

Отзыв  
официального оппонента  
кандидата физико-математических наук Павлова Владимира Борисовича  
на диссертацию Могулкина Андрея Игоревича  
«МЕХАНИКО-МАТЕМАТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ ДЕФОРМАЦИЙ  
ПРОФИЛИРОВАННЫХ ЭЛЕКТРОДОВ ИОННЫХ ДВИГАТЕЛЕЙ»,  
представленную на соискание ученой степени кандидата технических наук  
по специальности 05.07.05 – «Тепловые, электроракетные двигатели и энергоустановки  
летательных аппаратов»

Тенденции развития космических полетов показывают все более активное использование электроракетных двигателей. Чаще всего они применяются как двигатели коррекции летательных аппаратов, а также для поддержания или изменения высоты их орбит. Основными достоинствами электроракетных двигателей являются экономичность, надежность, высокий ресурс, простота эксплуатации. Также немаловажным фактором является возможность их работы практически на любом газе, в том числе и использование паров топлива жидкостных двигателей, оставшихся в баках. Главным преимуществом электроракетных двигателей является высокий удельный импульс тяги. Он более чем на порядок превышает удельный импульс жидкостного ракетного двигателя.

Электроракетные двигатели создают сравнительно небольшую тягу. Однако, с развитием бортовых энергетических установок, величина тяги может быть существенно увеличена, и тогда электроракетные двигатели будут представлять несомненный интерес для использования их в качестве маршевых двигателей для межпланетных и дальних космических перелетов.

Особое место в семействе электроракетных двигателей занимают ионные двигатели. Они обеспечивают наиболее высокое значение удельного импульса тяги. В ионном двигателе рабочее тело ионизируется в газоразрядной камере, а затем ионы ускоряются электростатическим полем. Электростатическое поле создается ионно-оптической системой, состоящей из положительного эмиссионного электрода, отрицательного ускоряющего электрода и замедляющего земляного электрода. Именно ионно-оптическая система позволяет достичь таких величин удельного импульса. Использование бескатодных схем ионизации рабочего тела (например, высокочастотное возбуждение плазмы) позволило бы иметь практически неограниченный ресурс двигателя. И только наличие узла ускорения, а именно ионно-оптической системы, этот ресурс ограничивает. Во время работы электроды ионно-оптической системы подвергаются неоднородным термическим нагрузкам. Для эффективной работы ускоряющей системы зазор между эмиссионным и ускоряющим электродами должен быть минимальным и постоянным за все время эксплуатации. Однако термические нагрузки приводят к неравномерной деформации электродов и, как следствие, к изменению межэлектродного зазора. Решение этой проблемы в разрабатываемых конструкциях ИД нового поколения является актуальной задачей.

В настоящей диссертации рассматривается возможность прогнозирования деформаций профилированных электродов и узлов ионно-оптической системы ионного двигателя при рабочих тепловых нагрузках. Это определяет актуальность и практическую ценность работы.

Диссертация Могулкина А.И. посвящена разработке механико-математической модели термомеханических процессов деформирования профилированных электродов и ионно-



оптических систем перспективных ионных двигателей при их тепловом нагружении и прогнозированию деформированного состояния, проведению численного моделирования узлов ионно-оптических узлов ионных двигателей различной размерности.

Основные результаты работы изложены в пяти научных статьях, опубликованных в изданиях, рекомендованных списком ВАК.

Диссертация состоит из введения, 5 глав, заключения и списка цитируемой литературы. В диссертации 161 страница, текст хорошо проиллюстрирован графиками, рисунками и таблицами.

Во введении обоснована актуальность работы, перечислены основные решаемые в ней проблемы, показана структура диссертации, сформулированы новизна полученных результатов и основные положения, выносимые на защиту.

В первой главе диссертации рассмотрены основные проблемы создания ионно-оптических систем для ионных двигателей:

- показаны перспективы использования электроракетных двигателей в современной космической технике и обосновано преимущество ионных двигателей по величине удельной тяги;

- рассмотрены физические и конструктивные особенности ионных двигателей с разрядом постоянного тока, высокочастотным и сверхвысокочастотным разрядами, а также тенденции и перспективы их развития;

- описаны основные процессы, происходящие в ионно-оптических системах, и проблемы конструирования ионно-оптических систем;

- сформулирована задача исследования.

Вторая глава диссертации посвящена разработке механико-математической модели деформаций профилированных электродов ионно-оптических систем с использованием основных дифференциальных уравнений теории тонкостенных оболочек. Проведен обзор литературы по методам расчета перфорированных оболочек и пластин с учетом температурно-силового нагружения конструкций. Основное нагружение связано с неравномерным нагревом электродов по радиусу. На основании граничных условий на контурах электродов аппарат матричных краевых интегральных и интегро-дифференциальных уравнений для осесимметричной задачи сведен к разработанному алгоритму расчета термоустойчивости и нелинейного изгиба профилированных электродов ионно-оптических систем, который представлен в виде нелинейного алгебраического уравнения третьей степени относительно безразмерной величины прогиба. Это один из важных результатов диссертации, значительно упрощающий процедуру оценки деформированного состояния электрода.

