



Государственная корпорация
по космической деятельности "Роскосмос"



Акционерное общество
"Центральный научно-исследовательский институт
машиностроения" (АО "ЦНИИмаш")

ул. Пионерская, д. 4, корп. 22
г.о. Королёв,
Московская область, 141070

Тел.: +7 (495) 513 5951
Факс: +7 (495) 512 2100

e-mail: corp@tsnimash.ru
http://www.tsnimash.ru

ОГРН 1195081054310
ИНН/КПП 5018200994/501801001

13.08.2025 исх. № BX-17845

На № _____ от _____

Председателю диссертационного
совета 24.2.327.06
на базе ФГБОУ ВО "МАИ (НИУ)"
д-ру техн. наук, проф.

Равиковичу Ю.А.

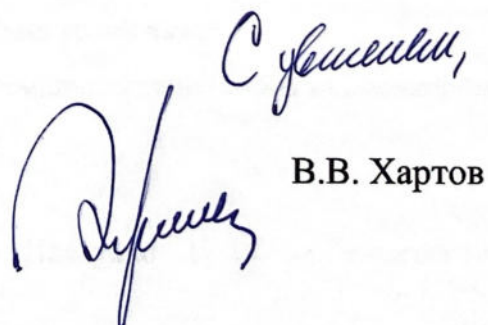
В ответ на исх. № 205-041-25 от 03.07.2025

Уважаемый Юрий Александрович!

В ответ на исх. № 205-041-25 от 03.07.2025 высылаю Вам отзыв ведущей организации АО "ЦНИИмаш" на диссертацию Подгуйко Николая Андреевича на тему: "Полый магнетронный катод для электроракетных двигателей и ускорителей плазмы", представленную на соискание ученой степени кандидата технических наук по специальности 2.5.15 – "Тепловые, электроракетные двигатели и энергоустановки летательных аппаратов", а также вышеуказанную диссертацию.

Приложения: 1. Отзыв ведущей организации на 6 л. в 2 экз.
2. Диссертация, 1 книга

Генеральный конструктор по автоматическим
космическим системам и комплексам -
заместитель генерального директора


В.В. Хартов

Исп.: Маленков Антон Александрович
Тел.: +7 (495) 513-47-39
Моб.: +7-916-812-32-13



УТВЕРЖДАЮ

Генеральный конструктор по
автоматическим космическим системам и
комплексам

заместитель генерального
директора, д-р техн. наук, проф.

В.В. Хартов

2025 г.



ОТЗЫВ ВЕДУЩЕЙ ОРГАНИЗАЦИИ

на диссертационную работу Подгуйко Николая Андреевича на тему: "Полый магнетронный катод для электроракетных двигателей и ускорителей плазмы", представленную на соискание ученой степени кандидата технических наук по специальности 2.5.15 – "Тепловые, электроракетные двигатели и энергоустановки летательных аппаратов"

Актуальность

Исследование посвящено созданию и анализу холодного полого магнетронного катода (ХПМК), предназначенного для применения в электроракетных двигателях (ЭРД) и плазменных ускорителях. В современных условиях, когда космическая отрасль стремится к использованию альтернативных и более доступных рабочих тел, таких как йод и атмосферный воздух, задача разработки катодов, способных эффективно функционировать в агрессивных средах, становится особенно значимой. Работа отвечает на вызовы, связанные с увеличением эффективности и надежности ЭРД, а также с расширением их эксплуатационных возможностей за счет внедрения новых типов катодов.

Вышесказанное обуславливает актуальность темы диссертационного исследования Подгуйко Н.А.

Научная новизна

Научная новизна диссертационной работы Подгуйко Н.А. заключается в следующем:

- впервые реализована многоступенчатая конструкция ХПМК, что позволило существенно снизить энергозатраты на генерацию электронов по сравнению с одноступенчатой конструкцией;
- разработана и апробирована математическая модель, описывающая процессы в многоступенчатом ХПМК и позволяющая выбирать оптимальное число ступеней для достижения требуемых токовых характеристик;

- экспериментально подтверждена возможность работы ХПМК в составе ЭРД с замкнутым дрейфом электронов;
- получен патент на изобретение, отражающий ключевые технические решения, предложенные в диссертации.

