

Отзыв

официального оппонента

на диссертационную работу **Генералова Дмитрия Александровича** на тему:
«Математическое моделирование тепловых процессов лопаточного аппарата турбомашин», представленную на соискание ученой степени кандидата технических наук по специальности 05.13.18 - «Математическое моделирование, численные методы и комплексы программ» в диссертационный совет Д 212.337.01, при ФГБОУ ВО «Пензенский государственный технологический университет»

Актуальность темы исследования

Повышение эффективности техники и сокращение сроков разработки новых образцов в настоящее время требуют создания адекватных математических моделей и повышения точности прогнозирования характеристик на стадиях проектирования или модернизации.

Один из основных способов достижения улучшенных характеристик современных газотурбинных установок заключается в повышении параметров рабочего тела (температуры и давления) перед турбиной. Поэтому возникает необходимость в повышении эффективности и разработки новых технологий и технических решений тепловой защиты лопаточного аппарата, который относится к наиболее теплонапряженным элементам конструкции.

Перспективным техническим решением в системах тепловой защиты является применение газодинамической температурной стратификации отбираемых из компрессора потоков рабочего тела и охлаждающего воздуха, а также отработанных газов. Однако включение устройств газодинамической температурной стратификации в системы тепловой защиты лопаточного аппарата может сопровождаться и негативными эффектами, связанными с отбором части стратифицируемого потока, уменьшением его давления, расхода и теплоотдачи. Дополнительные сложности при исследовании и применении газодинамической температурной стратификации связаны с фазовыми переходами и наличием в потоке рабочего тела конденсированных частиц, изменяющих процессы его

теплового взаимодействия с обтекаемой поверхностью. Все это требует достоверного и точного учета при проектировании технологий и технических устройств тепловой защиты лопаточного аппарата перспективных газотурбинных установок.

Актуальность темы диссертационного исследования определяется перспективной и малоизученной как с позиции определения потенциала, так и выбора рациональных схмотехнических и компоновочных решений, возможностью повышения эффективности тепловой защиты посредством использования газодинамической температурной стратификации потоков рабочего тела и охлаждающего воздуха, в том числе рециркулируемых.

Представленная диссертационная работа Д.А. Генералова выполнена в указанном направлении и посвящена актуальным проблемам математического моделирования тепловых процессов в энергетических установках, в частности в лопаточном аппарате турбомашин.

Обоснованность и достоверность научных положений, выводов и рекомендаций

Обоснованность научных положений, выводов и рекомендаций, содержащихся в диссертации Д.А. Генералова, определяется грамотным применением комплекса таких методов как метод тепловых балансов, конечно-разностной аппроксимация уравнений пограничного слоя по апробированной неявной шеститочечной схеме, а также использование в качестве теоретической и методической основы диссертации фундаментальных исследований и прикладных работ ведущих ученых в области математического моделирования тепловых и газодинамических процессов в энергетических установках.

Достоверность результатов исследования обеспечивается сопоставлением полученных расчетных данных с экспериментальными и расчетными данными других авторов, а также тестированием программного комплекса, апробацией результатов исследования на научно-практических конференциях, отражением основных результатов диссертационной работы в опубликованных автором научных трудах.

Результаты диссертационного исследования нашли отражение в

семнадцати научных работах, в том числе пять статей в научных изданиях рекомендованных Высшей аттестационной комиссией Министерства образования и науки РФ и в изданиях, включенных в базы Scopus & WoS, одном свидетельстве о регистрации программ для ЭВМ и одном патенте на изобретение РФ.

Общий анализ содержания работы

Диссертационная работа изложена на 130 страницах машинописного текста и состоит из введения, четырех глав, заключения. Список использованной литературы включает 99 наименований работ отечественных и зарубежных авторов. Материалы, изложенные в автореферате достаточно полно отражают содержание диссертации.

Во введении дана актуальность темы диссертационной работы, ее цель, задачи, приведена постановка проблемы, освещается общее состояние вопроса по рассматриваемому направлению, в компактной форме сформулированы и обоснованы основные результаты научного исследования.

В первой главе выполнен обзор и сделан анализ научно-технической и патентной информации по проблемам повышения эффективности турбомашин и совершенствования способов тепловой защиты их лопаточного аппарата, а также по вопросам, связанным с исследованиями и возможностью применения в системах тепловой защиты феномена газодинамической температурной стратификации.

