



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; http://www.kerc.msk.ru

16.11.2022 № 7-17/275  
на № 010/1558-03 от 07.11.2022

Председателю диссертационного  
совета 24.2.327.06  
на базе Московского авиационного  
института (национального  
исследовательского университета)  
Равиковичу Ю. А.

125993, г. Москва, А-80, ГСП-3,  
Волоколамское шоссе, дом 4,  
Ученый совет МАИ

Уважаемый Юрий Александрович!

Высылаю ОТЗЫВ официального оппонента Семёнкина А.В. на диссертационную работу Гордеева Святослава Валерьевича «Газоразрядная камера прямоточного высокочастотного ионного двигателя» представленную на соискание ученой степени кандидата технических наук по специальности 2.5.15. «Тепловые, электроракетные двигатели и энергоустановки летательных аппаратов».

Приложение: Отзыв в двух экземплярах на 5 листах каждый.

  
Главный научный сотрудник, д.т.н



А.В. Семёнкин

Отдел документационного  
обеспечения МАИ

21 » 11 2022г.

## ОТЗЫВ

Официального оппонента Семёнкина Александра Вениаминовича на диссертационную работу Гордеева Святослава Валерьевича «Газоразрядная камера прямоочного высокочастотного ионного двигателя» представленную на соискание ученой степени кандидата технических наук по специальности 2.5.15. «Тепловые, электроракетные двигатели и энергоустановки летательных аппаратов».

### Актуальность темы исследования

Одним из перспективных направлений развития космической техники является создание низкоорбитальных космических аппаратов (КА) дистанционного зондирования земли (ДЗЗ), функционирующих на высотах около 200 км, что дает возможность существенно улучшить разрешение аппаратуры ДЗЗ.

Использование низких орбит, с одной стороны, связано с увеличением аэродинамического сопротивления тормозящего космический аппарат, а другой стороны, дает потенциальную возможность использовать газ остаточной атмосферы в качестве рабочего вещества электроракетных двигателей (ЭРД), тяга которых компенсирует силу аэродинамического торможения и позволяет обеспечивать функционирование КА длительное время. Поэтому изучение возможностей создания ЭРД, работающих на атмосферном газе, и разработка путей и технических решений, обеспечивающих эффективную работу таких электроракетных двигателей, является важной и актуальной задачей.

Поскольку остаточная атмосфера на рассматриваемых высотах состоит из химически активных газов, наиболее предпочтительным является именно вариант ионного двигателя с высокочастотной диэлектрической газоразрядной камерой (ВЧИД), рассмотренный в диссертационной работе Гордеева С.В., что позволяет исключить химическое взаимодействие газоразрядной плазмы со стенками камеры.

Таким образом, тематика и направление работ диссертации, решаемые задачи, безусловно, являются актуальными и имеют важное практическое значение.

Целью работы является разработка научно технических основ проектирования газоразрядной камеры прямоочного высокочастотного ионного двигателя, работающего в условиях пониженных концентраций рабочего тела.

Для достижения поставленной цели в работе были решены следующие задачи:

1. Разработана инженерная физико-математическая модель высокочастотного индукционного разряда, поддерживаемого в различных газах, как одноатомных так и диссоциирующих молекулярных.

Отдел документационного  
обеспечения МАИ

«21» 11 20 22

2. Спроектирована и изготовлена лабораторная модель ВЧИД с прямоточной конфигурацией газоразрядной камеры, с возможностью регулирования прозрачности входного канала устройства забора атмосферных газов.
3. Проведены экспериментальные исследования режимов работы лабораторной модели ВЧИД.
4. Верифицирована физико-математическая модель с использованием опубликованных ранее и полученных в настоящей работе экспериментальных данных.
5. Выработаны рекомендации по проектированию газоразрядной камеры прямоточного ВЧИД.

#### **Результаты работы прошли широкую научную апробацию**

По тематике диссертации автором представлены доклады на ведущих профильных научных конференциях. По теме диссертации опубликовано 9 работ в рецензируемых научных изданиях, из них 2 работы опубликованы в журналах, входящих в перечень высшей аттестационной комиссии.

#### **Объем и структура диссертационной работы**

Диссертация изложена на 127 страницах машинописного текста, включает в себя 104 рисунка, 3 таблицы, а также 127 библиографических ссылок. Работа разделена на введение, 4 главы содержательной части, заключение, список сокращений и условных обозначений, список литературы.

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

**В первой главе** обсуждается применение ЭРД для поддержания космических аппаратов на низкой орбите. Приведены сведения о возможности использования остаточной атмосферной среды в качестве рабочего вещества двигателя. Рассмотрены различные виды ЭРД с точки зрения их использования по прямоточной схеме. Также приведен обзор различных схем прямоточных ЭРД. Рассмотрена концепция прямоточного ЭРД, и его составные части.

