

Math-Net.Ru

All Russian mathematical portal

A. M. Zimin, N. P. Kozlov, V. I. Khvesyuk,
A. A. Shcherbakov, Optimization of thermionic
cathode of an arc,
TVT, 1982, Volume 20, Issue 3, 442–446

<https://www.mathnet.ru/eng/tvt6334>

Use of the all-Russian mathematical portal Math-Net.Ru implies that you
have read and agreed to these terms of use

<https://www.mathnet.ru/eng/agreement>

Download details:

IP: 18.97.9.173

April 24, 2025, 05:57:14



УДК 537.52

ОБ ОПТИМИЗАЦИИ ТЕРМОКАТОДА ДУГОВОГО РАЗРЯДА

*Жимин А. М., Козлов Н. П., Хвезюк В. И.,
Щербаков А. А.*

Теоретически исследованы процессы на электродах из легированных тугоплавких металлов. Приведена расчетная система уравнений, описывающих катодные процессы. Проведено исследование влияния геометрии катода, тока и давления разряда на параметры катодных процессов. Выбран комплекс величин, характеризующих работоспособность электрода, проведен анализ влияния геометрических факторов на работоспособность катода. Рекомендованы варианты геометрии электрода с повышенной работоспособностью.

Стойкость катодов из легированных тугоплавких металлов существенно зависит от эффективности подпитки рабочей поверхности электрода активирующей присадкой [1–3]. Динамика этого процесса определяется в основном характером зависимости коэффициента диффузии присадки от температуры и распределением температур в теле электрода.

Температурное поле электрода может быть определено экспериментально либо найдено из решения замкнутой системы уравнений, описывающей катодные процессы (см., например, [4–6]) и включающей в себя уравнение теплопроводности для электродного узла сложной геометрии [7]. Тогда, используя известные соотношения для вычисления коэффициентов диффузии $D(T)$ [8] и решая уравнение диффузии, можно определить время обеднения τ рабочей поверхности электрода активатором и тем самым оценить его ресурс. Время обеднения τ — время, в течение которого прекращается подпитка рабочей поверхности катода активатором из глубоких слоев, лежащих в пределах области протяженностью δ от рабочей поверхности [2]. В данной работе для определения τ использовалось соотношение, полученное в [2] для ступенчатой аппроксимации функции $D(x)$: D_0 для $0 \leq x \leq \delta$ и 0 для $\delta < x$ в предположении нулевой концентрации присадки на поверхности. Найденные параметры катодных процессов могут быть использованы и для определения других характеристик катода, таких, например, как тепловая эрозия материала электрода, тепловой поток, поступающий в электрод, и т. п.

Цель данной работы — исследование влияния геометрии электрода, давления и тока разряда на комплекс величин, характеризующих работоспособность катода. Для расчета параметров катодных процессов использовалась с некоторыми изменениями система уравнений [6]. Скорость тепловой эрозии рассчитывалась по известной формуле Лэнгмюра [9]. В отличие от [6] в данной работе уравнения движения компонентов использовались в диффузионном приближении — инерционными членами пренебрегалось.

Система уравнений. Начало координат поместим на границе ионизационного слоя и слоя пространственного заряда прикатодной области, ось Ox направим к столбу дуги.

В выбранной системе координат уравнение диффузии атомов газа в квазинейтральном ионизационном слое разряда имеет вид

$$\frac{d}{dx} \left(D_a \frac{dn_a}{dx} \right) = -\beta n_e n_a + \alpha n_e^3. \quad (1)$$

Здесь $D_a = l_a v_a / 3$ — коэффициент диффузии; l_a — длина свободного пробега атома; n_a и v_a — концентрация и тепловая скорость атомов; n_e — кон-

центрация заряженных частиц; β и α — скорости ионизации и рекомбинации соответственно [10].

Уравнение неразрывности ионного тока использовалось в виде

$$dj_i/dx = -e\beta n_e n_a + e\alpha n_e^2, \quad (2)$$

(j_i — плотность ионного тока ($j_i(0) = en_i v_i/4$); e — заряд электрона).

