

О Т З Ы В

официального оппонента кандидата технических наук, доцента кафедры
«Тепломассообменных процессов и установок» ФГБОУ ВО «Национальный
Исследовательский Университет «МЭИ»

Савченковой Натальи Михайловны

на диссертационную работу **Борщева Никиты Олеговича** на тему:
«Методы исследования тепловой модели многоцветного элемента
конструкции спускаемого космического аппарата с учетом свойства
анизотропии»

представленную на соискание ученой степени кандидата технических наук
по специальности 05.07.03 – Прочность и тепловые режимы летальных
аппаратов

1. Актуальность избранной темы

Тепловое проектирование КА в целом является сложной технической задачей. В том случае, если определенный узел конструкции подвержен воздействию значимых тепловых потоков, необходимо учитывать изменение теплофизических свойства материалов рассматриваемых элементов конструкции в различных узлах конструкции.

Часто такая задача решается путем численного моделирования с привлечением математического аппарата решения обратных задач. В настоящее время существует ряд работ, посвященных решению обратных задач при тепловом моделировании КА. Однако большинство описанных решений носят обобщающий характер и имеют большие погрешности при сравнении с экспериментальными данными. Большую роль играет и длительность итерационного процесса.

Поставленная в диссертационной работе задача связана с разработкой комплекса методов и алгоритмов по определению теплофизических характеристик объекта исследования, которые используются в дальнейшем для теплового прогнозирования состояния конструкции.

Отдел документационного
обеспечения МАИ

« 19 05 20 21

Основное внимание в работе уделено созданию методики получения полей температур важного элемента стыковочного узла перспективного КА. Таким образом, тема диссертационной работы Н.О. Борщева является актуальной.

Тема и содержание диссертации соответствуют паспорту научной специальности 05.07.03 - Прочность и тепловые режимы летательных аппаратов:

в части формулы специальности:

Тепловые режимы летательных аппаратов – как составляющая данной специальности, включает разработку теоретических и экспериментальных методов исследования тепломассообменных процессов в конструкциях, агрегатах и системах летательных аппаратов (ЛА), выбор проектных решений и параметров с учетом тепловых режимов аппарата (тепловое проектирование ЛА), создание систем обеспечения рационального теплового состояния, решение проблем отработки и диагностики тепловых режимов ЛА. Основным содержанием данной области науки являются комплексные исследования малоизученных теплофизических процессов, сопровождающих работу ЛА, выбор теплозащитных материалов и покрытий, обоснование и выбор типа и параметров систем обеспечения теплового режима ЛА, методов диагностики и отработки теплового режима, определение и выбор рациональных в тепловом отношении схемных и компоновочных решений ЛА, а также конверсионное использование упомянутых методов и разработок. Значение решения научных и технических проблем данной специальности состоит в совершенствовании теоретической, методической, технической и экспериментальной базы, позволяющей повысить жизнестойкость, эффективность, качество, надежность, ремонтпригодность ЛА как технической системы, функционирующей в различных (как низко-, так и высокотемпературных) тепловых условиях, при одновременном снижении материалоемкости и энергопотребления систем, конструкций и устройств ЛА, обеспечивающих его рациональный тепловой режим.

в части областей исследований:

Пункту 6: Разработка методов теплового проектирования летательных аппаратов, включая:

- создание эффективных методов математического моделирования различных тепломассообменных процессов, сопровождающих работу теплонагруженных агрегатов и систем ЛА;

- выбор параметров этих систем и определение с учетом теплового режима проектного облика и компоновочного решения ЛА;

- создание, испытания и отработку новых теплозащитных и теплоизоляционных материалов и покрытий;

- разработку новых методов обеспечения теплового режима ЛА, использующего на борту криогенные рабочие тела и компоненты топлива.

Пункту 7: Теоретические и экспериментальные исследования теплофизических и тепломассообменных процессов в системах и агрегатах ЛА, а также при движении ЛА в различных средах, включая:

- разработку методов теоретических и экспериментальных исследований, отработки и диагностики тепловых режимов в процессе создания и эксплуатации ЛА;

- теоретическое обоснование, создание, эксплуатацию и модернизацию экспериментальной базы, необходимой для решения проблем обеспечения тепловых режимов ЛА;

- комбинаторный анализ, диагностику и оптимизацию тепловых условий функционирования ЛА.

