

УДК 533.9

А.В. ЛОЯН, Н.Н. КОШЕЛЕВ, А.И. ЦАГЛОВ, М.Ю. ТИТОВ

Национальный аэрокосмический университет им. Н.Е. Жуковского «ХАИ», Украина

ИССЛЕДОВАНИЕ РАСПРЕДЕЛЕНИЯ ТЕПЛОВЫХ ПОТОКОВ В КОНСТРУКЦИИ БЕЗНАКАЛЬНОГО ПОЛОГО КАТОДА ЭРД ПРИ РАБОЧИХ ТОКАХ ДО 50 А

В работе приводятся результаты экспериментальных и теоретических исследований распределения тепловых потоков в конструкции безнакального полого катода ЭРД. Экспериментальные работы включали в себя калориметрические измерения тепловых потоков и измерения температуры элементов конструкции при помощи термопар и пирометра. Теоретические исследования заключались в моделировании стационарного теплового состояния катода при различных разрядных токах, а также в определении теплопроводности эмиттера. Экспериментальные и теоретические результаты показали хорошую сопоставимость. Основываясь на полученных данных был сделан вывод, что для исследуемого безнакального полого катода в диапазоне разрядных токов от 10 до 50 А на катоде выделяется от 73 до 35 % разрядной мощности.

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

Введение

Катод в составе ЭРД является одним из наиболее теплонагруженных элементов, определяющий ресурс и надежность двигательной установки в целом. Задачи совершенствования конструкции катодов, направленные на повышение их эффективности и снижение массово-габаритных характеристик требуют исследования распределения тепловых потоков в конструкции катода [1 – 3].

Работа посвящена исследованию теплового состояния полого безнакального катода в диапазоне разрядных токов от 10 до 50 А.

Задачи данной работы являются следующими:

- 1) исследовать тепловое состояние эмиттера и всей конструкции безнакального полого катода в зависимости от величины разрядного тока;
- 2) верифицировать результаты калориметрических экспериментов по определению доли мощности, выделяющейся на катоде, путем моделирования теплового состояния катода;
- 3) на основании результатов исследований сделать выводы о необходимости дальнейшей модернизации конструкции катода, направленной на повышение ресурса и снижение массово-габаритных характеристик.

Экспериментальное исследование распределения тепловых потоков

Суммарные электрические затраты в дуговом разряде с полым катодом, работающим в диодном режиме, определяются величиной произведения

тока разряда на разность потенциалов между катодом (эмиттером) и анодом. Если не вдаваться в подробности, какие компоненты (частицы) плазмы и с какой температурой участвуют в теплообмене с отдельными электродами, а электроды выполнить в виде калориметров, то можно выяснить, как распределяется электрическая мощность на них, выделяемая в виде тепла [4].

В работе использовался действующий макет полого катода (рис.1) с гальванически и термически развязанной диафрагмой или киппером, представляющий собой кольцевой водяной калориметр. В этом калориметре реализована возможность установки сменного электрода различной длины и диаметра.

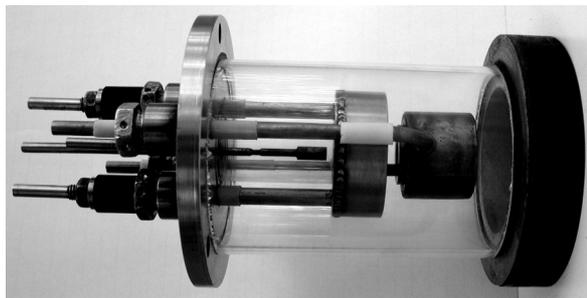


Рис. 1. Макет полого катода с внешним электродом-калориметром

Анод в макете также был выполнен в виде калориметра с отверстием 14 мм. Корпус катода и внешний кожух вакуумной камеры изготовлены из кварцевого стекла для реализации возможности измерения температуры эмиттера с помощью пирометра.

Мощность, выделенная на калориметре, определяется выражением:

$$W = Q/t, \tag{1}$$

или

$$W = c\dot{m}\Delta T, \tag{2}$$

где c – удельная теплоемкость воды,
 ΔT – изменение температуры воды,
 \dot{m} – расход воды.

Таким образом, для определения мощности, выделяемой на электроде дугового разряда с полым катодом, необходимо измерить расход воды через калориметр и разность ее температур на входе и выходе калориметра.

