
УДК 621.325:537.525

И. В. Мельник, д-р техн. наук, **С. Б. Тугай**, аспирант
Национальный технический университет Украины
«Киевский политехнический ин-т»
(Украина, 03056, Киев, пр-т Победы, 37, корпус 12,
тел. (044) 4068292, (044) 4549505; e-mail: imelnik@edd.ntu-kpi.kiev.ua)

Математическое моделирование физических процессов, протекающих на поверхности охлаждаемых катодов в источниках электронов высоковольтного тлеющего разряда

Предложена методика моделирования физических процессов, протекающих на поверхности охлаждаемых катодов в источниках электронов высоковольтного тлеющего разряда. Выполнены расчеты температуры на поверхности катода и его распыления под действием бомбардировки ионами. Рассмотрена энергетическая эффективность холодных катодов, используемых в технологических источниках электронов.

Запропоновано методику моделювання фізичних процесів, які відбуваються на поверхні охолоджуваних катодів у джерелах електронів високовольтного тліючого розряду. Виконано розрахунки температури на поверхні катода та його розпилення під дією іонного бомбардування. Розглянуто енергетичну ефективність холодних катодів, які використовуються у технологічних джерелах електронів.

К л ю ч е в ы е с л о в а: электронно-лучевые технологии, источники электронов высоковольтного тлеющего разряда, система охлаждения, вторичная ионно-электронная эмиссия, ионное распыление, энергетическая эффективность катода.

Источники электронов на основе высоковольтного тлеющего разряда (ВТР) находят широкое применение в промышленности при выполнении технологических операций сварки, пайки, нанесения различного рода покрытий, а также при вакуумной плавке тугоплавких материалов с целью их очистки [1—3]. Однако отсутствие эффективных методов и средств моделирования в некоторой степени сдерживает внедрение в промышленность этих перспективных источников электронов. Это объясняется сложностью комплексного описания многообразных физических процессов, протекающих в высоковольтном тлеющем разряде [4]. Тем не менее, современные средства компьютерного моделирования, например программный комплекс MatLab, позволяют с достаточно высокой степенью адекватнос-

ти описывать подобные физико-технологические системы. Общая методика моделирования источников электронов ВТР, а также соответствующие математические модели и программные средства их реализации описаны в работе [4].

В соответствии с этой методикой при моделировании источников электронов на основе ВТР большое значение имеет анализ физических процессов, протекающих на поверхности холодного катода. В первую очередь необходимо знать эмиссионные характеристики материала катода, от которых зависит плотность тока формируемого пучка. Для решения этой задачи необходимо определить температурный режим работы катода. Изменение геометрии его рабочей поверхности под действием ионной бомбардировки оказывает существенное влияние на самосогласованную электронно-ионную оптику высоковольтного тлеющего разряда [1, 5].

Комплексный анализ физических условий работы катода в высоковольтном тлеющем разряде достаточно сложен с математической точки зрения. Для расчета температуры поверхности катода необходимо решить уравнение теплового баланса или уравнение теплопроводности в зависимости от требуемой точности решения и от сложности решаемой задачи, определяемой граничными условиями [6].

Для анализа эмиссионных свойств катода и динамики распыления его поверхности используются соответствующие физико-математические модели и численные методы электрофизики [5, 7, 8]. В целом моделирование режимов работы охлаждаемого катода является важной составной частью более общей задачи комплексного моделирования и автоматизированного конструирования технологических электронных пушек высоковольтного тлеющего разряда [4, 9].

Рассмотрим ряд термодинамических моделей, позволяющих оценить температуру рабочей поверхности катода с заданной степенью точности. Предлагаемая численная модель позволяет итерационным методом определить геометрию поверхности катода с учетом его распыления под действием ионной бомбардировки. При построении всех предлагаемых моделей учтены основные физические особенности горения высоковольтного тлеющего разряда.

Постановка задачи. Поскольку комплексный расчет конструкций газоразрядных источников электронов крайне сложен и требует большого объема вычислительных ресурсов, в последнее время разрабатывались и совершенствовались в основном итерационные методы расчета самосогласованной электронно-ионной оптики высоковольтного разряда [4]. При этом рассматривались элементарные взаимодействия ускоренных заряженных и нейтральных частиц в объеме разрядного промежутка и на поверх-

ностях электродов, оказывающие существенное влияние на фокальные параметры формируемого электронного пучка [2].

Значительно меньше внимания уделено анализу энергетики высоковольтного разряда, хотя такие оценки крайне важны, поскольку баланс энергии на электродах влияет на стабильность работы источника электронов. Общие теоретические оценки баланса энергии в объеме высоковольтного разрядного промежутка и на электродах даны в работе [10].

Представляется целесообразным моделирование температурного режима катода в зависимости от мощности разряда. Такие модели позволяют разработать практические рекомендации относительно конструктивных особенностей систем охлаждения катодного узла, используемых в источниках электронов ВТР.

