

**МАТЕМАТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ РАЗВИТИЯ ПРОЦЕССОВ
НА КАТОДЕ ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ КОНТАКТОВ**

В.И.Милых, докт.техн.наук, **Т.П.Павленко**, канд.техн.наук
Национальный технический университет "Харьковский политехнический институт",
ул. Фрунзе, 21, Харьков, 61002, Украина.
e-mail: mvikpi@kharkov.ua

Представлена математическая модель и проведен анализ процессов в приэлектродных областях электрических контактов, происходящих при развитии дугового разряда. Оценки сопутствующих параметров в целом соответствуют результатам экспериментальных исследований электрических контактов в коммутационных электрических аппаратах. Библ. 10, рис. 4.

Ключевые слова: электрический контакт, дуговой разряд, приэлектродные области, математическая модель, результаты расчетов.

Введение. При работе коммутационных электрических аппаратов контакты подвержены различным видам износа, что сопровождается эрозией их рабочих поверхностей. Основным вклад в разрушение рабочей поверхности электрических контактов вносят электрическая дуга, возникающая в межконтактном промежутке, и процессы, протекающие в приэлектродных областях, а конкретно – в прикатодной области. Развитие дугового разряда и длительное горение дуги приводят к нежелательным последствиям, например, к расплавлению состава композиции на рабочей поверхности контактов и к свариванию поверхностей контактов, что может создавать аварийную ситуацию [2].

Теория электроэрозионных явлений и развития дугового разряда постоянно находится в стадии изучения и поиска путей повышения дугостойкости контактных композиций для электрических аппаратов. Одним из таких решений является активирование состава композиции контактов по всему объему, что обусловлено высокой термоэмиссионной активностью элементов состава, в результате которой уменьшается эрозия рабочей поверхности электрических контактов [8]. Но, к сожалению, сложность и взаимосвязанность процессов при исследовании электрических контактов требуют дорогостоящих многофакторных экспериментов (ввиду их длительности и трудоемкости). Поэтому для объяснения явлений, происходящих на рабочей поверхности электрических контактов и в приэлектродных областях, необходимо создание математических моделей, заменяющих либо упрощающих эксперименты.

Цель работы – сформировать и обосновать математическую модель термоэмиссионных процессов в прикатодной области электрических контактов при развитии дугового разряда.

Формирование математической модели. Математическая модель строится на результатах теоретического исследования процессов и явлений, которые базируются на основных положениях квантостатистической теории твердого тела с учетом энергетического распределения, взаимодействия, движения частиц и их эмиссии с рабочей поверхности электрических контактов при совокупном действии теплового и электрического полей [3, 6].

В качестве исходных основ математической модели принимаются уравнения Шредингера, Брауна, Крижановского и дальнейшие разработки современных исследователей, в результате которых определяются параметры эмиссионных процессов в прикатодной области, определяющие образование катодных пятен на рабочей поверхности электрических контактов и развитие эрозии [7, 9].

Имеющиеся в литературе модели Крижановского, Маккоуна, Ли [5, 9, 10] и других исследователей не в состоянии адекватно объяснить многие экспериментально наблюдаемые явления, например, дискретные перемещения катодных пятен по поверхности катода электрических контактов, высокие значения плотности тока (порядка 10^{12} А/м²), высокоэнтальпийные потоки газа и плазмы из приэлектродных областей электрических контактов, а также непосредственный механизм развития эрозии поверхности электрических контактов.

Предлагаемая математическая модель развития процессов на катоде дает формализованное описание основных экспериментальных фактов, а также связана с теорией развития дугового разряда и в концептуальном плане основана на комплексном подходе. Необходимость такого подхода объясняется сложной взаимосвязанностью, взаимозависимостью процессов и явлений (поверхностных, межфазных, плазменных, эмиссионных, электрических, дуговых, тепловых и др.), происходящих на рабочей

поверхности катода контактов и в прикатодной области. Указанные процессы способствуют образованию, развитию и распределению катодных пятен в зависимости от температуры и подвижности опорной точки дугового разряда, что определяет эрозию (разрушение) контактной поверхности.

