



Богатый Александр Владимирович

ЭЛЕКТРОМАГНИТНЫЙ АБЛЯЦИОННЫЙ ИМПУЛЬСНЫЙ
ПЛАЗМЕННЫЙ ДВИГАТЕЛЬ ДЛЯ МАЛЫХ КОСМИЧЕСКИХ
АППАРАТОВ

Специальность 05.07.05 - «Тепловые, электроракетные двигатели и
энергоустановки летательных аппаратов»

АВТОРЕФЕРАТ

диссертация на соискание учёной степени
кандидата технических наук

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

Научный руководитель: профессор, доктор технических наук, академик РАН

Попов Гарри Алексеевич

Официальные оппоненты:

Семёнкин Александр Вениаминович, доктор технических наук, доцент, АО «ГНЦ РФ «Исследовательский центр имени М.В. Келдыша», заместитель генерального директора по космическим аппаратам и энергетике – начальник отделения

Казеев Михаил Николаевич, кандидат физико-математических наук, ФГБУ «Национальный исследовательский центр Курчатовский институт», начальник лаборатории

Ведущая организация:

Акционерное общество «Центральный научно-исследовательский институт машиностроения»

Защита состоится «23» декабря 2021 года в 15:00 на заседании диссертационного совета Д 212.125.08, созданного на базе ФГБОУ ВО «Московский авиационный институт (национальный исследовательский университет)» по адресу: 125993, г. Москва, 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/600/qhzalglmxw4jt87cziphzjlnbb2f1n08//DISSERTATSIYA-ktn-Bogatyuy-AV.pdf>

Автореферат разослан « ____ » _____ 2021 г.

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

Зуев Юрий Владимирович

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы диссертации. В настоящее время идёт активное развитие направления малых (менее 500 кг согласно международной классификации) космических аппаратов (МКА), пригодных для выполнения широкого круга задач, которые до недавнего времени были доступны лишь для космических аппаратов (КА), обладающих значительными массами (более 500 кг). Данная тенденция объясняется новыми достижениями в микроэлектронике, появлением новых материалов и технологий, а также быстро растущим «потреблением информации»: интернет, телекоммуникации, данные о Земле (метеорология, картография) и прочее.

Снижение массово-габаритных характеристик КА позволяет выводить на околоземную орбиту одной ракетой-носителем одновременно от нескольких единиц до десятков МКА (в зависимости от массогабаритных параметров). Это могут быть МКА как функционирующие независимо друг от друга, и решающие различные задачи, так и аппараты, работающие совместно, составляющие распределенную организованную структуру, позволяющую решать задачи, недоступные одиночным КА.

Многие задачи, ставящиеся перед МКА, не могут быть решены без использования в системе управления движением двигательной установки (ДУ). Одиночным аппаратам, функционирующим на орбитах 250-500 км, ДУ необходимы для парирования сопротивления набегающего потока. В случае построения группировки МКА, двигательные установки необходимы для поддержания взаимного положения аппаратов. Часть аппаратов группировки может использоваться в качестве «холодного резерва», и вводиться в эксплуатацию по мере выхода из строя действующих аппаратов. Такое решение позволяет существенно снизить стоимость создания аппарата за счет снижения требований надежности. Однако, в этом случае встает вопрос увода с рабочих орбит МКА, отработавших свой ресурс или вышедших из строя, на орбиту захоронения, либо затопления. Для решения этой задачи также необходимо использование ДУ.

Задача по сведению аппарата с орбиты для затопления, либо перевод на орбиту захоронения требует значительного суммарного импульса тяги, величина которого на порядок может превышать значения, необходимые для выполнения целевой задачи в течение назначенного срока эксплуатации.

Наиболее подходящими для использования в составе ДУ являются электрические ракетные двигатели (ЭРД). Обладая удельным импульсом тяги, в несколько раз превышающим возможности ЖРД, ЭРД позволяют решать задачи обеспечения требуемых затрат характеристической скорости с использованием существенно меньшего количества топлива. Проигрывая в тяге, ДУ с ЭРД значительно выигрывают в полной массе, что является существенным фактором при выборе типа корректирующей ДУ (КДУ) для МКА с массами до 500 кг и сроком активного существования масштаба 5-8 лет.

Электроракетные двигательные установки (ЭРДУ) для МКА должны удовлетворять следующим требованиям:

- малая потребляемая мощность (от единиц до 200 Вт);
- возможность регулирования тяги и потребляемой мощности в широких пределах без снижения эффективности рабочего процесса;
- высокая надежность;
- относительно низкая стоимость разработки и изготовления.

Суммарный импульс тяги ЭРДУ должен обеспечивать выполнение космическим аппаратом целевой функции, а также, при необходимости, увод его с орбиты после завершения срока активного существования. Одним из типов ЭРД, удовлетворяющих указанным требованиям, являются абляционные импульсные плазменные двигатели (АИПД).

Актуальность темы исследования обусловлена необходимостью создания электроракетных двигательных установок мощностью менее 200 Вт для МКА, предназначенных для решения ряда важных задач, требующих высокоточные малые импульсы тяги при значительных значениях суммарного импульса тяги.

Степень разработанности темы диссертации

В настоящее время вопросам исследования АИПД и развития их конструкций посвящен довольно большой ряд экспериментальных, расчетно-теоретических и обзорных работ. В России и за рубежом создан ряд АИПД, в том числе доведенных до стадии летных испытаний, разработаны основные принципы их конструирования и методики их расчета. Тем не менее, во всех упомянутых работах подчеркивается необходимость дальнейшего совершенствования рабочих процессов в АИПД с целью улучшения массогабаритных характеристик, повышения удельных параметров, что позволит существенно расширить область применения ЭРДУ с АИПД в составе малых космических аппаратов.