Общая характеристика работы

Введение. В начале работы обосновывается актуальность разработки новых типов катодов для ЭРД, учитывая современные тенденции перехода к альтернативным рабочим телам, таким как йод и атмосферный воздух. Подчеркивается, что существующие катоды-компенсаторы плохо подходят для эксплуатации с химически активными средами, что ограничивает развитие ЭРД. Вводится понятие ХПМК в качестве перспективного решения этой проблемы. Формулируются основные цели и задачи исследования, а также обозначаются научная новизна и практическая значимость работы.

В первой главе проводится детальный обзор существующих и перспективных моделей электроракетных двигателей, включая анализ их основных характеристик и областей применения. Особое внимание уделяется вопросам выбора рабочего тела – сравниваются традиционные (ксенон) и альтернативные вещества (йод, воздух), приводятся их преимущества и недостатки для ЭРД. Рассматриваются современные конструкции катодов-компенсаторов, их ограничения, а также зарубежный и отечественный опыт в этой области. Обсуждаются вызовы, связанные с использованием химически активных газов, и выделяются требования к новым типам катодов. Кроме того, анализируются возможные области применения ХПМК помимо ЭРД, например, в плазменных контакторах и технологических ускорителях.

Вторая глава посвящена теоретическому анализу рабочих процессов в ХПМК. Описываются основные параметры, определяющие эффективность катода: энергетическая цена электрона и коэффициент использования рабочего тела. Приводится математическая модель магнетронного разряда, позволяющая оценивать минимальные напряжения и условия устойчивого горения разряда. Рассматривается влияние материалов катода, рабочего газа, давления и магнитного поля на характеристики устройства. Особое внимание уделяется многоступенчатой схеме ХПМК, которая позволяет существенно снизить энергозатраты на генерацию электронов. Проводится расчет оптимального числа ступеней катода для достижения заданных рабочих токов и ресурса устройства. Также анализируются вопросы теплового режима и эрозии катода, что важно для долговечности конструкции.

В третьей главе подробно описывается экспериментальная база, используемая для исследования ХПМК. Представлены схемы вакуумных стендов, системы подачи рабочего

газа, методы измерения токов, напряжений, давления и магнитного поля. Описываются различные конструкции исследуемых катодов, включая как водоохлаждаемые, так и радиационно-охлаждаемые варианты. Приводится методика проведения экспериментов, включая алгоритмы настройки параметров, регистрации данных и анализа погрешностей измерений. Обсуждается подход к оценке давления паров йода, используемого в качестве рабочего тела, и способы калибровки оборудования. Приводится обоснование достоверности получаемых экспериментальных данных.

Четвертая глава посвящена анализу экспериментальных результатов, полученных на различных конструкциях ХПМК. Последовательно рассматриваются одноступенчатые, двухступенчатые и трехступенчатые катоды. Для каждого типа конструкции приводятся результаты измерений вольт-амперных характеристик, энергетической цены электрона, коэффициента использования рабочего тела и влияния различных параметров (материал катода, рабочий газ, магнитное поле, давление) на работу устройства. Показано, что многоступенчатые схемы позволяют существенно повысить эффективность катода. Приводится анализ особенностей работы ХПМК на химически активных газах, таких как йод и воздух, а также результаты сравнительных испытаний с традиционными катодами. Обсуждаются вопросы оптимизации конструкции для достижения лучших показателей.

В пятой главе рассматривается интеграция ХПМК в состав электроракетного двигателя с анодным слоем (ДАС). Описываются особенности экспериментального стенда, используемого для комплексных испытаний, и методы измерения тяги, потенциалов и других ключевых параметров. Приводятся результаты сравнительных экспериментов по работе ДАС с традиционным термоэмиссионным катодом и с ХПМК. Анализируются параметры тяги, разрядных токов, энергетической эффективности и качества компенсации ионного пучка. Показано, что применение ХПМК позволяет добиться уровня характеристик, сопоставимого с лучшими зарубежными аналогами, и обеспечить стабильную работу ДАС на различных рабочих телах. Обсуждаются особенности влияния параметров ХПМК на эффективность всей двигательной установки.

В заключении обобщаются основные результаты исследования, делаются выводы о преимуществах и перспективах внедрения ХПМК в современные и будущие электроракетные двигатели и плазменные ускорители. Подчеркивается, что разработанная многоступенчатая схема ХПМК позволяет существенно повысить энергетическую и газовую эффективность катода, что подтверждено как теоретически, так и в ходе экспериментальных испытаний. Отмечается возможность практического применения полученных результатов в космической и технологической отраслях, а также в образовательном процессе.

