

На правах рукописи



**ЕЖОВ АЛЕКСЕЙ ДМИТРИЕВИЧ**

**ТЕПЛОВЫЕ ПРОЦЕССЫ  
В КОНТАКТНЫХ СОЕДИНЕНИЯХ ЖИДКОСТНЫХ РАКЕТНЫХ  
ДВИГАТЕЛЕЙ МАЛОЙ ТЯГИ**

Специальность 01.04.14  
«Теплофизика и теоретическая теплотехника»

**АВТОРЕФЕРАТ**  
диссертации на соискание ученой степени  
кандидата технических наук

Москва - 2017

Работа выполнена в федеральном государственном бюджетном образовательном учреждении высшего образования «Московский авиационный институт (национальный исследовательский университет)».

**Научный руководитель:** кандидат технических наук, доцент  
**Меснянкин Сергей Юрьевич**

**Официальные оппоненты:** **Резник Сергей Васильевич**  
доктор технических наук, профессор, ФГБОУ ВО  
Московский государственный технический  
университет им. Н.Э. Баумана, заведующий  
кафедрой «Ракетно-космические композитные  
конструкции»

**Попов Виктор Михайлович**  
доктор технических наук, профессор, ФГБОУ ВО  
«Воронежский государственный лесотехнический  
университет имени Г.Ф. Морозова», профессор  
кафедры «Электротехника, теплотехника и  
гидравлика»

**Ведущая организация:** Акционерное общество «Центральный Научно-исследовательский институт специального машиностроения» (АО «ЦНИИСМ»)

Защита состоится «09» октября 2017 г. в 13:00 часов на заседании диссертационного совета Д212.125.08, созданного на базе федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего образования «Московский авиационный институт (национальный исследовательский университет)» по адресу: 125993, Москва, А-80, ГСП-3, Волоколамское шоссе, д.4.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке и на сайте Московского авиационного института (национального исследовательского университета) [https://www.mai.ru/upload/iblock/563/ezhovad\\_dissert.pdf](https://www.mai.ru/upload/iblock/563/ezhovad_dissert.pdf)

Автореферат разослан: «\_\_\_\_\_» \_\_\_\_\_ 2017 г.

Ученый секретарь  
диссертационного совета  
Д212.125.08,  
д. т. н., профессор

 Зуев Юрий Владимирович

### **Актуальность темы диссертационной работы**

При проектировании жидкостных ракетных двигателей малой тяги (ЖРДМТ) с элементами из композиционных материалов находящимися в контакте с металлическими поверхностями необходимо достоверное знание теплового и напряженно-деформированного состояния конструкции. Для этого необходима методика определения температурных полей и напряженно-деформированного состояния конструкции с учетом значения контактного термического сопротивления (КТС), происходящих в узлах сопряжения. Наличие такой методики позволяет на начальном этапе проектирования учесть основные проблемные зоны, которые могут возникнуть в процессе эксплуатации и внести коррективы в конструкцию, сократить сроки испытаний и обработки изделия и создать более надежную конструкцию.

В качестве **объекта исследования** выбраны конструкции ЖРДМТ, содержащие многочисленные теплонапряженные неидеальные соединения.

### **Цель работы**

Исследование тепловых процессов в контактных соединениях композиционных теплонапряженных конструкций жидкостных ракетных двигателей малой тяги. Разработка инженерной методики численного моделирования теплообмена и напряженно-деформированного состояния создаваемых изделий с учетом влияния контактного термического сопротивления.

### **Для достижения цели решались следующие задачи**

- Изучение особенностей передачи теплоты в типовых конструкционных элементах жидкостных ракетных двигателей малой тяги.
- Разработка универсальной методики определения контактного термического сопротивления для новых типов материалов применяемых в современном двигателестроении, базирующейся на вычислении значения контактного термического сопротивления по данным микрогеометрии соприкасающихся поверхностей в соответствующих контактных парах.
- Предложение технического решения связанного с заменой материалов отдельных элементов, позволяющее снизить эквивалентные напряжения конструкции в целом, и на этой основе увеличить срок службы и повысить надежность разрабатываемых жидкостных ракетных двигателей малой тяги.

### **Научная новизна работы**

Научная новизна работы заключается в том, что впервые предложена методика определения контактного термического сопротивления на базе 3-х мерного моделирования сопрягаемых поверхностей реальных конструкций и комплексно решена тепловая задача на основе которой анализируется механическое нагружение в реальных неидеальных теплонагруженных соединениях жидкостных ракетных двигателей малой тяги с учетом значения термического сопротивления. Вносятся рекомендации по изменению применяемых конструктивных решений за счет разработанных методик численного моделирования теплового и механического состояния жидкостных ракетных двигателей малой тяги в результате нагрева камеры сгорания из углерод-углерод композиционных материалов с учетом значений контактного термического сопротивления в узлах контакта.

**Практическая и теоретическая значимость работы** заключается в том, что предложенные методики позволяют достаточно точно определить температурные поля и соответствующее им напряженно-деформированное состояние конструкции жидкостных ракетных двигателей малой тяги с учетом значений контактного термического сопротивления между соприкасающимися деталями неидеального соединения. Это в свою очередь позволяет найти значения межконтактного давления и

провести оптимизацию геометрии для отдельных высоконагруженных узлов из любой пары материалов соприкасающихся поверхностей. Такой подход делает универсальным расчет КТС и позволяет уже на начальном этапе выявить основные проблемы, которые могут возникнуть в процессе эксплуатации и значительно сократить сроки испытаний и отработки изделия.

#### **Личный вклад автора**

- Разработка методики численного моделирования контактного термического сопротивления между соприкасающимися поверхностями, включающая в себя анализ тепловых процессов в контактных парах различных материалов на микроуровне с последующим описанием этих процессов методом конечных элементов.

- Проектирование и сборка экспериментальной установки по определению контактного термического сопротивления в воздухе, проведение экспериментов и анализ опытных данных.

- Создание методики расчета напряженно-деформированного состояния жидкостных ракетных двигателей малой тяги с учетом значения контактного термического сопротивления между соприкасающимися поверхностями.

#### **Основные положения диссертации, выносимые на защиту**

Математическая модель контактного термического сопротивления для определения реального напряженно-деформированного состояния конструкции.

Механизм переноса теплоты в контактирующих теплонагруженных узлах различной формы и геометрии применительно к конструкциям жидкостных ракетных двигателей малой тяги.

#### **Публикации**

По тематике диссертационной работы опубликовано 20 научных работ, 5 из которых в журналах, входящих в перечень ВАК, и одно свидетельство на программу для ЭВМ.

#### **Степень достоверности и апробация результатов**

Достоверность диссертационной работы обеспечена:

- согласованием результатов численного моделирования с результатами натурального эксперимента;

- применением для расчетов программных комплексов, зарекомендовавших себя и сертифицированных для решения подобного рода задач.

Основные положения диссертационной работы доложены на научно-технических конференциях Всероссийского и международного уровня:

- Московская молодежная научно-практическая конференция «Инновации в авиации и космонавтике» (Москва 2014, 2015);

- XI Международная конференция пользователей ANSYS/CADFEM, (Москва 2014);

- 13-я, 14-я, 15-я Международная конференция «Авиация и космонавтика» (Москва 2014, 2015, 2016);

- Конкурс научно-технических работ и проектов «Молодежь и будущее авиации и космонавтики» (Москва 2014, 2015);

- XXXIX Академические чтения по космонавтике (Москва 2015);

- 6-я и 7-я научно-практическая Internet-конференция «Междисциплинарные исследования в области математического моделирования и информатики» (Тольятти 2015, 2016);

- Всероссийская научно-техническая конференция молодых ученых и специалистов «Новые решения и технологии в газотурбостроении» (Москва 2015);

- XLII, XLIII Международная молодежная научная конференция «Гагаринские чтения», (Москва 2016, 2017);

- XV Минский международный форум по тепло- и массообмену, (Минск 2016),

- XI Международная конференция по неравновесным процессам в соплах и струях (Алушта 2016).

## КРАТКОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

**Во введении** обосновывается актуальность темы исследования связанная с необходимостью учета контактного термического сопротивления в соединениях жидкостных ракетных двигателей малой тяги, формулируются цель работы и задачи исследования, отражена научная новизна, практическая значимость, приведены положения выносимые на защиту.

**В первой главе** представлена особенность тепловых процессов в контактной паре жидкостных ракетных двигателей малой тяги с учетом специфики различных соединений. Отмечено, что конструкции жидкостных ракетных двигателей малой тяги включают в себя множество соединений между элементами деталей (фланцевые, резьбовые, паянные, сварные соединения). Поскольку в большинстве случаев контакт в соединениях является дискретным, то происходит стягивание и удлинение линий теплового потока к контактными пятнам. Эти явления вносят существенные изменения в характер формирования температурного поля вблизи области контакта, а именно, повышают температурный градиент, образуется контактное термическое сопротивление. Все это ведет к локальному перегреву узлов конструкции, которое чаще всего ведет к выходу из строя всей конструкции в целом. Использование существующих методик по моделированию и прогнозированию КТС для оценки потерь температурного напора с учетом специфики применяемых материалов, их свойств и условий контактирования, вызывают сомнения в правильности выбора того или иного соотношения, а различия в абсолютных значениях контактного термического сопротивления для одних условий затрудняют их использование. Установлено, что большинство аналитических зависимостей становятся неприменимы для целого ряда задач инженерной практики.

Показана важность учета контактного термического сопротивления в конструкциях ЖРДМТ для достоверного определения теплового состояния на этапе проектирования конструкции. Показана актуальность данной задачи в обычных условиях и в безвоздушной среде, где возникающие контактные перепады температур наиболее значительны из-за отсутствия среды в межконтактном зазоре, которая выполняет роль проводника теплового потока.

**Во второй главе** представлен аналитический обзор литературы. Рассмотрены статьи, диссертации и материалы конференций отечественных и зарубежных авторов по тематике определения тепловых процессов в контактной зоне и моделирования шероховатости поверхности.

Отмечено, что применительно к жидкостным ракетным двигателям вопрос достоверного расчета температурного поля конструкции с учетом контактного термического сопротивления в сопряженных узлах контакта рассмотрен крайне слабо, а при протекании высокоинтенсивных тепловых потоков через контакт двух материалов, сильно различающихся как по коэффициенту линейного расширения, так и микротопографии поверхности, является достаточно сложным процессом, требующим достоверного определения состояния всей конструкции в целом на всем участке работы двигателя, от момента запуска до выхода на стационарный режим, а так же при повторных включениях и выключениях.

Анализируя доступные статьи и материалы конференций установлено, что лишь малая часть авторов проводит полный термомеханический расчет соприкосновения шероховатых поверхностей. Результаты работ посвященные моделированию контактного взаимодействия шероховатых поверхностей, расчету площади

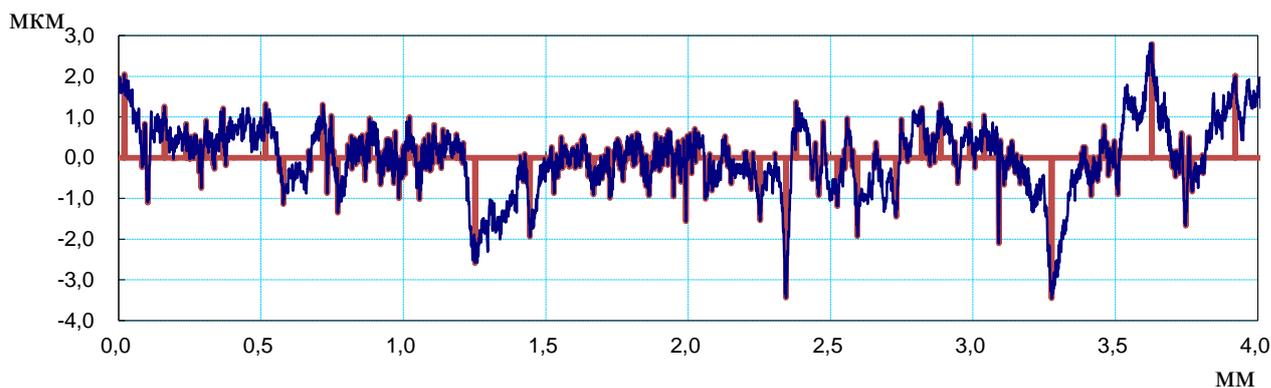
фактического касания и межконтактного объема одними авторами не учитываются при расчете и прогнозировании КТС другими авторами.

В результате анализа литературы определено, что одним из важнейших факторов, определяющих достоверный расчет температурного поля, эквивалентных напряжений конструкции, является состояние микрогеометрии контактирующих поверхностей. Эксплуатационные характеристики контактирующих деталей конструкции напрямую определяются свойствами контакта сопряженных поверхностей. Процессы трения и изнашивания происходят именно на фактической площади контакта и зависят не только от свойств материала, но и от давления на этой площади, поскольку величина фактического давления определяет разрушение поверхностных пленок и возникновение адгезионных связей на контакте.

Многочисленные публикации в области прогнозирования КТС и моделирования микротопографии поверхности свидетельствуют об актуальности тематики, её незавершённости и в явном виде невозможности использования имеющихся публикаций при проектировании современных ЖРДМТ. Вместе с тем достижения в области микротопографии и программного обеспечения 3-х мерного проектирования и программных систем конечно-элементного анализа линейных и нелинейных, стационарных и нестационарных пространственных задач механики деформируемого твёрдого тела, а также механики конструкций, теплопередачи и теплообмена, говорят о необходимости разработки методики расчета тепловых процессов в контактных соединениях на основе анализа профилограмм поверхностей. Результатом такого подхода является возможность определения теплонапряженного состояния конструкции с учетом значения КТС в широком диапазоне давлений и температур контактных пар специфических материалов, используемых в многочисленных соединениях современных ракетных двигателей.

**В третьей главе** отмечено, что использование основных характеристик шероховатых поверхностей, таких как  $R_a$ ,  $R_z$ ,  $S_m$  не позволяют определить истинные места контакта соприкасающихся поверхностей, а так же их взаимное расположение в самом контакте. С учётом того, что природа возникновения контактного термического сопротивления для конкретных материалов при фиксированной температуре и давлении зависит от геометрии соприкасающихся поверхностей и взаимного расположения отдельных неровностей, наиболее актуальным для достоверного определения КТС является определение реального расположения пятен фактического контакта и изучение механизма стягивания линий теплового потока. С целью определения истиной картины формирования зон сопряжения, изучения механического и теплового взаимодействия, представлена методика 3-х мерного моделирования соприкасающихся поверхностей.

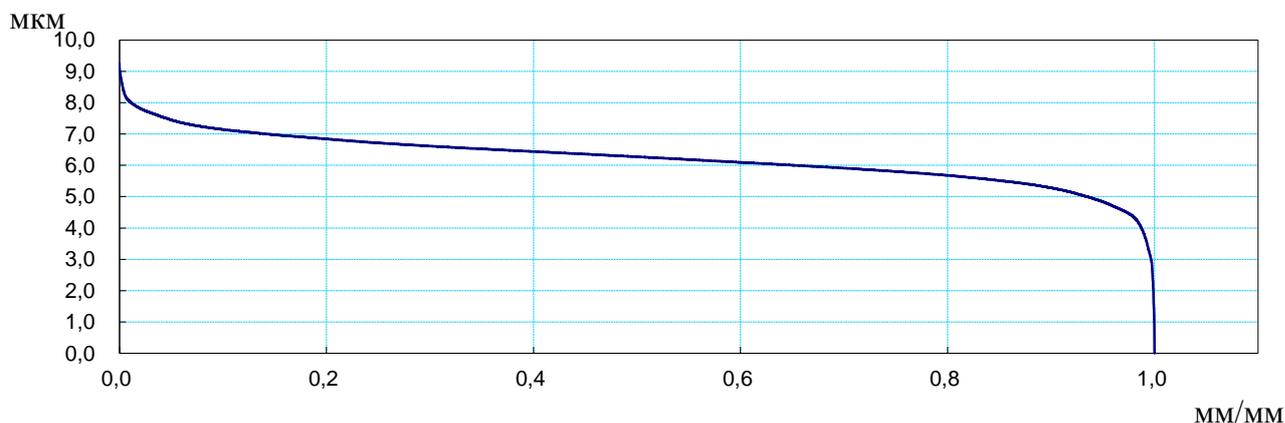
Для сопоставления моделируемых результатов с реальными и для получения основных характеристик шероховатости поверхности произведен ряд измерений профилограмм контактирующих поверхностей с помощью профилометра Mitutoyo SurfTest SJ-210. Наличие профилограмм в явном виде полученном с электронного профилометра не несет особой ценности для инженерных расчетов, ввиду наличия значительного объема данных о значениях координат точек профилограммы с шагом 1,5 мкм. Для уменьшения количества промежуточных точек между выступами и впадинами, а так же для точного определения среднего шага неровности производилась выборка точек впадин и выступов шероховатой поверхности. Результатом выборки является массив точек содержащий данные о выступах и впадинах профиля (рис.1)



