

УДК 533.9.07

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

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

ТЕПЛОВАЯ СХЕМА И РЕЗУЛЬТАТЫ ИСПЫТАНИЙ БЕЗНАКАЛЬНОГО ПОЛОГО КАТОДА НА ТОКИ 2-5 А ДЛЯ СПД100

В статье изложены вопросы разработки безнакального полого катода на токи 2-5 А для стационарного плазменного двигателя СПД100. Рассмотрена тепловая схема катода, полученная путем моделирования твердотельной модели катода методом конечных элементов и измерений температуры корпуса катода при помощи пирометра, а также результаты испытаний катода в диодном режиме. Приведены результаты динамических стартовых испытаний катода, а также его вольт-амперные характеристики при стационарном режиме работы и различных массовых расхода рабочего тела – ксенона – через катод. Продемонстрирована эффективная работа разработанного катода при токах от 1 до 5 А и массовых расходах 0,3-0,15 мг/с. Показано, что время старта катода с выходом его на рабочие параметры составляет всего 3-5 сек.

Ключевые слова: электроракетный двигатель, безнакальный полый катод, вольт-амперная характеристика

Введение

Одним из наиболее востребованных типов электроракетных (плазменных) двигателей (ЭРД) являются стационарные плазменные двигатели (СПД), в частности СПД100, которые применяются на геостационарных спутниках связи [1].

Полый катод является критически важным элементом электроракетных двигательных установок (ЭРДУ), который выполняет роль источника электронов, необходимых для ионизации рабочего тела (РТ) и нейтрализации заряда струи двигателя. К катоду предъявляется ряд требований, таких как эффективность, надежность, высокий ресурс, малая масса и заданное число запусков.

КПД и надежность ЭРДУ напрямую зависят от эффективности работы катода [2], поэтому задача разработки полых катодов, отвечающих постоянно возрастающим требованиям по энергоэффективности и ресурсу, является актуальной.

В отделении ЭРД ХАИ длительное время разрабатываются, изготавливаются и проходят испытания безнакальные полые катоды (БНК), отличающиеся от нагревных катодов быстрым временем старта, сниженными габаритами, массой и рабочей температурой эмиттера [3]. В конструкции БНК отсутствует нагреватель, нагрев эмиттера осуществляется разрядным током, а для запуска катода временно используется относительно высокое (400-800 В) напряжение [4].

В связи с широким применением двигателей типа СПД100 с потребляемой мощностью 1350 Вт и разрядным током до 5 А, возник закономерный воп-

рос о необходимости разработки и испытаний безнакального полого катода для такого двигателя, который позволит сократить время запуска и уменьшить массу ЭРДУ.

Цель работы

Целью данной работы являлось создание действующей модели безнакального полого катода-нейтрализатора для двигателя типа СПД100 на рабоче токи 1-5 А.

Тепловая схема катода

Важным и обязательным этапом разработки новой версии полого катода является моделирование его теплового состояния с целью проверки надежности паяных соединений в конструкции катода и минимизации тепловых потерь.

Проведенные ранее в лаборатории ЭРД ХАИ исследования [5] позволяют с высокой достоверностью задавать тепловые потоки от разряда к конструкции катода.

Для моделирования теплового состояния катода, исходя из результатов предыдущих исследований, были заданы следующие тепловые потоки на элементы катода:

- доля разрядной мощности, выделяемая на катоде в рабочей точке в 4,5 А и напряжении 24,5 В – 75% - 83 Вт;

- доля мощности, выделяемая на эмиттере – 65% - 72 Вт;

- доля мощности, выделяемая на киппере – 15%
- 11 Вт.

Для снижения расчетного времени и учитывая осесимметричность конструкции катода, моделирование проводилось на двухмерной осесимметричной модели. Размер элементов, на которые в процессе расчета разбивается модель, варьировался в зависимости от тепловых нагрузок на детали. Самая мелкая сетка задавалась в области эмиттера, самая крупная - на монтажном фланце (самой холодной части катода). Теплосброс с катода задавался излучением в окружающее пространство.

