

**Отзыв  
официального оппонента**

доктора технических наук, профессора, профессора кафедры  
«Электротехника, теплотехника и гидравлика» ФГБОУ ВО  
«Воронежского государственного лесотехнического университета  
имени Г.Ф. Морозова», Попова Виктора Михайловича  
на диссертационную работу Ежова Алексея Дмитриевича  
«Тепловые процессы в контактных соединениях жидкостных  
ракетных двигателей малой тяги»,  
представленную на соискание ученой степени кандидата  
технических наук по специальности 01.04.14 – «Теплофизика и  
теоретическая теплотехника»

**Актуальность работы.** Современное состояние материаловедения открывает перед разработчиками объектов современной техники возможность использования в элементах конструкции изделия материалов с самыми различными теплофизическими свойствами. Выбор наиболее подходящего материала, удовлетворяющего как по своим физическим свойствам, его доступности, экономическим показателям является первостепенной задачей при проектировании изделия. Зачастую результатом решения такой задачи является совокупное использование металлических и керамо-композитных материалов, что в свою очередь приводит к вопросу обеспечения требуемого теплового режима и обеспечения надежности конструкции.

Достоверное знание теплонапряженных зон позволяет разработчикам на этапе проектирования снизить тепловые потери, связанные с контактными явлениями в узлах соприкосновения деталей. Состояние шероховатости поверхности, наличие заполнителя и их достоверное представление в расчетах во многом определяет эксплуатационные свойства деталей конструкций. Одна из подобных задач, характерная для ракетного двигателестроения, а так же и алгоритм её решения, рассматривается в диссертационной работе, что и определяет её актуальность.

**Структура и объем работы.** Работа объемом 180 страниц состоит из введения, шести глав, заключения, списка литературы и приложений. Список литературы состоит из 131 источника. Введение содержит обоснование

актуальности выбранной тематики и краткое изложение диссертации, сформулированы цель и задачи работы, приведена информация о научной новизне и практическая значимости, достоверности и обоснованности результатов.

Первая глава диссертации содержит обзор существующих соединений в жидкостных ракетных двигателях. Отмечено, что наличие дискретного контакта вносят существенные изменения в характер формирования температурного поля жидкостных ракетных двигателей малой тяги и напряженно-деформированного состояния.

Вторая глава состоит из аналитического обзора литературы, посвященной тематике определения контактного термического сопротивления и моделирования шероховатости поверхности. Установлено, что большинство аналитических зависимостей становятся неприменимы для целого ряда задач инженерной практики.

Третья глава посвящена методике моделирования шероховатости поверхности. Приводится достаточно подробный алгоритм анализа данных профилограмм поверхностей и дальнейшего трехмерного моделирования микронеровностей.

В четвертой главе представлен численный метод расчета теплового и прочностного состояния двух контактирующих поверхностей, определения фактической площади контакта и их расположение. С целью расширения области применения методики автором приведены расчеты контактного термического сопротивления с учетом наличия межконтактной среды.

В пятой главе рассмотрены экспериментальные методы исследования тепловых процессов в контактной зоне. На основе проведенного анализа существующих установок по определению КТС, автором разработана экспериментальная установка, оснащенная современной аппаратной платформой. Приведены результаты эксперимента по определению КТС контактной пары графит – нержавеющая сталь

Последняя глава посвящена практической реализации предложенных научных решений. Приведен расчет напряженно-деформированного состояния с учетом влияния КТС между соприкасающимися поверхностями композитных камер сгорания жидкостных ракетных двигателей двух типов: с возможностью изменения геометрии соединений и с возможностью выбора материала прижимного кольца.

*Целью диссертационной работы* являлось исследование тепловых процессов в контактных соединениях композиционных теплонапряженных конструкций жидкостных ракетных двигателей малой тяги, что в конечном итоге и привело к разработке инженерной методики численного моделирования теплообмена и напряженно-деформированного состояния создаваемых изделий с учетом влияния контактного термического сопротивления.

*Достоверность* результатов диссертационной работы обеспечена:

- согласованием результатов полученных с помощью предлагаемой методики по определению КТС с многочисленными эмпирическими закономерностями приведенных в литературе;
- совпадением результатов численного решения с результатами проведенного эксперимента.

*Практическая значимость* результатов работы заключается в том, что на основе проведённого анализа возможно достоверное и точное определение температурных полей и соответствующее им напряженно-деформированное состояние конструкций с учетом значений контактного термического сопротивления и уже на начальном этапе проектирования определить проблемные участки, которые могут возникнуть в процессе эксплуатации и значительно сократить сроки испытаний и отработки изделия.

Достоинством данной работы является её поэтапная апробация на конференциях и многочисленных публикаций из 20 научных работ, 5 опубликованы в рецензируемых научных изданиях, рекомендованных ВАК при Минобрнауки России.

### **Замечания:**

- в работе не представлен тип контактирования при действующих контактных температурах и давлениях;
- отсутствует математическая модель контактного теплообмена - есть только методика оценки контактного сопротивления при помощи программных продуктов;
- отсутствуют значения КТС в области малых номинальных давлений контакта;
- отсутствует обоснование выбора стационарной методики экспериментального определения КТС;
- отсутствуют рекомендации по возможному использованию результатов исследования, кроме двигателей малой тяги.

### **Новизна** и положительные стороны работы:

- конкретное определение и обоснованность области применения, т.к. именно в ЖРД малой тяги можно обойтись без жидкостного охлаждения при условии интенсификации теплоотвода от теплонапряженных конструктивных элементов к излучающим за счет уменьшения контактных сопротивлений в разъемных соединениях;
- методика математического моделирования шероховатости поверхности, formalизованная в виде запатентованной программы;
- проверка известных термомеханических моделей контакта соединением модельных поверхностей в "ANSYS" при соответствующих граничных условиях;
- применение подтвержденных значений контактных сопротивлений в качестве граничных условий для моделирования теплонагруженного состояния конструкций ЖРД;
- четкий подход к определению контактного термического сопротивления для ранее не известных, специфических материалов.

Выводы в работе вполне отражают основные результаты исследований. Автореферат правильно отражает содержание работы. Тема диссертации и её

содержание соответствуют паспорту специальности 01.04.14 – «Теплофизика и теоретическая теплотехника».

С учетом отмеченного можно констатировать, что диссертация Ежова А.Д. выполнена на высоком научном уровне, является законченной научно-квалификационной работой, содержит новые и практически полезные научные результаты.

Диссертационная работа «Тепловые процессы в контактных соединениях жидкостных ракетных двигателей малой тяги» соответствует требованиям Положения о порядке присуждения научным и научно-педагогическим работникам ученых степеней. Её автор – Ежов Алексей Дмитриевич, заслуживает присуждения ему ученой степени кандидата технических наук по специальности 01.04.14 – «Теплофизика и теоретическая теплотехника».

Официальный оппонент –  
д.т.н., профессор, профессор  
кафедры «Электротехники, теплотехники и  
гидравлики» ФГБОУ ВО «Воронежского  
государственного лесотехнического  
университета имени Г.Ф. Морозова»



Попов Виктор Михайлович

394087, г. Воронеж, ул. Тимирязева, 8  
Телефон 8-473-253-73-08  
e-mail: etgvglta@mail.ru



Попова В.М.

13.09.2014 г.