



Государственная корпорация
по космической деятельности «Роскосмос»

Государственный научный центр Российской Федерации –
федеральное государственное унитарное предприятие

**«Исследовательский центр
имени М.В.Келдыша»**

(ГНЦ ФГУП «Центр Келдыша»)

Онежская ул, д. 8, г. Москва, Россия, 125438
Тел. +7 (495) 456-4608 Факс: +7 (495) 456-8228
ОКПО 07547339 ОГРН 1027700482303 ИНН/КПП 7711000836/774301001
kerc@elnet.msk.ru; http://www.kerc.msk.ru

23.11.2018 № 71-06/311

на № _____ от _____

Председателю диссертационного совета
Д 212.125.08 на базе Московского
авиационного института (национального
исследовательского университета)
доктору технических наук, профессору
Ю.А. Равиковичу

МАИ, Волоколамское ш., 4, Москва,
ГСП-3, 125993

Уважаемый Юрий Александрович!

В соответствии с вашим запросом от 09.10.2018 г. исх. № 010/860 направляю отзыв ведущей организации на диссертацию Суворова Максима Олеговича на тему «Тяговый узел проточного воздушного электрореактивного двигателя», представленной на соискание ученой степени кандидата технических наук по специальности 05.07.05 — «Тепловые, электроракетные двигатели и энергоустановки летательных аппаратов».

Приложение: Отзыв ведущей организации на — 6 л. в 2-х экз.

Заместитель генерального директора
по космическим аппаратам и энергетике –
начальник отделения 3

А.В.Семенкин

Исполнитель: И.Д.Сучкова
конт.тел: 8 (495) 456-63-47

СВЯЗНЫЙ ОТДЕЛ МАИ
Исх. № 26 / 11 / 2018

УТВЕРЖДАЮ

Заместитель генерального директора

ГНЦ ФГУП «Центр Келдыша»

по космическим аппаратам и энергетике, д.т.н.

А.В. Семенкин

2018 г.



ОТЗЫВ ВЕДУЩЕЙ ОРГАНИЗАЦИИ

на диссертацию Суворова Максима Олеговича

«Тяговый узел прямоточного воздушного электрореактивного двигателя»,
представленную на соискание учёной степени кандидата технических наук по
специальности 05.07.05 – «Тепловые, электроракетные двигатели и энергоустановки
летательных аппаратов»

Актуальность темы исследований

Прямоточные воздушные ионные двигатели являются новым типом электроракетных двигателей (ЭРД), которые могут быть использованы для компенсации аэродинамического сопротивления на низкоорбитальных космических аппаратах. В этих двигателях в качестве рабочего тела предполагается использовать атмосферный газ низкого давления, окружающий космический аппарат, что позволит уменьшить массу электроракетной двигательной установки и тем самым увеличить долю полезной нагрузки.

При создании прямоточного ЭРД необходимо решить комплекс научно-технических задач, к которым относятся разработка устройства для захвата набегающего потока атмосферных газов и эффективного удержания собранного газа в накопительном устройстве, обеспечение высокой степени ионизации рабочего тела в газоразрядной камере (ГРК), создание катодов-нейтрализаторов, способных работать на атмосферном газе, и ряд других. Поэтому представленная диссертация, посвящённая проблеме создания тягового узла прямоточного ЭРД на базе высокочастотного ионного двигателя (ВЧИД), является актуальной.

Новизна исследований и полученных результатов

В настоящей работе автор экспериментально показал возможность функционирования тягового узла прямоточного воздушного электрореактивного двигателя (ПВЭРД) на азот-кислородной смеси в соотношении, которое ранее не рассматривалось другими исследователями, и на концентрациях, соответствующих доступным при полете космических аппаратов (КА) на орбитах около 220 км. Продемонстрирована возможность устойчивого

зажигания высокочастотного разряда при пониженных концентрациях РТ без использования дополнительной подачи инертного газа.

Также автором использовались альтернативные схемы компоновки атмосферного прямоточного ВЧИД, в частности, реализована схема, в которой высокочастотный индуктор, устанавливается непосредственно в газоразрядный объем.

Положение о научной новизне балансной модели, представляющей собой стандартный набор балансных соотношений, построенных в предположении об однородном распределении всех параметров плазмы по объёму ГРК, представляется несоразмерным ее реальной полезности.

Достоверность основных положений, выносимых на защиту

Достоверность результатов экспериментальных исследований, выносимых на защиту, определяются корректностью применения исследовательской аппаратуры, методик измерений и условиями проведения экспериментов, а также повторяемостью результатов.

Основные результаты диссертационной работы опубликованы в открытой печати, неоднократно докладывались научной общественности и, тем самым, прошли научную апробацию.

