

ЗАКЛЮЧЕНИЕ ОБЪЕДИНЕННОГО ДИССЕРТАЦИОННОГО СОВЕТА  
Д 999.055.04 НА БАЗЕ ФЕДЕРАЛЬНОГО ГОСУДАРСТВЕННОГО  
БЮДЖЕТНОГО ОБРАЗОВАТЕЛЬНОГО УЧРЕЖДЕНИЯ ВЫСШЕГО  
ОБРАЗОВАНИЯ «КОМСОМОЛЬСКИЙ-НА-АМУРЕ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ  
ТЕХНИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ», ФЕДЕРАЛЬНОГО ГОСУДАРСТВЕННОГО  
БЮДЖЕТНОГО УЧРЕЖДЕНИЯ НАУКИ «ВЫЧИСЛИТЕЛЬНЫЙ ЦЕНТР  
ДАЛЬНЕВОСТОЧНОГО ОТДЕЛЕНИЯ РОССИЙСКОЙ АКАДЕМИИ НАУК»,  
ФЕДЕРАЛЬНОГО ГОСУДАРСТВЕННОГО БЮДЖЕТНОГО УЧРЕЖДЕНИЯ  
НАУКИ «ИНСТИТУТ МАШИНОВЕДЕНИЯ И МЕТАЛЛУРГИИ  
ДАЛЬНЕВОСТОЧНОГО ОТДЕЛЕНИЯ РОССИЙСКОЙ АКАДЕМИИ НАУК»,  
ФЕДЕРАЛЬНОГО ГОСУДАРСТВЕННОГО БЮДЖЕТНОГО  
ОБРАЗОВАТЕЛЬНОГО УЧРЕЖДЕНИЯ ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ  
«АМУРСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ» ПО ДИССЕРТАЦИИ  
НА СОИСКАНИЕ УЧЕНОЙ СТЕПЕНИ КАНДИДАТА НАУК

аттестационное дело № \_\_\_\_\_

решение диссертационного совета от 19 мая 2017 года №10

**О присуждении** Андрианову Ивану Константиновичу, гражданину Российской Федерации, учёной степени кандидата технических наук.

Диссертация «Численное моделирование процессов теплоотвода в оболочковых элементах турбомашин на основании условия длительной прочности» по специальности 05.13.18 – Математическое моделирование, численные методы и комплексы программ, принята к защите 10 марта 2017 года, протокол № 6, объединенным диссертационным советом Д 999.055.04 на базе федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего образования «Комсомольский-на-Амуре государственный технический университет», федерального государственного бюджетного учреждения науки «Вычислительный центр Дальневосточного отделения Российской академии наук», федерального государственного бюджетного учреждения науки «Институт машиноведения и металлургии Дальневосточного отделения Российской академии наук», федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего образования «Амурский государственный университет»,

681013, г. Комсомольск-на-Амуре, пр. Ленина, 27, приказ Минобрнауки России от 27 ноября 2015 г. № 1483/нк.

Соискатель Андрианов Иван Константинович 1990 года рождения, в 2013 году окончил магистратуру Федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего профессионального образования «Комсомольский-на-Амуре государственный технический университет» по направлению «Прикладная механика», в 2016 году окончил очную аспирантуру Федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего образования «Комсомольский-на-Амуре государственный технический университет», работает в Федеральном государственном бюджетном образовательном учреждении высшего образования «Комсомольский-на-Амуре государственный технический университет» старшим преподавателем кафедры «Механика и анализ конструкций и процессов».

Диссертация выполнена на кафедре «Прикладная математика и информатика» Федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего образования «Комсомольский-на-Амуре государственный технический университет».

**Научный руководитель** – кандидат технических наук, доцент, Гринкруг Мирон Соломонович, Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Комсомольский-на-Амуре государственный технический университет», кафедра «Общая физика», заведующий кафедрой.

