

УДК 533.9.07

А. И. ЦАГЛОВ, А. В. ЛОЯН, О. П. РЫБАЛОВ

*Национальный аэрокосмический университет им. Н. Е. Жуковского «ХАИ», Украина***МОДЕРНИЗАЦИЯ КОНСТРУКЦИИ КАТОДНО-НАГРЕВНОГО УЗЛА СТЕНДА ДЛЯ ИСПЫТАНИЙ ЭМИТТЕРОВ КАТОДОВ ЭРД**

В статье описано разработанное устройство для испытаний эмиттеров катодов ЭРД, приведены выявленные в ходе моделирования недостатки конструкции, а именно неравномерность распределения электрического и температурного полей по поверхности исследуемого образца, которая приводит к значительным погрешностям расчета плотности эмиссионного тока. Описаны пути модернизации стенда, которые позволяют снизить указанную погрешность до уровня менее 8 % в рабочем диапазоне температур 1200..1600°K. Показано, что реализация в конструкции устройства рекомендованных изменений привела к ожидаемым результатам. Проведенные исследования позволили создать высокоточный безинерциальный комплекс для исследования эмиссионных материалов катодов ЭРД, отвечающий всем современным требованиям.

Ключевые слова: безнакальный полый катод, эмиттер, нагревательный элемент.

Введение

Наиболее критичным элементом полого катода является эмиттер, изготовленный из термоэмиссионного материала и определяющий характеристики и ресурс катода в целом. Катод в свою очередь влияет на основные параметры электроракетного двигателя (ЭРД) и двигательной установки.

Поэтому вопрос исследования эмиссионных материалов для эмиттеров катодов ЭРД с целью разработки эмиттера с наилучшими параметрами, а именно: с низкой работой выхода, высокой плотностью тока, стойкостью к ионному распылению и отравлению, является актуальным.

В отделении ЭРД ХАИ разработка и совершенствование полых катодов и плазменных двигателей [1] неотъемлемо включали в себя работы по исследованию эмиссионных материалов для эмиттеров, технология изготовления которых базируется на пропитке вольфрамовой матрицы активной компонентой (скандат либо алюминат бария) [2].

Проведение таких исследований включает в себя необходимость разработки экспериментальной стендовой базы, позволяющей измерять характеристики эмиттеров с минимальными погрешностями и адекватно согласовывать данные испытаний, полученные в диодном режиме, с экспериментальными характеристиками при работе эмиттера в составе катода ЭРД.

В отделении ЭРД ХАИ для этих целей был разработан и укомплектован специальный стенд [2], позволяющий проводить испытания эмиттеров в диодном режиме.

Однако в процессе работы стенда был выявлен его недостаток – низкая точность расчета величины

плотности эмиссионного тока вследствие неравномерности распределения температуры и электрического поля по эмитирующей поверхности образца.

Целью данной работы являлось определение путей модернизации конструкции устройства для испытаний эмиттеров с целью получить погрешность расчета плотности эмиссионного тока ниже 10 % в диапазоне рабочих температур 1200..1600°K, модернизация стенда и испытания исследуемого образца.

Предпосылки модернизации

Стенд для испытания эмиттеров катодов ЭРД (рис. 1) состоит из вакуумной камеры (1), давление в которой измеряется при помощи термоэмиссионного и термометрических преобразователей (2,3). Предварительная откачка камеры осуществляется при помощи роторного насоса 2НВР-5ДМ (6) и при необходимости паромасляного насоса (5), отсекаемых от камеры клапаном (4). Откачка камеры до высокого вакуума (10^{-7} торр) обеспечивается магниторазрядным насосом типа НОРД (7).

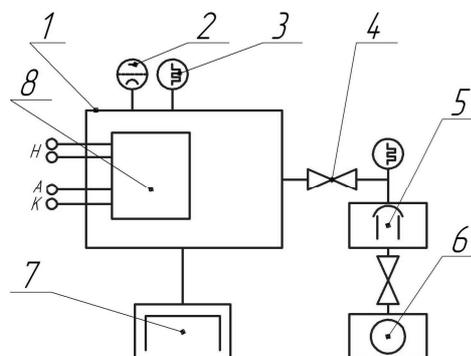


Рис. 1 ПГС схема испытательного стенда

Устройство для испытания эмиттеров или как иначе его можно назвать, катодно-нагревный узел стенда (8), размещено внутри вакуумной камеры. Через гальванически развязанные токовводы осуществляется подача потенциала на катод (К) и анод (А), а также питание нагревательного элемента (Н).