**Рис.1 – График выступов и впадин шероховатой поверхности.**

Процесс поиска выступов и впадин происходил в автоматическом режиме, путем прогонки значений файла с координатами точек через программу составленную на языке Fortran. Результатом работы программы является массив точек с координатами выступов и впадин. Знание количества точек выступов и впадин позволяет определить средний шаг неровностей профиля как частное от деления базовой длины на количество точек.

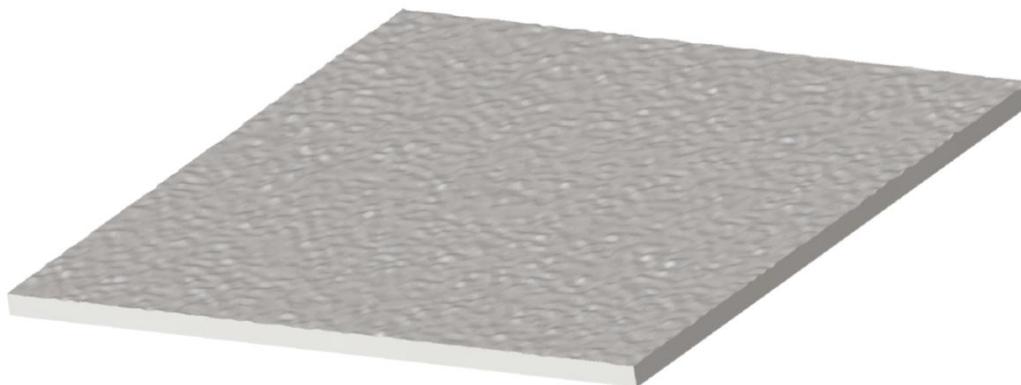
Для расчета характеристик контактирования двух шероховатых поверхностей необходимо четко знать распределение высот микровыступов по всей поверхности контакта. Именно от начальной площади касания и взаимного расположения двух поверхностей зависит распределение теплового потока в зоне контакта и как следствие температурного напора. Это распределение получено из профилограммы поверхности сортировкой точек от максимального до минимального значения по высоте микровыступа и обезразмеривания значения по базовой длине (Рис. 2). Наличие данного распределения позволяет использовать его для любых размеров расчетных областей, умножив безразмерную базовую длину на требуемую величину.



**Рис.2. – Распределение микровыступов по высоте для образца с  $R_a = 0.647$**

Для автоматизации процесса получения координат точек поверхностей, с целью работы с массивом данных, разработана программа на языке Фортран позволяющая получить таблицу данных с координатами точек  $(x, y, z)$  шероховатой поверхности. Получив все необходимые данные для моделирования поверхности, а именно средний шаг неровностей, распределение высот микровыступов по высоте, длина моделируемой поверхности, выполнялся процесс построения. В среде трёхмерного проектирования SolidWorks выполнялось считывание значений из файла с координатами точек, а в дальнейшем методом сплайновой интерполяции поверхности по точкам,

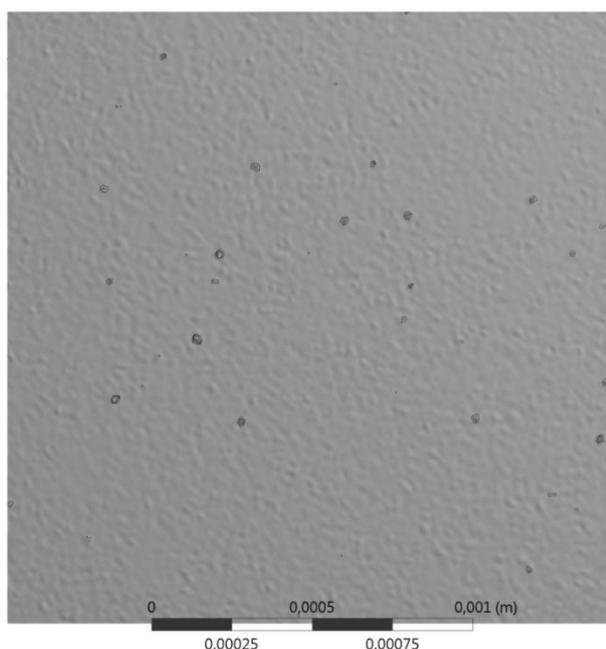
моделировалась микрогеометрия поверхности. Последовательность описанных действий позволяет получить трехмерную модель шероховатости поверхности, пример которой со значением  $R_a=0,647$ , и величиной базовой длины  $L=1$ мм приведен на рисунке 3.



**Рис.3 – 3-х мерная модель шероховатости поверхности  $R_a =0,647$ ,  $L=1$ мм.**

Используя представленный алгоритм построения модели шероховатости поверхности выполняется моделирование второй контактирующей поверхности. В дальнейшем данные модели сближались формируя поверхности контакта последовательно увеличивающуюся при росте механической нагрузки.

**В главе 4** приведен расчетно-аналитический метод определения температурных полей двух контактирующих шероховатых поверхностей. Для определения температурного поля использовались значения фактических площадей контакта и их расположение. Искомые величины являются результатом прочностного анализа при задании сжимающей нагрузки. Граничные условия для прочностного анализа соответственно: сжимающая нагрузка на образцы 0,5-2,5 МПа , материал образцов – 12Х18Н10Т, шероховатость образцов 0,531 мкм и 0,647 мкм, к боковым границам образцов приложены условия скользящей заделки без трения, к нижней границе приложены условия жесткой заделки , контакт происходит с коэффициентом трения 0,3. Результатом прочностного расчета является распределение поля эквивалентных напряжений, давлений в зоне контакта, фактической площади касания (Рис.4).



**Рис.4 – Места фактического контакта (отмечены темным цветом).**

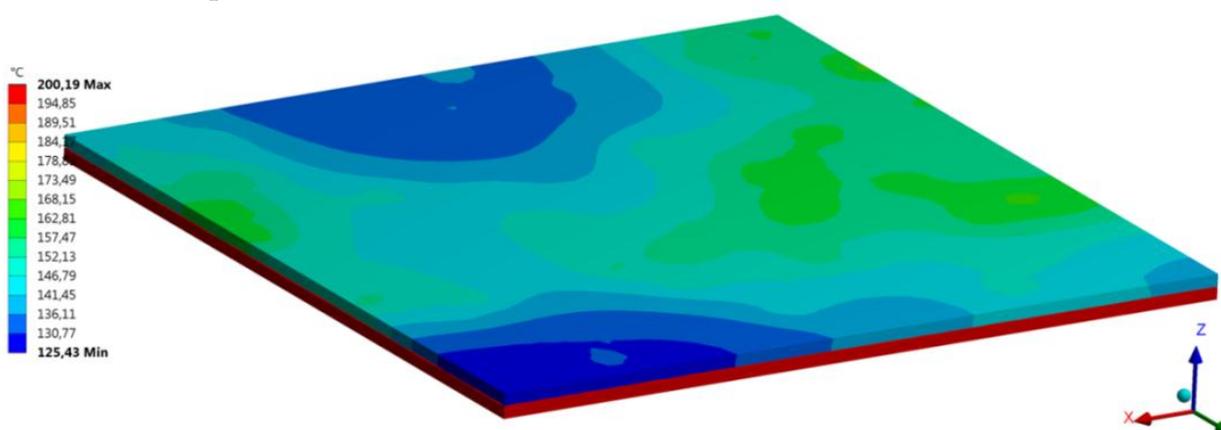
Знание фактических площадей касания позволяет максимально близко приблизиться к определению достоверного значения КТС. Для определения распределения температурного поля в подпрограмме теплового анализа используются модели шероховатых поверхностей с деформированной геометрией от воздействия сжимающей нагрузки.