Объектом исследования является электромагнитный АИПД с энергией разряда свыше 40 Дж.

Предметом исследования является начальная стадия развития электрического разряда в АИПД и её влияние на геометрию разрядного канала и тягово-энергетические характеристики АИПД.

Целью работы является повышение тягово-энергетических характеристик и уменьшение карбонизации аблируемых поверхностей рабочего тела электромагнитного абляционного импульсного плазменного двигателя.

Для достижения поставленной цели в работе были решены следующие **задачи**:

1. Выполнены экспериментальные и расчётно-теоретические исследования начальной стадии электрического разряда, тягово-энергетических характеристик и рабочих процессов электромагнитного АИПД.
2. Выполнены экспериментальные исследования условий возникновения карбонизации аблируемых поверхностей рабочего тела электромагнитного АИПД и разработать решения, предотвращающие карбонизацию и повышающие тягово-энергетические характеристики электромагнитного АИПД.

3. Получено экспериментальное подтверждение предотвращения карбонизации аблируемых поверхностей рабочего тела и повышения тягово-энергетических характеристик электромагнитных АИПД.

Научная новизна результатов исследований состоит в том, что впервые:

1. Установлен характер влияния предпробойных («темновых») процессов начальной стадии разряда на развитие электрического разряда и форму аблируемых поверхностей рабочего тела электромагнитных АИПД и разработана математическая модель темновой стадии разряда электромагнитного АИПД.
2. Разработан способ борьбы с карбонизацией и повышения тягово-энергетических характеристик электромагнитных АИПД посредством изменения в процессе работы расстояния между аблируемыми поверхностями рабочего тела, на который получен Патент РФ.
3. Разработана и реализована геометрия разрядного канала, позволяющая предотвратить карбонизацию аблируемых поверхностей рабочего тела и обеспечивающая повышение тягово-энергетических характеристик электромагнитных АИПД, на которую получен Патент РФ.

Теоретическая и практическая значимость результатов исследований

1. Разработан способ предотвращения карбонизации в электромагнитных АИПД посредством изменения расстояния между аблируемыми поверхностями рабочего тела в процессе работы, позволяющий создавать двигатели с регулируемыми тягово-энергетическими характеристиками при постоянной потребляемой мощности.
2. Создана научно-теоретическая основа для разработки физико-математической модели расчёта геометрии разрядного канала электромагнитного АИПД, учитывающей начальную стадию разряда, что приведёт к значительному сокращению времени разработки новых АИПД за счёт существенного снижения времени «приработки» рабочего тела.
3. Разработана и апробирована геометрия разрядного канала, предотвращающая карбонизацию аблируемых поверхностей рабочего тела

и повышающая тягово-энергетические характеристики электромагнитных АИПД. Применение разрядного канала разработанной геометрии в экспериментальном образце ЭРДУ АИПД-250 позволило повысить удельный импульс тяги на 9% и снизить цену тяги на 4%, в опытном образце для предварительных испытаний АИПД-95М (разработки АО «НИИЭМ» для КА «Ионосфера-М») повысить суммарный импульс тяги на 20%, среднюю тягу на 15% и предотвратить карбонизацию аблируемых поверхностей рабочего тела.

Методология и методы исследования

В исследовании применялись экспериментальные методы и методы математического моделирования. Экспериментально определялись осциллограммы разрядного тока и тягово-расходные характеристики лабораторных образцов АИПД. Проводились экспериментальные исследования рабочих процессов АИПД оптическими методами, в том числе спектроскопическими, интерферометрическими методами, методом магнитозондовой диагностики, и методами сверхскоростной фоторегистрации. Характеристики тягоизмерительного устройства и начальная («темновая») стадия разряда анализировались с помощью специально разработанных математических моделей реализованных в среде аналитических вычислений MAPLE 12.

Вклад автора в проведенное исследование

Основные положения диссертации получены лично автором, либо при непосредственном его участии, что подтверждено публикациями. В частности, соискатель самостоятельно выполнил следующие работы:

- проведен анализ современного состояния исследований ЭРД, предназначенных для малых космических аппаратов;
- обоснованы преимущественные области применения АИПД;
- сформулированы наиболее важные проблемы, требующие решения на современном этапе развития АИПД;
- рассмотрены различные варианты тягоизмерительных устройств, определены ТИУ, пригодные для экспериментальных исследований и испытаний АИПД;

- создано усовершенствованное тягоизмерительное устройство для АИПД со сниженным уровнем помех в регистрируемом сигнале;
- экспериментально исследовано влияние конфигурации и температуры поверхностей разрядного канала АИПД на процессы карбонизации шашек плазмообразующего вещества;
- проведены экспериментальные исследования рабочих процессов АИПД, в особенности в начальной стадии разряда оптическими методами диагностики;
- выявлена зависимость между начальной стадией разряда и конфигурацией разрядного канала АИПД;
- предложен модернизированный по результатам исследований разрядный канал АИПД новой геометрии;
- сформулированы и внедрены рекомендации для модернизации ЭРДУ АИПД-250 и АИПД-95М, позволившие улучшить их характеристики.

Положения, выносимые на защиту

В ходе проведения диссертационного исследования автором впервые в отечественной практике были разработаны следующие основные положения, выносимые на защиту:

- математическая модель темновой стадии разряда, результаты расчётов и их сравнения с результатами экспериментов;
- способы предотвращения карбонизации и повышения тягово-энергетических характеристик электромагнитных АИПД при постоянной потребляемой мощности;
- геометрия разрядного канала, предотвращающая карбонизацию аблируемых поверхностей рабочего тела электромагнитных АИПД.