**Официальные оппоненты:**

Минаев Сергей Сергеевич, гражданин Российской Федерации, доктор физико-математических наук, профессор, Федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования «Дальневосточный федеральный университет», Лаборатория перспективных технологий горения, главный научный сотрудник, заведующий лабораторией, г. Владивосток;

Севастьянов Георгий Мамиевич, гражданин Российской Федерации, кандидат физико-математических наук, Федеральное государственное бюджетное учреждение науки «Институт машиноведения и металлургии

Дальневосточного отделения Российской академии наук», Лаборатория проблем металлотехнологий, старший научный сотрудник, г. Комсомольск-на-Амуре.

**дали положительные отзывы о диссертации.**

**Ведущая** организация Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт прикладной математики Дальневосточного отделения Российской академии наук, г. Владивосток, в своём положительном заключении, подписанном Цициашвили Гурами Шалвовичем, доктором физико-математических наук, профессором, главным научным сотрудником Института прикладной математики Дальневосточного отделения Российской академии наук, Жиравок Алексеем Ниловичем, доктором технических наук, профессором, главным научным сотрудником Института прикладной математики Дальневосточного отделения Российской академии наук, и утвержденном академиком Российской академии наук Гузевым Михаилом Александровичем, директором Института прикладной математики Дальневосточного отделения Российской академии наук, указала, что диссертация Андрианова Ивана Константиновича представляет собой научно-квалификационную работу, выполненную на высоком научном уровне и представляет собой самостоятельное законченное исследование, в котором содержится решение научной проблемы, имеющей важное значение для развития соответствующей отрасли научных знаний. Диссертация обладает актуальностью и новизной, соответствует паспорту специальности 05.13.18 – «Математическое моделирование, численные методы и комплексы программ» согласно следующим пунктам: разработка новых математических методов моделирования объектов и явлений; реализация эффективных численных методов и алгоритмов в виде комплексов проблемно-ориентированных программ для проведения вычислительного эксперимента; комплексные исследования научных и технических проблем с применением современной технологии математического моделирования и вычислительного эксперимента. Выводы и рекомендации по использованию результатов исследования обоснованы и имеют практическое значение. В автореферате и публикациях соискателя в полной мере отражено содержание диссертации, а также наиболее существенные положения и выводы.

Представленная работа отвечает требованиям положения ВАК о присуждении ученых степеней, предъявляемым к кандидатским диссертациям, а ее автор Андрианов Иван Константинович заслуживает присуждения ему искомой степени кандидата технических наук по специальности 05.13.18 – «Математическое моделирование, численные методы и комплексы программ».

Выбор официальных оппонентов и ведущей организации обосновывается тем, что официальные оппоненты являются компетентными специалистами в исследуемой области, а ведущая организация широко известна достижениями работающих в ней специалистов в области науки, соответствующей тематике диссертации.

**На диссертацию и автореферат поступили отзывы** (все положительные, указывается основное отражение замечаний):

Отзыв на диссертацию ведущей организации Федеральное государственное бюджетное учреждение науки «Институт прикладной математики» Дальневосточного отделения Российской академии наук имеет основные замечания: 1. В работе ничего не сказано о теплообмене излучением. Вместе с тем, как правило, даже при интенсивном конвективном теплообмене роль лучистого теплового потока в подобных задачах оказывается важной, в том числе за счет переизлучения лопаток друг на друга. Во всяком случае, следовало бы оговорить, почему не учитывается этот теплообмен. 2. В работе не указано, учитывался ли теплообмен на торцевых поверхностях оболочковых элементов. 3. В работе не учитывалась переменность свойств и многослойность теплозащитных покрытий, используемых для тепловой изоляции элементов. 4. В работе ничего не говорится о погрешности используемых в работе численных методов, особенно в окрестностях экстремальных точек кривых, представленных на рисунках гл.5. 5. В работе никак не комментируется погрешность использования стационарных уравнений гл.2 при расчетах в гл.5, относящихся к строго говоря нестационарным процессам, характеризуемым различными временами  $\tau$ . 6. В работе не обсуждается влияние на вычислительные результаты погрешностей полуэмпирических формул (2.26) – (2.28), (2.36), (2.43), формула на с.50 (6-ая строка снизу). 7. В работе не проводится оценка вычислительной сложности применяемых алгоритмов, и не дается информация о времени счета