Ток эмиссии электронов с поверхности катода определялся по уравнению Ричардсона — Шоттки

$$j_{эм} = AT_n^2 \exp\left(-\frac{e\Phi_{эф}}{kT_n}\right), \quad (3),$$

где A — константа Ричардсона; T_n — температура рабочей поверхности катода; k — постоянная Больцмана; $e\Phi_{эф} = e\Phi - 0,44k\sqrt{E_k}$ — эффективная работа выхода; E_k — напряженность поля на поверхности катода, В/м.

Напряженность поля E_k определялась по формуле Чайдла — Лэнгмюра

$$E_k = 5700(A_r V_k)^{1/2} \sqrt{j_i}, \quad (4)$$

где A_r — атомный вес газа; V_k — катодное падение потенциала.

Состав газа в столбе дуги, необходимый для формулировки граничных условий к (1), определялся из уравнения Саха и уравнения состояния

$$p = kT_e(2n_i + n_a), \quad (5)$$

где p — давление в разряде; T_e — температура частиц всех сортов, не зависящая от координаты.

Уравнение неразрывности полной плотности тока в прикатодной области

$$j = j_i + j_{эм} - j_{еобр} = I/\pi r_0^2 = \text{const}. \quad (6)$$

Здесь j — полная плотность тока; I — ток дуги; r_0 — радиус пятна контакта дуги с электродом; $j_{еобр} = 1/4 \alpha_e n_e v_e \exp(-eV_k/kT_e)$ — «обратный» ток электронов плазмы на катод; α_e — коэффициент аккомодации электронов [11]; v_e — тепловая скорость электронов.

Уравнение баланса энергии в прикатодной области использовалось в виде

$$j_{эм}(V_k + 2kT_n/e) = j_i(V_i + 2kT_e/e) + j_{еобр}(V_k + 2kT_e/e) + 3,2jkT_e/e. \quad (7)$$

Здесь V_i — потенциал ионизации газа.

Тепловой поток на электрод определяется из уравнения баланса энергии на поверхности катода

$$q_0 = j_i \left(V_k + V_i - \Phi_{эф} + \frac{2kT_e}{e} \right) + j_{еобр} \left(\frac{2kT_e}{e} + \Phi_{эф} \right) - j_{эм} \left(\Phi_{эф} + \frac{2kT_n}{e} \right). \quad (8)$$

Для определения распределения температуры в многостержневом электроде в одномерном приближении использовалась система уравнений, приведенная в [7]

$$\Phi_k = \frac{d^2 T_k}{dx^2} + \frac{2 \operatorname{tg} \theta_k}{y_k} \frac{d T_k}{dx} - \frac{2[\epsilon_k \sigma_0 (T_k^4 - T_0^4) + \alpha_k (T_k - T_0)]}{\lambda_k y_k \cos \theta_k} + \frac{\rho_k I^2}{\lambda_k S_k^2} \quad (9)$$

для стержня в виде круглого усеченного конуса и

$$\Phi_k = \frac{d^2 T_k}{dx^2} - \frac{U_k}{\lambda_k S_k} [\epsilon_k \sigma_0 (T_k^4 - T_0^4) + \alpha_k (T_k - T_0)] + \frac{I^2}{\lambda_k S_k^2} \quad (11)$$

для стержня произвольного, но постоянного по длине сечения. Здесь n — число стержней в электроде; $T_k(x)$ — распределение температуры в k -м стержне; S_k — площадь сечения k -го стержня; $y_k = r_k + (x - l_{k-1}) \operatorname{tg} \theta_k$ — радиус стержня в виде усеченного конуса; r_k — радиус основания усеченного конуса, обращенного к тепловому потоку; θ_k —

угол наклона образующей к оси; l_k — расстояние от рабочего торца первого стержня ($x=l_0=0$) до конца k -го стержня; U_k — охлаждаемый периметр сечения стержня; λ_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.