Располагая картиной формирования площади контакта, производится тепловой расчёт сначала для модели с шероховатой поверхностью, а затем для модели идеального контакта, состоящей из прямых соосных цилиндров, контактирующих по плоской торцевой поверхности. Результатом такого расчета являются значения температуры на границах рассматриваемых элементов. При этом величина контактного термического сопротивления рассчитывается по формуле:

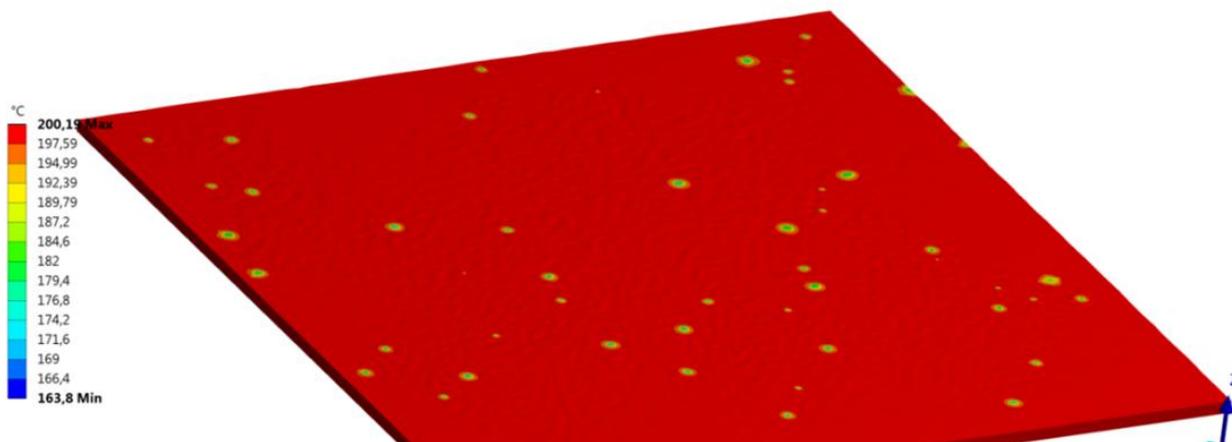
$$R_K = (T_{ниж1} - T_{ниж2})/q,$$

где  $T_{ниж1}$  и  $T_{ниж2}$  – температуры холодных поверхностей идеального и реального контактов соответственно, полученные 2-х кратным решением,  $q$  – удельный тепловой поток прошедший через зону контакта.

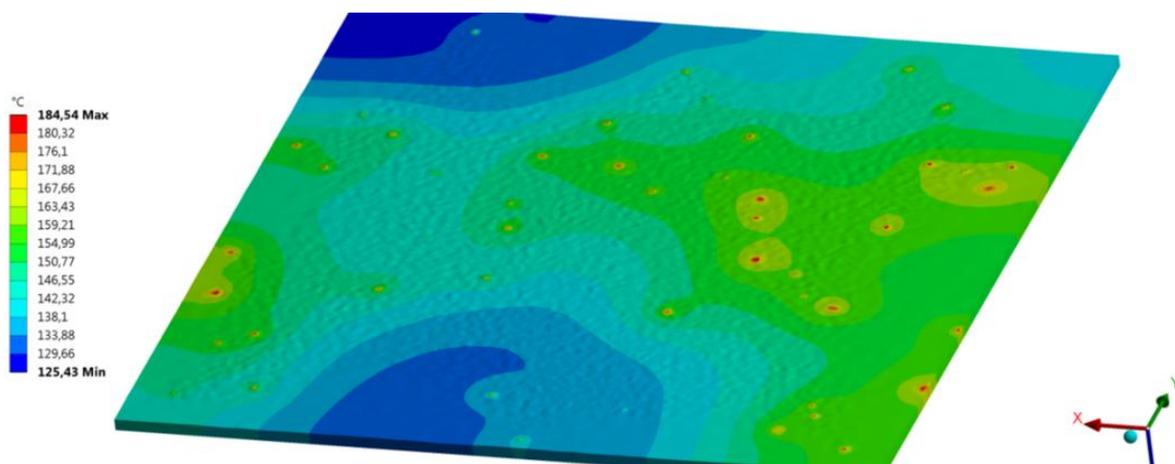
Результатом проведения теплового расчета по данной методике так же являются поле температур как в контактной зоне, так и на поверхностях отдельно сопрягаемых элементов, направление и величина теплового потока в контактирующих образцах. На рисунках 5–7 представлено распределение температурного поля контактирующих поверхностей из стали 12X10H8T при сжимающем давлении 2,5-МПа при отсутствии межконтактной среды.



**Рис. 5 – Распределение температурного поля в контактной паре 12X10H8Т-12X10H8Т.**



**Рис. 6 – Распределение температурного поля верхнего образца на поверхности контакта.**



**Рис. 7 – Распределение температурного поля нижнего образца на поверхности контакта.**

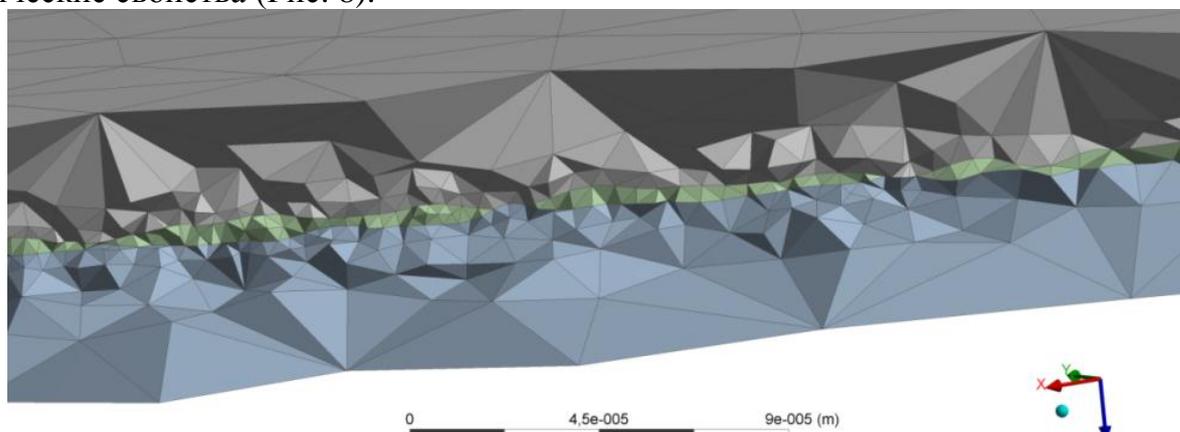
Полученные значения температурных полей позволяют выявить дополнительный перепад в контактирующих поверхностях и использовать их для расчета КТС между соответствующими парами материалов. С целью сопоставления полученных результатов КТС выполнено сопоставление с известными аналитическим зависимостям. Результаты расчетов отображены в таблице 1.

