

## ТЕПЛООБМЕН НА КАТОДАХ ДУГОВЫХ РАЗРЯДОВ. ПРИКАТОДНОЕ ПАДЕНИЕ ПОТЕНЦИАЛА

Х.Ц. Заятуев

ЗАО «Отраслевой Центр плазменно-энергетических технологий  
РАО «ЕЭС России», 671160, Россия, Республика Бурятия,  
г. Гусиноозерск, ул. Пушкина, 33, тел./факс 8-(30145)-92-6-49,  
E-mail: plazma@burnet.ru

Одной из важнейших, наряду с плотностью тока, характеристик работы катодов в дуговых разрядах является результирующая плотность теплового потока, поступающая на активную часть поверхности (опорное пятно) электрода из плазмы. Ее роль заключается в поддержании температурного режима работы электрода на уровне, необходимом для обеспечения непрерывности тока между катодом и плазмой.

Исследование процессов теплопереноса со стороны плазмы дугового разряда в тело электрода через опорное пятно имеет определяющее значение как для понимания приэлектродных процессов, так и механизма эрозии материала электрода. К сожалению, современное состояние теории экспериментальных и теоретических знаний приэлектродных процессов не позволяет с необходимой степенью точности провести балансировку процессов токо- и теплопереноса на катод.

Очевидно, что такое состояние проблемы изучения приэлектродных процессов в какой-то степени обусловлено разными условиями проведения опытов и, как следствие этого, достаточно большим разбросом в результатах измерений основных характеристик работы катодов.

Следует также отметить, что попытки проведения теоретических исследований с использованием системы уравнений, описывающих прикатодные процессы, где неизвестными параметрами являются почти все определяющие характеристики работы катода, такие, как плотности токов эмиссии электронов из металла  $j_{ек}^{эм}$  и ионов из плазмы  $j_{ик}$ , полная плотность тока  $j_k$  и плотности тепловых потоков  $q_k$  на катоде, радиус пятна  $R_p$ , напряженность электрического поля перед катодом  $E_k$ , прикатодное падение потенциала  $U_k$ , работа выхода электронов из металла с учетом эффекта Шоттки  $\theta$  и температура катода под пятном  $T_k$ , а известными данными являются ток дуги  $I_d$ , материал и геометрия электрода, род и давление плазмообразующего газа и работа выхода электронов  $e\phi$  [1-2], на наш взгляд, не могут претендовать на достоверность полученных результатов. Причинами этого могут быть следующие обстоятельства:

а) нет полной ясности в понимании механизмов эмиссии электронов из катода в дуговую плазму (яркий пример этому – явление «аномальной» эмиссии на термоэмиссионных катодах [3]);

б) в систему уравнений не входят такие параметры приэлектродной плазмы вблизи электрода, как температура и концентрация заряженных частиц, от значений которых зависят плотности тока электронов и ионов из плазмы на электрод. В свою очередь, значения этих параметров зависят от тока дуги и давления газа [4-6];

в) существует опасность, что при решении системы уравнений со многими неизвестными, подбором коэффициентов в уравнениях и произвольным выбором неопределенных параметров можно свести практически любой баланс.

Поэтому целью настоящей работы является исследование теплового режима работы электродов, при которых количество неизвестных сводится к минимуму. Исходными данными при этом должны быть параметры, значения которых измеряются с достаточной точностью. К этим параметрам относятся температуры и концентрации заряженных частиц плазмы столба дуги – электронов и ионов ( $T_e$ ,  $T_i$ ,  $n_e$  и  $n_i$ ) и температура катода –  $T_k$ . Так как температуры катода и заряженных частиц плазмы зависят от тока дуги, рода и давления газа в камере, материала и геометрии электродов [1, 5, 6], то для

любых конкретных условий проведения опытов можно получить данные по плотностям тока, доле ионного тока, прикатодному падению потенциалов, плотностям тепловых потоков и т.п. в зависимости, например, от тока дуги. Исследования баланса энергии на электродах дуговых разрядов в рамках вышеприведенных требований проведем на основе полученных в [7] выражений для таких определяющих характеристик работы электродов, как эффективная работа выхода  $e\phi_3$  и плотность тока эмиссии электронов  $j_e^{эм}$  на границе металл-плазма, результирующая плотность тока и доля ионного тока на катоде  $j_k$  и  $S_i$ . Независимыми в этих выражениях являются  $T_e$ ,  $T_i$ ,  $n_e$ ,  $n_i$  и  $T_k$ , причем, первые четыре параметра относятся к невозмущенной электродами плазме, т.е. к плазме за пределами области, где формируются прикатодное падение потенциала. Значения этих параметров можно получить из экспериментов.

