

УДК 533.9.07

А. В. ЛОЯН, А. И. ЦАГЛОВ

*Национальный аэрокосмический университет им. Н. Е. Жуковского «ХАИ», Украина***РЕЗУЛЬТАТЫ РАЗРАБОТКИ И ИСПЫТАНИЙ МИКРО РАСХОДНОГО КАТОДА-НЕЙТРАЛИЗАТОРА НА РАБОЧИЕ ТОКИ ДО 300 мА**

В статье рассмотрены вопросы влияния параметров полого катода на характеристики электроракетного двигателя, обоснована необходимость снижения массового расхода через катод и потребляемой катодом электрической мощности. Изложены физические аспекты разработки и результаты теплового моделирования конструкции катода. Представлены результаты испытаний микрорасходного (мкг/с) безнакального катода-нейтрализатора на рабочие токи до 300 мА для электроракетных двигателей. Показано, что созданная модель катода обеспечивает нейтрализацию ионного пучка с током от 0 до 300 мА при потенциале пучка 10-45 В, энергозатратах 5,5-12,5 Вт и расходе ксенона 10-30 микрограмм/сек. Использование такой модели катода позволит увеличить на 13-21 % удельный импульс маломощной двигательной установки и снизить необходимый запас рабочего тела на борту космического аппарата.

Ключевые слова: электроракетный двигатель, безнакальный полый катод, нейтрализация струи.

Введение

Полый катод является одним из ключевых элементов электроракетной двигательной установки (ЭРДУ) [1], так как без него не возможны запуск и работа двигателя, а его ресурс определяет ресурс ЭРДУ в целом. Являясь источником электронов, необходимых для ионизации рабочего тела и нейтрализации объемного заряда струи, катод влияет на основные параметры двигателя, такие как его удельный импульс и КПД.

Удельный импульс ЭРДУ определяется по следующей формуле [1]:

$$I_s = \frac{F}{\dot{m} \cdot g} = \frac{F}{g \cdot (\dot{m}_a + \dot{m}_c)}, \quad (1)$$

где F – тяга двигателя, \dot{m}_a , \dot{m}_c – массовые расходы рабочего тела (РТ) через анод и катод, g – ускорение свободного падения.

КПД ЭРДУ описывается выражением [1]:

$$\eta = \frac{F^2}{2 \cdot \dot{m} \cdot P} = \frac{F^2}{2 \cdot (\dot{m}_a + \dot{m}_c) \cdot P}, \quad (2)$$

где P – потребляемая двигателем мощность.

Электрическую мощность можно выразить следующим образом [2]:

$$P = I \cdot U = I \cdot (U_c + U_a), \quad (3)$$

где I – разрядный ток, U – разрядное напряжение, U_c – потенциал струи катода, U_a – падение напряжения в разрядной камере двигателя.

В качестве примера рассмотрим двигатель

СПД20М6 [3], разработанный в отделении ЭРД ХАИ. Стандартные массовые расходы через анод и катод составляют 0,3 и 0,075 мг/с соответственно, тяга двигателя – 4,5 мН, потребляемая мощность – 100 Вт.

Пользуясь формулами (1) и (2) можно рассчитать предельные возможности улучшения характеристик двигателя при обнулении массового расхода через катод. В таком случае прирост удельного импульса и КПД двигателя составит 25% (с 1200 до 1500 с) и 26% (с 0,27 до 0,34) соответственно.

Исходя из вышеизложенного видно, что для увеличения КПД ЭРДУ необходимо добиваться минимизации массового расхода РТ через катод и величины потенциала струи – затрат на транспортировку электрона из полости катода в разрядную камеру двигателя. Таким образом, задачи разработки катодов со сниженными энергозатратами и массовым расходом РТ являются актуальными.

Вопросами разработки полых катодов с малыми расходами в Украине занимались в ХАИ и в ДГУ [4], однако разрабатываемые в Днепропетровске катоды рассчитаны на использование цезия в качестве РТ, что значительно усложняет их испытания и применение. В ХАИ пошли по пути создания катодов, работающих на инертных газах, наиболее часто – ксеноне, используемом как в двигателях, так и в катодах.

Целью данной работы являлась разработка и испытания безнакального полого катода-нейтрализатора [3] с потребляемой мощностью менее 10 Вт, массовым расходом в десятки микрограмм и током нейтрализации до 300 мА.

Такой тип катода будет применим на электро-ракетных двигателях типа СПД и ПИД с потребляемой мощностью 50..300 Вт.

