

На правах рукописи



Нечаев Иван Леонидович

**ИССЛЕДОВАНИЕ ПЕРСПЕКТИВНЫХ СХЕМ АБЛЯЦИОННОГО
ИМПУЛЬСНОГО ПЛАЗМЕННОГО ДВИГАТЕЛЯ С ПОВЫШЕННЫМИ
ХАРАКТЕРИСТИКАМИ**

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, профессор, академик РАН

Попов Гарри Алексеевич

Официальные оппоненты: Ермошкин Юрий Михайлович,

кандидат технических наук, доцент,

АО «Информационные спутниковые системы» имени академика М.Ф. Решетнёва», начальник лаборатории

Козлов Андрей Николаевич

доктор физико-математических наук, доцент,

ФГУ «Федеральный исследовательский центр Институт прикладной математики им. М.В. Келдыша РАН», главный научный сотрудник

Ведущая организация: Федеральное государственное унитарное предприятие

«Опытное конструкторское бюро «Факел»

Защита состоится 17 декабря 2018 года в 15:00 на заседании диссертационного совета Д212.125.08, 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/b0d/Dissertatsiya_Nechaev.pdf

Автореферат разослан «__» _____ 2018 г.

Учёный секретарь

диссертационного совета Д212.125.08

доктор технических наук, профессор



Зуев Юрий Владимирович

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы исследования

В настоящее время электроракетные двигатели (ЭРД) в основном применяются как исполнительные органы системы управления движением космических аппаратов (КА). Наиболее широко ЭРД используются в качестве двигателей коррекции в составе геостационарных КА и низкоорбитальных КА дистанционного зондирования Земли (ДЗЗ). В случае российских КА ДЗЗ – это ЭРД типа СПД-50 (проект «Канопус-В»). В последние годы ЭРД также начали использоваться как маршевые двигатели для довыведения КА на геостационарную орбиту (ГСО). Это позволяет увеличить массу спутника на ГСО в 1,5 – 2 раза по сравнению с массой спутника, выведенного на орбиту по классической схеме. ЭРД также с успехом используются и в проектах по достижению удаленных объектов в дальнем космосе, например, на американском КА DS-1, японском КА Hayabusa и других.

Рост практического интереса к малым космическим аппаратам (МКА) массой от нескольких до сотен килограмм также обуславливает расширение сферы использования ЭРД. Характерной чертой этих аппаратов является их малоразмерность. Вследствие уменьшения размеров открываются более обширные возможности для запуска спутников. Аппараты, имеющие небольшие геометрические размеры, относительно малые массы, можно запускать группой одной ракетой-носителем или в качестве попутного груза при запуске других КА, а также применять для выведения на орбиты иные, более лёгкие (а значит более дешёвые ракеты-носители).

Использование МКА особенно актуально из-за стремления снизить стоимость жизненного цикла спутников для различных космических миссий путём совершенствования технологических решений, а, следовательно, уменьшения массы и размеров этих аппаратов. Применение современных технологий, материалов и конструктивных решений позволяет существенно уменьшить габариты электронной аппаратуры спутников, снизить потребляемую мощность и уменьшить суммарную массу КА. Это дает основание для реализации

ряда перспективных космических программ за счет применения МКА нового поколения. Некоторые задачи, выполняемые МКА, требуют коррекции орбиты и положения аппарата в космическом пространстве и, следовательно, наличия в составе МКА двигательной установки. ЭРД, благодаря свойственному им высокому удельному импульсу тяги, позволяют, при ограниченной массе МКА, обеспечить аппарату необходимую характеристическую скорость.

Одной из существующих разновидностей ЭРД являются импульсные плазменные двигатели (ИПД) с твердым диэлектрическим рабочим телом – абляционные импульсные плазменные двигатели (АИПД). Их отличительная особенность – возможность обеспечения достаточно стабильной величины единичного импульса тяги и возможность работать в широком диапазоне мощностей при заданной величине энергии в единичном разряде. АИПД в основном рассматриваются для использования в составе двигательных установок (ДУ) МКА с низкой мощностью бортовой энергетики (200 Вт и менее) для решения задач коррекции, ориентации, изменения орбиты и увода отработавших КА с орбиты.

АИПД является простым по конструкции и принципу действия. Он состоит из блока разрядного канала, ёмкостного накопителя энергии, системы хранения и подачи твёрдого рабочего тела, системы питания и управления, блока инициирования разряда, подводящих электрических шин. Исследования АИПД в МАИ велись на специализированной кафедре с 1960 года, а затем были продолжены в НИИ ПМЭ МАИ. Работы по созданию АИПД различной размерности в настоящее время ведутся в России в Научно-исследовательском институте прикладной механики и электродинамики Московского авиационного института. В результате был разработан ряд электроракетных двигательных установок (ЭРДУ) с потребляемой мощностью от 10 до 150 Вт и с удельным импульсом тяги от 12 км/с до 18 км/с, что превышает уровень, достигнутый зарубежными аналогами. Одна из ЭРДУ АИПД-45-2, предназначенная для малого космического аппарата научного назначения МКА-ФКИ-ПН2, прошла полный цикл наземных испытаний и была в 2014 г. выведена в составе КА на

околоземную орбиту. В данной работе лабораторный образец (модель) АИПД-45-2 принят за эталонный (базовый) и все полученные результаты сравниваются с ним. Также работы над АИПД и их применением ведутся в Национальном исследовательском центре «Курчатовский институт», АО «Корпорация «ВНИИЭМ», АО «НИИЭМ». Ранее они велись в ФГУП «ОКБ «Факел», ФГУП ЦНИИМаш и в ряде других организаций нашей страны. За рубежом основные центры по исследованию и созданию ИПД сосредоточены в США, ФРГ, Японии и Китае. При этом из всего спектра направлений исследований АИПД, задача улучшения его характеристик, включая увеличение удельного импульса тяги, при ограниченной потребляемой мощности, является одной из приоритетных.

Объект исследования

Объектом исследования является АИПД новых схем с усовершенствованным разрядным каналом.