Для описания процесса в квазистационарном катодном слое и подтверждения гипотезы модели использовались кинетические уравнения, определяющие взаимосвязанность эмиссионных, тепловых и дуговых процессов. Предлагаемая авторами математическая модель является развитием и обобщением моделей Брауна, Крижановского, Ли [1, 4, 5, 7, 9, 10] на основе современных представлений о роли атомарных процессов и квантостатистической природе электронной эмиссии в катодных пятнах, образованных под действием дугового разряда. Кроме того, такие уравнения характерны для каждого слоя приэлектродных областей (катода, анода и плазмы дуги) со своими необходимыми условиями по температуре, катодному падению напряжения в зависимости от изменения потенциалов электрического поля в этих слоях. Для определения процессов в квазистационарном катодном слое вводятся следующие положения:

- 1) электронная эмиссия в развитом катодном пятне имеет туннельную природу и поэтому учтена только на уровне квантовомеханических представлений;
- 2) важнейшими факторами формирования области положительного заряда являются атомарные процессы возбуждения, ионизации и резонансной перезарядки, имеющие наибольшие сечения взаимодействия;
- 3) основным механизмом поступления нейтральных частиц в область ионизации в квазистационарном режиме катодного пятна является испарение состава композиции с рабочей поверхности электрических контактов;
- 4) основная часть ускоренных в зоне катодного падения напряжения ионов после нейтрализации имплантируется инерционным образом вглубь катода электрического контакта;
- 5) распределение частиц происходит вдоль оси развития дугового разряда без учета влияния собственного магнитного поля.

С учетом вышеуказанных положений определена система уравнений квазистационарного катодного слоя [1, 4, 5, 7, 9, 10]

$$v \frac{\partial f_0}{\partial Z} = -v_i f_0 + \int_{-\infty}^{\infty} \sigma_n (|v - \xi|) \times \{f_0(Z, \xi) f_i(Z, v) - f_0(Z, v) f_i(Z, \xi)\} |v - \xi| d\xi; \quad (1)$$

$$v \frac{\partial f_i}{\partial Z} - \frac{eE}{m} \cdot \frac{\partial f_i}{\partial v} = v_i f_0 + \int_{-\infty}^{\infty} \sigma_n (|v - \xi|) \times \{f_0(Z, v) \cdot f_i(Z, \xi) - f_0(Z, \xi) \cdot f_i(Z, v)\} |v - \xi| d\xi; \quad (2)$$

$$\frac{dE^2}{d\varphi} = -\frac{2e(n_i - n_e)}{\varepsilon_0}; \quad E(U_k) = 0; \quad (3)$$

$$\frac{d^2\Psi}{dZ^2} + \frac{2m_e}{\hbar^2} [\varepsilon + w_{ek} - \varepsilon_F + U(Z)]\Psi = 0, \quad (4)$$

где v – скорость движения частиц; f_0 – функция распределения нейтралов; Z – энергетический уровень распределения частиц; v_i – частота ионизации; σ_n – сечение резонансной перезарядки; ξ – скорость образования зон расплавления на поверхности катода; f_i – функция распределения ионов в прикатодном слое; e – заряд электронов; E – напряженность электрического поля; m – масса частиц на поверхности катода; φ – потенциал электрического поля; n_i , n_e – концентрация ионов и электронов; ε_0 – диэлектрическая постоянная; U_k – катодное падение напряжения; Ψ – скалярная функция стационарных состояний электронов; m_e – масса электронов; \hbar – постоянная Планка; ε – энергия электрона; w_{ek} – работа выхода электронов с поверхности катода; ε_F – уровень Ферми электронного газа катода; $U(Z)$ – функция потенциального барьера.