**Таблица 1**

**Величина КТС пары 12X10Н8Т - 12X10Н8Т в вакууме при  $T_k=150^\circ\text{C}$ ,  $P_k=2,5$  МПа.**

Автор	$R_k \cdot 10^4$ , $\text{K} \cdot \text{m}^2 / \text{Вт}$
Мальков В.А.	7,63
Шлыков Ю.П.	8,49
Меснянкин С.Ю.	9,10
Попов В.М.	110,0
Данная работа	9,38

С целью расширения области применения предлагаемой методики произведен расчет контактного термического сопротивления с учетом наличия среды в межконтактной области. Межконтактная область задается как пространство, заключенное между контактирующими поверхностями. Для этой области также создавалась расчетная сеточная модель, и в параметрах материала определялись ее физические свойства (Рис. 8).



**Рис.8 – Расчетная сеточная модель контакта при наличии среды в межконтактной области**

Методика трехмерного моделирования микротопографии поверхности так же

позволяет определить межконтактный объем, что в свою очередь в ряде задач инженерной практики играет существенное значение. На рисунке 9 отображено распределение температурного поля в межконтактной среде. В таблице 2 представлены значения КТС для пары 12X10H8T - 12X10H8T с воздушной прослойкой рассчитанные по известным аналитическим зависимостям и по методике представленной в данной работе.

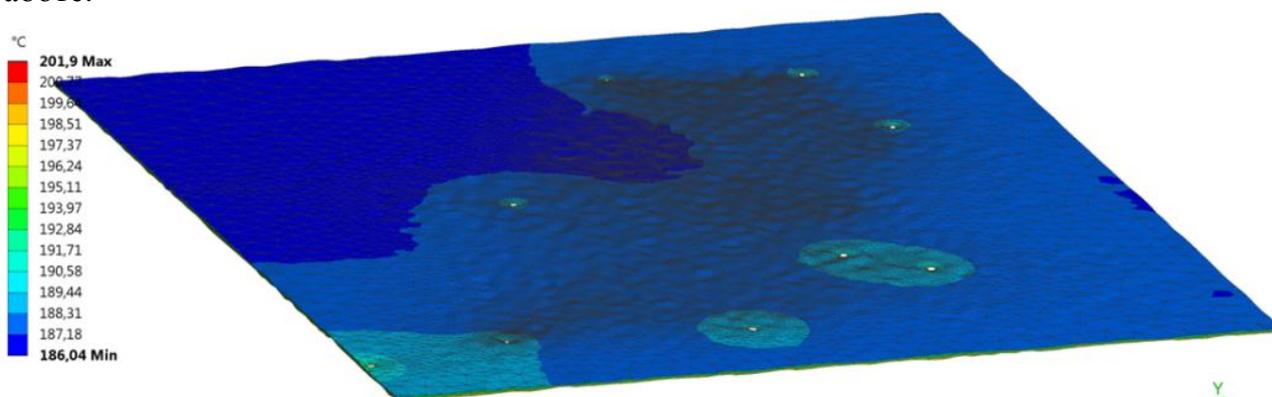


Рис.9 – Межконтактный объем и распределение температурного поля в нем

Таблица 2  
Величина КТС пары 12X10H8T - 12X10H8T с воздушной прослойкой  
 $T_k=150^{\circ}\text{C}$ ,  $P_k=2,5$  МПа

Автор	$R_k \cdot 10^4$ , $\text{K} \cdot \text{m}^2 / \text{Вт}$
Мальков В.А.	1,05
Шлыков Ю.П.	1,06
Попов В.М.	1,20
Меснянкин С.Ю.	1,07
Данная работа	1,35

Различие в значениях КТС при наличии воздушной среды внутри контакта объясняется тем, что в известных аналитических зависимостях по определению составляющей термического сопротивления среды используются значения средних высот микровыступов рассчитанных аналитически, которые, как показало моделирование, значительно ниже реальной рассматриваемой величины. Вследствие чего объем межконтактного пространства так же становится меньше, что приводит к уменьшению КТС всего контакта .

Проведенное сравнение с известными зависимостями позволяет сделать вывод, что использование известных аналитических зависимостей возможно только для условий контактирования, для которых они были получены. В противном случае это приводит к сильно различающимся значениям температур в зоне контакта и как следствие, самого значения КТС. Предлагаемая методика позволяет максимально точно перевести параметры шероховатой поверхности в трехмерный вид, пригодный для расчета, что в свою очередь ведет к уточненному определению контактных пятен, фактических площадей, межконтактного объема и позволяет проводить анализ КТС с любым наполнителем в пределах одной расчётной модели.

**Пятая глава** посвящена экспериментальным методам исследования тепловых процессов в контактной зоне. Проведенный анализ различных экспериментальных установок по определению КТС позволил определить основные элементы и особенности их применения. Разработана экспериментальная установка, оснащенная современной

аппаратной платформой, электронными датчиками преобразования сигналов термопар и прикладываемого давления. Схема экспериментальной установки представлена на рисунке 10



**Рис.10 - Схема экспериментальной установки**

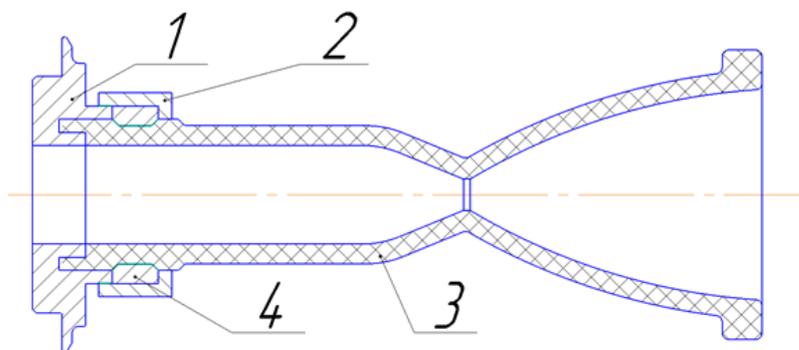
Проведены серии экспериментов между различными парами контактирующих материалов и получено удовлетворительное совпадение с экспериментальными данными. В качестве примера в таблице 3 приведены значения КТС для контактной пары Графит - 12Х10Н8Т, с межконтактной средой воздух, полученные в результате проведенного эксперимента, рассчитанные по методике, предложенной в работе, и по известным аналитическим зависимостям.

**Таблица 3**  
**Зависимость КТС пары Графит ( $R_a=1.314$ ) - 12Х18Н10Т ( $R_a=0.109$ ) от приложенного давления ( $T_k=420$  К)**

$P_k$	Данные эксперимента	Расчетные данные	Шлыков Ю.П.	Мальков В.А.	Попов В.М.
МПа	$K \cdot m^2 / Wt$				
3.12	1.81	2.15	0.81	0.90	2.10
4.58	1.67	1.65	0.64	0.77	1.48
6.32	1.49	1.38	0.53	0.67	1.34
8.52	1.17	1.15	0.43	0.59	1.21

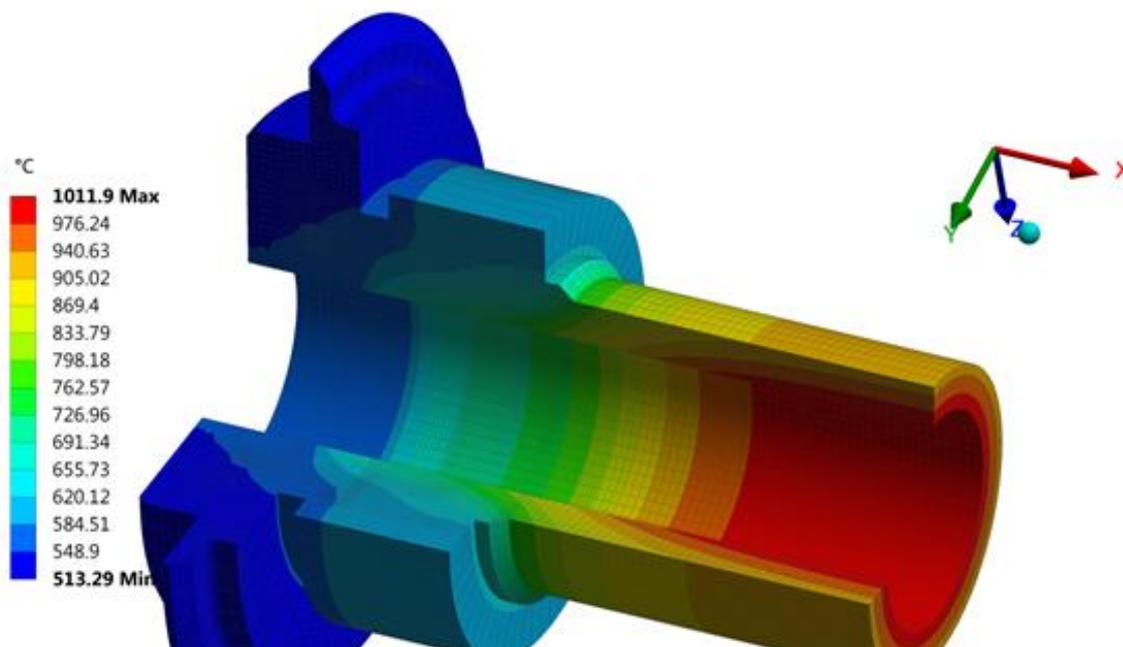
Приведенная таблица наглядно демонстрирует, что результаты полученные по методике предложенной автором удовлетворительно описывают значение КТС для контактной пары различных материалов, в отличие от существующих аналитических зависимостей, что с определенной уверенностью позволяет рекомендовать приведенную методику для расчета КТС в широком диапазоне давлений и пар материалов.

