

## ОТЗЫВ

официального оппонента

о диссертации МАДЕЕВА Сергея Викторовича

**«Экспериментальное исследование электродов ионно-оптических систем ионных двигателей из перспективных углеродных материалов»**, представленную в диссертационный совет № Д212.125.08, созданного на базе федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего образования «Московский авиационный институт (национальный исследовательский университет)», на соискание учёной степени кандидата технических наук по специальности 05.07.05 – «Тепловые, электроракетные двигатели и энергоустановки летательных аппаратов»

**Актуальность темы.** Диссертационная работа Мадеева Сергея Викторовича посвящена решению актуальной научной проблемы обеспечения ресурса ионных двигателей. Срок активного существования ионного двигателя преимущественно определяется эрозионной стойкостью ускоряющего электрода ионно-оптической системы, бомбардируемого ионами перезарядки. Для снижения скорости распыления обычно используются электроды из эрозионно-стойких материалов на основе углерода. Основным недостатком электродов из материалов на основе углерода, по сравнению с металлическими электродами, является пониженная стойкость к стартовым вибрационным нагрузкам. Поэтому в диссертационной работе основное внимание уделено разработке электродов из углерод-углеродных композиционных материалов (УУКМ). В целях увеличения тяговой эффективности ионного двигателя и упрощения технологии изготовления электродов из УУКМ рассматривается возможность создания электродов в форме плоских дисков. Однако, при создании плоских электродов с традиционными круглыми отверстиями в зоне вытягивания ионного пучка, происходит разрезание нитей наполнителя, что снижает механическую прочность электродов. Различные подходы по сохранению неповрежденных волокон в перемычках между отверстиями,

Отдел документационного  
обеспечения МАИ

17. 02 2021 г.

реализованные ранее, приводили либо к снижению эксплуатационных характеристик двигателя, либо демонстрировали невозможность создания апертур требуемой формы. Поэтому предложенное автором решение по созданию апертур в форме квадратов со скругленными углами, позволяющее сохранить эксплуатационные характеристики узла ионно-оптической системы и одновременно с этим повысить стойкость к вибрационным нагрузкам, не только актуально, но имеет и высокую **практическую значимость**.

**Цель исследований** соискатель формулирует как состоящую в разработке плоской двух-электродной ионно-оптической системы ионного двигателя с электродами из УУКМ с диаметром зоны перфорации более 150 мм, обладающей стойкостью к вибрационным механическим нагрузкам, и имеющей рабочий диапазон первеанса, сравнимый с рабочим диапазоном первеанса ИОС с традиционными круглыми апертурами.

Для достижения поставленной цели соискатель решает следующие задачи:

- Расчётным путём определить форму апертур электродов ИОС, позволяющую сохранить неповреждённые нити в перемычках между отверстиями и рабочий диапазон первеанса, близкий к рабочему диапазону эталонной ИОС с круглыми апертурами.
- Определить основные требования к заготовкам электродов ИОС из УУКМ и отработать технологию создания электродов.
- Провести сравнительные механические испытания электродов ИОС из УУКМ с традиционными круглыми и альтернативными апертурами.
- Провести сравнительные экспериментальные исследования рабочих диапазонов первеансов ИОС с круглыми апертурами и альтернативной ИОС с новой формой апертур.

Диссертация состоит из введения, пяти глав, заключения, списка сокращений и условных обозначений и списка литературы.

**Во введении** обоснована актуальность темы диссертации, сформулированы цель и основные задачи исследования, научная новизна, практическая и теоретическая значимость результатов работы, отражен личный вклад автора при выполнении исследований, представлены результаты апробации материалов диссертации на научных конференциях.

**Первая глава** содержит подробный обзор литературных источников по теме диссертации, автором рассмотрены различные способы замедления эрозии ускоряющего электрода, проведен анализ конструкторско-технологических решений при проектировании ионно-оптических систем с электродами из углеродных материалов. Проведенный анализ указывает на необходимость проведение поиска новой формы апертур для плоских электродов из УУКМ, которая позволит сохранить неповрежденные нити в перемычках между отверстиями без ущерба основным эксплуатационным характеристикам.

**Вторая глава** посвящена расчетному исследованию, целью которого был поиск формы апертур, которая позволила бы увеличить механическую прочность. Исследования проводились в программном продукте IOS-3D, разработанном в ГНЦ ФГУП «Центр Келдыша». Результаты численного моделирования показали, что ионно-оптические системы с квадратными апертурами со скругленными углами могут обладать диапазоном первеанса, близким к диапазону первеанса ИОС с традиционными круглыми апертурами. Кроме того, автором были проведены оценки эффективной прозрачности для ионов, эффективной прозрачности для потока нейтральных атомов, высоты потенциального барьера, отражающего электроны пучковой плазмы, угловой расходимости элементарного пучка и скорости распыления поверхностей УЭ, подтвердившие близость по этим параметрам ионно-оптических систем с круглыми апертурами и ионно-оптических систем с новой формой апертур.

**В третьей главе** рассматривалась технология создания электродов, описаны методики и аппаратура, применявшиеся для исследования свойств УУКМ. Полученные результаты использовались при моделировании теплового состояния двухэлектродных ИОС. Также в главе представлены результаты отработки технологии создания электродов для ионных двигателей ИД-200 и ИД-200 КР.

