



Государственная корпорация
по космической деятельности «Роскосмос»
АКЦИОНЕРНОЕ ОБЩЕСТВО
«ГОСУДАРСТВЕННЫЙ НАУЧНЫЙ ЦЕНТР
РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ
«ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ ЦЕНТР
ИМЕНИ М.В.КЕЛДЫША»
(АО ГНЦ «Центр Келдыша»)

Онежская ул., д. 8, Москва, Россия, 125438
Тел. +7 (495) 456-4608 Факс: +7 (495) 456-8228
ОКПО 47430587 ОГРН 1217700095667 ИНН/КПП 7743355574 / 774301001
kerc@elnet.msk.ru; <https://keldysh-space.ru>

22.10.2025 № 300-15/187
на № 205-097-25 от 14.10.2025

Ученый совет МАИ,
Председателю диссертационного совета
24.2.327.06
на базе Московского авиационного
института (национального
исследовательского университета)»
Равиковичу Ю. А.

125993, г. Москва,
Волоколамское шоссе, д. 4.

Уважаемый Юрий Александрович!

Высылаю отзыв официального оппонента А.В. Семёнкина по диссертационной работе Пейсаховича О.Д. «Высокочастотный ионный двигатель с четырехэлектродной системой ускорения», представленной на соискание ученой степени кандидата технических наук по специальности 2.5.15 «Тепловые, электроракетные двигатели и энергоустановки летательных аппаратов».

Приложение: отзыв оппонента по диссертационной работе Пейсаховича О.Д.,
2 экземпляра на 6 листах каждый.

Ученый секретарь, д.т.н.



И.С. Партола

ОТДЕЛ КОРРЕСПОНДЕНЦИИ
И КОНТРОЛЯ ИСПОЛНЕНИЯ
ДОКУМЕНТОВ МАИ

«05.11.2025г.

ОТЗЫВ

Официального оппонента Семёнкина Александра Вениаминовича на диссертационную работу 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».

Актуальность темы исследования

Применение электроракетных двигателей (ЭРД) на космических аппаратах (КА) активно увеличивается, расширяются функции, выполняемые ЭРД на КА. Электрические ракетные двигатели способны обеспечивать эффективное до-выведение КА с низкой опорной на высокую рабочую орбиту, длительное удержание на заданной орбите, решение маршевых задач для перелетов к другим планетам и в дальний космос. Различные функции, выполняемые ЭРД в процессе полета КА, требуют различных параметров двигателей для оптимизации каждой фазы полета.

Ионные двигатели (ИД) являются одним из наиболее перспективных типов ЭРД для использования как на околоземных КА, так и на космических аппаратах, осуществляющих миссии в дальний космос. Применительно к телекоммуникационным КА, создаваемые ионные двигатели (ИД) должны обеспечивать двухрежимность работы, что необходимо для эффективного выполнения межорбитальных манёвров и поддержания орбиты с использованием единой двигательной установки. КА для межпланетных полетов также требуют функционирования двигателя в двух режимах по удельному импульсу тяги и тяге, что позволяет, с одной стороны, сократить время перелёта в режиме с большой тягой, а с другой сокращать расход рабочего вещества при удержании КА на заданной орбите или при осуществлении миссий в дальний космос с высоким удельным импульсом.

Существующие ионные двигатели, выполненные по схеме Кауфмана или на основе высокочастотного разряда по схеме Лёба, близки к теоретическому пределу по плотности тяги, ресурсу и удельному импульсу.

Все используемые на сегодняшний день ИД основаны трёхэлектродной системе ускорения ионов рабочего вещества (СУ), которая является лимитирующим элементом конструкции и не позволяет обеспечить повышенные требования к удельному импульсу тяги, плотности тяги и ресурсу. Поэтому поиск путей преодоления существующих ограничений и расширение возможностей ионных двигателей является важной и актуальной задачей. Целью диссертационной работы Пейсаховича О.Д. являлось повышение характеристик и расширение возможного диапазона регулирования в высокочастотных ионных двигателях за счёт применения четырёхэлектродной системы ускорения.

Тема и направление работ диссертации работы являются актуальными, имеют важное практическое значение. Актуальность темы исследования определяется: в научном плане – необходимостью развития современных теоретических и практических представлений о процессах, протекающих в четырёхэлектродных системах ускорения ионных двигателей; в практическом отношении – необходимостью создания ионных двигателей с

Отдел корреспонденций
и контроля исполнения
документов МАИ

05.11.2025 г.

повышенными плотностью тяги и удельным импульсом. Создание такого двигателя дает возможность обеспечить потребности в решении задач околоземных и межпланетных перелетов.

Целью работы является повышение удельного импульса и плотности тяги многорежимных высокочастотных ионных двигателей.

