

На правах рукописи



СУВОРОВ Максим Олегович

**ТЯГОВЫЙ УЗЕЛ ПРЯМОТОЧНОГО ВОЗДУШНОГО
ЭЛЕКТРОРЕАКТИВНОГО ДВИГАТЕЛЯ**

Специальность 05.07.05

«Тепловые, электроракетные двигатели и энергоустановки
летательных аппаратов»

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание учёной степени
кандидата технических наук

Москва — 2018

Работа выполнена в федеральном государственном бюджетном образовательном учреждении высшего образования «Московский авиационный институт» (национальный исследовательский университет)».

Научный руководитель: доктор технических наук, доцент
Хартов Сергей Анатольевич

Официальные оппоненты: **Ходненко Владимир Павлович**
доктор технических наук, профессор, АО «Научно-производственное предприятие «Космические системы мониторинга, информационно-управляющие и электромеханические комплексы» имени А.Г. Иосифьяна», главный научный сотрудник

Пильников Александр Васильевич
кандидат технических наук, ФГУП "Центральный научно-исследовательский институт машиностроения", ведущий научный сотрудник.

Ведущая организация: Государственный научный центр РФ — федеральное государственное унитарное предприятие «Исследовательский центр им. М.В. Келдыша»

Защита состоится 17 декабря 2018 года в 13:00 на заседании диссертационного совета Д 212.125.08, созданного на базе ФГБОУ ВО «Московский авиационный институт (национальный исследовательский университет)» по адресу: 125993, Москва, А-80, ГСП-3, Волоколамское шоссе, д. 4.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке и на сайте ФГБОУ ВО «Московский авиационный институт (национальный исследовательский университет)» <https://mai.ru/upload/iblock/150/Suvorov-M.O.-dissertatsiya..pdf>

Автореферат разослан «___» _____ 2018 г.

Ученый секретарь
диссертационного совета Д 212.125.08
д. т. н., профессор

Зуев Юрий Владимирович

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы исследования

Перспективным направлением развития космической техники является использование спутников малой массы, характерным примером области применения которых служат космические аппараты (КА) дистанционного зондирования Земли (ДЗЗ). Данный вид аппаратов используется для изучения природных ресурсов Земли, картографирования, телекоммуникации и решения задач метеорологии и т.п.

Высоты орбит полета, характерных для спутников ДЗЗ, колеблются от 300 до 700 км. Для повышения эффективности работы целевой аппаратуры перспективных КА ДЗЗ высоты их орбит целесообразно снижать до 180...250 км. Однако аппарат, двигающийся по низким орбитам (НО), испытывает значительное аэродинамическое сопротивление при взаимодействии с внешними слоями атмосферы Земли. Для поддержания высоты его орбиты необходимы корректирующие двигатели, которые должны работать длительное время и создавать тягу, как минимум равную силе аэродинамического сопротивления КА. В противном случае внешняя атмосфера будет тормозить КА, и высота его орбиты будет уменьшаться, что приведет к еще большему росту силы торможения и в конечном итоге потере КА.

Срок активного существования (САС) неуправляемых КА на НО колеблется от нескольких дней до нескольких месяцев. При наличии корректирующей двигательной установки с традиционным жидкостным ракетным двигателем значительная доля массы аппарата должна отводиться для систем хранения топлива. Использование для этих целей электроракетных двигателей (ЭРД) позволит сократить массу топлива за счет малых расходов рабочего тела и, как показал опыт Европейского Космического Агентства по эксплуатации КА для «Исследования гравитационного поля и установившихся океанских течений» (GOCE – Gravity Field and Steady-state Ocean Circulation Explorer), увеличить работу спутника на НО до 4-х лет. Однако применение классических ЭРД не позволяет рассчитывать на дальнейшее значительное повышение САС НО КА поскольку помимо «топлива» ЭРД для своей работы требуют источников электрической энергии. Для низких орбит это панели солнечных батарей, размер которых в свою очередь увеличивает аэродинамическое сопротивление КА. Тогда для длительного функционирования аппарата все равно потребуются значительное увеличение массы рабочего тела, что с учетом массы солнечных батарей сокращает долю целевой аппаратуры КА.

Альтернативой может стать концепция ЭРД, работающего на атмосферных газах, забираемых из внешней среды при полете по низкой орбите, т.е. использование на НО КА прямоточного воздушного электрореактивного двигателя (ПВЭРД). Для создания моделей таких эффективно работающих двигателей необходимо решить ряд газо- и электро-

динамических задач, а также обосновать выбор конструкции и материалов для их воплощения.

Анализ показывает, что одной из перспективных схем для использования в качестве тягового модуля ПВЭРД является ионный двигатель с высокочастотной (ВЧ) ионизацией. Разновидность последнего успешно используется в качестве источника для ионизации и ускорения химически активных газов в ионно-плазменных технологических процессах. Однако напрямую использовать технологические источники в ПВЭРД невозможно из-за особенностей их работы, связанных с повышенными концентрациями рабочих тел и отсутствием опыта использования смесей газов, характерных для внешней атмосферы НО КА.

Итак, актуальность работы обусловлена интересом современной аэрокосмической промышленности к КА ДЗЗ с повышенной эффективностью целевой аппаратуры и необходимостью значительного увеличения САС таких аппаратов при использовании ПВЭРД, а также недостаточной изученностью использования компонентов атмосферы в качестве рабочего тела для электроракетных двигателей.

Объектом исследования является лабораторная модель высокочастотного ионного двигателя (ВЧИД), использующая компоненты атмосферы в качестве рабочего тела, – прототип тягового узла прямого воздушного электрореактивного двигателя (ПВЭРД).

Целью работы является разработка рекомендаций по созданию тягового узла прямого воздушного электрореактивного двигателя для управления полетом низколетящих космических аппаратов.

Основные задачи диссертации:

Для достижения заданной цели в рамках диссертационной работы решались следующие задачи:

1. Анализ компоновочных решений ПВЭРД и выбор схемы его тягового узла.
2. Разработка лабораторной модели ВЧИД, имитирующей работу тягового узла прямого воздушного электроракетного двигателя.
3. Модернизация оборудования для проведения исследований тягового узла.
4. Экспериментальное исследование лабораторной модели с использованием различных рабочих тел (РТ), в том числе атмосферной смеси (композиции азота и кислорода) в соотношениях, характерных для условий полета двигателя по низкой орбите.
5. Разработка балансовой модели тягового узла ПВЭРД для оценки зависимости его интегральных характеристик от концентраций атмосферных газов на входе в устройство ионизации.
6. Выработка рекомендаций по проектированию тягового узла ПВЭРД.

Положения, выносимые на защиту

1. Результаты экспериментального исследования работы ВЧИД на смеси атмосферных газов.
2. Балансовая модель для оценки интегральных характеристик ПВЭРД, а также данные сравнительного анализа экспериментальных исследований и с результатами моделирования.
3. Рекомендации по проектированию тягового узла ПВЭРД.

Методология и методы исследования

В работе применялись эмпирические и теоретические методики исследования. В ходе экспериментов применялись современные методы регистрации параметров и математической статистики для обработки результатов. Балансовая расчетная модель построена на известных принципах физики плазмы газового разряда.

Научная новизна

1. Показана возможность устойчивого горения ВЧ разряда на диссоциирующих молекулярных газах при концентрациях, обеспечиваемых заборным устройством на высотах орбиты около 220 км.
2. Проанализированы преимущества и недостатки альтернативных схем размещения ВЧ индуктора в устройстве ионизации при компоновке тягового модуля ПВЭРД.
3. Предложена упрощенная балансовая модель оценки зависимости интегральных параметров ПВЭРД от концентраций рабочего тела на входе в тяговый модуль.

