

УТВЕРЖДАЮ

Заместитель генерального директора  
по научной работе, д.т.н., профессор



В.Я. Геча

«30» 11 2022 г.

## ОТЗЫВ ВЕДУЩЕЙ ОРГАНИЗАЦИИ

на диссертационную работу Гордеева Святослава Валерьевича на тему «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»

В диссертационной работе исследуются физические процессы в газоразрядной камере прямоточного высокочастотного ионного двигателя (ВЧИД) для космического аппарата, предназначенного для функционирования на сверхнизких орбитах (200-300 км). В таком ВЧИД в качестве рабочего тела используются газы остаточной атмосферы Земли.

Данная тема безусловно является **актуальной**, поскольку создание такого двигателя открывает перспективы освоения сверхнизких околоземных орбит и позволит существенно снизить размеры и стоимость целевой аппаратуры космических аппаратов (КА) дистанционного зондирования Земли, снизить стоимость выведения КА и снять проблему космического мусора.

**Во введении** диссертационной работы проведен анализ существующих реактивных двигателей малой тяги, изложена концепция прямоточного ВЧИД и проведен анализ современного состояния мирового научного задела в этой

Отдел документационного  
обеспечения МАИ

02 12 2022 г.

области. Показана актуальность темы исследования, сформулированы цель и задачи исследования, отражены научная новизна, практическая значимость, приведены научные положения, выносимые на защиту, публикации автора по теме диссертации.

**В первой главе** с использованием опубликованных работ по теме диссертационного исследования проведен подробный анализ разработок прямоточных ЭРД. Рассмотрены вопросы, связанные с применением различных типов электрореактивных двигателей (ЭРД). Подробно рассмотрена концепция прямоточных ЭРД и проведен анализ предложенных ранее схем реализации. Детально рассмотрена схема прямоточного высокочастотного ионного двигателя.

**Во второй главе** проведен анализ существующих математических моделей ВЧИД, в том числе прямоточного двигателя. Описаны виды расчетов при моделировании высокочастотного разряда, учитывающие взаимодействия между различными группами частиц, а также частиц с электромагнитным полем. Описана предложенная автором численная физико-математическая модель высокочастотного индукционного разряда низкого давления. Приведены сведения об отладке составных частей модели с использованием аналитических решений с целью верификации методики расчета.

**В третьей главе** приводится описание и результаты проведенного автором диссертационной работы экспериментального исследования высокочастотного ионного двигателя с прямоточной конфигурацией газоразрядной камеры. Описана схема и методика проведения экспериментального исследования. Приведено подробное описание экспериментального стенда, в том числе средств измерения и контроля параметров. Дано описание лабораторного образца высокочастотного ионного двигателя с прямоточной конфигурацией разрядной камеры, на котором впервые была решена проблема удержания плазмы в газоразрядной камере

прямоточной конфигурации и достигнута стабильная работа двигателя. Приведены полученные автором работы экспериментальные зависимости потребляемой высокочастотной мощности от объемного расхода рабочего тела (азота).

**В четвертой главе** содержатся результаты верификации. Приведено сравнение экспериментальных данных, полученных другими авторами, с результатами моделирования для таких рабочих тел, как ксенон и азот. С использованием разработанной автором модели ВЧИД была смоделирована работа высокочастотного ионного двигателя с прямоточной конфигурацией газоразрядной камеры и проведен сравнительный анализ результатов с экспериментальными данными, полученными лично автором. Анализ результатов показал, что расхождение расчетных и экспериментальных значений не превышает 10%. По полученным результатам исследований выработаны рекомендации и направления дальнейших работ в части создания газоразрядной камеры прямоточного высокочастотного ионного двигателя.

**В заключении** приведены основные результаты диссертационного исследования, включающие разработку численной физико-математической модели высокочастотного индукционного разряда низкого давления и ее верификации с использованием полученных автором экспериментальных данных и данных, имеющих в литературе.

**Научная новизна и значимость результатов диссертационной работы** состоят в том, что в ней представлена оригинальная осесимметричная математическая модель высокочастотного индукционного разряда, которая впервые позволила получить распределения локальных параметров плазмы в высокочастотном ионном двигателе с прямоточной конфигурацией разрядной камеры, при использовании азота в качестве рабочего тела.

В работе впервые в ходе экспериментального исследования лабораторного образца высокочастотного ионного двигателя (ВЧИД) с прямоточной конфигурацией разрядной камеры получены зависимости потребляемой ВЧ-мощности от расхода рабочего тела (азота) для различных токов ионного пучка.

Проведенные экспериментальные исследования лабораторного макета ВЧИД с прямоточной конфигурацией газоразрядной камеры позволили впервые показать принципиальную возможность работы данного устройства в условиях пониженной концентрации рабочего тела, в том числе впервые показана возможность длительного удержания плазмы в газоразрядной камере прямоточной конфигурации.

Разработанная двумерная осесимметричная физико-математическая модель высокочастотного индукционного газового разряда в газоразрядной камере прямоточного ВЧИД позволяет проводить анализ изменения локальных параметров среды в рабочей области данного устройства в различных режимах работы.

**Степень достоверности результатов проведенных исследований** представленных в диссертации С.В. Гордеева, обеспечивается использованием общепринятых подходов к созданию математических моделей, обоснованному выбору применяемых методов вычислительной математики и математического моделирования.

Все разработанные математические модели, алгоритмы и программное обеспечение прошли верификацию на реальных данных, с использованием аналитических решений и экспериментальных результатов других исследователей, а также экспериментальных результатов, полученных при непосредственном участии автора диссертационной работы.