Частота ионизации частиц за счет явлений эмиссии определяется как

$$v_i = \sigma_i(\varphi) |\delta_e| / e, \quad (5)$$

где $\sigma_i(\varphi)$ – сечение потока ионизации частиц; δ_e – плотность электронного тока

$$\delta_e = -e \int_0^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} D(\bar{p}) f_F(\bar{p}) p_z \frac{d\bar{p}}{m_e}. \quad (6)$$

Здесь $D(\bar{p})$ – проницаемость потенциального барьера для электронов с импульсом \bar{p} , имеющим компоненты (p_x, p_y, p_z) ; $f_F(\bar{p})$ – функция Ферми распределения электронов по импульсам.

Проницаемость потенциального барьера электронов определяется как

$$D(\bar{p}) = \left[4 \left| \Psi_1 \Psi_2' - \Psi_1' \Psi_2 \right|^2 \right] \left[(\Psi_1 + \Psi_2')^2 + \left(\frac{\Psi_1'}{k} - k \Psi_2 \right)^2 \right]^{-1}, \quad (7)$$

где $\Psi_1 = \Psi_1(Z_2)$ и $\Psi_2 = \Psi_2(Z_2)$ – фундаментальные решения уравнения Шредингера (4) $\Psi_1(Z_1) = 1$; $\Psi_2(Z_1) = 0$; $\Psi_1'(Z_1) = 0$; $\Psi_2'(Z_1) = 1$, а Z_1 и Z_2 определяются условиями: $Z_1 < Z_2$, $\varepsilon + w_{ek}(Z_j) - \varepsilon_F - U(Z_j) = 0$, $j = 1, 2$; k – модуль волнового вектора.

Концентрация ионов, электронов и скорость электронов v_e находятся из выражений

$$n_i = \int_{-\infty}^{\infty} f_i(z, v) dv, \quad n_e = -\frac{\delta_e}{v_e}, \quad v_e = \sqrt{\frac{2w_{ek}}{m_e}}. \quad (8)$$

Для кинетических уравнений (1) и (2) имеют место условия однозначности

$$f_0(0, v) = g(v, T, \chi); \quad f_i(L, v) = 0; \quad f_0(Z, \pm\infty) = f_i(Z, \pm\infty) = 0, \quad (9)$$

где $g(v, T, \chi)$ – функция распределения по скоростям атомов, испаряющихся с катода; T – температура катода; χ – теплота испарения частиц с поверхности катода; L – расстояние между контактами.

Таким образом, система уравнений (1) – (9) описывает процессы в прикатодной области и представляет собой пример модели развития дугового разряда, наряду с развитием которого происходит изменение температурного поля катода. Основными факторами, определяющими динамику температурного режима катода, являются:

- энергия поглощенного катодом тормозного и рекомбинационного излучения из области объемного заряда эмитируемых электронов;
- энергия аккомодации и нейтрализации ионов;
- потери энергии на эмиссию;
- испарение состава композиции и кондуктивный теплоотвод.

При рассмотрении катодных процессов энергией излучения из столба дуги в окружающее пространство пренебрегаем, что упрощает данную задачу. Задача расчета температурного поля катода характеризуется рядом особенностей: подвижная граница исследуемой области вследствие эрозии изменяется по закону, определяемому температурным распределением; наличием сингулярности степенного типа, вызванной фазовыми переходами 1-го рода; а также нелинейности в силу температурной зависимости коэффициентов переноса, энтропии и плотности поверхностных источников.

