

ТЕПЛОВЫЕ, ЭЛЕКТРОРАКЕТНЫЕ ДВИГАТЕЛИ И ЭНЕРГОУСТАНОВКИ ЛЕТАТЕЛЬНЫХ АППАРАТОВ

УДК 629.7.036.74

DOI:10.34759/vst-2020-2-71-80

ТЕПЛОВОЙ РАСЧЕТ КАТОДА С БАРИЕВЫМ ТЕРМОЭМИТТЕРОМ

Синицин А.П.^{1*}, Парахин Г.А.^{1*}, Румянцев А.В.^{2**}

¹ Опытное конструкторское бюро «Факел»,
ОКБ «Факел», Московский проспект, 181, Калининград, 236001, Россия

² Балтийский федеральный университет им. И. Канта,
БФУ им. И. Канта, ул. А. Невского, 14, Калининград, 236041, Россия

* e-mail: info@fakel-russia.com

** e-mail: albert37@list.ru

Статья поступила в редакцию 03.02.2020

Представлены разработанная тепловая модель катода с бариевым термоэмиттером и результаты расчета теплового состояния его элементов. По результатам расчета теплового состояния элементов конструкции катода в режимах функционирования проведен анализ конструкции катода, параметров запуска, обеспечивающих тепловые требования к основным его элементам.

Ключевые слова: катод-компенсатор, стационарный плазменный двигатель, тепловая модель, пакет прикладных программ (ППП) SolidWorks Flow Simulation, тепловой расчет, тепловакуумные испытания, температура.

Введение

Катод-компенсатор (далее по тексту — катод) является одним из основных элементов стационарного плазменного двигателя (СПД).

Катод в СПД обеспечивает поток электронов для ионизации рабочего тела и нейтрализации заряда струи движителя, поэтому он во многом определяет надежность, устойчивость работы, стабильность параметров, динамику и ресурс двигательной установки в целом [1]. В настоящее время рассматривается ряд задач по стабилизации и коррекции космического аппарата, а также маршевых задач, требующих времени работы элект-

роракетной двигательной установки (ЭРДУ) с СПД $\sim 10^4$ ч с числом включений $\sim 10^5$.

В этих условиях решение проблемы разработки ЭРДУ в значительной мере определяется успехами в разработке газоразрядного катода. Поэтому создание и исследование работоспособной конструкции источника электронов — катода на токи 0,5—1 А, работающего на инертном газе, обладающего большим ресурсом, позволяющим производить многократные включения двигателя и потребляющим сравнительно малую мощность, является одной из важнейших задач при разработке ЭРДУ на базе СПД.

Измерение температуры внутренних элементов катодов в штатном исполнении из-за неразборности конструкции и небольших размеров элементов практически невозможно. Поэтому для определения их температуры в режимах функционирования была разработана тепловая математическая модель катода и проведен тепловой расчет с применением пакета прикладного программного обеспечения SolidWorks Flow Simulation 2014.

Задача теплового расчета

Задачей теплового расчета являлась оценка теплового состояния элементов катода с бариевым термоэмиттером в режиме стартового разогрева и в авторежиме (авторегим – работа катода, при котором температура термоэмиттера поддерживается за счет его ионной бомбардировки ионами рабочего тела. При этом цепь разряда между анодом и катодом замкнута, а источник внешнего нагрева (нагреватель) выключен) путем определения расчетного диапазона температур и тепловых потоков по элементам катода.

Цели теплового расчета

Целями теплового расчета являлись:

- определение минимальной мощности стартового разогрева катода, обеспечивающей условия для достижения температуры эмиттера за 160 с (уровень, достаточный для зажигания и поддержания разряда);
- оценка распределения температуры по элементам катода при различных граничных условиях;
- верификация тепловой модели по результатам тепловакуумных испытаний с целью использования модели для определения теплового состояния конструкции катода при различных граничных условиях.

Конструкция катода с бариевым эмиттером

Исследовалась разработанная конструкция катода с бариевым термоэмиттером, рассчитанного на токи 0.5–1.0 А и расход рабочего тела 0.08–0.1 мг/с. Отличием этого катода от аналогов является его улучшенная технологичность. Основными направлениями улучшения технологичности являются: снижение количества низкотехнологичных процессов и элементов; разбивка конструкции на под сборки таким образом, чтобы их сборка могла выполняться параллельно, а сборка между собой занимала бы минимум времени [2].

Производство бариевого термоэмиттера значительно проще в сравнении с термоэмиттером из гексаборида лантана [3–6]. Ввиду отсутствия нитридной керамики и гексаборида лантана отпадает необходимость защитных покрытий.

Одним из наиболее сложных узлов катода является нагреватель. Эта сборочная единица должна обеспечить стартовую температуру 1673 К для эмиттера из гексаборида лантана, а следовательно, сам нагреватель должен быть нагрет еще сильнее: согласно расчетам температура спирали достигает 2073 К [3]. В диапазоне 1673–2073 К могут работать только различные сплавы тугоплавких металлов (вольфрама, рения, молибдена, тантала, ниобия), а для электрической изоляции должна применяться специальная высокотемпературная керамика. Соединения тугоплавких металлов, как правило, выполняются в вакууме. Ответственные детали, контактирующие с высокотемпературной керамикой, защищаются от химического взаимодействия специальным покрытием.