Теоретическая и практическая значимость работы

1. Создан макет ВЧИД – прототип тягового узла ПВЭРД.
2. Доказана возможность и выбраны режимы устойчивого зажигания высокочастотного разряда в ВЧИД при пониженных концентрациях рабочего тела без использования пусковых добавок инертных газов, а также обеспечена стабильная работа ВЧИД на атмосферной смеси с концентрациями компонентов, соответствующими условиям полета при высоте орбиты КА 220 км.
3. Разработана упрощенная балансовая модель, связывающая концентрацию РТ, поступающего в двигатель с интегральными характеристиками ВЧИД, позволяющая оценить изменение интегральных характеристик двигателя в зависимости от формы и сечения заборного устройства ПВЭРД.

На основе проведенных исследований было получено 2 патента – на изобретение и полезную модель.

Исследования выполнены в рамках реализации проекта RFMEFI57714X0101 – «Разработка лабораторного образца электрического ракетного двигателя, использующего в качестве рабочего тела атмосферную среду, для низкоорбитальных космических аппаратов» Федеральной целевой программы «Исследования и разработки по

приоритетным направлениям развития научно-технологического комплекса России на 2014-2020 годы». Работа на всех этапах выполнялась в тесной кооперации с учеными Центрального аэрогидродинамического института им профессора Н.Е. Жуковского (ЦАГИ) и Московского государственного технического университета им. Н.Э. Баумана (МГТУ).

Достоверность приведенных результатов экспериментальных исследований обусловлена использованием современных методик измерений, сбора и обработки данных. Все исследования проводились на сертифицированном оборудовании. Полученные результаты согласуются с данными других исследователей.

Личный вклад соискателя

При непосредственном участии автора:

1. Разработана и исследована лабораторная модель ВЧИД при ее функционировании на ксеноне, кислороде, азоте и композиции последних, характерной для полета по низкой орбите.
2. Произведена обработка данных экспериментов – построены кривые-зависимости мощности, затраченной на ионизацию РТ от объемного расхода газа для ксенона, азота, кислорода и атмосферной смеси.
3. Построена балансовая модель для оценки интегральных характеристик ПВЭРД.
4. Разработаны рекомендации по дальнейшим исследованиям тягового модуля ПВЭРД.

Апробация

Результаты исследований, описанных в диссертации, представлены в 5-ти научно-технических отчетах, патенте на изобретение (№2614906 РФ опубликован 30.03.2017), патенте на полезную модель (№1688461 РФ, опубликован 21.02.2017), в 5-ти статьях в рецензируемых научных изданиях. Результаты работы обсуждались на семинарах кафедры «Электроракетные двигатели, энергетические и энергофизические установки» Московского авиационного института (национального исследовательского университета), а так же были доложены в рамках 10-ти российских и международных конференций: XL, XLI, XLII Академические чтения по космонавтике (Москва, 26 – 29 января 2016, 24 – 27 января 2017, 23 – 26 января 2018), XLII, XLIII Международной молодежной научной конференции «Гагаринские чтения – 2016, 2017» (Москва, 12 – 15 апреля 2016, 5 – 20 апреля 2017), 14-ой, 16-ой Международных конференциях «Авиация и космонавтика» (Москва, 16 – 20 ноября 2015, 20 – 24 ноября 2017), 3-rd International Academy of Astronautics Conference on Dynamics and Control of Space Systems (DYCOSS), (Москва, 30 мая – 1 июня 2017). IV-я научно-

техническая конференции молодых специалистов АО «ИСС» им. М.Ф. Решетнева, посвященная 60-ти летию запуска первого спутника Земли (Железногорск, 2017), научно-техническая конференция «Иосифьяновские чтения-2017» (Истра, 2017).

Структура и объем работы

Диссертационная работа изложена на 154 страницах машинописного текста, включает в себя 91 рисунок, 9 таблиц, а также список литературы, содержащий 101 наименование. Работа разделена на введение, 4 главы содержательной части, заключение, список сокращений и условных обозначений, список литературы.

СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введение 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 приведена краткая справка об аппаратах дистанционного зондирования Земли, а также обсуждается применение ЭРД для поддержания орбиты КА ДЗЗ на низких орбитах. Приведены сведения о возможности использования остаточной атмосферной среды в качестве РТ двигателя. Рассмотрена концепция использования в ПВЭРД тягового узла и узла забора атмосферных газов (УЗАГ).

Приведены результаты анализа по выбору высокочастотного ионного двигателя в качестве базы для создания тягового узла ПВЭРД, а также приведена его принципиальная схема и изложены основные принципы работы. Обоснована возможность проведения исследования тягового узла отдельно от других элементов ПВЭРД.

Выбрано соотношение концентраций РТ, соответствующее условиям полета на высоте около 220 км, при использовании УЗАГ с входным сечением 1 м^2 .

Приведены результаты исследования материалов типовых конструктивных элементов тягового узла ПВЭРД, а так же обоснована целесообразность их использования.

Вторая глава диссертации посвящена описанию экспериментального оборудования. В ней приводятся схемы экспериментальных стендов, схема электрического питания тягового узла ПВЭРД, даны характеристики измерительных приборов и их

погрешности, а также описаны лабораторный макет тягового узла ПВЭРД ВЧИД-15-1 и его модификации.

Первые экспериментальные исследования проводились на стенде «2ИУ-2В». В ходе выполнения проекта RFMEFI57714X0101 – «Разработка лабораторного образца электрического ракетного двигателя, использующего в качестве рабочего тела атмосферную среду, для низкоорбитальных космических аппаратов» для контрольных испытаний тягового узла ПВЭРД, при непосредственном участии автора, был спроектирован стенд «2ИУ-4В». Стенд обладает производительной безмасляной системой откачки и позволяет создавать динамический вакуум от $1,5 \cdot 10^{-5}$ до $8 \cdot 10^{-6}$ мм. рт. ст. Рабочий объем $V \approx 5,6 \text{ м}^3$ при длине камеры $L \approx 5$ м существенно способствовал уменьшению обратных тепловых и газовых потоков во время экспериментальных исследований тягового узла ПВЭРД.

Было разработано программное обеспечение в графической среде программирования LabView для платы аналогового сигнала Advantech PCI 1723 компьютера National Instruments PXI-1052, которая работала с блоком управления регуляторов расхода газа MKS Readout 247C, что позволило осуществлять подачу РТ, в частности атмосферной смеси в заданных концентрациях, в широком диапазоне расходов с высокой степенью точности, в режиме «реального времени».

В ходе экспериментальных исследований использовался высокочастотный генератор (ВЧГ) Seren R1001, позволявший работать в диапазоне частот $1,7 \div 2,1$ МГц, диапазоне мощностей $1 \div 1000$ Вт. Также, для сопоставления импедансов ВЧГ и нагрузки (индуктора ВЧИД), использовалось автоматическое согласующее устройство Seren AT6 Automatic Matching Device.

Для достижения целей, поставленных в настоящей работе, был разработан и изготовлен лабораторный образец высокочастотного ионного двигателя (ВЧИД) с диаметром пучка 150 мм. Были также изготовлены и исследованы две его модификации, которые тем или иным образом развивали концепцию идеи создания прямоточного воздушного ионного двигателя. В общей сложности экспериментальные исследования проводились на 3-х модификациях лабораторного образца ВЧИД:

- ВЧИД-15-1 традиционной конструкции с диаметром пучка ускоряемых ионов $d=150$ мм, цилиндрической разрядной камерой с диаметром $d=165$ мм и высотой $h=67$ мм;
- ВЧИД-15-2 с пристыкованным к разрядной камере объемом, имитирующим выходную часть термализатора УЗАГ ПВРД;
- ВЧИД-15-3 с индукторами, размещенными внутри разрядной камеры.

Модификации лабораторного образца ВЧИД-15 имеют разные схемы ввода мощности в плазменный объем.

Конструктивная схема лабораторного образца ВЧИД-15-1 представлена на рисунке 1.