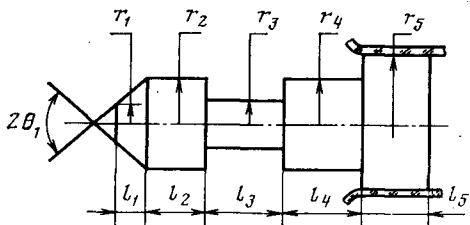


Рис. 1

Рис. 1. Геометрия катода исследуемого источника света

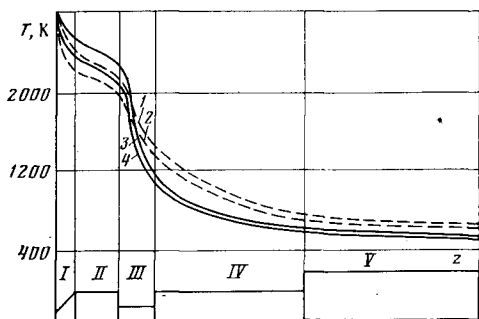


Рис. 2

Рис. 2. Температурные поля электродов для вариантов № 1 (1, 2) и № 5 (3, 4). Ток разряда — 50 А (1, 3) и 35 А (2, 4). Внизу — профиль электрода

С помощью найденных из решения системы (9)–(11) значений температурного «фона» рабочей поверхности катода $T_1(0)$ по формуле [4]

$$T_{\text{п}} = T_1(0) + \frac{\pi q_0 r_0}{4 \lambda_1} \left(1 - \frac{r_0^2}{r_1^2} \right) \quad (12)$$

рассчитывалась температура рабочей поверхности катода в зоне контакта с дугой.

В качестве объекта исследований был выбран дуговой источник высокоинтенсивного света с криптоновым наполнением [12, 13]. Исходные данные для расчетов: ток разряда I ; рабочее давление в источнике p ; свойства газа, заполняющего разрядный промежуток; свойства материала электрода; конфигурация и геометрические размеры катода и условия его охлаждения. В результате расчетов определялись следующие характеристики катодных процессов: поле температур катода $T_{\text{к}}(x)$, полная плотность тока j и ее составляющие, катодное падение потенциала $V_{\text{к}}$, электронная температура T_e , удельный и интегральный тепловые потоки через рабочую поверхность катода, радиус привязки разряда к электроду r_0 , температура поверхности катода в зоне привязки $T_{\text{п}}$.

В базовом варианте использовался электрод, геометрия которого приведена на рис. 1. Его размеры: $\theta_1=45^\circ$; $r_1=0,55$; $r_2=1,5$; $r_3=0,75$; $r_4=1,5$;

Таблица 1

Характеристики катода для тока 35 А

Номер варианта	p , МПа	$T_{\text{п}}$, К	$j \cdot 10^{-8}$, А / м ²	$j_{\text{эм}} \cdot 10^{-8}$, А / м ²	$j_i \cdot 10^{-7}$, А / м ²	$V_{\text{к}}$, В	T_e , эВ	$q_0 \cdot 10^{-8}$, Вт / м ²	$r_{\text{п}} \cdot 10$, мм
1	2,5	3400	3,76	3,30	7,50	8,92	1,33	7,70	1,72
2	2,5	3370	3,95	3,54	7,54	8,67	1,33	7,08	1,68
3	2,5	3340	3,63	3,12	7,54	9,17	1,33	8,34	1,75
4	2,5	3330	3,68	3,18	7,50	9,05	1,32	8,02	1,74
5	2,5	3450	4,06	3,69	7,59	8,55	1,33	6,79	1,66
6	2,5	3410	3,91	3,49	7,56	8,74	1,33	7,27	1,69
7	2,5	3410	4,06	3,69	7,59	8,55	1,33	6,79	1,66
8	2,5	3350	3,83	3,39	7,51	8,80	1,32	7,40	1,71
9	2,5	3400	3,70	3,20	7,56	9,05	1,33	8,03	1,74
10	2,0	3350	3,02	2,62	6,09	8,94	1,31	6,36	1,92
11	3,0	3440	4,59	4,06	9,05	8,91	1,34	9,11	1,56