Другим важным физическим процессом, протекающим на поверхности катода и оказывающим существенное влияние на самосогласованную ионно-электронную оптику ВТР, является распыление катода под воздействием его бомбардировки ускоренными ионами и нейтральными атомами. Вследствие неравномерности распыления геометрия катода меняется с течением времени, что приводит к изменению электронно-оптических свойств разрядного промежутка, в результате чего изменяются фокальные параметры формируемого пучка. Основные соотношения, связанные с анализом процесса распыления катода в источниках электронов ВТР, приведены в работе [5]. Здесь будем рассматривать изменение фокальных характеристик формируемого электронного пучка с течением времени.

Методы расчета температуры поверхности катода. Приближенные оценки средней температуры поверхности катода на основе решения уравнения теплового баланса. При конструировании технологических газоразрядных электронных пушек необходимо знать усредненную величину температуры катода, а не ее распределение по его поверхности. В этом случае оценить температуру катода в источниках электронов ВТР можно, решив уравнение теплового баланса, которое для систем охлаждения катодного узла в общем случае имеет вид [11]:

$$W_{\text{к}} = P_t = \frac{S_c (T_s - T_w) \lambda_c (T)}{l_c (T)}, \quad (1)$$

где $W_{\text{к}}$ — мощность, выделяемая на поверхности катода при его бомбардировке ускоренными ионами и нейтральными атомами; P_t — мощность, расходуемая на теплопроводность; S_c — площадь нагреваемой поверхности катода; T_s — ее температура, T_w — температура охлаждающей жидкости; λ_c — теплопроводность материала катода; l_c — его толщина.

Точность оценок температуры поверхности катода при использовании соотношения (1) не превышает 50 %. Тем не менее, в ряде случаев такие упрощенные оценки достаточны для выбора метода охлаждения, а также конструкции системы охлаждения катода и могут быть использованы в инженерной практике при проектировании электронных пушек ВТР.

В конструкциях газоразрядных пушек используются системы охлаждения катодного узла трех типов [11]:

- I — с массивным основанием без принудительного охлаждения;
- II — с принудительным охлаждением катода через основание;
- III — с непосредственным охлаждением катода.

Системы первого типа наиболее просты конструктивно, но имеют самую низкую эффективность охлаждения. Самые сложные — конструкции систем третьего типа, но они наиболее эффективны в случае выделения на поверхности катода большой тепловой мощности. Системы охлаждения второго типа занимают промежуточное положение.

С учетом того, что в электродных системах газоразрядных пушек для формирования сходящихся электронных пучков используется поверхность катода, выполненная в виде сферического сегмента, в работе [11] из уравнения (1) получены аналитические соотношения, позволяющие рассчитывать температуру катода для трех типов конструкций систем охлаждения.

I. Для системы без принудительного охлаждения

$$T_k = \frac{\gamma W_k \left(\left(\frac{R_k + l_k - \sqrt{R_k^2 - R^2}}{\lambda_k} \right) + \frac{l_b}{\lambda_b} + \frac{l_{oc}}{\lambda_{oc}} \right)}{R_k^2 (1 + \gamma) \left(\arcsin \left(\frac{R}{2R_k} \right) - \frac{R}{2R_k} \right) \left(1 - \frac{m_{oc} c_{oc}}{m_k c_k} \right)} + T_0, \quad m_{oc} = \pi \rho_{oc} l_{oc} R^2, \quad (2)$$

где m_k — масса катода,

$$m_k = \pi \rho_k (R_k - \sqrt{R_k^2 - R^2})^2 \frac{3R - R_k - \sqrt{R_k^2 - R^2}}{3};$$

R — радиус катода; R_k — радиус сферы катода; l_k — толщина катода; l_{oc} — толщина основания; l_b — усредненная ширина вакуумного зазора между катодом и основанием; m_{oc} — масса основания; ρ_{oc} и c_{oc} — плотность материала, из которого изготовлено основание, и его теплоемкость; λ_k и λ_{oc} — теплопроводность материала катода и материала основания; λ_b — теплопроводность рабочего газа с учетом его давления и температуры; ρ_k и c_k — плотность и теплоемкость материала катода; T_0 — температура окружающей среды; γ — коэффициент вторичной ионно-электронной эмиссии.