Практическая значимость полученных автором результатов

В ходе исследований автором был разработан и изготовлен действующий прототип тягового узла ПВЭРД, а также несколько его модификаций. На основе исследования автором было получено 2 охранных свидетельства РФ – патенты на изобретение и полезную модель.

На базе проведённых исследований автором выработаны рекомендации по созданию тягового узла ПВЭРД.

Содержание диссертации

Диссертация состоит из введения, четырех глав, заключения, списка сокращений и условных обозначений и списка цитируемой литературы.

Во введении сформулирована актуальность темы исследования, перечислены объект исследования, цель работы, основные задачи и методы исследования, научная новизна, теоретическая и практическая значимость работы, обоснована достоверность полученных результатов, приведены апробация результатов работы и публикации автора, личный вклад соискателя, кратко рассмотрена структура диссертации и содержание её глав.

В первой главе рассматривается возможность применения электроракетных двигателей для поддержания орбиты КА дистанционного зондирования Земли (ДЗЗ) на низких орбитах. Анализируется возможность использования остаточной атмосферной среды в качестве рабочего тела (РТ) двигателя. Рассмотрена концепция использования в ПВЭРД тягового узла и узла забора атмосферных газов (УЗАГ).

Проводится анализ по выбору типа ЭРД для решения указанной выше задачи, в результате которого автор исследования останавливается на высокочастотном ионном двигателе в качестве базы для создания тягового узла ПВЭРД. Приводится его принципиальная схема и излагаются основные принципы работы. Проводится выбор материалов типовых конструктивных элементов тягового узла ПВЭРД.

Вторая глава диссертации посвящена описанию условий проведения эксперимента. В ней приводятся схемы экспериментальных стендов, схема электрического питания тягового узла ПВЭРД, даются характеристики измерительных приборов и их погрешности, описывается лабораторный макет тягового узла ПВЭРД. Приводится описание проектирования испытательного стенда «2ИУ-4В», в котором автор принимал непосредственное участие.

Описывается процесс разработки программного обеспечения в программной среде LabView для взаимодействия с блоком управления регуляторов расхода газа. Это позволило осуществлять подачу рабочего тела (РТ) в заданных концентрациях и в широком диапазоне расходов.

Для достижения целей, поставленных в настоящей работе, был разработан и изготовлен лабораторный образец высокочастотного ионного двигателя (ВЧИД) с диаметром оптики 150 мм. Были также изготовлены и исследованы две его модификации, которые тем или иным образом развивали концепцию идеи создания прямоточного воздушного ионного двигателя. В общей сложности экспериментальные исследования проводились на 3-х модификациях лабораторного образца ВЧИД, отличающихся друг от друга наличием промежуточной емкости для РТ и внутреннего индуктора в рабочем объеме разрядной камеры.

В третьей главе диссертации приведены результаты экспериментальных исследований тягового узла ПВЭРД. Использована методика по оценке эффективности работы ВЧИД, предполагающая измерение величины тока ускоряемых ионов и снятие зависимости этой величины от мощности, затрачиваемой на ионообразование в разрядной камере, и расхода рабочего тела.

Автором исследована работа ВЧИД на ксеноне, азоте и кислороде в качестве РТ. Из анализа кривых был сделан вывод, что работа лабораторной модели тягового узла ПВЭРД на кислороде и азоте требует большей мощности и расхода РТ, чем при использовании ксенона для поддержания режима работы ВЧИД на заданном ионном токе. Автор объясняет это более высокими энергиями ионизации азота и кислорода, а также дополнительными затратами на диссоциацию. При работе на смеси атмосферных газов было выбрано соотношение молекулярного азота к молекулярному кислороду 2 к 1.

Анализируя результаты испытаний, автор делает вывод о том, что разработанная модель тягового узла может стабильно и эффективно работать на атмосферных газах при условиях,

соответствующих полету КА на высоте около 220 км. Также утверждается, что на всех исследованных режимах работы двигатель создавал достаточную тягу для преодоления лобового сопротивления аппарата. Приводятся результаты 100-часовых испытаний с циклограммой, характерной для работы двигателя на возможных орбитах.

Исходя из полученных результатов теоретических и экспериментальных исследований, автор работы предлагает ряд рекомендаций для проектирования тягового узла ПВЭРД и приводит запатентованную им концептуальную схему такого двигателя.

Четвертая глава посвящена разработке балансовой модели, которая должна дать возможность быстро оценить изменения интегральных характеристик тягового узла ПВЭРД в зависимости от значений концентраций атмосферных газов, поступающих в ионообразующую область двигателя.