Пункту 8: Термодинамический синтез, проектный анализ и отработку систем обеспечения теплового режима ЛА как технической системы, включая:

- исследование и анализ закономерностей, разработку способов интенсификации процессов теплообмена в агрегатах, системах и устройствах ЛА;

- разработку научных основ функционирования многоуровневых систем обеспечения теплового режима энергоемких ЛА;

- разработку новых методов тепловой защиты ЛА, работающих в экстремальных тепловых условиях;

- внедрение научных, технологических и технических достижений в области исследования и отработки тепловых режимов ЛА в другие сферы науки, техники и технологии.

2. Степень обоснованности научных положений, выводов и рекомендаций, сформулированных в диссертации.

В диссертационной работе автор применяет численно-аналитический метод исследования коэффициентов тензора теплопроводности на основе экспериментальной тепловой отработки изделия. Для достижения поставленной цели автор проводит анализ возможных методов решения поставленной задачи для выбора инструментария в своих исследованиях.

Автор **обоснованно** предлагает проводить метод последовательной параметрической идентификации вектора теплопроводности анизотропных твердых материалов двумя известными методами регуляризации: методом регуляризации А.Н. Тихонова и методом итерационной регуляризации.

Методы отличаются выбором параметра регуляризации, который **позволяет уменьшить** погрешность между экспериментальным и теоретическим температурным полем исследуемого объекта. Данные методы регуляризации **позволяют достичь** требуемой сходимости за минимальное число итераций.

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

В данной работе **достоверность** подтверждается строгой постановкой задачи, соответствующей условиям теплового нагружения рассматриваемого элемента конструкции, оценкой сходимости полученных результатов и величиной относительных погрешностей полученных значений.

Достоверность выводов и надежность разработанной автором

методики расчета, рекомендуемой для использования при проектировании анизотропных композиционных материалов, гарантируется сходимость с результатами экспериментальных исследований и подтверждается практикой их внедрения.

Научная новизна состоит в разработке обобщенной тепловой математической модели шпангоута стыковочного агрегата, позволяющей провести идентификацию компонентов симметричного тензора теплопроводности. **К новизне** данной работы можно отнести также разработанный автором алгоритм для решения задачи параметрического определения компонентов вектора теплопроводности элемента шпангоута АСА, позволяющий определить ориентацию вектора теплопроводности в обеспечении уточненного теплового состояния конструкции.

К новым данным в работе относятся полученные проектные параметры ИК-имитаторов стенда (задаваемые на них тепловые потоки, их геометрические характеристики и расположение в пространстве) для воспроизведения условий эксплуатации АСА на основе решения обратной задачи радиационного теплопереноса стохастическим методом моделирования Монте-Карло.

Научные положения и принципы теплового проектирования шпангоута стыковочного узла, сформулированные в диссертации, обоснованы высокой сходимостью полученных результатов моделирования с результатами тепловых наземных испытаний.

4. Значимость для науки и практики полученных автором результатов

заключается в том, что полученные выводы дополняют теорию теплового проектирования изделий ракетно-космической техники с явно выраженной анизотропией теплопроводности. Основные теоретические результаты могут стать основой для дальнейшего изучения теплового состояния конструкций спускаемых космических аппаратов при сверхкритическом тепловом нагружении.

Научные положения, сформулированные автором, и предложенные **технические решения** позволили разработать методику по определению компонент симметричного тензора теплопроводности элемента шпангоута АСА, прикладное программное обеспечение по определению ориентации главных осей тензора теплопроводности для материалов с явно-выраженной анизотропией и выбрать тепловую мощность ИК – имитаторов, включая их пространственное расположение для экспериментального стенда по моделированию внешнего теплосилового нагружения шпангоута АСА сверхкритическом тепловом потоком.

Основные результаты диссертации представлены в трудах ряда конференций, а также в журналах, входящих в перечень изданий, рецензируемых ВАК Минобрнауки России. В том числе три работы в журнале СТИН. Всего автором опубликовано 8 работ.

5. Конкретные рекомендации по использованию результатов и выводов диссертации.

Предложенная автором методика определения компонент симметричного тензора теплопроводности применима для узлов конструкции подверженных сверхкритическом тепловым нагрузкам.

Для предприятий отрасли представляет большой интерес также методика тепловых испытаний ОСА для отработки в наземных условиях имитации теплового нагружения элементов конструкции, характерных для спуска КА в плотных слоях атмосферы, а также при его старте. Данная методика будет востребована, например, на таких предприятиях, как ПАО "РКК "Энергия", АО "Корпорация "Комета" и др.

6. Оценка содержания диссертации, ее завершенность.

