



ул. Ленина, д. 52, г. Железногорск, ЗАТО Железногорск, Красноярский край, Российская Федерация, 662972
Тел. (3919) 76-40-02, 72-24-39, Факс (3919) 72-26-35, 75-61-46, e-mail: office@iss-reshetnev.ru, http: //www.iss-reshetnev.ru
ОГРН 1082452000290, ИНН 2452034898

от 02.02.2021 исх № 980-3/15
на № 208-06-03 от 18.01.2021

«Московский авиационный институт
(национальный исследовательский
университет)» МАИ
проректору по научной работе,
председателю диссертационного совета
Д 212.125.08, доктору технических наук,
профессору Равиковичу Ю.А.

Волоколамское ш. д. 4, Москва, 125 993.

Уважаемый Юрий Александрович!

Настоящим высылаю отзыв официального оппонента, начальника лаборатории Ермошкина Ю.М. на диссертацию Мадеева Сергея Викторовича на тему «Экспериментальное исследование электродов ионно-оптических систем ионных двигателей из перспективных углеродных материалов», представленной к защите на соискание ученой степени кандидата технических наук по специальности 05.07.05 – «Тепловые, электроракетные двигатели и энергоустановки летательных аппаратов».

Приложение: Отзыв, на 5 л., 2 экз., только в адрес.

ИО Главного конструктора проектирования и испытаний СОС и СК

А.В.Овчинников

ОТЗЫВ

официального оппонента, доктора технических наук, Ермошкина Юрия Михайловича на диссертацию Мадеева Сергея Викторовича на тему: **«Экспериментальное исследование электродов ионно-оптических систем ионных двигателей из перспективных углеродных материалов»**, представленную на соискание учёной степени кандидата технических наук по специальности 05.07.05 – «Тепловые, электроракетные двигатели и энергоустановки летательных аппаратов»

Представленная на отзыв диссертационная работа содержит: 120 стр. машинописного текста, в том числе: 110 стр. основного текста, 70 рисунков, 12 таблиц и состоит из введения, 5 глав и заключения с основными выводами и результатами. Список библиографических источников составляет 84 наименований работ отечественных и зарубежных авторов.

Актуальность темы исследований

Во многих странах мира у разработчиков космических аппаратов (КА) наблюдается возрастающий интерес к электрореактивным двигательным системам. Он обусловлен высоким удельным импульсом плазменных и ионных двигателей, что позволяет существенно снизить массу заправленной двигательной системы и снизить долю ее массы в массе КА по сравнению с системами на базе жидкостных двигателей. Особого внимания заслуживают ионные двигатели (ИД), отличающиеся повышенной экономичностью. Однако их недостатком является ограниченная тяга и, как следствие, необходимость обеспечения длительного ресурса.

Проведенные в диссертации исследования посвящены вопросам создания для ионных двигателей ионно-оптической системы (ИОС) новой конструкции с измененной формой отверстий. Общей тенденцией в проектировании ионных двигателей является переход от традиционных металлических электродов на более эрозионно-стойкие электроды из углеродных материалов. Их дополнительным преимуществом является низкий коэффициент температурного расширения, что позволяет создавать плоские электроды, повышающие тяговую эффективность двигателя. Однако электроды из углеродных материалов вследствие своей структуры обладают меньшей механической прочностью, что может привести к их разрушению под воздействием стартовых вибрационных нагрузок.

Среди известных углеродных материалов наибольшей механической прочностью обладают углерод-углеродные композиционные материалы (УУКМ), представляющие собой углеродную матрицу, армированную углеродными нитями. Наличие армирующего наполнителя позволяет существенно повысить стойкость электрода к вибрационным и ударным нагрузкам. Однако, при создании традиционных плоских электродов с круглыми отверстиями, обладающих максимальной эффективной прозрачностью, происходит разрезание нитей наполнителя в перемычках

между отверстиями, что приводит к существенному снижению механической прочности электродов. Реализованные ранее подходы по сохранению неповрежденных нитей в перемычках между отверстиями приводили либо к ухудшению оптических свойств (щелевые ИОС), либо к невозможности получения качественной формы отверстий.