II. Для системы с принудительным охлаждением катода через основание

$$T_{\text{к}} = \frac{\gamma W_{\text{к}} \left(\left(\frac{R_{\text{к}} + l_{\text{к}} - \sqrt{R_{\text{к}}^2 - R^2}}{\lambda_{\text{к}}} \right) + \frac{l_{\text{в}}}{\lambda_{\text{в}}} + \frac{l_{\text{ос}}}{\lambda_{\text{ос}}} \right)}{\alpha_{\text{о.ж}} R_{\text{к}}^2 (1 + \gamma) \left(\arcsin \left(\frac{R}{2R_{\text{к}}} \right) - \frac{R}{2R_{\text{к}}} \right)} + T_{\text{о.ж}}, \quad \alpha_{\text{о.ж}} = k_1 + k_2 \sqrt{v_{\text{о.ж}}}, \quad (3)$$

где $\alpha_{\text{о.ж}}$ — коэффициент теплоотдачи охлаждающей жидкости через основание; $T_{\text{о.ж}}$ — температура охлаждающей жидкости; $l_{\text{в}}$ — средняя величина вакуумного зазора между катодом и основанием; $\lambda_{\text{в}}$ — теплопроводность вакуумного зазора с учетом давления рабочего газа [8]; $v_{\text{о.ж}}$ — скорость протекания охлаждающей жидкости, м/с; k_1 и k_2 — эмпирические коэффициенты.

III. Для системы с непосредственным охлаждением катода

$$T_{\text{к}} = \frac{\gamma W_{\text{к}} (R_{\text{к}} + l_{\text{к}} - \sqrt{R_{\text{к}}^2 - R^2})}{\lambda_{\text{к}} R_{\text{к}}^2 (1 + \gamma) (k_1 + k_2 \sqrt{v_{\text{о.ж}}}) \left(\arcsin \left(\frac{R}{2R_{\text{к}}} \right) - \frac{R}{2R_{\text{к}}} \right)} + T_{\text{о.ж}}. \quad (4)$$

С использованием соотношений (2)—(4) рассчитана усредненная температура поверхности катода в зависимости от поглощаемой мощности, конструкции системы охлаждения и ее геометрических параметров. Расчеты проведены для значений $\gamma = 3,4$, $R_{\text{к}} = 0,8$ м, $R = 0,35$ м, $l_{\text{к}} = 0,01$ м, $l_{\text{ос}} = 0,003$ м и $l_{\text{в}} = 10^{-5}$ м, материал катода — алюминий, материал основания — медь, охлаждающая жидкость — вода [11]. Полученные результаты (рис. 1) позволяют сделать вывод о возможности использования той или иной системы охлаждения для газоразрядных пушек заданной мощности с учетом того, что на катоде выделяется до 5 % общей мощности разряда [10], а температура поверхности катода не должна превышать 100—150 °С [1].

При мощности разряда 2—3 кВт, особенно в источниках электронов, предназначенных для выполнения технологических операций небольшой длительности, например моноимпульсной сварки малогабаритных изделий [1], можно использовать катодный узел с системой охлаждения I типа, что позволяет значительно упростить конструкцию источника и его эксплуатацию.

При мощности разряда 5—10 кВт целесообразно использовать катодный узел с системой охлаждения II типа, обеспечив при этом надежный тепловой контакт между катодом и основанием держателя.

В источниках электронов, генерирующих электронные пучки мощностью десятки и сотни киловатт, необходимо использовать катодный

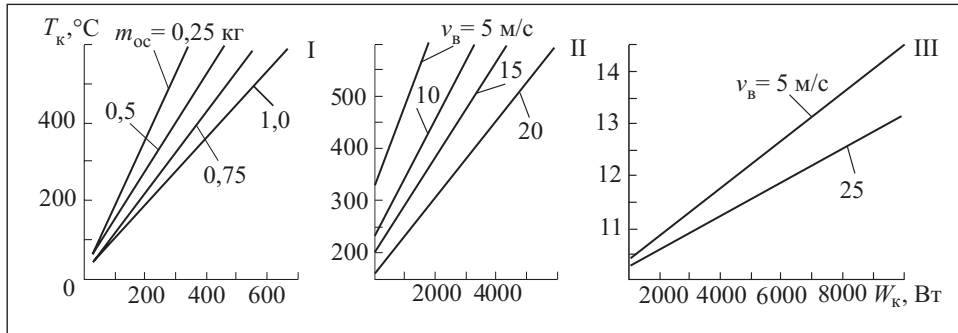


Рис. 1. Зависимость температуры поверхности катода от выделяемой им мощности при использовании систем охлаждения I, II и III типов

узел с системой охлаждения III типа. При этом конструкция узла в значительной степени усложняется, однако обеспечивается максимально эффективный отбор тепловой мощности от катода [11]. Такие катодные узлы широко используются, например, в газоразрядных пушках большой мощности, предназначенных для вакуумного переплава и очистки тугоплавких металлов [2].

Расчет распределения температуры на поверхности катода с помощью уравнения теплопроводности. Оценки температуры катода, проводимые с использованием соотношений (2)—(4), являются усредненными и не учитывают распределение температуры на поверхности катода. Предложенные выше рекомендации имеют большое практическое значение, однако для повышения стабильности работы газоразрядных пушек, а также для анализа энергетических параметров формируемого электронного пучка необходимы более точные оценки, учитывающие пространственное распределение температуры на поверхности катода. Это связано с тем, что рабочая температура катода оказывает существенное влияние на вторичную ионно-электронную эмиссию и на параметры генерируемого электронного пучка [12].