Содержание диссертации включает 5 глав, заключение, и список литературных источников, включающий 98 наименований. Материалы диссертации изложены аргументировано и в логической последовательности

на техническом языке понятном для специалистов по выбранной теме. Диссертация снабжена достаточным количеством иллюстраций необходимым для наглядного пояснения представленных результатов исследования. **Завершенность** диссертации в целом подтверждается соответствующими содержанию диссертации выводами, а также актами внедрения результатов проведенных исследований, как в практику АО «НПО ЭНЕРГОМАШ», так и в учебный процесс Московского авиационного института.

Во введении формулируются цели и задачи диссертационной работы, кратко рассмотрено основное содержание глав, указаны результаты, выносимые на защиту.

Первая глава обосновывает актуальность диссертационной работы. Рассмотрены определения «прямой» и «обратной» задач теплопроводности, основные численные методы решения «прямых» задач теплопроводности, такие как метод тепловых балансов, метод изотермических узлов, а также метод конечных элементов. Описаны основные виды обратных задач теплообмена и их отличие от прямых. Выполнен литературный обзор.

Дано описание выбранного объекта исследования. Объектом исследования является передний шпангоут активного стыковочного агрегата перспективного транспортного корабля «Орел». Данный КА должен предполагать многократное использование рассматриваемого узла в процессе эксплуатации КА. При входе в атмосферу он подвергается газодинамическому тепловому нагреву, где наиболее теплонагруженным элементом конструкции является шпангоут. Данный элемент конструкции является важной ее частью и отвечает за надёжность стыковки КА с международной космической станцией. Обеспечение штатного теплового состояния изделия является практически значимой и актуальной задачей представленной работы.

Вторая глава включает методику и алгоритм идентификации компонент симметричного тензора теплопроводности по данным замеров

температур в зоне установки термопар на основе минимизации функционала невязки между теоретическим и экспериментальным полем температур.

В качестве метода минимизации функционала выбран метод сопряжённых направлений, как наиболее точный метод первого порядка сходимости. Одной из главных задач в представленном методе является вычисление компонент градиентов минимизируемого функционала.

Важной отличительной особенностью решения данной задачи минимизации функционала, является получение аналитических зависимостей для каждой компоненты градиентов целевого функционала. В работе представлен вывод этих аналитических зависимостей, который проводился на основе решения вариационной задачи методом неопределённых множителей Лагранжа. Данные зависимости выведены автором для двух рассматриваемых в работе методов регуляризации, а именно: метод регуляризации А.М. Тихонова и метод итерационной регуляризации.

Процедура регуляризации позволила минимизировать погрешность между теоретическим и экспериментальным полем температур и помочь достичь требуемой сходимости за относительно небольшое количество итераций.

В третьей главе диссертационной работы произведено усовершенствование существующего численного метода решения «прямой» задачи прогрева конструкции с использованием метода «переменных направлений».

В работе показано, что для выбранной постановки задачи не удастся построить экономичные, полностью неявные (абсолютно устойчивые) схемы расщепления, обладающие полной аппроксимацией конечными разностями на каждом дробном шаге вычислений. При этом в каждом координатном направлении используются скалярные прогонки. Однако если воспользоваться информацией о решении задачи на верхнем временном слое, то рассмотренные схемы становятся абсолютно устойчивыми. Для расчетных узлов на других временных слоях можно использовать априорную

информацию на нижних временных слоях. Для этого была применена процедура линейной экстраполяции по времени на верхний временной слой по двум предыдущим дробным шагам.

Усовершенствование метода расчета, предложенное автором, состоит в решении рассматриваемой задачи для нелинейного теплового потока, включающего в себя лучисто-конвективный нагрев. Решение было получено для задачи в цилиндрических координатах.

В четвертой главе был разработан экспериментальный стенда для моделирования аэродинамического теплового нагрева шпангоута (условия эксплуатации ОИ) лучистым тепловым диффузным потоком с помощью ИК-имитаторов, на которых .расположены кварцево-галогенные лампы накаливания.

В данной главе также представлены полученные результаты решения граничной обратной задачи радиационного теплопереноса для выбора проектных параметров экспериментального стенда.

В качестве исходных данных для решения граничной обратной задачи радиационного теплопереноса использовано пространственно-временное распределение аэродинамических потоков, полученных моделированием прохождения спускаемого аппарата через плотные слои атмосферы.

Пятая глава показывает результаты численного моделирования температурного режима конструкции на примере элемента металлического шпангоута АСА для двух выбранных методов регуляризации среднеквадратичной ошибки.