Степень достоверности полученных результатов подтверждается:

- - обоснованным выбором существующих методик измерений и физико-математических моделей рабочих процессов;
- - соответствием измеренных характеристик расчётным значениям;
- - непротиворечивостью аналогичным результатам других авторов;

- - результатами неоднократного обсуждения положений и выводов по итогам работы на отечественных и международных конференциях, совещаниях с участием специалистов-экспертов.

Апробация результатов работы

Основные результаты работы обсуждались на семинарах НИИ ПМЭ МАИ и каф. 208 МАИ, а также докладывались на российских и международных конференциях:

1) 7-ая Международная конференция «Авиация и космонавтика — 2008» (Москва, Россия, 2008 г. Исследование распределения концентрации электронов в разряде абляционного импульсного плазменного двигателя);

2) 3d International European Conference for Aerospace Science (Версаль, Франция. 6-9 июля 2009. Research of laboratory small forces measurement system);

3) 10-я Международная конференция «Авиация и космонавтика — 2011» (Москва, Россия, 2011 г. The ablative pulsed plasma thruster (APPT) with the divided mechanism of plasma ionization and acceleration);

4) IX Международная конференция по неравновесным процессам в соплах и струях (NPNJ 2012) (Украина, Алушта, 25 – 31 мая 2012 г. Особенности создания и применения абляционных импульсных плазменных двигателей в составе систем управления движением малых и сверхмалых космических аппаратов);

5) 15-я Международная конференция "Авиация и космонавтика" (Москва, Россия, 2016 г. Разработка абляционных импульсных плазменных двигателей нового поколения);

6) 69th International Astronautical Congress (IAC) (Bremen, Germany, 1-5 October 2018. Development of electric propulsion thrusters for small spacecraft in RIAME MAI);

7) The 7th Russian-German Conference on Electric Propulsion and Their Application (Германия, Гиссен, 2018. 1) Electric Propulsion Thrusters of Next Generation Developed at RIAME MAI for Small Satellites. 2) Investigation of the initial stage of the electric discharge along the surface of the consumable dielectric in an ablative pulsed plasma thruster with a lateral feed of the propellant);

8) XLIV Академические чтения по космонавтике (Москва, Россия, 2020 г. Выбор системы измерения тяги импульсного источника плазмы);

9) 19-я Международная конференция «Авиация и космонавтика» (Москва, Россия, 2020 г. Разработка и испытания ЭРД малой мощности для МКА ДЗЗ на основе абляционного импульсного плазменного двигателя).

Публикации

По теме диссертации опубликовано 17 работ, из них в рецензируемых научных изданиях опубликовано 15 работ, получено 2 патента на изобретения.

Объем и структура работы

Работа представляет собой рукопись объемом 159 страниц печатного текста, включая 120 рисунков, 16 таблиц, а также 102 библиографические ссылки. Она включает в себя введение, четыре главы, заключение, список сокращений и условных обозначений, а также список литературы.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Введение посвящено обоснованию актуальности тематики диссертационного исследования. Определены цели и задачи исследования, показаны научная новизна, теоретическая и практическая значимость работы. Сформулированы положения, выносимые на защиту, указан личный вклад соискателя в исследования, положенные в основу диссертационной работы.

Первая глава диссертации посвящена обзору истории развития и современного состояния импульсных плазменных двигателей (ИПД). Рассмотрены существующие типы стационарных и импульсных электроракетных двигателей и обоснованы преимущественные области применения ИПД, в частности для управления орбитальным движением малых космических аппаратов. Проведен обзор различных типов ИПД, использующих твердые, жидкие и газообразные плазмообразующие вещества. Наиболее обстоятельно рассмотрены абляционные импульсные плазменные двигатели, получившие наибольшее распространение в России, и их зарубежные аналоги. Показаны способы улучшения характеристик АИПД и возникающие при этом проблемы, в частности проблема карбонизации

шашек плазмообразующего вещества. Показана важность исследования начальной стадии разряда, дающего ключ к решению указанной проблемы. Сформулированы цели и задачи диссертационного исследования.

Во **второй главе** описана стендовая база НИИ ПМЭ МАИ для исследования АИПД и ее модернизация автором диссертационной работы. Проведен анализ применимости тягоизмерительных устройств различного типа. Определен рациональный тип тягоизмерительного устройства для измерения средней тяги АИПД – маятниковый тягомер прямого действия. Разработана математическая модель тягомера данного типа, обосновывающая достоверность измерения средней тяги АИПД. Создано усовершенствованное автором тягоизмерительное устройство, отличающееся сниженным уровнем помех в регистрируемом сигнале. Рассмотрены также используемые в работе способы исследования локально-временных характеристик АИПД и его систем оптическими методами, в частности спектроскопическими, интерферометрическими и методами высокоскоростной фоторегистрации. Приведены оценки погрешности измерений при экспериментальных исследованиях АИПД.

Третья глава посвящена экспериментальному и расчетно-теоретическому исследованию процессов развития разряда и ускорения плазмы в АИПД. Применены следующие экспериментальные методы:

- интерферометрическое исследование распределения концентрации электронов в разрядном канале АИПД;
- спектроскопические исследования развития разряда, концентрации и температуры электронов в АИПД;
- исследование распределения плотности тока в разрядном канале АИПД методом магнитозондовой диагностики;
- высокоскоростная фоторегистрация развития разряда, в особенности в его начальной стадии.

