

ОТЗЫВ

официального оппонента на диссертацию

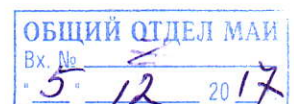
Круглова Кирилла Игоревича

«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"

1. Актуальность темы исследований.

Электрические ракетные двигатели (ЭРД) используются в космической технике, начиная с 70-х годов прошлого столетия, для коррекции и стабилизации орбиты искусственных спутников Земли (ИСЗ). В СССР и России наибольшее распространение получили двигательные установки на основе СПД, так как этот тип двигателей обладает наименьшей ценой тяги (электрическая мощность, потребляемая двигателем, отнесенная к величине тяги). По мере развития космической техники мощность источников электрической энергии на борту КА возрастает. В настоящее время она достигает 20 кВт на так называемых тяжелых ИСЗ и прогнозируется дальнейший ее рост до 50-100 кВт. Для коррекции и стабилизации орбиты таких ИСЗ электрические ракетные двигатели должны обладать высоким удельным импульсом (25 - 30 км/с).

В последнее десятилетие электрические ракетные двигатели стали применяться в качестве основного источника тяги для межпланетных перелетов и полетов в дальний космос. В этом случае удельный импульс тяги ЭРД должен быть (30 -50) км/с и более. Кроме того, современные ЭРД должны обладать высоким коэффициентом полезного действия (КПД) и большим ресурсом. Этим требованиям удовлетворяют ионные двигатели (ИД). В России эти двигатели разрабатываются в ГНЦ ФГУП «Центр Келдыша» и в НИИ ПМЭ МАИ. В Центре Келдыша разрабатываются ионные



двигатели постоянного тока (ИДПТ), а в НИИ ПММ МАИ – высокочастотные ионные двигатели (ВЧИД). При разработке этих двигателей важно знать величину температуры и ее распределение в двигателе уже на этапе проектирования. Это знание особенно необходимо для правильного выбора конструктивных параметров электродов ионно-оптической системы (ИОС). Поэтому создание методики расчета температурных полей в ВЧИД на основе математической тепловой модели является весьма актуальной. Создание такой методики позволит значительно сократить расходы на разработку ВЧИД.

2. Степень обоснованности научных положений, выводов и рекомендаций, сформулированных в диссертации. Основные положения, выносимые на защиту:

1. Балансовая модель плазмофизических процессов, обусловленных ионизацией рабочего тела в самостоятельном индукционном разряде, включающая взаимодействие частиц: ионов, электронов и фотонов с элементами конструкции ВЧИД с различными физическими свойствами.
2. Тепловая модель, определяющая связь тепловых потоков на поверхности газоразрядной камеры (ГРК), эмиссионного (ЭЭ) и ускоряющего (УЭ) электродов с интегральными характеристиками ВЧИД.
3. Тепловая расчетная модель ВЧИД, допускающая последовательное ее усложнение путем повышения уровня детализации объекта с конечной целью максимального приближения компьютерного объекта к разработанной графической модели, а при создании лабораторной модели и к реальному объекту.
4. Методика экспериментального измерения температурных полей во внешних элементах конструкции ВЧИД с использованием тепловизора.

Для составления балансовой модели тепловыделения в элементах конструкции двигателя автором диссертации тщательно проанализированы

физические процессы в (ГРК). Этот анализ позволил определить плотность тепловых потоков на стенки ГРК, ЭЭ и УЭ по величине плотности тока ионов и электронов на указанные элементы двигателя и величиной температуры электронов в ГРК. Тщательный анализ физических процессов ГРК двигателя послужил надежной основой для разработки тепловой модели ВЧИД. В этой модели установлена связь между ВЧ мощностью разряда, током пучка ионов из двигателя и средней температурой электронов в ГРК. Ток пучка и ВЧ мощность задаются в техническом задании на разработку двигателя, температура электронов определяется по уравнению сохранения энергии. Такой подход позволяет определить плотности тепловых потоков в конструктивные узлы двигателя: ГРК, ЭЭ и УЭ с достаточной точностью. Величина этих потоков определяет температуру указанных элементов. Численные расчеты были выполнены с помощью программного комплекса ANSYS, надежность которого не вызывает ни каких сомнений. Автору диссертации удалось довести длительность расчета до двух часов путем сокращения ячеек счета. Основой для этого послужило определение размеров областей с мало изменяющейся температурой.