Теоретическая база и прототип

Исходя из накопленного в отделении ЭРД ХАИ опыта по разработке безнакальных полых катодов, известно, что для стабильной работы эмиттера необходима его рабочая температура в диапазоне 900 - 1300⁰С [5]. Для обеспечения диффузионной привязки на эмиттере необходимо рабочее давление Хе в полости катода в диапазоне 20...50 торр [5]. При работе в оптимальном режиме с диффузионной привязкой на эмиттере выделяется около 30% от разрядной мощности в диодном режиме [6].

В качестве прототипа был выбран катод безнакального типа БНК М1R (рис. 1). Рабочий диапазон токов которого составляет 0.25-1.25 А, масса - 30 гр (без кабелей), который был разработан в ходе контракта ХАИ №402-24/2010.



Рис. 1. 1А катод БНК М1R

Этот катод прекрасно зарекомендовал себя при работе с маломощными двигателями типа СПД (P=50...250 Вт) и ПИД (150...300 Вт и 1,5кВт). Характеристики катода (рис. 2) позволяют работать на токах 0,5..1,5 А при массовых расходах РТ 0,06..0,13 мг/с.

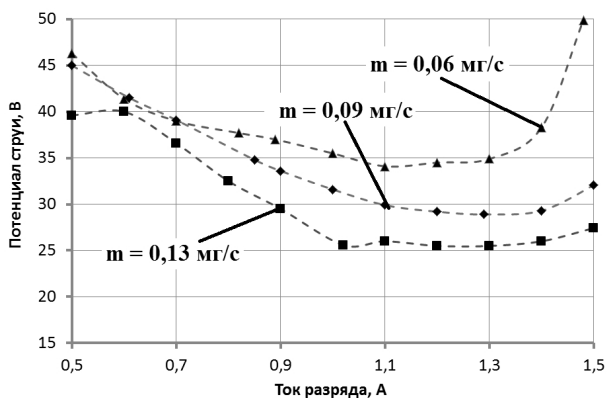


Рис. 2. Вольт-амперная характеристика катода БНК М1R

При этом минимально возможный рабочий ток составлял 0,25А при расходах не менее 0,05 мг/с.

Предварительные расчёты

Для оценки теплового состояния эмиттера и возможностей минимизации тепловых потерь использовалась одномерная модель «подвешенного» эмиттера (рис. 3). Учитывался только радиационный теплоотвод при степени черноты поверхности равной единице.

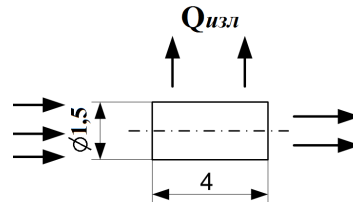


Рис. 3. Схема «подвешенного» эмиттера

Согласно формуле (4), максимальная теплоотдача с эмиттера излучением составляет 3,7 Вт для рабочей температуры 1000⁰С без экранов. Применяя 3 экрана (для расчетов использовалась формула (5), учитывающая влияние количества экранов на тепловые потери излучением) можно снизить мощность излучения до 1,2 Вт.

$$Q_{изл} = \varepsilon \cdot \sigma \cdot S \cdot (T^4 - T_0^4), \quad (4)$$

$$\varepsilon_2 = \frac{\varepsilon_1}{n+1}, \quad (5)$$

где ε – степень черноты, σ – постоянная Стефана-Больцмана, S – площадь поверхности, T , T_0 – температуры тела и окружающей среды, n – число экранов.

Для оценки потерь теплопроводностью в металлокерамический узел также применялась простейшая одномерная модель (рис. 4), излучение с поверхности ножки эмиттера не учитывалось.

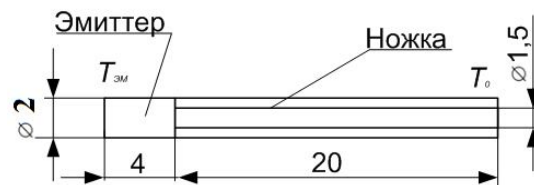


Рис. 4. Схема эмиттера с ножкой

Исходя из ранее полученных экспериментальных данных, в расчетах температура эмиттера принималась равной 1000⁰С, края ножки эмиттера - 200⁰С. Коэффициент теплопроводности для материала ножки – ковара – 19 Вт/м·К.

Тепловой поток рассчитывался по формуле:

$$Q = \alpha \cdot \frac{\Delta T}{l} \cdot S, \quad (6)$$

где l – длина ножки эмиттера, α – коэффициент теплопроводности. Полученное значение составило 4,2 Вт.

Таким образом, общий тепловой поток с эмиттера может составлять довольно значительную величину. Оценка сверху указывает на $4,2 + 3,7 = 7,9$ Вт. При этом потери на теплопроводность немного превышают потери на излучение.