В случае применения бариевого катода для его запуска достаточно температуры 1373 К, следовательно, температура нагревателя должна быть в пределах 1600 К. Такой нагреватель может быть выполнен в виде керамического корпуса из алюмооксидной керамики, в который вмонтирована проволока из тугоплавкого сплава. Намотка нагревателя бифилярная, токоподводы выведены с одного торца.

Отдельная проблема – присоединение токоподводов нагревателя к токоведущим частям катода (штангам). С учетом того, что материал спирали – тугоплавкий сплав, соединение токоподводов должно выполняться в вакууме [7]. Введение в сборку двух дополнительных вакуумных операций свело бы на нет все усилия по повышению технологичности конструкции.

Для присоединения нагревателя была отработана технология, являющаяся «ноу-хау» предприятия и позволяющая выполнять соединение указанных узлов без применения вакуумных операций. Место соединения разнородных материалов является одним из критических в конструкции.

В местах соединения газодинамической развязки – керамического изолятора – с металлическими деталями также имеются критические точки конструкции, предельная температура для которых – 873 К.

В узле сварки проставки (сплав молибдена) и токоподвода К (никелевый сплав) материалы свариваемых деталей имеют различные коэффициен-

ты линейного расширения. Циклический нагрев указанного соединения выше 773 К не рекомендуется из-за возникающих термомеханических напряжений вследствие разности в значениях термических коэффициентов расширения материалов [8].

Объект теплового моделирования и граничные условия

Объектом теплового моделирования является катод с бариевым термоэмиттером, устройство которого приведено на рис. 1.

Основной элемент катода — эмиттер, размещенный внутри капсулы 7. Для стартового разогрева катода вокруг капсулы с эмиттером установлен нагреватель 3, закрытый снаружи системой тепловых экранов 2.

К нагревателю через токоведущие части катода — штанги 4 — присоединены токоподводы К 8 и Н 9. Капсула с эмиттером соединена с токоподводом К при помощи проставки 5, обеспечивающей подвод рабочего тела к эмиттеру. Токоподводы К и Н крепятся к изолятору 10, отделяющему токопроводящие части от магистральной подачи рабочего тела 11.

В эмиттере катода с бариевым термоэмиттером в качестве эмиссионного материала применены вставки из прессованной и спеченной смеси по-

рошков вольфрама (70 %), окисей бария, алюминия, кальция и скандия.

В статье [9] приведена температура запуска катода с бариевым эмиттером, равная 1373 К, которая позволяет получить плотность тока, соответствующую современному эффективному катоду.

Так как эмиттер катода имеет пористую структуру, то его теплопроводность определяется распределением и формой пор в твердом теле и теплопроводностью газа в порах. Рост пористости на 1% ведет к падению теплопроводности на 5% вплоть до температуры 1200 К, после которой происходит ее рост по линейному закону, а начиная с температуры выше 1900 К рост теплопроводности носит ярко выраженный нелинейный характер, пропорционально температуре в кубе [10].

График зависимости коэффициента теплопроводности бариевого эмиттера от температуры показан на рис. 2.

Тепловой расчет катода с бариевым эмиттером проведен для следующих условий:

— окружающая среда — вакуум (конвективный теплообмен отсутствует);