Температурное поле катода описано следующей системой уравнений:

$$\rho \cdot c \frac{\partial T}{\partial t} = \frac{1}{r} \cdot \frac{\partial}{\partial r} \left(\lambda(T) \cdot r \cdot \frac{\partial T}{\partial r} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \cdot \left(\lambda(T) \frac{\partial T}{\partial z} \right), \quad z < \eta_0(r, t), \quad t > 0, \quad r \geq 0; \quad (10)$$

$$\left(-\lambda \text{grad} T, \bar{n}_s \right) = \delta \cdot U_{кз} - \chi \cdot \sqrt{\frac{m}{2\pi \cdot k_B \cdot T}} \cdot p_n(T); \quad z = \eta_0(r, t); \quad (11)$$

$$\left(\lambda^+ \text{grad} T^+ - \lambda^- \text{grad} T^-, \bar{n}_f \right) = \rho \cdot \alpha \cdot v_n, \quad T^+ = T^- = T_f, \quad M \in S_f(t), \quad (12)$$

$$T(r, z, 0) = T_0(r, z), \quad |T(r, z, t)| < \infty, \quad \forall r, z, t,$$

где ρ , c – массовая плотность и удельная теплоемкость состава композиции; t – время протекания процесса; λ – удельная теплопроводность состава композиции; r , z – координаты цилиндрической системы с началом в центре катодного пятна; $\eta_0(r, t)$ – функция, задающая поверхность фазового перехода жидкость–пар (т.е. подвижной границы области); \bar{n}_s – нормаль к поверхности плавления; δ – плотность тока на поверхности катода; $U_{кз}$ – эквивалентное падение напряжения в прикатодной области; k_B – постоянная Больцмана; $p_n(T)$ – давление насыщенных паров у поверхности катода; λ_i^+ , λ_i^- ; T^+ , T^- – удельная теплопроводность и температура в приграничных слоях на поверхности катода; T_f – температура начала фазового перехода; M – точка, принадлежащая расчетной области слоя движения фронта частиц S_f ; T_0 – значение температуры на бесконечности.

Развитие катодных пятен и их распределение на рабочей поверхности катода контакта зависит

не только от температуры, но и от падения напряжения в прикатодной области, которое эквивалентно катодному падению напряжения U_k и описывается уравнением

$$U_{kэ} = f(\beta \cdot k_1 \cdot U_k + U_u + \frac{m}{e} \chi - w_{ek}) + F \cdot [(1-f) \cdot U_k - f \cdot U_u] - (1-f) \cdot w^*, \quad (13)$$

где f – ионная доля тока на поверхности катода; β – коэффициент аккомодации иона; k_1 – коэффициент потерь энергии иона на пути к катоду контакта; U_u – эффективный потенциал газа вблизи катода; F – доля энергии ускоренных в зоне катодного потенциала эмиссионных электронов, излучаемых на катод; w^* – удельные потери при эмиссии электронов.

Подвижная граница области катодных пятен зависит от температурного распределения, при котором в момент ионизации частиц происходит как испарение состава композиции, так и продвижение частиц внутрь состава композиции за счет изменения катодного падения напряжения. Закон движения границы области катодного пятна описывается уравнением

$$\rho \cdot u_n = \sqrt{\frac{m}{2\pi \cdot k_B \cdot T}} \cdot p_n(T) - \frac{m}{e} \cdot f \cdot \delta, \quad (14)$$

где u_n – нормальная составляющая скорости движения границы в координатном представлении

$$u_n = - \frac{\partial \eta_0 / \partial t}{(1 + (\partial \eta_0 / \partial r_k)^2)^{1/2}}, \quad (15)$$

r_k – радиус катодного пятна.

Следует иметь в виду, что параметры $\delta, f, \beta, U_k, w^*$ являются сложными функциями, зависящими от температуры и связанными с трудностями аппроксимации подвижных границ фазовых переходов и превращений.

Решаемая задача развития термоэмиссионных процессов в прикатодной области электрических контактов при развитии дугового разряда была переформулирована с упрощениями, что позволило получить результаты, которые в наглядной форме иллюстрируют предложенную математическую модель и ее адекватность реальным физическим процессам, происходящим в указанной области и на рабочей поверхности катода контактов. Полученные результаты показывают взаимодействие этих процессов, что и отражает новизну представляемых исследований.