По результатам данного анализа были приняты следующие методы снижения тепловых потерь:

1) излучением:

- уменьшение общей площади эмиттера;
- уменьшение степени черноты;
- увеличение до максимально возможного количества экранов;

2) теплопроводностью:

- увеличение длины ножки эмиттера;
- уменьшение сечения ножки эмиттера;
- применение материалов с минимальным коэффициентом теплопроводности для данного диапазона температур.

Понятно, что учёт ограничений, вызванных действием других факторов (например, вибрационных нагрузок и т.д.) также необходим.

МКУ моделирование

Для оптимизации конструкции было использовано тепловое моделирование методом конечных элементов в программном пакете ANSYS.

На первом этапе использовалась модель, аналогичная рис. 4. Учитывалась теплоотдача излучением со всей поверхности. Температура, равная 1000°C задавалась на внутренней поверхности эмиттера. Рассчитывался тепловой поток с конструкции в окружающую среду излучением и теплопроводностью в ножку эмиттера. С учётом изложенных ранее мер по снижению тепловых потерь была проведена серия моделирований со следующими условиями:

- применялись от 1 до 4-х экранов;
- степень черноты ножки эмиттера задавалась в диапазоне 0,3...0,8;
- длина ножки эмиттера варьировалась от 50 до 150 мм.

Полученные результаты расчетов с ножкой эмиттера изготовленной из материала с высокой и низкой теплопроводностью (молибден и ковар) представлены на рис. 5 и 6.

Анализ полученных данных показал, что, применяя все способы снижения тепловых потерь, выделенные на этапе оценочного расчета, возможно создать безнакальный полый катод на токи нейтра-

лизации 50...300 мА при потребляемой мощности 2...6 Вт.

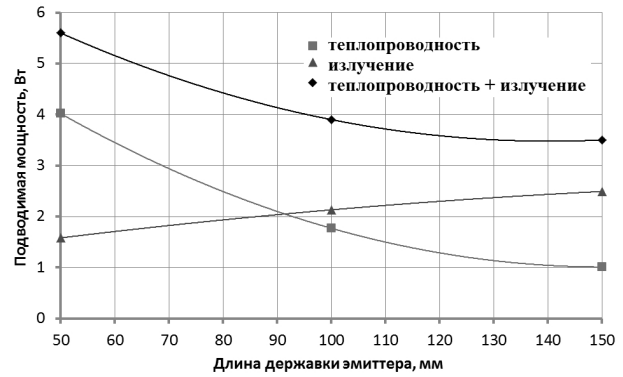


Рис. 5. Зависимость подводимой мощности от длины ножки эмиттера (молибден)

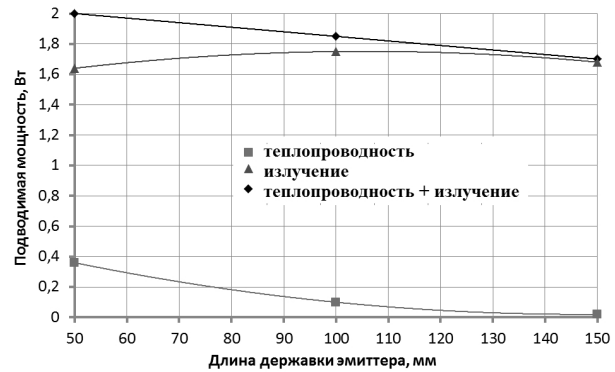


Рис. 6. Зависимость подводимой мощности от длины ножки эмиттера (ковар)

На втором этапе теплового моделирования была проведена детальная проработка конструкции катода, а именно количество, толщины и тип крепления тепловых экранов, применяемые материалы, длина ножки эмиттера и т.п.

При оптимизации использовался модифицированный симплекс метод с выбором главных влияющих факторов. Было проведено более 50 вариантов расчетов.

На рис. 7, 8 представлены результаты расчетов для тепловых нагрузок 2 Вт и 4 Вт.

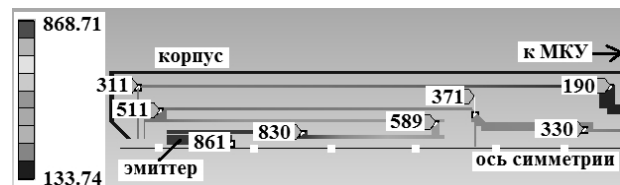


Рис. 7. Температурная карта катода при тепловом потоке на эмиттер 2 Вт

Очевидно, что принятые технические решения позволили создать необходимые температурные

условия для работы эмиттера. Также проведенные тепловые расчеты позволили подобрать необходимые типы припоев для соединения различных элементов конструкции катода и приступить к его изготовлению.

