

УДК 533.9.07

Н.Н. КОШЕЛЕВ, А.И. ЦАГЛОВ, В.А. ФЕДОТЕНКО*Национальный аэрокосмический университет им. Н.Е. Жуковского «ХАИ», Украина***МОДЕЛИРОВАНИЕ СТАРТОВОГО НАГРЕВА
БЕЗНАКАЛЬНОГО КАТОДА-КОМПЕНСАТОРА ДЛЯ МИКРО СПД**

При пусковых испытаниях катода для МСПД (до 0,5 А) наблюдалась относительно высокая стартовая эрозия торца эмиттера, которая снижала ресурс катода. Это обстоятельство побудило изменить характеристики запуска катода, а именно ограничить ток пускового источника питания. При этом, стартовый разогрев эмиттера катода производится за счет энергии тлеющего разряда, привязка которого распространяется на значительную площадь поверхности эмиттера и зависит от мощности разряда, типа и давления газа в полости катода. В статье приводятся результаты моделирования и экспериментальные данные теплового исследования стартового разогрева слаботокового катода с помощью газового разряда. Показано, что при 60-процентной доле электрической мощности стартового разряда, выделяемой в виде тепла на эмиттере катода, расчетные и экспериментальные данные наиболее близки.

Ключевые слова: *стационарный плазменный двигатель, безнакальный катод, стартовый разогрев, эмиттер.*

Введение

Общая постановка проблемы и ее связь с научно-практическими задачами. В настоящее время электрореактивные двигательные установки (ЭРДУ) широко используются на космических аппаратах (КА) для ориентации объекта, корректировки и смены орбиты, полета к другим планетам Солнечной системы. Число задач, решаемых ЭРДУ, увеличивается, и возрастают требования к тяговому, удельным и ресурсным характеристикам двигателей. В перспективных программах требуется многорежимность работы электрореактивной двигательной установки по мощности и тяге, а также повышенная точность при ориентации и стабилизации КА.

Одним из важнейших факторов, влияющих на точность ориентации КА, является время запуска ЭРД, а также импульс последствия, возникающий после отключения движителя. В случае использования ЭРДУ на базе стационарного плазменного двигателя (СПД) для выполнения таких задач, время выхода на рабочий режим определяется временем запуска катода-компенсатора. Применение катода без механического навесного нагревательного элемента (безнакальный катод), в котором стартовый разогрев осуществляется внутренним газовым разрядом, может существенно сократить время запуска двигателя.

Обзор публикаций и анализ нерешенных проблем. Пусковые характеристики и физические

процессы, протекающие при стартовом разогреве безнакальных катодов, исследовались в статье [1]. Авторами приведены вольтамперные характеристики разряда при испытании безнакальных катодов, описан процесс перехода тлеющего разряда в дуговой.

Моделирование процессов теплообмена в безнакальном термоэмиссионном катоде методом конечных элементов (МКЭ) описано в статье [2]. В работе продемонстрирована возможность адекватного численного анализа сложной прикладной нелинейной задачи радиационного теплообмена с помощью МКЭ.

Однако, в работах [1], при пусковых испытаниях катода на малые токи (до 0,5 А), используемого в микродвигателях, была замечена относительно высокая стартовая эрозия торца эмиттера, которая снижала ресурс катода. Это обстоятельство побудило изменить характеристики запуска катода, а именно ограничить ток пускового источника питания. При этом стартовый разогрев эмиттера катода производится за счет энергии тлеющего разряда, привязка которого распространяется на значительную площадь поверхности эмиттера и зависит от мощности разряда, типа и давления газа в полости катода [2]. Рассмотрены процессы запуска катодов, рассчитанных на единицы и десятки ампер, в которых быстрый запуск не приводил к значительной эрозии эмиттера.

Целью исследований, приводимых в данной работе, явилось исследование динамических и теп-

ловых процессов при старте безнакального катода, работающего в диапазоне токов 0,2 – 0,5 А.

Результаты исследований

Тепловые исследования проводились для двух рабочих газов: ксенона и аргона. В ходе выполнения экспериментов анализировались типы привязок тлеющих разрядов данных газов, проводились измерения давлений в полости катода, времени выхода на рабочий режим и температур державки эмиттера.

