



ГОСУДАРСТВЕННАЯ КОРПОРАЦИЯ  
ПО КОСМИЧЕСКОЙ ДЕЯТЕЛЬНОСТИ "РОСКОСМОС"

Федеральное государственное унитарное предприятие  
"ЦЕНТРАЛЬНЫЙ НАУЧНО-ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ  
ИНСТИТУТ МАШИНОСТРОЕНИЯ" (ФГУП ЦНИИмаш)



ул. Пионерская, д.4, городской округ  
Королёв, Московская область, 141070

Тел. (495) 513-59-51  
Факс (495)512-21-00

E-mail:corp@tsniimash.ru  
http://www.tsniimash.ru

ОКПО 07553682, ОГРН 1025002032791  
ИНН/КПП 5018034218/501801001

22.11.2018 исх. № 9001-7968

исх. № \_\_\_\_\_ от \_\_\_\_\_

Московский Авиационный Институт  
(национальный исследовательский  
университет) МАИ, Волоколамское ш. д. 4,  
Москва, 125993

Председателю диссертационного совета  
Д212.125.08,  
Доктору технических наук, профессору  
Ю.А. Равиковичу

Уважаемый Юрий Александрович!

Настоящим высылаю Вам отзыв официального оппонента, ведущего научного сотрудника ФГУП ЦНИИмаш, к.т.н. Пильникова Александра Васильевича на диссертацию Суворова М.О. «Тяговый узел прямоточного воздушного электрореактивного двигателя», представленную на соискание ученой степени кандидата технических наук по специальности 05.07.05 - «Тепловые, электроракетные двигатели и энергоустановки летательных аппаратов».

Приложение - «Отзыв...», на 5 листах, 2 экз., н/с.

Генеральный конструктор по  
средствам выведения и наземной  
космической инфраструктуре –  
заместитель генерального директора

Исп. А.В. Пильников  
тел. (495) 513-48-86

*С. Ю. Равикович*  
*Медвед*

А.А. Медведев

ОБЩИЙ ОТДЕЛ МАИ  
Вх. № 23 11 2018

014997 ❄

## Отзыв

официального оппонента

кандидата технических наук **Пильникова Александра Васильевича**  
на диссертационную работу **Суворова Максима Олеговича**  
«Тяговый узел прямого воздушного электрореактивного двигателя»,  
представленную на соискание ученой степени кандидата технических наук  
по специальности 05.07.05 — «Тепловые, электроракетные двигатели и  
энергоустановки летательных аппаратов»

### Актуальность темы диссертации

В последние несколько лет развитие спутников дистанционного зондирования Земли (ДЗЗ) сопровождается как ростом количества запускаемых аппаратов, так и качественной модернизацией устанавливаемой на них бортовой аппаратуры

Высота орбиты является одним из ключевых критериев, влияющих на качество получаемой с аппаратов ДЗЗ информации. Снижение высоты орбиты, вплоть до 200–250 км, может стать идеей, характеризующейся революционным скачком в развитии данного вида техники. Однако, создание низкоорбитальных космических аппаратов (КА) является довольно сложной технической задачей, так как со снижением высоты орбиты возрастает значение его аэродинамического сопротивления, которое должно быть скомпенсировано с помощью двигательной установки (ДУ) аппарата.

В основе ДУ коррекции на летных КА в основном применяются электроракетные двигатели (ЭРД). Они хорошо зарекомендовали себя и широко применяются для задач коррекции положения аппаратов в околоземном космическом пространстве. Основным преимуществом ЭРД является высокий удельный импульс (от 4000 с и выше для ионных двигателей (ИД)), а также относительно небольшие запасы рабочего тела (РТ), требуемые для длительного функционирования аппарата.

Основной проблемой при использовании современных летных ЭРД на низкоорбитальных КА является относительно высокая доля РТ в общей массе КА при заданных сроках активного существования (САС). Расчеты показывают, что при использовании штатных СПД-50 на аппаратах ДЗЗ типа «Канопус-В», при САС равном 5 лет, на орбитах порядка 180-200 км, масса ксенона превышает массу КА в 8 раз. То есть, использование СПД на таких орбитах практически неприемлемо. При использовании ИД для таких задач относительная доля массы РТ снижается, однако все-таки остается довольно высокой, сравнимой с массой КА. Для решения данной проблемы, а также для значительного увеличения САС аппарата, автор предлагает использовать в качестве РТ заборный воздух, то есть прямого воздушную схему электрореактивного двигателя (ПВЭРД), которая может использовать заборный воздух на высотах около 220 км и утилизировать его в качестве РТ для создания тяги. ПВЭРД состоит из двух основных узлов - устройства забора атмосферных газов (УЗАГ) и тягового узла.

