

ОТЗЫВ

официального оппонента доктора технических наук, профессора **М.К. Марахтанова** на диссертацию **Андрея Игоревича Могулкина** «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».

Рецензируемая диссертация состоит из 161 страницы текста, включающего в себя 109 рисунков и 6 таблиц. Список литературы содержит 113 наименований. Оформление диссертации соответствует требованиям, установленным Министерством образования и науки Российской Федерации. Результаты диссертации изложены в 5-ти статьях, опубликованных в изданиях, рекомендованных ВАК Минобрнауки РФ, а также в двух патентах Российской Федерации, а также в 7-ми докладах и иностранных журналах.

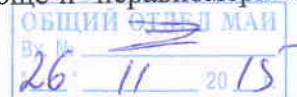
Содержание автореферата соответствует содержанию диссертации.

Актуальность избранной темы. В последнее время ионные электроракетные двигатели стали терять свою привлекательность в глазах отечественных ученых, в то время как в США, Германии или в Японии они по-прежнему популярны. Нам не следует упускать накопленный прежде опыт в разработке подобных ЭРД, и даже в этом смысле автор обращается к весьма актуальной теме.

Научная новизна работы заключается в том, что соискатель предложил и разработал оригинальную механико-математическую модель расчета деформации профилированных электродов ионного двигателя, взяв за основу высокочастотный двигатель. С помощью предложенной им модели можно оценить величину прогиба электродов ионно-оптической системы в зависимости от температуры, размеров и материала электродов. Результаты проверены на моделях двигателя. Главная направленность работы – увеличение ресурса двигателя.

Научные положения диссертации, её выводы и рекомендации надежно обоснованы теоретическим анализом и экспериментальными данными, полученными при участии Андрея Игоревича.

Основные задачи диссертации сформулированы ясно и выполнены исчерпывающе: от разработки требований к узлам ионно-оптической системы до разработки конструкций узлов системы с разными типоразмерами. Между этими крайними задачами надлежащее место занимает механико-математическая модель деформации электродов. Расчет подчинен условию, что нагрев вообще и неравномерный



нагрев, в частности, приводят к возникновению дополнительных прогибов электродов и нарушению безаварийной работы двигателя, уменьшению его ресурса.

Практическая ценность диссертации состоит в том, что, пользуясь полученными в ней данными, можно предложить расчетную модель, упрощающую вопросы проектирования и изготовления профилированных электродов ионно-оптической системы для двигателей с различным диаметром ускоренного ионного пучка.

Результаты работы, безусловно, достоверны. Личное участие автора в интересных и полезных НИР «оттачивало» его умение работать с ионными двигателями, наполняло практической ценностью качество его исследований. Материалы, изложенные в диссертации, автор получил сам, в собственных расчетах и экспериментах.

Публикаций и докладов, освещающих содержание и результаты данной работы, сделано вполне достаточно (14 наименований) для её защиты в качестве кандидатской диссертации. В диссертации приведены сведения о практическом использовании полученных результатов, запланированном на ряде предприятий.

Диссертация написана соискателем самостоятельно, несет черты внутреннего единства, содержит новые научные результаты и положения, которые убедительно аргументированы.

Диссертация состоит из введения и пяти глав.

Введение посвящено обоснованию диссертационного исследования, краткому описанию проблемы устойчивой работы электродов и формулированию основных задач.

В первой главе диссертации (18 стр. текста) представлен материал по вопросу создания ионных двигателей различных систем как у нас в стране, так и за рубежом. Рассмотрены тенденции развития ионных ЭРД с питанием газоразрядного источника высокочастотным током, оценены преимущества и недостатки такой схемы двигателя. Дано описание особенности конструкций ионно-оптической системы и протекающих в ней физических процессов. Обосновано, что термическая деформация электродов системы является одним из основных факторов, ограничивающих ресурс двигателя. По результатам этой обзорной главы обоснована актуальность поставленной задачи — исследование термомеханической деформации электродов в ионно-оптической системе ионного двигателя..

Во второй главе (37 стр. текста) дан обзор аналитических решений ряда задач по тепловой деформации пластин и оболочек, главным образом перфорированных. Основная форма оболочки – сферический слой (или сферический сегмент, как в диссертации).

Представлена физическая модель элемента тонкостенной оболочки, а также система дифференциальных уравнений термоупругости для определения деформации

оболочки. Задача представлена как осесимметричная, способы решения которой рассмотрены здесь же. Проанализированы и выбраны граничные условия на контурах рассмотренных электродов. В выборе краевых условий отражены, например, особенности эксплуатации ионно-оптической системы путем учета возможности угловых поворотов электродов обусловленных действием внешних факторов на опорные элементы. Рассмотрена деформация элементов, находящихся в условиях неравномерного нагрева по радиусу и толщине.

Для расчета деформации электрода были использованы интегральные уравнения, приведенные автором к безразмерной форме. В результате проведенного исследования найдено решение системы уравнений в безразмерном виде или в критериальных аргументах. Это можно считать научной заслугой Андрея Игоревича, позволяющей определить начальную форму профилированного электрода, обеспечивающую стабильность межэлектродного зазора ионно-оптической системы при различных тепловых нагрузках.