Детальное описание макета и методики измерений описаны в работе [4].

На рис. 2, 3 представлены результаты измеренных тепловых потоков на калориметры и расчет распределения мощностей в процентах к полной электрической мощности дугового разряда на диафрагме, эмиттере и аноде модели катода при двух фиксированных расходах аргона.

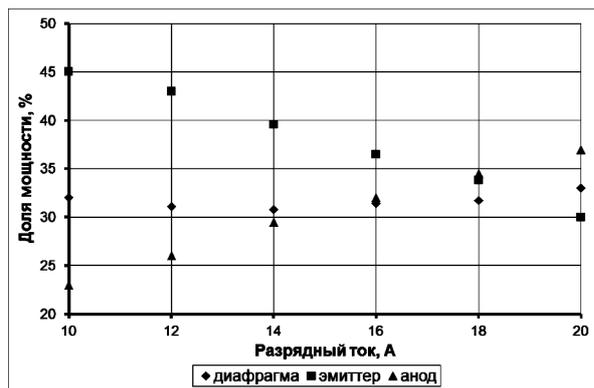


Рис. 2. Распределение долей мощности на аноде, диафрагме и эмиттере в зависимости от разрядного тока. Массовый расход Xe - 0,6 мг/с

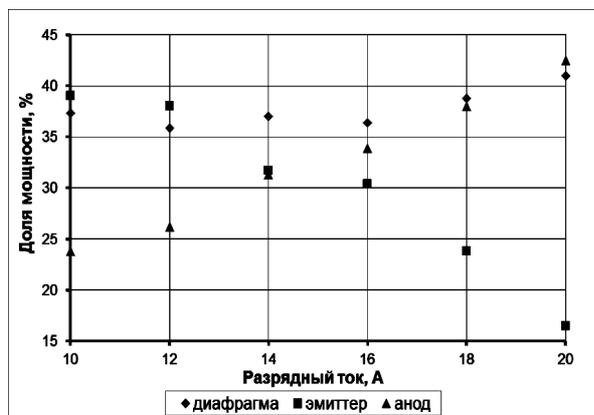


Рис. 3. Распределение долей мощности на аноде, диафрагме и эмиттере в зависимости от разрядного тока. Массовый расход Xe - 0,8 мг/с

Как видно из графиков доля мощности, выде-

ляемая на диафрагме, является значительной (более 30%), представляя прямые энергетические потери, которые возрастают с увеличением расхода газа. При этом, доля мощности на аноде возрастает с увеличением разрядного тока, а на эмиттере падает предположительно за счет эмиссионного и газового охлаждения.

Отдельно можно заметить, что доля мощности, выделяемая на диафрагме, остается практически неизменной, при этом потенциал диафрагмы падает с ростом тока и растет с повышением расхода (рис. 4, 5).

Давление же в полым катоде растет с увеличением тока разряда.

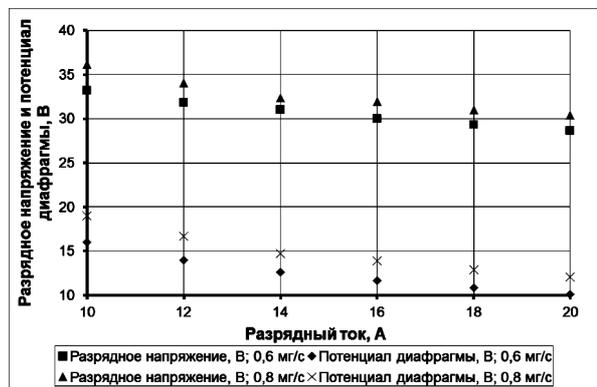


Рис. 4. Разрядное напряжение и потенциал диафрагмы в зависимости от тока

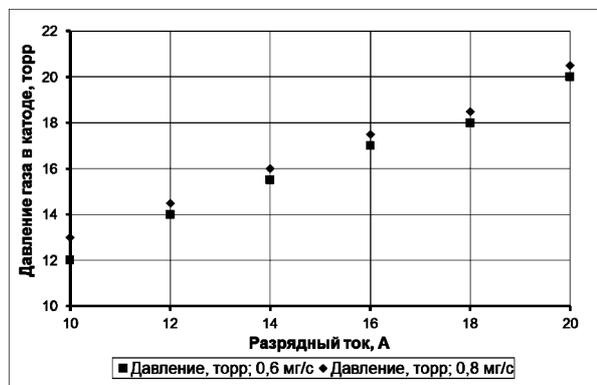


Рис. 5. Давление в полости катода в зависимости от разрядного тока

Объяснить это явление можно эффектом усиления контракции разряда при увеличении тока и оттеснении ионной компоненты плазмы от стенок диафрагмы.

