



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@tsniimash.ru
http://www.tsniimash.ru

ОГРН 1195081054310
ИНН / КПП 5018200994 / 501801001

27.10.2025 исх. № АМ-24500

На № _____ от _____

Председателю диссертационного совета
24.2.327.06 на базе Московского авиационного
института (национального исследовательского
университета)
доктору технических наук, профессору
Ю.А. Равиковичу
Волоколамское ш., д.4, Москва
e-mail: mai@mai.ru

Об отзыве оппонента

Уважаемый Юрий Александрович!

На исх. № 205-096-25 от 14.10.2025 высылаю Вам отзыв официального оппонента ведущего научного сотрудника отдела 12003 «Двигательные установки средств выведения и космических аппаратов» АО «ЦНИИмаш», к.т.н. Пильникова Александра Васильевича на диссертацию Пейсаховича Олега Дмитриевича «Высокочастотный ионный двигатель с четырёхэлектродной системой ускорения», представленную на соискание ученой степени кандидата технических наук по специальности 2.5.15 – «Тепловые, электроракетные двигатели и энергоустановки летательных аппаратов».

Приложение: «Отзыв.....» на 7 листах, 2 экз., н/с.

Генеральный конструктор по средствам выведения
и наземной космической инфраструктуре –
заместитель генерального директора

с уважением
А.А. Медведев
А.А. Медведев

Исполнитель:
Пильников А.В. Тел.: (495)513-48-86

ОТДЕЛ КОРРЕСПОНДЕНЦИИ
И КОНТРОЛЯ ИСПОЛНЕНИЯ
ДОКУМЕНТОВ МАИ

«05» 11 2025 г.

ОТЗЫВ

официального оппонента

кандидата технических наук **Пильникова Александра Васильевича**
о диссертационной работе **Пейсаховича Олега Дмитриевича**
«Высокочастотный ионный двигатель с четырёхэлектродной системой ускорения», представленной на соискание ученой степени кандидата технических наук по специальности 2.5.15. «Тепловые, электроракетные двигатели и энергоустановки летательных аппаратов».

Актуальность темы диссертации.

Одним из приоритетных направлений современного развития космической техники в области двигателестроения является создание электроракетных двигателей (ЭРД) с высокими значениями удельного импульса тяги (УИТ) и плотности тяги, предназначенных для перспективных космических аппаратов (КА) с большим сроком активного существования (САС), а также для аппаратов при исследовании дальнего космоса.

Применение существующих ионных двигателей (ИД) с трёхэлектродными системами ускорения (СУ) не позволяет обеспечить выполнение возросших требований к удельному импульсу, плотности тяги и ресурсу работы. В связи с этим, целью диссертационного исследования являлось повышение указанных характеристик высокочастотных ионных двигателей (ВЧИД) посредством внедрения четырёхэлектродной системы ускорения, обеспечивающей возможность их многорежимного функционирования.

Актуальность темы исследования обусловлена следующими факторами:
в **научном аспекте** — необходимостью углубления теоретических и экспериментальных представлений о физических процессах, происходящих в четырёхэлектродных системах ускорения ионных двигателей;

в **практическом плане** — потребностью в разработке ионных двигателей, обладающих повышенными показателями удельного импульса и плотности тяги. Реализация таких двигателей позволит удовлетворить современные требования, связанные с решением задач как околоземных, так и межпланетных миссий.

В ходе проведённых исследований Пейсахович О.Д. осуществил серию экспериментальных работ, направленных на изучение новой технологической концепции в области ионных двигателей, а именно — внедрения четырёхэлектродной системы ускорения в их конструкцию. Применение данной системы позволило существенно повысить удельный импульс и плотность тяги, что подтверждает её эффективность и перспективность для дальнейшего развития электроракетных двигателей.

Степень обоснованности научных положений, выводов и рекомендаций, сформулированных в диссертации.

На основании анализа существующих типов электроракетных двигателей в диссертации показано, что наибольший потенциал для дальнейшего развития имеют устройства с электростатическим механизмом ускорения, реализуемые на основе четырёхэлектродной системы ускорения. Также установлено, что одной из перспективных схем высокочастотных ионных двигателей (ВЧИД) является конструкция с четырёхэлектродной системой ускорения, обеспечивающей эффективное разделение зон извлечения и ускорения ионного пучка.

