

Работа выполнена на кафедре «Тепловая и топливная энергетика» в Федеральном государственном бюджетном образовательном учреждении высшего образования «Ульяновский государственный технический университет».

Научный руководитель: доктор технических наук
Ковальногов Владислав Николаевич

Официальные оппоненты: **Лаптев Анатолий Григорьевич**
доктор технических наук, профессор
ФГБОУ ВО «Казанский государственный энергетический университет», заведующий кафедрой «Технология воды и топлива»

Цынаева Анна Александровна
кандидат технических наук, доцент
ФГБОУ ВО «Самарский государственный технический университет», доцент кафедры «Теплогасоснабжение и вентиляция»

Ведущая организация: ФГБОУ ВО «Казанский национальный исследовательский технический университет им. А.Н. Туполева - КАИ»

Защита диссертации состоится 26 декабря 2017 г. в 14.00 часов на заседании диссертационного совета Д 212.337.01 на базе ФГБОУ ВО «Пензенский государственный технологический университет» по адресу: 440039, г. Пенза, проезд Байдукова / ул. Гагарина, д.1а/11, корпус 1, конференц-зал.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке Федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего образования «Пензенский государственный технологический университет» и на сайте <http://www.penzgtu.ru>

Отзывы на автореферат в двух экземплярах, заверенные печатью организации, просим направлять по указанному выше адресу.

Автореферат разослан 10 ноября 2017 г.

Ученый секретарь
диссертационного совета



Чулков Валерий Александрович

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы. Одним из основных способов достижения улучшенных характеристик перспективных газотурбинных установок остается повышение параметров рабочего тела (температуры и давления) перед турбиной, что, в свою очередь, требует совершенствования технологий и техники тепловой защиты лопаточного аппарата, относящегося 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 техники тепловой защиты лопаточного аппарата перспективных газотурбинных установок.

Дороговизна и трудоёмкость натуральных экспериментов по обработке технологии и компоновочных решений систем тепловой защиты лопаточного аппарата, основанных на газодинамической температурной стратификации, требует разработки адекватного математического обеспечения для исследования процесса посредством вычислительного эксперимента. Поэтому тема работы, посвященная математическому моделированию и численному исследованию теплового состояния охлаждаемых лопаток с учётом сопровождающих и инициируемых газодинамических явлений, является *актуальной*.

Тема диссертации напрямую связана с реализацией п. 8 «Приоритетных направлений развития науки, технологий и техники в Российской Федерации» и п. 26 «Перечня критических технологий Российской Федерации», утвержденных Указом Президента Российской Федерации от 07.07.2011, № 899. Исследование соответствует паспорту специальности 05.13.18 – математическое моделирование, численные методы и комплексы программ: п. 3 – разработка, обоснование и тестирование эффективных вычислительных методов с применением современных компьютерных технологий; п. 4 – реализация эффективных численных методов и алгоритмов в виде комплексов проблемно-ориентированных программ для проведения вычислительного эксперимента; п. 5 – комплексные исследования научных и технических проблем с применением современной технологии математического моделирования и вычислительного эксперимента; п. 8 – разработка систем компьютерного и имитационного моделирования.

Объектом исследования являются тепловые и газодинамические процессы в газотурбинных установках с системами охлаждения лопаточного аппарата.

Предметом исследования являются методы математического моделирования тепловых процессов в лопаточном аппарате газотурбинных установок.

Цель работы – математическое моделирование и разработка численного метода с реализацией комплекса программ для проведения вычислительного эксперимента по исследованию тепловых процессов в лопаточном аппарате газотурбинных установок с выявлением эффективных методов их тепловой защиты.

Для достижения поставленной цели решаются следующие **задачи**:

1. Разработать метод математического моделирования тепловых процессов в лопаточном аппарате газотурбинных установок, обеспечивающий учет газодинамической обстановки в межлопаточном пространстве.

2. Выполнить математическое моделирование тепловых процессов на основе сопряженного решения задачи теплопроводности лопатки и задачи анализа пограничного слоя при конвективном охлаждении лопаток с использованием демпфирующих полостей и при использовании газодинамической температурной стратификации для тепловой защиты лопаточного аппарата турбомашин.

3. Разработать методики численного расчета на основе конечно-разностного метода и метода теплового баланса и алгоритмы математического моделирования тепловой защиты лопаточного аппарата турбомашин.

4. Разработать комплекс программ для исследования посредством вычислительного эксперимента эффективности тепловой защиты лопаточного аппарата газотурбинной установки.