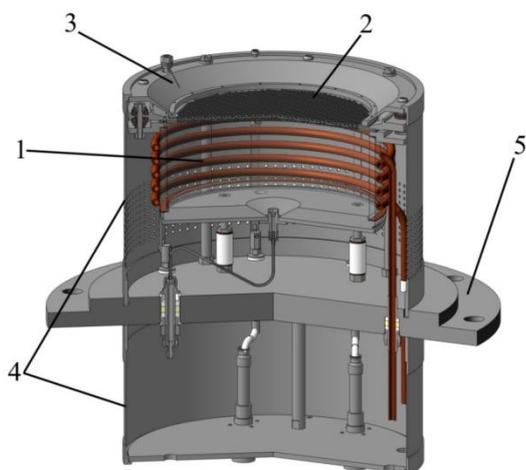


Рисунок 1 – Конструктивная схема лабораторного образца ВЧИД-15-1.

Двигатель состоит из следующих основных узлов:

- 1 – газоразрядная камера (РК), 2 – ионно-оптическая система (ИОС), 3 – накаливающая нить (нейтрализатор),
4 – корпус, 5 – монтажный фланец.

Для оценки влияния термализаторной полости УЗАГ на работу ВЧИД была спроектирована и изготовлена модификация ВЧИД-15-2 с дополнительной камерой, равной по объему разрядной камере и пристыкованной к ней. Конструктивная модель ВЧИД-15-2 представлена на рисунке 2.

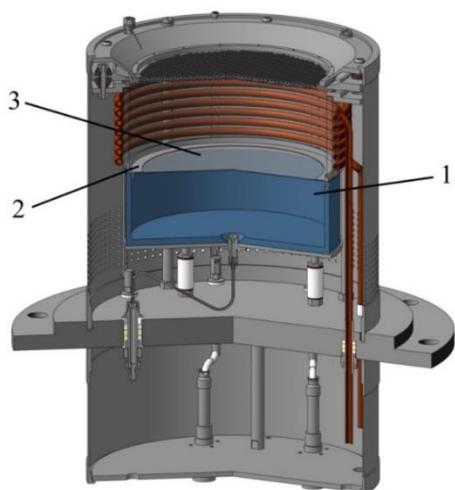


Рисунок 2 – Конструктивная схема лабораторного образца ВЧИД-15-2.

- 1 – термализаторная емкость,
2 – кольцо, 3 – разделительная сетка

Главной отличительной чертой данной модификации от ВЧИД-15-1 является наличие дополнительной цилиндрической емкости 1 (рис. 2.), куда рабочее тело подается из газораспределителя перед попаданием в ионизационную область РК. Дополнительная камера выполнена из керамики на основе нитрида кремния. Для разделения емкости термализации и рабочего объема РК, между этими областями установлено кольцо 2, к которому приварена мелкоячеистая сетка-разделитель 3. Кольцо и сетка изготовлены из нержавеющей стали, прозрачность сетки выбрана таким образом, чтобы обеспечить максимальное проникновение нейтральных атомов внутрь РК, а также обеспечить

удержание плазмы в объеме РК. Во время работы ВЧИД, разделительная сетка принимает потенциал эмиссионного электрода и препятствует выпадению ионов из РК в область термализации.

При реализации прямоточной схемы часть забранных УЗАГ частиц все равно будет проходить ПВЭРД «насквозь», не участвуя в процессе ионообразования. Для уменьшения доли этих частиц, в соответствии с рекомендациями ЦАГИ, в термализаторе устанавливаются специальные «жалюзи», препятствующие прямому прохождению потока газов. При определенной конструкции их можно заменить установленным внутри канала ПВЭРД индуктором. При этом эффективность ионизации атомов будет возрастать.

Для проверки возможности работы ВЧИД с индуктором, встраиваемым в поток в ПВЭРД, была разработана и изготовлена модификация ВЧИД-15-3. Главной отличительной чертой данной модели является наличие внутреннего индуктора в рабочем объеме РК. Для изоляции непосредственно от плазменного объема, индуктор был закрыт диэлектрическим стеклошнуром с пропиткой цементом на основе окиси алюминия. На рисунке 3 приведен внешний вид индуктора.



Рисунок 3 – Цилиндрический и конический индукторы с посадочным кольцом. ВЧИД-15-3.

В третьей главе диссертации приведены результаты экспериментальных исследований тягового узла ПВЭРД.

Методика исследования ВЧИД предполагает регистрацию величины тока ускоряемых ионов, истекающих из ИОС, как функцию мощности ВЧГ, затрачиваемой на ионообразование в РК от массового расхода рабочего тела.

В ходе исследований для упрощения работы с экспериментальным оборудованием, вместо массового расхода \dot{m} (измеряемого в мг/с), использовалась внесистемная единица –

объемный расход, который обозначается \dot{V} и измеряется в стандартных кубических сантиметрах в минуту ($\text{см}^3/\text{мин}$).

Методику также можно охарактеризовать, как построение семейства подобных гиперболических «изо-кривых», каждая из которых соответствует постоянному току пучка ионов I_i , причем чем ниже и левее лежит кривая, соответствующая ионному току, тем меньше затраты мощности ВЧГ и расход РТ, а, следовательно, тем эффективнее работает двигатель, превращая нейтральный газ в направленный пучок ионов.

Кривые-зависимости мощности от расхода применяют при сравнении режимов работы двигателя на разных рабочих телах, с разными материалами РК, при разных схемах согласования.

Были получены кривые-зависимости работы ВЧИД-15 на ксеноне, азоте и кислороде. Из анализа кривых был сделан вывод, что работа лабораторной модели тягового узла ПВЭРД на кислороде и азоте требует большей мощности ВЧГ и расхода РТ, чем при использовании ксенона для поддержания режима работы ВЧИД на заданном ионном токе. Это объясняется более высокими энергиями ионизации азота и кислорода, а также дополнительными затратами на диссоциацию. К примеру, для работы лабораторного образца ВЧИД-15-1 на ионном токе пучка $I_i=300$ мА на ксеноне, ему потребовалось 150 Вт вложенной мощности ВЧГ, и $10 \text{ см}^3/\text{мин}$ расхода РТ. Для поддержания этого же ионного тока при работе на кислороде понадобилось 300 Вт мощности ВЧГ и $20 \text{ см}^3/\text{мин}$ расхода РТ, на азоте – 350 Вт мощности ВЧГ и те же $20 \text{ см}^3/\text{мин}$ расхода. По отношению к ксенону, объемный расход РТ в обоих случаях увеличился в два раза, а мощность ВЧГ соответственно в 2 раза для кислорода и 2,33 раза для азота.

Для экспериментальных исследований при работе на смеси атмосферных газов было выбрано соотношение молекулярного азота к молекулярному кислороду 2 к 1.

Для оценки возможности работы двигателя ВЧИД-15-1 на концентрациях атмосферных газов, получаемых через УЗАГ на высотах около 220 км, с помощью рекомендаций ЦАГИ относительно заборного устройства, а также при помощи стандартной модели атмосферы NRLMSISE-00 были выбраны расходы рабочих тел, соответствующие реальным условиям работы ПВЭРД на высоте орбиты около 220 км $\dot{V}_{N_2}=31,68 \text{ см}^3/\text{мин}$ и $\dot{V}_{O_2}=15,84 \text{ см}^3/\text{мин}$ (отношение объемных расходов $2N_2:1O_2$). Для наглядности, суммарный объемный расход атмосферной смеси $\dot{V}_{УЗАГ}$, определяющий расход через УЗАГ площадью 1 м^2 был нанесен на рисунок 4.

