

## 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.

Ионные двигатели принадлежат одному из наиболее востребованных классов электроракетных двигателей. Современные достижения в повышении энергооснащенности космических аппаратов, с одной стороны, позволяют расширить круг задач, решаемых с помощью ионных двигателей, а, с другой стороны, требуют существенного улучшения их характеристик, в частности повышения ресурса. Одним из критических узлов ионного двигателя, в значительной степени определяющего его время жизни, является ионно-оптическая система (ИОС).

Основными процессами, ограничивающими ресурс ИОС, являются распыление поверхностей ускоряющего электрода ионами и неконтролируемое изменение межэлектродного зазора под действием тепловых нагрузок. Негативное влияние последнего эффекта возрастает с увеличением диаметра электродов ИОС. Для того, чтобы избежать изменение зазора и замыкание сеток в настоящее время используют электроды ИОС сферической формы. Однако, сложность технологии изготовления профилированных электродов, увеличение угла расходимости пучка, сопровождающееся снижением тягового КПД, необходимость расходовать рабочее тело на прогрев эмиссионного электрода перед началом работы двигателя заставляют искать другие подходы к изготовлению электродов ИОС.

Диссертация Мадеева С.В. посвящена разработке плоской двухэлектродной ионно-оптической системы ионного двигателя с электродами из углерод-углеродных композиционных материалов с диаметром зоны перфорации более 150 мм, обладающей стойкостью к вибрационным и механическим нагрузкам. Цель работы, решаемые автором задачи и полученные результаты делают диссертацию актуальной и своевременной.

Научная новизна работы Мадеева С.В. подтверждается впервые разработанной конструкцией ИОС, состоящей из двух плоских электродов, изготовленных из углерод-углеродных композиционных материалов, с квадратными отверстиями со скругленными углами. Диапазон изменения преанса на рабочих режимах разработанной ИОС близок по абсолютным значениям к рабочим диапазонам эталонной ИОС с круглыми апертурами.

Практическая значимость работы подтверждается результатами испытаний ИОС в составе двигателя ИД-200КР с диаметром пучка 200 мм.

Во второй, наиболее интересной главе диссертации выполнено моделирование, цель которого состоит в нахождении формы апертур электродов ИОС, обеспечивающей

Упр. инт. документацией  
обеспечения МАИ  
11. 03. 2021г.

стойкость к вибрационным нагрузкам без существенного сужения рабочего диапазона первеанса. Необходимость замены традиционных круглых отверстий на апертуры более сложной формы связана с необходимостью исключить перерезания волокон углерод-углеродных композиционных материалов в перемычках между отверстиями. Мадеевым С.В. рассмотрены квадратные апертуры, квадратные апертуры со скругленными углами и прямоугольные апертуры со скругленными углами. Показано, что:

- использование квадратных апертур вместо круглых сопровождается ростом перехвата пучка в ИОС в результате появления группы слабо сфокусированных ионов в угловой части ионного пучка;
- использование прямоугольных, щелевых апертур нецелесообразно для использования в ионных двигателях, где концентрация плазмы спадает по радиусу к стенкам газоразрядной камеры.
- оптимальными являются квадратные отверстия со скругленными краями.

Основным результатом второй главы являются рассчитанные параметры квадратных апертур со скругленными краями, при которых диапазон первеанса наиболее близок к диапазону, характерному для ИОС с круглыми отверстиями.

В третьей главе диссертации представлены основные этапы отработки технологии создания электродов ИОС с рассчитанными параметрами апертур из углерод-углеродных композиционных материалов с наполнителями на основе однонаправленной ленты, двунаправленной ткани и войлока. Выполнены исследования плотности, пористости, теплопроводности и коэффициентов линейного температурного расширения. Вибрационные испытания плоских электродов с квадратными отверстиями со скругленными углами, предназначенных для работы в составе ИД – 200, прошли без внешних повреждений. Электроды с круглыми отверстиями разрушились.

Сравнительные механические испытания электродов ИОС из углерод-углеродного композиционного материала с круглыми и квадратными апертурами, представленные в четвертой главе диссертации, подтвердили повышение жесткости при переходе к новой системе армирования.

В пятой главе на основании экспериментов выполнено сравнение рабочих диапазонов первеансов ИОС с круглыми и квадратными апертурами со скругленными углами. Показано, что экспериментальные результаты близки к расчетным, а имеющие место расхождения связаны с учетом при расчетах перезарядки и тока вторичных ионов, поступающих на ускоряющий электрод из зоны нейтрализации пучка.

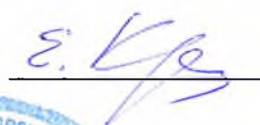
Исследования, представленные в диссертации, выполнены с использованием современных методов расчета электрических полей и ионных потоков в трёхмерном пространстве с произвольной формой граничных поверхностей, а также средств измерения плотности, пористости, теплопроводности, коэффициентов линейного температурного расширения, механических свойств ИОС. Экспериментальное подтверждение полученных расчётных результатов говорит о справедливости использованной расчетной модели.

Замечаниями по работе являются:

- отсутствие в ней анализа зависимости полученных результатов от атомного номера рабочего тела,
- отсутствие описания предположений, сделанных при расчетах оптимальной формы отверстий ИОС.

В целом диссертация Мадеева С.В. является научно-квалификационной работой, посвящённой актуальной теме. Ее результаты являются достоверными, обладают научной новизной, имеют теоретическую и практическую значимость. Диссертация соответствует заявленной специальности и удовлетворяет всем критериям, установленным «Положением о присуждении учёных степеней», а её автор, Мадеев Сергей Викторович заслуживает присуждения ему учёной степени кандидата технических наук по специальности 05.07.05 – «Тепловые, электроракетные двигатели и энергоустановки летательных аппаратов».

Ведущий научный сотрудник кафедры  
Физической электроники отделения  
радиофизики физического ф-та МГУ  
им. М.В. Ломоносова, д. ф.-м. н.



Е.А. Кралькина

04.03.2021

Подпись Е.А. Кралькиной заверяю  
Ученый секретарь Физического  
факультета МГУ, д.ф.м-н.



В.А.Караваяев

Кралькина Елена Александровна. Адрес: 119991, Москва, ГСП-1, Ленинские горы, д. 1, стр. 2, Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова», физический ф-т, отделение радиофизики, каф. Физической электроники. Эл. почта: [ekralkina@mail.ru](mailto:ekralkina@mail.ru). Телефон : рабочий +7(495)939-4773Б мобильный +7(926)-268-1097