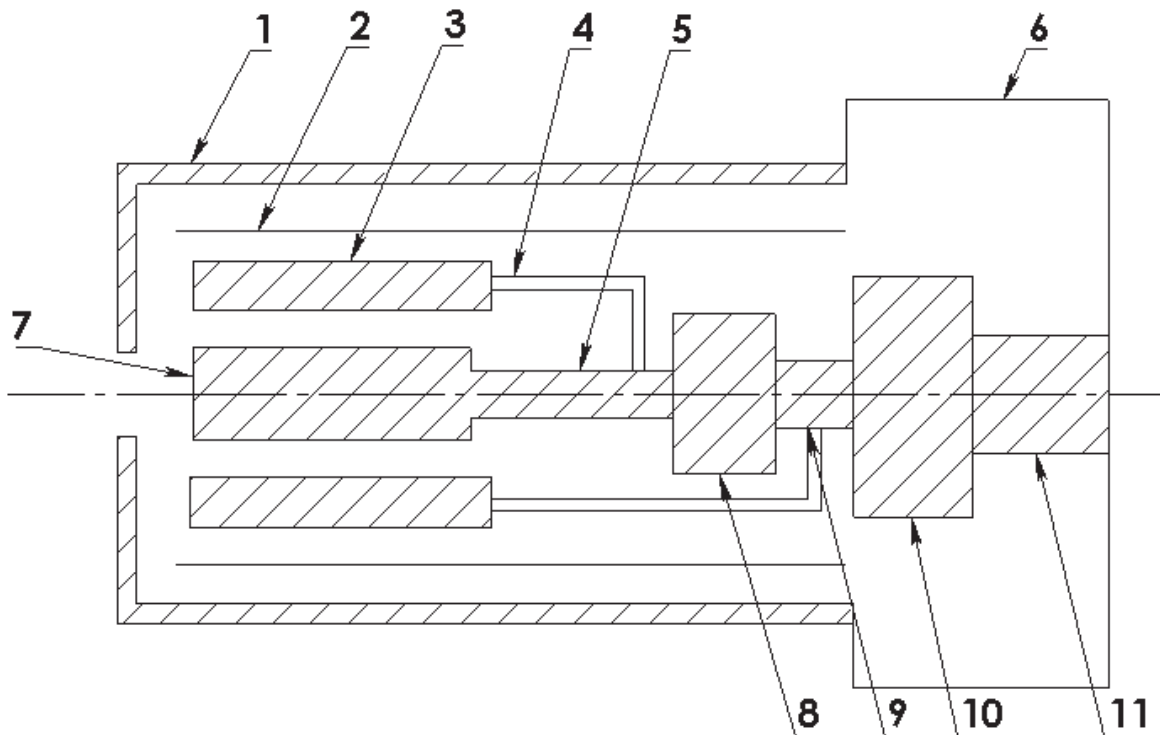


Рис. 1. Схема конструкции катода с бариевым эмиттером: 1 — пусковой электрод; 2 — тепловые экраны; 3 — нагреватель; 4 — штанги; 5 — проставка; 6 — корпус; 7 — капсула с эмиттером; 8 — токоподвод К; 9 — токоподвод Н; 10 — изолятор; 11 — магистраль подачи рабочего тела

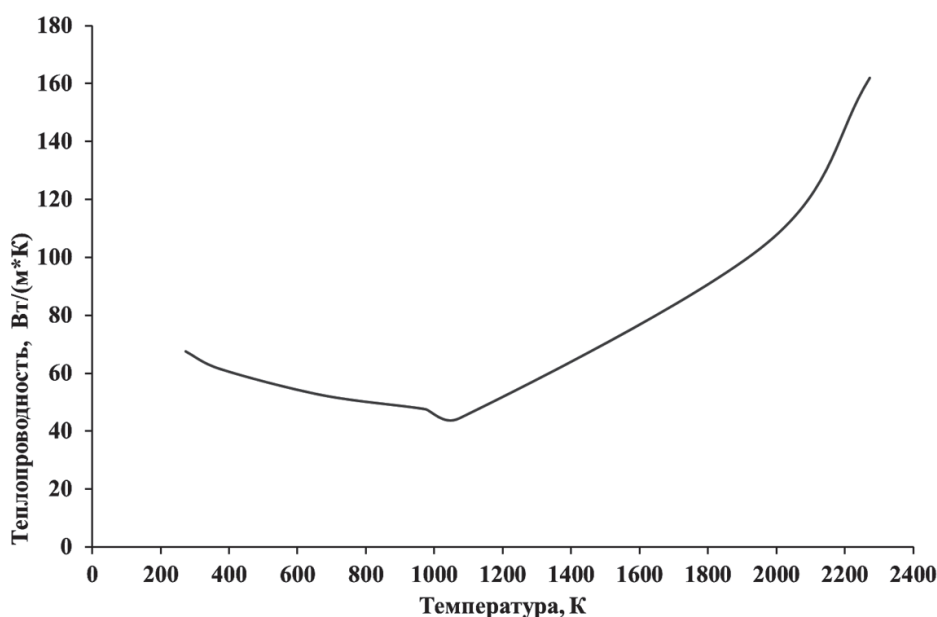


Рис. 2. Зависимость коэффициента теплопроводности бариевого эмиттера от температуры

— температура: окружающей среды, начальная элементов катода, посадочной поверхности равна 293 К.

Рассмотрены следующие режимы работы катода:

— подбор мощности нагрева, соответствующей эффективному запуску катода (стационарный режим);

— пять циклов (160 с — нагрев/10 мин — остывание) при подобранной мощности нагрева;

— авторежим при подобранной мощности.

Для оценки распределения температуры по элементам конструкции катода использовались следующие значения температуры в контрольных точках (рис. 3).