Методы исследования. Реализация цели и решение поставленных задач обеспечены использованием современных методов исследований, базирующихся на основных положениях теории тепломассообмена, гидрогазодинамики, пограничного слоя, математического моделирования и численных методов.

Научная новизна.

1. Разработан метод математического моделирования тепловых процессов в лопаточном аппарате газотурбинных установок, обеспечивающий анализ и учет газодинамической обстановки в пограничном слое межлопаточного пространства.

2. Выполнено 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.

3. Разработаны методики численного расчета на основе конечно-разностного метода и метода теплового баланса и алгоритмы математического моделирования тепловых процессов в лопаточном аппарате газотурбинных установок для исследования эффективности тепловой защиты.

4. 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.

Основные положения, выносимые на защиту:

1. Метод математического моделирования тепловых процессов в лопаточном аппарате газотурбинных установок, основанный на решении задач нестационарной теплопроводности лопатки, сопряженной с газодинамической обстановкой в пограничном слое межлопаточного пространства.

2. Результаты математического моделирования тепловых процессов на основе сопряженного решения задачи теплопроводности лопатки и задачи пограничного слоя при конвективном охлаждении лопаток с использованием демпфирующих полостей, а также при использовании газодинамической температурной стратификации для тепловой защиты лопаточного аппарата турбомашин.

3. Методики численного расчета на основе конечно-разностного метода и метода теплового баланса и алгоритмы математического моделирования тепловой защиты лопаточного аппарата турбомашин для исследования эффективности тепловой защиты.

4. Комплекс программ математического моделирования тепловых процессов в лопаточном аппарате газотурбинных установок и оценки эффективности тепловой защиты лопаток.

Практическая значимость работы. Практическая значимость разработанного комплекса программ заключается в возможности поиска и отработки в вычислительном эксперименте с его помощью 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. Применение разработанного с использованием новых программ технического решения газотурбинного двигателя, защищенного патентом РФ №2537793, позволит повысить КПД турбоустановок на 0,35% при увеличении температуры рабочего тела на 50 °С.

Достоверность полученных результатов обеспечена сопоставлением полученных расчетных данных с экспериментальными и расчетными данными, полученными другими авторами и тщательным тестированием программного комплекса. Адекватность модели проверялась сопоставлением с эксперимен-

тальными данными, полученными другими исследователями, расчетных данных по распределению коэффициентов теплоотдачи и температуры на поверхности лопатки.

Реализация результатов работы. Исследования выполнены при финансовой поддержке грантом РФФИ рег. №16-38-00475 «Разработка программно-информационного комплекса для исследования и отработки технологии тепловой защиты лопаток турбомашин», отдельные результаты получены при финансовой поддержке грантом Президента Российской Федерации по проекту МД-1576.2014.8 «Моделирование, исследование и разработка методов повышения эффективности энергомашин с дисперсным рабочим телом», грантом РФФИ рег. № 15-48-02275-р_а «Разработка принципов и моделей создания и исследования новых энергосберегающих, экологически чистых и замкнутых теплотехнологий с газодинамической температурной стратификацией рециркулируемого теплоносителя», отдельные разработки выполнены при поддержке Российского агентства по делам молодежи (приказ №192 от 24.12.2014 г. по проекту «Разработка программно-информационного комплекса для моделирования и исследования теплового состояния лопаток турбин»).

Разработанный комплекс программ и методические разработки, связанные с исследованием эффективности тепловой защиты лопаток турбомашин, используются в учебном процессе подготовки бакалавров по направлению «Теплоэнергетика и теплотехника», а также на производстве в филиале «Ульяновский» ПАО «Т Плюс» для анализа работы лопаточного аппарата турбомашин.

Апробация работы. Основные результаты исследования доложены на 12-й и 13-й международных конференциях по численному анализу и прикладной математике ICNAAM (Греция, Родос, 2014 и 2015 гг.), Шестой Российской конференции по теплообмену (Москва, 2014 г.), VIII Международной конференции «Проблемы промышленной теплотехники» (Украина, Киев, 2013 г.), международной конференции «IX Семинар вузов по теплофизике и энергетике» (Казань, 2015 г.), отраслевой конференции «Газовые турбины в энергетике и транспорте» (Москва, 2014 г.), X школе-семинаре молодых ученых и специалистов академика В.Е. Алемасова (Казань, 2016 г.), научно-технических конференциях Ульяновского государственного технического университета (Ульяновск, 2009-2016 гг.), научно-технических семинарах кафедры «Тепловая и топливная энергетика» Ульяновского государственного технического университета (2012-2016 гг.).

