



ФЕДЕРАЛЬНОЕ КОСМИЧЕСКОЕ АГЕНТСТВО

Федеральное государственное унитарное предприятие  
«ЦЕНТРАЛЬНЫЙ НАУЧНО-ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ  
ИНСТИТУТ МАШИНОСТРОЕНИЯ» (ФГУП ЦНИИМАШ)



ул. Пионерская, д. 4, г. Королёв,  
Московская область, 141070

Тел. (495) 513-59-51  
Факс (495) 512-21-00

E-mail: corp@tsniimash.ru  
http://www.tsniimash.ru

ОКПО 07553682, ОГРН 1025002032791  
ИНН/КПП 5018034218/501801001

30.11.15 исх. № 14-196  
на № \_\_\_\_\_ от \_\_\_\_\_

Учёному секретарю диссертационного  
совета ДС 212.125.08  
при Московском авиационном  
институте, доктору технических наук,  
профессору  
Зуеву Ю.В.  
Волоколамское ш., д.4, Москва А-80,  
ГСП-3, 125993

Уважаемый Юрий Владимирович!

Высылаю Вам отзыв на автореферат диссертационной работы Могоулкина Андрея Игоревича «Механико-математическая модель деформаций профилированных электродов ионных двигателей», представленной на соискание ученой степени кандидата технических наук по специальности 05.07.05 – «Тепловые, электроракетные двигатели и энергоустановки летательных аппаратов».

Приложение: отзыв на автореферат, 2 экз. на 4 л. каждый

Главный учёный секретарь,  
доктор технических наук, профессор

Ю.Н. Смагин



Исп. Горохов В.Б.  
Тел (495) 513-41-56

017320 \*

**О Т З Ы В**

на автореферат диссертации Могулкина Андрея Игоревича «Механико-математическая модель деформаций профилированных электродов ионных двигателей», представленной на соискание ученой степени кандидата технических наук по специальности 05.07.05 – Тепловые, электроракетные двигатели и энергоустановки летательных аппаратов

Россия уже 40 лет использует электроракетные двигатели (ЭРД) холловского типа на своих геостационарных космических аппаратах (КА). Первые летные испытания холловских двигателей типа стационарные плазменные двигатели (СПД) в России состоялись еще в 70-х годах прошлого столетия. Так, в 1971 г. электроракетная двигательная установка на базе СПД-60 была испытана в космосе в составе КА "Метеор". В результате работы ЭРДУ в течение примерно 170 ч., при тяге 21 мН и мощности 400 Вт исходная орбита спутника (апогей - 918.6 км, перигей - 879.7 км) была приближена к условно-синхронной.

Работы по созданию ряда ионных двигателей (ИД) проводятся в России, главным образом, в ГНЦ ФГУП "Центр Келдыша". Применение ИД вследствие их высокого удельного импульса тяги и ресурса дает значительный эффект по экономии массы рабочего тела как при решении маршевых задач, так и при использовании в системах коррекции орбиты КА. С развитием космической ядерной энергетики роль ИД будет возрастать.

Ионные двигатели имеют потенциальные преимущества перед двигателями холловского типа, т.к. имеют больший к.п.д. и позволяют получить большие значения удельного импульса при тех же мощностях. Одним из наиболее "слабых" узлов в ионном двигателе является ионно-оптическая система (ИОС) - технологически самый сложный узел, состоящий из 2х или 3х перфорированных сеток большой площади, расположенных максимально близко друг к другу и электрически смещенных друг

Вх. № 4-12 2015

относительно друга на сотни и тысячи вольт. В ИОС происходит формирование ионного пучка с высокой плотностью. В соответствии с требуемыми мощностью и тягой двигателя определяется диаметр рабочей перфорированной части электродов ИОС, который может составлять величину от 100 мм до 500 мм и более.

Диссертация посвящена исследованию важнейшей проблемы создания ИОС – устойчивости ее характеристик при тепловом нагружении. Узел ИОС содержит тонкие перфорированные электроды, установленные с малым зазором. Особенность работы электродов в составе ИОС связана с неравномерным нагревом, что приводит к их деформированию, из-за чего существует опасность изменения характеристик ИД и высоковольтного пробоя в межэлектродном зазоре. Одним из зарекомендовавших себя технических решений является применение профилированных электродов с начальным технологическим прогибом. В связи с указанными проблемами важно на этапе конструирования уметь рассчитывать начальную форму электродов и их деформации при нагревании до рабочих температур, при которых обеспечивается стабильная работа ИОС. Сложность задачи обусловлена еще и тем, что электроды имеют разную толщину, могут быть выполнены из разного материала, а их нагрев характеризуется различными температурными полями. Все названное подчеркивает важность разработки механико-математической модели электродов ИОС и проведение численного моделирования.