Результаты теплового моделирования катода представлены на рис. 1.

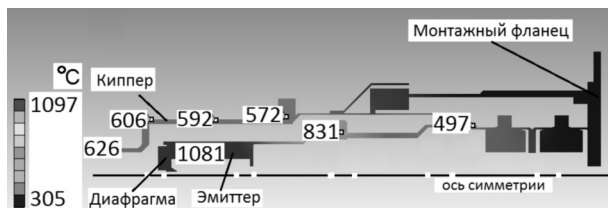


Рис. 1. Тепловая схема катода

Полученные результаты моделирования продемонстрировали следующие распределение температур в конструкции катода:

- внутренняя поверхность эмиттера – 1105°C;
- корпус катода (в месте крепления выходной диафрагмы) – 1090°C;
- киппер (в области среза диафрагмы) – 600°C
- монтажный фланец – 320°C.

Расчетное тепловое состояние катода было учтено при выборе материалов деталей и марок припоев, используемых в процессе сборки катода.

Испытания катода

Испытания изготовленной модели катода были проведены в диодном режиме (рис. 2) на одном из вакуумных стендов объемом 0,6 м³. Безмаслянный вакуум создавался турбомолекулярным насосом 010В-3500-006. Предельный вакуум составлял $1 \cdot 10^{-6}$ торр, динамический вакуум при расходе 0,2 мг/с составлял $7,9 \cdot 10^{-5}$ торр.

Для регулировки массового расхода РТ использовался тепловой расходомер фирмы Bronkhorst с погрешностью не более 1% в измеряемом диапазоне массовых расходов.

В качестве источника питания катода использовался специально разработанный для этих целей прибор фирмы Delta, позволяющий проводить запуск и управление режимом работы катода (Источник питания имеет режимы стабилизации тока и напряжения в пределах 0-8 А и 0-400 В, автоматический переход в режим стабилизации тока).

Испытания катода проходили в два этапа.

Первый этап заключался в исследовании процесса старта катода – динамических измерений разрядного тока, напряжения и давления РТ на входе в катод на временном промежутке в несколько секунд.

Второй этап заключался в измерении вольт-амперных характеристик (ВАХ) катода и температуры корпуса катода в зависимости от величины массового расхода РТ при стационарном режиме работы.

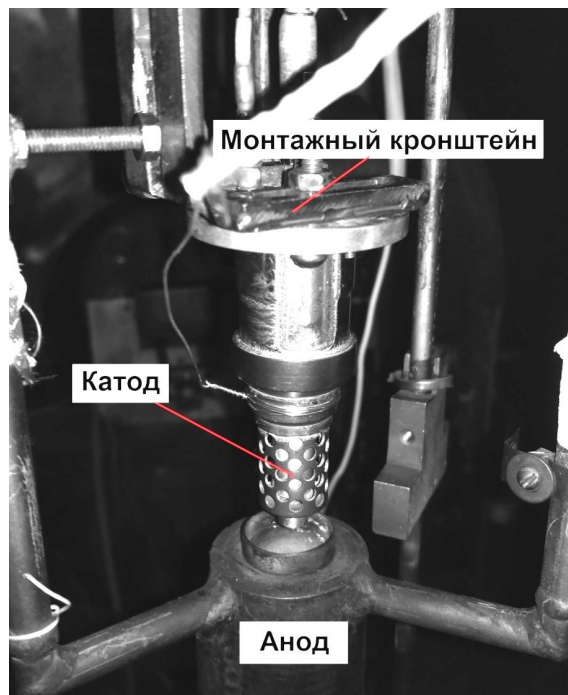


Рис. 2. Катод на испытательном стенде

Зависимости разрядного тока, напряжения эмиттер – анод и давления в вакуумной камере от времени представлены на рис. 3.

