

УДК 537:621.3

В. М. КУЛЯПИН, И. М. АСЛЯМОВ

## КАТОДНЫЕ ПРОЦЕССЫ ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ РАЗРЯДОВ

Предложена математическая модель нестационарного процесса фазовых превращений: плавления с уносом массы мишени под действием поверхностного источника энергии высокой плотности. Установлено, что исходные уравнения баланса энергии имеют непрерывные решения, но при выделении асимптотик возникает скачкообразность решения. Получены значения параметров области катодного падения потенциала. *Процессы фазовых превращений; испарения; катодные процессы; электрический разряд*

### ВВЕДЕНИЕ

Моделирование катодных процессов позволяет вскрыть закономерности и параметры области катодного падения потенциала, в том числе такие, которые пока невозможно определить экспериментально: напряженность поля, плотность тока электронов, ионов и другие.

Предлагается математическая модель для нахождения нестационарного процесса фазовых превращений плавления с уносом массы мишени испарением под действием поверхностного источника энергии высокой плотности с учетом объемного тепловыделения. Получено аналитическое решение задачи теплопроводности с фазовыми превращениями. Установлено, что исходные уравнения баланса энергии имеют непрерывные решения, но при выделении асимптотик возникает скачкообразность решения, их критичность к малому изменению параметров.

В расчетах использовано решение задачи сверхбыстрого нагрева, плавления и разрушения материалов. Интегральный метод решения таких задач в ряде случаев дает решение более точное, чем использование численного метода конечных разностей. На основе интегрального метода задача сводится к модели, позволяющей найти решение в замкнутой аналитической форме и провести сопряжение с газокинетическими процессами испарения.

При решении приняты допущения:

- теплофизические характеристики материала мишени постоянны и равны средним значениям для рассматриваемого диапазона температур;

- рассматриваемые процессы подчиняются закону Фурье.

В работе исследованы катодные процессы электрических разрядов различной длительности, проведено совместное рассмотрение эмиссионных и теплофизических процессов на границе «металл–плазма». Плотность тока электронов определена уравнением тока термоавтоэлектронной эмиссии Мерфи и Гуда, соотношение ионной и электронной составляющих подчиняется уравнению Маккоуна. В решение введены только значения работы выхода электронов, катодное падение потенциала и теплофизические постоянные материала.

Достоверность результатов подтверждена на основании сравнения с экспериментальными значениями, полученными Г. А. Месяцем. Расчетные величины хорошо согласуются с экспериментальными исследованиями.

### 1. МАТЕМАТИЧЕСКИЕ МОДЕЛИ ВЗАИМОСВЯЗАННЫХ ПРОЦЕССОВ ПРИ ВОЗДЕЙСТВИИ ЭЛЕКТРИЧЕСКОГО РАЗРЯДА

Эффекты в электрических элементах и устройствах систем управления связаны со сложными взаимодействиями электродинамических, термодинамических, гидродинамических процессов во всех агрегатных состояниях вещества – твердых телах, жидкостях, газах, плазме. Законченные физико-математические постановки здесь отсутствуют. Поэтому математическое моделирование является одним из действенных методов исследований.

В работе излагаются общие принципы анализа физического подобия и их приложения к процессам фазовых превращений. Широкое применение плазменных, ионных, электронных и искровых технологий выдвигает задачу исследования нелинейных процессов в электрических разрядах. Такие процессы характеризуются разнообразием разрядов в газе: неса-

мостоятельный разряд под действием внешнего ионизатора и самостоятельные газовые разряды. Все виды разрядов: дуговой, искровой, коронный, тлеющий, возникающий при низких давлениях, имеют область катодного падения потенциала, которая обеспечивает механизм извлечения электронов из металла.

Такие процессы характеризуются высокой концентрацией мощности, малыми размерами области взаимодействия, малой продолжительностью, что затрудняет теоретическое и экспериментальное исследование традиционными методами. В этих условиях весьма перспективно применение методов математического моделирования.