В качестве примера рассмотрим упрощенное уравнение баланса энергии на катоде, где подводимое тепло отводится теплопроводностью [4-6]

$$\frac{\lambda}{\delta}(T_k - T_ж) = j_k [S_i (U_k + U_i - \phi_3)] - (1 - S_i) \cdot \left( \phi_3 + \frac{2kT_k}{e} \right), \quad (1)$$

где  $\lambda$ ,  $T_k$ ,  $\delta$  – коэффициент теплопроводности, температура материала катода и его толщина;  $j_k$  и  $S_i$  – полная плотность тока и доля ионного тока на катоде;  $U_k$  – прикатодное падение потенциала;  $U_i$  – потенциал ионизации;  $\phi_3$  – потенциал, соответствующий работе выхода электронов из металла в плазму.

Решениями этого уравнения и, соответственно, рабочими точками катода, являются точки пересечения кривых

$$q_{отв}(T_k) = \frac{\lambda}{\delta}(T_k - T_ж) \text{ и}$$

$$q_{под}(T_k) = j_k [S_i (U_k + U_i - \phi_3)] - (1 - S_i) \cdot \left( \phi_3 + \frac{2kT_k}{e} \right)$$

в системе координат  $q-T_k$ .

На рис. 1 приведены зависимости  $q_{под}(T_k)$  для аргоновой плазмы атмосферного давления и  $q_{отв}(T_k)$  для вольфрамового плоского катода толщиной  $10^{-2}$  м.

Кривые, приведенные на этом рисунке, позволяют привести анализ устойчивости горения дуги на электродах, т.е. ответить на вопрос – почему температура электродов в дуговых разрядах остается неизменной при постоянных параметрах работы дуги. Для проведения такого анализа используем метод, применяемый для анализа устойчивости системы электрическая дуга – источник питания. Суть этого метода заключается в определении условий, при которых малые возмущения тока или напряжения, наложенные на дугу в рабочей точке, с течением времени затухают [8]. Применительно к анализу устойчивости горения дуги на электрод аналогами напряжения и тока являются плотность теплового потока на электрод и его температура. Действительно, из рассмотрения рабочей точки «А» (рис. 1) следует, что любое малое изменение температуры катода или плотности теплового потока, со временем затухает.

Например, предположим, что под действием какого-либо внешнего фактора температура катода уменьшилась на некоторую малую величину. Это изменение, как видно из рисунка, сопровождается увеличением плотности теплового потока на катод, под действием которого температура электрода поднимается до рабочего уровня. Т.е., для данной системы выполняется критерий устойчивости типа Кауффмана [8] –

$$\frac{dq_{отв}(T_k)}{dT_k} - \frac{dq_{под}(T_k)}{dT_k} > 0. \quad (2)$$

В уравнении (1) неопределенным параметром является прикатодное падение потенциала  $U_k$ . Разрешая это уравнение относительно  $U_k$ , получим выражение для прикатодного падения потенциала

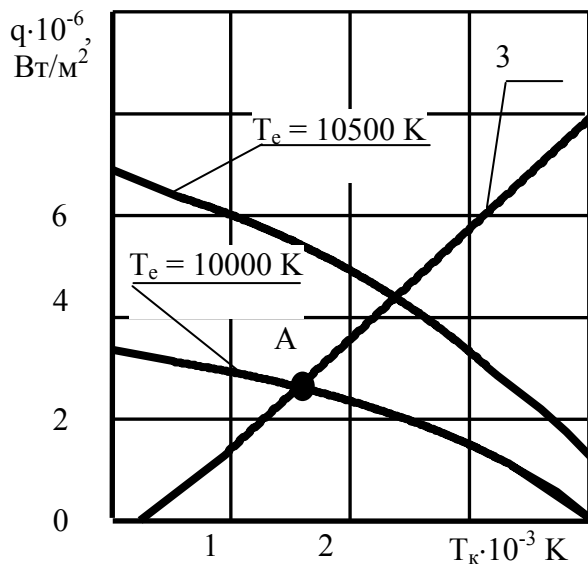
$$U_k = U_3^i + \frac{\varphi + \frac{2kT_k}{e}}{S_i} - \left( U_i - \frac{2kT_k}{e} \right), \quad (3)$$

где  $U_3^i = \frac{q_k}{j_{it}} = \frac{\lambda}{j_{it}} \frac{T_k - T_{ж}}{\delta}$  – вольтов эквивалент теплового потока, соответствующий

плотности тока ионов. Для других механизмов отвода тепла от катода выражение для  $U_3^i$  будет, соответственно, другое. Например, при радиационном механизме теплоотвода  $U_3^i = \varepsilon \sigma (T_k^4 - T_{ж}^4) / j_{it}$ ,  $\varepsilon$  – коэффициент излучательной способности материала катода,  $\sigma$  – постоянная Стефана-Больцмана.

