

Корпорация «Тактическое ракетное вооружение»

Военно-промышленная корпорация «НПО машиностроения»



Акционерное общество  
«УРАЛЬСКИЙ НАУЧНО-  
ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ ИНСТИТУТ  
КОМПОЗИЦИОННЫХ МАТЕРИАЛОВ»  
(АО «УНИИКМ»)

Новозвягинская ул., д.57, г. Пермь, Россия, 614014  
Тел.: (342) 267-07-68, 263-17-22 Факс.: (342) 263-16-00  
e-mail: [uniikm@yandex.ru](mailto:uniikm@yandex.ru), <http://www.uniikm.ru>  
ОКПО 07523132, ОГРН 1095906003490  
ИНН / КПП 5906092190 / 590601001

Учёному секретарю  
диссертационного совета Д212.125.08  
доктору технических наук, профессору  
Ю.В. Зуеву  
125993, г. Москва,  
МАИ, Волоколамское ш., д. 4  
Факс (499) 158 29 77.  
Тел. (499)158-43-33 E-mail: [mai@mai.ru](mailto:mai@mai.ru)

№ 1590/52 от 01 МАР 2021  
На № \_\_\_\_\_ от \_\_\_\_\_

Отзыв на автореферат.

Уважаемый Юрий Владимирович!

Направляю Вам отзыв на автореферат диссертации Мадеева Сергея Викторовича «Экспериментальное исследование электродов ионно-оптических систем ионных двигателей из перспективных углеродных материалов», представленной на соискание учёной степени кандидата технических наук по специальности: 05.07.05 «Тепловые, электроракетные двигатели и энергоустановки летательных аппаратов».

Приложение: Отзыв на автореферат

2 экз. на 3 листах.

Генеральный директор

В.Ю. Чунаев

Исполнитель: Ширяев М.И.,  
тел. (342) 263-15-76

Отдел документационного  
обеспечения МАИ

09.03 2021г.

УТВЕРЖДАЮ

Генеральный директор  
АО «Уральский научно-исследовательский  
институт композиционных материалов»



В.Ю. Чунаев

«    »    2021 г.

### ОТЗЫВ

на автореферат диссертации Мадеева Сергея Викторовича «Экспериментальное исследование электродов ионно-оптических систем ионных двигателей из перспективных углеродных материалов», представленной на соискание учёной степени кандидата технических наук по специальности: 05.07.05 «Тепловые, электроракетные двигатели и энергоустановки летательных аппаратов»

Увеличение электрической мощности современных космических аппаратов (КА) расширяет возможности применения на них электроракетных двигателей (ЭРД), включая использование для транспортных операций на околоземных орбитах, а также в качестве маршевых двигателей при полётах к Луне и удалённым телам Солнечной системы. Известно, что для решения указанных задач необходимы двигатели с экономичным расходом рабочего тела, обладающие удельным импульсом от 3000 с, а также ресурсом от 20000 ч. Ионные двигатели (ИД), в случае решения определённых проблем, могут соответствовать приведённым выше критериям. Одной из основных проблем при разработке ИД на данный момент является обеспечение ресурса. В диссертации справедливо отмечено, что узлом, имеющим наименьший ресурс, а, следовательно, определяющим срок активного существования двигателя, является ионнооптическая система (ИОС). В процессе работы двигателя происходит распыление поверхностей ускоряющего электрода (УЭ) ИОС ионами перезарядки. Основным способом снижения скорости распыления является замена традиционных металлических УЭ из молибдена или титана на более эрозионно-стойкие электроды из материалов на основе углерода. Задача, поставленная С.В. Мадеевым в диссертационной работе, является актуальной.

Подробно описывая алгоритм оптимального проектирования электродов, диссертант учитывал особенности структуры, принятых к

Узел документационного  
обеспечения МАИ

09 23 2021 г.

