

ОТЗЫВ

официального оппонента на диссертацию Круглова Кирилла Игоревича «Моделирование теплофизических процессов в высокочастотном ионном двигателе», представленную на соискание ученой степени кандидата технических наук по специальности 05.07.05 – Тепловые, электроракетные двигатели и энергоустановки летательных аппаратов

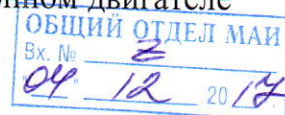
Диссертационная работа Круглова К.И. посвящена изучению физической природы и разработке модели тепловых процессов, протекающих в высокочастотном ионном двигателе (ВЧИД), что является весьма актуальным не только для расширения научного знания, но и для возможности решения ряда научно-технических задач в области управления полетом и удлинения сроков активного существования космических аппаратов.

Актуальность темы диссертации связана с необходимостью развития технологии ВЧИД, обладающей рядом технологических и эксплуатационных преимуществ по сравнению с технологией ионных двигателей с разрядом постоянного тока (ИДТП). Обе эти конкурирующие технологии получили в настоящее время наибольшее распространение. Целесообразность разработки технологии высокочастотных ионных двигателей (ВЧИД) обусловлена тенденциями развития отечественной космической техники.

Рецензируемая диссертация состоит из введения, четырех глав и заключения.

Формулировке поставленных и решённых в диссертации задач способствуют сведения, систематизированные автором во введении и 1-ой главе диссертации, о проблемах экспериментального и расчетно-теоретического исследования тепловых процессов, протекающих при работе ВЧИД, необходимости теплового моделирования для выбора материалов на этапе проектирования, для выявления критических элементов конструкции двигателя по предельной величине рабочей температуры, а также для решения вопроса теплового сопряжения двигателя с другими системами космического аппарата (КА). Приводятся описание теплофизических процессов, протекающих при работе двигателя, обзор существующих расчетных тепловых моделей и полученных ранее экспериментальных данных, формулируется постановка задачи теплового моделирования и экспериментального исследования тепловых процессов в ВЧИД.

В главе 2 приводится описание тепловой расчетной модели, построенной на основе учета различных физических механизмов переноса тепла в ионном двигателе



с индукционным высокочастотным разрядом. Обсуждается математическая постановка задачи, обоснованность граничных условий и схемы численного расчета.

Глава 3 является наиболее объёмной и содержательной главой диссертации. В ней представлены результаты расчетов трех моделей ВЧИД с различными диаметрами ионных пучков. Расчеты проведены для решения практических вопросов применимости выбранных материалов электродов и элементов конструкций рассматриваемых моделей на различных режимах работы двигателей.

В главе 4 описана специально разработанная методика тепловизионных измерений, позволившая получить экспериментальные данные по измерению температур образцов элементов конструкций исследуемых моделей двигательных блоков.

Достоверность и обоснованность полученных в диссертации результатов обусловлены использованием в экспериментах современного измерительного тепловизионного комплекса, продуманностью методик измерений и обработки экспериментальных данных по определению степени черноты и индикатрисы теплового излучения для элементов конструкции ВЧИД, а также сходимостью расчетных и экспериментальных результатов.

К полученным в диссертационной работе наиболее значимым **новым научным результатам** можно отнести следующие:

- предложена и обоснована балансовая модель плазмозфизических процессов, протекающих при самостоятельном индукционном разряде в высокочастотном ионном двигателе;

- разработана тепловая модель, определяющая связь тепловых потоков на поверхности газоразрядной камеры и электродов ионно-оптической системы с интегральными характеристиками ВЧИД, с большой точностью измеряемыми в эксперименте;

- проведены вычислительные эксперименты по исследованию распределения температурных полей в моделях двигателей ВЧИД ММ, ВЧИД-16 и проектируемого двигателя ВЧИД – 49 М;

- разработана оригинальная методика экспериментального измерения температурных полей во внешних элементах конструкции ВЧИД с использованием тепловизора;

- получено согласование результатов численных расчетов полей температур в проектируемых конструкциях ВЧИД различных мощностей с данными экспериментальных измерений.

Основываясь на представленных результатах диссертационной работы, можно судить о значительном объеме проведенных комплексных научных расчетно-экспериментальных исследований и по достоинству оценить **личный вклад** и труд автора. Им был выполнен весь комплекс экспериментальных работ, построены расчетные модели и выполнены компьютерные расчеты для трех моделей двигателей.

Практическая значимость результатов работы заключается в использовании разработанных расчетных моделей и методов тепловых измерений в НИОКР и ОКР для проведения анализа влияния материалов, их теплофизических свойств, контактных термосопротивлений на температуру в критических элементах ВЧИД. Полученные распределения температур электродов использованы в термомеханических расчетах узлов ИОС ВЧИД ММ, ВЧИД-16 и ВЧИД мощностью 15-20 кВт.

По диссертации могут быть сделаны следующие **замечания**:

1). Ресурс работы ВЧИД в значительной мере зависит от плотности мощности перезарядных ионов, выносимых на поверхность ускоряющего электрода (УЭ). Каковы сравнительные оценки вклада этого механизма эрозии УЭ для рассмотренных в диссертации моделей двигателей?

2). В диссертации, несмотря на огромный объем представленных материалов, не уделено места сравнительной оценке достоверности результатов, получаемых с помощью разработанной модели. Целесообразно было бы показать преимущества предлагаемого подхода на основе сравнения с результатами моделирования других авторов.

3). Известно, что величина контактного сопротивления может сильно влиять на распределение температур в сборной конструкции. При постановке задачи контактные сопротивления задавались в виде констант, соответствующих обратной величине проводимости контактов для различных материалов. Вместе с тем, эти значения могут существенно изменяться при деформации элементов в процессе работы ВЧИД. Варьировались ли их значения в расчетах? В зависимости (2.41) не указана размерность проводимости контакта $[K] = \text{Вт}/(\text{м}^2\text{К})$.

4). Для обоснования сделанного автором выбора метода измерения температур с использованием тепловизора, следовало бы провести более подробный сравнительный анализ точности термопарного, пирометрического и тепловизионного методов.

5). Остался невыясненным вопрос, о котором упоминает сам автор, о вкладе солнечной радиации в энергетический баланс.

Сделанные замечания не снижают достоинств диссертационной работы, носят рекомендательный характер и могут быть приняты во внимание при продолжении работ данного направления.

В целом представленная автором работа является содержательным и оригинальным исследованием, отличающимся системностью подходов в решении поставленных задач и тщательностью в разработке методик экспериментальных измерений и методов расчета. Диссертация представлена на 143 страницах, включает 74 рисунка, 16 таблиц и снабжена списком цитируемой литературы из 85 наименований. Автореферат диссертации соответствует ее содержанию.

На основании вышесказанного можно заключить, что диссертационная работа К.И. Круглова является важным научным исследованием, выполненным на высоком научном уровне и имеющим актуальное для космической отрасли практическое применение. Диссертация К.И. Круглова отвечает всем требованиям ВАК РФ, предъявляемым к кандидатским диссертациям, а ее автор – Кирилл Игоревич Круглов заслуживает присуждения ему ученой степени кандидата технических наук по специальности 05.07.05 – «Тепловые, электроракетные двигатели и энергоустановки летательных аппаратов»

Официальный оппонент,
доктор техн. наук, профессор
кафедры Теплофизики МИФИ;
115409 г. Москва, Каширское ш., д.31,
НИЯУ МИФИ, тел. (495)-788-56-99*90-99,
e-mail: OVMitrofanova@mephi.ru

О.В. Митрофанова



04.12.2017 *Т.В. Митрофанова*