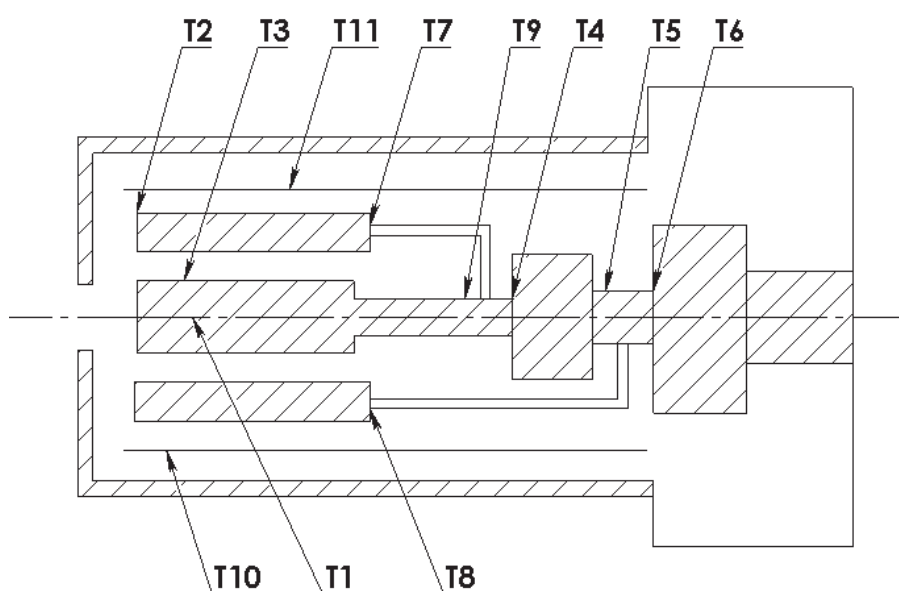


Рис. 3. Контрольные точки катода с бариевым эмиттером: Т1 — эмиттер; Т2 — керамика вокруг нагревателя; Т3 — обойма; Т4 —соединение проставки и токоподвода К; Т5 — соединение изолятора и токоподвода К; Т6 —соединение изолятора и токоподвода Н; Т7 — соединение нагревателя и штанги К; Т8 — соединение нагревателя и штанги Н; Т9 — соединение штанги К и токоподвода К; Т10 — электрод; Т11 — внешний экран вокруг керамики с нагревателем

Тепловая модель

Трехмерная тепловая модель катода построена в ППП SolidWorks Flow Simulation 2014. В модели задавались: геометрические размеры деталей (с незначительными упрощениями, не влияющими на распределение температуры [11, 12]); свойства конструкционных материалов и контактные термосопротивления между участками модели. При расчете термического сопротивления использовались следующие параметры [13]:

$$R_k = \frac{1}{\frac{2\lambda_m A \cdot (p_k / 3\sigma_B)^n}{\pi r_m} + \frac{\lambda_c K}{\sigma_3}},$$

где r_m — радиус пятна контакта;

λ_m — приведенный коэффициент теплопроводности контактирующих материалов при температуре в зоне контакта, Вт/(м·К),

$$\lambda_m = \frac{2\lambda_{m1}\lambda_{m2}}{\lambda_{m1} + \lambda_{m2}};$$

A — коэффициент, учитывающий реальную микрогеометрию контактирующих поверхностей [14];

p_k — удельная нагрузка на контактные поверхности, Па;

σ_B — предел прочности более мягкого материала при температуре зоны контакта, Па;

n — показатель степени, зависящий от рода контактирующих материалов;

λ_c — коэффициент теплопроводности среды при температуре зоны контакта;

K — опытный коэффициент,

$$K = 1,4 - \frac{1,5}{p_k^{0,25} 10^5};$$

σ_3 — эквивалентная толщина зазора.

Для ориентировочных расчетов можно принять

$$\sigma_3 = \frac{h_{cp1} + h_{cp2}}{2},$$

где h_{cp1} и h_{cp2} — средняя высота микронеровностей контактирующих поверхностей.

В расчете учитывался только кондуктивный и радиационный теплообмен, так как условия экс-

плуатации катода в составе двигателя — глубокий вакуум. В зависимости от времени и режима работы на тепловыделяющие элементы тепловой модели катода задавалась соответствующая режиму работы мощность. При расчете радиационного компонента теплообмена каждой поверхности присваивалась интегральная степень черноты в зависимости от материала и класса обработки поверхности [15].

В свойствах керамических деталей задавалась анизотропная теплопроводность, т.к. теплопроводность алюмооксидной керамики является двунаправленной, по нужной оси системы координат определялось направление аксиальной (поперечной) и радиальной тепловой проводимости [16].

В свойствах конструкционных материалов учитывалась температурная зависимость коэффициента теплопроводности и теплоемкости [17–18].

ППП SolidWorks Flow Simulation базируется на методе конечных объемов — это численный метод интегрирования систем дифференциальных уравнений в частных производных [19].

В тепловой модели в расчетной области применялось ручное управление построением сетки. В некоторых элементах по толщине стенок, в силу ее малости, располагается, как правило, единственная ячейка, что делает невозможным аппроксимацию изменения температуры. Однако в силу малости толщины и достаточно высокой теплопроводности переменная составляющая весьма мала.

В расчетной области задавались параметры, которые управляли процедурой адаптации расчетной сетки к решению в процессе расчета. В результате этой процедуры ячейки сетки разбивались в областях модели с особенностями, в которых требовалось локальное дробление сетки для того, чтобы обеспечить установленную точность решения. А в тех областях, где установленная точность решения достигалась на более грубой сетке, ячейки сливались. На адаптацию сетки к решению повлиял уровень дробления. Уровень дробления означает число операций дробления ячеек начальной сетки, которое требуется для того, чтобы были выполнены критерии адаптации сетки к решению. До тех пор, пока не был достигнут заданный уровень дробления, повторные циклы адаптации сетки проводились с последовательным увеличением уровня дробления. Таким образом, уровень дробления влияет на минимальный размер ячейки расчетной сетки. Вследствие этого в тепловой модели катода результирующая сетка имеет около 105 ячеек.

Таким образом, из-за геометрических особенностей в тепловой модели применены высокий уровень дробления ячеек сетки и более строгий критерий сходимости, что повлияло на высокую точность результатов и на время расчета [20].

Результаты теплового расчета

Начальный разогрев эмиттера катода с бариевым эмиттером происходит за счет нагревателя.

При запуске катода первоначальный разряд происходит между торцом разогретого нагревателем эмиттера и пусковым электродом. Далее нагреватель выключается и работа катода, а также тепловыделение в эмиттере происходят за счет разряда.

Мощность накала, необходимая для гарантированного запуска катода за 160 с, при котором температура бариевого эмиттера не ниже 1373 К, по результатам предварительного теплового расчета составила 45 Вт в стационарном режиме.