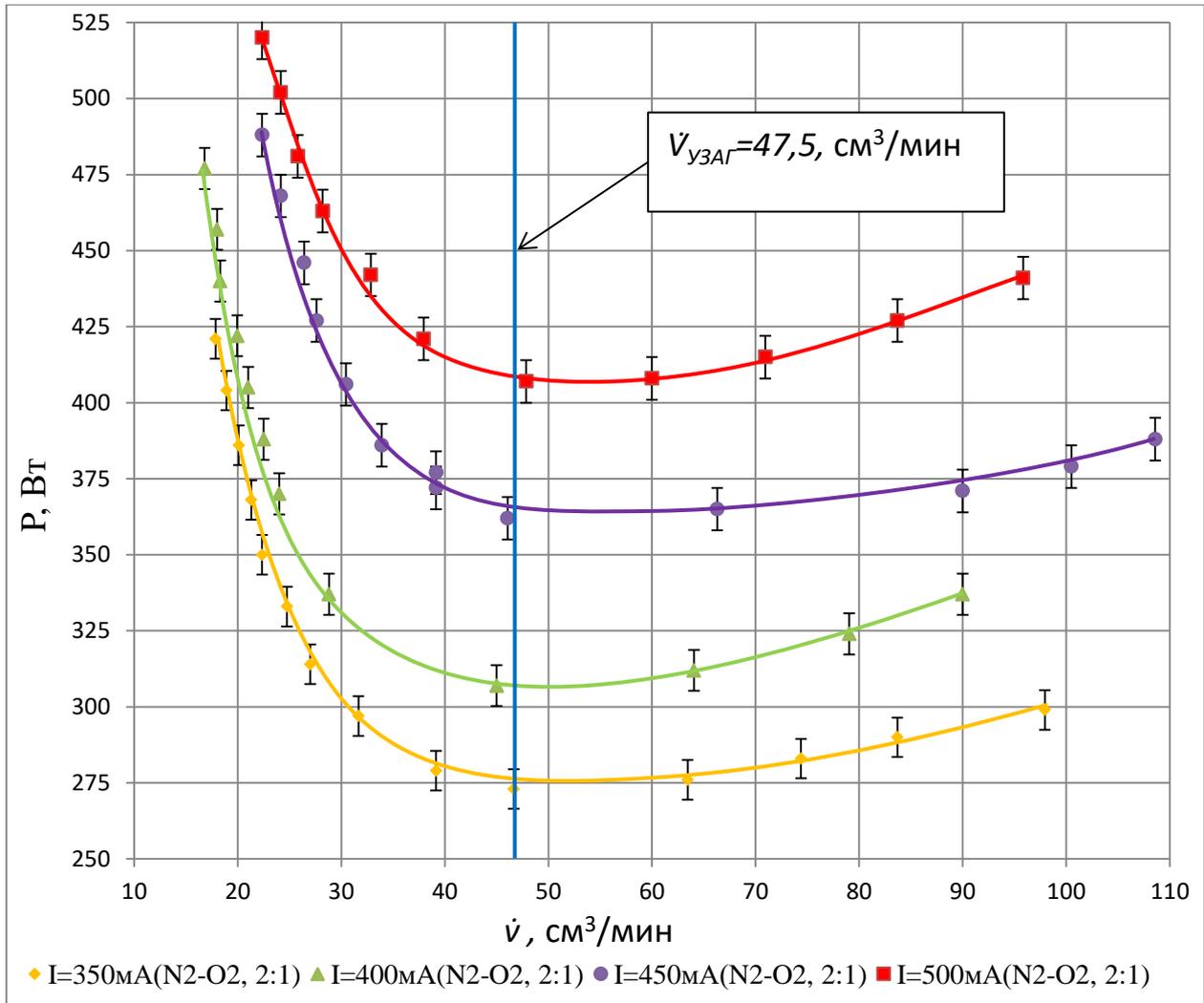


Рисунок 4 – Зависимости мощности ВЧГ от расхода РГ лабораторного образца ВЧИД-15-1 для атмосферной смеси. На графике отмечен суммарный объемный расход $\dot{V}_{УЗАГ}$ через УЗАГ площадью 1 м^2 на высоте орбиты около 220 км.

Как видно из рисунка 4, области перегиба кривых-зависимостей лежат «левее» точки, соответствующей $\dot{V}_{УЗАГ}$, что говорит о том, что разработанная модель тягового узла может стабильно и эффективно работать на композициях атмосферы, соответствующих концентрациям, полученным через УЗАГ площадью 1 м^2 на высотах около 220км.

В работе [Канев С. В., Петухов В.Г., Попов Г. А., Хартов С. А. Прямоточный электрореактивный двигатель для компенсации аэродинамического торможения низкоорбитальных космических аппаратов // Изв. вузов. Авиационная техника. 2015. № 3] были даны рекомендации для работы ПВЭРД на низких орбитах. ПВЭРД должен создавать тягу не менее 5 мН для преодоления силы лобового сопротивления на высоте орбиты около 220 км. Тяги, создаваемые ВЧИД-15-1 в ходе экспериментальных исследований, были рассчитаны на основе ионных токов, и представлены на рисунке 5.

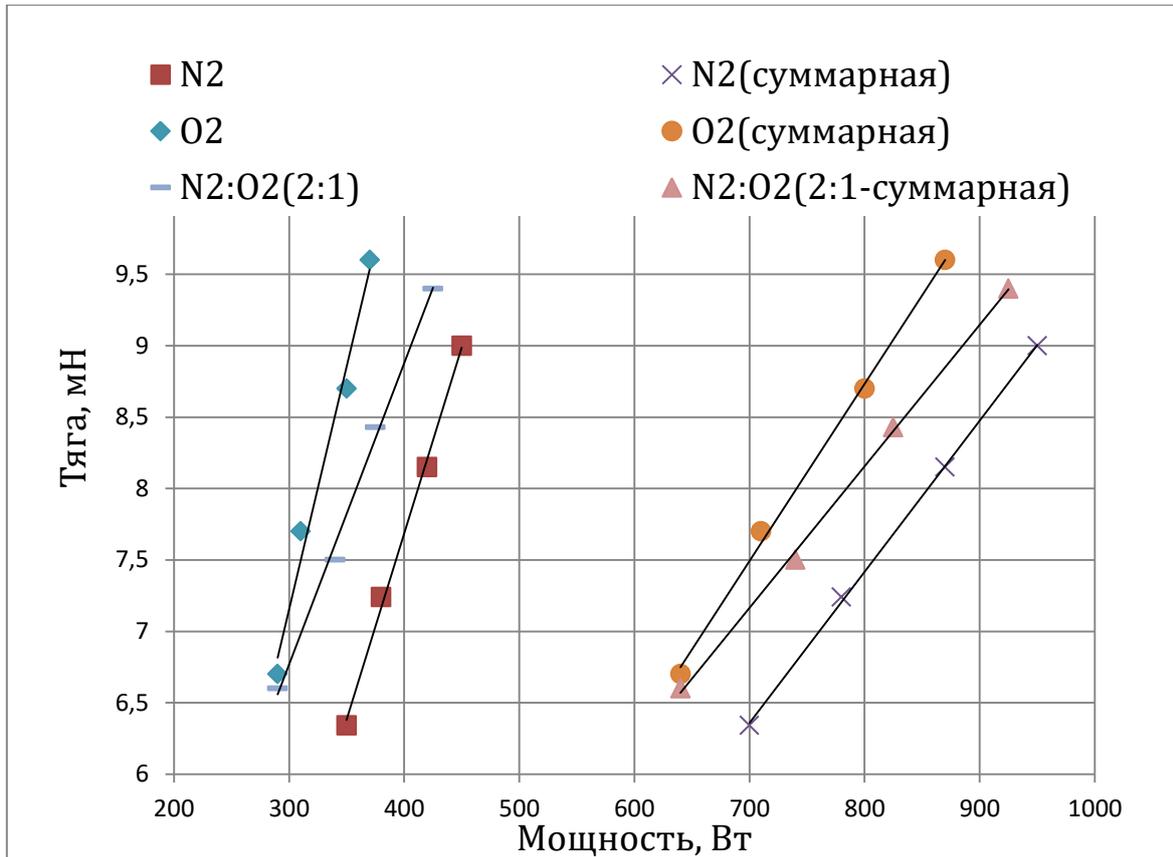


Рисунок 5 – Зависимости получаемой тяги ВЧИД от мощности лабораторного образца ВЧИД-15-1 для разных РТ. Суммарная мощность – сумма мощности, затрачиваемой на ионизацию рабочего тела, и мощности, расходуемой в ИОС для создания ускоряющего потенциала.