Проведённый анализ концепции ВЧИД с четырёхэлектродной системой ускорения позволил выявить недостаточно изученные аспекты функционирования данного типа устройств, что послужило основанием для постановки цели диссертационной работы — разработки научно-технических основ проектирования системы ускорения высокочастотного ионного двигателя

с четырёхэлектродной системой ускорения, обеспечивающей повышенные удельный импульс и плотность тяги.

Для исследования условий функционирования четырёхэлектродной системы ускорения в составе высокочастотного ионного двигателя (ВЧИД) была реализована комплексная экспериментальная программа, направленная на определение характеристик и оптимальных режимов работы двигателя с повышенными удельным импульсом и плотностью тяги. В ходе работы использовались лабораторные модели, оснащённые четырёхэлектродной системой ускорения, что позволило провести сравнительные испытания в трёх- и четырёхэлектродных конфигурациях без изменения базовой конструкции двигателя. Основное внимание уделялось исследованию влияния извлекающей и ускоряющей разностей потенциалов на параметры ионного пучка, величины вторичных токов и устойчивость разряда. Экспериментально определены диапазоны эффективной работы лабораторной модели ВЧИД средней мощности с четырёхэлектродной системой ускорения при энергии ионного пучка 4 кэВ, обеспечивающие повышение удельного импульса и плотности тяги. Зафиксированы два характерных режима работы двигателя — режим с повышенным удельным импульсом и режим с дросселированием тяги, переход между которыми осуществлялся изменением извлекающей и ускоряющей разности потенциалов. Также получены зависимости вторичных токов на внутренних и внешних поверхностях электродов системы ускорения от извлекающей и ускоряющей разности потенциалов ($\Delta U_{\text{изв}}$, $\Delta U_{\text{уск}}$), что позволило уточнить физические процессы, происходящие в межэлектродных зазорах. Экспериментально доказаны устойчивое инициирование разряда и стабильная работа ВЧИД с четырёхэлектродной системой ускорения, подтверждена возможность увеличения ресурса двигателя и расширения диапазона его регулирования. Результаты проведённых исследований подтвердили перспективность применения четырёхэлектродной системы

ускорения в существующих конструкциях высокочастотных ионных двигателей и её эффективность для реализации режимов с повышенными удельным импульсом и плотностью тяги.

Результаты математического моделирования процессов, протекающих в четырехэлектродной системе ускорения, показали высокую сходимость с экспериментом.

По результатам проведенных расчетных и экспериментальных исследований были выработаны рекомендации по проектированию ВЧИД с четырехэлектродной системой ускорения.

Достоверность полученных автором результатов диссертационной работы обусловлена использованием сертифицированного оборудования и современных, апробированных ранее методик измерений, сбора и обработки экспериментальных данных. Результаты экспериментальных исследований, полученные на лабораторных моделях двигателя с трёхэлектродными и четырёхэлектродными системами ускорения, согласуются с данными исследований других авторов.

Научная новизна результатов исследования.

1. В рамках диссертационной работы экспериментально установлены диапазоны эффективной работы лабораторной модели ВЧИД средней мощности с четырёхэлектродной системой ускорения на режиме повышенных удельного импульса и плотности тяги при энергии ионного пучка 4 кэВ.

2. Экспериментально определены два режима работы лабораторной модели ВЧИД средней мощности с четырёхэлектродной системой ускорения: режим с повышенным удельным импульсом и режим с дросселированием тяги (переход режимов осуществлялся изменением извлекающей и ускоряющей разностей потенциалов между электродами). Экспериментально доказано устойчивое

инициирование разряда и работа ВЧИД с четырёхэлектродной системой ускорения.

3. Получены экспериментальные зависимости величин вторичных токов на внешних и внутренних поверхностях электродов систем ускорения от извлекающей и ускоряющей разности потенциалов.

Практическая значимость результатов исследований.