Результаты реализации математической модели. Ввиду сложности протекающих процессов и их взаимодействия между собой, для демонстрации адекватности математической модели при определении сопутствующих им основных параметров использовался медный катод, свойства которого достаточно известны. При численных расчетах был использован комплекс данных, которые получены из

справочной литературы, на основе экспериментальных исследований, а также приняты ориентировочно ввиду отсутствия исчерпывающей информации. Из-за громоздкости этого комплекта данных они в статье не приводятся, т.к. ее основной целью являлось представление математической модели развития процессов на поверхности катода электрических контактов. В дальнейшем это будет представлено в работе, посвященной комплексу экспериментальных исследований.

Для сравнения результатов исследований использовались параметры экспериментальных образцов, при которых были определены значения удельного износа электрических контактов и падения напряжения при необходимом значении коммутируемого тока, равном 10 А, достаточном для быстрого нагрева центральной части катодного пятна с увеличением плотности тока.

Распределение плотности тока на рабочей поверхности медного катода в указанные моменты времени дано на рис. 1, а. По мере продвижения фронта испарения S_f частиц вглубь катода, что показано на рис. 1, б для конкретных моментов времени, повышаются градиенты температур и интенсивность кондуктивного теплоотвода, что стимулирует еще большую концентрацию тока на катоде электрического контакта. Проведенные расчеты однозначно подтвердили ранее высказывавшиеся в научной литературе предположения о наличии пространственного распределения плотности тока (рис. 1, а). Теоретические зна-

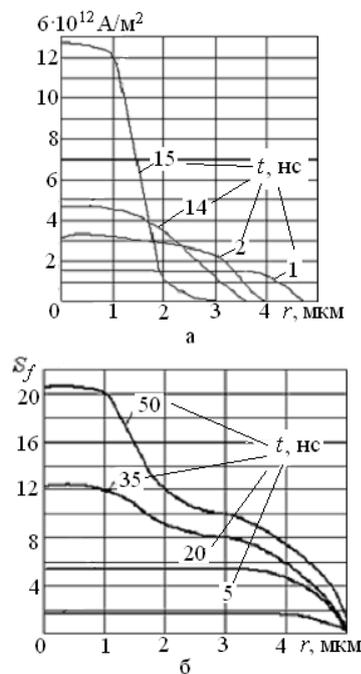


Рис. 1

чения плотности тока соответствуют экспериментально наблюдаемым (10^{10} – 10^{12} А/м²).

Процесс коммутации при токе 10 А с возникновением электрической дуги представляет собой дискретную, приблизительно периодическую последовательность актов ионизации и распада эмиссионных центров, которые определяют удельную эрозию рабочих поверхностей (ее зависимость от времени дана на рис. 2, а) и сопровождаются скачками катодного напряжения, что показано на рис. 2, б (на рис. 2: 1 – средние экспериментальные значения, 2 – расчетные значения для медных контактов).

Характер развития эмиссионных процессов и распределения частиц показан на рис. 3. Механизм появления катодных пятен связан с кондуктивным и лучистым разогревом микровыступов, которые контактируют с плазмой столба дуги. В итоге на выступах происходит переход эмиссии в термоэлектронный режим, который определяет поток частиц и поток ионов f (рис. 3, а), скорость v (рис. 3, б) и концентрацию частиц n (рис. 3, в) в прикатодной области в зависимости от напряженности электрического поля E (на рис. 3: 1 – нейтральные частицы, перемещающиеся от катода; 2 – перемещающиеся к катоду; 3 – поток ионов).