Для достижения поставленной цели в работе были решены следующие задачи:

1. Выявление ограничений в системах ускорения существующих ионных двигателей;
2. Разработка четырёхэлектродной системы ускорения для лабораторной модели высокочастотного ионного двигателя средней мощности;
3. Исследование влияния применения четырёхэлектродной системы ускорения на интегральные характеристики лабораторной модели высокочастотного ионного двигателя;
4. Измерение вторичных токов на электродах четырёхэлектродной системы ускорения, величины которых определяют ресурс двигателя.

Результаты работы прошли широкую научную апробацию

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 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).

Объем и структура диссертационной работы

Диссертационная работа изложена на 158 страницах машинописного текста, включает в себя 136 рисунков, 18 таблиц, а также список литературы, содержащий 98 наименований. Работа разделена на: введение, 4 главы содержательной части, заключение, список сокращений и условных обозначений, список литературы.

Диссертация включает в себя Введение, четыре Главы, Заключение, список литературы и акт внедрения

Во введении обоснована актуальность темы, определён объект исследования, сформулированы цель и задачи исследования, отражены научная новизна, практическая значимость, приведены научные положения, выносимые на защиту.

В первой главе приводятся характеристики современных и перспективных ИД, демонстрируются последние наработки в области двухрежимных ИД, описывается принцип работы четырехэлектродных СУ и их преимущества по сравнению с трёхэлектродными СУ, выявляются ограничения существующих трехэлектродных систем ускорения ИД.

Высокочастотный ионный двигатель (ВЧИД) является одним из типов ИД. Рабочее тело (РТ) инертный газ (ксенон, криптон и др.) подается в газоразрядную камеру (ГРК), в которой под действием высокочастотного (ВЧ) электромагнитного поля РТ ионизуется и в следствие этого образуется ВЧ разряд индуктивного типа. В системе ускорения (СУ) или ионно – оптической системе (ИОС) реализуется электростатический механизм ускорения, на входе происходит разделение зарядов (ионов и электронов) с последующим ускорением ионов в межэлектродном промежутке (зазоре) между эмиссионным и ускоряющим электродами. Катод-нейтрализатор инжектирует электроны в плазму пучка ускоренных ионов за срезом двигателя, это обеспечивает нейтрализацию ускоренного пучка ионов.

В отличие от используемой в настоящее время в ионных двигателях трехэлектродной схемы построения системы ускорения ионов рабочего вещества, четырехэлектродная СУ позволяет разделить зону извлечения ионов из газоразрядной камеры двигателя и зону ускорения ионного пучка благодаря дополнительному извлекающему электроду (ИЭ). Таким образом в первом межэлектродном зазоре между эмитирующим электродом (ЭЭ) и извлекающим электродом (ИЭ) формируется зона извлечения ионов из газоразрядной камеры и реализуются оптимальные условия для извлечения максимального ионного тока. Это позволяет повысить плотность тяги двигателя и увеличить удельный импульс. Появляется дополнительная степень свободы в регулировании ионного тока пучка. Ток ионов регулируется изменением извлекающей разности потенциалов, ускоряющая разность потенциалов, определяющая скорость истечения струи из двигателя, при этом не меняется.

Вторая глава содержит описание экспериментального стенового оборудования и лабораторных моделей двигателей, используемых в работе.

Описание лабораторных моделей ионных двигателей:

- источник ионов КЛАН-53-3.4 был доработан и оснащен четырехэлектродной СУ. Это конструктивное исполнение позволяет за один установки на испытательном стенде (без переборки СУ) проводить испытания в трех- и четырёхэлектродной конфигурации за счет внешних переключений в электрических цепях питания источника;
- высокочастотный ионный двигатель средней мощности с четырёхэлектродной системой ускорения ВЧИД-15-4 был создан путем модернизации исходной трехэлектродной СУ лабораторной модели ВЧИД средней мощности с диаметром ИП 150 мм. В конструкцию СУ был добавлен четвёртый электрод. Такая модернизация допустима для всех существующих ВЧИД с трехэлектродной СУ.

В диссертации приведено подробное описание стенового оборудования и использованных измерительных приборов. Отдельный раздел посвящен анализу погрешностей измерительного оборудования.

В третьей главе приводится описание проведенных экспериментов и расчетное исследование по определению вторичных токов, протекающих в четырёхэлектродной СУ источника ионов КЛАН-53-3.4. Показано, что использование четырехэлектродной системы ускорения позволяет существенно – около 1,5 раз – повысить плотность тока ионов по сравнению с исходной конструкцией, обеспечить возможность повышения удельного

импульса без нарушения оптимальных рабочих режимов в зоне извлечения ионов из плазмы газоразрядной камеры.

Несомненным достижением автора диссертационной работы является изучение вторичных потоков ионов на поверхности электродов, выполненные с помощью секционированной конструкции, позволяющей раздельно измерить поток на каждую из поверхностей электродов – цилиндрическую поверхность отверстий, переднюю и обратную плоскости электрода. Исследуемые вторичные потоки определяют ресурс двигателя, и измерение этих потоков дает информацию о тенденции изменении ресурса ИД при переходе к четырехэлектродной схеме системы ускорения.