В статье проведено рассмотрение сложных многопараметрических процессов в области катодного падения потенциала электрических разрядов, включающие теплофизические, эмиссионные и кинетические явления.

На основе решения уравнения баланса энергии вскрыты закономерности протекающих дискретных процессов, которые послужили основой разработки экспериментальных методов исследования и методик расчета ионно-плазменных и других нанотехнологий с устройствами, в которых исполнительным органом является электрический разряд.

Показана действенность применения математического моделирования при исследовании многопараметрических взаимосвязанных нелинейных процессов. Анализ результатов проведен с широким привлечением экспериментальных данных.

## 2. МОДЕЛЬ ПРОЦЕССОВ НА КАТОДЕ ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ РАЗРЯДОВ

Рассмотрим физические явления, возникающие на границе плазмы электрического разряда и поверхности катода. Модель физических явлений, возникающих при воздействии излучения электрического разряда, схематично представлена на рис. 1.

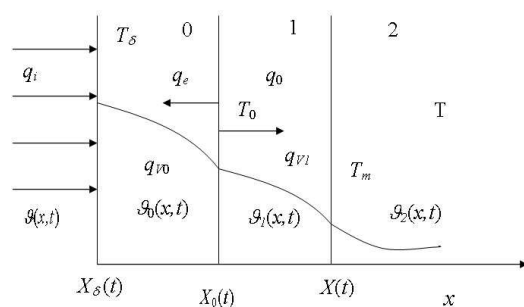


Рис. 1. Модель переходных процессов фазовых переходов

Тепловой поток бомбардировки катода ионным током плотностью  $q_i(t)$  с учетом ионной температуры плазмы и энергии возбуждения рекомбинированных ионов воздействует на поверхность. Температура поверхности начинает повышаться. После того, как она достигает температуры первого фазового превращения, начинается движение границы фазового перехода  $X(t)$  с затратами на покрытие скрытой теплоты фазового перехода  $L$ .

## 3. ВЗАИМОСВЯЗАННЫЕ ПРОЦЕССЫ НА КАТОДЕ ЭЛЕКТРОРАЗРЯДНЫХ УСТРОЙСТВ

### 3.1. Параметры микропроцессов на границе «металл–плазма»

Проведем совместное рассмотрение эмиссионных и теплофизических процессов в элементарном неподвижном катодном пятне на основе решения уравнения баланса энергии на катоде. В решение вводим только экспериментальные значения работы выхода  $\phi$ , катодное падение потенциала  $U_k$  и теплофизические постоянные катода – скрытая теплота парообразования  $L_0$  и плавления  $L$ , удельная теплоемкость  $c$  и температура плавления  $T_m$ .

Температурные режимы катодного пятна рассчитываем с учетом плавления и испарения материала катода поверхностным и объемным источниками теплового потока. Элементарные процессы рассматриваем в динамике. Так как инерционность теплофизических процессов намного выше инерционности эмиссионных процессов, учитываем зависимости от времени только теплофизических процессов. Учитываем энергию резистивного нагрева только расплавленной зоны, размер которой определяется величиной и длительностью воздействия теплового потока. С учетом принятых допущений решается уравнение баланса энергии в элементарном катодном пятне:

$$q_i + \frac{q_V}{2}(X - X_0) = q_0 + q_e + q_r. \quad (1)$$

В уравнении учитываются источники энергии – бомбардировка катода ионным током  $q_i$ , резистивный нагрев расплавленной зоны металла  $q_V$  и пути рассеяния энергии – термоэмиссию электронов  $q_e$ , испарение, плавление и теплопередачу в катод  $q_0$ . Радиационные потери  $q_r$  в рассматриваемом диапазоне температур незначительны и не учитываются при расчетах. Тепловой поток бомбардировки катода ионным током равен

$$q_i = \mu(I + \eta + \nu) \psi_j e U_k, \quad (2)$$

где  $\mu$  – коэффициент аккомодации;  $\eta$  – коэффициент, учитывающий влияние ионной температуры плазмы;  $\nu$  – коэффициент, учитывающий энергию возбуждения рекомбинированного иона.

