

*В.И.Милых, д-р техн. наук, Т.П. Павленко, канд. техн. наук.  
(Украина, Харьков, НТУ «Харьковский политехнический институт»)*

## **БАЛАНС ЭНЕРГИИ НА ПОВЕРХНОСТИ КАТОДА КОНТАКТОВ ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ АППАРАТОВ С УЧЕТОМ ЯВЛЕНИЯ ТЕРМОЭМИССИИ**

**Введение.** Процессы, происходящие на рабочей поверхности контактов электрических аппаратов, очень сложны и взаимосвязаны между собой [1,2].

В последнее время при теоретических и экспериментальных исследованиях составов композиций электрических контактов преобладает комплексный подход, заключающийся в совместном рассмотрении процессов в прикатодной области, на поверхности и в теле композиции самого катода электрического контакта. Основной проблемой при исследовании состава композиции электрического контакта является эрозия катода, которая определяется совокупностью катодных процессов как внутри, так и на поверхности катода электрического контакта. Разрушение рабочей поверхности электрического контакта происходит из-за недостаточной механической прочности, химического взаимодействия компонентов композиции электрического контакта между собой и с окружающей средой, а также обильного газовыделения и распыления компонентов композиции электрических контактов под действием температуры, бомбардировки ионов и т.п.

Цель работы – составить баланс энергии распределения частиц по поверхности катода электрических контактов и определить основные параметры составляющих баланса энергии.

**Анализ результатов исследований.** Картина явлений в прикатодной области дугового разряда с термоэмиссионным катодом электрических контактов может быть представлена на основе ряда моделей, которые основаны на различных приближительных расчетах катодных процессов, происходящих на поверхности электрических контактов. Предлагаемая модель не является исключением, так как в ней тоже рассматриваются оценочные расчеты энергий, участвующие в термоэмиссионном процессе, с помощью которых и составляется баланс энергии контактной системы электрических аппаратов [3–4].

Нагрев катода электрического контакта, в основном, осуществляется за счет потока ионов, которые, ускоряясь в зоне прикатодной области, бомбардируют поверхность катода электрического контакта. Плотность тока эмиссии электронов зависит от уровня температуры и напряженности электрического поля, что и определяет эмиссионное охлаждение катода электрического контакта. В то же время эмитируемые электроны участвуют в образовании ионов пространственного заряда электрической дуги, определяющих поток ионов и напряженность электрического поля. Для оценки баланса энергии необходимо знать условия на поверхности привязки разряда и в зоне пространственного заряда электрической дуги, которые зависят от многих факторов: компонентов

композиции электрических контактов, геометрии и условий охлаждения поверхности катода, уровня тока, рода и давления газа и др.

Рассмотрим составляющие баланса энергии на поверхности катода электрического контакта.

Энергия, поступающая за счет ионов:

$$q_i = j_i \left[ a_i \left( U_k + \frac{2kT_i}{e} \right) + a_H (E_i - j_{\text{эф}}) \right],$$

где  $j_i$ ,  $T_i$  – плотность тока и температура ионов;  $a_i$  – коэффициент аккомодации ионов (доля энергии без энергии ионизации, переданная катоду электрического контакта);  $U_k$  – катодное падение потенциала;  $kT_i$  – энергия, передаваемая ионам на границе катодного падения потенциалов;  $e$  – заряд электрона;  $a_H$  – коэффициент, учитывающий нейтрализацию ионов;  $E_i$  – потенциал ионизации;  $j_{\text{эф}}$  – эффективная работа выхода электронов с поверхности катода электрического контакта.

Энергия, приносимая обратными электронами с помощью потоков плазмы:

$$q_{e\text{обр}} = j_{e\text{обр}} a_e \left( \frac{2kT_e}{e} + j_{\text{эф}} \right),$$

где  $j_{e\text{обр}} = \frac{en_e}{4} \langle n_e \rangle \exp(-eU_k/kT_e)$  – плотность тока обратных электронов;  $a_e$  – коэффициент аккомодации электронов;  $n_e$  – концентрация электронов;  $\langle n_e \rangle = \sqrt{8kT_e/p m_e}$  – тепловая скорость электронов;  $m_e$  – масса электрона;  $kT_e$  – энергия, передаваемая электронам на границе катодного падения потенциала.