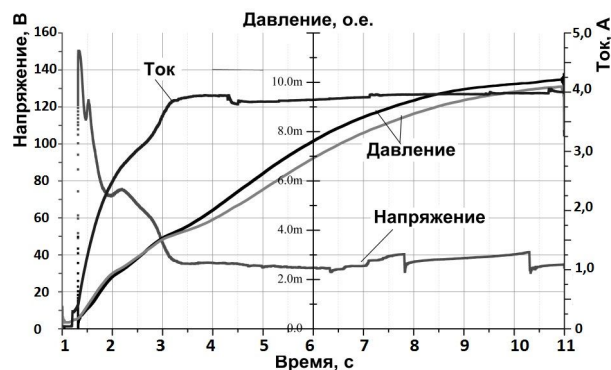


Рис. 3. Стартовые динамические характеристики

Исходя из приведенных данных, разрядного тока выход на рабочий уровень достигается за время около 2 с. При этом в процессе поджига разряда наблюдается резкое падение давления в вакуумной

камере, которое восстанавливается за время около 10 с, аналогичное времени выхода напряжения на номинальное значение.

Проведенные ранее исследования [6] показали, что время восстановления номинального расхода через катод, а значит и давления в вакуумной камере, зависит от объема внутренних полостей катода. Ранние версии безнакальных полых катодов имели время выхода на номинальный режим по массовому расходу порядка 30 с [6]. Минимизация объема внутренних полостей позволила сократить данное время до 10 с.

ВАХ основного разряда при различных значениях расхода ксенона представлены на рис. 4.

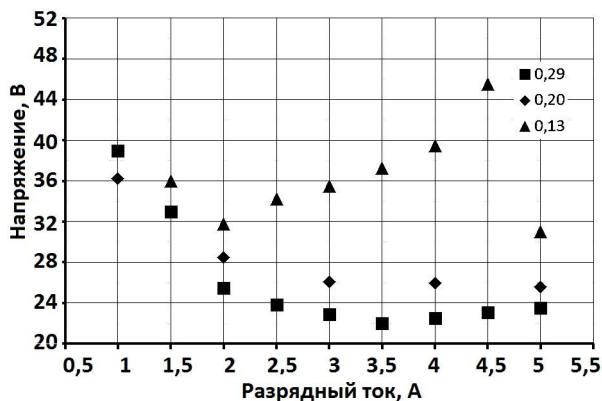


Рис. 4. Вольт-амперные характеристики катода

Исходя из представленных данных, наиболее эффективным режимом работы разработанного катода является режим с разрядным током 2-5 А и массовым расходом ксенона 0,2-0,3 мг/с. При этом границы устойчивой работы катода охватывают диапазон 1-5 А при расходах до 0,13 мг/с и выше. В ходе испытаний катода была продемонстрирована возможность работы катода на токи до 8 А. Результаты данных испытаний будут опубликованы позже.

Зависимости напряжения эмиттер-киппер от величины разрядного тока в промежутке эмиттер - анод представлены на рис. 5.

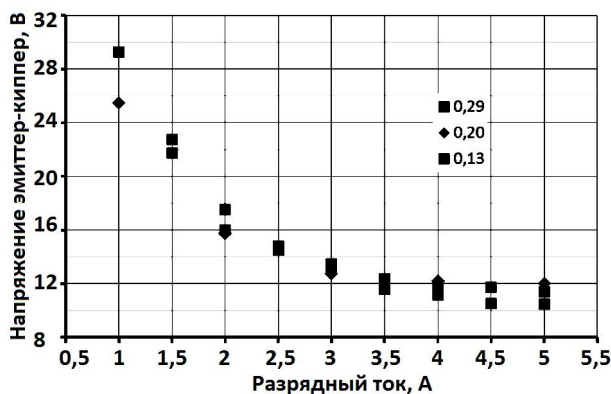


Рис. 5. Зависимости напряжения эмиттер-киппер от тока эмиттер - анод

Увеличение разрядного тока эмиттер-анод приводит к снижению доли мощности, выделяемой на киппере, и как следствие, к падению напряжения эмиттер – киппер. При этом напряжение эмиттер-киппер слабо зависит от величины массового расхода РГ. Таким образом, ток катод-анод определяется режимом работы двигателя и может изменяться в широких пределах без потери устойчивости разряда в катоде.