Публикации. По теме диссертации опубликовано 17 работ, в том числе 2 статьи в ведущих рецензируемых изданиях из перечня ВАК, 3 статьи в ведущих зарубежных изданиях, индексируемых в наукометрических базах Scopus и Web of Science, 1 патент на изобретение, 1 свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ.

Личный вклад автора. В списке трудов представлены 2 работы, выполненные единолично автором, а остальные 15 выполнены автором при его ос-

новном участии. При этом автором выполнялось: постановка задачи, выбор и разработка метода решения, расчеты, проработка и обобщение результатов, формирование выводов и заключения.

Структура и объем диссертации. Диссертационная работа состоит из введения, четырех глав, заключения, списка литературы (99 наименований) и приложений, включает 130 страниц машинописного текста, 69 рисунков и 3 таблицы.

СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении обоснована актуальность темы диссертации, сформулированы цель и задачи исследования, научная новизна и практическая значимость, представлены основные положения, выносимые на защиту, кратко проаннотировано содержание и структура диссертации.

В первой главе выполнен 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.

Создателем отечественной школы газотурбостроения был В.М. Маковский, работавший в 1930-е гг. на кафедре турбостроения Харьковского механико-машиностроительного института. В настоящее время работы в области газотурбинных установок активно продолжают научные группы в МЭИ (ТУ), МГТУ им. Н.Э. Баумана, КНИТУ-КАИ, СамГТУ, ВТИ, НПО ЦКТИ, GeneralElectric, Rolls-Royce, Pratt-Whitney, Sulzerи др.

Значительный вклад в исследование процессов теплообмена и газодинамики разработку систем тепловой защиты лопаточного аппарата турбомашин внесли работы Б.М. Галицейского, Л.М. Зысиной-Моложен, Г.С. Жирицкого, С.З. Копелева, В.И. Локая, В.Г. Петухова, А.Э. Роттэ, А.В. Щукина, А.Н. Фомина, D.G. Bogard, M.T. Schobeiri, K.A. Thole и др. Развитию теоретических представлений о температурной стратификации посвящены труды С.А. Бурцева, Э.П. Волчкова, А.Г. Здитовца, Н.Н. Ковальногова, А.И. Леонтьева, М.С. Макарова, А.П. Меркулова, Ш.А. Пиралишвили, Е.В. Цветовой, А.А. Цынаевой. Логическим развитием этих работ стало настоящее исследование.

Выводы по результатам анализа научно-технической литературы сводятся в основном к следующему:

1. Процессу тепловой защиты элементов турбомашин посвящено значительное число работ. В них рассмотрены различные способы тепловой защиты (воздушное, жидкостное), их эффективность, в том числе с помощью современных методов прогнозирования. На основании изучения известных автору работ представляется перспективной разработка комплекса программ, способного учитывать существующие способы охлаждения, а также разрабатывать новые.

2. В настоящее время для тепловой защиты лопаточного аппарата в основном применяют воздушные системы охлаждения. Перспективной и малоизученной как с позиции определения потенциала, так и выбора рациональных схемотехнических и компоновочных решений, является возможность повышения эффективности тепловой защиты посредством использования газодинамической температурной стратификации потоков рабочего тела и охлаждающего воздуха, в том числе рециркулируемых. Использование дисперсного потока в трубе температурной стратификации позволяет многократно увеличить эффективность стратификации, однако на основании анализа известных автору работ установлено, что применение газодинамической температурной стратификации дисперсных потоков для повышения эффективности работы турбомашин исследовано недостаточно.

3. Резервом повышения эффективности систем тепловой защиты лопаточного аппарата перспективных газотурбинных установок от воздействия высокотемпературного рабочего тела является максимальное «затягивание» ламинарно-турбулентного перехода при обтекании поверхностей корыта и спинки лопаток. При проектировании систем тепловой защиты лопаточного аппарата турбомашин необходимо учитывать эволюцию пограничного слоя, развивающегося около этих поверхностей, а также пространственную неоднородность газодинамических и тепломассообменных процессов в межлопаточном пространстве и трехмерность теплового состояния лопаток.

4. Существующие в настоящее время и хорошо развитые программные средства для проектирования и инженерных расчётов, обеспечивающие возможность трёхмерного моделирования (например, разработки фирм Ansys Inc., PTC и др.), 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. При автономном задании граничных условий нет возможности учитывать влияние на них действительного распределения температуры по поверхности лопатки в зависимости от времени.

