_2=0,24; r_3=0,15; r_4=0,27; l_1=0,12; l_*=0,09; l=0,5; L=1,65; $\delta=7\cdot10^{-2}$; $\Delta=5\cdot10^{-4}$, все размеры в см, $\varphi_1=\varphi_2=\pi/4$): *1* – расчет, *2* – эксперимент

Рис. 2. Зависимость температуры рабочей поверхности анода от длины головки анода: *1*, *2* – расчет; *1* – r_3=0,15 см, $\varphi_2=\pi/4$; *2* – r_3=0,24 см, φ_2=0 (остальные размеры см. на рис. 1); *3*, *4* – экспериментальные данные соответственно для случаев *1*, *2* (l=0,5 см)

Рис. 3. Зависимость температуры рабочей поверхности анода от длины обжатой части анода: *1* – δ=0,1 см; $\Delta=10^{-3}$ см; *2* – 0,1; $5\cdot10^{-4}$; *3* – $5\cdot10^{-2}$; 10^{-3}; *4* – $5\cdot10^{-2}$; $5\cdot10^{-4}$ (остальные размеры см. на рис. 1)

Результаты расчета удовлетворительно согласуются с данными эксперимента. Некоторое отличие связано, вероятно, с погрешностью определе-

ния эффективного коэффициента теплообмена (5), а также с отклонениями расчетной схемы от геометрии реального анода.

Рассматривалось влияние геометрии анода и других конструктивных параметров на температурный режим анодного узла *. Результаты расчета температуры рабочей поверхности анода для $I=35$ А, $V=8$ В представлены на рис. 2, 3. Там же приведены данные эксперимента.

Возрастание длины головки анода l приводит к росту температуры рабочей поверхности анода. Для фиксированного l отсутствие канавки (случай $r_2=r_3$) вызывает понижение температуры рабочей поверхности. Влияние длины обжатой части анода существенно при $L \leqslant L_*$. В рассмотренных условиях $L_* \approx 2$ см. Отметим, что предельная длина фольги, начиная с которой ее увеличение не оказывает влияния на температурный режим электрода, близка к 0,5 см. Уменьшение толщины кварцевой стенки δ и толщины газовой прослойки Δ, приводящее к возрастанию эффективного коэффициента теплообмена, облегчает температурный режим электродного узла.

Результаты работы могут быть использованы при исследовании температурных режимов электродов.

Москва

Поступила в редакцию
27 XI 1978

ЛИТЕРАТУРА

1. *Г. Эрбс.* Светотехника, *8*, 5, 1969.
2. *H. Hugel, G. Krulle.* Beit. Plasma Phys., *9*, 87, 1969.
3. *Е. И. Розовский.* ИФЖ, *28*, 268, 1975.
4. *М. А. Михеев, И. М. Михеева.* Основы теплопередачи. «Энергия», 1973.
5. *А. М. Дороднов, Н. П. Козлов, Н. Н. Решетников.* ТВТ, *13*, 614, 1975.
6. *Р. Е. Ровинский, Ю. М. Никитенко.* Радиотехника и электроника, *5*, вып. 6, 994, 1960.
7. *Г. С. Леонов, Л. Г. Сапрыкин, А. А. Кожевникова, Р. Г. Мананов, В. И. Васильев.* Авт. свид. № 532914. кл. H.01 J 61/06 от 22/II 1976. Бюлл. изобр. № 39, 1976.
8. *Л. Л. Бошняк.* Измерения при теплофизических исследованиях. «Машиностроение», Л., 1974.

* Температура кварца в зоне обжатия, характеризующая надежность анодного узла, оценивалась из решения уравнения теплопроводности для кварцевой трубки. Трубка нагревается через газовую прослойку от расположенного внутри трубки сплошного цилиндра (обжатой части анода) с постоянной по длине температурой, предполагающейся равной температуре анода в начале обжатия. Наружная поверхность трубки охлаждается проточной водой.