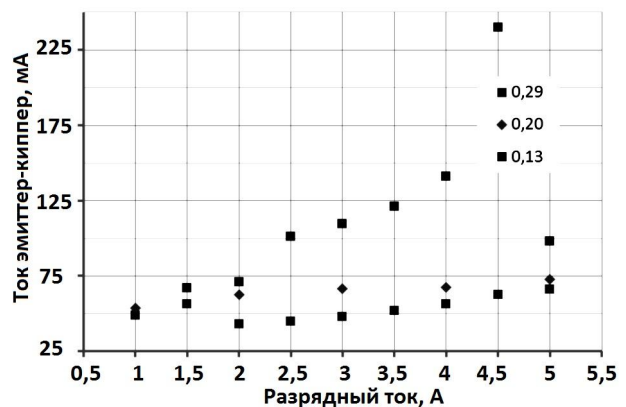


Рис. 6. Зависимости тока эмиттер-киппер от разрядного тока эмиттер - анод

Данные рис. 4 и 6 демонстрируют наличие области с повышенным разрядным напряжением и током на киппер при массовом расходе 0,13 мг/с и разрядном токе 4,5 А, что говорит о необходимости дальнейшей оптимизации конструкции катода.

Температура корпуса катода в месте крепления диафрагмы измерялась при помощи пирометра ЛОП-72 при различных режимах работы катода. Результаты измерений представлены на рис. 7.

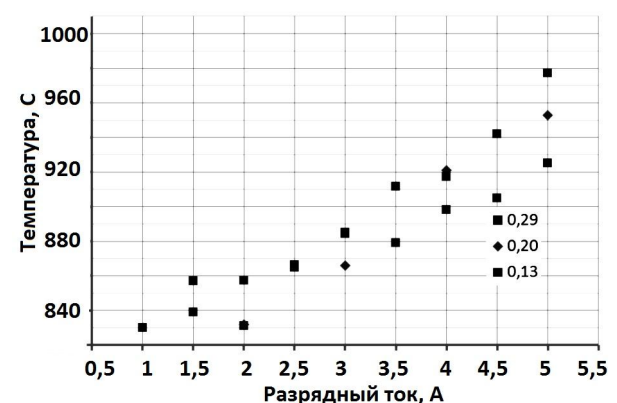


Рис. 7. Зависимости температуры корпуса катода от величины разрядного тока

Результаты эксперимента продемонстрировали диапазон температуры корпуса эмиттера в пределах 820-980°С, что не превышает 1000°С и является ниже расчетных значений. Дальнейшая оптимизация конструкции катода позволит снизить рабочие тем-

пературы в местах пайки деталей, что повысит надежность изделия и снизит его стоимость за счет применения менее тугоплавких припоев.

Различия между расчетом и экспериментальными данными могут объясняться наличием отверстий в киппере (рис. 2), моделирование которых не учитывалось при расчете осесимметричной двухмерной модели.

На данный момент катод проработал более 150 часов, продемонстрировав стабильность характеристик и отсутствие дефектов при периодическом визуальном осмотре. Планируемый расчетный ресурс катода составляет более 8000 часов.

Измерение вольт-амперных и вольт-расходных характеристик показали, что катод может быть с успехом применен для комплектации как двигателей СПД-100 с мощностью 1350 Вт, так и для двигателей СПД-70 и СПД-50 с мощностями 650 и 200 Вт соответственно.

Выводы и дальнейшие перспективы

Проведенные испытания разработанного безнакального полого катода для двигателя типа СПД100 продемонстрировали устойчивую работу катода при токах 1-5 А (при номинальном разрядном токе СПД100 – 4,5 А), а также возможность работы на токи до 8 А. Рабочая температура эмиттера при этом не превышала 1000 С.

Испытания катода подтвердили адекватность и применимость тепловой модели катода, а также заложенные в конструкцию технические решения.