Исходя из вышеперечисленного, сформулированы задачи, которые решаются в работе.

Во второй главе выполнено математическое моделирование теплового состояния лопаток турбомашин с учётом сопутствующих и инициируемых газодинамических процессов в межлопаточном пространстве и охлаждающих трактах. В соответствии с выводами к первой главе, базовая модель для расчета температурного поля лопатки сформулирована в трёхмерной нестационарной постановке с учетом зависимости теплофизических свойств материала лопатки от температуры и включает дифференциальное уравнение теплопроводности, дополненное начальными и граничными условиями однозначности. При этом в

граничных условиях местные коэффициенты теплоотдачи α_i к поверхностям лопатки за исключением корыта и спинки определяли по известным эмпирическим уравнениям подобия, а местные коэффициенты теплоотдачи на поверхностях корыта и спинки лопатки определяли в сопряженной постановке по результатам решения системы уравнений пограничного слоя, описывающих процесс теплоотдачи на поверхности лопатки в каждом ее сечении по высоте (эту же модель пограничного слоя использовали и при анализе движения и теплообмена в трактах устройства газодинамической температурной стратификации).

Система уравнений пограничного слоя включает:

– дифференциальное уравнение энергии

$$\rho c_p \left(\frac{\partial T}{\partial \tau} + w_x \frac{\partial T}{\partial x} + w_y \frac{\partial T}{\partial y} \right) = \frac{\partial}{\partial \tau} \left[(\lambda + \lambda_T) \frac{\partial T}{\partial y} \right] + (\mu + \mu_T) \left(\frac{\partial w_x}{\partial y} \right)^2 + \frac{dP}{d\tau} + w_x \frac{dP}{dx} + q_v; \quad (1)$$

– дифференциальное уравнение движения

$$\rho \left(\frac{\partial w_x}{\partial \tau} + w_x \frac{\partial w_x}{\partial x} + w_y \frac{\partial w_x}{\partial y} \right) = - \frac{dP}{dx} + \frac{\partial}{\partial y} \left[(\mu + \mu_T) \frac{\partial w_x}{\partial y} \right] + S_v; \quad (2)$$

– дифференциальное уравнение неразрывности

$$\frac{\partial P}{\partial \tau} + \frac{\partial(\rho w_x)}{\partial x} + \frac{\partial(\rho w_y)}{\partial y} = 0; \quad (3)$$

– уравнение состояния

$$\rho = P/(RT), \quad (4)$$

где μ – динамический коэффициент вязкости, Па·с; ρ – плотность несущей среды, кг/м³; c_p – удельная изобарная теплоемкость, Дж/(кг·К); λ – коэффициент теплопроводности, Вт/(м·К); P – давление потока, МПа; w_x – продольная составляющая скорости, м/с; w_y – поперечная составляющая скорости, м/с; x – продольная координата, м; y – поперечная координата, м; λ_T – коэффициент турбулентного переноса теплоты, Вт/(м·К); μ_T – коэффициент турбулентного переноса количества движения, Па·с; S_v – член, характеризующий интенсивность внутренних источников количества движения, Н/м³; q_v – член, характеризующий интенсивность внутренних источников теплоты, Вт/м³.

Интенсивность внутренних источников теплоты q_v и количества движения S_v , входящие в уравнения (1) и (2), применительно к дисперсному пограничному слою определяли по формулам:

$$S_v = \frac{0,75 \rho_s \rho c_{fs}}{\rho_B d_s} |u_s - u| (u_s - u), \quad (5)$$

$$q_v = \frac{6 \alpha_s \rho_s}{\rho_B d_s} (T_s - T), \quad (6)$$

где α_s – коэффициент теплоотдачи конденсированных частиц дисперсной фазы, Вт/(м²·К); c_{fs} – коэффициент сопротивления трения конденсированных частиц дисперсной среды; ρ_s – плотность конденсированной фазы (масса конденсированных частиц в единице объема среды), кг/м³; ρ_b – плотность вещества частиц, кг/м³; u_s – скорость частиц, м/с; T_s – температура частиц, К; d_s – диаметр частиц, м.

На участке поверхности лопатки с ламинарным пограничным слоем $\lambda_T = \mu_T = 0$, на участке поверхности с турбулентным пограничным слоем коэффициент турбулентного переноса теплоты λ_T определяли по соотношению:

$$\lambda_T = \frac{\mu_T c_p}{Pr_T} \approx \frac{\mu_T c_p}{0,9}, \quad (7)$$

где Pr_T – турбулентное число Прандтля по толщине пограничного слоя.