Как видно из представленных зависимостей, все режимы работы в ходе исследований ВЧИД-15-1 создавали достаточную тягу для преодоления лобового сопротивления аппарата. Двигатель работал в пределах мощности до 1кВт, создавал тягу больше 5 мН, а также доказал возможность зажигания и стабильной работы на малых концентрациях РТ, что говорит о возможности применения ВЧИД-15-1 в качестве тягового узла ПВЭРД при работе на атмосферной смеси.

Модификация ВЧИД-15-2 проходила испытания в течение 100 часов с цикличностью эквивалентной ожидаемой циклограмме включений и выключений двигателя на потенциальных орбитах.

Исходя из вышеперечисленных результатов теоретических и экспериментальных исследований, были предложены следующие рекомендации для проектирования тягового узла ПВЭРД:

1. В тяговом узле ПВЭРД целесообразно применять типовые конструктивные элементы ВЧИД, в частности, ионно-оптическую систему для ускорения ионизованных атмосферных газов.

2. Так как ресурс ионных двигателей напрямую зависит от ресурса электродов ИОС, при их проектировании необходимо учитывать рекомендации по стойкости конструкционных материалов к эрозии при работе в среде радикалов азота и кислорода, сформулированных совместно с учеными из МГТУ им. Баумана. В качестве материалов для электродов следует выбирать титан или молибден.

3. Для разделения термализатора и РК, между этими элементами необходимо размещать разделительную сетку. Разделитель должен быть выполнен из диэлектрического материала.

4. При использовании встраиваемого в поток индуктора следует предусмотреть возможность подключения ВЧГ и блоков питания ИОС таким образом, чтобы индуктор находился под плавающим потенциалом, или под потенциалом эмиссионного электрода во избежание возникновения электрического пробоя между индуктором и конструктивными элементами ВЧИД.

5. При работе тягового узла в составе ПВЭРД, целесообразно использовать внутренний индуктор конической формы, для термализации потока забираемого воздуха и более эффективной его ионизации.

С учетом рекомендаций была запатентована концептуальная схема ПВЭРД, представленная на рисунке 6.

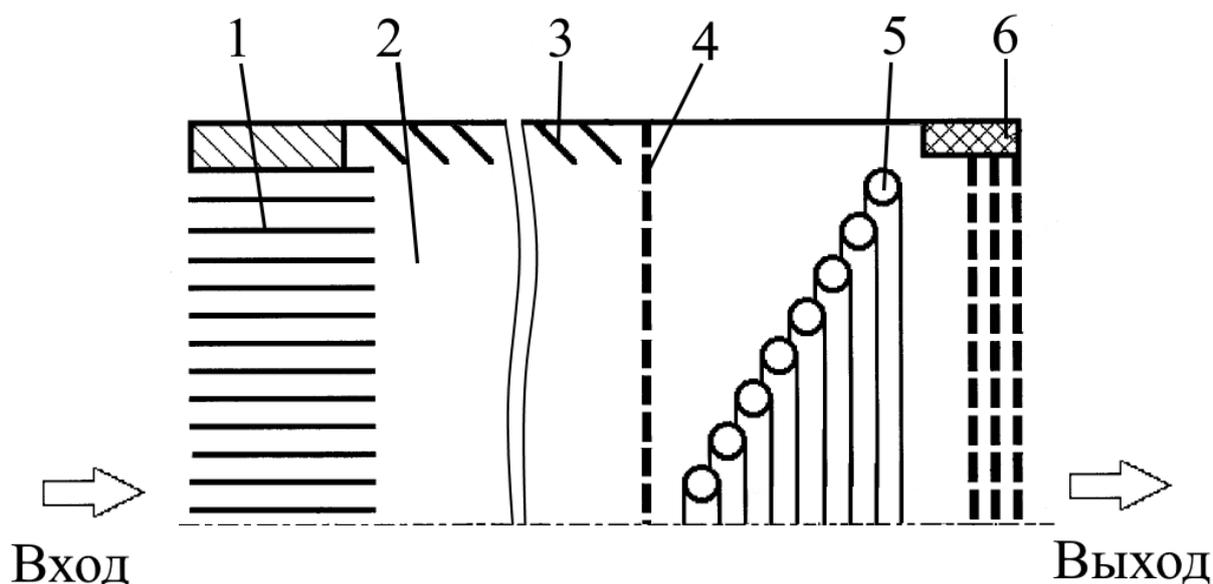


Рисунок 6 – Концептуальная схема ПВЭРД.

- 1 – УЗАГ, 2 – термализатор, 3 – кольцевые отражатели, 4 – разделитель,
5 – индуктор, 6 – ионно-оптическая система.

Четвертая глава посвящена разработке балансовой модели. При работе с ПВЭРД важно уметь быстро оценить изменения интегральных характеристик тягового узла ПВЭРД, в зависимости от значений концентраций атмосферных газов, поступающих в ионообразующую область двигателя. Изменение высоты орбиты, площади входного сечения УЗАГ, солнечная и геомагнитная активность – данные факторы в существенной степени влияют на доступные массовые расходы, попадающие в ПВЭРД.

Для расчета интегральных характеристик, в частности тяги двигателя и затрачиваемой мощности тягового узла ПВЭРД была создана балансовая модель. Основной сложностью модели является использование в тяговом блоке ПВЭРД молекулярных газов – азота и кислорода. В отличие от ксенона, при расчетах стоит учитывать процессы диссоциации.

В ходе работы над настоящей моделью был сделан ряд допущений и ограничений. К ним относятся:

- Средняя скорость нейтральных атомов считается тепловой.
- Расчетные концентрации частиц считаются постоянными по всему объему.
- В модели используется Максвелловское распределение электронов по скоростям. Данное допущение часто применяется в балансовых моделях такого типа.
- Погрешности аппроксимации сечений ионизации и диссоциации составляют 30-40%. В отличие от ксенона, сказывается дефицит экспериментальных данных по определению сечений ионизации и диссоциации кислорода и азота.
- Для упрощения расчета в модели в полной мере не учтены потери мощности на возбуждение и двойную ионизацию. Тепловая энергия электронов задается равной $2,5 kT_e$.
- Так как точная оценка потерь мощности в контуре согласования ВЧГ с нагрузкой невозможна, то для упрощения расчетов мощности на ионизацию был введен коэффициент, учитывающий эффективности передачи мощности ВЧГ в плазму.
- Так как при прохождении через термализатор атмосферные газы становятся молекулярными, то изначально модель была рассчитана на работу с молекулярным азотом, молекулярным кислородом и их композициями. Для расчета работы ПВЭРД на других РТ требуется серьезная переработка модели.
- При моделировании не рассматривается конфигурация магнитного поля, создаваемого индуктором внутри газоразрядного объема.