Предмет исследования

Предметом исследования являются удельные характеристики лабораторного образца АИПД с усовершенствованным разрядным каналом.

Цель работы

Разработка новых перспективных схем АИПД с повышенным значением удельного импульса тяги и снижение массы конструкции двигательной установки.

Основные задачи диссертации:

В соответствии с целью диссертации были поставлены и решены следующие задачи:

1. Проведён анализ тенденций развития АИПД и способов повышения их удельных характеристик.
2. Разработаны и исследованы лабораторные образцы АИПД различных схем и конструкций с улучшенными удельными характеристиками.
3. Проведён экспериментальный и расчётный анализ влияния конфигурации разрядной цепи на процесс ускорения в АИПД

Методы исследования

В диссертации применялась совокупность экспериментальных и расчетных методов: экспериментальный метод определения основных интегральных тягово-энергетических характеристик АИПД, экспериментальный метод определения разрядного тока, расчетный метод моделирования разрядного тока и определения среднемассовой скорости истечения в электродинамическом приближении, метод определения угла отклонения струи плазмы при помощи фотофиксации скачка уплотнения плазмы на заостренном клине из токонепроводящих материалов, метод визуализации развития разряда при помощи фиксации его высокоскоростным фоторегистратором.

Научная новизна

- Предложена новая схема АИПД с асимметричным разрядным каналом, обеспечивающая более высокий удельный импульс тяги по сравнению с базовой моделью при фиксированных параметрах накопителя энергии и одинаковых размерах разрядного канала.

- Предложена новая схема АИПД с двойным обратным токоподводом, обеспечивающая более высокую среднемассовую скорость истечения плазмы по сравнению с базовой моделью.

- Предложена новая схема двухступенчатого АИПД с одним общим электродом для двух ступеней. На этой модели был получен удельный импульс тяги практически в два раза больший, чем на базовой модели АИПД в том же диапазоне энергий.

Теоретическая и практическая значимость результатов работы

Разработаны схема АИПД с асимметричным разрядным каналом, двойным обратным токоподводом и двухступенчатая схема ускорения, позволившие существенно увеличить удельный импульс тяги двигателя. Экспериментальное исследование влияния конфигурации разрядной цепи модели с двойным обратным токоподводом на процесс ускорения в АИПД позволило подтвердить теоретические оценки, полученные расчётным анализом модели с двойным обратным токоподводом. Проведённые исследования и разработки позволили

увеличить удельный импульс тяги двигателя при асимметричной и схеме с двойным обратным токоподводом – до 15%, а в случае использования двухступенчатой схемы практически вдвое по сравнению с базовой моделью. Результаты, полученные на двухступенчатом образце АИПД, свидетельствуют о том, что двухступенчатая схема ускорения плазмы является перспективной с точки зрения получения высоких среднемассовых скоростей истечения (до 20 км/с и выше). Даны рекомендации, связанные с уменьшением массы двигательной установки на базе АИПД.

Полученные результаты могут быть использованы на практике при создании перспективных образцов АИПД.

Достоверность полученных результатов

Достоверность полученных результатов, научных положений и сделанных выводов подтверждается выбором существующих методик измерений, соответствием измеренных удельных характеристик и величины разрядного тока расчётным значениям, а также непротиворечивостью аналогичным результатам других авторов.

Реализация и внедрение результатов работы

Результаты работы используются в НИИ ПМЭ МАИ при проведении научно-исследовательских и опытно-конструкторских работ по созданию прототипов новых лётных образцов ЭРД на основе АИПД.

Апробация результатов

Основные результаты работы обсуждались на семинарах, а так же докладывались на российских и международных конференциях:

- 1) 9-я международная конференция «Авиация и космонавтика – 2010» (Москва, Россия, 16-18 ноября 2010 года);
- 2) 37-я международная молодёжная конференция «37 Гагаринские чтения» (Москва, Россия, 2010 год);
- 3) 10-я международная конференция «Авиация и космонавтика – 2011» (Москва, Россия, 8-10 ноября 2011 года);

4) XXXV академические чтения по космонавтике им. академика С. П. Королёва. (Москва, Россия, 2011 год);

5) XXXVI академические чтения по космонавтике им. академика С. П. Королёва. (Москва, Россия, 2012 год);

6) 11-я международная конференция «Авиация и космонавтика – 2012» (Москва, Россия, 13-15 ноября 2011 года);

7) Московская молодёжная научно-практическая конференция «Инновации в авиации и космонавтике». (Москва, Россия, 2012 год);

8) Первая молодёжная конференция «Инновационная деятельность в науке и технике». (Москва, Россия, 2012 год);

9) XXXVII академические чтения по космонавтике им. академика С. П. Королёва. (Москва, Россия, 2013 год).

Публикации в рецензируемых научных изданиях

По теме диссертации опубликовано 15 научных работ, из них 3 – в рецензируемых научных изданиях, получено 2 патента на изобретение.

Личный вклад соискателя

Работа является результатом исследований, проводимых автором с 2009 года по настоящее время.

Основные результаты диссертации получены лично автором, либо при непосредственном его участии. В процессе выполнения диссертации соискатель самостоятельно выполнил следующие виды научно-исследовательских работ:

- Исследование лабораторной модели АИПД с асимметричной схемой разрядного канала, верификация полученных результатов при контрольных экспериментах.

- Исследование лабораторной модели АИПД с двойным обратным токоподводом, верификация полученных результатов при контрольных экспериментах

- Исследование лабораторной модели АИПД двухступенчатой схемы, верификация полученных результатов при контрольных экспериментах

- Постановка и проведение экспериментов магнитозондовой диагностики с целью изучения распределения магнитных полей в РК АИПД с двойным обратным токоподводом с применением зонда индуктивного типа.

- Обработка экспериментальных данных с целью определения распределения магнитной индукции по длине разрядного канала лабораторной модели АИПД.

- Сопоставление теоретических расчётов с полученными экспериментальными данными магнитозондовой диагностики.

Основные положения, выносимые на защиту

1. Результаты исследования двухступенчатого АИПД новой схемы с одним общим электродом разрядного канала.