За 160 с разогрева мощностью 45 Вт температура эмиттера достигает 1408 К. Рабочей температуры 1373 К эмиттер достигает после 150 с разогрева.

Максимальные значения температуры на элементах катода с бариевым эмиттером при циклическом разогреве (160 с – нагрев/10 мин. – остывание) и авторежиме показаны в табл. 1.

Из таблицы видно, что по результатам теплового расчета значения температуры во всех контрольных точках не превышают максимальную допустимую температуру в местах контроля.

Верификация тепловой модели

По результатам предварительного теплового расчета была выбрана предложенная выше тепловая схема, собрано рабочее изделие (инженерная модель) и проведены тепловакуумные испытания (ТВИ) на стенде ФГУП «ОКБ Факел». По результатам испытаний была проведена верификация тепловой модели катода.

Процедура верификации тепловой модели основана на решении обратной задачи теплового проектирования и состоит из идентификации результатов расчета с экспериментальными данными, полученными при идентичных граничных и начальных условиях для разработанной модели катода, и уточнения теплофизических и геометрических характеристик элементов тепловой модели и/или ее функциональной схемы.

При проведении тепловакуумных испытаний для выполнения сравнительного анализа на тепловой модели катода были выбраны участки, соответствующие местам установки термодатчиков Тп1, Тп2, Тп3, Тп4, Тп5. Термодатчики были установлены в следующих местах (рис. 4).

Таблица 1

Результаты теплового расчета катода с бариевым эмиттером в контрольных точках

Наименование термодатчика	Циклический нагрев	Авторежим	Максимально допустимая температура, К
Т1 (эмиттер)	1418	1471	2573
Т2 (керамика вокруг нагревателя)	1555	844	2273
Т3 (обойма)	1425	1253	2473
Т4 (соединение проставки и токоподвода К)	652	523	2373
Т5 (соединение изолятора и токоподвода К)	551	428	773
Т6 (соединение изолятора и токоподвода Н)	501	405	773
Т7 (соединение нагревателя и штанги К)	811	528	873
Т8 (соединение нагревателя и штанги Н)	864	523	873
Т9 (соединение штанги К и токоподвода К)	575	463	973
Т10 (электрод)	533	448	2473
Т11 (внешний экран вокруг керамики с нагревателем)	1168	708	2373

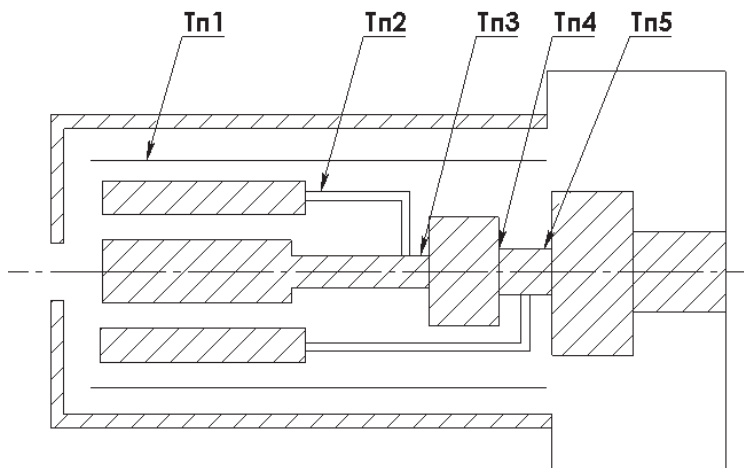


Рис. 4. Места установки термопар при испытаниях: Тп1 — тепловой экран; Тп2 — соединение нагревателя и штанги; Тп3 — соединение проставки и токоподвода К; Тп4 — соединение изолятора и токоподвода К; Тп5 — соединение изолятора и токоподвода Н

На рис. 5 приведены графики сравнения результатов теплового расчета с результатами тепловакуумных испытаний катода с бариевым эмит-

тером. Из анализа результатов, приведенных на рис. 4 и в табл. 2, следует, что максимальное расхождение температур соответствующих участков