При этом используется оригинальная модель турбулентного переноса. Коэффициент турбулентного переноса количества движения μ_T в соответствии с модифицированной моделью пути смешения Прандтля определяли по выражению:

$$\mu_T = \frac{\rho l^2 \partial u}{\partial y}, \quad (8)$$

где длина пути смешения l рассчитывается по выражению:

$$l = \alpha y \{1 - \exp[-\rho \nu y / (26\mu)]\}. \quad (9)$$

Здесь ν – динамическая скорость в рассматриваемой точке.

Коэффициент $\alpha = \alpha_T$ определяется зависимостью, учитывающей влияние фактора динамической нестационарности, продольного градиента давления и кривизны обтекаемой поверхности:

$$\alpha_T = 0,4 \frac{\sqrt{1 - \frac{4,9}{\left(\frac{\partial w_x}{\partial y}\right)_{y=0}} \left[\frac{\left(\frac{\partial P_\infty}{\partial \tau}\right)}{\rho_\infty w_{x0} w_{x\infty}} - \frac{w_{x\infty}}{r} \right]}}{1 + 21,4 \frac{\left(\frac{\partial P_\infty}{\partial x}\right)}{P_\infty u_0 \left(\frac{\partial w_x}{\partial y}\right)_{y=0}}, \quad (10)$$

где w_{x0} – скорость потока в начальном сечении, м/с; $w_{x\infty}$ – скорость за пределами пограничного слоя, м/с; u_0 – скорость частиц в начальном сечении, м/с; r – радиус кривизны, м; индекс ∞ характеризует параметры течения в анализируемом сечении за пределами пограничного слоя.

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

Третья глава посвящена разработке численных методов и алгоритмов их программной реализации для исследования процессов тепловой защиты лопаточного аппарата турбомашин.

Переход от дифференциального уравнения теплопроводности лопатки к конечно-разностному уравнению осуществляется с помощью метода тепловых балансов. Для каждого типа расчетных элементов лопатки составляются дискретные аналоги дифференциального уравнения теплопроводности (1). Каждый расчетный элемент обладает уникальным трехкомпонентным номером (i, j, k) , в котором i – номер расчетной точки в радиальном (вдоль радиуса) направлении, начиная с точки на нижней торцовой поверхности лопатки ($i=1$); j – то же в окружном направлении (вдоль оси φ) лопатки; k – то же в осевом (вдоль оси x) направлении, начиная с левого сечения.

Для нахождения температур при граничных условиях третьего рода в граничных расчетных элементах необходимо знать температуру стенки участка граничного элемента лопатки и значения коэффициентов теплоотдачи от омывающего потока (продуктов сгорания, охладителя). Эти значения находятся из расчета граничных условий на поверхностях охлаждающих каналов и на поверхностях лопатки. Конечно-разностная аппроксимация уравнений (1) – (4) осуществляется по апробированной неявной шеститочечной схеме, имеющей первый порядок по времени и второй порядок аппроксимации по пространственным переменным. Для этого выбираются в плоскости x, y основная прямоугольная сетка, изображенная сплошными линиями на рис. 1, и вспомогательная сетка, изображенная штриховыми линиями:

$$\begin{aligned} x &= i\Delta x_i, y = j\Delta y_j; i, j = 1, 2, \dots, \\ x &= (i+0,5)\Delta x_i, y = j\Delta y_j \\ x &= i\Delta x_i, y = (j+0,5)\Delta y_j; i, j = 1, 2, \dots, \end{aligned} \quad (11)$$

где i – номер расчетного сечения по оси x ; j – номер слоя по оси y .

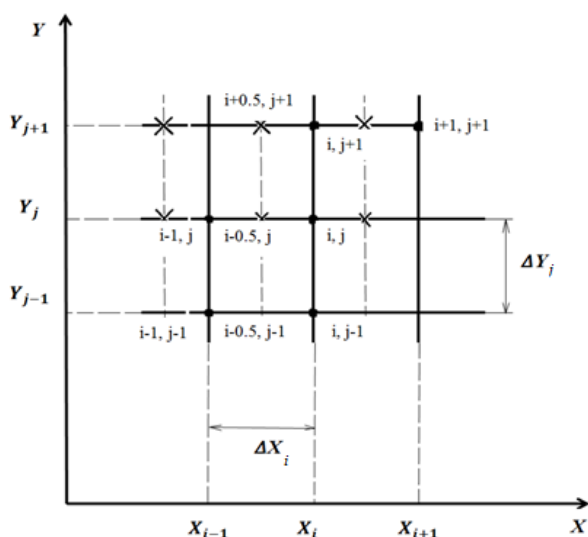


Рисунок 1 – Разностная сетка

Технически в расчетах лопатка разбивается на слои по высоте и для каждого слоя распределение коэффициентов теплоотдачи вдоль корыта и спинки лопатки определяются по результатам расчета двумерного пограничного слоя.