2. Результаты исследований АИПД новой схемы с асимметричным разрядным каналом.

3. Результаты исследований АИПД новой схемы с двойным обратным токоподводом, имеющим повышенное значение электромагнитной составляющей тяги.

4. Результаты экспериментальных исследований тягово-энергетических характеристик вышеперечисленных образцов АИПД.

5. Экспериментально подтверждено, что за счёт изменения распределения величины магнитной индукции по длине разрядного канала в модели АИПД с двойным обратным токоподводом увеличивается значение среднemasсовой скорости истечения плазмы.

Структура и объём работы

Диссертационная работа представляет собой рукопись объёмом 166 страниц печатного текста, включая 124 рисунка, 12 таблиц, а также список цитируемой литературы, содержащий 69 наименований. Она включает в себя введение, четыре раздела, заключение, список сокращений и условных обозначений, а также список использованных источников.

СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Введение посвящено обоснованию актуальности тематики диссертационного исследования, краткому описанию проблемы создания АИПД с улучшенными удельными характеристиками.

Первая глава диссертации посвящена анализу современного состояния развития АИПД. В главе приводится обзор физических моделей рабочих процессов и методов расчёта параметров АИПД. Представлен сравнительный анализ рабочих характеристик современных АИПД.

Во **второй главе** проводится анализ тенденций развития АИПД. На примере конкретной летной двигательной установки АИПД-45-2 рассматривается структура полной массы двигателя (рисунок 1) и возможности улучшения его массогабаритных характеристик [1].

Из представленных данных видно, что масса конденсаторного блока накопителя энергии (БНЭ) в сумме с массой рабочего тела составляют более половины всей массы ДУ. С увеличением энергии АИПД масса БНЭ растет в основном за счет увеличения количества конденсаторов. Для ее снижения необходимо оптимизировать энерго содержание батареи и использовать конденсаторы с высокой удельной энергоемкостью.

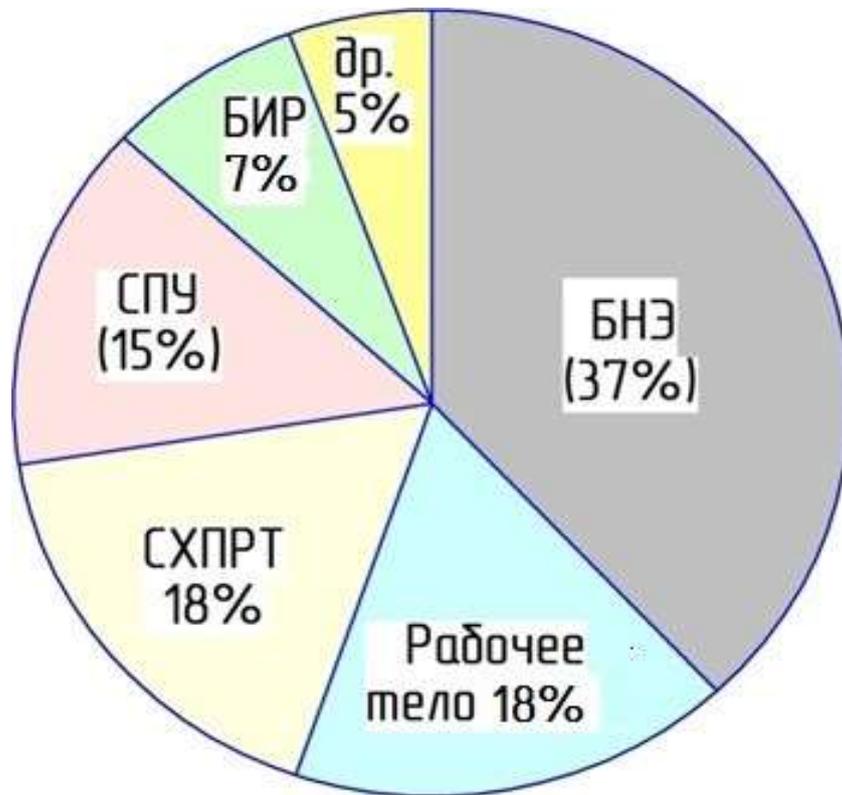


Рисунок 1 - Структура полной массы ЭРДУ на основе АИПД(БИР – блок инициирования разряда, БПУ – блок питания и управления, СХПРТ – система хранения и подачи рабочего тела, БНЭ – блок накопителя энергии, РТ – рабочее тело)

Масса рабочего тела $M_{РТ}$ зависит от заданного суммарного импульса тяги P_{Σ} и характерного для данного двигателя удельного импульса тяги $J_{уд}$ в соответствии с соотношением $M_{РТ}=P_{\Sigma}/J_{уд}$. Повышая величину $J_{уд}$, можно снизить массу запасаемого рабочего тела и, соответственно, уменьшить полную массу ЭРДУ (рисунок 2).