Соотношение между ионной  $j_i$  и электронной  $j_e$  составляющими тока разряда  $\psi = j_i / j_e$  определяется уравнением Маккоуна для тока амбиполярной эмиссии

$$\psi = \frac{1}{\left(\frac{m_i}{m_e}\right)^{\frac{1}{2}}} \left( 1 + \frac{E^2}{7,57 \cdot 10^5 \cdot U_k^2 \cdot j_e} \right), \quad (3)$$

где  $m_i / m_e$  – отношение массы иона к массе электрона;  $E$  – напряженность поля у катода.

Плотность тока электронной эмиссии  $j_e$  для высокотемпературной области катодного пятна описывается уравнением термоавтоэлектронной эмиссии Мерфи и Гуда

$$j_e = 120T_0^2 \frac{1,64 \cdot 10^{-2} E^{3/4} / T_0}{\sin(1,64 \cdot 10^{-2} E^{3/4} / T_0)} \times \exp\left(\frac{4,39E^{1/2} - 1,16 \cdot 10^4 \phi}{T_0}\right); \quad (4)$$

где  $T_0$  – температура поверхности катодного пятна.

Тепловой поток резистивного нагрева расплавленной зоны металла, отнесенный к единице площади катодного пятна, равен

$$q_V = 0,48 \left(\frac{2\pi}{3} \cdot r_k^3\right) \frac{j^2}{\sigma}; \quad (5)$$

$$q_V = 0,48 \frac{2\pi j^2}{3\sigma} (X - X_0)^3;$$

где  $\sigma = \frac{\sigma_m}{1 + \frac{2}{3} \alpha_m (T_0 - T)}$  – электропроводность

катода;  $\sigma_m$  – электропроводность при температуре плавления;  $\alpha_m$  – температурный коэффициент;  $j = j_e + j_i = (1 + \psi)j_e$  – плотность тока в катодном пятне.

Глубина плавления  $X - X_0$  определяется из [1–5]. Тепловой поток, отводимый термоэмиссией электронов, равен

$$q_e = (\phi - 3,8 \cdot 10^{-4} \cdot E^{1/2} + 1,724 \cdot 10^{-4} \cdot T_0) j_e. \quad (6)$$

Температура катодного пятна в зависимости от плотности теплового потока определяется уравнением

$$q_0 = \frac{\lambda_1(T_0 - T_m)}{X - X_0} + [L_0 + L + c(T_0 - T)] \sqrt{\frac{M}{T_0}} \exp\left(A - 4,234 - \frac{B}{T_0}\right), \quad (7)$$

где  $M$  – атомная масса материала катода,  $A, B$  – табулированные постоянные скорости испарения.

По приведенным уравнениям рассчитаны значения параметров области катодного падения потенциала, удовлетворяющие условия равновесия теплофизических и эмиссионных процессов на катодах из серебра, меди, железа, никеля и золота. Результаты расчетов представлены на рис. 2–5.