Для расчета пространственного распределения температуры в осесимметричных электродных системах ВТР, формирующих электронные пучки с точечным фокусом [3], следует решить уравнение теплопроводности, которое для анализируемых аксиально-симметричных систем записывается в цилиндрических координатах [6, 12]:

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho c_v T) = \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left(\lambda \frac{\partial T}{\partial r} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(\lambda \frac{\partial T}{\partial z} \right) + F(r, z), \quad (5)$$

где r, z — пространственные координаты; T — температура поверхности катода; λ и ρ — теплопроводность и плотность материала катода; c_v — его

объемная теплоемкость; $F(r, z)$ — плотность источников тепла. Уравнение (5) решается с учетом граничных условий, определяемых геометрией катодного узла и пространственным распределением неоднородных тепловых потоков [6].

Существует аналитическое решение двумерной тепловой задачи, позволяющее описать процесс охлаждения тонкого тела через массивное основание [6]. Это решение можно применить для расчета температуры поверхности плоского катода, охлаждаемого через массивное основание, т.е. для рассмотренной выше системы охлаждения I типа. С учетом граничных условий это решение имеет вид [12]

$$T_{\max} = \frac{W_{\kappa}(E_i(-kr^2) - E_i(-kR^2) - 2\exp(-kR^2)\ln(R))}{4\pi k\lambda_{\kappa}R^2} +$$

$$+ \frac{W_{\kappa}l_{\kappa}(\exp(-kr^2) - 1)}{\alpha\pi R^2} + \frac{W_{\kappa}\exp(-kR^2)\ln(R)}{2k\lambda_{\kappa}\pi R^2} + A\left(I_0\left(r\sqrt{\frac{\alpha}{\lambda_{\kappa}l_{\kappa}}}\right) - 1\right) + T_{\min},$$

$$T_{\min} = A + \frac{W_{\kappa}l_{\kappa}}{\pi R^2} + T_0,$$

$$A = \frac{\sqrt{\frac{\lambda_{\kappa}l_{\kappa}}{\alpha}} \left(\frac{W_{\kappa}(\exp(-kr^2) - \exp(-kR^2))}{2k\lambda_{\kappa}\pi R^2 r} + \frac{2W_{\kappa}kr l_{\kappa} \exp(-kR^2)}{\alpha\pi R^2} \right)}{I_1\left(r\sqrt{\frac{\alpha}{\lambda_{\kappa}l_{\kappa}}}\right)}, \quad (6)$$

$$E_i(-x) = \int_{-\infty}^{-x} \frac{\exp(t)}{t} dt, \quad I_{\nu}(z) = \left(\frac{z}{2}\right)^{\nu} \sum_{k=0}^{\infty} \frac{\left(\frac{z^2}{4}\right)^k}{k!\Gamma(\nu+k+1)}, \quad \Gamma(a) = \int_0^{\infty} e^{-t} t^{a-1} dt,$$

где T_{\max} — максимальная температура на периферии катода; T_{\min} — минимальная температура в центральной части катода; $E_i(-x)$ — интегральная показательная функция; r — радиус основания; $I_0(x)$ и $I_1(x)$ — модифицированные функции Бесселя первого рода нулевого и первого порядка; $\Gamma(a)$ — гамма-функция Эйлера; k — коэффициент сосредоточенности теплового потока.

В соотношениях (6) минимальная температура соответствует оси симметрии системы, или центральной части катодного узла, а максимальная

ная — периферийной области катода. Зависимость максимальной температуры катода от радиуса основания катодного узла для различных значений W_k приведена на рис. 2. При определении максимальной температуры поверхности катода в соответствии с соотношениями (6) радиус основания системы охлаждения необходимо подбирать так, чтобы максимальная температура катода не превышала $150\text{ }^\circ\text{C}$ (так же, как и при использовании формул (2)—(4)).

Оценки температуры поверхности катода, проводимые с использованием соотношений (6), имеют ограниченный характер и справедливы только для плоской геометрии катода при выполнении условий $l_k \ll r$ и $l_k \ll R$, при этом точность расчетов составляет 10—15 %. Для катодов с более сложной сферической геометрией, используемых в источниках электронов ВТР для формирования сходящихся электронных пучков с точечным фокусом [3, 4], такие оценки могут быть на 30—35 % меньше, в зависимости от радиуса сферы катода R_k [12]. Кроме того, уравнения (6) справедливы только для систем охлаждения I типа, а для систем охлаждения II и III типов аналитического решения уравнения теплопроводности (5) не существует.

Для более точных оценок температурных режимов работы охлаждаемого катода в источниках электронов ВТР необходимо использовать численные методы решения уравнения (5), которое с учетом специфики поставленной задачи значительно упрощается. В данном случае решается стационарная термодинамическая задача, в которой для анализируемых невысоких температур $\lambda_k(T) = \text{const}$, поэтому гиперболическое уравнение теплопроводности (5) сводится к более простому эллиптическому уравнению Пуассона. При решении задачи охлаждения катода был использован метод конечных элементов.