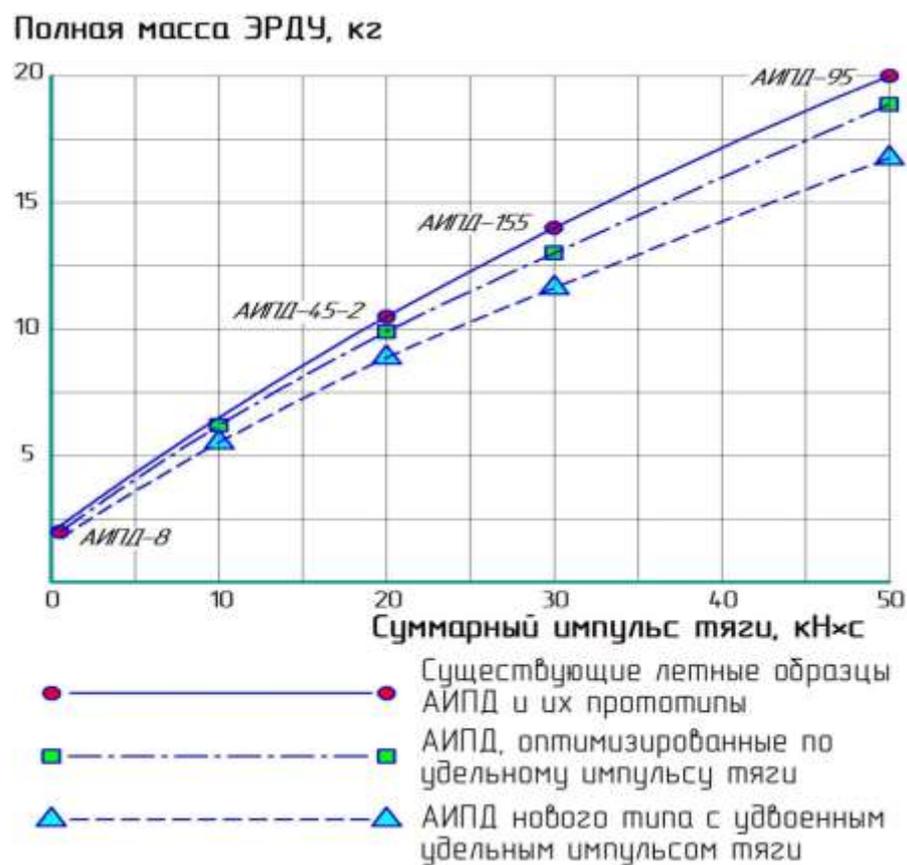


Рисунок 2 - Зависимость полной массы ЭРДУ на базе АИПД от суммарного импульса тяги при различных удельных импульсах тяги

Таким образом, рассматриваются различные способы повышения удельного импульса тяги АИПД при неизменной энергии разряда и подобных размерах разрядного канала. Все применённые способы имеют свои достоинства и недостатки при их реализации в конструкции двигателя. Однако при решении задач, требующих повышенного значения удельного импульса тяги они могут быть востребованы при создании ЭРД на базе АИПД.

Третья глава посвящена исследованию модели с асимметричным разрядным каналом.

Результаты исследования в НИИ ПМЭ МАИ лабораторных образцов АИПД, оптимизированных по удельному импульсу тяги, показали, что при энергии разряда $W \sim 50 \dots 100$ Дж существуют принципиальные возможности увеличения $J_{уд}$ на 15-20%. Так было установлено, что достаточно часто имеет место значительная неравномерность расхода (до 30%) левой и правой шашек рабочего тела двигателя без существенного ухудшения его характеристик. Наблюдалось

даже некоторое повышение удельного импульса тяги, особенно в случае науглероживания одной из шашек. То есть имеет место ускорение рабочего вещества поступающего в разряд преимущественно с одной из шашек, а вторая просто «парит» и продукты ее абляции ускоряются лишь до тепловых скоростей и снижают величину результирующего удельного импульса тяги. Поэтому, можно предположить, что удалив одну из шашек, удастся повысить значение $J_{уд}$ (асимметричная схема разрядного канала).

Приводятся результаты параметрических испытаний лабораторной модели АИПД рельсовой геометрии с одной шашкой рабочего тела вместо двух (асимметричная схема разрядного канала). При этом одновременно исследовался плазменный ускоритель базовой симметричной схемы при тех же геометрических размерах разрядного канала и энергиях разряда W . Полученные результаты для двигателя асимметричной схемы представлены в таблице 1, для стандартной схемы – в таблице 2.

Таблица 1 - Удельные характеристики лабораторной модели АИПД с асимметричным разрядным каналом

№ п/п	W , Дж	P , мНс	J_{sp} , М/с	\dot{m} , мг/имп
1	117,7	2,25	15200	0,148
2	99,1	1,93	13300	0,145
3	83,2	1,57	11600	0,136
4	69,7	1,24	11000	0,113

Таблица 2 - Удельные характеристики лабораторной модели АИПД базовой схемы

№ п/п	W , Дж	P , мНс	J_{sp} , М/с	\dot{m} , мг/имп
1	69,7	1,4	11637	0,123
2	83,3	1,7	11491	0,148
3	118,1	2,4	13916	0,175

Видно, что при энергии разряда более ~ 80 Дж удельный импульс тяги у АИПД с асимметричным разрядом несколько выше, чем у двигателя классической схемы. При $W \sim 118$ Дж превышение составляет 8%. Наблюдались также отдельные случаи увеличения удельного импульса тяги на 12-14%.

Практическая реализация схемы асимметричного разрядного канала (РК) в летных прототипах двигателя потребует устранения двух его основных недостатков – это открытая схема канала и отклонение вектора скорости истечения основной массы рабочего вещества от центральной плоскости РК. Под открытой схемой понимается отсутствие с одной из сторон РК шашки рабочего тела. Это приводит к тому, что часть рабочего вещества покидает РК в направлении перпендикулярном оси, в сторону противоположную месту размещения шашки. Интенсивное осаждение продуктов разложения рабочего тела – фторопласта, на элементах конструкции двигателя повышает риск возникновения паразитных пробоев по образовавшейся углеродной пленке. Для предотвращения этого был разработан вариант канала (рисунок 3) с одной шашкой и стенкой из диэлектрического материала с низким коэффициентом распыления (нитрид бора, алюмооксидная керамика). Эксперименты показали, что в данном случае наблюдается некоторое повышение средней скорости истечения плазмы. Для проверки данного предположения и оценки работоспособности модели со стенкой из новых конструктивных материалов при длительном функционировании необходимо провести дополнительные исследования.