Устройство для испытания эмиттеров (рис. 2) состоит из нагревателя (6), который крепится к трем ножкам (5), эмиттера (1), расположенного над нагревателем крепящегося с помощью опор (4), анодного блока (2) - расположенного над эмиттером в специальном креплении (3) 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].

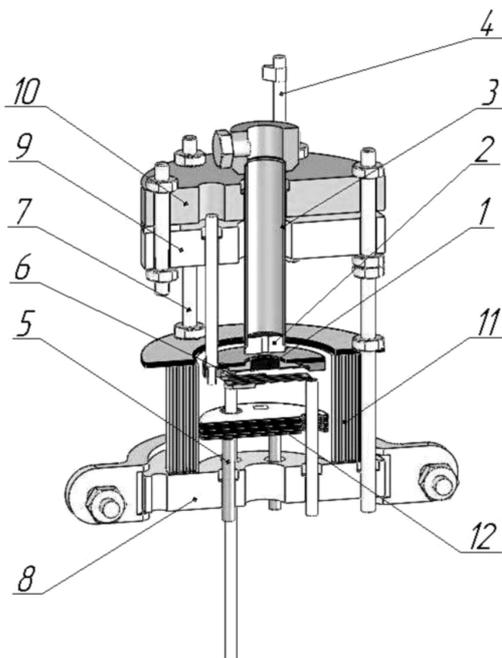


Рис. 2 Конструкция устройства для испытания эмиттеров катодов ЭРД

Более подробно конструкция устройства для испытания эмиттеров и всего стенда рассмотрена в работе [3].

Для адекватного моделирования тепловых процессов в устройстве и в катодах был разработан специальный расчетный способ, позволивший определить зависимость теплопроводности эмиттера от

рабочей температуры [4].

Для обеспечения возможности сравнения данных, полученных в ходе испытаний эмиттера в диодном режиме, с характеристиками эмиттера при работе в составе катода ЭРД была проведена серия исследований по определению распределения тепловых потоков в конструкции катода при различных разрядных токах [5].

Для снижения временных затрат на исследование эмиссионных материалов была разработана методика расчета вольт-амперных характеристик (ВАХ) диодного промежутка в режиме одного импульса [6], учитывающая реактивную составляющую цепи, адекватным образом описывающая измеренные ВАХ и позволяющая исследовать характеристики образца как в импульсном, так и в стационарном режимах работы.

Для проверки адекватности измерений параметров эмиттеров была проведена серия моделирований устройства для испытания эмиттеров методом конечных элементов в программном пакете ANSYS, а именно, моделирование распределения электрических и температурных полей на рабочей поверхности эмиттера.

Результаты моделирования распределения электрических полей в промежутке катод – анод (рис. 3) показали наличие существенной неравномерности [7].

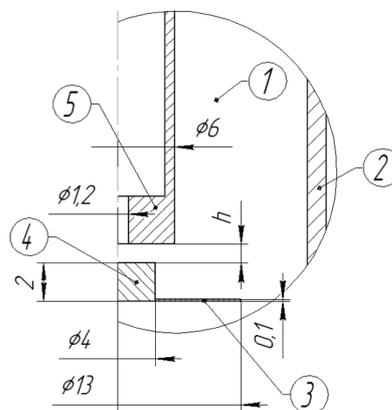


Рис. 3. Геометрическая модель узла «анод-эмиттер»: 1 – окружающее пространство (вакуум); 2 – металлическая стенка; 3 – экран; 4 – эмиттер; 5 – анод

Проведенные исследования позволили сформулировать следующие выводы [7]:

1. Форма и размеры элементов узла «анод-эмиттер» в значительной степени влияют на равномерность распределения напряженности электрического поля (E) по поверхности эмиттера.

2. Для повышения равномерности распределения E необходимо устранять эффект концентрации напряженности электрического поля на краях эмиттера. Для данной конфигурации узла этого можно

добиться, установив металлический экран в уровень с рабочей поверхностью эмиттера. Кроме того необходимо устанавливать экран без зазора к эмиттеру.

3. Приемник электронного тока (анод) должен быть большим в диаметре, чем диаметр эмиттера как минимум в 2-3 раза.

4. Для данной конфигурации устройства расстояние между анодом и эмиттером должно быть 2...3 мм.

Результаты моделирования распределения температурных полей показали, что [8]:

1. 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.

2. Указанная неоднородность температуры может приводить к неравномерности расчёта плотности эмиссионного тока до 50 % и выше.

3. Существенная неоднородность эмиссионного тока требует оптимизации конструкции экспериментального устройства.