Примем, что все ионы, появляющиеся в объеме РК выпадают на стенки. Для атомарного кислорода справедливо следующее выражение.

$$n_e n_O \langle \sigma v_{iO} \rangle V_{\text{кам}} = K_n n_{iO} v_{iO} S_{\text{ст}}, \quad (1)$$

где K_n – коэффициент, учитывающий уменьшение концентрации заряженных частиц вблизи стенки. В настоящей работе он принимается равным 0,7 $\langle \sigma v_{iO} \rangle$ – коэффициент скорости ионизации, n_e – концентрация электронов и n_{iO} – концентрация ионов атомарного кислорода в камере, v_{iO} – скорость Бома, т.е. скорость выпадения ионов атомарного кислорода на стенку. $V_{\text{кам}}$ – объем ионизационной камеры, $S_{\text{ст}}$ – площадь стенок РК

Запишем аналогичные выражения для молекулярного кислорода:

$$n_e n_{O_2} \langle \sigma v_{iO_2} \rangle V_{\text{кам}} = 0,7 n_{iO_2} v_{iO_2} S_{\text{ст}} \quad (2)$$

Для азота:

$$n_e n_N \langle \sigma v_{iN} \rangle V_{\text{кам}} = 0,7 n_{iN} v_{iN} S_{\text{ст}} \quad (3)$$

$$n_e n_{N_2} \langle \sigma v_{iN_2} \rangle V_{\text{кам}} = 0,7 n_{iN_2} v_{iN_2} S_{\text{ст}} \quad (4)$$

После попадания в термализатор весь газ становится молекулярным. Массовый расход кислорода, входящий в РК, должен покидать ионообразующую область через ИОС в виде атомарных и молекулярных нейтралов, а так же в виде атомарных и молекулярных ионов:

$$\begin{aligned} \frac{\dot{m}_{O_2}}{M_{iO_2}} &= \frac{1}{2} n_{iO} v_{iO} \sigma_i S_{\text{ИОС}} + n_{iO_2} v_{iO_2} \sigma_i S_{\text{ИОС}} \\ &+ \frac{1}{2} \left(n_O \frac{v_O}{2} - n_{iO} v_{iO} (1 - \sigma_i) \right) \frac{\sigma_0}{2 - \sigma_0} S_{\text{ИОС}} \\ &+ \left(n_{O_2} \frac{v_{O_2}}{2} - n_{iO_2} v_{iO_2} (1 - \sigma_i) \right) \frac{\sigma_0}{2 - \sigma_0} S_{\text{ИОС}} \end{aligned} \quad (5)$$

где σ_0 – коэффициент прозрачности ИОС для нейтральных атомов, σ_i – для ионов, $S_{\text{ИОС}}$ – площадь ИОС, а v_O и v_{O_2} – тепловые скорости атомов и молекул кислорода, M_{iO} – масса иона кислорода, M_{iN_2} – масса молекулы кислорода.

Для азота:

$$\begin{aligned} \frac{\dot{m}_{N_2}}{M_{iN_2}} &= \frac{1}{2} n_{iN} v_{iN} \sigma_i S_{\text{ИОС}} + n_{iN_2} v_{iN_2} \sigma_i S_{\text{ИОС}} \\ &+ \frac{1}{2} \left(n_N \frac{v_N}{2} - n_{iN} v_{iN} (1 - \sigma_i) \right) \frac{\sigma_0}{2 - \sigma_0} S_{\text{ИОС}} \\ &+ \left(n_{N_2} \frac{v_{N_2}}{2} - n_{iN_2} v_{iN_2} (1 - \sigma_i) \right) \frac{\sigma_0}{2 - \sigma_0} S_{\text{ИОС}} \end{aligned} \quad (6)$$

где v_N и v_{N_2} – тепловые скорости атомов и молекул азота, M_{iN} – масса иона азота, M_{iN_2} – масса молекулы азота.

В РК происходит процесс диссоциации молекул кислорода на атомы. Получившиеся атомы покидают газоразрядный объем в виде ионов и нейтралов:

$$\begin{aligned} & 2n_e n_{O_2} \langle \sigma v_{dissO_2} \rangle V_{кам} = \\ & = 0,7n_{iO} v_{iO} \sigma_i S_{иос} + \left(n_O \frac{v_O}{2} - 0,7n_{iO} v_{iO} (1 - \sigma_i) \right) \frac{\sigma_0}{2 - \sigma_0} S_{иос}, \end{aligned} \quad (7)$$

где $\langle \sigma v_{dissO_2} \rangle$ – коэффициент скорости диссоциации молекул кислорода.

Аналогичное выражение можно записать для азота:

$$\begin{aligned} & 2n_e n_{N_2} \langle \sigma v_{dissN_2} \rangle V_{кам} = \\ & = 0,7n_{iN} v_{iN} \sigma_i S_{иос} + \left(n_N \frac{v_N}{2} - 0,7n_{iN} v_{iN} (1 - \sigma_i) \right) \frac{\sigma_0}{2 - \sigma_0} S_{иос} \end{aligned} \quad (8)$$

где $\langle \sigma v_{dissN_2} \rangle$ – коэффициент скорости диссоциации молекул азота.

Уравнения (1), (2), (3), (4), (5), (6), (7), (8) образуют систему уравнений, решив которую можно получить концентрации разных частиц внутри РК ВЧИД. Неизвестными в данном случае являются концентрации заряженных частиц n_e , нейтральных атомов кислорода n_O , молекулярных атомов кислорода n_{O_2} , ионов атомарного n_{iO} и молекулярного n_{iO_2} кислорода, нейтральных атомов азота n_N , молекулярных атомов азота n_{N_2} , ионов атомарного n_{iN} и молекулярного n_{iN_2} азота. На 9 неизвестных приходится 8 уравнений.

Добавим к получившейся системе уравнение квазинейтральности плазмы:

$$n_e = n_{iO_2} + n_{iO} + n_{iN_2} + n_{iN} \quad (9)$$

Для конкретной температуры электронов T_e , решаем систему уравнений методом Ньютона (численный метод итерационных приближений), находим концентрации частиц внутри газоразрядного объема.

Для найденных концентраций частиц рассчитываем интегральные параметры двигателя.

Ток ионного пучка, извлекаемого ИОС при работе ВЧИД-15-1 на атмосферной смеси:

$$\begin{aligned} I_{\Sigma} = & 0,43n_{iN} \sigma_i S_{иос} q_e v_{iN} + 0,43n_{iN_2} \sigma_i S_{иос} q_e v_{iN_2} \\ & + 0,43n_{iO} \sigma_i S_{иос} q_e v_{iO} + 0,43n_{iO_2} \sigma_i S_{иос} q_e v_{iO_2} \end{aligned} \quad (10)$$

где $q_e = 1,6 \cdot 10^{-19}$ Кл – заряд электрона, v_{iN} , v_{iN_2} , v_{iO} , v_{iO_2} – скорость Бома.

Мощность, затрачиваемая на ионизацию и диссоциацию атмосферной смеси:

$$N_{ion\Sigma} = n_e n_{N_2} q_e (\langle \sigma v_{iN_2} \rangle (\varepsilon_{iN_2} + 2,5T_e) + \varepsilon_{disN_2} \langle \sigma v_{disN_2} \rangle) V_{кам} + \\ n_e n_N q_e \langle \sigma v_{iN} \rangle (\varepsilon_{iN} + 2,5T_e) V_{кам} + n_e n_{O_2} q_e (\langle \sigma v_{iO_2} \rangle (\varepsilon_{iO_2} + 2,5T_e) + \\ \varepsilon_{disO_2} \langle \sigma v_{disO_2} \rangle) V_{кам} + n_e n_O q_e \langle \sigma v_{iO} \rangle (\varepsilon_{iO} + 2,5T_e) V_{кам}, \quad (11)$$

где ε_{iO_2} – энергия ионизации молекулы кислорода, ε_{iO} – энергия ионизации атома кислорода, ε_{disO_2} – энергия диссоциации молекулы кислорода, ε_{iN_2} – энергия ионизации молекулы азота, ε_{iN} – энергия ионизации атома азота, ε_{disN_2} – энергия диссоциации молекулы азота.

Тяга, создаваемая при работе двигательного узла ПВЭРД на атмосферной смеси:

$$P_\Sigma = 0,43 n_{iN} \sigma_i S_{иос} v_{iN} M_{iN} W_{iN} + 0,43 n_{iN_2} \sigma_i S_{иос} v_{iN_2} M_{iN_2} W_{iN_2} \\ + 0,43 n_{iO} \sigma_i S_{иос} v_{iO} M_{iO} W_{iO} + 0,43 n_{iO_2} \sigma_i S_{иос} v_{iO_2} M_{iO_2} W_{iO_2} \quad (12)$$

где W_{iO_2} , W_{iO} , W_{iN_2} , W_{iN} – скорости истечения молекулярных и атомарных ионов соответственно.