Дальнейшие работы будут направлены на исследования работы катода при разрядных токах до 8 А и проведении ускоренных ресурсных испытаний с применением метода оптической эмиссионной спектроскопии.

Авторы выражают благодарность своим коллегам М. Ю. Титову и А. Н. Хаустовой за техническую поддержку при составлении конструкторской документации и проведении испытаний катода.

Литература

1. Goebel, D. M. *Fundamentals of Electric Propulsion Ion and Hall Thrusters [Text]* / Dan M. Goebel, Ira Katz. – Jet Propulsion Laboratory California Institute of Technology, USA, 2008. – 514 с.

2. Лоян, А. В. *Результаты разработки и испытаний микрорасходного катода-нейтрализатора на рабочие токи до 300 мА [Текст]* / А. В. Лоян, А. И. Цаглов // *Авиационно-космическая техника и технология*. – 2015. – № 8 (125). – С. 65-69.

3. Koshelev, N. N. *Investigation of Hollow Cathode for Low Power Hall Effect Thruster [Электронный*

ресурс] / N. N. Koshelev, A. V. Loyan // *International electric propulsion conference IEPC-2007-103*. – Режим доступа: http://erps.spacegrant.org/uploads/images/images/iepc_articledownload_1988-2007/2007index/IEPC-2007-103.pdf. – 1.06.2016.

4. 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.

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, М. Ю. Титов // *Авиационно-космическая техника и технология*. – 2013. – №10 (107). – С. 42-46.

6. Loyan A. V. *Analyze of gas propellant consumption oscillation when the self-heated hollow cathode is starting from "Cold state" [Электронный ресурс]* / A.V. Loyan // *International electric propulsion conference IEPC-1999-138*. – Режим доступа: http://erps.spacegrant.org/uploads/images/images/iepc_articledownload_1988-2007/1999index/9138.pdf. – 1.06.2016.

References

1. Goebel, D. M., Katz, I. *Fundamentals of Electric Propulsion Ion and Hall Thrusters, Jet Propulsion Laboratory California Institute of Technology, USA, 2008*. 514 p.

2. Loyan, A. V., Tsaglov, O. I. *Rezultaty razrabotki i ispytaniy mikroraskhodnogo katoda-neitralizatora na rabochie toki do 300 mA [Results of micro flow cathode-neutralizer with operating current up to 300 mA development and testing]. Aviatcionno-kosmicheskaya tekhnika i tekhnologiya, 2015, no. 8 (125), pp. 65-69.*

3. Koshelev, N. N., Loyan, A. V. *Investigation of Hollow Cathode for Low Power Hall Effect Thruster, Proceedings of International electric propulsion conference IEPC-2007-103*. [The global pharmaceutical industry]. Available at: http://erps.spacegrant.org/uploads/images/images/iepc_articledownload_1988-2007/2007index/IEPC-2007-103.pdf (accessed 1.06.2016).

4. Koshelev, N. N., Tsaglov, A. I., Fedotenko, V. A. *Modelirovanie startovogo nagreva beznakalnogo katoda-kompensatora dlya mikro SPD [Simulation of startup heating of heaterless cathode for small stationary plasma thruster]. Aviatcionno-kosmicheskaya tekhnika i tekhnologiya, 2009, no. 8 (65), pp. 116-120.*

5. Loyan, A. V., Koshelev, N. N., Tsaglov, A. I., Titov, M. Y. *Issledovanie raspredeleniya teplovykh potokov v konstruktsii beznakalnogo poлого katoda ERD pri rabochikh tokakh do 50 A [Investigation of thermal fluxes distribution in the construction of heaterless hol-*

low cathode for electric propulsion in operating current range up to 50 A]. *Aviatsionno-kosmicheskaya tekhnika i tekhnologiya*, 2013, № 10 (107), pp. 42-46.