В части экспериментальных исследований достоверность обусловлена использованием современных методик измерений, сбора и обработки данных. Все исследования проводились на сертифицированном оборудовании.

**Практическая значимость работы** заключается в возможности решения актуальных прикладных задач, стоящих перед предприятиями ракетно-космической отрасли и связанных с созданием перспективных низкоорбитальных космических аппаратов, для которых наиболее актуальной проблемой является достижение минимальных энергетических и массогабаритных характеристик с достижением максимально возможного срока активного существования при выполнении поставленных целевых задач.

При выполнении теоретических и экспериментальных исследований в рамках диссертационной работы были достигнуты следующие результаты:

– разработана физико-математическая модель высокочастотного индукционного разряда низкого давления, поддерживаемого в различных (в том числе диссоциирующих) газах, проведена ее верификация с использованием опубликованных ранее и полученных в настоящей работе экспериментальных данных, и рассчитаны параметры высокочастотного ионного двигателя с прямоточной конфигурацией газоразрядной камеры при работе на азоте. Расхождения результатов расчета и экспериментальных данных не превышают 10%;

– создана лабораторная модель высокочастотного ионного двигателя, позволяющая проводить исследование имитации работы его газоразрядной камеры в прямоточном режиме;

– предложена схема разделительного узла, расположенного на входе в высокочастотную газоразрядную камеру прямоточной конфигурации, доказывающего принципиальную возможность удержания плазмы от проникновения в заборное устройство атмосферных газов при ускоряющем напряжении в двигателе до +600 В;

– экспериментальное исследование лабораторного образца прямого двигателя с диаметром ионного пучка 50 мм продемонстрировало возможность создания им силы тяги до 1 мН при работе высокочастотной разрядной камеры в условиях пониженной концентрации рабочего тела.

**Результаты диссертационной работы могут быть использованы** производителями перспективных космических аппаратов, применяющих в качестве рабочего тела планетарные атмосферные газы на орбитах функционирования до 300 км (например, для задач ДЗЗ).

По представленной работе можно сделать **следующие замечания**:

1. Во второй главе, посвященной разработанной автором физико-математической модели высокочастотного индукционного разряда низкого давления, приведены и проанализированы отдельные модели физических процессов в ВЧИД. Представляется, что объединению этих моделей, с учетом особенностей прямого ЭРД, уделено недостаточно внимания.

2. В главе 3, посвященной экспериментальным исследованиям прямого ВЧИД, в схеме эксперимента присутствует устройство забора атмосферных газов (УЗАГ), однако рабочее тело подается в область ионизации. Благодаря введенным автором разделительным сеткам и щелевым каналам в УЗАГ удалось получить значимые и оригинальные результаты, в том числе, по обратному потоку рабочего тела, что является несомненным достоинством этой главы. Однако, в постановке задачи эксперимента и выводах это техническое решение не достаточно освещено.

3. Заключение по работе представляется излишне лаконичным, выводы по разделам не приведены.

4. При оформлении диссертации и автореферата автору не удалось избежать отдельных неточностей. Так, на рис.1.1 не приведен баллистический коэффициент КА (соотношение миделя и массы), на рис. 1.3 размерность силы сопротивления должна быть в Н, а не в мН, на рисунке 1.18 на принципиальной

схеме прямоточного электроракетного двигателя не выделена область, которой посвящено диссертационное исследование.

Однако отмеченные недостатки не снижают ценности и практической значимости диссертации. Проведенные исследования можно характеризовать как научно обоснованные методические разработки, обеспечивающие решение важных прикладных задач.

Диссертация Гордеева Святослава Валерьевича на тему «Газоразрядная камера прямоточного высокочастотного ионного двигателя» на соискание ученой степени кандидата технических наук представляет собой законченную научно-квалификационную работу, выполненную автором на высоком научно-техническом уровне.

Новые научные результаты, полученные автором работы, имеют существенное значение для науки и практики.

Тема и содержание диссертации Гордеева Святослава Валерьевича соответствуют паспорту специальности 2.5.15. – «Тепловые, электроракетные двигатели и энергоустановки летательных аппаратов».

Автореферат полно и объективно отражает содержание диссертации. Выводы по диссертации соответствуют выводам, опубликованным в автореферате.

По своей актуальности, научной новизне, объему выполненных исследований, теоретической и практической значимости полученных результатов, а также оформлению и содержанию представленная работа соответствует всем требованиям п. 9-14 «Положения о присуждении ученых степеней», утвержденного Постановлением Правительства Российской Федерации от 24.09.2013 № 842, предъявляемым к диссертациям на соискание ученой степени кандидата наук, а её автор, Гордеев Святослав Валерьевич, заслуживает присуждения степени кандидата технических наук по

специальности 2.5.15. – «Тепловые, электроракетные двигатели и энергоустановки летательных аппаратов».

Результаты диссертационной работы были рассмотрены на заседании секции №4 НТС АО «Корпорация «ВНИИЭМ» (протокол №19/2022 от 18.11.2022 г.) и получили положительную оценку.

Начальник НТЦ «Новые технологии», к.т.н.



Каверин В.В.

Акционерное общество «Научно-производственная корпорация «Космические системы мониторинга, информационно-управляющие и электромеханические комплексы» имени А.Г. Иосифьяна» (АО «Корпорация «ВНИИЭМ»)

Почтовый адрес: 107078, Российская Федерация, город Москва, Хоромный тупик, дом 4, строение 1

Телефон: (495) 608-84-67, (495) 365-56-10

Факс: (495) 624-86-65, (495) 366-26-38

E-mail: info@vniiem.ru, vniiem@vniiem.ru

*Сотрудником ознакомлен 02.12.2022 Горюхов (С.В. Гордеев)*