Проведённые исследования распределения концентраций заряженных частиц, плотности тока в разрядном канале исследуемого АИПД с энергией разряда 55 Дж показали, удовлетворительное согласование ввода массы и энергии в разрядный

канал, соответствующее по своему характеру электромагнитным АИПД с энергиями разряда от 40 Дж до 150 Дж, у которых соотношение емкости и начальной индуктивности разрядного контура близко к оптимальному (Пат. 2253953 Российская федерация, МПК H05H1/54, F03H1/00. Импульсный плазменный ускоритель и способ ускорения плазмы / Антропов Н.Н., Дьяконов Г.А., Орлов М.М., Попов Г.А., Тютин В.К., Яковлев В.Н., заявитель и патентообладатель НИИ ПМЭ МАИ. – № 2003128090/06, заявл. 22.09.2003, опубл. 10.06.2005, Бюл. №16.).

На рис. 1 показаны пять последовательных кадров высокоскоростного фоторегистратора, которые охватывают промежуток времени разряда макета АИПД-95 с энергией разряда 155 Дж длительностью 500 нс – длительность искровой стадии разряда, время экспозиции каждого кадра 100 нс. Токовая привязка, которую становится видно на искровой стадии разряда, формируется под определённым для каждой конкретной модели АИПД углом к поверхностям электродов. Угол развития разряда не изменяется в процессе разряда, и зависит от электрических параметров разрядной цепи и геометрических параметров разрядного канала.

Отмечена зона, находящаяся вблизи торцевого изолятора и анода, которая в процессе всего разряда остается практически не заполненной плазмой. В случае начала процесса карбонизации, в этой зоне на аблируемых поверхностях шашек в первую очередь возникает карбонизация.

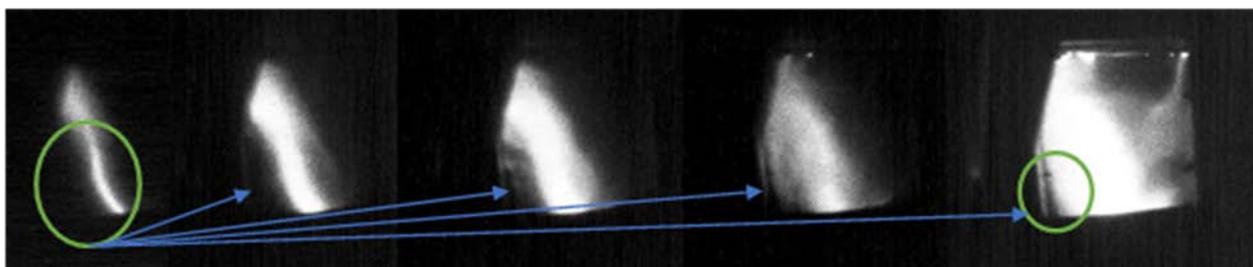


Рис. 1. Изображение развития искровой стадии разряда в разрядном канале макета АИПД-95.

Разработана и исследована математическая модель движения заряженных частиц на начальной стадии разряда в канале АИПД. На рис. 2 показано достаточно хорошее совпадение результатов расчёта траектории движения электронов и формы токовой привязки в разрядном канале.

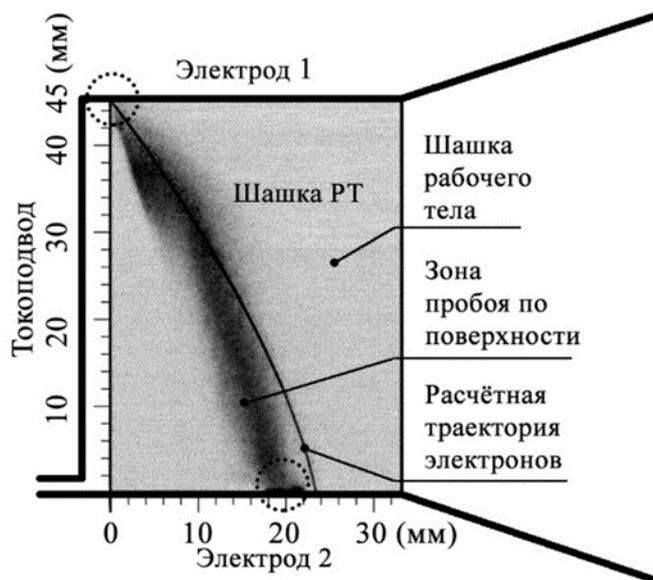


Рис. 2. Изображение расчетной траектории движения электронов на искровой стадии АИПД-95, наложенной на изображение, полученное высокоскоростной фотосъемкой

С учетом результатов высокоскоростной фоторегистрации развития разряда, а также математического моделирования движения заряженных частиц на его начальной стадии, экспериментально исследованы условия возникновения карбонизации аблируемых поверхностей разрядного канала АИПД. Показано, что карбонизация отсутствует, если угол наклона торцевого изолятора разрядного канала соответствует углу наклона токовой привязки на начальной стадии разряда. При соблюдении этого условия отпадает необходимость в глубокой форкамере торцевого изолятора.

Введено понятие «точка карбонизации», означающее расстояние между аблируемыми поверхностями рабочего тела, превышение которого приводит началу карбонизации. Показано, что температура аблируемых поверхностей рабочего тела не оказывает влияния на процессы карбонизации.

Автором впервые экспериментально было установлено, что работа электромагнитного АИПД без карбонизации возможна при расстоянии между аблируемыми поверхностями рабочего тела, превышающем «точку карбонизации», в случае раздвижения шашек в процессе работы. Изменение расстояния между шашками РТ в процессе работы двигателя позволило решить задачу управления интегральными параметрами: удельным импульсом тяги, единичным импульсом тяги (варьировать тягу при постоянной мощности), а также решить проблему науглероживания при располагаемой мощности ниже расчетной, данный способ был защищён патентом РФ на изобретение №2452142 [93].

В **четвертой главе**, посвященной практическому применению результатов проведенных исследований, проведен анализ влияния конструкции разрядного канала на работоспособность и характеристики АИПД. Разработан усовершенствованный разрядный канал с торцевым изолятором и форкамерой нового типа.

