



ул. Ленина, д. 52, г. Железногорск, ЗАТО Железногорск, Красноярский край, Российская  
Федерация, 662972

Тел. (3919) 76-40-02, 72-24-39, Факс (3919) 72-26-35, 75-61-46, e-mail: office@iss-reshetnev.ru,  
http: //www.iss-reshetnev.ru

ОГРН 1082452000290, ИНН 2452034898

### Отзыв

официального оппонента

кандидата технических наук **Ермошкина Юрия Михайловича**

на диссертационную работу **Нечаева Ивана Леонидовича**

«Исследование перспективных схем абляционного импульсного плазменного двигателя с  
повышенными характеристиками», представленную на соискание ученой степени  
кандидата технических наук по специальности 05.07.05 — «Тепловые, электроракетные  
двигатели и энергоустановки летательных аппаратов»

### Актуальность темы работы

Рост потребности в долгоживущих малых космических аппаратах (МКА) массой до 1000 кг повышает интерес разработчиков к использованию электрореактивных двигателей (ЭРД). При определенных условиях их применение позволяет снизить массу заправленной двигательной подсистемы за счёт сокращения запасов рабочего тела. Основными выходными параметрами ЭРД являются тяга, удельный импульс, ресурс. Дополнительно могут рассматриваться такие параметры, как энергетическая цена тяги и тяговый КПД. Из всего многообразия типов и разновидностей ЭРД в представленной работе рассматривается абляционный импульсный плазменный двигатель (АИПД) и двигательная система на его основе. АИПД могут найти применение для решения отдельных специальных задач, требующих выдачи точно дозированных и ограниченных по величине импульсов тяги. Двигательная система на базе АИПД состоит из следующих основных узлов: конденсаторной батареи, выполняющей роль накопителя энергии; электродов; торцевого изолятора; фторопластовых шашек рабочего тела (РТ) и свечи, инициирующей разряд.

Смешанный (тепловой и электромагнитный) механизм ускорения плазмы обеспечивает получение в АИПД удельного импульса тяги на уровне 15000 м/с, что является приемлемой величиной, обеспечивающей преимущество перед системами на

химическом топливе при достаточно больших величинах требуемого суммарного импульса.

Диссертационная работа Нечаева И.Л. посвящена совершенствованию АИПД, в том числе - экспериментальному исследованию новых конструктивных схем двигателя, магнитозондовой диагностики плазмы с помощью индуктивного зонда, а также фотодиагностике плазмы АИПД. Применяемые численные модели для оценки изменения параметров двигателя также необходимы для более детальной и точной картины происходящих изменений в процессах ускорения плазмы.

Полученные характеристики трёх образцов АИПД новых схем, а также результаты магнитозондовой диагностики АИПД с двойным обратным токоподводом, фотодиагностики плазмы в асимметричном разрядном канале свидетельствуют о высоком уровне проработки данного вопроса. Автор работы ставит себе основной целью повышение удельного импульса и тягового КПД, что и обуславливает научную актуальность темы диссертации.

Диссертация содержит введение, четыре главы содержательной части, заключение, список применяемых сокращений, а также список использованной литературы, содержащий 69 наименований. Текст диссертации на 166 страницах в достаточной мере проиллюстрирован.

### **Содержание работы**

Во введении автор формулирует актуальность, а также цели и задачи диссертационной работы, приводит основные положения, выносимые на защиту.

В первой главе автор привёл обзор принципов работы АИПД, в котором также остановился на истории развития концепции данного двигателя и путях его совершенствования. Отдельно им было уделено внимание проблемам теоретического описания рабочего процесса и экспериментального исследования двигателя. На основании анализа проблемных вопросов автором была сформулированная основная задача исследования — разработка способов улучшения удельных характеристик АИПД.

Во второй главе автором рассматриваются основные направления и способы решения поставленных задач. Оцениваются параметры лучших современных образцов АИПД, а также их основные недостатки, которые могут быть устранены.

В третьей главе, посвящённой экспериментальной части работы, автор подробно описывает объект исследования и экспериментальную установку, на которой изучались лабораторные модели АИПД. Описывается тягоизмерительное устройство, а также способы его поверки. При этом приводятся результаты испытаний лабораторного образца базового АИПД, с которыми сравнивались все полученные в дальнейшей работе данные.

Приводятся исследования модели с асимметричным разрядным каналом, а также её фотодиагностика.

Четвёртая глава посвящена исследованию моделей новой оригинальной конструкции - с двойным обратным токоподводом и двухступенчатой модели АИПД с одним общим электродом для обеих ступеней. Описывается магнитозондовая диагностика модели с двойным обратным токоподводом. Автор обосновывает на примере результатов, полученных в более ранних работах, применимость данных схем АИПД и их более высокую эффективность по сравнению с имеющимися образцами. Основной отличительной чертой магнитозондовой диагностики, приводимой автором, является проведение измерений без дополнительных средств аппаратной фильтрации в цепях регистрации искажений сигнала, что повышает достоверность регистрируемых параметров. В тексте приводятся результаты экспериментальных измерений в объеме разрядного канала АИПД в виде линейного набора точек, позволяющего достаточно подробно представить картину распределения величины магнитной индукции по длине разрядного канала. Для более ясного понимания величины положительного эффекта, достигаемого в данной модели, была создана ее модификация с аналогичными параметрами цепи (величиной индуктивности контура). Анализ полученных данных показал, что модель с двойным обратным токоподводом обладает повышенным удельным импульсом за счет удвоения величины тока и создаваемого им магнитного поля в зоне разряда, прилегающей к токоподводам. Также автором была создана новая модель двухступенчатого АИПД с характеристиками практически вдвое более высокими, чем на базовой модели с той же энергией импульса.