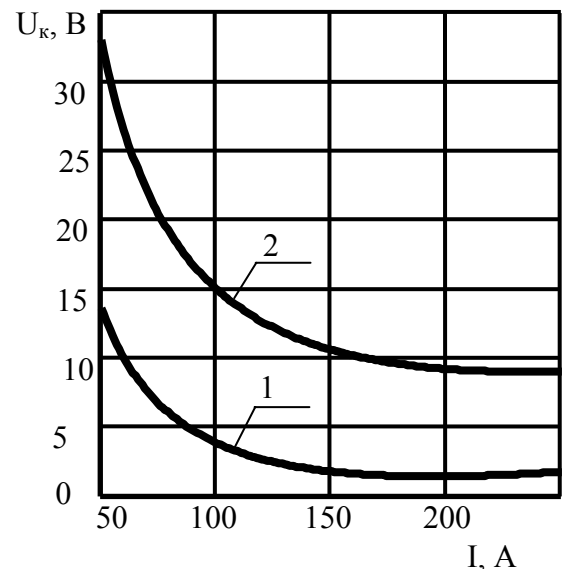
Таким образом, все члены в правой части выражения (3) имеют вполне определенные зависимости от температур плазмы и катода [7], что дает возможность получить расчетные зависимости величины прикатодного падения потенциала от тока дуги. Для этих целей воспользуемся данными по зависимостям температур катода и плазмы от тока дуги, приведенными в [1, 5, 6]. Здесь следует отметить, что несмотря на разные условия проведения опытов, температура катода увеличивается линейно, а температура плазмы – по логарифмическому закону с ростом тока дуги.

Интерполируя зависимости температуры катода от тока линейной функции  $T_k = a + bI$ , а температуры плазмы – логарифмической  $T_e = c + d \cdot \lg I$ , проведем расчет  $U_k = f(I)$  для аргоновой плазмы атмосферного давления. На рис. 2 приведены результаты расчета  $U_k = f(I)$  по формуле (3) от тока дуги. Из рисунка видно, что величина прикатодного падения потенциала имеет сильную зависимость от коэффициентов  $a, b, c, d$ , а характер изменения  $U_k$  от  $I$  имеет хорошее качественное согласие с экспериментальными данными [5-6].



**Рис. 1.** Зависимости плотностей тепловых потоков от температуры катода.

1 и 2 – плотности теплового потока из плазмы на катод –  $q_{под}$ ; 3 – плотности теплового потока, отводимые с катода –  $q_{отв}$ ;  
 $U_k = 10$  В.



**Рис. 2.** Расчетные зависимости прикатодного падения потенциала от тока.

$$T_k = 1750 + 5 \cdot I.$$

$$1 - T_e = 5370 + 2430 \cdot \lg(I);$$

$$2 - T_e = 5360 + 2140 \cdot \lg(I).$$

## ЛИТЕРАТУРА

1. Грановский В.Л. *Электрический ток в газе. Установившийся ток.* – М.: Наука. – 1973. – 544 с.
2. Нейман В. *Приэлектродные процессы в газовом разряде высокого давления // Экспериментальные исследования плазмотронов.* – Новосибирск: Наука. – 1977. – С. 253-292.
3. Поротников А.А., Петросов В.А., Острецов И.Н. *Приэлектродные процессы.* // В кн.: *Физика и применение плазменных ускорителей.* Минск: Наука и техника. – 1974. – С. 239-260.
4. Кесаев И.Г. *Катодные процессы электрической дуги.* – М.: Наука, 1968. – 244 с.
5. Жуков М.Ф., Козлов Н.П., Пустогаров А.В. и др. *Приэлектродные процессы в дуговых разрядах.* – Новосибирск: Наука. – 1982. – 158 с.
6. Гордеев В.Ф., Пустогаров А.В. *Термоэмиссионные дуговые катоды.* – М.: Энергоатомиздат, 1988. – 192 с.
7. Заятуев Х.Ц. *Равновесная и результирующая плотности тока на катодах дуговых разрядов.* В настоящем сборнике.
8. Жуков М.Ф., Коротеев А.С., Урюков Б.А. *Прикладная динамика термической плазмы.* – Новосибирск: Наука. – 1975. – 300 с.