



АКЦИОНЕРНОЕ ОБЩЕСТВО  
«НАУЧНО-ПРОИЗВОДСТВЕННАЯ КОРПОРАЦИЯ  
«КОСМИЧЕСКИЕ СИСТЕМЫ МОНИТОРИНГА,  
ИНФОРМАЦИОННО-УПРАВЛЯЮЩИЕ И ЭЛЕКТРОМЕХАНИЧЕСКИЕ  
КОМПЛЕКСЫ» имени А.Г. ИОСИФЬЯНА»  
(АО «Корпорация «ВНИИЭМ»)



107078, Российская Федерация, город Москва, Хоромный тупик, дом 4, строение 1, тел.: 8 (495) 608-84-67, тел.: 8 (495) 365-56-10,  
факс: 8 (495) 624-86-65, 8 (495) 366-26-38, а/я 325, e-mail: info@vniiem.ru, vniiem@vniiem.ru  
ИНН 7701944514, КПП 770101001, ОГРН 5117746071097, ОКПО 04657139, ОКВЭД 73.10

21.11.2018 № АЭ - 6679/х

На № \_\_\_\_\_

Председателю ученого совета Д212.125.08  
д.т.н., профессору Равиковичу Ю.А.  
ФГБОУ ВО «Московский авиационный институт  
(национальный исследовательский университет)»  
по адресу, А-80, ГСП-3, Волоколамское шоссе, д.4

Отзыв на диссертацию.

Уважаемый Юрий Александрович!

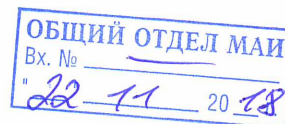
Направляю Вам отзыв официального оппонента д.т.н., профессора  
Ходненко Владимира Павловича на диссертацию Суворова Максима  
Олеговича «Тяговый узел прямоточного воздушного электрореактивного  
двигателя».

Приложение: отзыв в 2 экз. на 4 л. каждый

Ученый секретарь  
АО «Корпорация «ВНИИЭМ»  
к.в.н., доцент

А.В. Пинчук

Исп. Ходненко В.П.  
12-83



63586

Отзыв  
официального оппонента  
доктора технических наук **Ходненко Владимира Павловича**  
на диссертационную работу **Суворова Максима Олеговича**  
«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»

**Актуальность темы диссертации**

Спутники дистанционного зондирования Земли (ДЗЗ) являются важным сегментом современной аэрокосмической отрасли. Технологии, используемые на современных аппаратах данного класса, призваны помочь в изучении природных ресурсов нашей планеты. Космические аппараты (КА) ДЗЗ широко применяются для решения целого ряда прикладных задач: оперативный мониторинг чрезвычайных ситуаций, в том числе пожаров, предотвращение стихийных бедствий, контроль строительства, экологические проблемы, например, контроль паводков, вырубki лесов, а также широкий круг сельскохозяйственных вопросов.

В последние годы в РФ сильно возрос интерес к спутникам ДЗЗ. Согласно Федеральной программе на 2016 - 2025 годы, Госкорпорация «РОСКОСМОС» планирует довести орбитальную группировку средств ДЗЗ до 23 КА к 2025 году. Поэтому, важно своевременно заниматься вопросами поиска путей модернизации и увеличения эффективности данного вида искусственных спутников Земли (ИСЗ).

В рамках данной диссертационной работы рассматривается возможность снижения орбит спутников ДЗЗ вплоть до высот 200...250 км над поверхностью Земли, как один из наиболее перспективных путей повышения эффективности работы целевой аппаратуры, в первую очередь в части улучшения пространственного разрешения. Для компенсации лобового сопротивления, автор рассматривает прямоточную схему компоновки аппарата с высокочастотным ионным двигателем (ВЧИД), выступающим в качестве тягового узла двигательной установки (ДУ). Такой тип электроракетного двигателя (ЭРД) выбран неспроста, так в качестве рабочего тела (РТ) в прямоточной схеме выступает азот-кислородная смесь, собираемая аппаратом при движении по орбите с помощью устройства забора атмосферных газов (УЗАГ) из остаточной атмосферы. Безэлектродная схема ионизации рабочего тела, используемая в ВЧИД, не чувствительна к работе на химически активных газах, в том числе на радикалах кислорода, что может являться серьезным ограничением для выбора других типов ЭРД. Таким образом, прямоточная компоновка аппарата позволяет увеличить массу полезной нагрузки в виду отсутствия баков с РТ. Также это в значительной мере способствует увеличению срока работы ИСЗ в целом, так как часто ресурс низкоорбитальных

КА больше зависит от количества запасенного на борту РТ, нежели от ресурса отдельных элементов конструкции.

Настоящая диссертационная работа посвящена экспериментальному исследованию тягового узла прямоточного воздушного электроракетного двигателя (ПВЭРД). В ходе исследований автор показал возможность стабильной работы тягового узла на атмосферной смеси на концентрациях, соответствующих реальным условиям полета, рассмотрел альтернативные компоновки двигателя, а так же разработал и предложил упрощенную математическую модель для оценки интегральных параметров ВЧИД. Работа диссертанта является актуальной, в ней рассматриваются сложные и востребованные задачи, решение которых способствует развитию ЭРД и спутников ДЗЗ.

### **Обоснованность научных положений, выводов и рекомендаций**

Автором на основе экспериментальных данных обоснованы возможность независимого исследования работы тягового и заборного узлов ПВЭРД и выбор высокочастотного ионного двигателя в качестве прототипа тягового узла.

Диссертантом в ходе испытаний показана возможность работы тягового узла в циклическом режиме, демонстрирующим скважность работы ПВЭРД на выбранных орбитах.