Четвертая глава содержит результаты расчетного и экспериментального исследования высокочастотного ионного двигателя средней мощности с диаметром ионного пучка 150 мм и четырёхэлектродной системой ускорения. Представлены результаты зарегистрированных интегральных характеристик во всем диапазоне работы лабораторной модели высокочастотного ионного двигателя средней мощности с четырёхэлектродной системой ускорения.

Приведены данные измерений энергии ионов в выходной струе двигателя и показано, что энергия ионов соответствует приложенной разности потенциалов СУ во всем исследованном диапазоне параметров, что подтверждает эффективную работу четырехэлектродной системы ускорения.

Дано сравнение экспериментальных и расчетных данных, полученных автором с помощью современных методов численного моделирования процессов в ионных двигателях.

Заключение содержит основные результаты и выводы по работе.

В результате научных исследований в рамках диссертационной работы Пейсаховичу О.Д. удалось повысить удельный импульс и плотность тяги за счет использования четырёхэлектродной системы ускорения в составе высокочастотного ионного двигателя. Все поставленные задачи диссертационной работы успешно выполнены.

Результаты диссертационной работы обладают научной новизной и практической полезностью.

Научная новизна результатов исследований состоит в том, что:

- 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.
- 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 доказана устойчивая инициация разряда и работа ВЧИД с четырёхэлектродной системой ускорения.

- Получены экспериментальные зависимости величин вторичных токов на внешних и внутренних поверхностях электродов систем ускорения от извлекающей разности потенциалов и ускоряющей разности потенциалов и показано, что применение четырехэлектродной схемы позволяет снизить потоки вторичных ионов на элементы конструкции двигателя.

Теоретическая и практическая значимость результатов исследований заключается в следующем:

- Экспериментально доказана возможность повышения ресурса и увеличения диапазона регулирования двухрежимного ВЧИД с четырёхэлектродной системой ускорения.
- Экспериментально подтверждена возможность применения четырёхэлектродной системы ускорения на уже существующих конструкциях ВЧИД.
- Подтверждена возможность использования физико-математической модели для расчёта конфигурации ионного пучка и определения вторичных токов, выпадающих на поверхности электродов в четырёхэлектродных системах ускорения.

Достоверность приведенных в данной работе результатов исследований обусловлена использованием сертифицированного оборудования и современных, апробированных ранее, методик измерений, сбора и обработки экспериментальных данных. Результаты экспериментальных исследований, полученные на лабораторных моделях двигателя с трёх- и четырёхэлектродными системами ускорения, согласуются с данными исследований других авторов.

В качестве недостатков работы можно отметить следующее:

- Не приведены данные прямых ресурсных испытаний четырехэлектродной системы ускорения;
- В тексте диссертации имеется несколько опечаток;
- Не приведены данные о предельных режимах, при которых целесообразно использование четырехэлектродной системы ускорения.

Заключение

Отмеченные недостатки не снижают общего положительного представления о диссертации как о цельной научной работе и не ставят под сомнение полученные результаты и разработанные рекомендации. Диссертационная работа выполнена на высоком научно-техническом уровне и представляет собой законченную научно-исследовательскую работу, в которой решены важные задачи, имеющие большое значение для создания высокочастотного ионного двигателя с четырёхэлектродной системой ускорения.

Диссертационная работа является актуальной, обладает новизной и практической полезностью, выводы и рекомендации, сделанные в работе, обоснованы.

Содержание автореферата полностью соответствует основным положениям диссертационной работы.

Диссертационная работа Пейсаховича О.Д. соответствует паспорту специальности 2.5.15. – «Тепловые, электроракетные двигатели и энергоустановки летательных аппаратов» (пункты 1, 2, 4, 10, 12 и 13) и удовлетворяет требованиям «Положения о присуждении ученых степеней», утвержденного постановлением Правительства РФ №842 от 24.09.2013 г., а её автор Пейсахович Олег Дмитриевич заслуживает присуждения ученой степени кандидата технических наук по специальности 2.5.15. – «Тепловые, электроракетные двигатели и энергоустановки летательных аппаратов».

Главный научный сотрудник АО ГНЦ "Центр Келдыша",
доктор технических наук



А.В. Семёнкин

27.10.2025

Подпись официального оппонента Семёнина А.В. удостоверяю
Ученый секретарь АО ГНЦ «Центр Келдыша»,
доктор технических наук

И.С. Партола

Акционерное общество «Государственный научный центр Российской Федерации – «Исследовательский центр имени И.В.Келдыша», адрес: Онежская ул., д.8, г. Москва, 125438
Электронная почта: semenkin@kerc.msk.ru
Телефон: 8 (495) 456-20-63

Сотрудник одолжил

05.11.2025

Степанов О.Р.