

## ОТЗЫВ

официального оппонента д.ф.-м.н. Кралькиной Елены Александровны  
на диссертационную работу Меркурьева Дениса Владимировича  
«Способы повышения тяговых характеристик стационарного плазменного двигателя на  
режимах работы с высокими удельными импульсами тяги»,  
представленную на соискание ученой степени кандидата технических наук по специальности  
05.07.05 – Тепловые, электроракетные двигатели и энергоустановки летательных аппаратов

Развитие космической техники, и в частности, проекты по освоению дальнего космоса ставят перед исследователями задачи повышения удельного импульса тяги и увеличения ресурса электроракетных двигателей. В нашей стране, где была предложена физическая идея построения стационарного плазменного двигателя (СПД), где были разработаны и активно используются летные модели СПД, естественно сконцентрировать усилия на создании модели СПД с повышенным удельным импульсом тяги. В связи с этим диссертационная работа Меркурьева Д.В., посвященная экспериментальному исследованию возможностей повышения тяговых характеристик стационарного плазменного двигателя на режимах работы с высоким удельным импульсом тяги, представляется весьма своевременной и актуальной.

Целью работы Меркурьева Д.В. является разработка способов повышения тяговых характеристик СПД на режимах с высоким удельным импульсом тяги и выявление особенностей работы СПД на указанных режимах. Основные идеи, заложенные в основу диссертации Меркурьева Д.В, состоят в использовании магнитного экрана, позволяющего оптимизировать магнитное поле в канале, положение и размер зоны ионизации и ускорения, а также в подаче на экран отрицательного смещения относительно анода с целью снижения разрядного тока. Это позволяет реализовать режимы СПД с оптимизированными характеристиками, в том числе с увеличенным удельным импульсом тяги. Диссертантом рассмотрены многочисленные следствия использования магнитного экрана. Полученные результаты указывают на широкий спектр возможностей оптимизации параметров СПД, однако, и на возникновение ряда сопутствующих проблем, пути решения которых также рассматриваются автором диссертации. Меркурьевым Д.В. рассмотрены и частично решены проблемы снижения эрозии стенок канала двигателя, преодоления затруднений в поджиге разряда в двигателе при низких расходах рабочего тела, исследована зависимость энергии ионов в радиальных потоках частиц в окрестности выходной плоскости двигателя и найдено

положение катода, сводящее к минимуму эрозию катода, возникающую при его бомбардировке ионами. Полученные в диссертации результаты и сравнение их с известными из литературных источников позволяет сделать вывод, что диссертационная работа Меркурьева Д.В. обладает несомненной научной новизной.

Практическая значимость работы состоит в разработке и создании лабораторных моделей двигателей СПД-100ПМ и СПД-140ПМ, способных работать как в одноступенчатом, так и двухступенчатом режимах с удельным импульсом тяги 30 и 35 км/сек соответственно при тяговом КПД, превышающем 50%.

Достоверность результатов, полученных Меркурьевым Д.В., подтверждается испытанием трех моделей СПД, выполненных как на стендах НИИПМЭ МАИ, так и ОКБ «Факел».

Диссертация Меркурьева Д.В. состоит из введения, четырех глав, заключения и списка цитированной литературы. Большая часть второй главы, а также третья и четвертая главы являются оригинальными.

Первая глава диссертации содержит анализ литературных данных, посвященных состоянию исследований в области СПД и, в частности, возможных перспектив и проблем, связанных с разработкой моделей с повышенным удельным импульсом тяги. В главе представлена общая характеристика современных электроракетных двигателей и СПД, выполнен обстоятельный критический обзор по исследованиям СПД с высоким удельным импульсом тяги. Особое внимание уделено рассмотрению проблем, возникающих при работе двигателей с повышенным разрядным напряжением. Кроме того, представлен обзор литературы, посвященной исследованию процессов в струе СПД, в частности изучению возникновения радиальных ионных потоков, которые могут распылять как элементы конструкции самого двигателя, так и космического аппарата. На основании обзора литературы, указав на наличие «белых пятен» в существующей базе данных и необходимость их заполнения с научной и практической точек зрения Меркурьевым Д.В. сформулированы цели и задачи диссертации.

