

УДК 533.9

А.И. ЦАГЛОВ, А.В. ЛОЯН, Е.П. СОЛОНИНКО

*Национальный аэрокосмический университет им. Н.Е. Жуковского «ХАИ», Украина***МИНИМИЗАЦИЯ ТЕМПЕРАТУРНОЙ НЕРАВНОМЕРНОСТИ ПОВЕРХНОСТИ ИССЛЕДУЕМОГО ОБРАЗЦА ПРИ ИСПЫТАНИЯХ ЭМИТТЕРОВ КАТОДОВ ЭРД**

*В статье приводится конструкция устройства для испытания эмиттеров катодов ЭРД в диодном режиме. Представлена разработанная конечно-элементная модель испытательного устройства, смоделировано тепловое состояние элементов конструкции в номинальном рабочем режиме. Показано, что при испытаниях эмиттеров имеется значительная температурная неоднородность эмиссионной поверхности образца, которая вносит дополнительную погрешность в результаты измерений и расчётов эмиссионных свойств материала. Результаты моделирования выявили неравномерность температуры эмиттирующей поверхности в 10-12°K, что приводит к росту неравномерности по плотности эмиссионного тока до 40-50 %.*

**Ключевые слова:** *безнакальный полый катод, конечно-элементная модель, эмиттер.*

**Введение**

В большинстве случаев наиболее критичным элементом электроактивной двигательной установки является катод, определяющий ресурс, эффективность и логику запуска двигателя. В свою очередь эмиттер - наиболее критичный элемент катода, определяющий его эффективность и ресурс. При этом эмиттер и узел его крепления являются наиболее теплонпряженными деталями катода [1].

Главными характеристиками материала эмиттера есть работа выхода, максимальная плотность тока, стойкость к отравлению и ионной бомбардировке. Поэтому исследование этих свойств является задачей, решение которой необходимо для дальнейшего совершенствования катодов ЭРД. В тоже время отсутствие методики исследования эмиттеров, работающих в газовых средах, заставляет проводить работы в высоковакуумном диодном режиме, а затем экстраполировать результаты на газоразрядный режим. Естественно, что в процессе исследований возникают ошибки, связанные как с погрешностью измерений физических величин (тока, напряжения, температуры), так и с погрешностями отношений реальных объектов от идеализированных. К таким можно отнести погрешности установки образца, отклонение от однородной температуры и др.

Поэтому задача определения распределения температуры по поверхности эмиссионного образца является необходимой для оценки погрешности этого типа и её минимизации.

Данная работа посвящена анализу погрешностей измерения за счет температурной неравномерности эмиттирующей поверхности исследуемого образца при испытаниях в диодном режиме.

Объектом исследования является тепловое состояние конструкции печи для испытания эмиттеров и непосредственно самого испытываемого образца.

Таким образом, цели работы являются следующими:

1. Рассчитать распределение температуры в конструкции устройства для испытаний эмиттеров.
2. Выявить степень неравномерности распределения температуры по рабочей поверхности эмиттера при его испытаниях.
3. Сделать выводы о необходимости совершенствования конструкции устройства.

**Описание экспериментального устройства**

Описание конструкции устройства для испытания образцов эмиссионных материалов проводилось на специализированном стенде, подробно рассмотренном в [2].

Устройство для испытания эмиттеров (рис. 1) состоит из нагревательного элемента (6), который крепится к трем молибденовым ножкам (5), эмиттера (1), расположенного над нагревателем, который крепится тремя стержнями (4) изготовленными из молибдена, анодного блока (2) - расположенного над эмиттером в специальном креплении (3, из Мо) и керамических колец (8, 9, 10), выполняющих роль изоляторов, соединяемых между собой металлическими шпильками (7). Стержни, соединяющие керамическую основу катодного и анодного блоков, изготовлены из молибдена. Благодаря этому величина зазора между диафрагмой анода и эмиттером остается неизменной в процессе нагрева образца до различных температур.

Между нагревателем и керамической шайбой предусмотрен блок торцевых экранов (12). На керамической основе также расположены экраны (11), способствующие снижению тепловых потерь, а также уменьшению теплового потока на остальные элементы конструкции [2].

В конструкции печи были использованы следующие материалы:

- Вольфрам – нагреватель, анод, экраны, державка эмиттера;
- Молибден – анодная трубка, держатель эмиттера;
- МР47ВП – токоотводы нагревателя;
- ВК94-1 – керамические кольца;
- 29НК – токоподвод анодный.