Разработанная автором балансовая модель высокочастотного разряда для быстрой оценки интегральных характеристик ПВЭРД хорошо согласуется с экспериментальными данными с точностью не хуже 15%.

### **Достоверность полученных результатов**

Все экспериментальные исследования, представленные в настоящей диссертационной работе, были выполнены на современном сертифицированном оборудовании. В ходе исследований использовались апробированные ранее методики измерений и обработки данных, что дает право судить об обоснованности сделанных научных выводов.

### **Научная новизна результатов исследования**

Одной из главных особенностей реализации ПВЭРД заключается в использовании газов остаточной атмосферы в качестве РТ. Кислород и азот, присутствующие в атмосфере на высотах 200...250 км в достаточном объеме, в отличие от классических РТ ионных двигателей, ксенона и аргона, являются молекулярными газами, а значит, немаловажным является процесс диссоциации этих газов. В работе автор показал возможность стабильной работы ВЧИД на атмосферных компонентах в выбранном соотношении азот-кислород – 2 ÷ 1 (два к одному), а так же, на тех концентрациях газов, которые возможно обеспечить при помощи УЗАГ при полете КА на высоте 220 км. Зажигание высокочастотного разряда производилось с помощью временной повышения мощности, вкладываемой в индуктор, а не за счет добавление

инертных газов в момент пуска. Так как тяга ПВЭРД в первую очередь зависит от доступной концентрации РТ, автором, на основе простейших физических уравнений, была разработана и предложена балансовая модель, позволяющая провести быструю оценку интегральных характеристик тягового узла, в зависимости от объемного расхода атмосферной смеси, поступающей в разрядную камеру. Подобные модели для двухкомпонентной смеси диссоциирующих газов ранее не предлагались.

Автором были впервые рассмотрены дополнительные компоновочные схемы ВЧИД ПВЭРД, направленные на повышение эффективности тягового узла. В частности, была создана модификация ВЧИД, в которой индуктор устанавливался внутри газоразрядного объема, что способствовало уменьшению затрат на генерацию плазмы за счет увеличения эффективности процесса ионизации.

### **Практическая значимость результатов исследования**

Специально для проведения экспериментальных исследований, автором был создан лабораторный образец тягового узла ПВЭРД, а так же были предложены и отработаны его альтернативные компоновки. В качестве результата проделанных работ автором были сформулированы рекомендации по созданию тягового узла ПВЭРД, а так же разработана и предложена упрощенная балансовая модель для расчета интегральных характеристик тягового узла, которую в будущем можно использовать для дальнейшей проработки концепции ПВЭРД. За время работы над диссертацией, автором были получены 2 патентных свидетельства РФ по выбранной тематике: на изобретение и полезную модель.

Основные результаты работы изложены в 5 научных статьях, опубликованных в журналах, рекомендованных ВАК.

В диссертации имеются и некоторые недостатки:

1. В работе автор указывает потенциальный диапазон орбит, возможных для функционирования КА с прямоточной схемой - 200÷250 км над поверхностью Земли, однако в практической части постоянно фигурирует цифра 220 км. Именно для данного значения высоты орбиты рассчитаны концентрации РТ, получаемые через входное сечение устройства забора. Стоит заметить, что состав атмосферы имеет значительный разброс даже в небольшом диапазоне высот, не говоря уже о разнице в 50 км. Нужно понимать, что реальный высотный диапазон функционирования аппарата будет гораздо меньше. Однако автор не приводит эти данные функционирования КА по высоте и не предлагает никаких рекомендаций на этот счет.

2. В главе, посвященной экспериментальному оборудованию, автор уделил слишком много внимания вопросу модернизации системы подачи РТ. Отчасти это является оправданным, так как подобный пункт (№3 Модернизация оборудования для проведения исследований тягового узла) есть в основных задачах

диссертационной работы, однако можно было ограничиться менее подробным описанием этой части.

3. Более серьезное замечание стоит сделать относительно приведенной математической модели. Автор списывает половину мощности высокочастотного генератора, вводимой в контур с нагрузкой, на потери. В диссертации следовало более подробно объяснить природу этих потерь, а так же высказывать соображения о методах борьбы с ними.

Тем не менее, отмеченные недостатки не снижают научной ценности проведенного исследования и не влияют на общую положительную оценку диссертационной работы.

Диссертация Суворова М.О. является законченной научно-квалификационной работой и выполнена на достаточно высоком научном уровне. Материал изложен грамотным техническим языком, в нем отражен личный вклад автора в результат исследования. Автореферат отражает существо диссертации.

Рецензируемая диссертационная работа удовлетворяет требованиям Положения о присуждении учёных степеней (п.9), предъявляемым к кандидатским диссертациям. Изложенный в ней материал соответствует паспорту специальности 05.07.05 — «Тепловые, электроракетные двигатели и энергоустановки летательных аппаратов», а её автор, Суворов Максим Олегович, заслуживает присуждение учёной степени кандидата технических наук.

Главный научный сотрудник отдела 21  
АО «Корпорация «ВНИИЭМ»,  
доктор технических наук, профессор

  
В.П. Ходненко

Подпись официального оппонента, д.т.н., профессора Ходненко В.П. удостоверяю.

Ученый секретарь АО  
«Корпорация «ВНИИЭМ»,  
к.в.н, доцент



А.В. Пинчук

Полное название организации: Акционерное общество «Научно-производственная корпорация «Космические системы мониторинга, информационно-управляющие электромеханические комплексы» имени А.Г. Иосифьяна».

Почтовый адрес: 107078, РФ, г. Москва, Хоромный тупик, дом 4, строение 1.

Телефон: 8(495) 608-84-67

Электронная почта: [vniiem@orc.ru](mailto:vniiem@orc.ru)