Таблица 2

Номер варианта	$T_{кв}, K$	$Q_{эp} \cdot 10^3, г/с$	$Q_{пот}, Вт$	$\tau, ч$
1	710	4,06	71,6	215,4
2	877	2,56	62,8	145,4
3	777	2,20	80,3	477,7
4	752	2,00	76,3	484,9
5	596	3,91	58,4	273,0
6	677	2,93	62,5	71,3
7	633	2,76	53,7	35,2
8	689	2,26	67,6	392,5
9	740	3,54	76,0	332,2
10	718	2,88	73,8	220,5
11	702	3,78	69,5	458,3

Таблица 3

Номер варианта	$T_{кв}, K$			$Q_{эp} \cdot 10^{-3}, г/с$			$Q_{пот}, Вт$			$\tau, ч$		
	$I=25A$	45A	50A	25	45	50	25	45	50	25	45	50
1	699	747	751	0,82	5,13	5,92	69,9	80,3	80,4	450,0	79,0	75,4
5	574	612	618	0,72	5,83	6,14	52,9	61,4	62,0	849,5	152,6	132,7
8	670	716	724	0,88	5,28	6,89	64,0	73,3	74,6	840,2	142,5	112,6

$r_3=2,8; l_1=0,95; l_2=2,25; l_3=1,8; l_4=7,5; l_5=9$ (r, l — в мм). Материал электрода — торированный вольфрам, газ — криптон, давление — 2,5 МПа, ток — 35 А.

Результаты расчетов для тока 35 А приведены в табл. 1. Варианты № 1, 10, 11 соответствуют базовой геометрии катода. Для последующих вариантов ниже указаны только отличия от базового варианта (остальные геометрические размеры те же). Вариант № 2 — $\theta_1=30^\circ, r_2=1,1$ мм; № 3 — $r_3=0,9 r_2$; № 4 — $r_3=0,7 r_2$; № 5 — $r_3=0,5$ мм; № 6 — $r_2=1$; № 7 — $r_2=0,75$; № 8 — $l_2=1,8, l_3=2,25$; № 9 — $l_2=3; l_3=1,05$.

В табл. 2 приведены основные расчетные характеристики работоспособности катода для перечисленных вариантов: $T_{кв}$ — температура электрода в точке контакта с кварцевой стенкой (рис. 1); $Q_{эp}$ — эрозия материала электрода за время обеднения τ его поверхности присадкой; $Q_{пот}$ — тепловой поток в электрод. Табл. 3 содержит те же характеристики для токов 25,45 и 50 А.

Таким образом, из приведенных результатов следует, что, несмотря на относительно малые интервалы варьирования геометрических характеристик электродов, ряд исследуемых параметров меняется достаточно сильно. Так, при одном и том же токе 35 А и рабочем давлении 2,5 МПа тепловые потоки изменяются в интервале 58,4—80,3 Вт (в $\sim 1,5$ раза), максимальные температуры в месте обжатия — в интервале 596—777 К (в $\sim 1,3$ раза), время обеднения присадкой — от 35,2 до 484,9 ч¹ (более чем на порядок).

Получены следующие основные закономерности изменения характеристик катодных процессов.

1. Температура в зоне привязки разряда к электроду меняется довольно слабо для различных вариантов геометрии.

2. Ухудшение теплоотвода от рабочей поверхности катода (уменьшение диаметров стержней, увеличение их длины) приводит к уменьшению

¹ Следует отметить, что по мере обеднения присадкой приповерхностной зоны электрода, примыкающей к рабочей поверхности, возрастает работа выхода электронов из катода (в данной постановке не учитывалось). Это вызывает соответствующее изменение характеристик катодных процессов (повышение температуры рабочей поверхности, увеличение катодного падения потенциала, теплового потока в электрод и т. п.), в результате чего изменяются температурное поле катода и диффузионный поток частиц присадки из катода. Вследствие этого ресурс работы катода, т. е. время до достижения температуры плавления на рабочей поверхности, будет меньше указанных в таблице величин. Поэтому приведенные здесь значения τ скорее отражают качественное влияние геометрии катода и условий разряда на работоспособность.

тепловых потерь в электрод и, соответственно, к снижению уровня температур «дальних» от разряда частей стержней.

3. Такие величины, как катодное падение потенциала, плотность ионного тока, плотность тока, довольно слабо зависят от геометрических характеристик электрода.