используемых программ. 8. В работе ничего не говорится о сравнении полученных в ходе численного эксперимента результатов с натурными экспериментами, опубликованными в литературе или проведенными самостоятельно. 9. Соотношение (2.3) использует линейную аппроксимацию, следовало бы обосновать возможность такой аппроксимации и указать величину возможной погрешности. 10. В работе приводится ряд практических рекомендаций на основе результатов численного моделирования, однако их недостаточно. Выводы на основе этих результатов нередко имеют расплывчатый характер и непонятно, как их использовать на практике. Например, «Температура хладагента постепенно повышается в соответствии с направлением течения потока. Наибольшее изменение температуры охладителя отмечается в канале периферийного сечения» (с.100); «Наименьшая температура достигается в конце расчетного контура» (с.105).

Отзыв на диссертацию официального оппонента Минаева Сергея Сергеевича имеет основные замечания: 1. Несмотря на достаточно полное цитирование литературы по тематике исследования, в обзоре отсутствует общая математическая формулировка постановки задачи и описание редуцированных моделей, которые используются различными авторами. Это несколько затрудняет понимание роли и места исследований автора диссертации в данной области. 2. Выражения для потоков тепла (2.4)-(2.6) приведены для частного случая цилиндрической геометрии. В общем случае несимметричной формы оболочки уравнения для потоков должны записываться через производную по нормали к поверхности. 3. Опечатка в написании базовых уравнений (2.13) и (2.15), в которых отсутствует знак равенства. 4. В исследовании используется зависимость числа Нуссельта от температуры в рамках модели Сукомела (2.26). Неясно, в каком диапазоне параметров (скорость потока, температур, диаметров канала) справедлива эта аппроксимация. 5. Тоже замечание относится к выражению для сил трения. Квадратичная зависимость от скорости потока Вейсбаха-Дарси в (2.36) используется при достаточно больших значениях числа Рейнольдса, а при малых скоростях справедлива линейная аппроксимация. Необходимо указать диапазон применимости используемой зависимости. 6. Общим недостатком является отсутствие списка используемых обозначений. 7. Расчет показывает

нелинейную зависимость коэффициентов теплоотдачи или скорости от координаты (см., например Рис. 5.9, 5.11, 5.13). В частности, имеется локальный максимум в этих зависимостях. В работе отсутствует обсуждение физических причин возникновения этой нелинейной зависимости. Подтверждаются ли эти расчеты экспериментами или расчетами других авторов? 8. В численном моделировании не приведены данные об изменении узлов расчетной сетки для проверки корректности алгоритмов расчета.

Отзыв на диссертацию официального оппонента Севастьянова Георгия Мамиевича имеет основные замечания: 1. В тексте диссертации нет схем, отражающих поперечное сечение и расположение канала (каналов) охлаждения. Из текстового описания эту информацию также тяжело получить однозначно. По косвенным данным (по результатам расчетов характерного линейного размера канала, скорости течения охладителя и локального коэффициента теплоотдачи) можно предположить, что рассматриваются, вероятнее всего, щелевые каналы, так как площадь сечения канала оказывается приближенно линейной функцией характерного линейного размера. Вместе с тем, формула (2.26) для определения числа Нуссельта известна как аппроксимация экспериментальных данных для прямых каналов кругового сечения. В рассматриваемой работе каналы охлаждения заведомо не прямые, причем с существенным сужением по длине. 2. Числа Пекле для рассматриваемых процессов достаточно велики (порядка 100). В таких случаях для аппроксимации пространственных производных температуры, как правило, используются противопоточные разностные схемы, а не схемы с центральными разностями, как это сделано в работе. 3. Уравнение (2.31) в работе противоречит используемому соотношению гидравлического приближения на стр.48. Возможность замены двумерного (в лучшем случае) течения охладителя в канале при меняющемся практически на порядок его характерном линейном размере на одномерное модельное течение стоило бы аргументировать. Уравнение Навье-Стокса (2.20) записано в предположении постоянства объемной и динамической вязкости, вместе с тем, судя по численной схеме, автор пересчитывает значения этих коэффициентов в узлах сетки в зависимости от температуры. 4. Поскольку в работе численно решается достаточно «тяжелая» нелинейная система уравнений в частных производных очень желательно было

бы после получения расчетных данных проверить выполнение уравнений баланса энергии и контактных условий на границах по тепловым потокам. Это дало бы основания исключить возможность расчетных ошибок.