Форкамера, представляющая собой некоторый свободный объем в торцевом изоляторе, в котором устанавливается свеча поджига разряда, была предложена в НИИ ПМЭ МАИ еще в самом начале развития схемы рельсотрона с боковой подачей плазмообразующего вещества для борьбы с карбонизацией рабочих поверхностей шашек. Глубина форкамеры зависит от длительности начальной стадии разряда: чем продолжительнее разряд, тем большая требуется глубина форкамеры, чтобы на срез шашек рабочего тела выходил уже сформировавшийся разряд, способный обеспечить на поверхности шашек необходимый для эффективной абляции поток лучистой энергии. Применение форкамеры позволило решить проблему карбонизации и создать первые работоспособные образцы АИПД с боковой подачей плазмообразующего вещества. Вместе с тем, было известно, что слишком большая глубина форкамеры приводит к завышенной начальной индуктивности разрядного контура, что негативно сказывается на электродинамическом к.п.д. процесса ускорения плазмы.

Позднее было обнаружено, что торцевой изолятор и форкамера с вертикальными стенками не гарантируют от карбонизации участков шашек

рабочего тела, примыкающих к аноду. Был предложен торцевой изолятор с наклонными стенками. Чтобы значительно не увеличивать глубину форкамеры, угол наклона стенки торцевого изолятора первоначально был принят небольшим - 5° к вертикали.

Таким образом, сложилась типовая для АИПД 2000-х годов конфигурация торцевого изолятора, пример которой показан на рис. 3. На рисунке видно, что торцевой изолятор имеет форму сегмента усеченного конуса высотой h с углом наклона образующей к вертикали $\delta=5^\circ$. Форкамера образована полуцилиндром с вертикальными стенками, таким образом, глубина форкамеры a вблизи катода равна ее полуширине $\frac{1}{2}b$, а вблизи анода $a=\frac{1}{2}b+h\cdot\text{tg } \delta$.

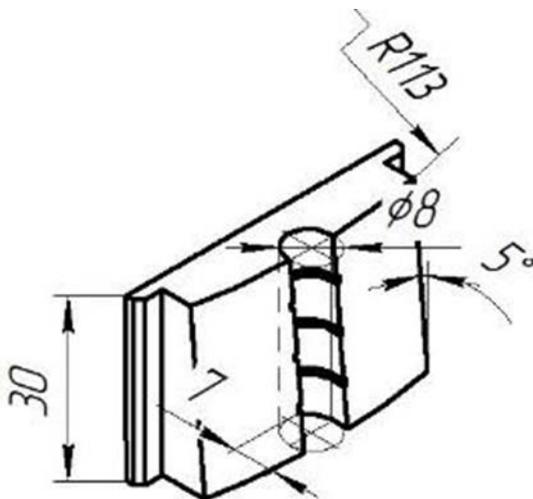


Рис. 3. Торцевой изолятор АИПД-45-2 (энергия разряда $W\sim 60$ Дж, $h=30$ мм, $\delta=5^\circ$, $b=8$ мм, $a=4\dots 7$ мм)

Экспериментальные и расчетно-теоретические исследования начальной стадии разряда в АИПД, приведенные в главе 3, показали, что первоначальный пробой разрядного промежутка происходит под углом к вертикали, близким к 15° . Если придать соответствующий угол наклона торцевому изолятору, то карбонизация шашек рабочего тела не наблюдается даже при полном отсутствии форкамеры. Это позволит увеличить электродинамический к.п.д. процесса ускорения плазмы, избежав потери энергии в объеме форкамеры. Кроме того, уменьшение опасности карбонизации шашек дает возможность увеличить расстояние между шашками, тем самым уменьшить плотность плазмы и, как следствие, увеличить скорость ее

истечения. Это позволит повысить удельный импульс тяги двигателя при неизменной площади рабочей поверхности шашек, либо при сохранении удельного импульса тяги увеличить площадь рабочей поверхности шашек и, как следствие, повысить массу запасаемого рабочего тела и суммарный импульс тяги двигателя. Вместе с тем, эксперименты на лабораторных моделях АИПД показали, что форкамера совсем небольшой глубины, 1...2 мм, все же полезна, так как позволяет точно зафиксировать положение ребра между задней и торцевой (рабочей) гранями шашки рабочего тела.

Как результат проведенных работ, автором была предложена новая конфигурация торцевого изолятора, пример которой для той же энергии разряда $W \sim 60$ Дж приведен на рис. 4. Угол наклона образующей конической поверхности торцевого изолятора к вертикали увеличен с 5° до 15° , форкамера повышенной ширины имеет минимальную глубину и наклонена к вертикали под тем же углом.

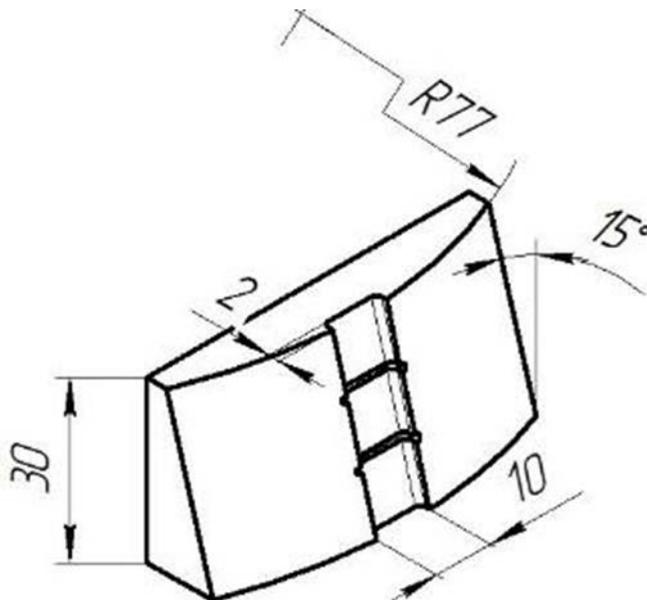


Рис. 4. Торцевой изолятор АИПД-250 и АИПД-350
(энергия разряда $W \sim 50 \dots 60$ Дж, $h=30$ мм, $\delta=15^\circ$, $b=10$ мм, $a=2$ мм)

Схема разрядного канала ЭРДУ АИПД-250, а также АИПД-350, с торцевым изолятором нового типа представлена на рис. 5.