Измерение температуры элементов конструкции катода было проведено при помощи термопар, расположенных согласно рис. 6. Крепление термопар производилось путем точечной сварки.

Результаты измерений температуры при различных разрядных токах и фиксированном массовом расходе представлены на рис. 7.

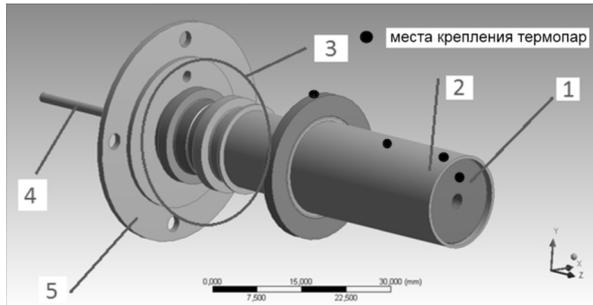


Рис. 6. Твердотельная модель катода: 1 – диафрагма; 2 – корпус, внутри которого расположен эмиттер; 3 – металло-керамический узел (МКУ); 4 – газоподвод; 5 – крепежный фланец

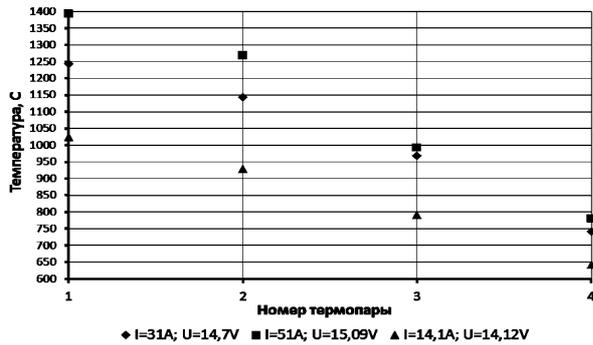


Рис. 7. Результаты измерений температуры элементов катода при помощи термопар при различных разрядных токах

Таким образом, были установлены следующие контрольные точки для моделирования теплового состояния катода:

- доли мощности на диафрагме и эмиттере в зависимости от величины разрядного тока;
- температуры конструктивных элементов катода в зависимости от разрядного тока.

Моделирование теплового состояния катода

Моделирование теплового состояния катода проводилось при помощи программного пакета ANSYS, реализующего метод конечных элементов.

Каждая из деталей, а также конструкция в целом обладают осевой симметрией, поэтому было принято решение решать двухмерную тепловую задачу. Все соединения деталей в катоде – паяные. Поэтому в процессе моделирования теплового состояния катода было принято решение считать все спаи идеальными (припой заполнил все микроне-

ровности в местах соединения деталей) и, следовательно, не вызывающими тепловых сопротивлений.

Расчетная модель безнакального полого катода с обозначением мест приложения тепловой нагрузки, представленную на рис. 8.

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.

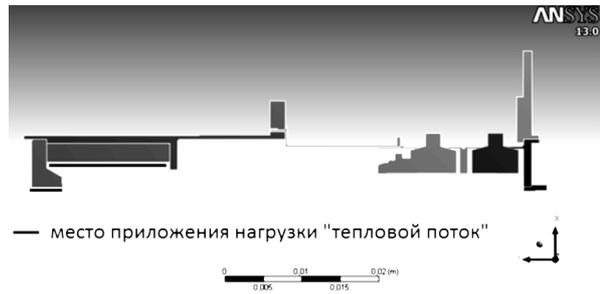


Рис. 8. Геометрия конечно элементной модели. Приложенные нагрузки

Исходя из результатов проведенных испытаний катодов с измерением температуры деталей при помощи пирометра и термопар [1, 3], были приняты следующие диапазоны рабочих температур для деталей из того или иного материала:

- вольфрам (матрица эмиттера и диафрагма) – 1200-1400°C;
- молибден (корпус) – 1000-1200°C;
- сплав 29НК и керамика ВК-94 (узел МКУ) – 200-300°C;
- нержавеющая сталь (крепежный фланец) – 100-200°C.