Пограничный слой разбивается по толщине и длине, при этом в тех областях, где градиент скорости течения в ней максимален, обеспечивается сгущение сетки. По координате y это пристеночная область. По координате x это области с большой кривизной поверхности лопатки. Выбор величин шагов Δt , Δx , Δy определяет сходимость, точность и устойчивость решения численной схемы. На рисунке 2 представлены алгоритмы программной реализации математического моделирования тепловой защиты лопаточного аппарата турбомашин.

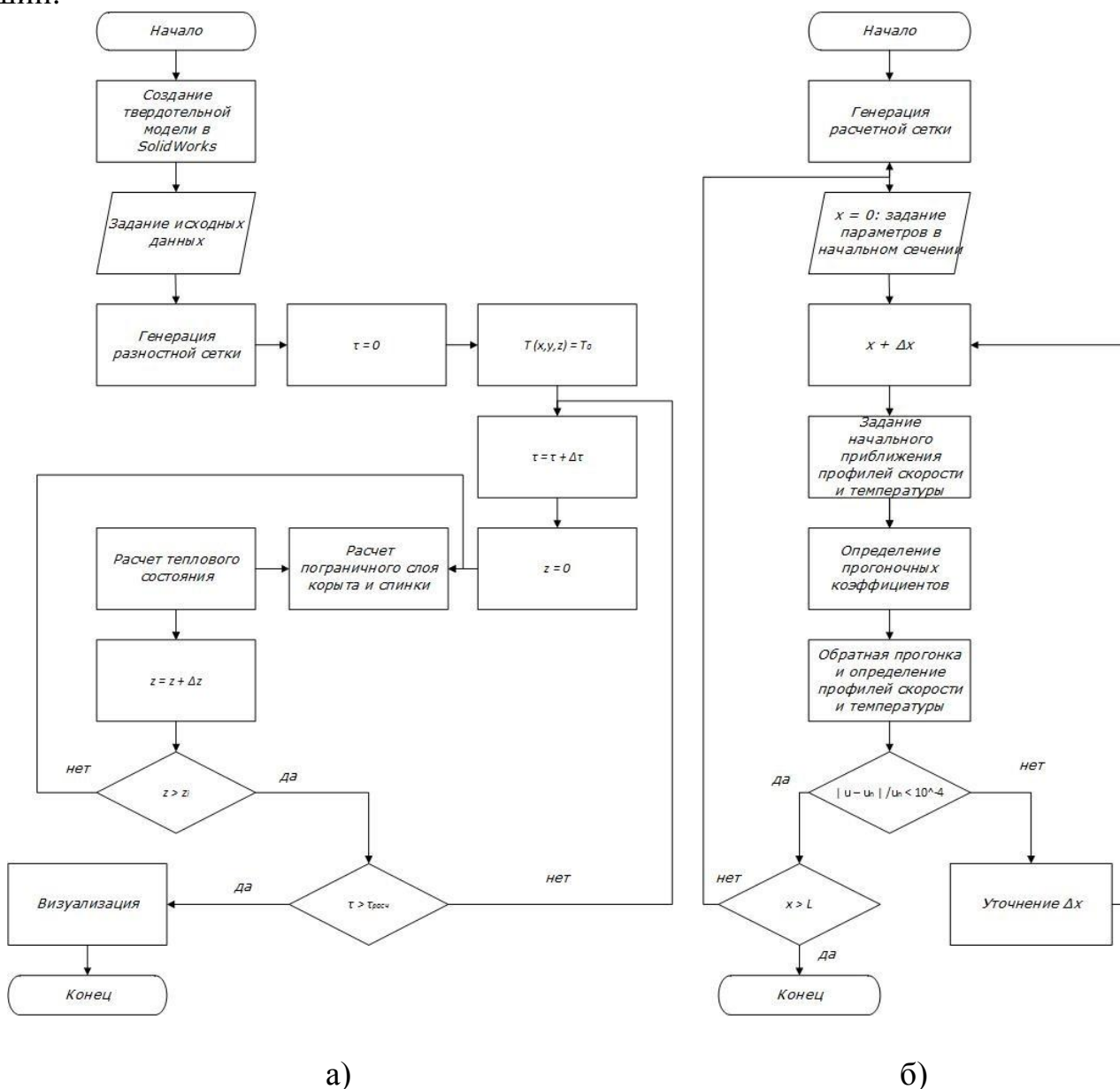


Рисунок 2 – Схема алгоритма определения теплового состояния лопатки (а) и расчета пограничного слоя (б)

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.