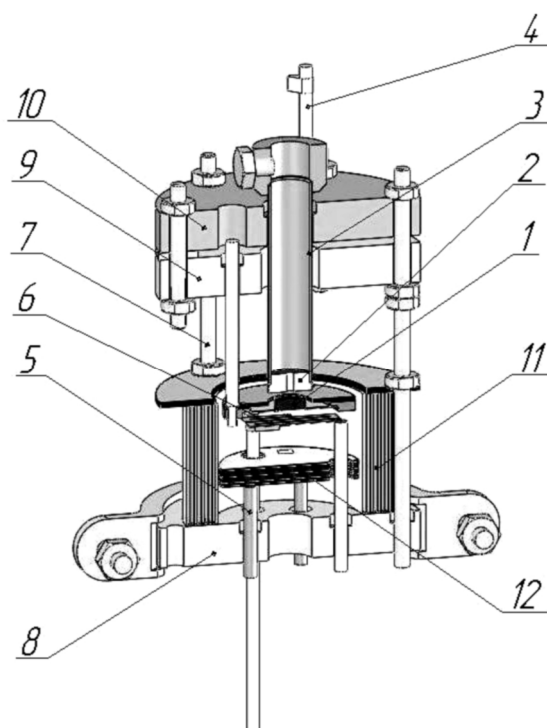


Рис. 1. Устройство для испытаний эмиттеров

Экспериментальными измеренными рабочими параметрами, необходимыми для моделирования теплового состояния печи являются следующими:

- Тепловая мощность нагревателя – 90 Вт
- Температура эмиттера – 1400 °К.

### Моделирование теплового состояния

Моделирование теплового состояния печи проводилось методом конечных элементов, реализованном в программном пакете – ANSYS Workbench.

Для уменьшения расчетного времени и при учете частичной осевой симметрии использовался сектор (120°) от конечно-элементной модели испытательной печи эмиттеров.

Также в конструкцию модели были введены следующие упрощения:

1. Экранно-вакуумная изоляция была заменена на одиночные экраны с расчетом степени черноты одиночного экрана по следующей формуле [3]:

$$\varepsilon_2 = \frac{\varepsilon_1}{n+1}, \quad (1)$$

где  $n$  – начальное количество экранов;  $\varepsilon_1$  – степень черноты экрана сборки экранно-вакуумной изоляции,  $\varepsilon_2$  – степень черноты модельного одиночного экрана.

2. Форма нагревателя была заменена на цилиндрическую. Тепловой поток на нагреватель задавался удельной величиной.

3. Из модели были изъяты конструкционные шпильки (рис. 1, № 4), находящиеся в отдалении от нагревателя.

Расчетная модель печи для испытания эмиттеров с обозначением места приложения тепловой нагрузки представлена на рис. 2.

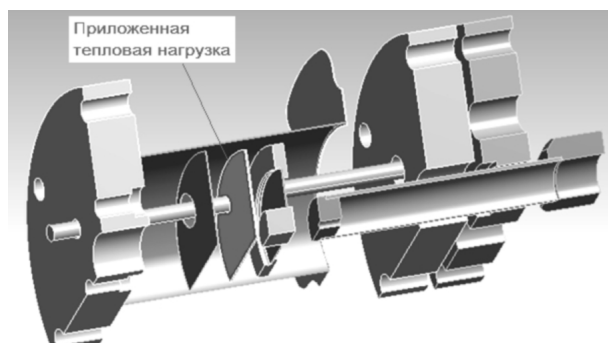


Рис. 2. Расчетная твердотельная модель печи для испытания эмиттеров

Свойства материалов представлены в табл. 1 [4]. Свойства эмиттера заданы согласно проведенных расчетов, подробно описанных в [5].

Таблица 1

Теплофизические свойства материалов для конечно-элементной печи

	Теплопроводность, $\lambda$ , Вт/(м·К)	Степень черноты, $\varepsilon$
<b>Вольфрам</b> Анод/нагреватель	110	0,24/0,86
<b>Молибден</b>	160	0,17
<b>29НК</b>	25	0,45
<b>МР47ВП*</b>	100	0,45
<b>ВК94+</b>	7,5..9	0,8
<b>Эмиттер</b>	40	0,8
<b>Экраны (W)</b>	110	0,024..0,048

С учетом стационарности решаемой задачи, представляется допустимым задание теплофизических свойств материалов, не зависящих от температуры, но по величине соответствующим свойствам

материалов при рабочих температурах. В рассматриваемых относительно узких диапазонах температуры теплофизические характеристики материалов практически постоянны, поэтому и в модели они заданы также постоянными.