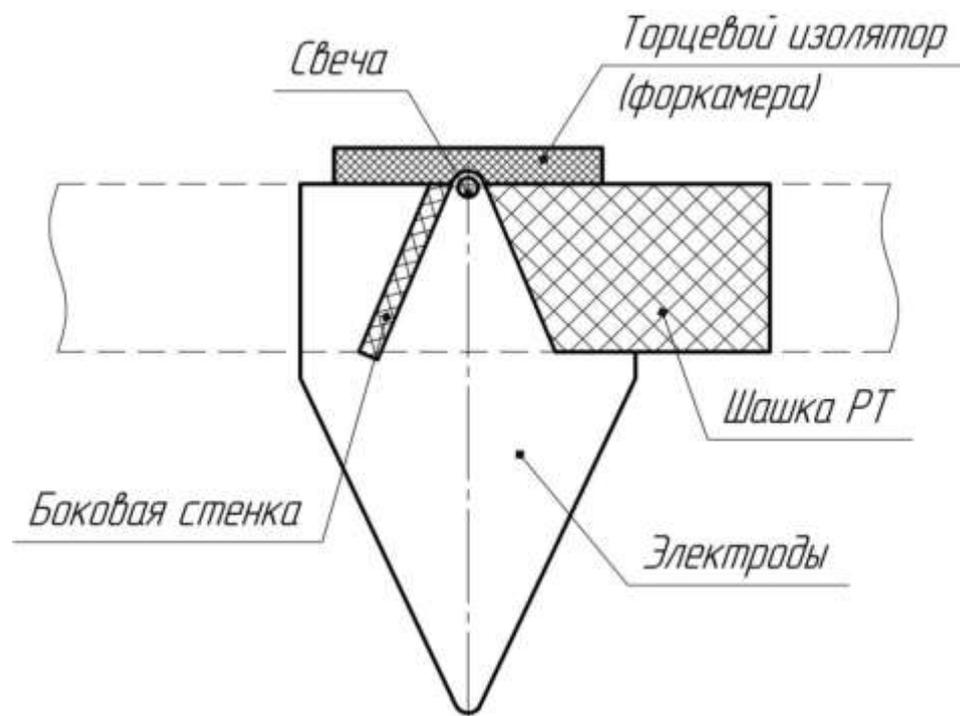


Рисунок 3 – Схема канала с асимметричным разрядом и стенкой

Факт отклонения вектора скорости истечения основной массы рабочего вещества от центральной плоскости РК двигателя асимметричной схемы был установлен при изучении характера привязки разряда к поверхности электродов. Устранить данное отклонение можно схемным путем, используя вместо одного два поочередно работающих асимметричных разряда. В этом случае вектор средней тяги будет направлен по оси, так как каждый из поочередно вылетающих сгустков плазмы отклоняется в свою сторону на одинаковый угол. У разработанной по данной схеме модели свечи поджига разряда и, соответственно, шашки РТ были разнесены на расстояние $10 \div 30$ мм для минимизации влияния асимметричных разрядов друг на друга. По результатам экспериментов было установлено, что характеристики модели с двумя свечами несколько хуже, чем у стандартной модели классической схемы. Это может быть связано с воздействием излучения из сгустка плазмы, возникающего при срабатывании одного асимметричного разряда, на шашку рабочего тела второго асимметричного разряда. В результате возникает дополнительный расход рабочего вещества, практически не участвующий в процессе создания тяги двигателя. Для устранения влияния одного асимметричного разряда на другой необходимо либо

использовать перегородку между каналами из диэлектрического материала с низким коэффициентом распыления, либо рассмотреть схемы с секционированными электродами и существенно большим расстоянием между шашками рабочего тела, чем у исследовавшейся модели.

В процессе исследований двигателя асимметричной схемы, для наблюдения за процессом развития разряда, использовался высокоскоростной фоторегистратор.

Для определения углов отклонения сгустков плазмы в асимметричном разряде применялся метод их визуализации на заостренном клине. Его суть заключается в размещении в струе плазмы клина, на острие которого генерируются характерные для сверхзвукового потока ударные волны, хорошо видимые на фотоснимках. По углу наклона ударных волн к продольной оси РК можно определить направление вектора скорости потока. Съёмка потока плазмы производилась фотокамерой через фланец вакуумной камеры, изготовленный из кварцевого стекла. Отклонение потока плазмы исследовалось при различных положениях свечи и шашки относительно центральной плоскости РК. В итоге было установлено, что наименьшее отклонение наблюдается при смещении свечи на 5 мм относительно центральной плоскости РК.

Таким образом, по результатам проведенных исследований можно сделать вывод о том, что схема двигателя с асимметричным разрядом при энергии более ~ 80 Дж позволяет повысить удельный импульс тяги по сравнению с классической схемой и при соответствующей доработке может быть использована в опытно-конструкторских работах в области АИПД.

В главе также приведено описание лабораторного стенда и применяемого исследовательского оборудования.

В **четвертой** главе рассматривается модель с двойным обратным токоподводом и более перспективное направление – двухступенчатые схемы.

В первом случае способом увеличения удельного импульса тяги АИПД является повышение значения электромагнитной составляющей тяги двигателя. Увеличить эффективность ускорения плазмы электромагнитной силой можно

повысив величину магнитного поля. Для этого, при условии неизменности разрядного тока, необходимо изменить конструкцию обратного токоподвода, удвоив количество проводников, лежащих в одной плоскости, с одинаковым направлением разрядного тока (рисунок 4).

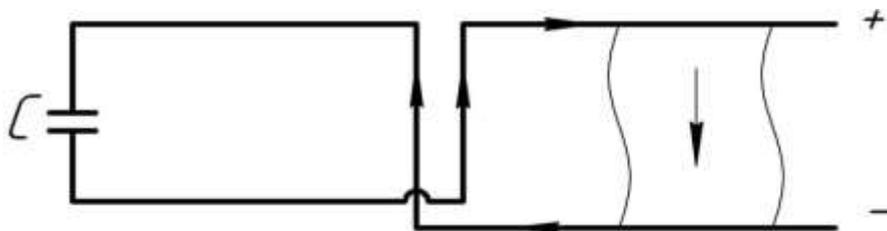


Рисунок 4 - Упрощённая электрическая схема АИПД с двойным обратным токоподводом

В данной главе представлены результаты экспериментальных исследований АИПД с двойным обратным токоподводом. В основу его конструкции был положен стандартный РК рельсотронного типа, аналогичный летному образцу АИПД-45-2.

Внешний вид практической реализации схемы двойного обратного токоподвода представлен на рисунке 5.