4. С увеличением давления плотность тока на катоде и плотность ионного тока возрастают, потери в электрод уменьшаются.

5. С ростом тока катодное падение потенциала уменьшается, плотность тока и интегральный тепловой поток увеличиваются, удельный тепловой поток уменьшается.

Полученные расчетные данные позволяют рекомендовать варианты геометрии электрода с увеличенным временем обеднения присадкой — основным фактором, влияющим на работоспособность электрода в данных условиях. Так, например, из табл. 2 следует, что с этой точки зрения лучшими являются варианты № 3, 4, 8. Они обеспечивают также существенное снижение температуры электрода в месте обжатия (и соответствующее уменьшение температурных напряжений), заметное снижение тепловых потерь в электрод и эрозии электрода, а также увеличение времени обеднения присадкой, т. е. улучшают все характеристики работоспособности электрода.

Расчет характеристик для варианта № 5 в диапазоне рабочих токов 25—50 А показал, что все они (за исключением незначительного увеличения эрозии на больших токах) в таком диапазоне токов значительно превосходят те же величины для случая базовой геометрии. Сравнение температурных полей для варианта № 5 и базового электрода при токах 35 и 50 А приведено на рис. 2.

Отметим, что аналогичным образом может быть проведено исследование работоспособности электродов и других плазменных систем.

Московское высшее техническое
училище имени Н. Э. Баумана

Поступила в редакцию
2.IV.1981

ЛИТЕРАТУРА

1. Амосов В. М., Карелин Б. А., Кубышкин В. В. Электродные материалы на основе легированных тугоплавких металлов. М.: Металлургия, 1976, 283 с.
2. Белоусова Л. Е. Влияние температуры вольфрамового электрода на время обеднения активатором.— ЖТФ, 1980, т. 50, № 4, с. 792.
3. Зимин А. М., Козлов Н. П. и др. Динамика эрозии активированного катода.— ФХОМ, 1980, № 4, с. 16.
4. Нейман В. Приэлектродные процессы в газовом разряде высокого давления.— В кн.: Экспериментальные исследования плазмотронов. Новосибирск: Наука, 1977, с. 253.
5. Мойжес Б. Я., Немчинский В. А. К теории дуги высокого давления на тугоплавком катоде. I.— ЖТФ, 1972, т. 42, № 5, с. 1001; К теории дуги высокого давления на тугоплавком катоде. II.— ЖТФ, 1973, т. 43, № 11, с. 2309; К теории цилиндрического катода в дуге высокого давления.— ЖТФ, 1975, т. 45, № 6, с. 1212.
6. Зимин А. М., Козлов Н. П., Хвасюк В. И. К расчету термоэмиссионного катода.— Изв. СО АН СССР. Сер. техн. наук. Вып. 2. 1979, № 8, с. 17.
7. Белоусова Л. Е., Бородин К. С., Гайдуков Е. Н. и др. Распределение температуры по длине электрода дуговой лампы.— ТВТ, 1979, т. 17, № 5, с. 1082.
8. Таблицы физических величин / Под ред. И. К. Кикоина; М.: Атомиздат, 1976, 1008 с.
9. Фесенко В. В., Болгар А. С. Испарение тугоплавких соединений. М.: Металлургия, 1966, 326 с.
10. Меликов И. В., Морозов А. И. Динамика ионов в компенсированных ионных пучках с учетом ионизации и выгорания нейтралов.— Физика плазмы, 1977, т. 3, № 2, с. 388.
11. Добрецов Л. Н., Гомоюнова М. В. Эмиссионная электроника. М.: Наука, 1966, 564 с.
12. Леонов Г. С., Мананов Р. Г. Электропроводность дугового разряда высокого давления в криптоне и ксеноне.— ТВТ, 1979, т. 17, № 2, с. 217.
13. Леонов Г. С., Сапрыкин Л. Г. и др. Авт. свид. № 532914. Анодный узел дуговой кварцевой лампы высокого и сверхвысокого давления с водяным охлаждением.— Бюл. изобр., 1976, № 39.