Тепловой расчет проводился методом конечных элементов при помощи программы COSMOS-

WORKS. Разбиение модели на конечные элементы проводилось неравномерно. Такое решение продиктовано целесообразностью разбиения теплонагруженных элементов катода (эмиттер, державка эмиттера и ножка эмиттера) на мелкую сетку с шагом не более 0,01 мм и ненагруженных тепловым потоком элементов (фланец, керамика) на более крупную сетку. Такой подход уменьшает затрачиваемое ЭВМ время, при этом, не снижая точность получаемых результатов. Для уменьшения расчетного времени при учете радиальной симметричности получаемых результатов рассчитывался сектор модели катода (1/24 часть) (рис. 1).

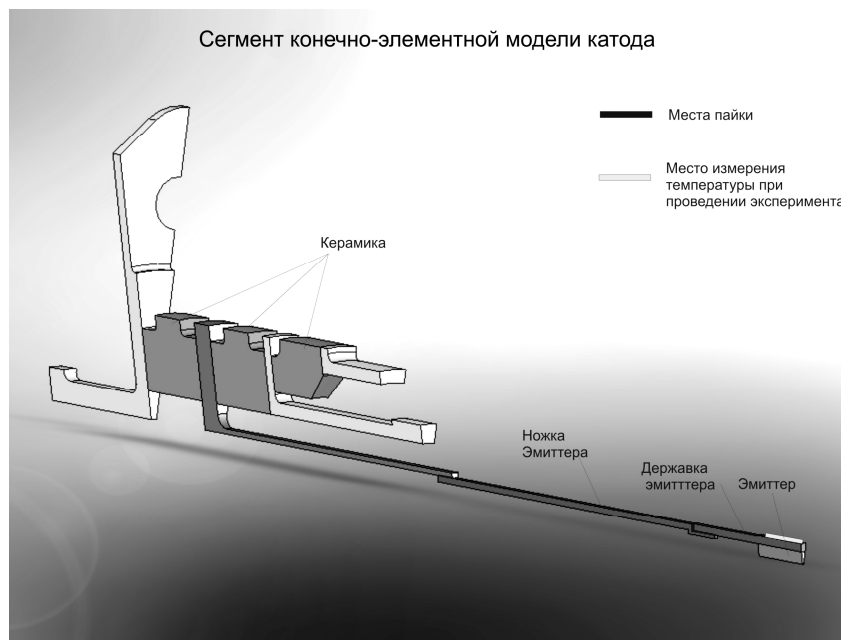


Рис. 1. Сегмент модели безнакального катода.

В модели катода использованы следующие материалы. Эмиттер электронов – пористый вольфрам, пористость – 30%, пропитанный специальной пропиткой, повышающей эмиссионные свойства вольфрама. Держатель эмиттера выполнен из молибдена. Керамический узел выполнен из материала ВК94. Крепежные элементы выполнены из сплава 29НК. Свойства материалов взяты из [3, 4].

Примечание: расчет параметров пористого вольфрама производился по следующей формуле:

$$X = X_1 \cdot (1 - П), \quad (1)$$

где X – параметр вольфрама пористого;

X1 – параметр вольфрама не пористого, взятый из источника [3];

П – коэффициент пористости вольфрама.

Особенности теплового расчета:

1). Объект исследования – катод БНК-05 без наличия внутреннего экрана (рис. 1).

2). Предмет исследования – распределение тем-

пературы в элементах конструкции катода.

3). В ходе проведения эксперимента было установлено, что рабочие газы (ксенон и аргон) имеют различные типы привязок тлеющего разряда. Выбранные типы привязок тепловой нагрузки (Вт/м²) показаны на рис. 2.

Из приведенных типов привязок в ходе анализа результатов эксперимента и данных, полученных в ходе расчета, были выбраны привязки, наиболее отвечающие параметрам запуска катода данного типа. Такими являются следующие типы привязок тлеющего разряда для ксенона – 3,4. Результаты расчета с выбранными типами привязок сравнивались с экспериментальными данными и приведены ниже на рис. 6 – 8.

4). Теплоотвод с внешней поверхности катода осуществляется только излучением. Температура окружающей среды 20 С. Теплообмен между газом и внутренней поверхностью катода конвективный.

Задается коэффициентом теплоотдачи. Соединение элементов сплошное, свойства припоя не учитываются.