Наземные испытания АИПД-250 были проведены в 2017 г. Результаты испытаний, и для сравнения, характеристики лётного образца предыдущего поколения ЭРДУ АИПД-45-2, приведены в табл. 1.

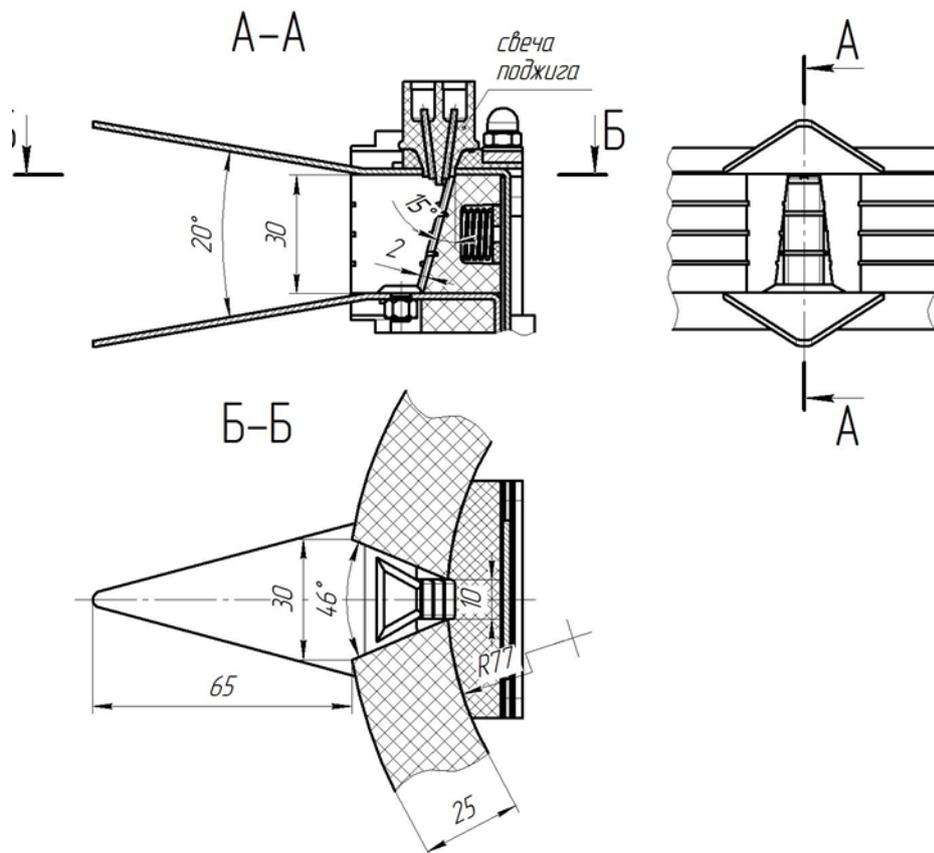


Рис. 5. Схема разрядного канала АИПД-250 и АИПД-350

Табл. 1. Сравнительные характеристики ЭРДУ АИПД-45-2 и АИПД-250

Тип ЭРДУ	АИПД-45-2	АИПД-250
Энергия разряда, Дж	55	62
Потребляемая мощность, Вт	75...150	60...120
Ресурс по запасу рабочего тела, ч	3860	3600
Удельный импульс тяги, м/с	11000	12000
Средняя тяга, мН	1,45...2,9	1,2...2,4
Суммарный импульс тяги, кН·с	20	15,6
Масса вырабатываемого рабочего тела, кг	1,8	1,3
Полная масса ЭРДУ с запасом рабочего тела, кг	10,5	8,2
Цена тяги, Вт/мН	52	50
Отношение тяги к массе ЭРДУ, мкН/кг	274	296
Эффективный удельный импульс тяги, м/с	1900	1900

Из табл. 1 следует, что при приблизительно той же энергии разряда удельный импульс тяги двигателя нового поколения увеличился с 11000 м/с до 12000 м/с, что можно объяснить только лучшей организацией рабочего процесса, в частности лучшим использованием ускорения плазмы в начальной стадии разряда.

АИПД большой энергии разряда ($W > 100$ Дж) получили меньшее распространение, так как в своей области тяги и потребляемой мощности (150 В и более) вступают в конкуренцию с успешно развивающимися стационарными плазменными и ионными двигателями, такими как, например, стационарные плазменные двигатели холловского типа (СПД) и ионные двигатели. Примером АИПД большой энергии разряда является АИПД-95, разрабатываемый НИИЭМ совместно с НИИ ПМЭ МАИ для МКА научного назначения «Ионосфера».

Испытания АИПД-95, проведенные на стендовой базе НИИ ПМЭ МАИ, показали, что тяговые и расходные характеристики ЭРДУ в основном соответствуют техническому заданию, но наблюдается карбонизация рабочих и задних поверхностей шашек, приводящая к периодическому пробою разрядного контура.