Заданные теплофизические свойства используемых материалов приведены в табл. 1 [5]. Теплопроводность эмиттера задавалась исходя из результатов расчетов, приведенных в [6]. Для определения теплопроводности эмиттера была разработана численная модель для расчета эффективной теплопроводности пористых материалов в зависимости от их физико-химических свойств – пористости, размеров зерен, композитного состава. Значение теплопроводности составило 40 Вт/(м·К).

Таблица 1

Заданные свойства материалов

	Вольфрам	Молибден	29НК	12X18Н9Т	ВК94
λ , Вт/(м·К)	200	150	9..10	38	7,5..9*
Ср, Дж/кг	130	270	7..8,1	440	11,5..12,5*
ϵ	0,61	0,38..0,39*	0,45	0,82	0,8

Моделирование тепловых состояний катода проводилось в диапазоне разрядных токов от 10 до 50 А. Модель катода тарировалась согласно результатам экспериментальных данных с целью нахождения распределения долей мощности в конструкции катода.

Результаты моделирования в диапазоне разрядных токов от 10 до 50 А представлены на рис. 9.

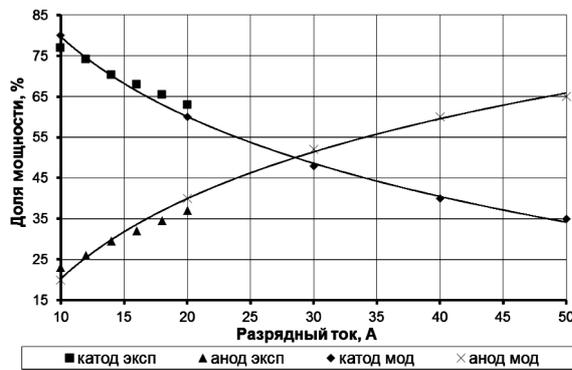


Рис. 9. Распределение разрядной мощности в зависимости от тока разряда. Эксперимент и моделирование

Результаты расчета теплового состояния катода (распределение температуры по конструкции катода) при 50 А режиме работы представлены на рис. 10. Рабочие температуры контрольных точек приведены в табл. 2.

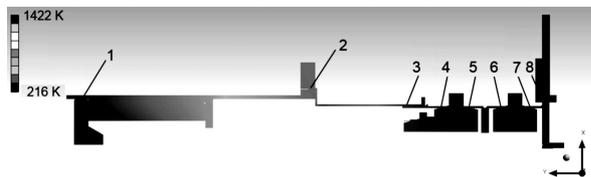


Рис. 10 Результаты теплового расчета катода с указанными контрольными точками при 50А

Таким образом, в результате моделирования удалось выявить распределение разрядной мощности и тепловое состояние конструкции катода в диапазоне разрядных токов до 50А.

Выводы и дальнейшие перспективы

Выполненные исследования позволили сделать следующие выводы:

1. Разработанная расчетная конечно-элементная модель катода продемонстрировала приемлемую сходимость результатов с экспериментальными данными (несоответствие менее 10 %) и может применяться для анализа теплового состояния катода при варьировании теплофизических свойств материала эмиттера и внесении изменений в конструкцию катода.

2. Было получено, что с возрастанием разрядного тока от 10 до 50 А доля мощности, выделяемая на катоде, снижается с 73 до 35 %.

3. Повышение массового расхода приводит к снижению доли разрядной мощности, выделяемой на катоде. При этом доля мощности, выделяемая непосредственно на диафрагме, возрастает.

4. По полученным значениям температур в контрольных точках (местах спаев) была проверена работоспособность расчетной конструкции (надежность паяных соединений). Проверочные данные представлены в табл. 2. Проверка показала, что температуры паяных соединений являются значительно меньшими, чем максимально допустимые.

5. Таким образом, было доказано, что в процессе работы катода принятой конструкции при 50 А режиме на катоде выделяется около 35 % мощности разряда. При этом температура эмиттера катода находится в диапазоне 1200..1350°С, температура диафрагмы соответствует 1350..1400°С, температура крепежного фланца составляет ниже 200°С, что является приемлемым для использования катода в качестве источника электронов для мощных СПД.