В главе 6 представлена практическая реализация предложенных научных решений на примере расчета напряженно-деформированного состояния с учетом влияния КТС между соприкасающимися поверхностями композитных камер сгорания жидкостных ракетных двигателей с возможностью изменения геометрии соединений и выбором материала прижимного кольца. Конструкция жидкостного ракетного двигателя малой тяги с возможностью конструктивного изменения геометрии соединений представлена на рисунке 11.

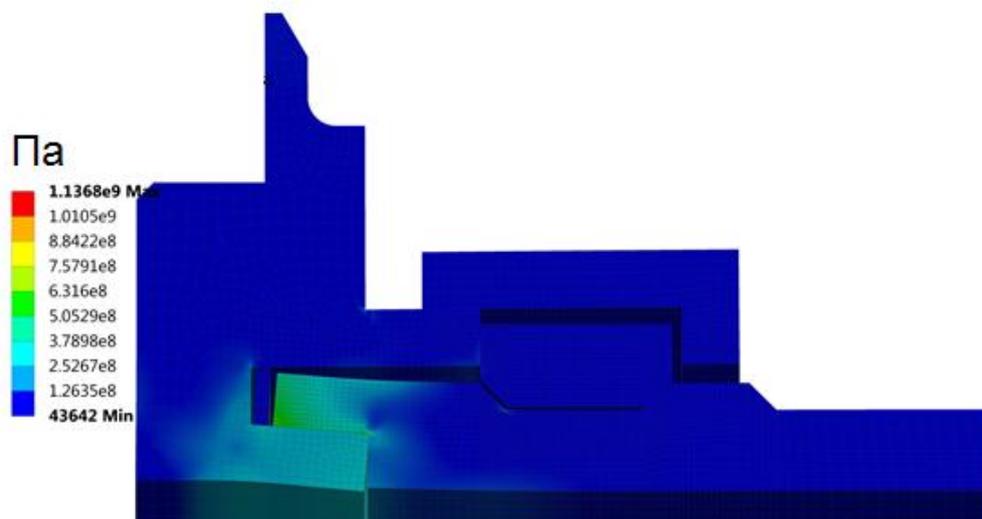


**Рис. 11. – Конструкция в сборе. (1 - переходная головка, 2 - прижимное кольцо, 3 – камера сгорания из композиционного материала, 4 - переходное кольцо).**

С целью определения полей температуры и давления в жидкостном ракетном двигателе малой тяги была построена его твердотельная геометрическая модель и произведен анализ результатов напряженно-деформированного состояния, полученных деформаций, условий контакта и полей давлений в зависимости от температуры. (Рис.12-13).



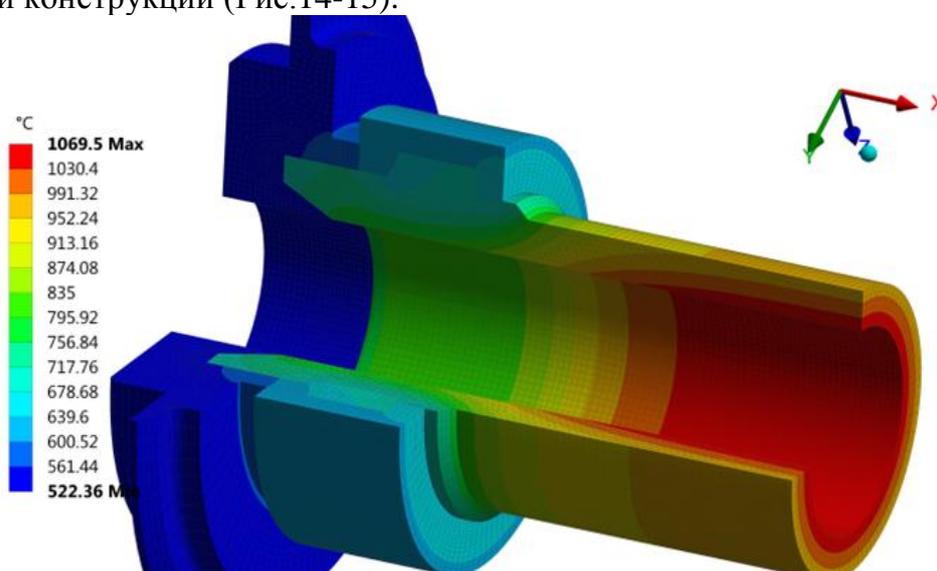
**Рис.12 – Температурное поле конструкции.**



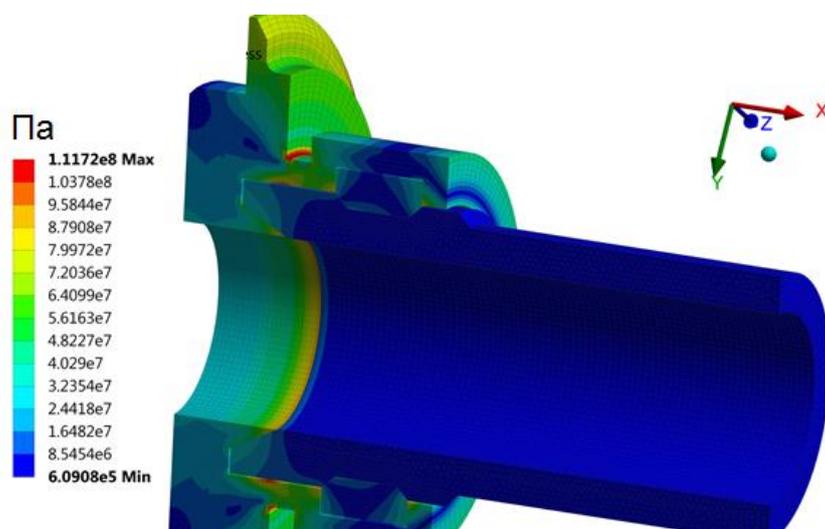
**Рис.13 – Поле эквивалентных напряжений конструкции.**

По результатам проведенного прочностного анализа выявлено превышение значения предела прочности материала композитной камеры сгорания в ступенчатом узле стыковки композитной камеры сгорания и переходной головки из конструкционной стали и возможно разрушение данного узла при циклической нагрузке. Для снижения эквивалентных напряжений произведена модернизация конструкции путем замены ступенчатого узла на конусную посадку с углом сопряжения  $\alpha$ . Далее повторялся предыдущий расчетный этап. Необходимо отметить, что выполнение этой операции происходит неоднократно для поиска оптимальной геометрии конструкции. После того, как результаты расчёта подтвердили требуемый характер поведения деталей, была выполнена ее параметрическая оптимизация. По полученным из оптимизационного расчёта значениям межконтактных давлений, вычислялось значение КТС в соответствующих контактных парах.