Отдельно стоит отметить учет перфорации электродов корректным использованием коэффициентов конструктивной ортотропии.

В третьей главе проведено численное моделирование температурного деформирования электродов узла ИОС по разработанной механико-математической модели и алгоритму. Были рассмотрены электроды различного диаметра, изготовленные из разных материалов. Полученные зависимости изменения дополнительного прогиба электродов от изменения начального технологического прогиба для различных перепадов температур позволяют прогнозировать изменение межэлектродного зазора и, как следствие, изменение плотности ионного тока.

На основании проведенных расчетных исследований были выработаны рекомендации к проектированию электродов и узлов ионно-оптических систем.

Четвертая глава посвящена расчетному исследованию изменения формы электродов с использованием программно-вычислительного комплекса ANSYS. Тепловые деформации были рассчитаны для электродов ВЧИД-16 и ВЧИД-45М с диаметром перфорированной части 160 мм и 450 мм, соответственно, изготовленных из различных материалов (ВТ1-0, ТВ-36, ВМ-2, УУКМ).

Результаты тепловых деформаций, полученных по разработанному алгоритму, показали хорошее согласие с результатами, рассчитанными в ANSYS.

В пятой главе проведено сравнение расчетов механико-математической модели с известными из литературы экспериментальными данными. Стоит отметить, что корректная постановка эксперимента по тепловому деформированию электродов ионно-оптической системы крайне сложна. Поэтому только в случае с экспериментальным исследованием термоустойчивости сферических электродов для двигателя ПИД-200 получено хорошее согласие между экспериментальными и расчетными данными по дополнительному прогибу и изменению межэлектродного зазора.

Полученные рекомендации были использованы для конструирования высокочастотных источников ионов диаметром 80, 100, 160, 450 и 500мм. Отмечено, что стендовые испытания показали работоспособность лабораторных моделей ВДИЧ-8 и ВЧИД-16.

Диссертационная работа Могулкина А.И. обладает высоким научным уровнем, новизной и практической направленностью. Стоит отдельно отметить следующие пункты, в полной мере характеризующие научную новизну диссертационной работы:

1. Разработанная механико-математическая модель, методика и алгоритм могут быть применены для определения дополнительных прогибов для электродов различных размеров, изготовленных из разных материалов.

2. На основе расчетных исследований с использованием разработанной модели определены условия обеспечения стабильной работы узла ионно-оптической системы и ионных двигателей в целом.

Достоверность полученных результатов характеризуется не только использованием основных дифференциальных уравнений теории тонкостенных оболочек и корректным выбором граничных условий, но и высокой степенью согласования с экспериментальными данными.

Предложенные рекомендации и разработанные на их основании конструкции узлов ионно-оптических систем и ионных двигателей в целом, в полной мере характеризуют практическую направленность диссертационной работы.

Диссертационная работа является законченной научно-квалификационной работой. Материал в диссертационной работе изложен грамотным техническим языком, четко обозначен личный вклад автора в результаты исследований.

Однако по содержанию диссертационной работы имеется несколько замечаний:

1. В диссертационной работе автору следовало более полно описать причины возникновения теплового нагружения. То есть связать его с тепловым потоком, идущим на элементы конструкции двигателя, которые граничат с плазмой высокочастотного разряда, и описать процессы образования и поддержания плазмы разряда.

2. Приведенные в диссертации графически изображенные зависимости изменения плотности ионного тока при изменении величины межэлектродного зазора следовало привязать не только к тепловому нагружению, но и к подводимой к индуктору мощности и к КПД передачи мощности в разряд, что является изначальной причиной нагрева электродов. Привязка

к уровням мощности работы двигателя позволила бы более полно охарактеризовать предлагаемую автором методику.

3. В пятой главе для эксперимента по деформированию электродов диаметром 200 мм стоило произвести численное моделирование деформаций в программно-вычислительном комплексе ANSYS, как это было выполнено в четвертой главе для электродов двигателей ВЧИД-16 и ВЧИД-45М, и в пятой главе для электродов диаметром 300 мм.

Приведенные выше замечания не снижают научной и практической ценности проведенного исследования. Результаты диссертационной работы Могулкина А.И. могут быть применены при разработке конструкций узлов ионно-оптических систем ионных двигателей.

Рецензируемая диссертационная работа удовлетворяет требованиям Положения ВАК о порядке присуждения ученых степеней, предъявляемых к кандидатским диссертациям, а ее автор, Могулкин Андрей Игоревич, заслуживает присуждения степени кандидата технических наук по специальности 05.07.05 «Тепловые, электроракетные двигатели и энергоустановки летательных аппаратов».

Павлов Владимир Борисович

Адрес: 119991, г. Москва, ул. Ленинские горы, д. 1, стр.2

Телефон: +7(495)939-4773

e-mail: vb\_pavlov@mail.ru

сайт: <http://www.phys.msu.ru/>

Старший научный сотрудник кафедры физической электроники, физический факультет, ФГБОУ ВПО «Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова»

кандидат физико-математических наук

Павлов В.Б.

Подпись Павлова В.Б. удостоверяю

Декан Физического факультета МГУ имени М.В. Ломоносова, профессор



Сысоев Н.Н.

18.11.2015