Отзыв на автореферат Афанасьева А.П., кандидата технических наук, заведующего кафедрой технических дисциплин ФГБОУ ВО «Приамурский государственный университет имени Шолом-Алейхема» (г. Биробиджан) имеет основные замечания: 1. Согласно автореферату в работе рассматриваются оболочковые элементы, которые защищены теплоизоляционным слоем постоянной толщины. В тоже время на сегодняшний день достаточно часто теплозащитные покрытия имеют переменную толщину, что диссертантом также могло быть использовано в качестве инструмента для управления расходом охладителя и реализацией равнопрочного состояния. 2. В работе достаточно кратко изложены подходы к оценке напряженно-деформированного состояния исследуемых элементов.

Отзыв на автореферат Сьюй А.В., кандидата физико-математических наук, заведующего кафедрой «Физика и теоретическая механика» Федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего образования «Дальневосточный государственный университет путей сообщения» (г. Хабаровск) имеет основные замечания: в автореферате для построения дискретных моделей теплоотвода используются неявные разностные схемы, что значительно усложняет постановку задачи, в сравнении с явными схемами. Поэтому представлялось бы целесообразным обосновать выбор численной дискретизации в автореферате.

Отзыв на автореферат Светашкова А.А., доктора физико-математических наук, профессора кафедры теоретической и прикладной механики ФГАОУ ВО «Национальный исследовательский Томский политехнический университет» (г.Томск) имеет основные замечания: 1. Термин «оболочковых» является неверным. Нужно заменить данный термин на «оболочечных». 2. Из автореферата не ясно как связан критерий прочности с температурой.

В дискуссии приняли участие:

- доктор физ.-мат. наук, профессор, член корр. РАН Буренин А.А., директор Федерального государственного бюджетного учреждения науки «Институт

машиноведения и металлургии Дальневосточного отделения Российской академии наук»;

- доктор техн. наук, профессор Тарануха Н.А., заведующий кафедрой «Кораблестроения» Федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего образования «Комсомольский-на-Амуре государственный технический университет».

Соискатель имеет 24 опубликованные работы, из них по теме диссертации опубликовано 14 научных работ общим объемом 4 печатных листа, в том числе 4 статьи в научных журналах и изданиях, которые включены в перечень российских рецензируемых научных журналов и изданий, рекомендованных ВАК для опубликования основных научных результатов диссертаций. Соискателю выдано 3 свидетельства о государственной регистрации программ для ЭВМ. Авторский вклад в подготовку работ, опубликованных в соавторстве, заключается в проведении математического моделирования процессов оптимального теплоотвода, разработке численной методики расчета минимального массового расхода и геометрии каналов теплоотвода, обеспечивающих выполнение условия длительной прочности, разработке комплекса программ для проведения вычислительных экспериментов.

Наиболее значимые работы:

1. Андрианов, И. К. Параметрическая идентификация математической модели теплообменного процесса для тонкостенных криволинейных оболочек турбомашин / И. К. Андрианов, М. С. Гринкруг // Математическое моделирование и численные методы. – 2016. – № 2(10). – С. 24-38.
2. Андрианов, И. К. Математическое моделирование геометрии каналов теплоотвода оболочковых элементов турбомашин, удовлетворяющей требуемому тепловому состоянию / И. К. Андрианов, М. С. Гринкруг // Вестник Рыбинского государственного авиационного технического университета им. П.А. Соловьева. – 2016. – № 2(37). – С. 85-89.
3. Андрианов, И. К. Численный метод расчета теплоотдачи для требуемого температурного поля на поверхности контакта лопатки и теплозащитного покрытия при поперечной схеме охлаждения / И. К. Андрианов, М. С. Гринкруг //

Вестник Московского государственного областного университета. Серия: «Физика-математика». – 2015. – №2. – С. 34-43.