В 2018 г. началась разработка модернизированных МКА «Ионосфера-М» и двигательной установки для него АИПД-95М. При разработке модернизированного варианта заказчиком было выдвинуто требование по повышению суммарного импульса тяги с 50 кН·с до 60,5 кН·с с целью обеспечения увода аппарата с орбиты по истечении срока его активного существования. Для выполнения этого требования при модернизации АИПД-95 с целью увеличения запаса рабочего тела площадь поперечного сечения шашек была увеличена 15,3 см² до 18,0 см². Указанная доработка могла привести к дальнейшему обострению проблемы карбонизации, так при увеличении площади рабочих поверхностей шашек плотность падающей на них лучистой энергии неизбежно падет. Учитывая это обстоятельство, а также результаты испытаний АИПД-95, в НИИ ПМЭ МАИ при участии автора были выработаны рекомендации по доработке разрядного канала ЭРДУ АИПД-95:

В соответствии с рекомендациями НИИ ПМЭ МАИ в 2019 г. НИИЭМ был разработан и изготовлен модернизированный вариант ЭРДУ АИПД-95М с торцевым изолятором и форкамерой нового типа.

Результаты проведенных в 2020-21 гг. в НИИ ПМЭ МАИ наземных испытаний модернизированной ЭРДУ АИПД-95М и, для сравнения, предыдущего образца АИПД-95 приведены в табл. 2.

Табл. 2. Сравнительные характеристики ЭРДУ АИПД-95 и модернизированной ЭРДУ АИПД-95М

Тип ЭРДУ	АИПД-95	АИПД-95М
Энергия разряда, Дж	155	155
Потребляемая мощность, Вт	170	180
Удельный импульс тяги, м/с	13100	13600
Средняя тяга, мН	2,6	3,0
Суммарный импульс тяги, кН·с	50	60,5
Масса вырабатываемого рабочего тела, кг	3,3	4,5
Полная масса ЭРДУ с запасом рабочего тела, кг	20	20,63

Из табл. 2 следует, что требование заказчика по увеличению суммарного импульса тяги АИПД-95 было успешно выполнено. При этом удалось решить проблему карбонизации рабочих поверхностей шашек рабочего тела, что объясняется соответствием угла наклона торцевого изолятора разрядного канала углу наклона токовой привязки на начальной стадии разряда.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Диссертация выполнена при поддержке гранта Правительства Российской Федерации, выделяемого из федерального бюджета для государственной поддержки научных исследований, проводимых под руководством ведущих ученых в российских образовательных организациях высшего образования, научных учреждениях и государственных научных центрах Российской Федерации (VII очередь, постановление Правительства РФ №220 от 09.04.2010). Соглашение №075-15-2019-1894 от 03.12.2019.

По результатам выполненной работы можно сделать следующие **выводы:**

1. Проведен анализ текущего состояния разработок, тенденций развития и областей применения АИПД. Сформулированы основные проблемы АИПД, требующие решения.

2. Произведён анализ существующих типов ТИУ, пригодных для измерения тяг ЭРД, в результате которого сделан обоснованный выбор типа ТИУ для использования в ходе экспериментальных исследований. Разработано усовершенствованное ТИУ со сниженным уровнем помех в регистрируемом сигнале, позволившее провести достоверные измерения тяг испытанных АИПД. Разработана математическая модель ТИУ струнного типа, подтвердившая достоверность измерения тяги, создаваемой АИПД.

3. Проведены исследования развития разряда в разрядном канале АИПД с электромагнитным механизмом ускорения посредством оптических и магнитозондовых измерений, а на начальной стадии разряда, посредством использования высокоскоростной фотосъемки, позволившей впервые зафиксировать зарождение и развитие искровой стадии разряда, определяющей угол развития дуговой стадии разряда, что позволило выявить зависимость между начальной стадией разряда и конфигурацией разрядного канала АИПД.

4. Приближенная математическая модель начальной (предпробойной) стадии разряда АИПД подтвердила основные результаты экспериментальных исследований.

5. Проведено исследование условий возникновения карбонизации рабочих поверхностей шашек РТ, в результате которого установлено отсутствие заметного влияния температуры шашек на процессы карбонизации, определено критическое расстояние, при котором возникает карбонизация, отмечена важность учёта фактора «остаточной атмосферы» в разрядном канале, а также выработаны рекомендации по доработке разрядного канала КДУ АИПД-95.

6. Проведены исследования влияния конструкции разрядного канала на характеристики АИПД, в результате которых определена оптимальная длина электродов, разработана новая конструкция торцевого изолятора, позволившая увеличить удельный импульс тяги лабораторной модели АИПД-70 на 20%.

7. Полученные результаты исследования апробированы на ЭРДУ АИПД-250 и КДУ АИПД-95. Применение в конструкции ЭРДУ АИПД-250 разработанного торцевого изолятора позволило повысить удельный импульс тяги на 9%, снизить цену тяги на 4%. Применение в конструкции КДУ АИПД-95 разработанного торцевого изолятора позволило при сохранении габаритов разрядного канала и ЭРДУ в целом повысить суммарный импульс тяги на 20%, среднюю тягу на 15% при сохранении удельного импульса тяги и предотвратить карбонизацию аблируемых поверхностей рабочего тела.