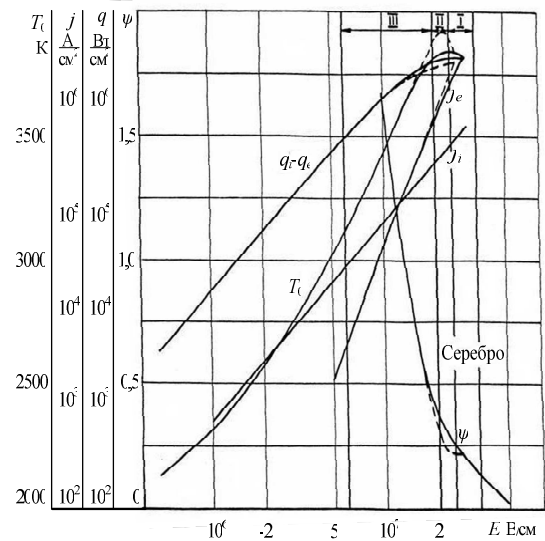


Рис. 2. Равновесные параметры разрядов на серебряном электроде

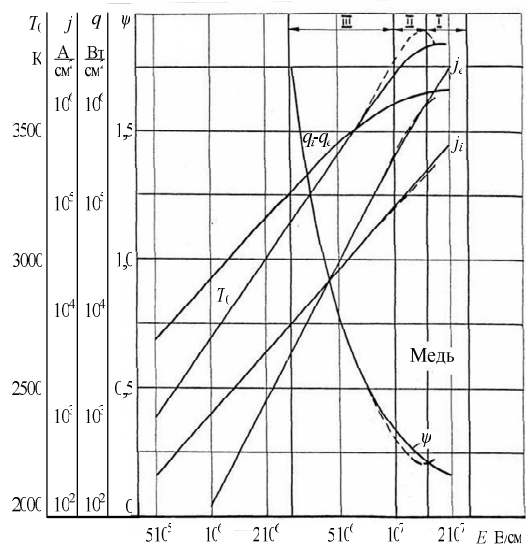


Рис. 3. Равновесные параметры разрядов на медном катоде

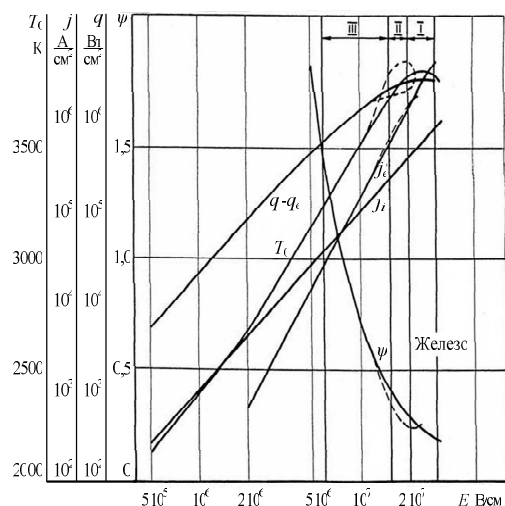


Рис. 4. Равновесные параметры разрядов на стальном катоде

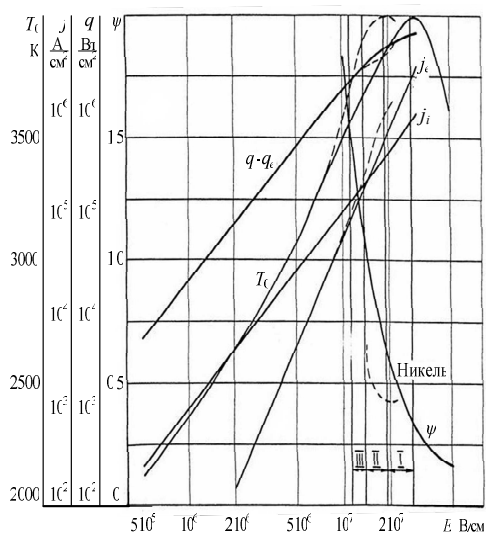


Рис. 5. Равновесные параметры разрядов на никелевом катоде

также дискретны. Температура поверхности снижается, извлечение электронов подчиняется автоэлектронному механизму эмиссии.

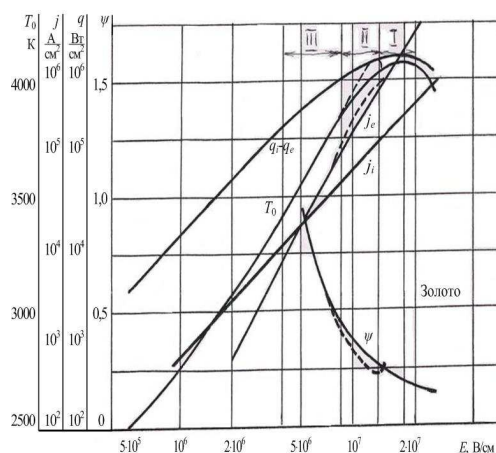


Рис. 6. Равновесные параметры разрядов на катоде из золота

Длительность существования элементарных катодных пятен в функции напряженности поля у катода представлены на рис. 7.