Проведенные автором исследования позволяют решить проблему обеспечения механической прочности электродов из углеродных материалов без ухудшения оптических свойств ИОС и определить круг материалов, пригодных для создания электродов. Получены также данные, указывающие на необходимость уточнения теорий, объясняющих влияние низкоскоростных ударов на механическую прочность углеродных материалов. Поэтому тема представленной диссертации, а также результаты, полученные в процессе диссертационного исследования, являются актуальными.

Основное содержание работы

Во введении показана актуальность исследования, определены цели и задачи, сформулированы новизна и практическая значимость работы.

В первой главе содержится обзор литературных источников по теме диссертации, показано современное состояние научной проблемы, проанализированы и критически оценены существующие подходы и методы ее решения, в частности, показана проблематичность создания углеродных электродов ИОС с высокими механическими свойствами из-за разрезания упрочняющих нитей при традиционной форме отверстий.

Во второй главе приводятся результаты расчетного исследования с целью поиска формы отверстий, которая бы позволяла увеличить стойкость электродов из УУКМ к вибрационным нагрузкам без существенного сужения рабочего диапазона тока ионного пучка. Показано, что таким требованиям отвечают электроды с квадратными отверстиями со скругленными углами.

В третьей описываются этапы отработки технологии создания УУКМ электродов ионно-оптических систем.

В четвертой главе содержатся результаты сравнительных механических испытаний электродов ИОС из УУКМ с круглыми отверстиями и квадратными отверстиями со скругленными углами. Показано, что электроды с новой формой отверстий обладают повышенной жесткостью и механической прочностью.

В пятой главе приводятся результаты сравнительных экспериментальных исследований рабочих диапазонов первеанса традиционной и альтернативной ИОС. Показано, что эти показатели для ИОС обоих типов сопоставимы по величине.

В заключении обобщены полученные результаты и сформулированы выводы по работе.

Новизна исследований и полученных результатов

Научная новизна работы состоит в том, что разработана новая конструкция плоских электродов ИОС ионных двигателей из УУКМ с квадратными отверстиями со скругленными углами. Впервые проведены расчетно-экспериментальные исследования рабочих диапазонов первеанса (отношение тока ионного пучка к ускоряющему напряжению в степени $3/2$) ИОС нового типа, подтвердившие близость по абсолютным значениям к рабочим диапазонам эталонной ИОС с круглыми отверстиями. Впервые проведены сравнительные экспериментальные исследования, подтверждающие повышение жёсткости электродов ИОС из УУКМ при переходе от круглой формы отверстий к квадратным со скругленными углами.

Обоснованность и достоверность основных положений, выносимых на защиту

Обоснованность научных положений, достоверность результатов исследований и положений, выносимых на защиту, определяются корректностью применения исследовательской аппаратуры и условиями проведения экспериментов. Результаты экспериментов подтверждаются сопоставлением полученных в работе данных с экспериментальными и расчетными данными, полученными другими исследователями.

Научная и практическая значимость полученных автором результатов

Отработанная автором технология создания электродов и сформулированные требования к заготовкам из УУКМ открывает перспективы создания ИОС с повышенными прочностными характеристиками. Полученные автором экспериментальные данные о плотности, пористости, теплопроводности и коэффициентах линейного температурного расширения для различных УУКМ отечественного производства могут быть использованы при разработке новых перспективных ИОС. Результаты работы были использованы при разработке ионного двигателя ИД-200КР с диаметром пучка 200 мм, с толщиной эмиссионного электрода 0,5 мм и геометрической прозрачностью 0,63. Изготовленные опытные образцы плоских электродов ИОС ИД-200 из УУК, успешно прошли огневые, вибрационные и ударные испытания.

Двигатель типа ИД-200КР с электродами новой формы с квадратными отверстиями может служить прототипом для создания двигателя коррекции орбиты геостационарных спутников, а в обоснованных случаях – и для довыведения спутников на геостационарную орбиту.

Рекомендации по использованию результатов диссертации

Результаты диссертационной работы С. В. Мадеева рекомендуется использовать в научной и производственной деятельности предприятий, занимающихся разработкой ЭРД, таких как ГНЦ ФГУП «Центр Келдыша»,

КБХА, МАИ. Часть результатов может быть отражена при чтении специальных курсов в МФТИ, МАИ, МЭИ, МИРЭА, МГТУ им. Н. Э. Баумана и других ВУЗов.