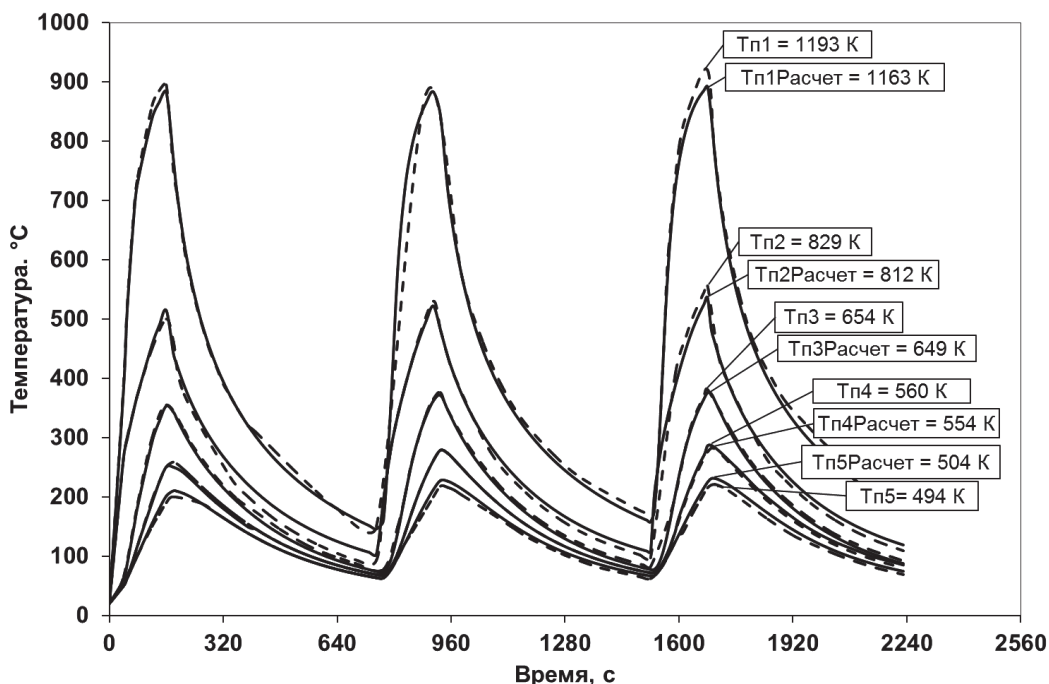


Рис. 5. Сравнение результатов тепловакуумных испытаний с результатами теплового расчета

Таблица 2

Измеренные и расчетные значения температуры элементов конструкции

	Значения температуры в местах установки термопар и на соответствующих участках тепловой модели, К				
	Тп1	Тп2	Тп3	Тп4	Тп5
Результаты при ТВИ, К	1193	829	654	560	494
Результаты теплового расчета, К	1163	812	649	554	504

катода, полученных при испытаниях и при расчете тепловой модели, составляет не более 4 %, что дает возможность использования тепловой модели катода для предсказания теплового состояния конструкции катода при расчетном воспроизведении ситуаций, которые не проверялись в процессе физического эксперимента, а также для сравнения расчетных температур с температурами, зарегистрированными при натурной эксплуатации.

Выводы

По результатам теплового расчета минимальная мощность нагревателя для гарантированного запуска катода с бариевым эмиттером через 160 секунд разогрева составляет 45 Вт.

В различных режимах работы катода с бариевым эмиттером (циклический разогрев, авторежим) по результатам теплового расчета значения температуры элементов конструкции катода находятся в допустимом рабочем диапазоне, что свидетельствует о правильности выбранных решений в ходе проектирования конструкции катода.

Проведена верификация тепловой модели катода с результатами тепловакуумных испытаний, что дает возможность использования тепловой модели катода для предсказания теплового состояния конструкции катода при расчетном воспроизведении ситуаций, которые не проверялись в процессе физического эксперимента, а также для сравнения расчетных температур с температурами, зарегистрированными при натурной эксплуатации.

Библиографический список

1. *Никонов Б.П.* Оксидный катод. — М: Энергия, 1979. — 238 с.
2. *Saevets P., Semenenko D., Albertini R., Scremin G.* Development of a Long-Life Low-Power Hall Thruster // The 35th International Electric Propulsion Conference (8–12 October 2017, Georgia Institute of Technology, Atlanta, Georgia, USA). IEPC-2017-38.
3. *Kurzyna J., Barral S., Danilko D.* et al. First Tests of the KLIMT Thruster with Xenon Propellant at the ESA Propulsion Laboratory // Space Propulsion 2014 (Cologne, Germany, 19-22.05.2014). Paper No. 2980923.
4. *Loyan A.V., Maksymenko T.A.* Electric Propulsion System based on Small Hall Thruster SPT-20M for Microsatellites // The 33rd International Electric Propulsion Conference (6–10 October 2013, The George Washington University, Washington, D.C., USA). IEPC2013, <http://www.iepc2013.org/>
5. *Domonkos M.T., Gallimore A.D., Patterson M.J.* An Evaluation of Hollow Cathode Scaling to Very Low Power and Flow Rate. — Published by the Electric Rocket Propulsion Society with permission, 1997.
6. *Rotter J.E.* An Analysis of Multiple Configurations of Next-Generation Cathodes in a Low Power Hall Thruster. — Theses and Dissertations, 2009. URL: <https://scholar.afit.edu/etd/2417>
7. *Goebel D.M., Katz I.* Fundamentals of electric propulsion: Ion and Hall Thrusters. — Denwer: Wiley, 2008. — 512 p.
8. *Rossetti P., Signori M., Andrenucci M., Paganucci F.* Hollow Cathodes Study at Alta-Centrosazio // Presented at the 29th International Electric Propulsion Conference (31 October – 4 November 2005, Princeton University, Italy). IEPC-2005-277.
9. *Ашкинази Л.А.* Результаты в области термо- и вторичноэлектронных катодов за 1990–2012 годы: литературный обзор. — М.: Изд-во МИЭМ, 2012. URL: http://lit.lib.ru/a/ashkinazi_la/text_0070.shtml
10. *Кресанов В.С., Малахов Н.П., Морозов В.В.* и др. Высокоэффективный эмиттер электронов на основе гексаборида лантана. — М.: Энергоатомиздат, 1987. — 151 с.
11. *Чувильдеев В.Н., Нохрин А.В., Баранов Г.В.* и др. Исследование структуры и механических свойств нано- и ультрадисперсных механоактивированных вольфрамовых псевдосплавов // Вестник Нижегородского университета им. Н.И. Лобачевского. 2010. № 2(1). С. 47–59.
12. *Стрелецкий А.Н., Портной В.К., Леонов А.В.* Механохимическая активация и спекание вольфрама и его смесей с медью и никелем // Химия в интересах устойчивого развития. 2002. Т. 10. №1–2. С. 245–254.
13. *Светцов В.И.* Вакуумная и плазменная электроника: Учебное пособие. — Иваново: Изд-во ИГХТУ, 2003. — 172 с.
14. *Эспе В.* Технология электровакуумных материалов. Т. 1. Металлы и материалы с металлической проводимостью. — Пер. с немецкого. Под общ. ред. Р.А. Нилендера и А.А. Котляра. — М.-Л.: Энергия, 1962. — 632 с.
15. *Лившиц Б.Г., Крапошин В.С., Липецкий Я.Л.* Физические свойства металлов и сплавов: Учебник. — М.: Металлургия, 1980. — 320 с.
16. *Кошелев Н.Н., Цаглов А.И., Федотенко В.А.* Моделирование стартового нагрева безнакального катода-компенсатора для микроСПД // Авиационно-космическая техника и технология. 2009. № 8(65). С. 116–120.
17. *Мартыненко О.Г.* (ред.) Справочник по теплообменникам: В 2-х т. Т. 2 / Пер. с англ.— М.: Энергоатомиздат, 1987.— 352 с.
18. *Чубов П.Н., Саевец П.А., Румянцев А.В.* Тепловой расчет стационарного плазменного двигателя СПД-50 // Вестник Московского авиационного института. 2017. Т. 24. № 4. С. 70–79.
19. *Синицин А.П., Гоца Д.А., Румянцев А.В.* Тепловой расчет жидкостного ракетного двигателя малой тяги на экологически безопасном монотопливе // Вес-