Численное решение уравнения теплопроводности для рассмотренных типов систем охлаждения [11], осуществлялось с использованием программы `pdetool`, входящей в состав программного комплекса `MatLab` [12]. Графические результаты расчетов для системы II типа приведены на рис. 3.

Предложенные методы расчета температуры поверхности катода различны по сложности реализации, адекватности описания процесса теплопередачи и точности моделирования. Для приближенных оценок при выборе способа охлаждения можно использовать упрощенные аналитические соотношения (2)—(4), однако точность расчета усредненной температуры поверхности катода при этом не будет превышать 50 %.

Для маломощных источников электронов при использовании системы охлаждения I типа максимальную температуру катода можно рассчитать согласно (6). При этом для плоского катода точность расчетов будет

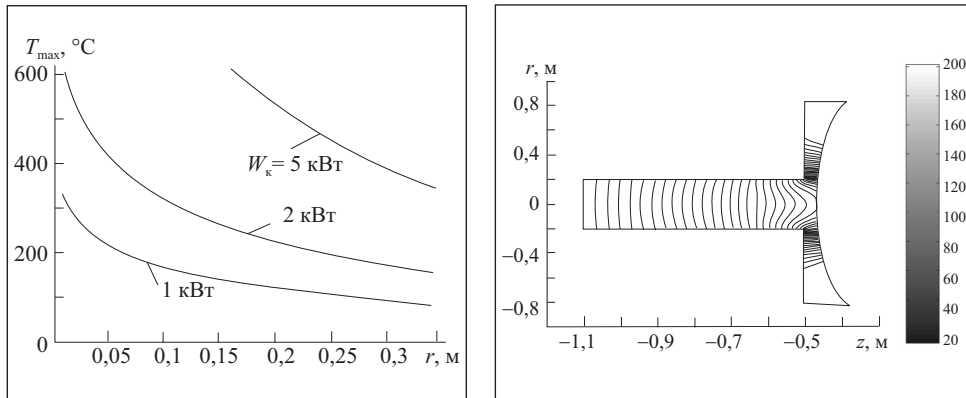


Рис. 2. Зависимость максимальной температуры катода от радиуса основания системы охлаждения

Рис. 3. Распределение температуры в системе с охлаждением катода через медное основание с зазором: $R_k = 0,8$ м; $R = 0,35$ м; $l_k = 0,01$ м; $l_s = 10^{-5}$ м; $T_0 = 10$ °С; $W_k = 1$ кВт

не ниже 15 %, а для сферической формы катода — не ниже 30 %. Для получения более точных оценок следует решать уравнения теплопроводности (5) с помощью средств современных математических САПР. Оценки температуры поверхности катода в электронных пушках ВТР имеют большое значение и используются для определения его эмиссионных свойств и энергетической эффективности.

Моделирование процесса распыления поверхности катода под воздействием ионной бомбардировки. Моделирование изменения геометрии катода в ВТР под воздействием его бомбардировки ионами основано на численном анализе баланса атомов металла и газа в прикатодной области с учетом процессов сорбции и десорбции газа. При этом для упрощения математической модели полагают, что процессы сорбции и десорбции независимы. Тогда для анализа процесса распыления металла можно использовать теорию неупругих соударений Резерфорда, в соответствии с которой число атомов, покидающих металл, составляет [5, 7, 8]

$$v_a = \sqrt{\frac{\varepsilon E_0}{E_d}} \sum_{n=1}^{n_c} \exp\left(-\left(\alpha_e \sqrt{n} + \frac{(n-1)\xi}{2}\right)\right). \quad (7)$$

Здесь $\alpha_e = k\beta$ — параметр, характеризующий вероятность вылета атома из металла; β — экспоненциальный коэффициент, характеризующий зависимость количества вылетающих из металла атомов от глубины их рас-

положения; k — коэффициент, характеризующий связь между глубиной проникновения иона и числом его соударений с атомами металла;

$$\varepsilon = \frac{2M_i M_m}{(M_i + M_m)^2}; \quad \xi = 1 - \frac{(M_i - M_m)^2}{2M_i M_m} \ln \frac{M_i + M_m}{M_i - M_m}; \quad n_c = \frac{\ln \frac{eE_0}{E_d}}{\ln \left(\frac{(M_i + M_m)^2}{M_i^2 + M_m^2} \right)}, \quad (8)$$