Полученная в результате расчета величина контактного термического сопротивления использовалась в расчете теплового состояния конструкции, при котором определялись реальные температурные поля и тепловые потоки. Полученные значения теплового состояния детали задавались в качестве тепловой нагрузки в граничных условиях прочностного анализа, в котором вычислялись эквивалентные напряжения всей конструкции (Рис.14-15).

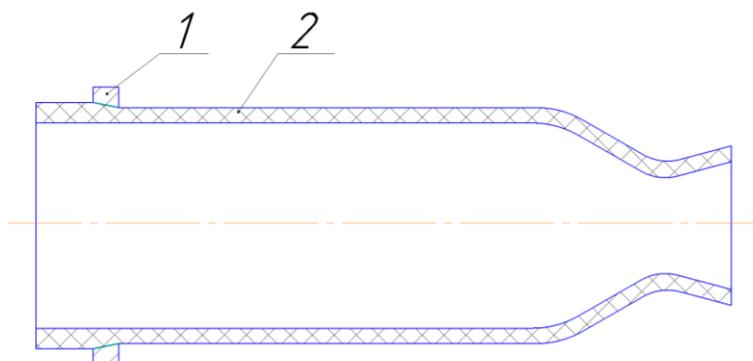


**Рис.14 - Температурные поля в конструкции с учетом КТС.**



**Рис.15 – Эквивалентные напряжения в конструкции с учетом КТС.**

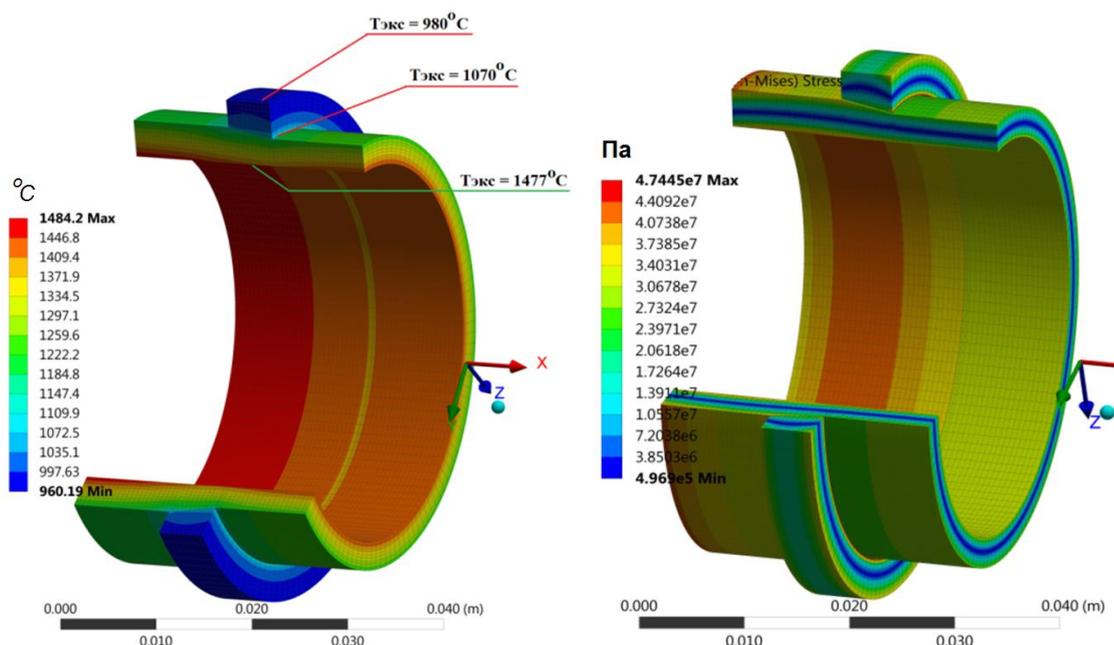
Вторым объектом для численного моделирования является конструкция ЖРДМТ с композитной (КМК-МС) камерой сгорания с возможностью изменения материала прижимного кольца. На рисунке 16 представлена конструкция, в которой: 1 – переходное кольцо из титанового сплава ТВ-36 с термическим коэффициентом линейного расширения (ТКЛР) равным  $8 \cdot 10^{-6}$  1/К, 2 – камера сгорания из композиционного материала КМК-МС со значением ТКЛР равным  $0,5 \cdot 10^{-6}$  1/К..



**Рис.16 – Средняя камера сгорания из композиционного материала КМК-МС.  
1 – переходное кольцо, 2 – камера сгорания.**

Отличие предыдущего расчета камеры сгорания от текущего отличается тем, что в данном варианте, из-за наличия ряда ограничений по конструкции, недопустимо изменение геометрии, возможно только варьирование материалами переходного кольца. Очевидно, что из-за существенного различия значений термического коэффициента линейного расширения используемых материалов при высоких температурах эксплуатации возникает значительная разница в тепловом расширении деталей, которая приводит к возникновению зазоров и деформаций между ними.

В результате проведенного теплового и прочностного анализа с учетом значений контактного термического сопротивления, получены соответствующие значения температурного поля и поля эквивалентных напряжений в конструкции (Рис. 17)



**Рис. 17 - Температурное поле (слева) и поля эквивалентных напряжений (справа) в конструкции ЖРД МТ.**

Результаты расчетов наглядно показывают, что значения температур удовлетворительно совпадают с результатами огневых испытаний, что говорит о правомерности использования предлагаемой методики при расчете теплового состояния конструкции ЖРД МТ.

С целью поиска подходящего материала кольца был произведен расчет для ряда сплавов. Результаты приведённого анализа представлены в таблице 4.

**Таблица 4.**

**Величина межконтактного давления.**

Материал кольца	Межконтактное давление, МПа
BT-1	0
BT-5Л	0
BT-6Л	0
BT-9Л	0
BT-21Л	0
BT-3-1Л	0
ТВ-36 при температуре 250°C	46.1
ТВ-36 при температуре 960°C	0
КМК-МС слои вдоль оси	9.31
КМК-МС слои поперек оси	6.91

Из приведенной таблицы видно, что практически у всех титановых сплавов отсутствует контакт при тепловой нагрузке. Прижимное кольцо выполненное из титанового сплава ТВ-36, который из-за своего специфического ТКЛР на определённом этапе сжимает комpositную камеру сгорания до 46 МПа, а при дальнейшем нагреве - теряет с ней контакт. Изготовление прижимного кольца из материала КМК-МС таким образом, чтобы слои материала были ориентированы перпендикулярно к оси камеры

сгорания, обеспечивает оптимальные значения контактного давления на всем промежутке работы изделия.

В конце главы приводятся рекомендации по оптимизации теплонагруженных контактных соединений как за счет изменения конструктива исследуемой геометрии, так и за счет изменения параметров шероховатости поверхности.

## **ЗАКЛЮЧЕНИЕ**

По результатам выполненных исследований можно сформулировать следующие выводы:

1. Рассмотрены и проанализированы типовые конструкции жидкостных ракетных двигателей малой тяги. Установлено, что при их создании применяются принципиально новые материалы, которые из-за особенностей разрабатываемых конструкций должны быть выполнены разъемными, а с учетом высокой тепловой нагрузки и повышенными требованиями к тепловым расчетам необходимо производить учет контактного термического сопротивления, возникающего за счет неидеальности соединения.

2. По результатам обзора литературы выявлено, что известные публикации в области исследования контактного термического сопротивления и моделирования микрогеометрии сопрягаемых поверхностей свидетельствуют об актуальности тематики, её незавершённости и в явном виде невозможности использования имеющихся результатов при проектировании современных двигателей.

3. Проведен анализ современных методов моделирования поверхности микрогеометрии сопрягаемых деталей и предложена методика построения трехмерной шероховатости поверхности, базирующейся на данных полученных с электронного профилометра. Одним из важных моментов предложенной методики является моделирование трехмерной модели шероховатой поверхности, максимально точно повторяющей характер профилограммы снятой электронным профилометром. По результатам этой методики разработан метод определения контактного термического сопротивления между соприкасающимися поверхностями разнородных материалов с учетом и без наличия наполнителя в зоне контакта, позволяющий провести предварительный расчет теплонапряженного состояния контактной пары. Данная методика легла в основу контактного теплового и прочностного анализа, что в конечном итоге позволило сформировать целостную картину прогнозирования КТС в реальных соединениях.