**В четвертой главе** приведен краткий обзор механизмов разрушения электродов ИОС под действием вибрационных нагрузок. Сформулирован критерий выбора между двумя схемами армирования, предполагающий отсутствие соударений между электродами при заданном зазоре. Для исследования влияния схемы армирования жёсткость электродов были проведены автономные вибрационные испытания ИОС, результаты которых подтвердили повышение жёсткости при переходе к новой схеме армирования.

**В пятой главе** приведены результаты экспериментальных исследований рабочих диапазонов первеансов ИОС с круглыми и квадратными апертурами. Сравнительные экспериментальные исследования ИОС с круглыми апертурами, расположенными в узлах гексагональной решётки, и ИОС нового типа с апертурами в форме квадратов со скруглёнными углами подтвердили сделанный ранее по результатам численного моделирования вывод о том, что эти системы могут обладать сходными функциональными характеристиками.

В заключении обобщены основные результаты исследований.

Автореферат полностью отражает основные результаты исследований и выводы диссертационной работы.

Практическая значимость работы заключается в том, что результаты, полученные Мадеевым С.В., могут быть использованы при разработке ионно-оптических систем ионных двигателей средней и высокой мощности. Подтверждением этому служит внедрение результатов исследований при

создании ионных двигателей ИД-200, ИД-200КР и ИД-200ПМ (акт о внедрении №71/21-02 от 25.01.2021).

Проведенные исследования являются **новыми**, а результаты, выносимые на защиту, впервые получены лично автором и **новизна** их также не вызывает сомнений. Соискателем впервые были получены следующие результаты:

- Разработана новая конструкция плоских электродов ИОС ИД из УУКМ с квадратными апертурами со скругленными углами.
- Рассчитаны и экспериментально подтверждены рабочие диапазоны первеанса ИОС с квадратными апертурами со скруглёнными углами и показано, что эти диапазоны близки по абсолютным значениям к рабочим диапазонам первеанса эталонной ИОС с круглыми апертурами.
- Проведены сравнительные экспериментальные исследования, подтверждающие повышение жёсткости электродов ИОС из УУКМ при переходе от круглой формы апертур к апертурам квадратной формы со скругленными углами.

**Достоверность** полученных автором положений, выводов и заключений, обеспечивается выбором апробированных методик измерений и диагностики, сопоставлением полученных результатов с данными других авторов, измеренных характеристик с расчетными значениями, а также сравнением результатов с опубликованными и признанными данными других авторов.

**Апробация работы и публикации.** В целом, диссертация оставляет хорошее впечатление. Результаты прошли **апробацию** на международных научных конференциях, **опубликованы** в пяти работах, в том числе 3 изданиях, рекомендованных ВАК РФ.

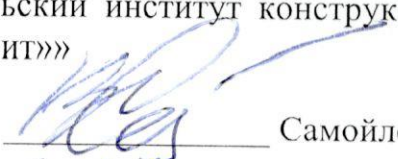
Вместе с тем, на мой взгляд, в представленной диссертационной работе можно отметить **ряд недостатков**:

1. По кристаллической структуре матрица и наполнитель в УУКМ различаются достаточно сильно. В ходе оценки скоростей эрозии поверхностей УЭ следовало учесть возможные отличия в скоростях распыления матрицы и наполнителя.
2. Согласно представленному обзору, большинство исследований механических свойств композиционных материалов проводится изначально посредством моделирования перемещения с использованием микромеханических моделей, с последующей корректировкой коэффициентов демпфирования из результатов экспериментов. В настоящей работе подобные расчетные исследования отсутствуют.
3. Не рассмотрена возможность применения других видов материалов, в частности карбидкремниевых, так как в настоящее время существуют аддитивные технологии, позволяющие получать изделия с сетчатой структурой, с большим количеством регулярных ячеек. Сделанные замечания не снижают общей высокой оценки диссертации.

### **Заключение**

Считаю, что представленная диссертационная работа выполнена на высоком научно-техническом уровне и является законченной научно-квалификационной работой, которая полностью соответствует всем критериям, установленным «Положением о присуждении учёных степеней», утвержденным постановлением Правительства РФ от 24 сентября 2013 г. №842, а её автор МАДЕЕВ СЕРГЕЙ ВИКТОРОВИЧ заслуживает присуждения учёной степени кандидата технических наук по специальности 05.07.05 «Тепловые, электроракетные двигатели и энергоустановки летательных аппаратов».

Доктор технических наук,  
начальник управления научно-технического развития  
АО «Научно-исследовательский институт конструкционных материалов на  
основе графита «НИИГрафит»»

  
Самойлов Владимир Маркович

05.02.2024 6

Адрес: 111524, г. Москва, ул. Электродная, д. 2, с. 1

Телефон: 8 (916) 608-96-49, e-mail: [vsamoylov@niigrafit.org](mailto:vsamoylov@niigrafit.org).

Подпись Самойлова Владимира Марковича заверяю



С отзывом ознакомлен.  
18.02.2021. <sup>7</sup>