Соответствие специальности

Диссертационная работа, посвящённая разработке перспективных ионно-оптических систем ионных двигателей с электродами из углерод-углеродных композиционных материалов, соответствует специальности 05.07.05 – Тепловые, электроракетные двигатели и энергоустановки летательных аппаратов. Автореферат работы адекватно отражает её основное содержание, научную новизну, выводы и другие ключевые элементы. Основные результаты диссертационной работы опубликованы в открытой печати.

Личный вклад соискателя

Из материалов диссертации следует, что основные результаты получены лично автором, либо при непосредственном его участии, что подтверждено публикациями. В частности, соискатель самостоятельно выполнил следующее:

- анализ современного состояния исследований и разработок ионно-оптических систем ионных двигателей с электродами из материалов на основе углерода;
- исследования формы отверстий, позволяющей сохранить неповрежденные нити в перемычках между ними без существенного снижения рабочего диапазона первеанса, а также эффективной прозрачности для потока ионов и нейтральных атомов, угловой расходимости элементарного пучка и скорости распыления поверхностей ускоряющего электрода;
- отработка технологии изготовления электродов;
- формирование требований к заготовкам из УУКМ;
- анализ механизмов разрушения электродов ИОС под действием вибрационных нагрузок и обоснование выбора между электродами традиционной конструкции и электродами ИОС нового типа с квадратными отверстиями со скругленными углами;
- подготовка и проведение механических испытаний электродов с традиционной и альтернативной формами апертур;
- подготовка и проведение огневых испытаний ИОС с электродов из УУКМ с традиционной конструкции и ИОС нового типа для сравнения рабочих диапазонов первеансов.

Апробация работы и публикации

Основные результаты данной работы докладывались на НТС отдела электрофизики ГНЦ ФГУП «Центр Келдыша»; на 7-ой европейской конференции по авионавигации и космическим наукам (Милан, 2017); на 7-ой российско-германской конференции по электроракетным двигателям и их применению (Гиссен, 2018). Результаты также отражены в отчетах Центра

Келдыша о НИР для госкорпорации «Роскосмос». Основное содержание и результаты диссертационной работы изложены в 5-и печатных работах, из них 2 работы опубликованы в изданиях из рекомендованного ВАК при Министерстве образования и науки РФ перечня рецензируемых научных изданий и иностранных изданий, входящих в международные реферативные базы (Scopus).

Замечания по диссертационной работе

1. В работе не проведен анализ влияния новой конструкции электродов на ресурсные характеристики двигателя и пробойные характеристики ИОС, что важно с учетом перспектив практического ионных двигателей.

2. В ходе сравнительного численного моделирования не показано влияние смещения отверстий ускоряющего электрода относительно отверстий эмиссионного электрода на эксплуатационные свойства ИОС.

Заключение

Несмотря на отмеченные недостатки, считаю, что диссертация Мадеева С.В. выполнена на высоком уровне, полученные результаты представляют научный и практический интерес.

Диссертация Мадеева С.В. является законченной научно-квалификационной работой, которая полностью соответствует всем требованиям п.9 «Положения о присуждении учёных степеней», утвержденным постановлением Правительства РФ от 24 сентября 2013 г. №842, а её автор Мадеев Сергей Викторович **заслуживает присуждения учёной степени кандидата технических наук по специальности 05.07.05 «Тепловые, электроракетные двигатели и энергоустановки летательных аппаратов».**

Официальный оппонент:

доктор технических наук, доцент,

начальник лаборатории проектирования и испытаний систем коррекции АО «Информационные спутниковые системы» имени академика М.Ф. Решетнёва

Почтовый адрес 662972, Российская Федерация, Красноярский край, г. Железногорск, ул. Ленина, д. 52

Телефон 8(39197) 6-47-85

E-mail erm@iss-reshetnev.ru

 Ю.М. Ермошкин

Подпись Ермошкина Юрия Михайловича заверяю:
Начальник отдела по работе с персоналом


 М.В.Лазарев

С отзывом ознакомлен.
18.02.2021

