



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, 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

13.11.2019 № 71-06/191

на № 010/1091 от 08.10.2019

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 08.10.2019 г. исх. № 010/1091 направляю отзыв ведущей организации на диссертацию Мельникова Андрея Викторовича «Высокочастотный ионный двигатель с дополнительным постоянным магнитным полем», представленную на соискание учёной степени кандидата технических наук по специальности 05.07.05 – «Тепловые, электроракетные двигатели и энергоустановки летательных аппаратов».

Приложение: Отзыв ведущей организации на — 5 л. в 2-х экз.

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

А.В.Семенкин

А.В.Семенкин

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

ОБЩИЙ ОТДЕЛ МАИ
Вх. № 13
11 2019

УТВЕРЖДАЮ

Заместитель генерального директора
ГНЦ ФГУП «Центр Келдыша»
по космическим аппаратам и энергетике –
начальник отделения З, д.т.н.

А.В. Семенкин

2019 г.



ОТЗЫВ ВЕДУЩЕЙ ОРГАНИЗАЦИИ

на диссертацию Мельникова Андрея Викторовича

«Высокочастотный ионный двигатель с дополнительным постоянным магнитным полем», представленную на соискание учёной степени кандидата технических наук по специальности 05.07.05 – «Тепловые, электроракетные двигатели и энергоустановки летательных аппаратов»

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 диссертации описаны перспективы применения ИД на низкоорбитальных КА дистанционного зондирования Земли, описан принцип работы ВЧИД, проведён обзор расчётных моделей ВЧ индуктивного разряда, рассмотрены методы повышения энергетической эффективности ВЧИД. Среди методов повышения эффективности подробно рассматриваются такие, как оптимизация размеров и формы ГРК, параметров индуктора и ионно-оптической системы, содержится информация о предшествующих работах, посвящённых изучению влияния внешнего магнитного поля на ВЧ разряд.

Вторая глава диссертации посвящена описанию вакуумной установки, на которой проводились исследования, системы подачи рабочего тела, электропитания и управления, конструкции лабораторных моделей двух двигателей с диаметром ИОС 80 и 100 мм.

Приведены результаты расчёта магнитного поля, изложена методика проведения экспериментов и приведены оценки погрешности измерений.

В третьей главе диссертации описаны результаты проведенных экспериментов. Эксперименты проводились на двух лабораторных моделях ВЧИД с диаметрами пучка 100 и 80 мм.

При проведении экспериментов на двигателе с диаметром пучка 100 мм положительный эффект от наложения внешнего магнитного поля наблюдался лишь в диапазоне низких токов пучка, при этом использовалась двухполюсная магнитная система.

При исследовании лабораторной модели с диаметром пучка 80 мм положительное влияние дополнительного постоянного магнитного поля наблюдалось во всем рассматриваемом диапазоне режимов работы. Приведены результаты исследований локальных параметров плазмы, а также испытаны три типа магнитных систем: бесполусная, однополюсная и двухполюсная. Наиболее эффективной оказалась бесполусная магнитная система, а наименее – двухполюсная.

Приведены результаты экспериментов с постоянным внешним магнитом. Сформулированы рекомендации проектированию ВЧИД с дополнительным постоянным магнитным полем.

В четвёртой главе приводится описание инженерной математической модели разряда в ГРК ВЧИД и продемонстрированы результаты численного моделирования двигателя с диаметром ИОС 80 мм. В расчётах получено выравнивание радиального распределения температуры электронов и увеличение концентрации электронов в приосевой области при наложении внешнего магнитного поля, наблюдавшееся в экспериментах. Сделан вывод о том, что модель с точностью до 20% способна предсказать извлекаемый ток ионного пучка, а также позволяет проводить предварительную расчётную оптимизацию конфигурации магнитного поля.

В заключении формулируются полученные в работе результаты.

Актуальность темы исследований

Ионные двигатели (ИД) в настоящее время находят применение на низкоорбитальных космических аппаратах для компенсации аэродинамического сопротивления, на геостационарных спутниках для управления ориентацией и коррекции параметров орбиты, а также в качестве маршевых двигателей на аппаратах, предназначенных для изучения объектов Солнечной системы. Среди ионных двигателей различных типов наименьшая цена иона достигается в двигателях с ионизацией рабочего тела в разряде постоянного тока. В современных высокочастотных ионных двигателях (ВЧИД) цена иона выше. Однако широкое применение микрокосмических аппаратов, в том числе формата CubeSat, требует

создания двигателей малой мощности (до 100 Вт), что приводит к трудностям при масштабировании двигателей с разрядом постоянного тока. При падении мощности падает интегральная эффективность всех типов ионных двигателей, поэтому представленная диссертация, посвящённая проблеме повышения эффективности ионизации в ГРК ВЧИД, является актуальной, особенно применительно к двигателям малой мощности.