В качестве нагрузок в модели используются тепловые потоки и радиационный теплообмен.

Рассчитанное распределение температуры по конструкционным элементам устройства для испытания эмиттеров представлено на рис. 3.

Рассчитанная интегральная температура эмиттера составила около 1120°C, что близко к экспериментальным значениям (отклонения менее 5 %).

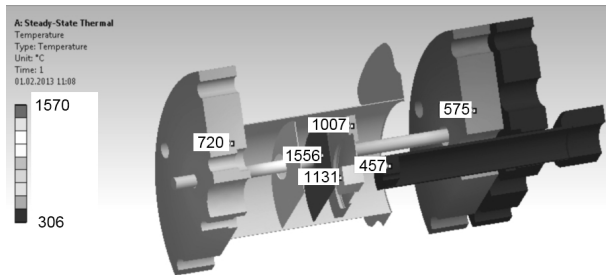


Рис. 3. Распределение температуры по конструкции

Распределение температуры по радиусу эмиттера, на стороне, обращенной к аноду, представлено на рис. 4.

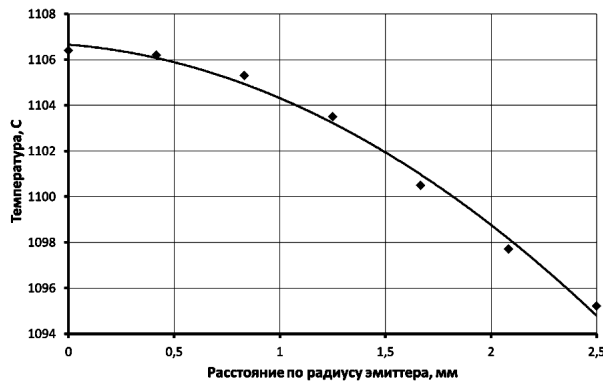


Рис. 4. Распределение температуры по радиусу эмиттера

Очевидно, что неравномерность распределения температуры по эмиссионной поверхности испытуемого образца составила 8 – 12°C, что находится в рамках погрешности измерения пирометра ЛОП-72 и не может быть измерено экспериментально.

### Анализ результатов и выводы

Кажущаяся малость градиента температуры по поверхности эмиттера на самом деле очень обманчива. Покажем это на простом примере. Рассчитаем

отношение тока эмиссии для начальной температуры  $T_1$  и  $T_1 + \delta T$ . Для этого воспользуемся формулой Ричардсона-Дешмана:

$$j = AT^2 \exp\left(-\frac{e \cdot \phi}{nT}\right), \quad (2)$$

где  $j$  – плотность тока;  $T$  – температура эмиттера;  $A$ ,  $e$ ,  $n$  – постоянные,  $\phi$  – работа выхода.

Тогда соотношение токов определяется следующим выражением:

$$\theta = \frac{j_2(T_1 + \delta T)}{j_1(T_1)} = \exp\left[\phi \cdot \left(\frac{1}{T_1} - \frac{1}{T_1 + \delta T}\right)\right]. \quad (3)$$

На основании приведенных зависимостей построим графики  $\theta(T)$  для  $\phi = 2$  и различных значений температуры 1200, 1400 и 1600°K (рис. 5).



Рис. 5. Зависимости разности плотности тока эмиссии от температурной неравномерности поверхности

Очевидно, что различие эмиссионного тока с поверхности испытуемого образца может достигать 40-50 % и более.

В результате проделанной работы показано:

1. Разработанная модель позволяет рассчитать поле температур экспериментального устройства для определения эмиссионных свойств с точностью не хуже 5 %.
2. Для конструкции экспериментального устройства неравномерность температуры по поверхности образца может достигать 10-12°K.
3. Указанная неоднородность температуры может приводить к неравномерности эмиссионного тока до 50 %.
4. Существенная неоднородность эмиссионного тока требует либо оптимизации конструкции экспериментального устройства с целью минимизации температурной неоднородности испытуемого образца либо учета в методике обработки экспериментальных данных.