4. Гринкруг, М. С. Численный подход к расчету параметров охлаждающего потока в каналах оболочковых элементов турбомашин для заданных условий на поверхности теплоотвода / М. С. Гринкруг, И. К. Андрианов // Интернет-журнал «Наукovedение». – 2016. – Том 8. – №1; URL: <http://naukovedenie.ru/PDF/25TVN116.pdf> (дата обращения: 18.02.2016).

5. Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ №2016660802. Программа для расчета температурных полей на граничных поверхностях оболочковых элементов на основании требуемой температурной конфигурации, удовлетворяющей условию длительной прочности / И. К. Андрианов, М. С. Гринкруг (RU) // Правообладатель: ФГБОУ ВО «КНАГТУ»; заявл. 27.07.2016; зарегистр. 21.09.2016.

6. Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ №2016660803. Программа для расчета параметров теплоотвода в каналах охлаждения оболочковых элементов турбомашин, обеспечивающих требуемое тепловое состояние элементов / И. К. Андрианов, М. С. Гринкруг (RU) // Правообладатель: ФГБОУ ВО «КНАГТУ»; заявл. 27.07.2016; зарегистр. 21.09.2016.

7. Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ №2016660980. Программа для расчета геометрических характеристик каналов охлаждения оболочковых элементов турбомашин, обеспечивающих требуемые условия теплоотвода /И. К. Андрианов, М. С. Гринкруг (RU) // Правообладатель: ФГБОУ ВО «КНАГТУ»; заявл. 27.07.2016; зарегистр. 27.09.2016.

**Диссертационный совет отмечает, что на основании выполненных соискателем исследований:**

**разработан** и программно реализован новый научный подход по оптимизации процессов отвода тепла в оболочковых элементах, подвергаемых силовому воздействию, внешнему подводу теплоты и внутреннему охлаждению на основании оценки прочностного ресурса; построена математическая модель для описания процессов оптимального отвода тепла в оболочковых элементах на основании условия длительной прочности, согласно которому реализуется

неравномерное тепловое состояние на наиболее термонагруженной поверхности оболочкового элемента, определяемое неравномерностью напряженного состояния элементов;

**предложен** новый численный метод расчета оптимальных процессов отвода тепла в оболочковых элементах турбомашин за счет минимизации массового расхода охлаждающих сред на основании построенных нелинейных разностных закономерностей, определяющих изменение геометрии каналов теплоотвода на основании условия длительной прочности при одинаковом временном режиме работы и одинаковом коэффициенте запаса прочности;

**доказана** перспективность использования разработанной численной модели отвода тепла при оптимизации процессов охлаждения и проведении комплексных расчетов оптимальных параметров массового расхода охладителя, изменения геометрии каналов охлаждения.

**Теоретическая значимость** исследования обоснована тем, что:

**получены** численные закономерности, связывающие минимальный массовый расход охладителя и изменение ширины поперечного сечения каналов теплоотвода на основании критерия длительной прочности, условий подвода тепловой энергии, позволяющие управлять процессом оптимального охлаждения за счет варьирования геометрическими характеристиками каналов теплоотвода;

**применительно к проблематике диссертации результативно (эффективно, то есть с получением обладающих новизной результатов) использованы** методы численного интегрирования и дифференцирования, итерационные методы расчета нелинейных уравнений, методы и технологии разработки программного обеспечения;

**изложены** методы и подходы к моделированию оптимальных систем охлаждения элементов турбомашин, аспекты численного решения линейных и нелинейных задач теплопереноса и газодинамики;

**раскрыты** проблемы, связанные с исследованием комплексных теплообменных задач, затрагивающих вопросы оптимизации процессов теплопереноса, исследования кинематики течения охлаждающих сред, а также оценки прочностного состояния элементов;

**проведена модернизация** существующих вычислительных подходов к расчету оптимальных параметров теплоотвода на основании неявных разностных схем решения нелинейных дифференциальных уравнений теплопереноса и газодинамики, сопряженных с оценкой прочностного ресурса, обеспечивающих получение новых результатов по теме диссертации.