Новизна исследований и полученных результатов

В настоящей работе автором экспериментально показано улучшение интегральных характеристик ВЧИД малой мощности при наложении магнитного поля определенной топологии.

Доказано предположение, обосновывающее улучшение интегральных характеристик модели ВЧИД малой мощности при дросселировании тяги, за счет эффекта увеличения концентрации плазмы и выравнивания температуры электронов по радиусу при наличии магнитного поля определенной топологии.

Определены значения осевой и радиальной составляющих дополнительного постоянного магнитного поля на срезе разрядной камеры для ВЧИД малой мощности с диаметром 80-100 мм.

Достоверность основных положений, выносимых на защиту

Достоверность результатов экспериментальных исследований, выносимых на защиту, определяются корректностью применения исследовательской аппаратуры и условиями проведения экспериментов.

Практическая значимость полученных автором результатов

Доказано улучшение интегральных характеристик ВЧИД малой мощности при наложении магнитного поля определенной топологии. Определены режимы работы двигателей размерностью 80-100 мм параметры магнитного поля, при которых наблюдается улучшение интегральных характеристик.

Экспериментально подтверждена возможность использования постоянного магнита в качестве источника дополнительного магнитного поля для ВЧИД.

Разработаны рекомендации по созданию моделей ВЧИД малой мощности, найденные технические решения защищены патентом на полезную модель.

Рекомендации по использованию результатов и выводов диссертации

Результаты диссертационной работы А.В. Мельникова 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 с дополнительным постоянным магнитным полем и соответствует специальности 05.07.05 – Тепловые, электроракетные двигатели и энергетические установки летательных аппаратов. Автореферат работы адекватно отражает её основное содержание, научную новизну, выводы и другие ключевые элементы. Основные результаты диссертационной работы опубликованы в открытой печати.

Замечания по диссертационной работе

1. В работе исследуется конфигурация магнитного поля, названная рупорно-аксиальной, при этом данный термин не раскрыт и не является общеупотребительным. В работе недостаточно четко обоснован выбор именно такой конфигурации магнитного поля и ее преимущества по сравнению с другими конфигурациями.

2. Применительно к модели ВЧИД диаметром 80 мм получены наилучшие результаты для бесполосной магнитной системы, а менее выраженные для двухполосной. В тоже время ВЧИД с диаметром пучка 100 мм испытан только с двухполосной системой, что возможно не позволило получить более весомые результаты во втором случае.

3. Утверждение *«По результатам системных исследований различных конфигураций дополнительного постоянного магнитного поля показано, что его топология, обеспечивающая стабильную работу и улучшение интегральных характеристик ВЧИД малой мощности, в широком диапазоне дросселирования тяги, достигается при значениях индукции осевой и радиальной составляющих на срезе разрядной камеры уровня 0,5 и 0,3 мТл соответственно»* представляется недостаточно обоснованным, поскольку, например, на стр. 31 диссертации утверждается со ссылкой на исследования других авторов, что *«Наилучший вклад ВЧ мощности наблюдается при определенной, резонансной индукции магнитного поля B_{res} , величина которой зависит как от плотности плазмы, так и от частоты тока в индукторе»*. Проведенные исследования охватывают не столь значительный диапазон типоразмеров устройств и режимов их функционирования для столь категоричных заявлений.

4. Инженерная математическая модель вызывает целый ряд замечаний по ее постановке и использованию. Модель не учитывает распространение волн в плазме, что для высокочастотного ионного двигателя выглядит недостаточно обоснованным. Использование векторного магнитного потенциала, который определён с точностью до градиента произвольной скалярной функции допускает чрезвычайно широкое применение методов подбора значений используемых величин.

Общие выводы

Оценивая диссертацию Мельникова А.В., в целом, можно заключить, что она представляет собой научно-квалификационную работу, в которой рассматривается актуальная научно-техническая задача повышения эффективности ионизации в ГРК ВЧИД за счет наложение внешнего постоянного магнитного поля.

Отмеченные недостатки в целом не снижают ценность полученных результатов и не умаляют практическую значимость работы особенно в ее экспериментальной части.

По своему содержанию и полученным результатам работа соответствует требованиям «Положения о порядке присуждения ученых степеней», а ее автор, Мельников Андрей Викторович, 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 08.11.2019, протокол № 19-23/120.

Отзыв составили

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


Александр Сергеевич Ловцов

Ведущий инженер отдела 120,
ГНЦ ФГУП «Центр Келдыша»
к.т.н.


Михаил Юрьевич Селиванов

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>