где M_i и M_m — молекулярная масса ионов газа и атомов металла; E_0 — начальная энергия первичного выбитого атома; n_c — число столкновений иона с атомами металла при его торможении с учетом рассеяния; $E_d = 2Ae^{-6,5} = 23$ эВ; n — число соударений иона с атомами металла. Тогда в соответствии с моделью распыления Булгакова коэффициент катодного распыления определяется из следующей системы уравнений [7, 8]:

$$S = 4\pi a^2 \left(\frac{\rho N_A}{M_m} \right)^{3/2} \frac{M_i (Z_i Z_m E_R)^2}{M_m E H} \left(1 - \exp \left(-N_0^{3/2} \sigma_s \sqrt{\left(\frac{4E_R M_i}{M_m E} \right)} \right) \right), \quad \sigma_s = \pi R_s^2, \quad (9)$$

где E — энергия ионов, бомбардирующих катод; Z_i и Z_m — порядковые номера атомов ионов и атомов металла в таблице элементов; N_A — постоянная Авогадро; N_0 — плотность атомов металла; E_R — энергия Ридберга; a — радиус первой орбиты электрона в соответствии с моделью Бора; σ_s — сечение рассеяния перемещенных атомов при их столкновениях с атомами решетки металла. Параметр R_s в (9) определяется численным решением неявным методом Эйлера следующей системы нелинейных уравнений:

$$\frac{\bar{E}}{2} = \frac{(eZ_m)^2}{R_s} \exp \left(-\frac{\sqrt{2} R_s Z_i^{1/3}}{a} \right); \quad \bar{E} = H \ln \left(\frac{4M_i E}{M_m H} \right), \quad (10)$$

где H — теплота сублимации металла [7, 8].

Толщина катодного слоя, распыленного под воздействием ионной бомбардировки, определяется из соотношений (7)—(10) и с учетом процессов десорбции и сорбции атомов рабочего газа имеет вид [5]

$$\tau = \frac{N_0}{\frac{j_i}{e} \left(S_i \left(1 + \frac{j_a}{j_i} \right) - 1 \right) + K_d \theta_p \exp \left(-\frac{q}{kT_p} \right) - \frac{a_e p (1 - \theta_p)}{\sqrt{2\pi k T_p m_p}}}, \quad (11)$$

где $N_0 = \rho l_k / m$ — число атомов в слое толщиной l_k на единице площади распыляемой поверхности; p — парциальное давление газа в области горения разряда; θ — степень покрытия поверхности атомами примеси в условных единицах; T_p — температура атомов газовой примеси; m_p — масса атомов примеси; K_d — коэффициент десорбции; q — энергия десорбции; j_i — плотность потока ионов на поверхности катода; j_a — плотность потока нейтральных атомов; S_i — коэффициент катодного распыления, вычисляемый из соотношений (9), (10).

Как свидетельствуют результаты моделирования, для реальных физических условий горения ВТР в знаменателе соотношения (11) можно не учитывать второе и третье слагаемые, описывающие процессы сорбции и десорбции атомов рабочего газа металлической поверхностью катода, поскольку эти величины на несколько порядков меньше первого слагаемого, которое определяет толщину катодного слоя, распыляемого под воздействием ионной бомбардировки [5].

Соотношения (7) — (11) использованы при анализе реальных электродных систем технологических электронных пушек для определения динамики изменения их энергетических и электронно-оптических параметров в процессе работы. При этом для моделирования движения и взаимодействия заряженных частиц в электрическом поле в соответствии с методикой, описанной в [4], использован метод недеформируемых трубок токов, основанный на методе интегральных уравнений.

Особенность данного моделирования состоит в том, что расчет распределения электрического поля и потоков частиц выполнен итерационно. При решении достаточно сложной самосогласованной электронно-оптической задачи было учтено изменение геометрии эмиссионной поверхности катода под воздействием бомбардирующих ее потоков частиц. При этом объем распыленного элементарного участка поверхности катода определен как $\Delta S l_k$, где ΔS — площадь участка поверхности катода, а l_k — его толщина.

Результаты моделирования свидетельствуют о том, что скорость изменения толщины распыленного слоя катода $d\tau / dt$ не превышает нескольких микрометров в минуту [5]. В результате моделирования получены зависимости фокальной плотности тока формируемого электронного пучка и его фокального диаметра от времени работы катода (рис. 4). Результаты моделирования, описывающие изменение геометрии поверхности катода с течением времени, приведены в работе [5].

Оценка энергетической эффективности катода. При оценке энергетической эффективности катодов технологических газоразрядных электронных пушек необходимо учитывать, что при физических условиях горе-