**Вторая глава** посвящена физико-математической модели высокочастотного индукционного разряда, в том числе, в диссоциирующих газах.

Разработанная физико-математическая модель позволила провести расчеты:

- распределения амплитудного значения плотности вихревых электронных токов;
- параметров электромагнитного поля;
- распределения концентраций нейтральных атомов и молекул;
- распределения концентраций атомарных и молекулярных ионов.

В расчетах учитывается наличие в плазме ионов, нейтральных атомов и электронов (в случае диссоциирующего рабочего тела учитываются нейтральные атомы и молекулы, а также атомарные и молекулярные ионы).

В третьей главе приводится описание экспериментального исследования ВЧИД с прямоточной конфигурацией газоразрядной камеры. Приведено описание стенда и его систем, созданного экспериментального образца ВЧИД. Особенностью конструкции экспериментального образца двигателя является трансформируемый узел моделирующий влияние устройства забора атмосферных газов на работу двигателя (УЗАГ), что дало возможность исследовать параметры ВЧИД при различных условиях работы газоразрядной камеры. При этом была решена проблема удержания плазмы в газоразрядной камере с помощью двух разделительных сеток и достигнута стабильная работа двигателя.

В результате экспериментальных исследований получены данные о режимах двигателя и границах его эффективной работы.

Четвертая глава содержит сведения о верификации разработанной физико-математической модели с использованием экспериментальных данных, полученных другими авторами, а также с использованием данных, полученных лично автором диссертационной работы.

Показано, что расхождение расчетных и экспериментальных данных для азота в большей части исследованного диапазона параметров не превышает 10%, что позволяет использовать разработанную автором физико-математическую модель при проектировании двигателей.

**Заключение** содержит основные результаты и выводы по работе.

**Результаты диссертационной работы обладают научной новизной и практической полезностью.**

**Научная новизна результатов исследований** состоит в том, что:

1. Разработана оригинальная двумерная осесимметричная физико-математическая модель процессов в газоразрядной камере прямого ВЧИД, потребляющая умеренное количество вычислительных ресурсов, и позволяющая, в то же время, анализировать изменения локальных параметров плазмы высокочастотного разряда.

2. Впервые показана принципиальная возможность удержания высокопотенциальной плазмы в объеме газоразрядной камеры прямого конфигурации.

3. Впервые получены экспериментальные зависимости потребляемой высокочастотной мощности от расхода рабочего тела для высокочастотного ионного двигателя с прямого конфигурацией газоразрядной камеры в условиях пониженной концентрации рабочего тела.

**Теоретическая и практическая значимость результатов исследований** заключается в следующем:

1. Создан лабораторный макет ВЧИД с прямого конфигурацией газоразрядной камеры.
2. Доказана принципиальная возможность работы ВЧИД с прямого конфигурацией газоразрядной камеры в условиях пониженной концентрации рабочего тела.
3. Разработана двумерная осесимметричная физико-математическая модель высокочастотного индукционного газового разряда в газоразрядной камере прямого ВЧИД.

**Достоверность** результатов экспериментальных исследований подтверждается применением аттестованной современной измерительной аппаратуры, апробированных методик измерения. Достоверность теоретических исследований подтверждена удовлетворительным совпадением результатов расчетов с результатами эксперимента.

**В качестве недостатков работы можно отметить следующее:**

Не приведено описание использованного метода определения тяги двигателя, численные значения тяги, приведенные в Заключение, не проиллюстрированы данными в тексте диссертации.

Не приведены сведения о границах применимости предложенной физико-математической модели.

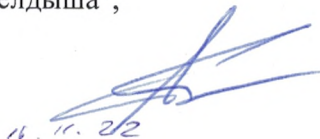
Однако отмеченные недостатки не снижают общего положительного представления о диссертации как о цельной научной работе и не ставят под сомнение полученные результаты и разработанные рекомендации. Диссертационная работа выполнена на высоком научно-техническом уровне и представляет собой законченную научно-исследовательскую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

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

Содержание автореферата соответствует основным положениям диссертационной работы.

Диссертационная работа соответствует требованиям, предъявляемым ВАК РФ, а ее автор С.В. Гордеев 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

Подпись официального оппонента Семёнкина А.В. удостоверяю  
Ученый секретарь АО ГНЦ «Центр Келдыша»,  
кандидат военных наук



Ю.Л. Смирнов

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](mailto:semenkin@kerc.msk.ru)  
Телефон: 8 (495) 456-20-63

*с отзывом ознакомлен 21.11.2022 Гордеев (С.В. Гордеев)*