4. С целью проверки предложенной методики по определению КТС разработана экспериментальная установка, оснащенная современной аппаратной платформой, электронными датчиками преобразования термопар и прикладываемого давления. Проведены серии экспериментов между различными парами контактирующих материалов. Сопоставление величин контактного термического сопротивления с результатами экспериментов и известными аналитическими зависимостями позволяют рекомендовать разработанную методику для инженерных расчетов.

5. Выполнен расчет термомеханического состояния конструкции жидкостного ракетного двигателя малой тяги с возможностью изменения материала прижимного кольца. Предложен вариант усовершенствования геометрии с изменением узла сопряжения камеры сгорания и переходной головки. Отмечено существенное влияние значения КТС на характер распределения температурного поля и полей эквивалентных напряжений.

6. Проведен расчет теплового и напряженно-деформированного состояния конструкции жидкостного ракетного двигателя малой тяги с возможностью конструктивного изменения геометрии соединений. В качестве материалов прижимного кольца рассмотрены различные титановые сплавы и композиционные материалы. Установлено, что применение прижимных колец из титановых сплавов ведет к исчезновению контакта между прижимным кольцом и камерой сгорания, а наиболее предпочтительным материалом прижимного кольца ЖРД МТ является композиционный материал КМК-МС с ориентацией слоев перпендикулярно оси камеры сгорания.

7. Результаты проведенных исследований с большой определенностью и точностью позволяют на начальном этапе проектирования учесть основные проблемные зоны, которые могут возникнуть в процессе эксплуатации и, в итоге, внести коррективы в конструкцию, что позволит сократить сроки испытаний и обработки изделия и создать более надежную конструкцию.

## **ОСНОВНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ ДИССЕРТАЦИИ ИЗЛОЖЕНЫ В СЛЕДУЮЩИХ ПУБЛИКАЦИЯХ:**

### **Публикации в рецензируемых изданиях**

1. Меснянкин С.Ю., Ежов А.Д., Басов А.А. Определение контактного термического сопротивления на базе трехмерного моделирования соприкасающихся поверхностей // Известия Российской академии наук. Энергетика. 2014. N 5. С. 65-74.
2. Ежов А.Д., Меснянкин С.Ю. Моделирование шероховатых поверхностей для контактных задач с композиционными материалами // Механика композиционных материалов и конструкций. 2015. Т. 21. N 2. С. 272-281 .
3. Ежов А.Д. Определение контактного термического сопротивления пары: композиционный материал С-SI-C и титановый сплав // Труды МАИ. 2015. N 82. URL: [http://trudymai.ru/upload/iblock/34e/ezhov\\_rus.pdf](http://trudymai.ru/upload/iblock/34e/ezhov_rus.pdf)
4. Ежов А.Д., Быков Л.В., Меснянкин С.Ю., Богачев Е.А., Разина А.С.. Доработка и оптимизация элементов конструкции с учетом тепловых деформаций. // Тепловые процессы в технике. 2015. N 11. С. 510-516.
5. Ежов А.Д. Численное решение задачи контактного взаимодействия шероховатых поверхностей энергетических установок. // Вестник Московского авиационного института. 2016. Т. 23. N 1. С. 68-79.

### **Свидетельство на программу для ЭВМ**

6. Ежов А.Д., Меснянкин С.Ю., Быков Л.В., Свидетельство о государственной регистрации программ для ЭВМ №2015618021 «Определение координат точек шероховатой плоской поверхности» от 28.06.2015 г.

### **Публикации в других изданиях**

7. Ежов А.Д. Температурные поля в сложных сопряженных конструкциях композитных камер сгорания ЖРД. // Сборник тезисов докладов Московской молодежной научно-практической конференции «Инновации в авиации и космонавтике - 2014». Москва. МАИ. 22-24 апреля 2014. С.107-108.
8. Ежов А.Д. Моделирование процессов статики и теплопередачи в контактных узлах современных энергоустановок. // Сборник аннотаций конкурса научно-технических работ и проектов «Молодежь и будущее авиации и космонавтики». Москва. МАИ. 17-21 ноября 2014. С.93-94.
9. Ежов А.Д. Моделирование процессов в контактных узлах современных энергоустановок. // Сборник тезисов докладов 13-й Международной конференции «Авиация и космонавтика – 2014». Москва. МАИ. 17-21 ноября 2014. С.222-224.

10. Ежов А.Д., Анализ теплового состояния контактных узлов современных энергоустановок. // Сборник тезисов докладов Московской молодежной научно-практической конференции «Инновации в авиации и космонавтике - 2015». Москва. МАИ. 21-23 апреля 2015. С.78-79.
11. Ежов А.Д., Быков Л.В., Меснянкин С.Ю. Моделирование термомеханического поведения конструкции ЖРД малой тяги в результате нагрева // Сборник докладов 6-й научно-практической Internet-конференции «Междисциплинарные исследования в области математического моделирования и информатики». Тольятти. 14-15 мая 2015. С.193-200.
12. Ежов А.Д., Быков Л.В., Меснянкин С.Ю. Задача поиска оптимальных условий контакта деталей с различными термическими коэффициентами линейного расширения. // Сборник докладов Всероссийской научно-технической конференции молодых ученых и специалистов «Новые решения и технологии в газотурбостроении». Москва. ЦИАМ. 26-28 мая 2015. С. 219-220.
13. Ежов А.Д. Моделирование контактного взаимодействия шероховатых поверхностей энергетических установок. // Сборник аннотаций конкурса научно-технических работ и проектов «Молодежь и будущее авиации и космонавтики». Москва. МАИ. 16-20 ноября 2015г. С.80-81.
14. Ежов А.Д., Меснянкин С.Ю., Быков Л.В. Моделирование поведения теплонапряженных конструкций в зонах контакта металлов с композиционными материалами. // Сборник тезисов докладов 14-й Международной конференции «Авиация и космонавтика – 2015». Москва. 16-20 ноября 2015. С.56-58.
15. Ежов А.Д. Моделирование шероховатости поверхности для контактных тепло-прочностных задач. // Сборник тезисов докладов XLII международной молодёжной научной конференции «Гагаринские чтения». Москва. МАИ. 12-15 апреля 2016. Т. 1. С.105-106.
16. Ежов А.Д., Быков Л.В., Меснянкин С.Ю. Методика определения средних температур поверхностей при контактном теплообмене. // Сборник докладов 7-й научно-практической Internet-конференции «Междисциплинарные исследования в области математического моделирования и информатики». Тольятти. 30-31 марта 2016. С.256-262.
17. Ежов А.Д., Меснянкин С.Ю., Быков Л.В., Богачев Е.А. Термомеханический анализ теплонапряженных конструкций в зонах контакта металлов с композиционными материалами. // Сборник тезисов докладов XV Минского международного форума по тепло- и массообмену. Минск. НАН Беларуси. 23-26 мая 2016г. Т. 2. С.349-352.
18. Ежов А.Д., Меснянкин С.Ю., Быков Л.В. Анализ теплонапряженного состояния металло-композиционных конструкций на примере жидкостного ракетного двигателя малой тяги. // Сборник тезисов докладов XI Международной конференции по неравновесным процессам в соплах и струях. Алушта, Крым. МАИ. 25-31 мая 2016. С.335-337.
19. Ежов А.Д. Моделирование процессов в контактных узлах современных энергоустановок. // Сборник тезисов докладов 15-й Международной конференции «Авиация и космонавтика – 2016». Москва. МАИ. 14-18 ноября 2016г. С.269-270.
20. Ежов А.Д. Методика определения межконтактного объема и пятен фактического контакта соприкасающихся поверхностей энергоустановок. // Сборник тезисов докладов XLIII Международной молодёжной научной конференции «Гагаринские чтения». Москва. МАИ. 05-19 апреля 2017. С.1008.