В диссертации Могулкина А.И. решается задача о деформации перфорированных электродов ионных двигателей при их нагреве в процессе эксплуатации. Электроды представляют собой сферические сегменты тонкостенных оболочек, перфорированных отверстиями. Рассматриваются две близко расположенные оболочки. Задачей является определение изменения в процессе нагрева профиля каждой из них и расстояния между ними, т.к. эти параметры существенным образом влияют на удельный импульс ионного

двигателя.

Судя по автореферату, рассматриваются два подхода при решении этой задачи. В первом случае применяется программный комплекс ANSYS. Второй подход заключается в самостоятельном решении автором этой задачи на основе численно-аналитического решения уравнений теории упругости пологих тонкостенных оболочек. Данный подход представляется оправданным, т.к. он позволил автору получить аналитическое решение этой задачи, что представляется важным результатом для практики. Так при проектировании оболочек необходимо рассматривать большое количество вариантов конструкции электродов, отличающихся по диаметру электродов, размерам начального прогиба, по материалам и т.п. В этом случае аналитические оценки весьма полезны. Так автором получены таблицы значений рекомендуемых начальных прогибов электродов с различными физико-механическими свойствами и размерами электродов.

В качестве замечаний в части прочности следует отметить:

1) Не учтена возможность изменения геометрии электродов за счет эффектов ползучести материала электродов при длительной работе ионного двигателя.

2) В качестве критерия выбора допустимых деформаций электродов используется величина достижения максимального удельного импульса. Однако не приводятся реализующиеся при этом напряжения, которые важны для оценки длительной и ресурсной прочности перфорированной оболочки электрода.


Данные замечания не умаляют достоинств работы, а могут быть использоваться как рекомендации при дальнейшей работе в части повышения работоспособности электродов.

В целом автореферат свидетельствует, что диссертация Могулкина А.В. «Механико-математическая модель деформаций профилированных электродов ионных двигателей» является законченной научно-квалификационной работой, содержащей новые научные сведения,

которые могут быть использованы при разработке и проектировании новых электроракетных двигателей, а также ускорителей ионов технологического и научного назначений. Судя по автореферату диссертационная работа отвечает требованиям ВАК, предъявляемым к кандидатским диссертациям, заслуживает положительной оценки, а её автор, Могулкин Андрей Игоревич, заслуживает присуждения ученой степени кандидата технических наук по специальности 05.07.05 – Тепловые, электроракетные двигатели и энергоустановки летательных аппаратов.

Отзыв рассмотрен и одобрен на заседании подсекции 2-2 секции №2 Научно-технического совета Федерального государственного унитарного предприятия “Центральный научно-исследовательский институт машиностроения” (ФГУП ЦНИИмаш) (протокол № 21 от 27.11.2015).

Начальник лаборатории ФГУП  
ЦНИИмаш, кандидат физико-  
математических наук

 В.Б. Горохов

141070, Московская область, г. Королёв, ул. Пионерская, 4  
Тел.: 8-495-513-41-56, E-mail: [Lab22042@tsniimash.ru](mailto:Lab22042@tsniimash.ru)

И.о. начальника Управления  
ФГУП ЦНИИмаш, кандидат  
технических наук

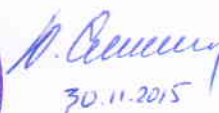
 Е.М. Твердохлебова

141070, Московская область, г. Королёв, ул. Пионерская, 4  
Тел.: 8-495-513-59-23, E-mail: [TverdohlebovaEM@tsniimash.ru](mailto:TverdohlebovaEM@tsniimash.ru)

Подписи начальника лаборатории, кандидата физико-математических наук Виктора Борисовича Горохова и и.о. начальника Управления Твердохлебовой Екатерины Михайловны удостоверяю.

Главный учёный секретарь  
ФГУП ЦНИИмаш,  
доктор технических наук, профессор



  
30.11.2015

Ю.Н. Смагин