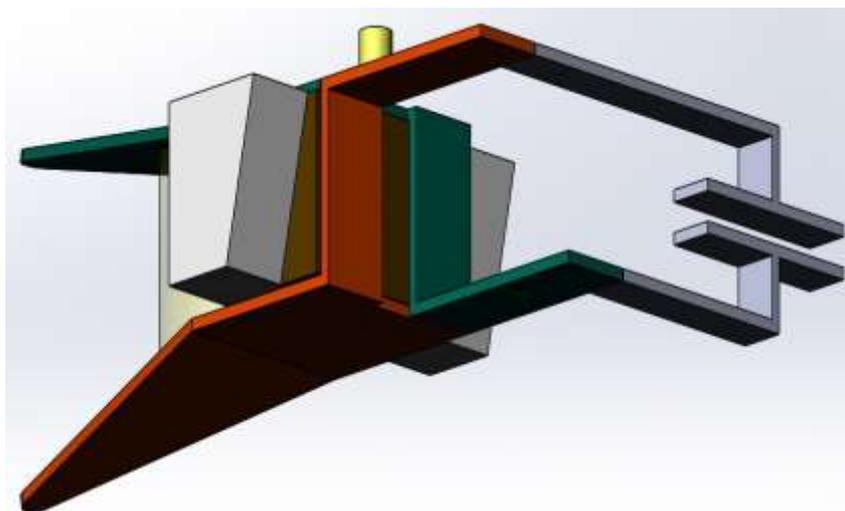


Рисунок 5 – Внешний вид двойного обратного токоподвода

Вследствие скин-эффекта топография магнитного поля, возникающего при протекании тока в этих токоподводах, имеет достаточно сложную структуру. При этом, в среднем, его величина по абсолютному значению несколько выше, чем у

стандартной модели. В общем случае коэффициент усиления должен находиться в диапазоне от 1 до 2. Соответствующее увеличение электромагнитной составляющей тяги, при условии изменения расхода в малых пределах, должно привести к росту удельного импульса тяги.

Одной из основных электротехнических характеристик любого разрядного контура является величина его начальной индуктивности L_0 . Измерения L_0 разрядного контура модели с двойным обратным токоподводом показали, что она имеет значение порядка 60 нГн. У стандартных же АИПД L_0 составляет 30÷35 нГн. Поэтому для более корректного сравнения моделей между собой была изготовлена стандартная модель двигателя, у которой начальная индуктивность была искусственно увеличена до 60 нГн за счет использования в конструкции удлиненного токопровода.

Характеристики двигателя с двойным обратным токоподводом в зависимости от энергии разряда приведены в таблице 3.

Таблица 3 – Характеристики АИПД с двойным обратным токоподводом

№ п/п	W, Дж	P, мНс	J_{sp} , М/с	\dot{m} , мг/имп
1	55,9	1,09	12330	0,0884
2	66,67	1,32	13550	0,0974
3	78,33	1,576	14940	0,1055

Таблица 4 – Результаты испытаний двигателя базовой схемы с увеличенной индуктивностью

№ п/п	W, Дж	P, мНс	J_{sp} , М/с	\dot{m} , мг/имп
1	56,3	1,1	11590	0,095
2	67,0	1,4	12730	0,106
3	84,7	1,8	15180	0,118

Полученные результаты наглядно свидетельствуют о том, что на новой модели с двумя шинами в определенном диапазоне энергий можно получить более высокую среднемассовую скорость истечения. При $W \sim 56-67$ Дж, превышение составляет 6%. Удельный импульс тяги модели с двойным обратным токоподводом также имеет большие значения (на 10 – 15%), чем у стандартного АИПД штатного исполнения с $L_0 \sim 30$ нГн.

С целью более глубокого анализа полученных результатов был проведен расчет осциллограмм и скоростей истечения плазмы для двигателей с различной конфигурацией РК в электродинамическом приближении. Преследовалась цель провести расчетную оценку степени увеличения магнитного поля и, соответственно, объемной электромагнитной силы, в случае применения двойного обратного токоподвода.

В расчёте применяется система уравнений Арцимовича [Колесников П.М. Электродинамическое ускорение плазмы. М.: Атомиздат, 1971. 389 с.]:

$$m_0 \frac{d^2 v}{dt^2} = \frac{I^2 dL}{2 dz}$$

$$\frac{dz}{dt} = v$$

$$I = -C \frac{dU}{dt}$$

$$\frac{dLI}{dt} + R_0 I - U = 0$$

$$L = L_0 + bz$$

начальные условия: $z=0, \frac{dz}{dt}=0, I=0, U=U_0$. Также предполагалось, что $R_0=0$.

Данная система уравнений решается в безразмерном виде и позволяет получить расчетные осциллограммы тока и графики изменения скорости. Добившись наилучшего совпадения расчетных осциллограмм тока с экспериментальными, было установлено, что в модели с двойным обратным токоподводом усиление магнитного поля составляет от 10 % до 70 %. Этот результат подтверждает и несколько конкретизирует предположение о

коэффициенте усиления магнитного поля находящемся в диапазоне $1 \div 2$, сделанного ранее из общих рассуждений.

Для подтверждения расчётных данных в главе проводятся результаты магнитозондовой диагностики. Для этой цели использовался магнитный зонд индуктивного типа, схема которого представлена на рисунке 6.