Для экспериментального определения температуры был использован тепловизор. Было установлено, что для определения температуры с точностью менее 5% необходимо измерение степени черноты непосредственно изготовленных деталей. Для ГРК методика определения степени черноты была разработана. Обоснованность полученных результатов подтверждена термопарными измерениями.

3. Достоверность и новизна исследования, полученных результатов, выводов и рекомендаций, сформулированных в диссертации.

Новизна работы состоит в том, что в России научно обоснованной методики расчета температур в элементах конструкции ВЧИД не существовало. Автору диссертации удалось создать такую методику.

Достоверность полученных результатов подтверждена прямыми измерениями температуры ГРК двигателя. Расхождение измеренной температуры и температуры полученной в расчете не превышает 5%. Это обстоятельство указывает на то, что предложенная методика может использоваться при разработке ВЧИД.

4. Значимость для науки и практики полученных автором результатов.

Практическая значимость разработанной автором расчетно-экспериментальной методики определения температур в элементах конструкции двигателя состоит в том, что с ее помощью можно оценить температуру наиболее нагретых элементов ИОС, а именно распределение температуры в эмиссионном электроде и ускоряющем электроде уже на этапе проектирования ВЧИД. Эти данные позволяют значительно снизить стоимость разработки, так как при создании опытного образца ВЧИД уменьшает число экспериментальных моделей двигателя и время на их исследование.

5. Конкретные рекомендации по использованию результатов и выводов диссертации.

Результаты работы рекомендуется использовать при разработке летных образцов ЭРД на основе ВЧИД с удельным импульсом выше 30км/с в ГНЦ ФГУП «Центр Келдыша», ФГБОУ ВПО «Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова», ФГБУ «Национальный исследовательский центр «Курчатовский институт», ФГУП ОКБ «Факел».

6. Оценка содержания диссертации, ее завершенности.

Работа представляет собой рукопись объемом 143 страницы печатного текста, включая 74 рисунка, 16 таблиц, а также список цитируемой

литературы, содержащий 85 наименований. Она включает в себя введение, четыре раздела, заключение, а также список использованных источников.

Во введении приводится обоснование актуальности тематики диссертационного исследования, краткое описание проблемы экспериментального и расчетно-теоретического исследования тепловых процессов, протекающих при работе ВЧИД. Описывается степень разработанности избранной темы, формулируются цели и задачи, научная новизна, теоретическая и практическая значимость результатов работы, методология и методы диссертационного исследования, положения, выносимые на защиту, достоверность полученных результатов, реализация и внедрение результатов работы, личный вклад соискателя, сообщаются сведения об апробации работы и публикациях автора, излагается объём и структура диссертации. В первом разделе описываются технические характеристики известных ВЧИД, их преимущества и недостатки по сравнению с более распространенными ионными двигателями на постоянном токе. Приводится описание теплофизических процессов, протекающие при работе двигателя в различных узлах его конструкции. Приводится обзор существующих расчетных тепловых моделей. Формулируется постановка задачи теплового моделирования и экспериментального исследования тепловых процессов в ВЧИД. Во втором разделе приводится изложение разработанной тепловой расчетной модели процессов. В модели принято, что перенос тепла в конструкции ВЧИД осуществляется лучистым и теплопроводным способом, а также через контактные сопротивления. Определяются выражения для тепловых потоков из плазмы разряда, идущие на поверхности различных элементов ВЧИД. В работе численным образом определяются температуры в элементах конструкции ВЧИД путем решения уравнения теплопроводности, записанного в форме уравнения Лапласа. Основными параметрами в предлагаемой тепловой модели являются значения вводимой ВЧ мощности и ионного тока из двигателя. Это вызвано