6. Loyan, A. V. Analyze of gas propellant consumption oscillation when the self-heated hollow cathode is starting from "Cold state". *Proceedings of Inter-*

national electric propulsion conference IEPC-1999-138 [The global pharmaceutical industry]. Available at: http://erps.spacegrant.org/uploads/images/images/iepc_articledownload_1988-2007/1999/index/9138.pdf (accessed 1.06.2016).

Поступила в редакцию 12.05.2016, рассмотрена на редколлегии 16.06.2016

Рецензент: д-р техн. наук, доц., доц. кафедры теоретической механики, машиноведения и роботомеханических систем Ю. А. Сысоев, Национальный аэрокосмический университет им. Н. Е. Жуковского «ХАИ», Харьков.

ТЕПЛОВА СХЕМА Й РЕЗУЛЬТАТИ ВИПРОБУВАНЬ БЕЗНАКАЛЬНОГО ПОРОЖНИСТОГО КАТОДУ НА СТРУМ 2-5 А ДЛЯ СПД100

А. В. Лоян, О. П. Рыбалов, Є. І. Іщенко, О. І. Цаглов

У статті викладені питання розробки безнакального полого катода на струми 2-5 А для стаціонарного плазмового двигуна СПД100. Розглянуто теплова схема катода, отримана шляхом моделювання твердотільної моделі катода методом кінцевих елементів і вимірювань температури корпусу катода за допомогою пірометра, а також результати випробувань катода в діодному режимі. Наведено результати динамічних стартових випробувань катода, а також його вольт-амперні характеристики при стаціонарному режимі роботи і різних масових витратах робочого тіла - ксенону - через катод. Продемонстровано ефективна робота розробленого катода при токах від 1 до 5 А і масових витратах 0,3-0,15 мг/с, показано, що час старту катода з виходом його на робочі параметри складає всього 3-5 сек.

Ключові слова: електроракетний двигун, безнакальний порожнистий катод, вольт-амперна характеристика

THERMAL CONDITIONS AND TEST RESULTS OF HEATERLESS HOLLOW CATHODE FOR CURRENTS 2-5 A FOR SPT100

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

The article describes the issues of heaterless hollow cathode with currents 2-5 A for stationary plasma thruster SPT100 development. The thermal conditions, obtained by modeling of cathode solid model using finite element method and the measurements of the cathode body temperature using a pyrometer, are considered. Results of tests of the cathode in the diode mode are described. Results of the dynamic tests of cathode starting, as well as its current-voltage characteristics in stationary mode with various mass flow rate of the working medium - xenon - through the cathode are presented. It is demonstrated that the developed cathode has effective operation with currents of 1 to 5 A and mass flow rates 0,3-0,15 mg/sec. It is shown that the start time of cathode with output to operating point is only 3-5 seconds.

Keywords: electric propulsion, heaterless hollow cathode, current-voltage characteristic

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

Рыбалов Олег Петрович – мл. науч. сотр. каф. 402 Национального аэрокосмического университета им. Н. Е. Жуковского «ХАИ», Харьков, Украина.

Іщенко Евгений Иванович – науч. сотр. каф. 401 Национального аэрокосмического университета им. Н. Е. Жуковского «ХАИ», Харьков, Украина.

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

Loyan Andrey Vitaliyovich - Candidate of Technical Science, Senior Researcher of department 402, head of Electric Propulsion department of MSTC STE, National Aerospace University named after N. Ye. Zhukovsky "KhAI", Kharkov, Ukraine, e-mail: a.loyan@khai.edu.

Rubalov Oleg Petrovich - junior Researcher of department 402, National Aerospace University named after N. Ye. Zhukovsky "KhAI", Kharkov, Ukraine.

Ishenko Evgeniy Ivanovich – researcher of department 402, National Aerospace University named after N. Ye. Zhukovsky "KhAI", Kharkov, Ukraine.

Tsaglov Alexandr Igorevich - Candidate of Technical Science, Senior Researcher of department 402, National Aerospace University named after N. Ye. Zhukovsky "KhAI", Kharkov, Ukraine, e-mail: a.tsaglov@khai.edu.