исследованию углерод-углеродных материалов. Предложенное решение, основанное на исследовании различных форм апертур, является комплексным, показывает новаторский подход автора к проблеме. Расчётные исследования проводились в программе IOS-3D, предназначенной для расчёта электрических полей и ионных потоков в трёхмерном пространстве с произвольной формой граничных поверхностей. В качестве эталонной ИОС с круглыми апертурами была выбрана ИОС двигателя ИД-200. Аналитическим решением тестовых задач была проверена и показана корректность алгоритма и вычислительного кода. Работоспособность разработанного вычислительного комплекса была проверена при проектировании эмиссионного и ускоряющего электродов с апертурами квадратной формы со скруглёнными углами. Удачное решение этой задачи было подкреплено диссертантом расчётом. Диссертантом приведено теоретическое обоснование выбранных форм апертур, выбрана база и способ для сравнения предложенных форм. Путём последовательного изменения радиусов скругления в эмиссионном и ускоряющем электродах была найдена оптимальная геометрия, в которой диапазон первеанса (диапазон плотностей тока, при котором не происходит попадание ионов, вытягиваемых из газоразрядной камеры, на ускоряющий электрод) ( $P_{\min} = 0.034$ ;  $P_{\max} = 0.328$ ) наиболее близок к этому диапазону для ИОС с круглыми апертурами: ( $P_{\min} = 0.022$ ;  $P_{\max} = 0.343$ ). Предложенная форма апертур удобно согласовывается со структурой углерод-углеродного материала.

С.В. Мадеевым представлены хорошие результаты тепловых и виброиспытаний. Все электроды успешно прошли огневые испытания. После вибрационных испытаний произошло разрушение электродов с круглыми отверстиями. Электроды с квадратными отверстиями со скруглёнными углами прошли вибрационные испытания без внешних повреждений и изменений АЧХ. В настоящем исследовании проверялось предположение об увеличении жёсткости электродов ИОС из УУКМ при переходе от круглых отверстий к квадратным отверстиям со скруглёнными углами. Сравнительные автономные вибрационные испытания эмиссионных электродов с круглой формой апертур и эмиссионных электродов с квадратной формой апертур со скруглёнными углами показали, при одинаковых условиях вибрационных нагрузок, что собственная частота сборки фланца и электрода с круглыми отверстиями составила  $140 \pm 10$  Гц, а у электродов с квадратными отверстиями со скруглёнными углами -  $190 \pm 10$ . Перемещение центра эталонной ИОС с круглыми апертурами на 30 % больше перемещения центра альтернативной

ИОС с квадратными апертурами со скругленными углами, что подтверждает повышение жёсткости при переходе к новой схеме армирования.

Материал в автореферате стилистически хорошо и грамотно изложен, вся работа с достаточной полнотой и представительностью отражена в публикациях. Диссертационная работа является завершённой и самодостаточной научно-исследовательской работой, обладающей практической значимостью. Работа соответствует требованиям Положения о присуждении учёных степеней, утверждённым постановлением Правительства РФ от 24 сентября 2014 г. № 842, содержит новые проектные и вычислительные решения и новые результаты анализа электрических, теплофизических и механических характеристик проектируемых электродов ИОС электроракетного двигателя. Автор диссертации Мадеев Сергей Викторович заслуживает присвоения учёной степени кандидата технических наук по специальности 05.07.05 «Тепловые, электроракетные двигатели и энергоустановки летательных аппаратов»

Начальник лаборатории 521  
Ширяев Михаил Иванович,  
НИО – 5  
АО «Уральский научно-исследовательский  
институт композиционных материалов»,  
Новозвягинская ул., д. 57, г. Пермь,  
Россия, 614014, тел. (342) 263-15-60  
E-mail: [uniikm@yandex.ru](mailto:uniikm@yandex.ru), [www.uniikm.ru](http://www.uniikm.ru)

Подпись



М.И. Ширяева удостоверяю:

И. О. начальника службы управления персоналом –

С.Н. Шайхрадзева