тем, что, как правило, они задаются при разработке ВЧИД. Кроме того они могут быть измерены при отработке двигателя. В разделе приводятся результат расчета температур в модельном двигателе ВЧИД – 16. Выполнена серия расчетов температур в модельной конструкции ВЧИД-16 с целью обоснования упрощений и допущений расчетной модели, сделанных для возможного большего сокращения объема счета. В третьем разделе приводятся результаты расчетов температурных полей в тепловых моделях разрабатываемых в НИИ ПМЭ МАИ трех двигателей ВЧИД разной мощности с диаметрами ионного пучка 8, 16 и 49 см. Численные расчеты температур в двигателях позволили отработать расчетную модель, и определить предельную величину ВЧ мощности, при которой в качестве материала электродов ИОС можно использовать титановый сплав ВТ1 – 4. Рассчитанные профили температур по радиусу для ЭЭ и УЭ использовались для решения термомеханической задачи устойчивости электродов при разработке в МАИ указанных двигателей. В этом разделе приводится так же тепловой расчет для двигательной установки на основе ВЧИД с диаметром пучка 8 см, планируемой для применения в составе космического аппарата. Проведенные расчеты показали, что предложенная методика определения температурных полей в элементах ВЧИД вполне применима для определения температуры блоков, из которых состоит двигательная установка. В четвертом разделе приводится описание экспериментальных измерений температурных полей в ГРК и электродах ИОС двигателя. Измерения температур проводились при помощи тепловизора FLIRSC645. Описана методика измерений и результаты измерений. Показано, что измеренные температуры в газоразрядной камере совпадают с расчетными значениями с точностью 5% . Этот результат свидетельствует о высокой достоверности предложенной методики расчета температур в ВЧИД и рекомендаций, сделанных на основании расчетов.

Диссертация является вполне законченным исследованием, показывающим возможность расчета распределения температуры в конструктивных узлах ВЧИД. Диссертация написана хорошим литературным языком. Следует отметить, что основные результаты диссертационного исследования в необходимом количестве опубликованы научных журналах, рекомендованных ВАК, и докладывались на международных конференциях. Автореферат с достаточной полнотой отражает основное содержание диссертации.

7. Замечания по работе.

В качестве замечаний и недостатков можно отметить следующее:

1. Предложенная в диссертации методика определения температуры с помощью тепловизора не доработана. Поэтому определить распределение температуры в УЭ не удалось.
2. При изложении материала допущены неопределенности, связанные с неточным указанием номеров рисунков. Например, стр. 68 вместо рисунка 2.10 указан рисунок 2.4, а на стр.69 вместо 2.9 указан 2.6.

8. Заключение

Указанные замечания не снижают научной и практической значимости работы и носят рекомендательный характер. Диссертационная работа Круглова Кирилла Игоревича «Моделирование теплофизических процессов в высокочастотном ионном двигателе» является законченной научно-квалификационной работой, в которой на основании выполненных автором исследований изложена научно обоснованная методика определения температуры узлах высокочастотного ионного двигателя, внедрение которой внесет значительный вклад в развитие экономики и повышение обороноспособности РФ. Считаю, что представленная к защите работа по своей актуальности, научной новизне, научно-техническому уровню и

практической значимости полностью отвечает требованиям п.п. 9-14 Положения ВАК РФ о присуждении учёных степеней, предъявляемых к диссертациям на соискание учёной степени кандидата технических наук по специальности 05.07.05 – "Тепловые, электроракетные двигатели и энергоустановки летательных аппаратов", а её автор Круглов Кирилл Игоревич заслуживает присуждение учёной степени кандидата технических наук.

Официальный оппонент,

кандидат технических наук, старший научный сотрудник, доцент кафедры физики Московского технологического университета (МИРЭА), 119454, Москва, Проспект Вернадского, д.78, тел. 89260835007, E-mail: bishaev@mirea.ru

Бишаев Андрей Михайлович

Подпись Бишаева А.М. удостоверяю



Гербовая печать

Дата

учебный секретарь
Н. В. Лемелова
05.12.2017г.

07.12.2017 П.А.И.