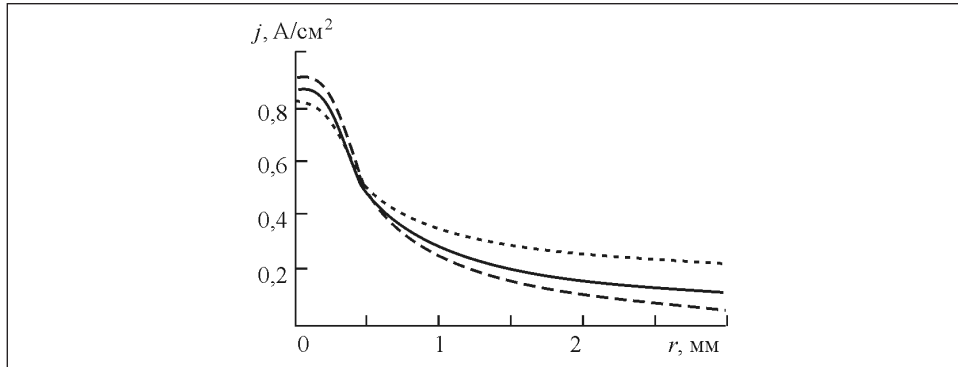


Рис. 4. Зависимости изменения фокальной плотности тока электронного пучка от времени при изменении геометрии поверхности катода: --- — в начале работы; — — через 20 А/ч; ····· — через 40 А/ч; ускоряющее напряжение — 10 кВ; рабочее давление — 8 Па

ния ВТР потери мощности в объеме разрядного промежутка составляют не более 1 % потребляемой мощности, т.е. основные энергетические потери происходят на электродах [10].

Соотношение для расчета ионного тока на поверхности катода с учетом перезарядки ионов на атомах остаточного газа имеет вид [1, 10]

$$j_i = \left(\frac{5}{3}\right)^{3/2} \frac{\varepsilon U_{\text{к.а}}^{3/2}}{6\pi d_{\text{к.а}}^{3/2}} \sqrt{\frac{e}{m_i p_{a0} \bar{Q}_{i0}}}, \quad (12)$$

где ε — диэлектрическая проницаемость газа; $U_{\text{к.а}}$ — ускоряющее напряжение; $d_{\text{к.а}}$ — размер разрядного промежутка; p_{a0} — приведенное давление в разрядном промежутке; \bar{Q}_{i0} — сечение перезарядок ионов на атомах остаточного газа. Поскольку, в соответствии с соотношением (12), перезарядки оказывают существенное влияние на энергетику ВТР, при анализе энергетики разряда кроме ионного тока необходимо учитывать поток ускоренных нейтральных атомов на поверхность катода [1, 10]:

$$j_n = \frac{j_i d_{\text{к.а}} p_{a0} \bar{Q}_{i0}}{e}, \quad (13)$$

где j_i — плотность тока ионов на катоде. Тогда баланс мощности на катоде, с учетом (12), (13), определяется следующими соотношениями [10]:

удельная мощность ионного потока на катоде —

$$W_i = \frac{j_i U_{\text{к.а}}}{d_{\text{к.а}} p_{a0} \bar{Q}_{i0}}; \quad (14)$$

удельная мощность потока нейтральных атомов —

$$W_n = \frac{j_i U_{\text{к.а}}}{2}; \quad (15)$$

суммарная удельная мощность, выделяемая на катоде, —

$$W_k = W_i + W_n = j_i U_{\text{к.а}} \frac{2 + d_{\text{к.а}} P_{a0} \bar{Q}_{i0}}{2 d_{\text{к.а}} P_{a0} \bar{Q}_{i0}}. \quad (16)$$

Удельная мощность, выделяемая на аноде ВТР,

$$W_a = j_e \mu_a U_{\text{к.а}}, \quad (17)$$

где j_e — плотность тока электронного пучка; μ_a — коэффициент отражения электронов от поверхности анода. Тогда энергетическую эффективность газоразрядного источника электронов можно определить из соотношения [10]

$$\eta = 1 - \frac{2 + k_d (1 + 2k_d \gamma_{\text{э.к}} \mu_a)}{2k_d (1 + \gamma_{\text{э.к}} k_d)}, \quad k_d = d_{\text{к.а}} P_{a0} \bar{Q}_{i0}, \quad (18)$$

где $\gamma_{\text{э.к}}$ — коэффициент вторичной ионно-электронной эмиссии для материала катода.

С учетом изложенного выражение для энергетической эффективности катода имеет вид [1]

$$H_{\text{э}} = \frac{I_{\text{э.к}}}{W_k} = \frac{d(\gamma_{\text{э.к}} U_{\text{к.а}})}{dU_{\text{к.а}}}, \quad (19)$$

где $I_{\text{э.к}}$ — ток электронов на поверхности катода.

Результаты выполненных расчетов свидетельствуют о том, что энергетическая эффективность газоразрядных пушек составляет 90 %, при этом 5 % потребляемой мощности выделяется на катоде, а 5 % — на аноде. Энергетическая эффективность катода зависит от тока разряда и изменяется в диапазоне 0,8—1,8 мА/Вт. Оценки баланса энергии в разрядном промежутке ВТР, выполненные по формулам (12)—(19), были использованы для расчета температуры поверхности катода и анализа распыления его поверхности под воздействием бомбардировки ионами и нейтральными атомами.