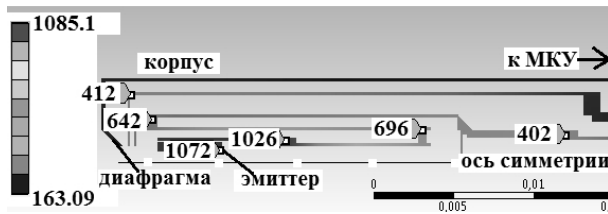


Рис. 8. Температурная карта катода при тепловом потоке на эмиттер 4 Вт

Результаты испытаний

Испытания изготовленной модели изделия (рис. 9) проводились в диодном режиме.

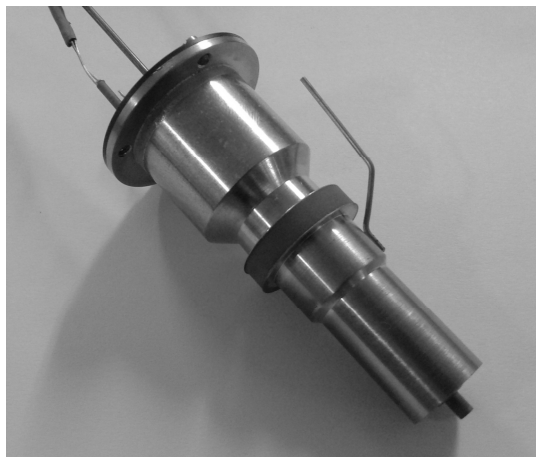


Рис. 9. Фотография изготовленного катода-нейтрализатора

Для измерения расхода РТ применялся расходомер Bronkhorst F-200CV-002-ABD-11-V, позволяющий измерять расход ксенона в диапазоне 0..0,2 мг/с с точностью – 0,5% [7].

Электрическая схема испытаний катода-нейтрализатора представлена на рис. 10.

Для питания внутреннего разряда катода между эмиттером (Э) и киппером (К) и внешнего разряда киппер – анод (А) использовались два отдельных источника питания ИП1 и ИП2, соответственно с общим минусом на эмиттере. Для запуска катода использовался блок поджига (БП), обеспечивающий пробой разряда между эмиттером и поджигающим электродом (П.Э.). После запуска катода блок поджига автоматически отключался.

Потребляемая нейтрализатором электрическая мощность (эмиттер-поджигающий электрод) составляла около 5-12 Вт. Массовый расход ксенона в стационарном режиме работы составлял 10-30 мкг/с. Результаты испытаний представлены на рис. 11.

Рис. 10. Электрическая схема испытаний катода-нейтрализатора

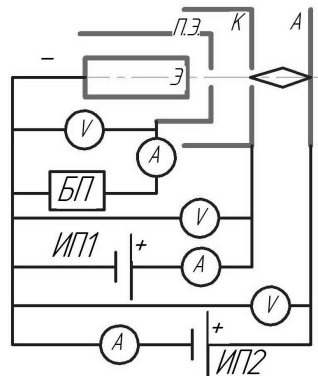


Рис. 10. Электрическая схема испытаний катода-нейтрализатора

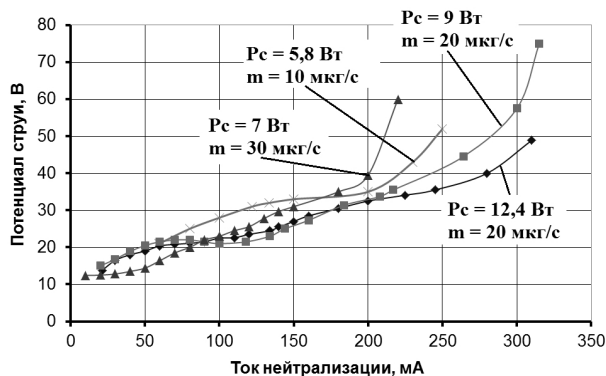


Рис. 11. Результаты испытаний микрорасходного катода-нейтрализатора

Выводы и дальнейшие перспективы

Результаты испытаний показали, что созданная модель безнакального катода-нейтрализатора обеспечивает нейтрализацию ионного пучка с током до 300 мА при потенциале пучка не более 45 В, энергозатратах 5,5-12,5 Вт и расходе 10-30 микрограмм/сек.

Согласно проведённому во введении анализу влияния катода на параметры двигателя СПД20 с учетом полученных экспериментальных данных, можно сделать вывод, что применение разработанного катода-нейтрализатора с расходом РТ 0,03..0,01 мг/с позволит повысить удельный импульс и КПД двигателя на 13..21 % и 15..22 % соответственно.