Представлены результаты расчета итерационной сходимости теоретического поля температур к экспериментальному.

Итерационная сходимость также оценивается в работе по абсолютному значению нерегуляризуемой невязки в зависимости от номера итерации. Показаны полученные зависимости компонент симметричного тензора теплопроводности, как функции от температуры.

Результаты, полученные в диссертационном исследовании, обобщены и представлены **в заключении**. Кроме того, основные результаты по каждому разделу работы, кратко изложены в конце соответствующего раздела.

Содержание **авторезферата** отражает основные материалы диссертационной работы в краткой форме. В нем изложены основные положения и выводы диссертации, показан вклад автора, степень новизны и практическая значимость результатов исследований.

7. Достоинства и недостатки в содержании и оформлении диссертации, мнение о научной работе соискателя в целом.

В качестве замечаний к диссертационной работе следует отметить:

1. Наземная тепловая отработка спускаемых аппаратов обычно проводится с использованием газодинамической установки, которая моделирует тепловые условия спуска КА. В своей работе автор использовал тепловое испытание изделия с помощью кварцево-галогенных ламп накаливания. В работе отсутствует обоснование выбора данного подхода к проведению испытаний.

2. В первой главе не представлен обзор существующих методов регуляризации обратных коэффициентных задач теплопроводности, по которому можно было бы судить об эффективности используемых в данной работе методов.

3. Диссертационная работа написана технически грамотным языком, отслеживается логика изложенного материала, но в тексте присутствуют грамматические ошибки, а также встречается несоблюдение требований по оформлению рукописей, например, в списке литературных источников.

4. Во второй главе при составлении обобщенного функционала Лагранжа не ясно, почему в качестве ограничения была взята нетривиальная постановка вариации температурного поля.

6. В третьей главе при выборе проектных параметров нет оценки точности полученных вычислений в зависимости от количества испускаемых

лучей при решении данной задачи методом прямой трассировки лучей.

7. В четвертой главе не приведена аналитическая оценка сходимости по выбираемому шагу интегрирования.

Ознакомление с диссертацией соискателя позволяет составить представление о выполненной научной работе. Автор в поставленной задаче использовал сложный математический аппарат решения обратной задачи теплопроводности анизотропной конструкции стыковочного узла. К сожалению, пояснения автора, представленные в работе, не всегда четкие, а порой несколько запутанные. Тем не менее, предложенная автором методика прогнозирования теплового состояния исследуемого узла конструкции представляет, как теоретический, так и практический интерес.

В целом, решение автором сложной, актуальной технической задачи, свидетельствует об успешном сочетании его научной и инженерной деятельности, а результаты диссертационной работы представляют интерес для промышленности.

8. Заключение о соответствии диссертации критериям, установленным Положением о порядке присуждения ученых степеней.

Диссертация Борщева Никиты Олеговича по форме и содержанию, актуальности, полноте поставленных и решенных задач, совокупности новых научных результатов, строго аргументированных и критически оцененных по сравнению с известными аналогичными результатами в данной области исследований, отвечает требованиям, предъявляемым к кандидатским диссертациям.

Несмотря на отмеченные недостатки, диссертация является законченной научно-квалификационной работой, в которой решена научно-техническая задача, связанная с разработкой важного конструктивного элемента (шпангоута), входящего в стыковочный узел многоразового перспективного КА. Рассматриваемый шпангоут подвержен жесткому воздействию теплового нагружения в плотных слоях атмосферы при спуске

КА на Землю.

Работа выполнена на хорошем научном уровне и соответствует требованиям п.9-14 «Положения о присуждении ученых степеней», утвержденного Постановлением Правительства Российской Федерации от 24 сентября 2013 года №842 в актуальной редакции, а её автор, Борщев Никита Олегович заслуживает присуждения ученой степени кандидата технических наук по специальности 05.07.03 - Прочность и тепловые режимы космических аппаратов.

Официальный оппонент -

доцент кафедры «Тепломассообменных
процессов и установок» ФГБОУ ВО «НИУ «МЭИ»,
кандидат технических наук



Н.М. Савченкова

“ 27 ” 09 2021 г.

Подпись официального оппонента

к.т.н. Савченковой Натальи Михайловны заверяю



МЕСТИТЕЛЬ НАЧАЛЬНИКА
ПО РАБОТЕ С ПЕРСОНАЛОМ
Ж:Н:Н:КНЕВАЯ

М.П.

“ 27 ” 09 2021 г.