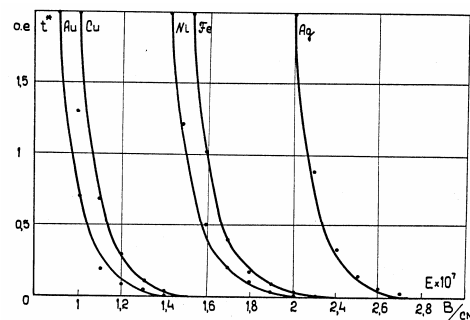


Рис. 7. Длительность существования элементарных катодных пятен

Выбраны материалы с однократной ионизацией, чтобы полнее выявить механизм взаимосвязанных процессов..

Из рассмотрения результатов расчета можно выделить три характерные области катодного падения потенциала электрических разрядов. Рассмотрим их на примере серебра.

При напряженности  $E > 2,6 \cdot 10^7$  В/см (рис. 2) длительность существования катодных пятен меньше времени нагрева поверхности катода до температуры  $T_0$  и начала испарения, термоэмиссия электронов ослабляет поверхностный источник тепла и, по-видимому, основным источником энергии является энергия резистивного нагрева. При напряженности  $E > > 2,6 \cdot 10^7$  В/см доля энергии поверхностного теплового потока снижается, и основным источником энергии становится энергия резистивного нагрева материала катода. Процессы

Следовательно, процессы на катоде в зависимости от времени определяются различными источниками энергии и подразделяются на три вида. Дискретные процессы, когда основную роль играет тепло резистивного нагрева, дискретные процессы, определяемые энергией бомбардировки катода ионным током, а тепло Джоуля-Ленца приводит к прекращению разряда. Стационарные процессы, когда баланс энергии выполняется независимо от длительности разряда и величины расплавленной зоны.

### 3.2. Классификация катодных процессов

В соответствии с особенностями протекания теплофизических и эмиссионных процессов катодные процессы электрического разряда можно разделить на три типа. Следует отметить относительную условность границ разбиения, так как они определяют только преобладающий

механизм развития пятен, которые существуют на катоде одновременно и постоянно вырождаются одно в другое, возникают вновь.

Катодные пятна в области напряженности поля (для серебра)  $E \geq 2,6 \cdot 10^7$  В/см (рис. 2) дискретны, характеризуются преобладающей ролью объемного источника нагрева расплавленного объема, малой продолжительностью существования (меньше 1–30 мкс) и высокой плотностью электронного тока ( $j > 2 \cdot 10^6$  А/см<sup>2</sup>). Катодные пятна в этой области напряженности поля относятся к первому типу пятен и характерны для искровых разрядов и начальной стадии электрического пробоя. Примем за максимальную продолжительность существования пятен первого типа время нагрева поверхности катодного пятна до температуры  $T_0$  и начала интенсивного испарения

$$\bar{t}_0 = \frac{2}{\left[ \frac{L_0 + L + c(T_0 - T)}{L_0 + c(T_m - T)} \right]^2}. \quad (9)$$

Минимальная продолжительность пятен первого типа определяется начальными условиями разряда и максимальной напряженностью поля у катода. Примем за верхнюю границу пятен первого типа время  $\bar{t}_1$ , при котором нормированная функция распределения длительности существования дискретных элементарных катодных пятен равна единице. То есть нижний предел интеграла от функции распределения

$$\int_{\bar{t}_1}^2 g(\bar{t}) d\bar{t} = 1. \quad (10)$$

Интегрирование ведется до времени  $\bar{t} = 2$ , при котором прекращается влияние объемного источника тепла, и катодные пятна вырождаются в неподвижные. Оценим предельные значения параметров пятен первого типа. Используем функцию распределения продолжительности существования элементарного катодного пятна