Достоверность результатов

Обоснованность теоретических выводов подтверждается использованием проверенных физических принципов и расчетных методов, а экспериментальные данные получены с помощью современных измерительных комплексов, что обеспечивает высокую степень надежности выводов. Проведено сопоставление экспериментальных результатов с расчетными оценками, а также анализ возможных погрешностей и влияния различных факторов на точность измерений.

Теоретическая и практическая значимость

Теоретическая значимость работы заключается в формировании новой инженерной модели для расчета и проектирования многоступенчатых ХПМК, что расширяет инструментарий для оптимизации катодов в области электрической ракетной техники.

Практическая значимость подтверждается изготовлением и испытанием опытных образцов ХПМК, пригодных для внедрения в профильных предприятиях космической и промышленной сферы, а также для использования в учебных программах технических вузов.

Личный вклад автора

Автор самостоятельно провёл анализ литературы и патентных источников, сформулировал требования к катоду нового типа, разработал математическую модель рабочих процессов, участвовал в проектировании, сборке и экспериментальных исследованиях опытных образцов ХПМК, а также в анализе их совместной работы с двигателем с анодным слоем. Основные результаты работы получены лично автором или при его непосредственном участии.

Публикации

По материалам диссертационного исследования опубликованы семь научных работ, включая две статьи в изданиях, входящих в перечень ВАК РФ, одна статья в журнале, индексируемом в базе Scopus, и четыре тезиса докладов на научных конференциях.

Замечания

1. Не представлены результаты длительных ресурсных испытаний ХПМК, что не позволяет оценить его долговечность в реальных условиях эксплуатации.
2. Отсутствует анализ массы, потребляемой мощности, габаритов и компоновочных особенностей полого магнетронного катода, что затрудняет сравнение с существующими решениями и оценку применимости в ЭРД.

3. Не приведены экспериментальные результаты работы многоступенчатых катодов на йоде или воздухе, что ограничивает выводы о пригодности конструкции для альтернативных рабочих тел.

4. Не рассмотрены аспекты масштабирования катода для разных диапазонов токов и вопросы промышленного внедрения, что снижает прикладную ценность результатов.

Сделанные замечания не снижают общей положительной оценки диссертационной работы Подгуйко Н.А.

Заключение

Диссертация Подгуйко Николая Андреевича на тему "Полый магнетронный катод для электроракетных двигателей и ускорителей плазмы" представляет собой законченную научно-квалификационную работу, в которой решена актуальная научно-техническая задача повышения эффективности и ресурса катодов для электроракетных двигателей, в том числе на альтернативных рабочих телах, имеющая значение для развития и расширения эксплуатационных возможностей ЭРД.

Тема и содержание диссертации Подгуйко Николая Андреевича соответствуют паспорту специальности 2.5.15. – "Тепловые, электроракетные двигатели и энергоустановки летательных аппаратов" (пункты 1, 2 и 6 Паспорта специальности).

По своей актуальности, научной новизне, объему выполненных исследований, теоретической и практической значимости полученных результатов, а также оформлению и содержанию данная работа соответствует требованиям п. 9-14 "Положения о присуждении ученых степеней", утвержденного Постановлением Правительства Российской Федерации от 24.09.2013 № 842, предъявляемым к работам, поданным на соискание ученой степени кандидата наук, а её автор, Подгуйко Николай Андреевич, заслуживает присуждения степени кандидата технических наук по специальности 2.5.15. – "Тепловые, электроракетные двигатели и энергоустановки летательных аппаратов".

Настоящий отзыв обсужден и одобрен на заседании секции 10 "Автоматические космические системы и комплексы" Научно-технического совета АО "ЦНИИмаш", проведенном 12 августа 2025 года (Протокол № 5 от 12.08.2025).

Начальник Центра автоматических космических систем и комплексов, д-р техн. наук



Е.М. Твердохлебова

Главный специалист по космическим платформам



А.В. Белогрудов

С отзывом ознакомлен 20.08.2025  / Подгуйко Н.А.

Контактные данные организации:

Полное наименование: Акционерное общество "Центральный научно исследовательский институт машиностроения"

Сокращенное наименование: АО "ЦНИИмаш"

Адрес: 141070, Московская область, г. Королёв, ул. Пионерская, д.4

Телефон: +7 (495) 513-59-51

Факс: +7 (495) 513-21-00

Адрес электронной почты: corp@tsniimash.ru

Официальный сайт: <https://tsniimash.ru>