Модернизация конструкции

Для определения путей совершенствования конструкции стенда была проведена серия моделирований тепловых полей новой конструкции узла «анод-эмиттер» (рис. 4), учитывающей все полученные ранее рекомендации [7,8].

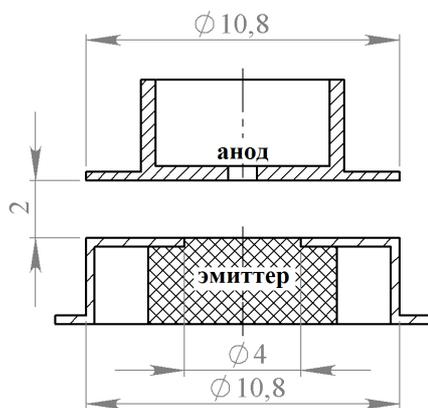


Рис. 4 Усовершенствованная конструкция узла эмиттер-анод

Для обеспечения равномерности распределения электрического поля был увеличен диаметр анода, крепежное кольцо (держатель эмиттера) было расположено вровень с эмиссионной поверхностью исследуемого образца без зазора. Для обеспечения температурной равномерности эмиссионной поверхности исследуемого образца была изменена его форма. Диаметр исследуемого образца со стороны нагревателя был увеличен с 5 до 6 мм. А

диаметр со стороны анода был уменьшен до 4 мм за счет выточки под крепежное кольцо. Это позволило увеличить площадь контакта между исследуемым образцом и крепежным кольцом с целью снижения температурных градиентов на эмиссионной поверхности (рис. 4).

Результаты теплового моделирования усовершенствованной конструкции устройства для испытаний эмиттеров при мощности нагревателя 90 Вт представлены на рис. 5.

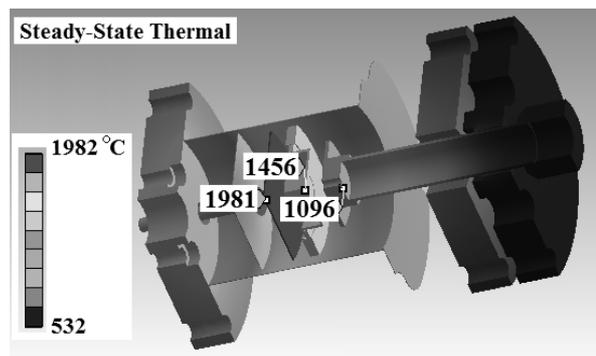


Рис. 5 Распределение температуры по конструкции устройства после усовершенствования

На рис. 6 представлены зависимости критерия неравномерности температуры эмиссионной поверхности образца от радиального положения при различных мощностях нагревателя.

В качестве критерия неравномерности (K) температуры поверхности вдоль радиуса исследуемого образца было принято отношение максимальной температуры на центральной оси к температуре поверхности в рассматриваемой точке на радиусе:

$$K = \frac{T_{\max}}{T(R_{\text{эм}})} \quad (1)$$

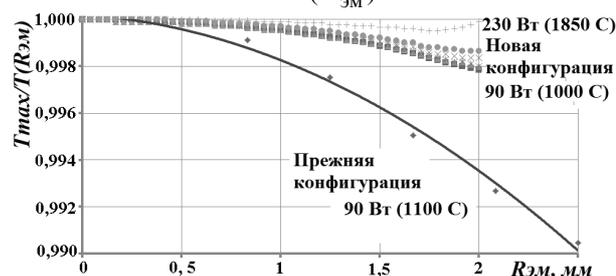


Рис. 6 Степень неравномерности температур эмиссионной поверхности исследуемого образца при различных конструкциях узла «эмиттер-анод»

Как видно из представленных данных (рис. 6), температурная неравномерность эмиссионной поверхности образца составила не более 0.998, что соответствует разбросу менее 2° и диапазону рабочих температур 1200...1600°K, что приводит к погрешности расчета плотности эмиссионного тока 4...8 %.

Результаты испытаний

После изготовления необходимых элементов и модернизации конструкции катодно-нагревного узла стенда экспериментальным путем были исследованы температурные характеристики устройства и эмиссионные характеристики опытного образца

На рис. 7 представлена зависимость температуры эмиттера от подаваемой на нагреватель электрической мощности. Температура эмиттера измерялась при помощи пирометра ЛОП-72 через специальное смотровое окно.