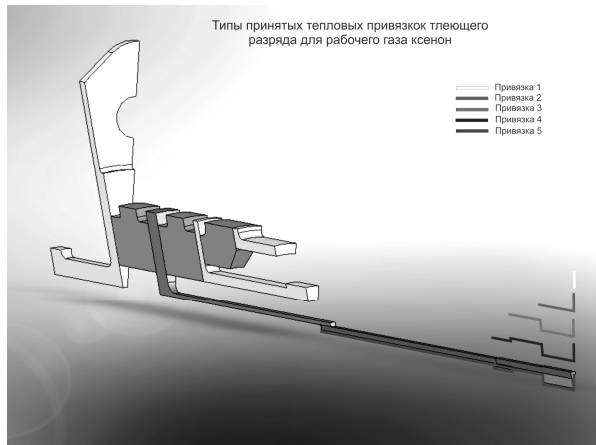


Рис. 2. Типы привязок тлеющего разряда

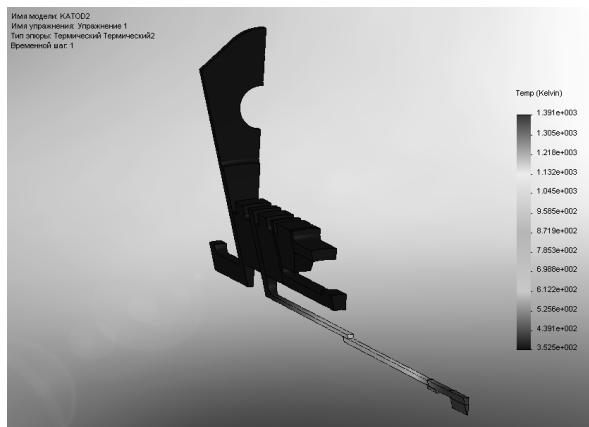


Рис. 3. Распределение температуры в конструкции безнакального катода

5). Тепловая нагрузка задавалась тепловым потоком с мощностью, равной мощности разряда, отнесенной к единице поверхности, к которой вызывался тлеющий разряд.

Параметрами, требующими уточнения и вносящие погрешность в тепловой расчет, являются степень черноты материала, изменяющаяся с течением времени, и коэффициент теплоотдачи между стенками внутреннего канала и рабочим газом.

После проведения теплового расчета было получено следующее распределение температур в конструкции безнакального катода (рис. 3).

При проведении эксперимента по нахождению зависимостей установившейся температуры державки эмиттера и времени выхода на рабочий режим от мощности разряда катод помещался в стеклянную колбу $d = 25$ мм, герметично соединенную с вакуумной камерой. Температура эмиттера определялась оптическим методом при помощи пирометра, после того как катод нагревался до равновесной

температуры (рис. 4, 5). Эксперимент проводился при различных давлениях рабочего газа. Для каждого давления равновесная температура и время выхода на неё определялись при семи различных значениях разрядного тока и напряжения (от 16 до 30Вт мощности).

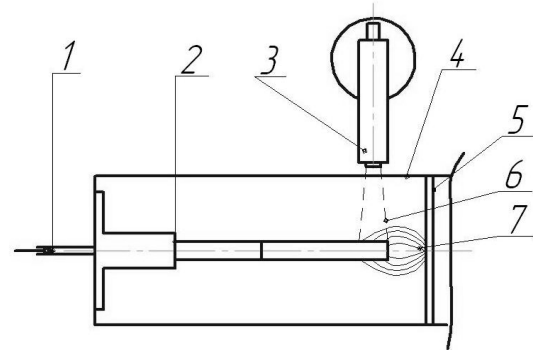


Рис. 4. Схема эксперимента: 1 – трубка подачи рабочего газа; 2 – катод БНК-05 без экрана и корпуса; 3 – пирометр; 4 – стеклянная колба; 5 – диафрагма; 6 – границы области измерения температуры в ходе эксперимента; 7 – тлеющий разряд

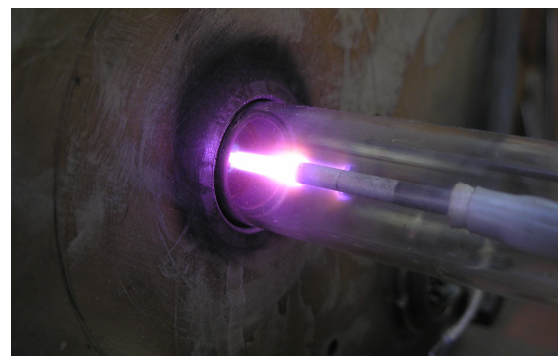


Рис. 5. Стартовый разогрев

Типичные зависимости установившейся температуры и времени разогрева от мощности газового разряда показаны на рис. 6.