Полученные автором экспериментальные данные сравниваются с результатами других исследователей, при этом отмечается, что на момент начала работы лучшими характеристиками обладают отечественные аналоги.

На основе полученных экспериментальных данных автором были сформулированы рекомендации, позволяющие создать новую конструкцию АИПД, которая может послужить прототипом для отработочных и лётных моделей.

**Достоверность и обоснованность полученных автором результатов** диссертации обусловлена использованием корректных методик измерений, основанных на апробированных ранее подходах, проведением экспериментальных исследований на сертифицированном оборудовании. Автором проведено сравнение экспериментальных результатов работы с характеристиками лучших образцов современных АИПД. Применённая модель численного моделирования параметров двигателя верифицирована по результатам экспериментальных исследований. Учитывая всё вышесказанное,

результаты, выводы и рекомендации, приведённые в работе Нечаева И.Л. можно назвать достоверными и обоснованными.

### **Научная новизна результатов исследования**

В рамках диссертационной работы автором предложены три новые схемы АИПД: схема с асимметричным разрядным каналом, схема АИПД с двойным обратным токоподводом, схема двухступенчатого АИПД с одним общим электродом для двух ступеней. На всех трёх новых лабораторных моделях был получен более высокий удельный импульс тяги по сравнению с базовой моделью при фиксированных параметрах накопителя энергии и одинаковых размерах разрядного канала. На новой модели с двухступенчатой схемой ускорения был получен удельный импульс тяги, почти в два раза больший, чем на базовой модели АИПД в том же диапазоне энергий импульса.

### **Практическая значимость результатов исследования**

Автором была создано несколько лабораторных моделей АИПД, на которых получены более высокие удельные импульсы тяги по сравнению с более ранними моделями. При фиксированной массе рабочего тела это позволяет получить более высокие значения суммарного импульса, что создает возможности для расширения круга решаемых с помощью АИПД задач. Созданные модели АИПД с улучшенными характеристиками могут послужить прототипами для отработочных и летных моделей двигателей.

Результаты работы изложены в 15 публикациях, 3 в научных статьях журналов, рекомендованных ВАК, а также двух патентах на изобретение.

К диссертационной работе имеются и некоторые замечания. В частности:

1. Автором приведено большое количество однотипных графиков, характеризующих протекание разряда в двигателе. Целесообразно выявить общие закономерности и привести их для более наглядного представления результатов экспериментов.

2. В главе 4 приведена двухступенчатая конструкция двигателя. Для лучшего понимания особенностей ее работы целесообразно привести схему протекания токов, направления магнитного поля и приложенной к единице объема плазмы силы Ампера.

3. Недостаточно полно очерчена область возможного применения двигательных систем на базе АИПД, оценка их преимуществ и недостатков по сравнению с альтернативными вариантами на базе двигателей иных типов.

Отмеченные недостатки не снижают научной и практической ценности проведенного исследования, не влияют на общую положительную оценку диссертационной работы. Результаты работы Нечаева И.Л. могут быть использованы при

создании новых двигательных систем на базе абляционного импульсного плазменного двигателя. Автореферат отражает основное содержание диссертационной работы и полностью ей соответствует.

Диссертационная работа Нечаева И.Л. выполнена на высоком научном уровне, проведённое исследование отличается практической направленностью. Материал изложен грамотным техническим языком, ясно отражён личный вклад автора в результат исследования. Диссертация является законченной научно-квалификационной работой.

Рецензируемая диссертационная работа удовлетворяет требованиям Положения о присуждении ученых степеней, предъявляемым к кандидатским диссертациям. Изложенный в ней материал соответствует паспорту специальности 05.07.05 — «Тепловые, электроракетные двигатели и энергоустановки летательных аппаратов», а ее автор, Нечаев Иван Леонидович, заслуживает присуждение степени кандидата технических наук.

Начальник лаборатории проектирования и испытаний систем коррекции КА акционерного общества «Информационные спутниковые системы» имени академика М.Ф. Решетнёва, доцент, кандидат технических наук

 Ю.М. Ермошкин

Телефон: +7 (913) 519-27-77

Электронная почта: [erm@iss-reshetnev.ru](mailto:erm@iss-reshetnev.ru)

Подпись официального оппонента к.т.н. Ермошкина Юрия Михайловича удостоверяю.

Должность *Нач. отдела*

 **М. В. ЛАЗАРЕВ**  
подпись ОТДЕЛ ПО РАБОТЕ С ПЕРСОНАЛОМ ФИО  