Существующие в настоящее время и хорошо развитые программные средства для проектирования и инженерных расчётов, обеспечивающие возможность трёхмерного моделирования мало пригодны для надежного количественного прогнозирования теплового состояния лопаток турбомашин, поскольку при их использовании затруднена возможность автоматического формирования граничных условий теплообмена, отражающих особенности процессов в межлопаточном пространстве турбомашин и в трактах охлаждения лопаток. В первой главе сформулированы задачи, которые решаются в следующих главах.

Вторая глава, состоящая из трех параграфов, посвящена выполнению

математического моделирования теплового состояния лопаток турбомашин с учётом сопутствующих и инициируемых газодинамических процессов в межлопаточном пространстве и охлаждающих трактах.

Математическое моделирование тепловых процессов в лопаточном аппарате выполнено с учетом газодинамической обстановки в пограничном слое межлопаточного пространства посредством сопряженного численного решения системы дифференциальных уравнений пограничного слоя и задачи нестационарной теплопроводности лопатки.

Модель для расчета температурного поля лопатки приводится в трёхмерной нестационарной постановке с учетом зависимости теплофизических свойств материала лопатки от температуры и включает в себя дифференциальное уравнение теплопроводности, которое дополняется начальными и граничными условиями однозначности. При этом в граничных условиях местные коэффициенты теплоотдачи к поверхностям лопатки, за исключением корыта и спинки, определялись по известным эмпирическим уравнениям подобия, а местные коэффициенты теплоотдачи на поверхностях корыта и спинки лопатки определялись в сопряженной постановке по результатам решения системы уравнений пограничного слоя, описывающих процесс теплоотдачи на поверхности лопатки в каждом ее сечении по высоте. Эта же модель пограничного слоя использовалась и при анализе движения и теплообмена в трактах устройства газодинамической температурной стратификации.

Также **в третьей главе** идет описание разработанного численного метода и алгоритмов программной реализации исследуемых процессов тепловой защиты лопаточного аппарата турбомашин.

Переход от дифференциального уравнения теплопроводности лопатки к конечно-разностному уравнению автор осуществляет с помощью метода тепловых балансов.

Необходимые для нахождения температур при граничных условиях третьего рода в граничных расчетных элементах температуру стенки участка граничного элемента лопатки и значения коэффициентов теплоотдачи от омывающего потока (продуктов сгорания, охладителя) находились из расчета

граничных условий на поверхностях охлаждающих каналов и на поверхностях лопатки. Конечно-разностная аппроксимация уравнений пограничного слоя осуществляется по апробированной неявной шеститочечной схеме, имеющей первый порядок по времени и второй порядок аппроксимации по пространственным переменным.

В третьей главе представлены алгоритмы программной реализации математического моделирования тепловой защиты лопаточного аппарата турбомашин. Особенностью разработанного метода является использование результатов расчета пограничного слоя, в том числе с учетом воздействий, дисперсности потока и газодинамической температурной стратификации для решения задачи теплопроводности лопатки.

В завершающей части главы приведены результаты методических исследований по выбору оптимальной густоты расчётной сетки, а также результаты тестовых расчётов в сопоставлении с результатами экспериментов, полученными ранее другими исследователями, которое показало удовлетворительное их согласование.

В четвертой главе представлено описание разработанного комплекса программ для анализа теплового состояния лопаток турбомашин и результатам решения задач исследования условий использования демпфирующих полостей и газодинамической температурной стратификации для эффективной тепловой защиты лопаточного аппарата турбомашин, графически изображена его структура. Для расчета теплового состояния лопаток турбомашин с учетом газодинамики дисперсного рабочего тела в комплексе программ реализован предложенный численный метод, определена оптимальная густота сетки, адаптированы базы данных.

Исследование с использованием разработанного комплекса программ проводилось в несколько этапов. Выполнено математическое моделирование охлаждения с применением перфорированных поверхностей спинки и корыта с демпфирующими полостями, исследовалась эффективность различных способов охлаждения, в том числе на перфорированных поверхностях корыта и спинки турбинной лопатки с глухими демпфирующими полостями при ее пленочном

охлаждении.

Достоверность результатов и адекватность математического моделирования обеспечивается строгими математическими доказательствами, вычислительными экспериментами и в некоторых случаях предельными переходами к эталонным вариантам, сравнением с данными экспериментов, а также натурных наблюдений.