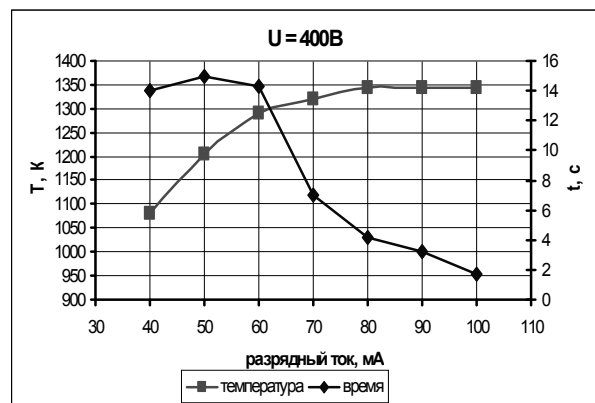


Рис. 6. Экспериментальные данные

Выход кривой температуры на графиках на постоянную полку при значениях разрядного тока $I_p = 80$ мА и выше объясняется переходом тлеющего разряда в дуговой, ведущего к изменению напряжения и падению мощности разряда.

Одним из результатов исследования было определение доли разрядной мощности, выделяющейся на катодной части разряда (эмиттере) в виде тепла.

Результаты расчета показали совпадения зависимости температуры от мощности с экспериментальными данными при доли разрядной мощности, выделяемой на катодной части разряда (эмиттере), $N = 55\% - 60\%$ (рис. 7). Следовательно, остальная доля мощности выделяется на диафрагме, а также идет на нагрев рабочего газа и эмиссионное охлаждение эмиттера. Подобное отношение выделяемых мощностей приведено в книге [5].

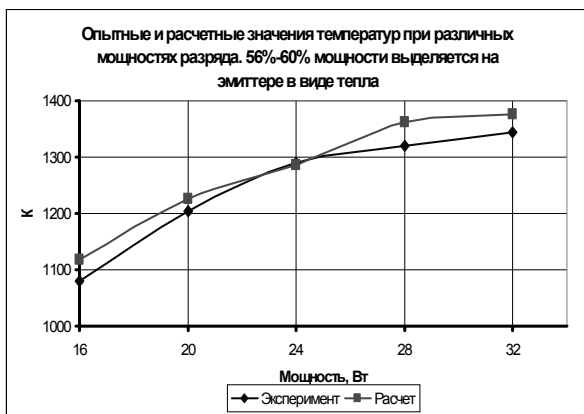


Рис. 7. Опытные и расчетные данные после подборки доли разрядной мощности идущей на нагрев катода

Также в ходе исследования сравнивалось расчетное и экспериментальное время выхода катода на рабочий режим. Ниже приведены результаты динамического расчета катода (рис. 8).

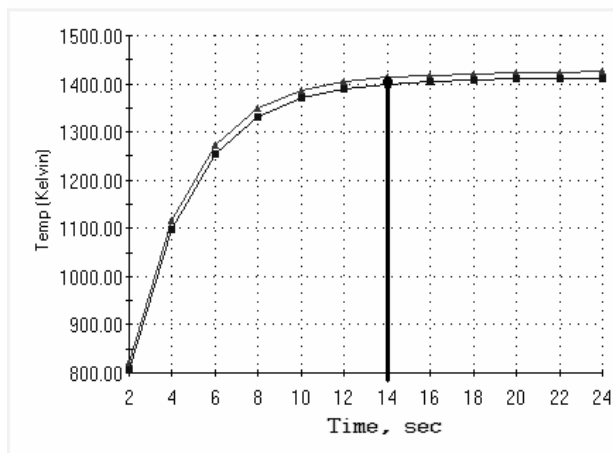


Рис. 8. Результат динамического расчета

Красной (верхней) и синей (нижней) линиями обозначены показания виртуальных датчиков температуры, характеризующих границы области изменения температуры. Черная вертикаль соответствует экспериментальному значению времени выхода в рабочий режим.

При проведении эксперимента по измерению давления в полости катода выяснилось, что давление меняется менее чем на 5%, и не требует учета данного процесса при тепловом моделировании безнакального катода.

Выводы

Найденные температурные распределения и характер привязок тлеющего разряда в среде рабочих газов могут использоваться для расчета термических напряжений в местах соединения элементов катода.

Полученные результаты позволяют проводить оптимизацию конструкции и параметров запуска (стартового тока и напряжения) для соблюдения компромисса между быстрым выходом катода на рабочий режим и разрушением элементов его конструкции, которые проявляются при возникновении критических термических напряжений.