Анализ конструкции катода позволяет сделать вывод о возможности её дальнейшего усовершенствования с целью снижения потребляемой мощности до уровня менее 5 Вт и расходах менее 10 мкг/с в установленном диапазоне токов нейтрализации.

Литература

1. Стационарные плазменные двигатели [Текст] : учеб. пособие / Н. В. Белан, В. П. Ким, А. И. Оранский [и др.] – Х. : ХАИ, 1989. – 315 с.
2. Научные основы создания новых высокоэффективных катодов для плазменных технологий в космической, авиационной и других отраслях промышленности [Текст] : отчет по НИР (заключ.) / Нац. аэрокосмический университет им. Н. Е. Жуковского «ХАИ»; рук. Таран А.; испол. Лоян А. В., Цагов О. И. – Х., 2014 – 162 с. – № ДР 0112U001039. – Инв. № 0215U006162.
3. Loyan, A. V. Performance investigation of SPT-20M low power hall effect thruster [Electronic resource] / A. V. Loyan, T. A. Maksymenko // The 30th International Electric Propulsion Conference, Florence, Italy September 17-20, 2007, IEPC-Italy-2007-100. – Access: http://erps.spacegrant.org/uploads/images/images/iepc_articledownload_1988-2007/2007index/IEPC-2007-100.pdf. – 8.05.2015.
4. Хитько, А. В. Методика расчета полого катода с внутренним разрядом [Текст] / А. В. Хитько, А. М. Черкун // Авиационно-космическая техника и технология. – 2010. – № 10 (77). – С. 103 – 105.
5. Koshelev, N. N. Investigation of Hollow Cathode for Low Power Hall Effect Thruster [Text] / N. N. Koshelev, A. V. Loyan // IEPC, Italy-2007-103. – Режим доступа: http://erps.spacegrant.org/uploads/images/images/iepc_articledownload_1988-2007/2007index/IEPC-2007-103.pdf. – 2.05.2015.
6. 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.
7. Официальный сайт фирмы Bronkhorst [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://www.bronkhorst.com/files/downloads/datasheets/el-flow/f-200cv.pdf>. – 8.05.2015.

Поступила в редакцию 6.06.2015, рассмотрена на редколлегии 19.06.2015

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

РЕЗУЛЬТАТИ РОЗРОБКИ Й ВИПРОБУВАНЬ МІКРО ВИТРАТНОГО КАТОДУ-НЕЙТРАЛІЗАТОРУ НА РОБОЧІ СТРУМИ ДО 300 МА

А. В. Лоян, О. І. Цаглов

У статті розглянуто питання впливу параметрів порожнистого катода на характеристики електроракетного двигуна, обґрунтовано необхідність зниження масових витрат через катод й споживаної катодом електричної потужності. Викладено фізичні аспекти розробки й результати теплового моделювання конструкції катода. Представлено результати випробувань мікровитратного (мкг/с) безнакального катоду-нейтралізатору на робочі струми до 300 мА для електроракетних двигунів. Показано, що виготовлена модель катода забезпечує струм нейтралізації іонного пучка струмом від 0 до 300 мА при потенціалі струменя 10-45 В, енерговитратах 5,5-12,5 Вт та витратах ксенону 10-30 мікрограм/сек. Використання такої моделі катода дозволить збільшити на 13-21 % питомий імпульс малопотужної рушійної установки й зменшити необхідний запас робочого тіла на борту космічного апарату.

Ключові слова: електроракетний двигун, безнакальний порожнистий катод, нейтралізація струменя.

RESULTS OF MICRO MASS FLOW CATHODE-NEUTRALIZER WITH OPERATING CURRENT UP TO 300 mA DEVELOPMENT AND TESTING

A. V. Loyan, O. I. Tsaglov

In article are described questions of hollow cathode parameters influence on plasma thruster characteristics. It is validated a necessity to reducing of hollow cathode mass flow rate and power consumption. Physical aspects of development and results of cathode construction thermal modeling are describes. Test results of micro flow rate (mcg/s) heaterless cathode-neutralizer for electric propulsion with working current up to 300 mA are presented. It is shown that manufactured cathode model provides neutralized current from 0 to 300 mA with plume potential 10-45 V, power consumption 5,5-12,5 W and xenon mass flow rate 10-30 microgram/sec. Application of this model with low power electric propulsion system will allow to increase on 13-21 % specific impulse of thruster module and to reduce necessary mass of propellant on spacecraft board.

Key words: electric propulsion thruster, heaterless hollow cathode, plume neutralization.

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.

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.