Таким образом, разработанная методика математического моделирования тепловых процессов в лопаточном аппарате состоит из следующих последовательно повторяемых этапов: 1 - для каждого сечения по высоте пера лопатки определяется распределение коэффициентов теплоотдачи вдоль корыта и спинки путем численного решения системы дифференциальных уравнений пограничного слоя с учетом начальных и граничных условий; 2 - полученные значения коэффициентов теплоотдачи подставляются в граничные условия и численно решается уравнение нестационарной теплопроводности; 3 - найденное распределение температуры стенки подставляется в дифференциальное уравнение теплоотдачи и уточняются значения коэффициентов теплоотдачи a_i и температуры стенки путем повторения этапов 1 и 2 до тех пор, пока значения этих параметров, подсчитанные на последовательных итерациях, не установятся с наперед заданной малой погрешностью.

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.

Четвертая глава посвящена созданию комплекса программ для анализа теплового состояния лопаток турбомашин и результатам исследования условий использования демпфирующих полостей и газодинамической температурной стратификации для эффективной тепловой защиты лопаточного аппарата турбомашин.

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. В отличие от известных пакетов, например *Ansys*, которые не могут задавать в исходных данных всей специфики теплообмена в турбомашинах, поскольку ориентированы на инженерный расчет, разработанный комплекс программ пригоден для расчета потоков с интенсивными воздействиями (факторы динамической нестационарности, градиенты давления, дисперсность рабочего тела). При этом погрешность численного эксперимента не превышала погрешности натурального эксперимента.

Структура комплекса программ представлена на рисунке 3.