Научная новизна работы заключается в достижении следующих обоснованных и достоверных результатов:

- разработана и реализована математическая модель тепловых процессов в лопаточном аппарате газотурбинных установок с возможностью учитывать газодинамическую обстановку в пограничном слое межлопаточного пространства;

- проведено математическое моделирование тепловых процессов на основе сопряженного решения задачи теплопроводности лопаток и задачи анализа пограничного слоя при конвективном охлаждении лопаток с использованием демпфирующих полостей, а также при использовании газодинамической температурной стратификации для тепловой защиты лопаточного аппарата турбомашин;

- представлен численный метод и алгоритмы программной реализации математического моделирования тепловых процессов в лопаточном аппарате газотурбинных установок для исследования эффективности тепловой защиты;

- создан комплекс программ для анализа теплового состояния лопаток турбомашин с учетом газодинамической обстановки в межлопаточном пространстве при различных способах тепловой защиты, обеспечивающий повышение результативности исследования и оценки заданной точности при сокращении вычислительных затрат математического моделирования.

Практическая значимость работы

Практическая значимость диссертации заключается в разработанном комплексе программ, который обеспечивает возможность поиска и отработки в вычислительном эксперименте перспективных технических решений по тепловой

защите лопаточного аппарата. Применение газодинамической температурной стратификации открывает возможности форсирования тактико-технических характеристик газотурбинной установки, либо увеличения её ресурса за счет повышения эффективности охлаждения лопаточного аппарата. Разработанное техническое решение газотурбинного двигателя, защищенное патентом РФ №2537793, позволит повысить КПД турбоустановок на 0,33 % при увеличении температуры рабочего тела на 50 °С. Результаты работы приняты к внедрению в специализированных организациях.

Замечания по диссертационной работе

1. При описании методик недостаточно внимания уделено вопросам устойчивости расчетов и зависимости полученных результатов от ошибок экспериментальных данных.

2. Некоторые графические материалы выполнены недостаточно аккуратно (рис. 3.7, 3.14). Не везде присутствует единый стиль оформления графиков.

3. Первая глава имеет слишком большой объем (60 стр.), это около 45% от всего текста диссертации.

4. Нет обоснования применения критериальных выражений (2.4), (2.7.) и других при моделировании теплоотдачи от перфорированных поверхностей и с демпфирующими полостями (раздел 4.4.).

5. При всей значительности результатов исследования теплового состояния лопаток турбомашин следует уделить больше внимания практическим приложениям данного моделирования.

Следует отметить, что указанные замечания не снижают общей научной и практической ценности работы, а имеют частный характер.

Заключение

Диссертационное исследование Генералова Д.А. является законченной научно квалификационной работой, в которой содержатся решения актуальных задач повышения эффективности работы современных и проектируемых турбомашин с разработкой численных методов с реализацией комплекса программ, имеющих существенное значение для развития соответствующих областей математического моделирования.

Автореферат в полной мере отражает основные положения диссертационного исследования, его содержание соответствует тексту диссертации и указанным публикациям. Представленная диссертационная работа соответствует области исследований 05.13.18 - «Математическое моделирование, численные методы и комплексы программ» паспорта научных специальностей.

Таким образом, диссертация на тему «Математическое моделирование тепловых процессов лопаточного аппарата турбомашин» отвечает требованиям, установленным Положением о присуждении ученых степеней, утвержденных постановлением Правительства Российской Федерации от 24 сентября 2013 года, № 842 с изменениями постановления Правительства Российской Федерации от 21 апреля 2016 г. № 355 (пп. 9, 10, 11, 13, 14), а ее автор, Генералов Дмитрий Александрович заслуживает присуждения ученой степени кандидата технических наук по специальности 05.13.18 - «Математическое моделирование, численные методы и комплексы программ».

Лаптев Анатолий Григорьевич, доктор технических наук, профессор, Почетный работник ВПО РФ, заведующий кафедрой «Технология воды и топлива» ФГБОУ ВО «Казанский государственный энергетический университет»

Контактная информация: Лаптев Анатолий Григорьевич, доктор технических наук, профессор, заведующий кафедрой «Технология воды и топлива» ФГБОУ ВО «Казанский государственный энергетический университет», 420066, г. Казань, ул. Красносельская, 51, В-717а; телефон: 8(843)519-42-53(54); e-mail: tvt_kgeu@mail.ru; официальный сайт организации: <https://kgeu.ru/>



Подпись Лаптева Анатолия Григорьевича
удостоверяю

Секретарь УК: Светлана Свечева А.А.