$$g(\bar{t}) = 0,1/\bar{t}. \quad (11)$$

Тогда из условия нормирования функции распределения продолжительности существования катодных пятен определяется нижний предел

$$\int_{\bar{t}_1}^2 \frac{0,1}{\bar{t}} d\bar{t} = 1 = 0,1 \ln \bar{t} \Big|_{\bar{t}_1}^2 = 0,1 (\ln 2 - \ln \bar{t}_1),$$

$$\bar{t}_1 = \exp(-9,306853) = 9,1 \cdot 10^{-5}.$$

Напряженность поля при данной продолжительности существования определяется

$$E = E_j + 9,307 \cdot 10^6 \text{ В/см}. \quad (12)$$

Из решения уравнения баланса энергии определяем значения параметров катодных пятен  $j_e, j_b, j, E$  для времени  $\bar{t}_1 = 9,1 \cdot 10^{-5}$ . Верхние значения параметров катодных пятен первого типа представлены в табл. 1.

Таблица 1  
Параметры процессов первого типа

Параметры Металл	$E \cdot 10^7$ , В/см	$j_e \cdot 10^6$ , А/см <sup>2</sup>	$j_i \cdot 10^6$ , А/см <sup>2</sup>	$t_b \cdot 10^{-9}$ , с
Серебро	3,43	10,0	1,0	1,13
Медь	2,43	6,36	0,775	94,2
Золото	2,33	1,75	0,285	250,5
Железо	2,93	4,75	0,86	0,6
Никель	2,83	2,34	0,807	1,7

Дискретные катодные пятна второго типа соответствуют длительности существования от  $\bar{t}_0$  до  $\bar{t} = 2$  и области напряженности поля  $2 \cdot 10^7 \leq E \leq 2,6 \cdot 10^7$  В/см (для серебра). Эмиссионные процессы катодных пятен 2-го типа определяются в основном энергией поверхностного источника бомбардировки катода ионным током. Резистивный нагрев расплавленной зоны приводит к распаду неподвижного элементарного катодного пятна. По мере увеличения расплавленной зоны резистивный нагрев приводит к тому, что через время  $\bar{t}_b$  суммарный тепловой поток, подводимый к пятну, начинает превышать величину, которую способны отвести эмиссия электронов и теплофизические процессы. Наличие избыточной энергии вызывает перегрев расплавленного металла, взрыв и распад элементарного катодного пятна. Катодный процесс перемещается в новую точку привязки разряда. Катодные пятна 2-го типа в основном определяют эрозию катода и самопроизвольное перемещение катодных пятен. Граница пятен 1-го и 2-го типов довольно четко определена как по длительности существования катодных пятен, так и по величине напряженности электрического поля у катода. Минимальное время существования катодных пятен 2-го типа определяется временем нагрева материала катода до температуры  $T_0$  и начала испарения с поверхности. Минимальное время существования элементарного катодного пятна второго типа определяется уравнением

$$t_{b \min} = \frac{2[L_0 + c(T_0 - T_m)]\rho\epsilon\bar{t}_{b \min}, c}{q_0^2}, \quad (13)$$

Таблица 2  
Параметры процессов второго типа

Материал	Ag	Cu	Au	Fe	Ni
$E \cdot 10^7, \text{ В/см}$	2,5	1,5	1,4	2,0	1,9
$T_0, \text{ К}$	3901,5	3900,0	4079,6	4392,1	4504,6
$j_e \cdot 10^6, \text{ А/см}^2$	2,11	1,16	0,47	1,73	0,88
$\psi = j_i/j_e$	0,22	0,19	0,23	0,24	0,42
$Q_v \cdot 10^6, \text{ Вт/см}^2$	9,67	4,74	2,41	8,61	7,33
$q_e \cdot 10^6, \text{ Вт/см}^2$	6,51	3,71	1,75	6,16	3,46
$q_v (X-X_0), \text{ Вт/см}^2$	0,84	0,61	0,34	1,40	1,87
$j_i \cdot 10^6, \text{ А/см}^2$	0,47	0,22	0,66	0,43	0,37
$t_b^*$	0,03	0,03	0,019	0,051	0,05
$t_b \cdot 10^{-6}, \text{ с}$	3,78	31,4	52,3	0,34	0,94
$f_{\max}, \text{ кГц}$	265	31,8	19	290	1060