**Значение полученных соискателем результатов исследования для практики** подтверждается тем, что:

**разработана** численная методика расчета оптимальных параметров теплоотвода на основании построенных пошаговых алгоритмов, позволяющая повысить эффективность охлаждения элементов турбомашин, в частности, рабочих и сопловых лопаток, камер сгорания, корпусов газотурбинного двигателя за счет снижения нецелесообразных затрат на охлаждение менее нагруженных участков элемента путем минимизации расхода охлаждающих сред;

**разработан** новый программный комплекс, включающий в себя три программы для ЭВМ, реализующие вычислительные схемы для расчета минимального массового расхода хладагента и изменения ширины каналов теплоотвода, определения неравномерной температурной конфигурации на наиболее нагруженных поверхностях оболочки при требуемом временном режиме нагружения и запасе прочности, за счет управления кинематической картиной течения охладителя и параметрами теплоотдачи при переменной геометрии систем охлаждения;

результаты диссертационного исследования **внедрены** в учебный процесс кафедры «Механика и анализ конструкций и процессов» ФГБОУ ВО «Комсомольский-на-Амуре государственный технический университет» при чтении лекций и проведении практических занятий, что подтверждается актом о внедрении результатов исследования;

**определены** перспективы практического использования разработанных численной методики и комплекса программ для оптимизации процессов охлаждения в связи с повышением рабочих температур теплоподводящих газовых сред оболочковых элементов турбомашин.

**Оценка достоверности** результатов исследования выявила:

**теория** построена на известных подходах математического моделирования, традиционных уравнениях теплопереноса и газодинамики, использовании апробированных конечно-разностных методов решения дифференциальных и интегральных уравнений;

**идея базируется** на обоснованном применении полуэмпирических соотношений для описания процессов теплоотвода в каналах охлаждения оболочковых элементов, имеющих опытное подтверждение;

**использованы** для проверки адекватности модели расчетные данные других исследователей: проведен сравнительный анализ результатов расчета процессов теплопереноса на основании входных и выходных данных расчетных работ других авторов по рассматриваемой тематике.

**использованы** современные методики сбора и обработки исходной информации.

**Личный вклад** соискателя состоит в непосредственном участии в построении математической модели оптимального отвода тепла, разработке и обосновании численной методики решения исследуемой обратной задачи, разработке комплекса программ, проведении вычислительных экспериментов, доказательстве основных результатов, подготовке результатов и личном участии в их апробации на всероссийских и региональных семинарах и конференциях, подготовке основных публикаций по выполненной работе.

Диссертация охватывает основные вопросы поставленной научной задачи и соответствует критерию внутреннего единства, что подтверждается наличием последовательного плана исследования: анализа современного состояния вопроса исследования, построения математической модели оптимального теплоотвода, разработки численной методики расчета и пошаговых алгоритмов, а также программной реализации и оценки результатов численного расчета минимального массового расхода охладителя и геометрической конфигурации каналов теплоотвода, удовлетворяющих условию длительной прочности; основной идейной линией, концептуальностью и взаимосвязью выводов.

Диссертационным советом сделан вывод о том, что диссертация представляет собой законченную научно-квалификационную работу и отвечает

требованиям, установленным Положением о порядке присуждения учёных степеней.

На заседании 19.05.2017 г. диссертационный совет Д 999.055.04 принял решение присудить Андрианову Ивану Константиновичу учёную степень кандидата технических наук за решение научной проблемы в области математического моделирования и численного решения задачи оптимального отвода тепла в оболочковых элементах турбомашин.

При проведении тайного голосования диссертационный совет в количестве 17 человек, из них 7 докторов наук по профилю рассматриваемой диссертации, участвовавших в заседании, из 24 человек, входящих в состав совета, дополнительно введены на разовую защиту 0 человек, проголосовали: за присуждение ученой степени 17, против присуждения ученой степени 0, недействительных бюллетеней 0.

Председатель диссертационного  
совета



Тарануха Николай Алексеевич

Учёный секретарь  
диссертационного совета

Боромотин Константин Сергеевич

19 мая 2017 года