Суммарная мощность, затрачиваемая на поддержание ВЧ разряда, а так же на создание ускоряющего потенциала в ИОС:

$$N_{\Sigma\Sigma} = \frac{N_{ion\Sigma}}{\eta_{ind}} + U^+ I_\Sigma, \quad (13)$$

U^+ – ускоряющий потенциал эмиссионного электрода. Во всех экспериментальных исследованиях, проведенных в настоящей диссертационной работе $U^+ = 1000\text{В}$. Для оценки суммарной мощности, затрачиваемой в двигателе, была введена величина КПД индуктора. Это связано с сложностью учета потерь, возникающих в схеме согласования ВЧГ и индуктора η_{ind} . В ходе моделирования КПД индуктора принимался равным $\eta_{ind} = 0,5$. В будущем, при появлении исследований потерь мощности в контуре согласования ВЧГ и нагрузки, настоящую модель можно будет уточнить.

Начальные приближения для численного решения системы уравнений (1) - (8):

$$n_e = 10^{17} \text{м}^{-3} \\ n_O = 10^{17} \text{м}^{-3}, n_{O_2} = 10^{17} \text{м}^{-3} \\ n_{iO} = 10^{16} \text{м}^{-3}, n_{iO_2} = 10^{16} \text{м}^{-3} \\ n_N = 10^{17} \text{м}^{-3}, n_{N_2} = 10^{17} \text{м}^{-3} \\ n_{Ni} = 10^{16} \text{м}^{-3}, n_{Ni_2} = 10^{16} \text{м}^{-3}$$

В главе 1 рассчитана концентрация молекулярного азота и кислорода, которую возможно получить при работе ПВЭРД на орбитах высотой 220км с помощью УЗАГ с входным сечением 1м^2 . $\dot{V}_{N_2}=31,68 \text{ см}^3/\text{мин}$ и $\dot{V}_{O_2}=15,84 \text{ см}^3/\text{мин}$ (отношение объемных расходов $2N_2:1O_2$):

$$\dot{m}_{N_2} = \frac{31,68}{10^6 \cdot 46} = 6,88 \cdot 10^{-7} \frac{\text{кг}}{\text{с}} \quad (14)$$

$$\dot{m}_{O_2} = \frac{15,84}{10^6 \cdot 42} = 3,77 \cdot 10^{-7} \frac{\text{кг}}{\text{с}} \quad (15)$$

$$\dot{m}_{\Sigma} = \dot{m}_{N_2} + \dot{m}_{O_2} = 10,65 \cdot 10^{-7} \frac{\text{кг}}{\text{с}} \quad (16)$$

Результаты расчетов модели для атмосферной смеси сведены в таблицу 1.

Таблица 1 – Результаты расчетов по модели для атмосферной смеси.

Температура электронов, эВ	8,5	8,8	9,1	9,5
n_{iO}	$1 \cdot 10^{16}$	$1,4 \cdot 10^{16}$	$1,8 \cdot 10^{16}$	$2,3 \cdot 10^{16}$
n_{iO_2}	$2,4 \cdot 10^{16}$	$2,5 \cdot 10^{16}$	$2,6 \cdot 10^{16}$	$2,61 \cdot 10^{16}$
n_O	$6,5 \cdot 10^{18}$	$6,7 \cdot 10^{18}$	$6,7 \cdot 10^{18}$	$6,7 \cdot 10^{18}$
n_{O_2}	$2,4 \cdot 10^{18}$	$2,1 \cdot 10^{18}$	$1,7 \cdot 10^{18}$	$1,4 \cdot 10^{18}$
n_e	$6,5 \cdot 10^{16}$	$7,6 \cdot 10^{16}$	$8,7 \cdot 10^{16}$	$1 \cdot 10^{17}$
n_{iN}	$1,7 \cdot 10^{18}$	$2,2 \cdot 10^{18}$	$2,8 \cdot 10^{18}$	$3,6 \cdot 10^{16}$
n_{iN_2}	$1,4 \cdot 10^{16}$	$1,5 \cdot 10^{16}$	$1,6 \cdot 10^{16}$	$1,7 \cdot 10^{16}$
n_N	$1,2 \cdot 10^{19}$	$1,3 \cdot 10^{19}$	$1,35 \cdot 10^{19}$	$1,4 \cdot 10^{19}$
n_{N_2}	$7,4 \cdot 10^{18}$	$6,5 \cdot 10^{18}$	$5,7 \cdot 10^{18}$	$4,8 \cdot 10^{18}$
Мощность на ионизацию РТ, Вт	124	152	182	227
Мощность ВЧГ, Вт	248	303	364	455
Суммарная мощность, Вт	551	670	800	987
Тяга, мН	6,3	7,5	8,7	10

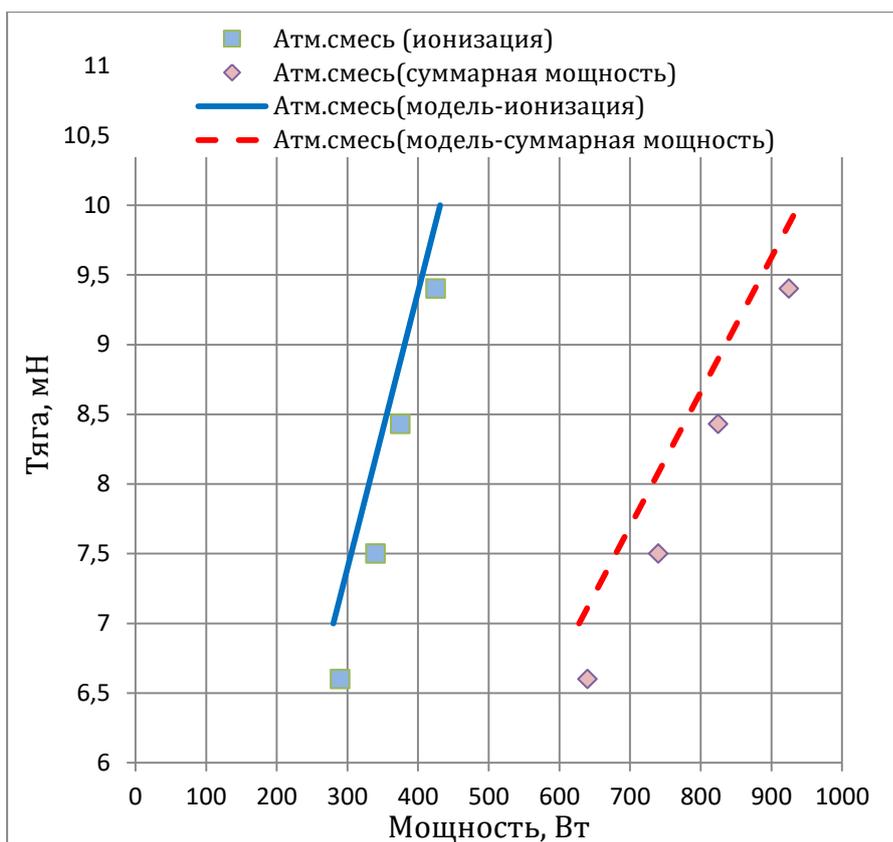


Рисунок 7 – Сравнение результатов моделирования тяги и потребляемой мощности двигателя ВЧИД-15-1 при работе на атмосферной смеси ($2N_2:1O_2$) с результатами экспериментов.

Сравнение результатов моделирования тяги и потребляемой мощности двигателя ВЧИД-15-1 при работе на атмосферной смеси с результатами экспериментов представлено на рис. 7. Анализ рис. 7 показывает, что в случае применения балансовой модели для расчета работы тягового узла ПВЭРД на атмосферной смеси, отличие экспериментальных данных от результатов расчета не превышает 10%. (по кислороду ~ 15%, по азоту ~5%).