В табл. 2 приведены значения минимального времени существования катодных пятен 2-го типа и соответствующие значения параметров области катодного падения потенциала. Как видно из табл. 2, для различных катодов минимальная продолжительность существования катодных пятен 2-го типа (и, соответственно, максимальная продолжительность существования пятен 1-го типа) находится в пределах 0,3–30 мкс.

Нижняя граница пятен 2-го типа определяется временем достижения расплавленной зоны металла установленного значения, а по напряженности соответствует минимальной напряженности поля, при которой наблюдается распад элементарного катодного пятна. Установившееся значение расплавленной зоны достигает за время  $t_{e \max} = 2$ , или

$$t_{b \max} = 2[L_0 + c(T_0 - T_m)]\rho\epsilon / q_0^2, \text{ с.} \quad (14)$$

Значения параметров области катодного падения потенциала для пятне второго типа при  $t_{b \max} = 2$  приведены в табл. 3.

Таблица 3  
Минимальные значения параметров дискретных процессов

Материал катода	Ag	Cu	AU	Fe	Ni
$E \cdot 10^7, \text{ В/см}$	2,0	1,0	0,90	1,5	1,4
$T_0, \text{ К}$	3895,3	3778,1	3906,2	4300,0	4356,2
$j_e \cdot 10^6, \text{ А/см}^2$	1,02	0,34	0,12	0,71	0,31
$\psi = j_i/j_e$	0,30	0,28	0,37	0,33	0,65
$q_i \cdot 10^6, \text{ Вт/см}^2$	6,17	2,10	0,99	4,82	3,97
$q_e \cdot 10^6, \text{ Вт/см}^2$	3,34	1,19	0,48	2,69	1,30
$q_v (X-X_0) \cdot 10^6, \text{ Вт/см}^2$	1,11	0,30	0,14	0,98	1,39
$j_i \cdot 10^6, \text{ А/см}^2$	0,30	0,09	0,04	0,24	0,20
$T_{\text{ВМАХ}} \cdot 10^{-3}, \text{ с}$	0,20	1,97	2,02	0,003	0,03
$f, \text{ кГц}$	4,9	0,50	0,49	39	27,5

Из сравнения данных табл. 2 и 3 следует, что продолжительность существования катодных пятен второго типа находится в пределах от 0,3–50 мкс до 0,03–2 мс. Границы пятен второго типа нанесены на рис. 2–6 пунктирной линией. На основании расчетов получено, что для пятен второго типа характерно постоянство результирующего потока, расходуемого на теплофизические процессы  $q_0 \approx \text{const}$ , и, соответственно, температуры поверхности  $T_0$ .

При напряженности поля  $E < 2 \cdot 10^7 \text{ В/см}$  на катоде образуются неподвижные пятна третьего типа. Даже при максимальной величине расплавленной зоны металла в пятне наблюдается равновесие теплофизических и эмиссионных процессов. Эрозия пятен происходит только за счет испарения материала катода. Максимальная плотность тока электронов находится в пределах  $(0,12-1,022) \cdot 10^6 \text{ А/см}^2$ . В зависимости от напряженности поля изменяется суммарный тепловой поток  $q_0 = q_i - q_e$ , при этом изменяется и температура катодных пятен. Определим нижнюю границу существования катодных пятен третьего типа по напряженности как точку, при которой функция распределения плотности тока электронов равна нулю (при постоянстве температуры катодного пятна)

$$g(j_e) = 0. \quad (15)$$

Нижние границы существования стационарных пятен 3-го типа приведены в табл. 4.

Таким образом, из расчета баланса энергии на катоде определены пределы различных механизмов взаимодействия материала катода с плазмой, на основании чего проведена классификация типов катодных процессов.