В качестве тягового узла ПВЭРД в диссертационной работе рассматривается высокочастотный ионный двигатель (ВЧИД), ионизация газов, поступающих в газоразрядную камеру (ГРК) которого происходит при помощи высокочастотного генератора (ВЧГ) в медном индукторе-антенне, намотанной вокруг разрядного объема, то есть, так называемая безэлектродная схема ионизации. Далее, полученные ионы ускоряются электрическим полем в ионно-оптической системе (ИОС). Несмотря на то, что ВЧИД несколько уступает ионным двигателям Кауфмана, использующим катод в ГРК, как по удельному импульсу так и по затратам энергии на ионизацию, однако при использовании в качестве РТ в ГРК компонентов атмосферной среды, в частности, азота и кислорода, неоспоримым преимуществом все-таки является безэлектродная схема ионизации. При использовании классической схемы Кауфмана невозможно обеспечить длительный ресурс работы двигателя в условиях химически активных газов и их радикалов.

Диссертация Суворова М.О. посвящена экспериментальному исследованию работы тягового узла ПВЭРД на концентрациях атмосферных газов : азота, кислорода и их композиции, соответствующих параметрам, достижимым в реальных условиях полета КА на высоте орбиты около 220 км. В ходе исследований автор рассматривал альтернативные схемы компоновки ВЧИД, им была разработана упрощенная математическая модель для оценки влияния концентрации атмосферной смеси на входе в ГРК на интегральные параметры двигателя, в частности, тягу и мощность, затрачиваемую для работы двигателя. Результатом исследований стали рекомендации для проектирования тягового узла ПВЭРД, а также намечено направление дальнейших исследований. Актуальность работы определяется интересом современной аэрокосмической промышленности к аппаратам ДЗЗ в целом, а также к путям повышения эффективности данного типа КА.

Диссертация содержит введение, четыре главы, заключение и список цитируемой литературы из 101 источника. Текст диссертации, изложенный на 154 страницах, наполнен рисунками, графиками и таблицами, помогающими наглядно разобраться в материале, а также ознакомиться с результатами исследований.

### **Степень обоснованности научных положений, выводов и рекомендаций, сформулированных в диссертации**

Автором рассмотрена концепция прямоточного воздушного электрореактивного двигателя, как способ повышения эффективности работы аппаратов ДЗЗ, а также освещены проблемы создания подобного устройства в современных условиях. Проанализированы условия работы двигателя на высотах орбиты около 220 км. Обоснована возможность исследования работы устройства забора и тягового узла ПВЭРД по отдельности. На основе проведенного анализа сформулирована актуальность исследования тягового узла ПВЭРД.

В работе представлены результаты экспериментальных исследований тягового узла (разработанной и изготовленной лабораторной модели ВЧИД) на молекулярных газах: азоте, кислороде и атмосферной смеси на концентрациях, соответствующих реальным условиям полета КА на высоте орбиты 220 км. Автор опытным путем показал возможность стабильного зажигания и горения высокочастотного разряда при доступных концентрациях атмосферного РТ без традиционно используемого добавления инертных газов. Им так же были предложены и рассмотрены альтернативные схемы компоновки тягового узла ПВЭРД, в частности с внутренним индуктором и с дополнительной термализационной емкостью. Анализ результатов исследования альтернативных компоновочных схем лег в основу разработанных рекомендаций для дальнейшей проработки прямоточной схемы воздушного электрореактивного двигателя.

Автор также разработал и предложил упрощенную математическую (балансовую) модель, которая позволяет быстро оценить изменение интегральных характеристик тягового узла ПВЭРД, в зависимости от изменения концентрации атмосферного РТ на входе в ГРК, что заметно сокращает время экспериментального поиска режимов работы двигателя. Отличительной чертой приведенной модели, а также ее основной сложностью в расчете, является наличие двух молекулярных газов, подверженных диссоциации. Такая концепция ранее исследователями не рассматривалась. Автор приводит сравнение результатов расчета с экспериментальными данными, полученными в ходе исследования тягового узла ПВЭРД. Представленное сопоставление показывают хорошую корреляцию эксперимента и модели (расхождение не более 15%).

**Достоверность полученных автором результатов** обусловлена использованием современных методик измерений, сбора и обработки данных. Все исследования, проведенные в рамках данной диссертационной работы, были выполнены на сертифицированном оборудовании. Полученные результаты качественно согласуются с результатами других исследователей.

### **Научная новизна результатов исследования**

Стоит отметить, что использование кислорода и азота в качестве РТ, само по себе, не является чем-то принципиально новым. Так, к примеру, широко известен опыт использования по отдельности данных газов в технологических источниках ионов. Однако особенностью исследуемого тягового узла ПВЭРД являются относительно низкие концентрации РТ, а также пропорциональный состав кислорода и азота, отличный от известных комбинаций, что значительно осложняет организацию рабочего процесса тягового узла и ранее другими исследователями не рассматривалось.