Энергия, приносимая потоком нейтральных атомов:

$$q_a = \frac{n_a}{4} \langle n_a \rangle M c_n (T_a - T_k) a_a,$$

где  $n_a$ ,  $\langle n_a \rangle$ ,  $M$ ,  $c_n$ ,  $T_a$  – концентрация, тепловая скорость, масса, удельная теплоемкость, температура нейтральных атомов;  $T_k$  – температура катода электрического контакта;  $a_a$  – коэффициент аккомодации нейтральных атомов.

Подвод энергии за счет излучения плазмы:

$$q_{R_{\text{пл}}} = \frac{\epsilon_{\text{пл}}}{2} \left( l + r - \sqrt{l^2 + r^2} \right),$$

где  $\epsilon_{\text{пл}}$  – объемный коэффициент изотропного излучения плазмы, который зависит от давления, температуры плазмы;  $l$ ,  $r$  – длина и радиус столба дуги.

Энергия, уносимая электронами эмиссии (эмиссионное охлаждение):

$$q_{\text{э}} = j_{e\text{эм}} \left( \frac{2kT_k}{e} + j_{\text{эф}} \right),$$

где  $j_{e\text{эм}}$  – плотность тока электронов за счет процесса эмиссии.

Энергия теплового излучения с поверхности катода

$$q_{ek} = \epsilon s_o T_k^4,$$

где  $s_o$  – постоянная Стефана–Больцмана;  $\epsilon$  – интегральный коэффициент теплового излучения поверхности катода, зависящий от рода материала, состояния поверхности, уровня температуры.

Энергия, отводимая за счет теплопроводности в тело катода композиции электрического контакта:

$$q_l = l (dT_k / dz),$$

где  $l$  – теплопроводность катода электрического контакта;  $z$  – площадь проплавления тела композиции электрического контакта.

Энергия, затрачиваемая на испарение компонентов композиции электрического контакта с поверхности:

$$q_{\text{исп}} = h \cdot n_{\text{исп}},$$

где  $h, n_{\text{исп}}$  – удельная теплота и скорость испарения компонентов композиции электрических контактов в зоне привязки дугового разряда.

Оценка баланса энергии на поверхности катода проведена в виде:

$$q_{\text{э}} + q_{ek} + q_l + q_{\text{исп}} = q_i + q_{e\text{обр}} + q_{R\text{пл}} + q_a.$$

Используя экспериментально определенные значения  $T_k, q_l, U_k, j, T_e, q_{R\text{пл}}$ , из рассмотренной системы уравнений можно получить уравнения для определения полного тока, тока термоэмиссии электронов и напряженности электрического поля на поверхности катода электрического контакта соответственно

– уравнение полного тока:

$$j = j_{e\text{эм}} + j_i - j_{e\text{обр}};$$

– уравнение тока термоэмиссии:

$$j_{e\text{эм}} = A_o T_k^2 \exp \left[ - \frac{e(j - \sqrt{eE_k})}{kT_k} \right],$$

где  $A_o$  – универсальная постоянная для всех металлов;

– напряженность электрического поля на поверхности катода электрического контакта:

$$E_k^2 = 7,6 \cdot 10^5 U_k^{\frac{1}{2}} \left\{ j_i \left( \frac{m_i}{m_e} \right)^{\frac{1}{2}} - j_{e\text{эм}} \right\},$$

где  $m_i$  – масса ионов.

При этом предполагается, что вблизи катода плазма находится в локальном термодинамическом равновесии.

**Вывод.** На основании общего подхода к исследованию катодных процессов с учетом ряда допущений можно определить распределение тепловых энергий по длине прикатодной зоны. С помощью данной модели можно определять оценочные параметры основных значений: ток эмиссии электронов; напряженность электрического поля на поверхности катода электрических контактов.

#### Список литературы

1. Жуков М.Ф., Н.П.Козлов, А.В.Пустогаров и др. Приэлектродные процессы в дуговых разрядах. – Новосибирск: Изд-во ИТФ, 1982.– 185 с.
2. Зимин А.М., Козлов Н.П., Хвесюк В.И. Теоретические исследования термоэмиссионных катодов / Под ред. М.Ф.Жукова. – Новосибирск: Изд-во ИТФ, 1977.– С.7–40.
3. Павленко Т.П. Энергетические параметры катодного пятна электрической дуги на рабочей поверхности контактов // Вестн. НТУ "ХПИ, № 35. – С.101–106.
4. Павленко Т.П. Динамика развития дугового разряда // Електротехніка і електромеханіка. 2005.– №3. – С. 38–41.

*Рекомендовано до друку: доцентом Азюковським О.О.*