- тник Московского авиационного института. 2018.
Т. 25. № 2. С. 109-116.
20. Алямовский А.А. SolidWorks Simulation. Как решать
практические задачи. — СПб.: БХВ-Петербург, 2012.
— 448 с.

THERMAL DESIGN OF CATHODE WITH BARIUM THERMO-EMITTER

Sinitsin A.P.^{1*}, Parakhin G.A.^{1*}, Rumyantsev A.V.^{2**}

¹ Experimental Design Bureau "Fakel",
181, Moskovsky av., Kaliningrad, 236001, Russia

² Immanuel Kant Baltic Federal University,
IKBFU, 14, A. Nevskogo str., Kaliningrad, 236041, Russia

* e-mail: info@fakel-russia.com

** e-mail: albert37@list.ru

Abstract

This article presents the results of a thermal model developing and application of a cathode with Barium emitter for the temperature field computing, determining internal and external conductive and radiative heat fluxes, gradients and velocities of temperature changing in the cathode stationary and dynamic operation modes, as well as heat release computing on the cathode emitter. Based on the computational results of the thermal state of the cathode design elements in functioning modes, the analysis of the cathode design and start parameters, which ensure meeting the thermal requirements to its main elements, was performed.

The objectives of the above said thermal computations were:

- determining a minimum power for the cathode pre-start heating, which ensures conditions of reaching emitter temperature within 160 sec (the level sufficient to ignite and maintain the discharge),

- estimating temperature distribution by the cathode elements at various boundary conditions and verifying the thermal model based on the thermal vacuum tests results to employ the model for determining the cathode structure thermal state at various boundary conditions.

The task of the thermal calculation was elements thermal state estimation of the cathode with Barium thermo-emitter in the start heating mode and in the automatic mode (which means the cathode operation when thermo-emitter temperature is maintained by bombarding by the ions of the working body. The discharge circuit between the anode and cathode herewith is closed, and the source of the external

heating (heater) is turned-off by way of determining the estimated range and thermal flows over the cathode elements

A 3D thermal model of a cathode with Barium emitter was developed with SolidWorks Flow Simulation 2014, which employs the finite volume method, i.e. a numerical method for integration of differential equation systems in partial derivatives. Boundary conditions for the thermal design were being set identical to the thermal vacuum test conditions.

The following elements were set in the model: parts geometrical sizes (with insignificant simplifications not affecting the temperature distribution), structural materials properties and contact thermal resistances between the model areas. The calculation accounted for only conductive and radiative heat exchange, since cathode operation conditions as a part of the thruster represent a deep vacuum. A power, corresponding to the operation mode, was set on the heat releasing elements of the cathode thermal model depending on time and operation mode. When calculating a radiative component of heat exchange, integral emissivity factor was assigned to each surface, depending on material and surface treatment class.

Anisotropic thermal conductivity was set in the ceramic parts properties, i.e. thermal conductivity of Aluminum oxide ceramics is two-directional. Direction of axial (transversal) and radial thermal conductivity was determined along the corresponding axis of the coordinate system. A temperature dependence between the thermal conductivity coefficient and thermal capacity was accounted for in structural materials properties.

Experimental data obtained at EDB Fakel facility from thermal vacuum tests of a cathode with Barium emitter was employed for the thermal design model verification. The thermal model verification consisted in heaters power selection and heat release on the emitter from the condition that the temperature calculated values in the checkpoints coincide with the measured ones.