Выводы

Предложенная методика моделирования позволяет проводить комплексную оценку режимов работы охлаждаемых катодов в технологических газоразрядных электронных пушках. Для решения электронно-оптичес-

кой задачи использована комплексная методика моделирования, описанная в работе [4]. Основными преимуществами предложенной методики моделирования, описывающей физические условия работы охлаждаемого катода, являются ее комплексность и универсальность. Теплофизические и электрофизические параметры материала катода и рабочего газа, а также эмпирические коэффициенты, используемые в соотношениях (2)—(19), либо взяты из справочной литературы, либо вычислены с помощью аппроксимации экспериментальных данных [5, 10—12].

Из полученных результатов можно сделать вывод о том, что срок службы катодов в газоразрядных пушках зависит от мощности пушки и может составлять сотни ампер-часов. Причиной изменения электронно-оптических свойств электродных систем ВТР является неоднородность ионного потока на поверхности сферического катода, что при длительной эксплуатации приводит к существенному искажению геометрической формы его эмиссионной поверхности вследствие ее распыления.

Предложенная методика позволяет анализировать все основные физические процессы, протекающие в катодной области разрядного промежутка ВТР, с учетом их взаимосвязи. Полученные результаты представляют значительный практический интерес для специалистов, занимающихся проектированием и эксплуатацией электронно-лучевого технологического оборудования.

The procedure of simulation of physical processes taking place on the cathode surface in the glow discharge electron sources is considered. Calculation of temperature on the cathode surface, and to cathode sputtering under the ions bombarding has been performed. Energy efficiency of cold cathodes, used in high voltage gas discharge electron sources, is also considered.

1. *Плазменные процессы в технологических электронных пушках* / Завьялов М. А., Крейндель Ю. Е., Новиков А. А., Шантурин Л. П. — М.: Энергоатомиздат, 1989. — 256 с.
2. *Ладохин С. В., Левицкий Н. И., Чернявский В. Б. и др.* Электронно-лучевая плавка в литейном производстве. — Киев: «Сталь», 2007. — 605 с.
3. *Денбновецкий С. В., Мельник В. И., Мельник И. В., Тугай Б. А.* Газоразрядные электронные пушки и их применение в промышленности // *Электроника и связь. Тем. вып. «Проблемы электроники»*. Ч. 2. — Киев: Изд-во «Политехника», 2005. — С. 84—87.
4. *Мельник И. В., Тугай С. Б.* Методика моделирования технологических источников электронов высоковольтного тлеющего разряда // *Электрон. моделирование*. — 2010. — 32, № 6. — С. 31—43.
5. *Денбновецкий С. В., Мельник В. И., Мельник И. В., Тугай Б. А.* Моделирование влияния распыления катода на оптические свойства электродных систем высоковольтного тлеющего разряда // *Техническая электродинамика. Тем. вып. «Проблемы современной электротехники»*. — 2006. — Ч. 6. — С. 94—97.
6. *Исаченко В. П., Осипова В. А., Сукомел А. С.* Теплопередача. — М.: Энергоатомиздат, 1981. — 417 с.
7. *Плешивцев Н. В.* Катодное распыление. — М.: Атомиздат, 1968. — 347 с.

8. *Распыление* твердых тел под ионной бомбардировкой: Физическое распыление одномерных твердых тел. / Пер. с англ. под ред. Бериша Р. — М.: Мир, 1984. — 336 с.
9. Мельник И. В. Классификация моделей электронно-оптических систем с точки зрения методологии САПР // *Электроника и связь*. — 2007. — №2 (37). — С. 20—31.
10. Мельник И. В. Теоретические оценки влияния нагрева электродов и рабочего газа на энергетические параметры источников электронов высоковольтного тлеющего разряда. — *Электроника и связь*. — 2004. — 9, № 21. — С. 14—16.
11. Мельник В. И., Мельник И. В. Моделирование температурных режимов работы катода источников электронов высоковольтного тлеющего разряда на основе решения уравнения теплового баланса // *Вест. Херсонского национального технического университета*. — 2010. — Вып. 3 (39). — С. 311—315.
12. Мельник И. В., Тугай С. Б. Моделирование распределения температуры на поверхности холодного катода в источниках электронов высоковольтного тлеющего разряда // *Там же*. — 2011. — Вып. 3 (42). — С. 296—301.

Поступила 19.07.12

МЕЛЬНИК Игорь Витальевич, д-р техн. наук, доцент кафедры электронных приборов и устройств Национального технического университета Украины «Киевский политехнический ин-т». В 1989 г. окончил Киевский политехнический ин-т. Область научных исследований — моделирование электронно-лучевых технологических устройств, теория газового разряда, программирование и теория алгоритмов.

ТУГАЙ Сергей Борисович, аспирант кафедры электронных приборов и устройств Национального технического университета Украины «Киевский политехнический ин-т», который окончил в 2002 году. Область научных исследований — моделирование и проектирование электронно-лучевых технологических устройств, системы управления электронно-лучевым технологическим оборудованием.