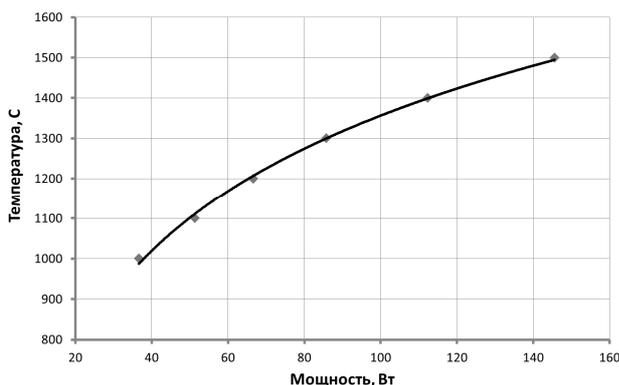


Рис. 7. Зависимость температуры эмиттера от подаваемой на нагреватель мощности

Результаты исследования зависимости температуры эмиттера от подаваемой на него мощности позволили выявить рабочий диапазон мощностей нагревателя, составивший 35-150 Вт в диапазоне температур 1000-1500°С.

В ходе проверки стенда были исследованы характеристики опытного образца – эмиттера, изготовленного из прессованного вольфрамового порошка со специальной пропиткой на основе алюмината бария. Результаты испытаний эмиттера представлены на рис 8 и 9.

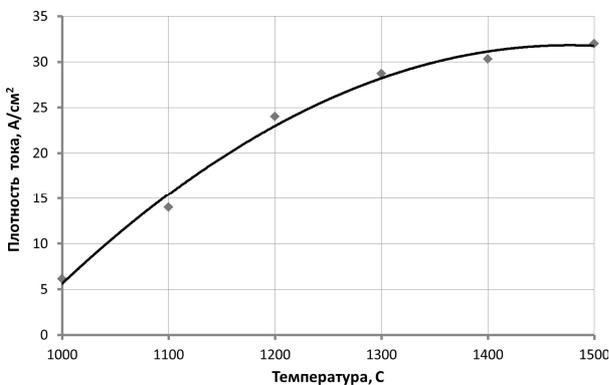


Рис. 8. Зависимость плотности эмиссионного тока эмиттера от его температуры

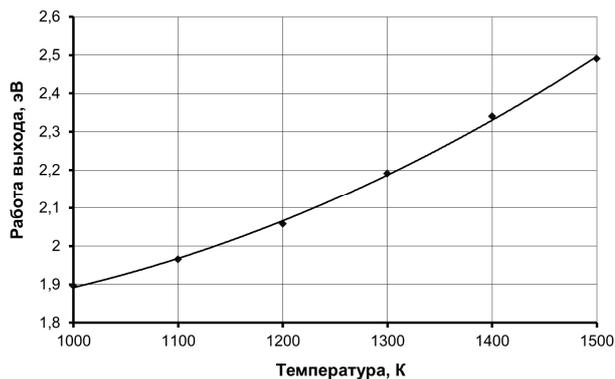


Рис. 9. Зависимость работы выхода эмиттера от температуры

Проведенные экспериментальные исследования подтвердили работоспособность модернизированной конструкции в установленных температурных режимах.

Выводы и дальнейшие перспективы

В результате проделанной работы показано:

1. Разработанные модели позволяют рассчитать поля температур и электрических полей в конструкции экспериментального устройства для определения эмиссионных свойств с точностью не хуже 5 %.
2. Для усовершенствованной конструкции катодно-нагревного узла стенда неравномерность распределения температуры и электрического поля по поверхности исследуемого образца составила не более 2°%.
3. Указанная неоднородность температуры обеспечивает погрешность расчета плотности эмиссионного тока менее 4..8% в рабочем диапазоне температур 1200...1600°К.
4. Усовершенствованная конструкция устройства для испытания эмиттеров обеспечивает высокую степень равномерности распределений температуры и электрического поля по рабочей поверхности исследуемого эмиссионного образца в широком диапазоне рабочих температур.
5. Создан универсальный безынерционный стенд для исследования эмиттеров катодов ЭРД, позволяющий качественно, при минимальных погрешностях, измерять параметры эмиссионных материалов.

Литература

1. Koshelev, N. N. Investigation of Hollow Cathode for Low Power Hall Effect Thruster [Text] / N.N. Koshelev, A.V. Loyan // IEPC. – Italy, 2007. – Vol. 103, No 2. – P. 17-24.
 2. Предварительные испытания La-B-Sc эмиттеров катодов ЭРД [Текст] / А. В. Лоян,

Н. Н. Кошелев, Е. П. Солонинко [и др.] // *Авиационно-космическая техника и технология*. – 2010. – № 8 (75). – С. 68-72.