Based on the thermal design results, a minimum heater power for guaranteed start of the cathode with Barium emitter was selected.

Cathode thermal model verification with the thermal vacuum test results was carried out. This allows the cathode thermal model application for predicting a thermal state of the cathode structure while numerical reproduction of situations, which were not verified while physical experiment, as well as compare the temperature predictions with the temperatures registered in flight.

Keywords: cathode-compensator, barium thermal emitter, thermal vacuum tests, thermal model verification, stationary plasma engine, SolidWorks Flow Simulation PPP, cathode design.

References

1. Nikonov B.P. *Oksidnyi katod* (Oxide cathode), Moscow, Energiya, 1979, 238 p.
2. Saevets P., Semenenko D., Albertini R., Scremin G. Development of a Long-Life Low-Power Hall Thruster. *The 35th International Electric Propulsion Conference (8–12 October 2017, Georgia Institute of Technology, Atlanta, Georgia, USA)*. IEPC-2017-38.
3. Kurzyna J., Barral S., Daniłko D. et al. First Tests of the KLIMT Thruster with Xenon Propellant at the ESA Propulsion Laboratory. *Space Propulsion 2014 (Cologne, Germany, 19–22.05.2014)*. Paper No. 2980923.
4. Loyan A.V., Maksymenko T.A. Electric Propulsion System based on Small Hall Thruster SPT-20M for Microsatellites. *The 33rd International Electric Propulsion Conference (6–10 October 2013, The George Washington University, Washington, D.C., USA)*. IEPC2013, <http://www.iepc2013.org/>
5. Domonkos M.T., Gallimore A.D., Patterson M.J. *An Evaluation of Hollow Cathode Scaling to Very Low Power and Flow Rate*. Published by the Electric Rocket Propulsion Society with permission, 1997.
6. Rotter J.E. *An Analysis of Multiple Configurations of Next-Generation Cathodes in a Low Power Hall Thruster*. Theses and Dissertations, 2009. URL: <https://scholar.afit.edu/etd/2417>
7. Goebel D.M., Katz I. *Fundamentals of electric propulsion: Ion and Hall Thrusters*. Denver, Wiley, 2008, 512 p.
8. Rossetti P., Signori M., Andrenucci M., Paganucci F. Hollow Cathodes Study at Alta-Centrosazio. *The 29th International Electric Propulsion Conference (31 October – 4 November 2005, Princeton University, Italy)*. IEPC-2005-277.
9. Ashkinazi L.A. *Rezultaty v oblasti termo- i vtorichnoelektronnykh katodov za 1990-2012 gody: literaturnyi obzor* (Results in the field of thermo- and secondary-electron cathodes for 1990-2012: a literary review), Moscow, MIEM, 2012 p. URL: http://lit.lib.ru/a/ashkinazi_1_a/text_0070.shtml
10. Kresanov V.S., Malakhov N.P., Morozov V.V. et al. *Vysokoeffektivnyi emitter elektronov na osnove gekhsaborida lantana* (High-efficiency electron emitter based on lanthanum hexaboride), Moscow, Energoatomizdat, 1987, 151 p.
11. Chuvil'deev V.N., Nokhrin A.V., Baranov G.V. et al. *Vestnik Nizhegorodskogo universiteta im. N.I. Lobachevskogo*, 2010, no. 2(1), pp. 47-59.
12. Streletskii A.N., Portnoi V.K., Leonov A.B. *Khimiya v interesakh ustoychivogo razvitiya*, 2002, vol. 10, no. 1-2, pp. 245-254.
13. Svetsov V.I. *Vakuumnaya i plazmennaya elektronika* (Vacuum and plasma electronics), Ivanovo, IGKhTU, 2003, 172 p.
14. Espe W. *Werkstoffkunde der Hochvakuumtechnik. Band 1. Metalle und metallisch leitende Werkstoffe*. VEB Deutscher Verlag der Wissenschaften Berlin 1959. 911 s.
15. Livshits B.G., Kraposhin V.S., Lipetskii Ya.L. *Fizicheskie svoystva metallov i splavov* (Physical properties of metals and alloys), Moscow, Metallurgiya, 1980, 320 p.
16. Koshelev N.N., Tsaglov A.I., Fedotenko V.A. *Aviatsionno-kosmicheskaya tekhnika i tekhnologiya*, 2009, no. 8(65), pp. 116-120.
17. Hewitt G.F. *Heat Exchanger Design Handbook*. Department of Chemical Engineering, Imperial College London, London SW7 2AZ, UK 2008 (HEDH 2008). In 5 volumes.
18. Chubov P.N., Saevets P.A., Rumyantsev A.V. Thermal calculation of the SPT-50 stationary plasma thruster. *Aerospace MAI Journal*, 2017, vol. 24, no. 4, pp. 70-79.
19. Sinitin A. P., Goza D. A., Rumyantsev A. V. Thermal calculations of liquid low thruster on pollution-safe fuel. *Aerospace MAI Journal*, 2018, vol. 25, no. 2, pp. 109-116.
20. Alyamovskii A.A. *SolidWorks Simulation. Kak reshat' prakticheskie zadachi* (SolidWorks Simulation. How to solve practical problems), Moscow, BKhV-Peterburg, 2012, 445 p.