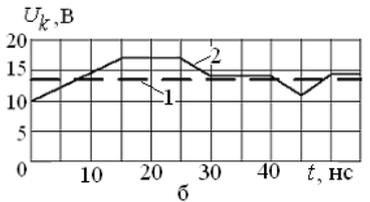
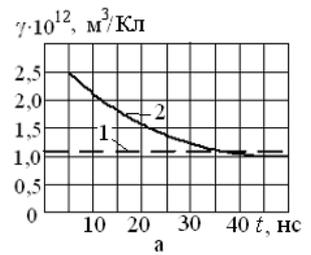


Рис. 2

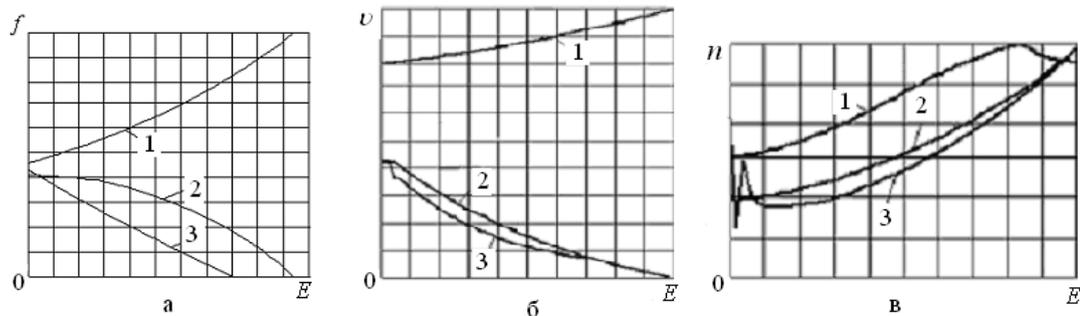


Рис. 3

Эволюция эмиссионного центра при токах ниже пороговых характеризуется монотонным снижением температуры и резким ростом падения напряжения. Зависимость катодного падения потенциала φ от напряженности электрического поля E в прикатодной области показана на рис. 4.

Заключение. Разработанная математическая модель развития термоэмиссионных процессов в прикатодной области электрических контактов основана на результатах теоретических и экспериментальных исследований, которые связаны с уравнениями теплопроводности, движения, распределения, взаимодействия частиц в этой области и на рабочей поверхности электрических контактов. Данная модель рассчитана на определение основных параметров развития процессов в прикатодной области и на поверхности катода электрического контакта.

Представленная математическая модель может служить основой для программного комплекса, ориентированного на расчет важнейших технических параметров и научно обоснованный выбор контактных композиций для низковольтных электрических аппаратов.

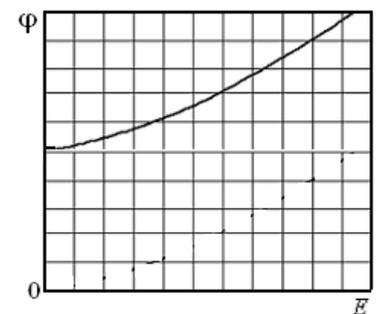


Рис. 4

1. Блохинцев Д.И. Основы квантовой механики. – М.: Наука, 1976. – 664 с.
2. Брон О.Б. Проблемы контактов в силовом аппаратостроении. Электрические контакты. – М.: Наука, 1975. – 97 с.
3. Евстифиев В.В. Эмиссионные явления на поверхности твердого тела. – Пенза: изд. Пенз. гос.ун-та, 2008. – 240 с.
4. Кесаев Н.Г. Катодные процессы электрической дуги. – М.: Наука, 1968. – 244 с.
5. Крижановский С.М. К теории вольт-амперной характеристики столба нестационарного дугового разряда высокого давления // ЖТФ. – 1965. – Т.35. – С. 1882–1888.
6. Милых В.И., Павленко Т.П. Баланс энергии на поверхности катода с учетом явления термоэмиссии // Гірн. електромеханіка та автоматика (наук.-техн. зб.). – 2011. – № 86. – С. 115–118.
7. Никитин Е.Е., Смирнов Б.М. Атомно-молекулярные процессы. – М.: Наука, 1988. – 304 с.