В рамках диссертационной работы, автором был проведен анализ различных компоновочных решений двигателя, а также была предложена принципиально новая схема ПВЭРД с встроенным в поток

индуктором-антенной. Использование данной схемы позволило увеличить эффективность ионизации РТ при уменьшении затрат мощности на работу тягового узла. Автор рекомендует данную схему к использованию в ПВЭРД для увеличения энергетической эффективности тягового узла.

Вторым важным нововведением является предложенная балансовая математическая модель ПВЭРД. В литературе часто встречается использование подобных балансовых моделей для быстрой оценки зависимости параметров ЭРД и, в частности, ионных двигателей, от тех или иных факторов. Однако эти модели, в основном, созданы для однокомпонентных инертных газов, таких как ксенон, аргон, криптон и др., так как эти газы являются классическими РТ. Расчет параметров ЭРД в случае ВЧИД, использующего атмосферные смеси, существенно осложняется тем, что азот и кислород являются молекулярными газами, а потенциалы их ионизации имеют одни и те же порядки, что потенциалы диссоциации. В результате, автор впервые предложил модель, по которой можно оценить влияние концентрации атмосферных газов на входе в ГРК ВЧИД на тягу и суммарную мощность, требуемую для работы тягового узла.

#### **Практическая значимость работы:**

1. Учитывая рекомендации по конструкционным материалам, автором был разработан лабораторный образец тягового узла ПВЭРД и две его модификации. Проведены экспериментальные исследования лабораторного образца и его модификаций, в ходе которых была показана возможность зажигания и стабильной работы прототипов тягового узла ПВЭРД

2. Предложена упрощенная балансовая модель, связывающая концентрацию атмосферного РТ на входе в ГРК тягового узла с его интегральными характеристиками.

3. Выдвинуты рекомендации по созданию тягового узла ПВЭРД

4. В ходе исследований, приведенных в настоящей работе, автором было получено 2 патента: на изобретение и полезную модель.

**Основные результаты работы** изложены в пяти статьях в рецензируемых научных изданиях. Из них три в научных журналах, рекомендованных ВАК, и две в изданиях индексированных в международной реферативной базе (SCOPUS). Автором получено 2 патента по тематике выполненных исследований.

Однако к работе имеются и **некоторые замечания**, а именно:

1. Во «Введении» диссертационной работы не в полной мере корректно сформулированы параграфы с научной новизной, практической и теоретической значимостью. В последующих главах автор излагает суть данных вопросов, однако, неточная и неполная формулировка этих пунктов создает неправильное восприятие основных акцентов работы.

2. Автор работы занимался только вопросами создания прототипа тягового узла ПВЭРД. Несмотря на то, что, в целом, концепция прямого тягового узла ПВЭРД выглядит реализуемой, стоит отметить, что автор уделил мало внимания одной из наиболее остро стоящих проблем для данной схемы двигателя – проблеме нейтрализации ионного потока. Современные модели катодов-нейтрализаторов не способны работать на атмосферной смеси.

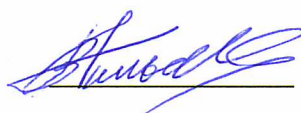
3. Математическая модель содержит в себе ряд упрощений реальных физических процессов, происходящих в газоразрядном объеме, что, в общем, является приемлемым для быстрой оценки интегральных параметров, однако введение коэффициента, учитывающего потери ВЧ-мощности в индукторе, само по себе является несколько грубым допущением и в значительной мере может сказываться на точности модели.

Тем не менее, приведенные замечания не снижают научной и практической ценности проведенных исследований, а работа обладает высоким техническим уровнем.

Диссертация является законченной научно-квалификационной работой, в которой решена актуальная научная задача разработки концепции создания тягового узла ПВЭРД. Работа обладает высоким научным уровнем и отличается практической направленностью.

Таким образом, рецензируемая диссертационная работа удовлетворяет требованиям **«Положения ВАК о порядке присуждения ученых степеней, предъявляемых к кандидатским диссертациям»**. Изложенный в ней материал соответствует паспорту специальности 05.07.05 «Тепловые, электроракетные двигатели и энергоустановки летательных аппаратов», а ее автор, Суворов Максим Олегович, заслуживает присуждения ученой степени кандидата технических наук.

Ведущий научный сотрудник отдела 4101  
«Научно-техническое сопровождение  
наземной экспериментальной отработки  
и летных испытаний двигательных  
установок», кандидат технических наук



А.В. Пильников

Подпись официального оппонента к.т.н. Пильникова А.В. удостоверяю:

Главный Ученый секретарь ФГУП ЦНИИмаш,

д.т.н., профессор



Ю.Н. Смагин

Полное название организации: Федеральное государственное унитарное предприятие «Центральный научно-исследовательский институт машиностроения» (ФГУП «ЦНИИмаш»).

Адрес: 141070, РФ, Московская область, г. Королев, ул. Пионерская, дом 4.

Телефон: 8(495) 513-59-51, Факс: 8(495) 512-21-00

Электронная почта: corp@tsniimash.ru