1. Экспериментально доказана возможность повышения ресурса и увеличения диапазона регулирования двухрежимного ВЧИД с четырёхэлектродной системой ускорения.

2. Экспериментально подтверждена возможность применения четырёхэлектродной системы ускорения на уже существующих конструкциях ВЧИД.

3. Подтверждена возможность использования физико-математической модели для расчёта конфигурации ионного пучка и определения вторичных токов, выпадающих на поверхности электродов в четырёхэлектродных системах ускорения.

По теме диссертации опубликовано 13 работ, из них 2 статьи в рецензируемых научных изданиях из рекомендованного перечня ВАК (по специальности 2.5.15.); 2 статьи в рецензируемых научных изданиях, включенных в Российский индекс научного цитирования (РИНЦ); 4 статьи в ведущих научных журналах и изданиях, включенных в международные системы цитирования; 5 тезисов докладов на научных конференциях. Получено два патента на изобретение (RU 2752857 C1, опубликован 11.08.2021; RU 2763333 C1, опубликован 18.12.2021).

Однако по результатам детального анализа текста диссертации можно сформулировать некоторые замечания по выполненной работе, а именно:

1. В рамках работы были проведены исследования и регистрация диапазона интегральных характеристик ВЧИД с четырёхэлектродной системой ускорения, эмиссионный электрод которой имел толщину 0,7 мм, а межэлектродный зазор между эмиссионным и извлекающим электродами был равен 1 мм. Однако известно, что оптимальным с точки зрения максимальной эффективности извлечения ионного пучка рекомендуется использовать эмиссионный электрод толщиной 0,3-0,5 мм, а межэлектродный зазор – до 0,7 мм.

2. Не были проведены исследования работы ВЧИД с четырёхэлектродной системой ускорения с ускоряющим электродом из композитных материалов, обеспечивающих минимальное разрушение в результате эрозии и максимальный ресурс двигателя.

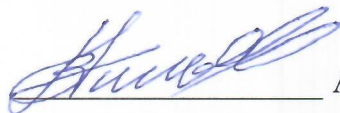
3. Газоразрядная камера исследуемой лабораторной модели имела цилиндрическую форму, что является менее эффективным при ионизации рабочего вещества. Необходимо было бы провести испытания и на полусферической газоразрядной камере.

Тем не менее, отмеченные замечания не снижают научной ценности проведенных исследований и не влияют на общую положительную оценку диссертационной работы. Результаты работы Пейсаховича О.Д. могут быть использованы при разработке высокочастотных ионных двигателей с повышенными плотностью тяги и удельным импульсом тяги за счет использования в их составе четырёхэлектродной системы ускорения.

Диссертационная работа Пейсаховича О.Д. выполнена на высоком научном уровне и является законченной научно-квалификационной работой. Материал изложен грамотным техническим языком, отражен личный вклад автора в результаты исследования. Автореферат полностью отражает сущность диссертации.

Диссертационная работа удовлетворяет требованиям п. 9-14. «Положения ВАК о присуждении учёных степеней», предъявляемым к кандидатским диссертациям. Изложенный в ней материал соответствует паспорту специальности 2.5.15. «Тепловые, электроракетные двигатели и энергоустановки летательных аппаратов» (пункты 1, 2, 4, 10, 12 и 13), а её автор, Пейсахович Олег Дмитриевич, заслуживает присуждения учёной степени кандидата технических наук.

Ведущий научный сотрудник отдела 12003 «Двигательные установки средств выведения и космических аппаратов» АО «ЦНИИмаш», кандидат технических наук



А.В. Пильников

Подпись официального оппонента Пильникова А.В. удостоверяю:

Главный ученый секретарь АО «ЦНИИмаш»,

доктор технических наук, с.н.с.



В.Ю. Ключников

27.10.2025

Полное название организации: Акционерное общество "Центральный научно-исследовательский институт машиностроения" (АО «ЦНИИмаш»).

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

Электронная почта: corp@tsniimash.ru.

Телефон: 8(495)513-59-51. Факс: 8(495)512-21-00.

С отрывом от оригинала
05.11.2025

С. Пейсахович О.Д. 7