В третьей главе (23 стр. текста) представлен материал, иллюстрирующий возможности численного моделирования формы электродов при их нагреве с помощью предложенной механико-математической модели деформаций. Для электродов разного диаметра, выполненных из различных материалов с различным начальным прогибом были численно определены значения дополнительных (по отношению к исходному) прогибов при тепловом нагружении. Результаты численного моделирования показали, что разработанная математическая модель позволяет определить, при какой начальной форме полусферического электрода его тепловая деформация лежит в пределах заданного допуска. Предложенная *термомеханическая* модель деформации электродов оказалась простой и эффективной. На её основании были разработаны рекомендации для конструирования электродов узла ионно-оптической системы для перспективных ионных двигателей, разрабатываемых в НИИ ПМЭ МАИ для промышленности.

В четвертой главе (11 стр. текста) представлены результаты моделирования тепловых деформаций электродов в программном комплексе ANSYS и их сравнения с результатами численного моделирования по предложенному алгоритму. Глава содержит изображения электродов с цветовой иллюстрацией их деформации, а также графиков, иллюстрирующих отклонение результатов, прогнозируемых разработанной (инженерной) методикой и полученных в программном комплексе ANSYS. Степень сходимости результатов высока (свыше 90 %). Графические иллюстрации выполнены с высоким качеством.

Заключительная пятая глава (45 стр. текста) самая большая в диссертации. В ней проводится сравнение результатов, полученных из расчетной модели деформаций профилированных электродов ионных двигателей, с результатами их лабораторных испытаний, взятыми из различных литературных данных. Испытания проводились в ряде организаций, в том числе и при участии автора.

Сравнение показало, что в двух случаях (двигатель RIT-22 и двигатель диаметром 300 мм) разница между результатами расчета и данными измерения деформаций электродов сравнительно невелика, что обусловлено либо условиями эксперимента, либо технологией производства электродов. В третьем случае (двигатель диаметром 200 мм, Харьковский авиационный институт) расчетные и экспериментальные результаты оказались достаточно близкими (не более 20 %). В расчете на удовлетворительную сходимость результатов, в МАИ была разработана конструкторская документация для ряда лабораторных моделей высокочастотных ионных двигателей с диаметром пучка 80, 100, 160 и 450 мм. Она передана в КБ «Химвтоматика» и в КБ «Факел». Двигатели 80 и 160 мм испытаны в МАИ. Соискатель принимал активное участие как в разработке документации так и в испытаниях двигателей.

Как официальный оппонент **замечаний по существу диссертации не имею**, а работу в целом одобряю. Особо отмечаю её трудоемкую и аккуратно выполненную расчетную часть.

Формальными недостатками диссертации считаю следующее.

1. В первой, постановочной, главе нет обзора ионных двигателей, работающих на орбите как в настоящее, так и в прежнее время. Здесь нет соответствующей таблицы параметров штатных двигателей. Отсутствие подобных данных затрудняет оценку технологических достоинств предлагаемых конструкций и расчетов.
2. Во введении не мешало бы упомянуть, что вторая полноразмерная ЭРДУ с ионным двигателем SERT-II была запущена в космос в начале 1970 г., а разработка двигателей семейства RIT шла в то время уже полным ходом.
3. Номера параграфов не следует писать, как **1.1.2.3**. Их нумерацию достаточно ограничить двумя цифрами.
4. Номера листов диссертации проставлены наверху и посередине страницы. Это оригинально, но искать номер страницы неудобно.
5. Рисунки следует раздробить, не собирать 3...4 изображения под одним номером. Номер рисунка не делать четырехзначным: **2.2.3.4**. Читатель не должен затруднять себя разгадыванием сложных номеров.

6. Буквы и цифры на рисунках следует изображать крупнее, тогда и рисунок станет выразительнее. Подписи под рисунками должны быть подробнее, без аббревиатур. Подписи под осями графиков записывать также подробнее.

7. Не следует увлекаться аббревиатурами, например ИОС ВЧИД или ИДПТ, или УУКМ, или ЭЭ ВЧИД-45М, в тексте диссертации, которую могут читать непосвященные лица.

В целом считаю, что данная квалификационная работа актуальна и полезна. Она соответствует положению ВАК Минобрнауки РФ о порядке присуждения ученых степеней, а её автор, Андрей Игоревич Моголкин, заслуживает присуждения степени кандидата технических наук по специальности 05.07.05 «Тепловые, электроракетные двигатели и энергоустановки летательных аппаратов».

Официальный оппонент,
доктор технических наук, профессор,
заведующий кафедрой «Плазменные энергетические
установки» МГТУ им. Н.Э. Баумана

М.К. Марахтанов

25 ноября 2015 года

Марахтанов Михаил Константинович

Адрес: 105005, г. Москва, 2-я Бауманская ул., д.5, стр. 1

Телефон: 8 (499) 263-61-78

e-mail: mkm@power.bmstu.ru

веб-сайт: www.bmstu.ru

Подпись профессора М.К. Марахтанова заверяю,
директор НИИЭМ МГТУ им. Н.Э. Баумана