Таблица 4

Параметры неподвижных точек привязки разряда

Материал катода	Ag	Cu	Au	Fe	Ni
$E \cdot 10^7, \text{ В / см}$	0,6	0,275	0,4	0,6	1,1
$j_e \cdot 10^3, \text{ А/см}^2$	2,697	3,65	6,0	25,4	87,0
$j_i \cdot 10^3, \text{ А/см}^2$	2,5	7,6	8,7	35,5	133

Границы пятен всех трех видов нанесены на рис. 2–6 вертикальными линиями. В стационарных процессах перенос тока осуществляется пятнами всех трех типов, образующих квазистационарные макротяны. Для характеристики интегральных параметров процесса необходимо получить функции распределения.

### ЗАКЛЮЧЕНИЕ

1. Из совместного рассмотрения в динамике процессов на катоде установлено, что катодные процессы дискретны. Распад элементарных катодных пятен вызван превышением скорости выделения энергии над скоростью теплопередачи испарением, теплопроводностью и термоэмиссией электронов, дискретность процессов является причиной высокочастотных колебаний катодного потенциала.

2. Установлено, что характеристики процессов в аппаратах с электрическими разрядами могут быть определены на основе решения уравнения баланса энергии на катоде. Учитывается энергия бомбардировки катода ионным током и резистивный нагрев расплавленной зоны катода. Отвод энергии осуществляется термоэмиссией электронов фазовыми преобразованиями.

3. Установлено, что различные виды электрических разрядов определяются соотношением катодных пятен трех типов. Катодные процессы дискретных пятен первого типа характерны для импульсных разрядов с длительностью меньше времени нагрева катода до температуры испарения, когда основным источником является энергия резистивного нагрева.

4. Катодные процессы в дискретных пятнах второго типа определяются энергией бомбардировки катода ионным током, резистивный нагрев не превышает 40% суммарной энергии. Но резистивный нагрев приводит к развитию неустойчивости катодных процессов, когда

скорость подвода энергии начинает превышать скорость отвода термоэмиссией электронов, теплофизическими процессами происходит перегрев и взрыв расплавленного катодного пятна. Неподвижные пятна третьего рода характерны для процессов с низкой напряженностью поля, в них соблюдается равновесие теплофизических и эмиссионных процессов.

5. Установлено, что неустойчивость катодных процессов определяется микропроцессами в элементарном катодном пятне, перегревом и распадом точки привязки разряда

6. Показано, что при исследовании катодных процессов необходимо применять статистические методы.

### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Куляпин В. М. Некоторые задачи теплопроводности с фазовыми превращениями // Инж.-физ. журнал. 1971. Т. 20, № 3. С. 497–504.
2. Куляпин В. М., Аслямов И. М. Электрический разряд в системах электрооборудования летательных аппаратов // Электрические контакты и электроды: Тр. ин-та проблем материаловедения НАН Украины. Киев, 2008. С. 23–31.
3. Месяц Г. А. Электронная эмиссия из сегнетоэлектрических плазменных катодов // Успехи физических наук. 2008. Т. 178, № 1. С. 85–108.
- 4/ Месяц Г. А., Яландин М. И. Пикосекундная электроника больших мощностей // Успехи физических наук. 2005. Т. 175, № 3. С. 226–245.
5. Месяц Г. А. Эктоны в вакуумном разряде: пробой, искра, дуга. М.: Наука, 2000.

### ОБ АВТОРАХ



**Куляпин Владислав Максимилианович**, проф., каф. электрооборуд. ЛА. Дипл. инж.-электромех. (Новосиб. электротехн. ин-т, 1958). Д-р техн. наук по по эл-там и уст-вам систем упр-я (УГАТУ, 2003). Иссл. в обл. систем упр-я с электрич. разрядами.



**Аслямов Ирек Мирзифатихович**, асп. той же каф. Дипл. инж. по электрооборуд. ЛА (УГАТУ, 2005). Иссл. в обл. систем регулир. электрооборуд. ЛА.