СПИСОК ПУБЛИКАЦИЙ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ

Публикации в рецензируемых научных изданиях и изданиях, приравненных к ним

1. Antipov A.A., Bogatyu A.V. Simulation of the motion of charged particles in an ablative pulsed plasma thruster at the initial stage of the discharge // *Procedia Engineering*. 2017. Vol. 185. P.61-68. doi:10.1016/j.proeng.2017.03.292.
2. Antropov N.N., Bogatyu A.V., Boykachev V.N., Dyakonov G.A., Lyubinskaya N.V., Popov G.A., Semenikhin S.A., Tyutin V.K., Yakovlev V.N. Development of Russian Next-Generation Ablative Pulsed Plasma Thrusters // 6th Russian-German Conference on Electric Propulsion and Their Application / *Procedia Engineering*. 2017. Vol. 185. P.53-60. doi:10.1016/j.proeng.2017.03.291.
3. Antipov A.A., Bogatyu A.V., Semenov A.A. Investigation of the Initial Stage of the Discharge in an Ablative Pulsed Plasma Thruster // *Journal of Surface Investigation X-ray Synchrotron and Neutron Techniques*. 2018. 12(5). p. 1037–1040. doi:10.1134/S1027451018050208.
4. Bogatyi A.V., Dyakonov G.A., Elnikov R.V., Popov G.A. Application of Low-Power Pulse Plasma Thrusters in Thrust Units of Small Spacecrafts // *Applied Mathematics and Computational Mechanics for Smart Applications. Smart Innovation, Systems and Technologies*. 2021. Vol. 217. P.141-154. doi:10.1007/978-981-33-4826-4_11.

5. Bogatyi A.V., Semenikhin S.A. Selection of the Thrust Measurement System for a Pulsed Plasma Thruster // XLIV ACADEMIC SPACE CONFERENCE: AIP Conference Proceedings. 2021. 2318, 040008. doi:10.1063/5.0035783.
6. Bogatyi A.V., Semenikhin S.A. Carburization of the Working Surfaces of Bars of a Plasma Pulse Source // Journal of Surface Investigation X-ray Synchrotron and Neutron Techniques. V. 15(1). P. 89-93. doi: 10.1134/S1027451021010067.
7. Антропов Н.Н., А.В. Богатый, Дьяконов Г.А., Орлов М.М., Попов Г.А., Тютин В.К., Яковлев В.Н. Разработка абляционных импульсных плазменных двигателей в НИИ прикладной механики и электродинамики // Космонавтика и ракетостроение. 2008. №3(52). С.28-34.
8. Антропов Н.Н., Богатый А.В., Дьяконов Г.А., Любинская Н.В., Попов Г.А., Семенихин С.А., Тютин В.К., Хрусталева М.М., Яковлев В.Н. Новый этап развития абляционных импульсных плазменных двигателей в НИИ ПМЭ // Вестник ФГУП «НПО им. С.А. Лавочкина». 2011. № 5. С. 30-40.
9. Богатый А.В., Дьяконов Г.А., Нечаев И.Л. Абляционный импульсный плазменный двигатель с разделенным механизмом ионизации и ускорением рабочего тела // Электронный журнал «Труды МАИ». 2012. №52. С. 20.
10. Антропов Н.Н., Дьяконов Г.А., Попов Г.А., Харламов В.С., Богатый А.В., Любинская Н.В., Даньшов Ю.Т., Нечаев И.Л., Семенихин С.А., Яковлев В.Н., Тютин В.К. Корректирующая двигательная установка с абляционным импульсным плазменным двигателем для малых космических аппаратов // Вестник ФГУП «НПО им. С.А. Лавочкина». 2013. № 5 (21). С. 33-37.
11. Богатый А.В., Дьяконов Г.А., Нечаев И.Л., Попов Г.А., Марьяшин А.Ю., Халапян К.Г. Перспективы улучшения массогабаритных характеристик абляционных импульсных плазменных двигателей // Труды НПП ВНИИЭМ «Вопросы электромеханики». 2013. Т.133. №2. С. 19-26.
12. Антипов А.А., Богатый А.В. Моделирование движения заряженных частиц в абляционном импульсном плазменном двигателе в начальной стадии разряда // Известия Российской академии наук. Энергетика. 2017. № 3. С. 42-49.

13. Богатый А.В., Ельников Р.В., Назаренко И.П., Попов Г.А., Семенихин С.А. Перспективные импульсные плазменные двигатели и их применение в составе двигательных установок малых космических аппаратов // Известия высших учебных заведений. Авиационная техника. 2018. № 3. С. 119-125.
14. Богатый А.В., Дьяконов Г.А., Любинская Н.В., Нечаев И.Л., Попов Г.А., Семенихин С.А., Тютин В.К., Яковлев В.Н. Современное состояние работ по созданию ЭРДУ с АИПД в НИИ ПМЭ МАИ // Известия Российской академии наук. Энергетика. 2019. № 3. С. 96-109.
15. Ахметжанов Р.В., Богатый А.В., Дьяконов Г.А., Ким В.П., Меркурьев Д.В., Любинская Н.В., Семенихин С.А., Спивак О.О., Попов Г.А. Электрические ракетные двигатели нового поколения для малых космических аппаратов // Известия Российской академии наук. Энергетика. 2019. №3. С. 3-13.
16. Пат. на изобретение 2452142 С1 Российская Федерация, МПК H05H 1/54, F03H 1/00, Способ работы импульсного плазменного ускорителя / Богатый А.В., Дьяконов Г.А.; заявитель и патентообладатель Федеральное государственное бюджетное Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования" Московский авиационный институт (национальный исследовательский университет)" (RU). — № 2010149145/07; заявл. 02.12.2010; опубл. 27.05.2012, Бюл. № 15.
17. Пат. на изобретение 2516011 С1 Российская Федерация, МПК F03H 1/00, H05H 1/54, Эрозионный импульсный плазменный ускоритель / Богатый А.В., Дьяконов Г.А., Попов Г.А.; заявитель и патентообладатель Федеральное государственное бюджетное Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования" Московский авиационный институт (национальный исследовательский университет)" (RU). — № 2012147328/07; заявл. 08.11.2012; опубл. 20.05.2014, Бюл. № 14.