3. Солонинко, Е. П. Измерительный безинерциальный комплекс для определения эмиссионных свойств термоэмиссионных материалов [Текст] / Е. П. Солонинко // *Радиоэлектронные и компьютерные системы*. – 2013. – № 2 (61). – С. 24-30.

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

5. Исследование распределения тепловых потоков в конструкции безнакального полого катода ЭРД при рабочих токах до 50 А [Текст] / А. В. Лоян, Н. Н. Кошелев, А. И. Цаглов [и др.] // *Авиационно-*

космическая техника и технология. – 2013. – № 10 (107). – С. 42-46.

6. Лоян, А. В. Расчет вольт-амперных характеристик диодного промежутка в режиме одного импульса при испытаниях эмиттеров катодов электрореактивных двигателей [Текст] / А. В. Лоян, Е. П. Солонинко // *Авиационно-космическая техника и технология*. – 2013. – № 4 (101). – С. 83-88.

7. Лоян, А. В. Минимизация неоднородности электрического поля при испытаниях эмиттеров катодов ЭРД [Текст] / А. В. Лоян, М. Ю. Титов, Е. П. Солонинко // *Авиационно-космическая техника и технология*. – 2013. – № 8 (105). – С. 206-210.

8. Цаглов, А. И. Минимизация температурной неравномерности поверхности исследуемого образца при испытаниях эмиттеров катодов ЭРД [Текст] / А. И. Цаглов, А. В. Лоян, Е. П. Солонинко // *Авиационно-космическая техника и технология*. – 2013. – № 9 (106). – С. 258-261.

Поступила в редакцию 8.06.15, рассмотрена на редколлегии 17.06.2015

Рецензент: д-р техн. наук, проф., декан физико-технического факультета А. Н. Петренко, Днепрпетровский национальный университет имени Олеся Гончара, Днепрпетровск.

МОДЕРНІЗАЦІЯ КОНСТРУКЦІЇ КАТОДНО-НАГРІВНОГО ВУЗЛА СТЕНДУ ДЛЯ ІСПИТІВ ЕМІТЕРІВ КАТОДІВ ЕРД

О. І. Цаглов, А. В. Лоян, О. П. Рибалов

У статті надано опис розробленого пристрою для випробувань емітерів катодів ЕРД, наведено виявлені у ході моделювання недоліки конструкції, а саме нерівномірність розподілу електричного і температурного полів по поверхні досліджуємого зразка, що призводить до значних похибок розрахунку щільності емісійного струму. Описано шляхи модернізації стенду, що дозволяють знизити вказану похибку до рівня менш ніж 8 % у робочому діапазоні температур 1200..1600°К. Показано, що реалізація у конструкції пристрою рекомендованих змін призвела до очікуваних результатів. Проведені дослідження дозволили створити високоточний безінерційний комплекс для дослідження властивостей емісійних матеріалів катодів ЕРД, що відповідає усім сучасним вимогам.

Ключові слова: безнакальний порожнистий катод, емітер, нагрівний елемент.

MODERNIZATION OF CATHODE-HEATER ASSEMBLY FOR CATHODES EMITTERS TESTING STAND

A. I. Tsaglov, A. V. Loyan, O. P. Rubalov

In article is described developed device for electric propulsion cathode's emitters testing. It is shown detected during modeling disadvantages of construction, notably nonuniformity of electric and temperature fields across surface of investigated sample, which leads to significant error of emission current density calculation. Paths of device modernization, which allow reducing defined error to the level less than 8 % in the range of working temperatures 1200.. 1600°K, are described. It is shown, that realization of recommended changes in a device construction is adduced to expected results. Carried out investigation are allowed to design high accuracy inertialess complex for characteristics of electric propulsion cathodes emission materials investigation, which is responded for all today requirements.

Key words: heaterless hollow cathode, emitter, heater element.

Цаглов Александр Игоревич – канд. техн. наук, ст. науч. сотр. каф. 402, Национальный аэрокосмический университет им. Н. Е. Жуковского «ХАИ», Харьков, Украина, e-mail: a.tsaglov@khai.edu.

Лоян Андрей Витальевич – канд. техн. наук, ст. науч. сотр. каф. 402, начальник отдела ЭРДУ МНТЦ КЭД, Национальный аэрокосмический университет им. Н. Е. Жуковского «ХАИ», Харьков, Украина, e-mail: a.loyan@khai.edu;

Рибалов Олег Петрович – мл. науч. сотр. каф. 401, Национальный аэрокосмический университет им. Н. Е. Жуковского «ХАИ», Харьков, Украина.