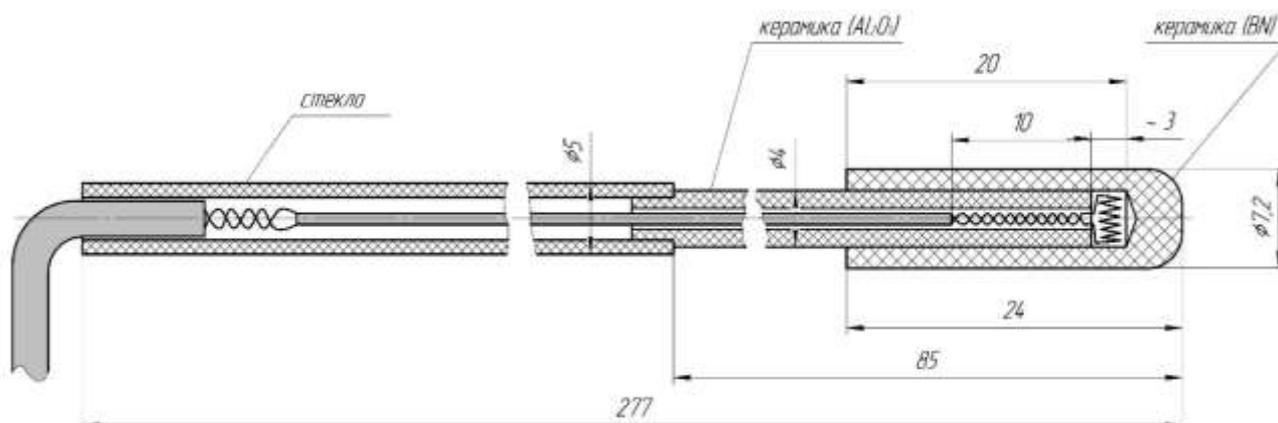


Рисунок 6 – Принципиальная схема магнитного зонда

Результаты магнитозондовых измерений подтверждают факт увеличения собственного магнитного поля в РК АИПД с двойным обратным токоподводом, который был установлен при расчетном анализе процессов, происходящих в двигателе. Данный прирост составляет в среднем 20%. Этот результат делает более обоснованным предположение об увеличении удельного импульса тяги за счет повышения электромагнитной составляющей тяги в АИПД с двойным обратным токоподводом.

В целом, разряд в ускорительном канале АИПД выполняет две функции – одновременное и самосогласованное дозирование и ускорение рабочего тела. При этом наблюдается существенное временное рассогласование ввода энергии и массы в разрядный канал. Значительная часть массы плазмообразующего вещества поступает в канал уже после того, как разряд практически завершился (эффект «послепарения»). Эта часть плазменного потока ускоряется только до тепловых скоростей, что приводит к снижению среднемассовой скорости. Решить

эту проблему можно разделив функции дозирования и ускорения плазмы, используя двухступенчатую схему двигателя. Рассматривались различные конструкции и конфигурации РК с двумя батареями различной энергоёмкости.

В главе приводятся результаты экспериментальных исследований перспективного варианта лабораторного образца АИПД двухступенчатой схемы, изображенной на рисунке 7.

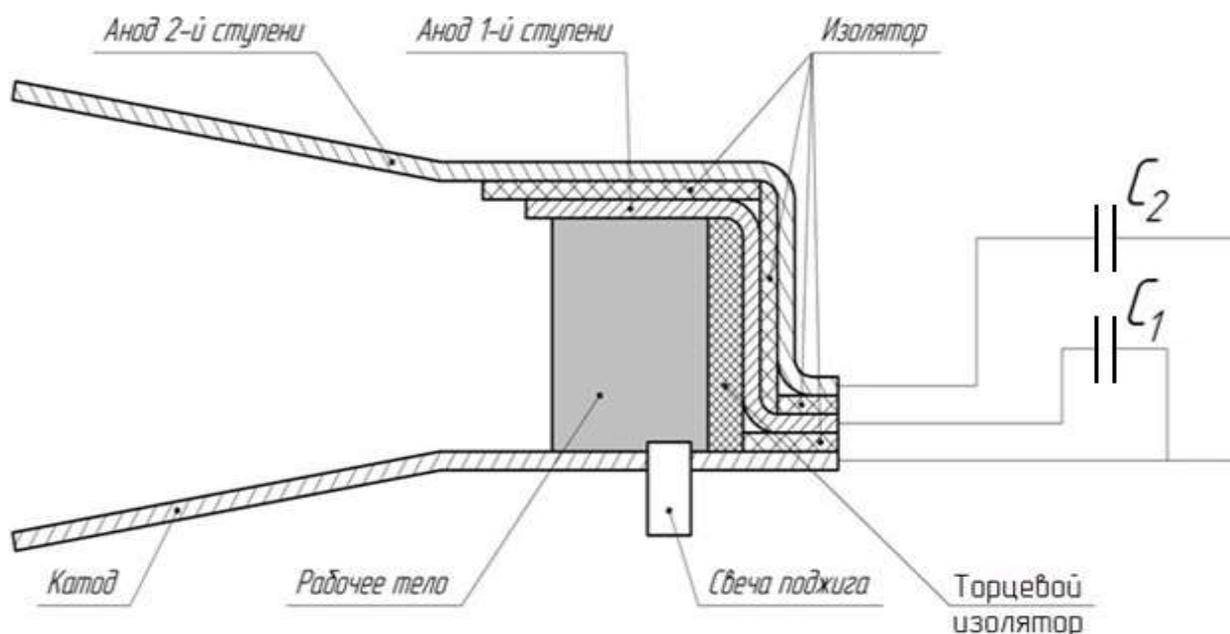


Рисунок 7 - Схема АИПД с двумя ступенями ускорения

Ее основное отличие от ранее исследовавшихся схем состоит в том, что катод у первой и второй ступеней общий, а аноды – разные (на конструкцию РК получен патент [4]).

В таблице 5 представлены характеристики, полученные в ходе отработки и оптимизации лабораторного образца АИПД двухступенчатой схемы [6-15].

Таблица 5 - Характеристики лабораторных образцов двухступенчатых АИПД

Образец АИПД	Энергия разряда I ступени W, Дж	Энергия разряда II ступени W, Дж	Суммарная энергия разряда W, Дж	Удельный импульс тяги $J_{уд}$, м/с	Цена тяги C_T , Вт/мН
1	20	42,7	62,7	7100	209
2	10	42,7	52,7	13300	188
3	8	42,7	50,7	22000	137

Сравнение полученных данных с результатами испытаний одноступенчатых АИПД с той же энергией разряда показывает, что применение двухступенчатой схемы двигателя позволяет увеличить удельный импульс тяги приблизительно вдвое по сравнению с одноступенчатыми образцами [1].

В данной главе приведены также результаты проведенной оценки погрешности измерений и достоверности экспериментальных данных.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

1. Проведён анализ структуры массы АИПД. Показано, что преимущественное влияние на улучшение его массогабаритных характеристик оказывает повышение удельной энергоёмкости конденсаторов и удельного импульса тяги.