8. Павленко Т.П. Физические процессы на поверхности контактов с учетом потоков плазмы и термоэмиссионной активности материала // *Електротехніка і Електромеханіка*. – 2009. – № 1. – С. 25–28.
9. Райзер Ю.П. Физика газового разряда. – М.: Наука, 1987. – 592 с.
10. Lee T.H., Greenwood A. Theory fo the cathode mechanism in metal vapor arcs // *J. Appl. Phys.* – 1961. – Vol. 32. – Pp. 916–924.

УДК 621.316.933.064.4

МАТЕМАТИЧНА МОДЕЛЬ РОЗВИТКУ ПРОЦЕСІВ НА КАТОДІ ЕЛЕКТРИЧНИХ КОНТАКТІВ

В.І. Мілих, докт.техн.наук, **Т.П. Павленко**, канд.техн.наук

Національний технічний університет „Харківський політехнічний інститут”,

вул. Фрунзе, 21, Харків, 61002, Україна.

e-mail: mvikpi@kharkov.ua

Представлено математичну модель і проведено аналіз процесів у приелектродних областях електричних контактів, що відбуваються при розвитку дугового розряду. Оцінки супутніх параметрів у цілому відповідають результатам експериментальних досліджень електричних контактів в комутаційних електричних апаратах. Бібл. 10, рис. 4.

Ключові слова: електричний контакт, дуговий розряд, приелектродні області, математична модель, результати розрахунків.

MATHEMATICAL MODEL OF DEVELOPMENT OF PROCESSES ON THE CATHODE OF ELECTRIC CONTACTS

V.I. Milykh, T.P. Pavlenko

National Technical University “Kharkov Polytechnic Institute”,

Frunze str., 21, Kharkiv, 61002, Ukraine.

e-mail: mvikpi@kharkov.ua

A mathematical model is presented and the analysis of processes is conducted in regions near the electrodes of electric contacts, what is going on at development of arc digit. The estimations of concomitant parameters on the whole correspond the results of experimental researches of electric contacts in the electric vehicles of commutations. References 10, figures 4.

References 10, figures 4.

Key words: electric contact, arc digit, regions near the electrodes, mathematical model, results of calculations.

1. Blokhintsev D.I. Bases of quantum mechanics. – Moskva: Nauka, 1976. – 664 p. (Rus)
2. Bron O.B. Problems of contacts in strong exact vehicles structure. Electric contacts. – Moskva: Nauka, 1975. – 97 p. (Rus)
3. Evstafiev V.V. The phenomena of emissions on the surface of solid (studies manual). – Penza: Izdatelstvo Gosudarstvennogo Universiteta, 2008. – 240 p. (Rus)
4. Kesaev N.G. Processes of cathodes of voltaic arc. – Moskva: Nauka, 1968. – 244 p. (Rus)
5. Krizhanovskiy C.M. To the theory of volt-ampere description of post of unstationary arc digit of high pressure. // *Zhurnal tekhnicheskoi fiziki*. – 1965. – Vol.35. – Pp. 1882–1888. (Rus)
6. Milykh V.I., Pavlenko T.P. Balance of energy on the surface of cathode taking into account the phenomenon of thermoemissiya. // *Hirnycha elektromekhanika i avtomatika (naukovo-tekhnichnyi zbirnyk)*. – 2011. – № 86. – Pp. 115–118. (Rus)
7. Nikitin E.E., Smirnov B.M. The atomic-molecular processes. – Moskva: Nauka, 1988. – 304 p. (Rus)
8. Pavlenko T.P. The physical processes on the surface of contacts taking into account the streams of plasma and thermoemission activity of material // *Elektrotekhnika and Elektromekhanika*. – 2009. – № 1. – Pp. 25–28. (Rus)
9. Rayzer U.P. Physics of gas digit. – Moskva: Nauka, – 1987. – 592 p. (Rus)
10. Lee T.H., Greenwood A. Theory fo the cathode mechanism in metal vapor arcs // *J. Appl. Phys.* – 1961. – Vol. 32. – Pp. 916–924.

Надійшла 06.07.2012

Received 06.07.2012