В дальнейшем точность конечно-элементной модели катода можно повысить за счет задания более точных теплофизических свойств материала эмиттера и других наиболее теплонагруженных деталей катода.

Таблица 2

Результаты проверки надежности паяных соединений

№ точки	Марка припоя	Температура плавления, °С	Макс. допустимая рабочая температура, °С	Рабочая температура, °С
1	ППЛ-100	1773	1550	1290
2	ПМПдН-35-15	1171	1000	870
3-7	ПСр72В	780	580	280-140

Литература

1. Результаты анализа тепловых процессов сильноточных катодов мощных ЭРД [Текст] / Г.А. Парахин, Н.Н. Кошелев, А.В. Лоян, О.П. Рыбалов // *Авиационно-космическая техника и технология*. – 2010. – № 10 (77). – С. 109 – 114.
2. 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*. – 2009. – № 8(65). – С. 116 – 120.
3. Results of Tests of High-Current Cathode for High-Power Hall Thruster [Text] / A. Loyan, N. Koshelev, O.Ribalov, M. Dudeck, S. Zurbach // *International electric Propulsion Conference*. – 2011. – P. 197.
4. Кошелев, Н.Н. Калориметрические измерения в полом катоде [Текст] / Н.Н. Кошелев, О.П. Рыбалов, Е.И. Ищенко // *Авиационно-космическая техника и технология*. – 2012. – № 7(94). – С. 157 – 161.
5. Свойства и применение металлов и сплавов для электровакуумных приборов: справочное пособие [Текст] / Р.Т. Андреева, С.И. Ипатов, Н.С. Розина и др. – М.: Энергия, 1973. – 336 с.
6. 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 05.06.2013, рассмотрена на редколлегии 12.06.2013

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

ДОСЛІДЖЕННЯ РОЗПОДІЛУ ТЕПЛОВИХ ПОТОКІВ У КОНСТРУКЦІЇ БЕЗНАКАЛЬНОГО ПОЛОГО КАТОДУ ЕРД ПРИ РОБОЧИХ СТРУМАХ ДО 50 А

А.В. Лоян, М.М. Кошелев, О.І. Цаглов, М.Ю. Тітов

У роботі наводяться результати експериментальних і теоретичних досліджень розподілу теплових потоків в конструкції безнакального полого катода ЕРД. Експериментальні роботи включали в себе калориметричні вимірювання теплових потоків і вимірювання температури елементів конструкції за допомогою термопар і пірометра. Теоретичні дослідження полягали у моделюванні стаціонарного теплового стану катода при різних розрядних токах, а також у визначенні теплопровідності емітера. Експериментальні та теоретичні результати показали хорошу збіжність. Ґрунтуючись на отриманих даних був зроблений висновок, що для досліджуваного безнакального порожнистого катода в діапазоні розрядних струмів від 10 до 50 А на катоді виділяється від 73 до 35% розрядної потужності.

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

INVESTIGATION OF THERMAL FLUXES DISTRIBUTION IN THE CONSTRUCTION OF HEATERLESS HOLLOW CATHODE FOR ELECTRIC PROPULSION IN OPERATING CURRENT RANGE UP TO 50 A

A.V. Loyan, N.N. Koshelev, A.I. Tsaglov, M.Yu. Titov

The paper describes results of experimental and theoretical investigations of thermal fluxes distribution in construction of heaterless hollow cathode for electric propulsion. Experimental activities were including calorimetric measurements of thermal fluxes and temperature measurements of construction elements by thermocouples and pyrometer. Theoretical investigations were including simulation of temperature distribution in cathode construction for different discharge currents and emitter thermal conductivity definition. Experimental and theoretical results had shown a good agreement. On the basis of obtained results the conclusion, that for investigated heaterless hollow cathode in 10-50 A current range discharge power deposition on cathode is from 73 to 35%, was made.

Key words: heaterless hollow cathode, finite element model, emitter, anode, diaphragm.

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.

Кошелев Николай Николаевич – ст. науч. сотр. каф. 401 Национального аэрокосмического университета им. Н.Е. Жуковского «ХАИ», Харьков, Украина, e-mail: nikolajkoshelev@rambler.ru.

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

Титов Максим Юрьевич – инженер каф. 401 Национального аэрокосмического университета им. Н.Е. Жуковского «ХАИ», Харьков, Украина, e-mail: m.yu.titov@uker.net.