### Литература

1. Кошелев, Н. Н. Моделирование стартового нагрева безнакального катода-компенсатора для микро СПД [Текст] / Н.Н. Кошелев, А.И. Цаглов, В.А. Федотенко // *Авиационно-космическая техника и технология*. – 2005. – № 65. – С. 116-120.

2. Лоян, А.В. Предварительные испытания La-B-Sc эмиттеров катодов ЭРД [Текст] / А.В. Лоян, Н.Н. Кошелев, Е.П. Солонинко, Е.Г. Агеева // *Авиационно-космическая техника и технология*. – 2010. – № 8(75). – С. 68-72.

3. Гребер, Г. Основы учения о теплообмене

[Текст] / Г. Гребер / под ред. А.А. Гухмана. - М.: Изд-во иностранной литературы, 1958. – 566 с.

4. Андреева, Р.Т. Свойства и применение металлов и сплавов для электровакуумных приборов: справочное пособие [Текст] / Р.Т. Андреева, С.И. Ипатова, Н.С. Розилова. – М.: Энергия, 1973. – 336 с.

5. Лоян, А.В. Расчетный способ определения эффективной теплопроводности металлопористых эмиттеров катодов ЭРД [Текст] / А.В. Лоян, М.Ю. Титов, Е.П. Солонинко // *Авиационно-космическая техника и технология*. – 2013. – № 7 (104). – С. 112-116.

Поступила в редакцию 10.06.2013, рассмотрена на редколлегии 14.06.2013

**Рецензент:** д-р техн. наук, проф., проф. кафедры А.И. Оранский, Национальный аэрокосмический университет им. Н. Е. Жуковского «ХАИ», Харьков.

### МІНІМІЗАЦІЯ ТЕМПЕРАТУРНОЇ НЕРІВНОМІРНОСТІ ПОВЕРХНІ ДОСЛІДЖУВАНОВОГО ЗРАЗКА ПРИ ВИПРОБУВАННЯХ ЕМІТЕРІВ КАТОДІВ ЕРД

*О.І. Цаглов, А.В. Лоян, Є.П. Солонинко*

У статті наводиться конструкція пристрою для випробування емітерів катодів ЕРД в діодному режимі. Представлена розроблена кінцево-елементна модель випробувального пристрою, змодельовано тепловий стан елементів конструкції в номінальному робочому режимі. Показано, що при випробуваннях емітерів є значна температурна неоднорідність емісійної поверхні зразка, яка вносить додаткову похибку у результати вимірювань і розрахунків емісійних властивостей матеріалу. Результати моделювання виявили нерівномірність температури емісійної поверхні у 10-12°K, що призводить до зростання нерівномірності густини емісійного току до 40-50 %.

**Ключові слова:** безнакальний порожнистий катод, кінцева-елементна модель, емітер.

### REDUCTION OF TEST SAMPLE SURFACE TEMPERATURE NONUNIFORMITY DURING ELECTRIC PROPULSION CATHODE'S EMITTERS TESTING

*A.I. Tsaglov, A.V. Loyan, E.P. Soloninko*

The article presents the design of electric propulsion cathode's emitters testing device in diode mode. The developed finite element model of the test device is presented, simulated the temperature distribution of the structural elements in the nominal operating conditions. It is shown that during emitters testing there is a significant temperature nonuniformity of the sample emission surface, which introduces additional uncertainty in the results of measurements and calculations of the emission properties of the material. Simulation results had shown nonuniformity of emission surface 10-12°K, which allows to increasing of emission current density nonuniformity up to 40-50 %.

**Keywords:** heaterless hollow cathode finite element model, the emitter.

**Цаглов Александр Игоревич** – аспирант каф. 401 Национального аэрокосмического университета им. Н.Е. Жуковского «ХАИ», Харьков, Украина, e-mail: A.Tsaglov@ukr.net.

**Лоян Андрей Витальевич** – канд. техн. наук, ст. науч. сотр. каф. 401, начальник отдела ЭРДУ МНТЦ КЭД Национального аэрокосмического университета им. Н.Е. Жуковского «ХАИ», Харьков, Украина, e-mail: A.Loyan@khai.edu.

**Солонинко Евгений Павлович** - аспирант каф. 401 Национального аэрокосмического университета им. Н.Е. Жуковского «ХАИ», Харьков, Украина.