2. Разработана и исследована модели АИПД рельсовой геометрии с асимметричным разрядным каналом. Предложенная схема позволяет повысить удельный импульс тяги до 15% по сравнению с базовой моделью.

3. Разработана и исследована модели АИПД рельсовой геометрии с двойным обратным токоподводом. Предложенная схема позволяет повысить удельный импульс тяги до 15% по сравнению с базовой моделью. Проведенные магнитозондовые измерения в разрядном канале данной модели АИПД, показали увеличение собственного магнитного поля в первом полупериоде разряда, что способствовало указанному выше росту среднемассовой скорости истечения плазмы

4. Разработана и исследована модель двухступенчатого АИПД с одним общим электродом для двух ступеней. Предложенная схема позволяет управлять процессами абляции рабочего тела и его ускорением, что даёт двукратное увеличения удельного импульса тяги по сравнению с базовой моделью.

5. Проведённые исследования свидетельствуют о возможности разработать лётные варианты АИПД на новом уровне. Конкретный двигатель может быть создан при определённых требованиях технического задания на АИПД для конкретных КА.

Список публикаций по теме диссертации

В рецензируемых научных изданиях:

1. Богатый А.В., Дьяконов Г.А., Нечаев И.Л. Абляционный импульсный плазменный двигатель с разделенным механизмом ионизации и ускорения рабочего тела // Труды МАИ. 2012. Выпуск № 52. URL: <http://trudymai.ru/upload/iblock/767/ablyatsionnyy-impulsnyy-plazmennyy-dvigatel-s-razdelennym-mekhanizmom-ionizatsii-i-uskoreniem-rabocheho-tela.pdf?lang=ru&issue=52> (дата обращения: 03.10.2018).

2. Дьяконов Г.А., Нечаев И.Л., Семенихин С.А. Экспериментальные методы повышения удельных характеристик абляционных импульсных плазменных двигателей // Труды МАИ. 2017. Выпуск № 93. URL: http://trudymai.ru/upload/iblock/eba/dyakonov_nechaev_semenikhin_rus.pdf?lang=ru&issue=93 (дата обращения: 03.10.2018).

3. Антропов Н.Н., Богатый А.В., Даньшов Ю.Т.,..., Нечаев И.Л.,... и др. Корректирующая двигательная установка с абляционным импульсным плазменным двигателем для малых космических аппаратов. // Вестник «НПО имени С.А. Лавочкина». 2013, № 5. С. 33-37.

Патенты на изобретение:

4. Патент на изобретение - № 2542354 РФ. Эрозионный импульсный плазменный двигатель/ Богатый А.В., Дьяконов Г.А., Нечаев И.Л., Заяв.: № 2013143895/07, 01.10.2013. Опубл.: 20.02.2015 Бюл. № 5.

5. Патент на изобретение - № 2664892 РФ. Абляционный импульсный плазменный двигатель/ Дьяконов Г.А., Лебедев В.Л., Любинская Н.В., Нечаев И.Л., Семенихин С.А., Заяв.: № 2017142943, 08.12.2017. Опубл.: 23.08.2018 Бюл. № 24.

Другие публикации:

6. Богатый А.В., Дьяконов Г.А., Марьяшин А.Ю., Нечаев И.Л. и др. Перспективы улучшения массогабаритных характеристик абляционных импульсных плазменных двигателей // Труды ВНИИЭМ «Вопросы электромеханики» 2013. Т. 133, №2. С. 19-26.

7. Богатый А.В., Дьяконов Г.А., Нечаев И.Л. Разработка двухступенчатого АИПД. // Сборник тезисов 9-ой международной конференции «Авиация и космонавтика – 2010». М., 2010. С. 192-193

8. Богатый А.В., Дьяконов Г.А., Нечаев И.Л. Разработка абляционного импульсного плазменного двигателя (АИПД) двухступенчатой схемы. // Научные труды 37-й международной молодёжной конференции «37 Гагаринские чтения» М., 2011. Т. 2. С.147-148

9. Богатый А.В., Дьяконов Г.А., Нечаев И.Л. Абляционный импульсный плазменный двигатель (АИПД) с разделённым механизмом ионизации и ускорения РТ. // Сборник тезисов 10-ой международной конференции «Авиация и космонавтика – 2011 М., 2011. С. 169-170

10. Богатый А.В., Дьяконов Г.А., Нечаев И.Л. Разработка абляционного импульсного плазменного двигателя с двухступенчатой схемой ускорения плазмы. // Материалы XXXV академических чтений по космонавтике. М., 2011. С. 113-114

11. Богатый А.В., Дьяконов Г.А., Нечаев И.Л. Абляционный импульсный плазменный двигатель с разделённым механизмом ионизации и ускорения рабочего тела. // Материалы XXXVI академических чтений по космонавтике. М., 2012. С. 102-103

12. Богатый А.В., Дьяконов Г.А., Нечаев И.Л. Абляционный импульсный плазменный двигатель (АИПД) с разделённым механизмом ионизации и

ускорения рабочего тела (РТ). // Сборник тезисов Московской молодёжной научно-практической конференции «Инновации в авиации и космонавтике» М., 2012. 51 с.

13. Богатый А.В., Дьяконов Г.А., Нечаев И.Л. Оценка путей улучшения массогабаритных характеристик абляционных импульсных плазменных двигателей (АИПД) // Материалы первой молодёжной конференции «Инновационная деятельность в науке и технике» М., 2012. 19 с.

14. Богатый А.В., Дьяконов Г.А., Нечаев И.Л. Оценка путей улучшения массогабаритных характеристик абляционных импульсных плазменных двигателей (АИПД). // Материалы XXXVII академических чтений по космонавтике. М., 2013. С. 106-107

15. Богатый А.В., Дьяконов Г.А., Нечаев И.Л. Пути повышения удельных характеристик абляционных импульсных плазменных двигателей. // Сборник тезисов 12-ой международной конференции «Авиация и космонавтика – 2013» М., 2013. С. 361-362