В целом, можно отметить, что созданная модель хорошо верифицируется экспериментальными данными, зарегистрированными во время экспериментальных исследований работы тягового блока ПВЭРД на компонентах атмосферы. Максимальное отличие модели от эксперимента составляет не более 15% процентов. При дальнейшей проработке ПВЭРД модель может быть использована для других образцов с отличными геометрическими параметрами тягового узла и УЗАГ. При использовании ВЧГ летного образца (ВЧГ с автоподстройкой частоты в составе штатной системы питания и управления двигателем) – возможно повышение точности модели за счет уменьшения потерь мощности в контурах согласования ВЧГ с нагрузкой.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

При достижении поставленных в настоящей диссертации задач были получены следующие результаты:

1. На основании проведенного анализа компоновочных решений ПВЭРД показано, что на орбитах с высотами порядка 220 км, на входе в ионизационную камеру тягового узла возможно достижение концентраций молекулярных атмосферных газов до $5 \cdot 10^{17} \text{ м}^{-3}$ с соотношением смеси газов: молекулярный азот и кислород – 2:1, что является достаточным для возможности ионизации в высокочастотном разряде.

2. С учетом экспериментальных данных сделан вывод о возможности независимого исследования работы тягового и заборного узлов ПВЭРД. Обоснован выбор высокочастотного ионного двигателя в качестве прототипа тягового узла. Определен максимальный доступный массовый расход атмосферных газов через ПВЭРД с миделевой площадью 1 м^2 . Результаты экспериментального анализа стойкости к разрушению основных конструкционных материалов элементов тягового узла в среде радикалов азота и кислорода обосновали возможность использование в конструкции ПВЭРД типовых материалов.

3. Разработана лабораторная модель тягового узла с двумя модификациями, имитирующими ее работу в составе ПВЭРД. При проектировании моделей были учтены результаты анализа условий полета и рекомендации по выбору конструкционных материалов.

4. Создан стенд для имитации работы тягового узла, аттестованный для испытаний. Разработана схема автоматизированного управления подачей смеси атмосферных газов в ходе эксперимента.

5. В ходе экспериментальных исследований лабораторных моделей была продемонстрирована работоспособность тягового узла ПВЭРД на разнородных рабочих телах: ксеноне, кислороде, азоте и атмосферной смеси, соответствующей высоте полета 220 км. Была доказана возможность стабильного зажигания высокочастотного разряда на достижимых в полете концентрациях газов без добавления к смеси инертных газов, используемых другими исследователями. В ходе испытаний продемонстрирована возможность работы тягового узла в циклическом режиме, демонстрирующим скажность работы ПВЭРД на потенциальных орбитах.

6. С учетом известных соотношений для высокочастотного разряда, была разработана балансовая модель, которую можно рекомендовать для быстрой оценки интегральных характеристик, в частности тяги ПВЭРД. Результаты моделирования качественно согласуются с экспериментальными данными, максимальное количественное расхождение не превышает 15%.

7. На основании проведенных исследований сформулированы рекомендации по разработке тягового узла перспективного ПВЭРД для использования на макете-демонстраторе низкоорбитального космического аппарата.

СПИСОК ПУБЛИКАЦИЙ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ

В рецензируемых научных изданиях:

1. Кожевников В.В., Смирнов П.Е., Суворов М.О., Хартов С.А. Разработка высокочастотного ионного двигателя, работающего на атмосферных газах. // Известия Российской академии наук. Энергетика. 2017. № 3 С. 5-12.
2. Ерофеев А.И., Суворов М.О., Никифоров А.П., Сырин С.А., Попов Г.А., Хартов С. А. Разработка воздушного прямоточного электрореактивного двигателя для компенсации аэродинамического торможения низкоорбитальных космических аппаратов. // Вестник НПО им. С.А. Лавочкина. 2016. № 3. С. 104-110.
3. Гордеев С. В., Канев С. В., Суворов М.О., Хартов С.А. Оценка параметров прямоточного высокочастотного ионного двигателя // Труды МАИ. 2017. № 96. URL: <http://trudymai.ru/published.php?ID=85709>.
4. Suvorov M., Kozhevnikov V., Khartov S., Cherniy I. Plasma local parameters measuring in the low power radio-frequency ion thruster's discharge chamber // Procedia Engineering. 2017. Vol. 185. pp. 432-437.
5. Suvorov M., Syrin S., Khartov S., Popov G. Air-Breathing ramjet electric propulsion thruster for controlling low-orbit spacecraft motion and for compensating its aerodynamic drag // Advances in the Astronautical Sciences. 2017. Vol. 161. pp. 833-841.

Патенты:

6. Патент на полезную модель №168846 РФ. Ионно-плазменный двигатель / Гаврюшин В. М., Канев С. В., Суворов М. О., Хартов С. А. Заявитель: Московский авиационный институт (национальный исследовательский университет). — № 2016127448. Заявка от 07.07.2016. Опубликовано 21.02.17. Бюл № 6.
7. Патент на изобретение № 2614906 РФ. Прямоточный электрореактивный двигатель / Канев С. В., Попов Г. А., Суворов М. О., Сырин С. А., Хартов С. А., Ерофеев А. И. Заявитель: Московский авиационный институт (национальный исследовательский университет). — № 2016112914. Заявка от 05.04.2016. Опубликовано 30.03.17. Бюл. № 10.

Другие публикации:

8. Суворов М.О., Хартов С.А. Разработка высокочастотного ионного двигателя, работающего // Сб. тез. 14-й международной конференции «Авиация и Космонавтика - 2015». 16-20 Ноября 2015. С. 152-153.
9. Суворов М.О., Смирнов П.Е., Смирнова О.В., Хартов С.А. Экспериментальное исследование работы катода-нейтрализатора с высокочастотным разрядом // Сб. тез. 16-й международной конференции «Авиация и Космонавтика — 2017». Москва.

2017. С. 125-126.

10. Суворов М.О, Хартов С.А. Разработка высокочастотного ионного двигателя, работающего на атмосферных газах // Сб. тез. докл. XI академических чтений по космонавтике, посвященных памяти академика С.П. Королева. Москва, МГТУ им. Н.Э. Баумана. 26-29 января 2016. С. 74.
11. Суворов М.О., Хартов С.А. Высокочастотный ионный двигатель, работающий на атмосферных газах // Сб. тез. докл. XLI академических чтений по космонавтике, посвященных памяти академика С.П. Королева. Москва. 17 января 2017. С. 77.
12. Суворов М.О, Хартов С.А. Разработка высокочастотного ионного двигателя, работающего на атмосферных газах // Сб. тез. докл. международной молодежной научной конференции «Гагаринские чтения – 2016». Москва. 12-15 апреля 2016. Т. 3. С. 719.
13. Суворов М.О, Хартов С.А. Высокочастотный ионный двигатель, работающий на атмосферных газах // Сб. тез. докл. международной молодежной научной конференции «Гагаринские чтения – 2017». Москва. 5-20 апреля 2017. С. 579-580.
14. Кожевников В.В., Суворов М.О., Хартов С.А. Исследование индукционного разряда в камере высокочастотного ионного двигателя // Сб. тез. докл. XLII академических чтений по космонавтике, посвященных памяти академика С.П. Королева. Москва. 23-26 января 2018. С. 72.
15. Суворов М.О., Гордеев С.В., Канев С.В., Хартов С.А. Анализ характеристик высокочастотного ионного двигателя, работающего на ионизированных газах верхних слоев атмосферы // Сб. тез. докл. XLII академических чтений по космонавтике, посвященных памяти академика С.П. Королева. Москва. 23-26 января 2018. С. 71.
16. Суворов М.О., Гордеев С.В., Канев С.В., Хартов С.А. Высокочастотный ионный двигатель, использующий в качестве рабочего тела смесь газов верхних слоев атмосферы // Сб. тез. IV-й научно-технической конференции молодых специалистов АО «ИСС», посвященная 60-ти летию запуска первого спутника Земли на тему «Разработка, производство, испытания и эксплуатация космических аппаратов и систем». Железногорск. 2017. С. 123-124.
17. Суворов М.О., Гордеев С.В., Канев С.В., Хартов С.А. Высокочастотный ионный двигатель, работающий на ионизированных газах верхних слоев атмосферы // Сб. тез. докл. конференции «Иосифьяновские чтения-2017». Истра. 2017. С. 187-188.