Приводится описание математической модели, основанное на стандартном наборе балансных соотношений. В ходе работы над моделью автором был сделан ряд допущений и предположений. К ним относятся следующие положения:

1. Средняя скорость нейтральных атомов считается тепловой.
2. Модель является «нульмерной», то есть концентрация компонент плазмы считается постоянной во всем объеме.
3. Электронная компонента рассматривается в приближении Максвелловского распределения по скоростям.
4. Потерями мощности на возбуждение и двойную ионизацию пренебрегается.
5. Для расчета мощности, затрачиваемой на ионизацию, была применена упрощенная методика.
6. Модель применима для работы только с молекулярным азотом, молекулярным кислородом и их композициями.
7. При моделировании не рассматривается конфигурация магнитного поля, создаваемого индуктором внутри газоразрядного объема.

Проводится сравнение результатов моделирования тяги и потребляемой мощности ВЧИД при работе на атмосферной смеси с результатами экспериментов. Автор отмечает, что результаты моделирования хорошо согласуются с экспериментальными данными, и делает вывод о том, что модель может быть использована для других образцов с отличными геометрическими параметрами.

В заключении формулируются полученные в работе результаты.

Рекомендации по использованию результатов и выводов диссертации

Результаты диссертационной работы М.О. Суворова могут быть полезны для потенциальных организаций-разработчиков низкоорбитальных космических аппаратов (АО «ИСС», АО «Корпорация «ВНИИЭМ»), а также научных организаций, занимающихся разработкой и исследованиями ионных двигателей (ГНЦ ФГУП «Центр Келдыша», МАИ).

Соответствие специальности

Диссертационная работа посвящена исследованию выходных параметров высокочастотного ионного двигателя и соответствует специальности 05.07.05 – Тепловые, электроракетные двигатели и энергетические установки летательных аппаратов.

Замечания по диссертационной работе

1. Утверждение на странице 9 *«В первой главе...обоснована возможность проведения исследования тягового узла отдельно от других элементов ПВЭРД»* не подтверждено в тексте главы 1.

2. Рисунок 1.7 заимствован из публикации [Fujita K. Air intake performance of air breathing ion engines / Journal of the Japan Society for Aeronautical and Space Sciences. 2004. Vol. 52. № 610] или из других более ранних публикаций и приведён без соответствующей ссылки.

3. Утверждение на странице 30 *«концентрации частиц, необходимые для создания стабильного ВЧ-разряда в РК ВЧИД колеблются в диапазоне $10^{17} \div 10^{18} \text{ м}^{-3}$ »* приведено без каких-либо ссылок и никак не обосновано.

4. При расчёте размера ячейки сетки, разделяющей ёмкости термализации и рабочего объёма разрядной камеры, допущена ошибка: в формулу (2.5) вместо разности потенциалов между плазмой и сеткой U_c подставлен потенциал эмиссионного электрода.

Общие выводы

Оценивая диссертацию Суворова М.О., в целом, можно заключить, что она представляет собой законченную научно-квалификационную работу, в которой решена актуальная научно-техническая задача создания прототипа тягового узла прямооточного воздушного ЭРД на базе ВЧИД и определения его характеристик на основе обширных экспериментальных исследований. Автореферат работы адекватно отражает её основное содержание, научную новизну, выводы и другие ключевые элементы.


Отмеченные недостатки в целом не снижают ценность полученных результатов и не умаляют практическую значимость работы.

По своему содержанию и полученным результатам работа соответствует требованиям п.9 «Положения о порядке присуждения ученых степеней», а ее автор, Суворов Максим Олегович, заслуживает присуждения ученой степени кандидата технических наук. По специальности 05.07.05 – «Тепловые, электроракетные двигатели и энергоустановки летательных аппаратов».

Отзыв составлен на основе изучения диссертации и автореферата. Отзыв рассмотрен и единогласно утверждён на заседании научно-технического совета отдела электрофизики 20.11.2018, протокол № 18-27/120.

Отзыв составили

Начальник отдела 120,
ГНЦ ФГУП «Центр Келдыша»
к. ф.-м.н.


Александр Сергеевич Ловцов

Научный сотрудник отдела 120,
ГНЦ ФГУП «Центр Келдыша»
к. ф.-м.н.


Дмитрий Александрович Кравченко

Сведения о ведущей организации:

Государственный научный центр Российской Федерации – федеральное государственное унитарное предприятие «Исследовательский центр имени М.В. Келдыша» (ГНЦ ФГУП «Центр Келдыша»), 125438, г. Москва, ул. Онежская, д. 8; телефон: +7 (495) 456-46-08; e-mail: kerc@elnet.msk.ru, сайт: <http://kerc.msk.ru>