Полученная конечно-элементная модель отвечает действительности и может использоваться для дальнейших тепловых исследований безнакального катода.

Рабочие газы аргон и ксенон имеют различные привязки стартовых разрядов, что требует учета при выборе рабочих газов.

Изменение давлений внутри полости катода незначительные и могут не учитываться при описании процессов, происходящих в полости катода при тлеющем разряде.

Результаты показали, что эффективность нагрева эмиттера в безнакальном катоде газовым разрядом составляет – 55% – 60%.

Литература

1. Лоян А.В. Экспериментальные исследования пусковых характеристик безнакальных полых катодов / А.В. Лоян, Н.Н. Кошелев, М.Т. Алиева // *Авиационно-космическая техника и технология: сб. науч. тр.* – Х.: НАКУ «ХАИ», 2002. – Вып. 30. – С. 256-258.
2. Дыбский П.А. Конечно-элементная модель теплообмена в безнакальном термоэмиссионном катоде / П.А. Дыбский, А.В. Лоян, Н.Н. Кошелев // *Авиационно-космическая техника и технология.* – 2003. – № 5 (40). – С. 162-164.
3. Захаров М.В. *Жаропрочные сплавы* / М.В. Захаров, А. М.Захаров. – М.: Металлургия, 1972. –384 с.

4. Преснов В.А. *Керамика и её спаи с металлом в технике* / В.А. Преснов, М.Л. Любимов, В.В. Строганова. – М.: Атомиздат, 1969. – 232 с.

5. Хольт Р. *Электрические контакты: пер. с англ.* / Р. Хольт. – М.: Иностранная литература, 1961. – 320 с.

Поступила в редакцию 12.05.2009

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

МОДЕЛЮВАННЯ СТАРТОВОГО РОЗІГРІВУ БЕЗНАКАЛЬНОГО КАТОДА-КОМПЕНСАТОРА ДЛЯ МІКРО СПД

М.М. Кошелев, А.І. Цаглов, В.А. Федотенко

При пускових випробуваннях катоду для МСПД (до 0,5 А) спостерігалась відносно висока стартова ерозія торцю емітера, яка зменшувала ресурс катоду. Ця обставина побудила змінити характеристики запуску катоду, а саме понизити струм пускового джерела живлення. При цьому, стартовий розігрів емітеру відбувається за рахунок енергії тліючого розряду, прив'язка якого розповсюджується на значну площу поверхні емітеру і залежить від потужності розряду, типу і тиску газу в порожнині катоду. У статті приводяться результати моделювання і експериментальні данні теплового дослідження стартового розігріву низького струмового катоду за допомогою газового розряду. Показано, що при 60-відсотковій долі електричної потужності стартового розряду, що виділяється у вигляді тепла на емітері катоду, розрахункові та експериментальні данні найбільш близькі.

Ключові слова: стаціонарний плазмовий двигун, безнакальний катод, стартовий розігрів, емітер.

SIMULATION OF STARTUP HEATING OF HEATERLESS CATHODE FOR SMALL STATIONARY PLASMA THRUSTER

N.N. Koshelev, A.I. Tsaglov, V.A. Fedotenko

Height start up erosion butt of emitter was observed during startup tests of cathode for micro SPT (before 0,5 A), that lower the resource of cathode. That occasion excite change start characteristics to wit limit for current of starting power supply. The startup heating of emitter realize by energy of inside gas discharge, which startup spots apply by significant emitter area and depend of discharge power, type and pressure in cathode's interstice. In this article set the results of heat simulation and experiment data of thermal analysis startup heating of heatless cathode between gas discharge. In article indicate, that calculated and experiment dates are particularly near, when the thermal power, that deposit on cathode, is 60-percent of electric power.

Key words: stationary plasma engine, heaterless cathode, starting warming-up, emitter.

Кошелев Николай Николаевич – старший научный сотрудник кафедры двигателей и энергоустановок ЛА Национального аэрокосмического университета им. Н.Е. Жуковского «ХАИ», Харьков, Украина.

Цаглов Александр Игоревич - студент 4 курса факультета ракетно-космической техники Национального аэрокосмического университета им. Н.Е. Жуковского «ХАИ», Харьков, Украина.

Федотенко Владимир Алексеевич - канд. техн. наук, доцент кафедры основ компьютерного конструирования Национального аэрокосмического университета им. Н.Е. Жуковского «ХАИ», Харьков, Украина.