Во второй главе представлены описание экспериментальной установки, основные методы исследования интегральных характеристик моделей, конструкция исследованных моделей, а также результаты исследований характеристик моделей СПД-100П и СПД-85П, включая высоковольтные режимы при малых расходах рабочего тела. Результаты, представленные во второй главе, являются базисом всей работы. Здесь описаны результаты многочисленных экспериментов по выбору и оптимизации положения магнитного экрана, его

размера, напряжения между экраном и анодом, влияния указанных параметров на тяговые характеристики. Полученные результаты показали перспективность выбранного подхода, а именно оптимизации магнитного поля в канале и использовании двухступенчатой схемы питания разряда для повышения тяговых характеристик рассмотренных моделей по сравнению с традиционными двигателями.

Важнейшей характеристикой электроракетного двигателя является его ресурс. В связи с этим в диссертационной работе выполнены эрозионные испытания оптимизированной модели двигателя СПД-100П, которые выявили снижение тяговых характеристик двигателя со временем за счет уширения выходной части ускорительного канала, а также появления на поверхности экрана порошкообразного материала.

В третьей главе описан комплекс мероприятий, выполненных диссертантом, по предотвращению негативных эффектов, выявленных на предыдущем этапе исследований, а также представлены результаты испытания модернизированных моделей двигателя СПД-100ПМ и СПД140ПМ с увеличенными удельным импульсом тяги и ресурсом. К наиболее интересным результатам, представленным в главе 3, стоит отнести, во-первых, смещение в исследованных моделях максимума магнитной индукции за плоскость наружного полюса, что приводит к выдвигению зоны ионизации и ускорения ионов за срез двигателя и обеспечивает защиту стенок газоразрядной камеры, увеличивая ресурс двигателя. Вторым интересным результатом является выяснение причины и решение проблемы затруднения поджига разряда при низких расходах рабочего тела.

Четвертая глава диссертации посвящена исследованию радиальных потоков ускоренных ионов вблизи выходной плоскости СПД. Необходимость указанного исследования диктуется проблемой защиты элементов катода от ионной бомбардировки, сопровождающейся эрозией катода. В главе показано, что в радиальных потоках ионов доминируют ионы с энергией 80 – 120 эВ, причем энергия ионов слабо зависит от приложенного разрядного напряжения. Для решения проблемы защиты катода от потоков ускоренных ионов Меркурьевым Д.В. найдена возможность изменения положения катода, сводящая к минимуму его бомбардировку ионами. Это является важным результатом диссертации.

Замечания по диссертационной работе:

1. Описание установки, методик исследования и рассматриваемых моделей совмещены в главе 2 с результатами исследований характеристик моделей СПД-100П и СПД-85П. Полученные в ходе испытаний результаты являются оригинальными ст

определяющими логику дальнейшей работы. В связи с этим было бы целесообразно оставить описательную, «стандартную» часть в рамках главы 2, а оригинальную часть выделить в отдельную главу.

2. Термин «слой ионизации и ускорения» представляется не слишком удачным, т.к. в физике плазмы под слоем обычно понимают область, где нарушается квазинейтральность.
3. В работе накоплен обширный экспериментальный материал, позволивший автору разработать модели СПД-100ПМ и СПД140ПМ. Однако хотелось бы дополнить полученные результаты более полным их обсуждением, проясняющим физические причины обнаруженных закономерностей.

В целом, отмеченные недостатки не влияют на общую положительную оценку диссертационной работы. Диссертация Меркурьева Д.В. является законченной научно-квалификационной работой, посвященной нахождению, реализации и исследованию способов повышения тяговых характеристик стационарного плазменного двигателя на режимах работы с высокими удельными импульсами тяги. Диссертация написана логичным, ясным языком. Автореферат правильно и полно отражает содержание диссертации. Результаты опубликованы в 6 работах, из них 2 статьи в рецензируемых научных журналах из списка ВАК.

Представленная работа соответствует требованиям ВАК РФ, предъявляемым к кандидатским диссертациям, а ее автор заслуживает присуждения ему ученой степени кандидата технических наук по специальности 05.07.05 05 – Тепловые, электроракетные двигатели и энергоустановки летательных аппаратов.

Доктор физико-математических наук,  
Ведущий научный сотрудник  
физического факультета МГУ  
119991, Москва, Ленинские горы,  
МГУ, физический факультет,  
кафедра физической электроники  
Телефон: +7(495)939-4773  
e-mail: [ekralkina@mail.ru](mailto:ekralkina@mail.ru)

Подпись Кралькиной Е.А. удостоверяю  
Декан физического факультета МГУ  
доктор физико-математических наук, профессор



Кралькина Е.А.



Сысоев Н.Н.

03.11.2015