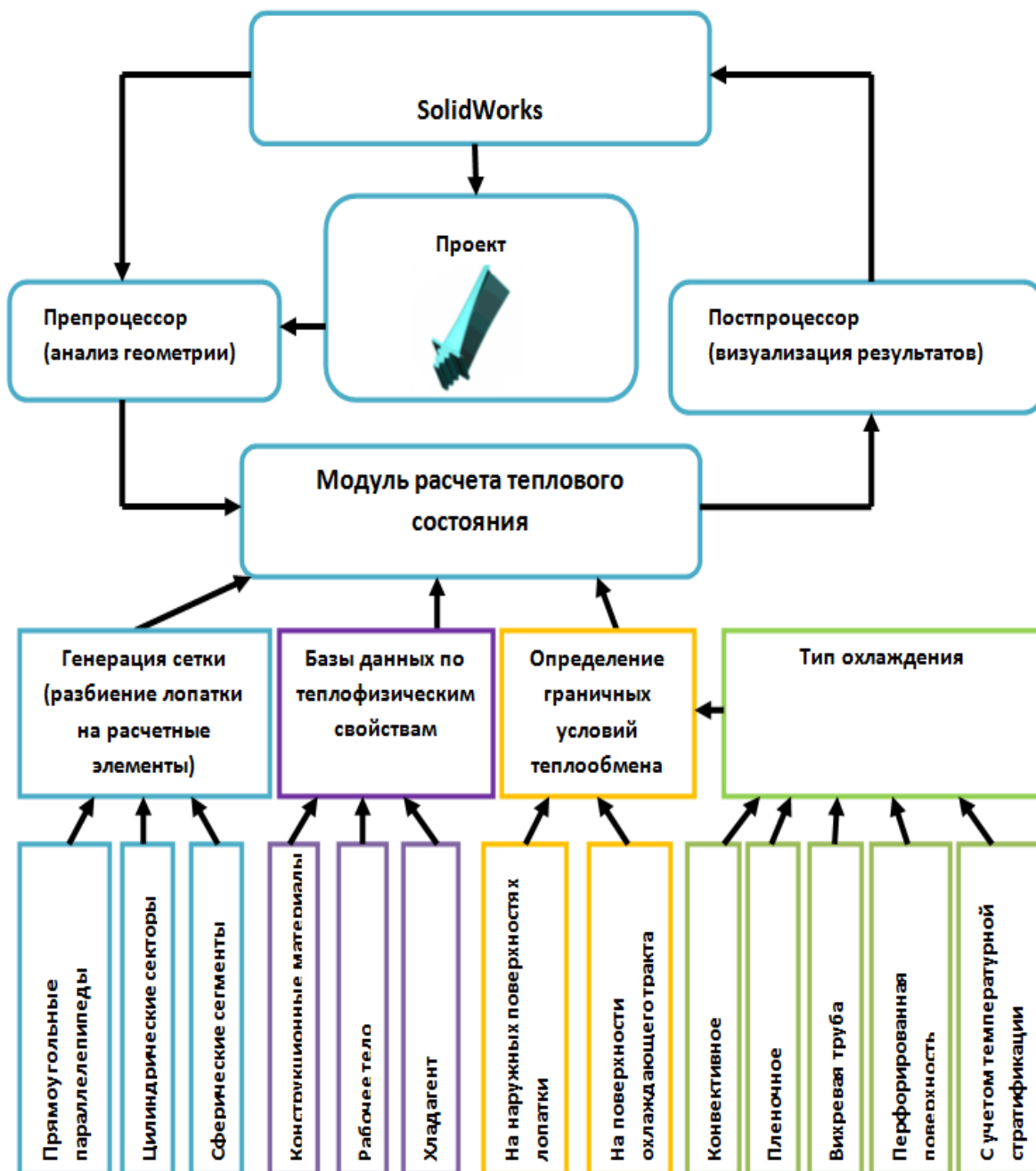


Рисунок 3 – Структура комплекса программ для анализа теплового состояния лопаток

Исследование с использованием разработанного комплекса программ проводилось в несколько этапов. Математическое моделирование охлаждения с применением перфорированных поверхностей спинки и корыта с демпфирующими полостями, некоторые результаты которого приведены на рисунке 4, показало, что за счет использования перфораций на поверхности и глухих демпфирующих полостей происходит повышение эффективности завесы без увеличения расхода охладителя.

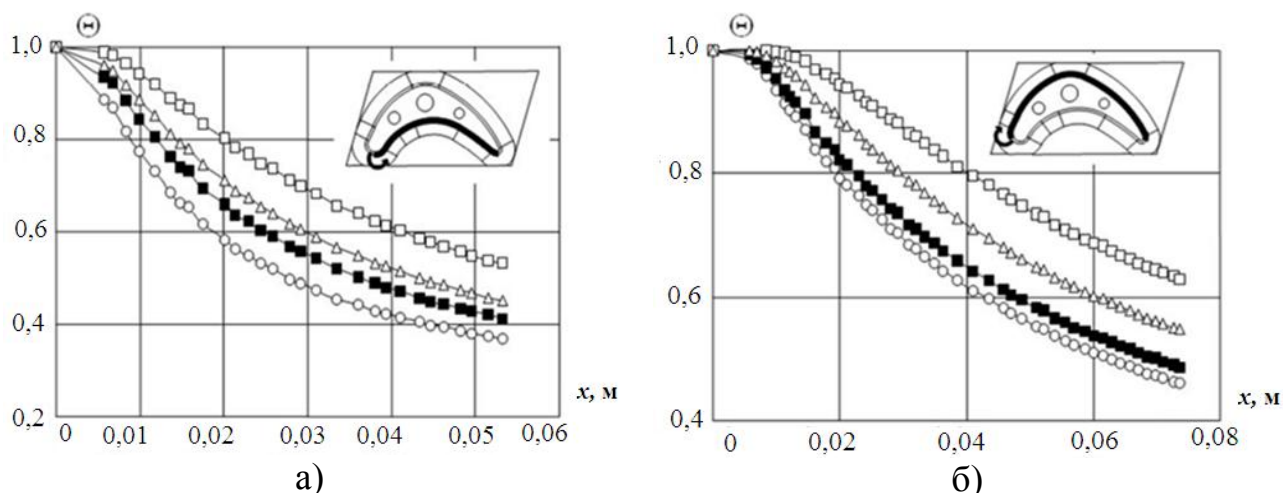


Рисунок 4 - Влияние относительной площади перфораций на изменение вдоль корыта (а) и спинки (б) лопатки эффективности пленочного охлаждения на перфорированной поверхности с демпфирующими полостями:

○ $\bar{f}=0$; ■ – 0,001; Δ – 0,0015; □ – 0,002

Далее исследован процесс газодинамической температурной стратификации в оригинальном устройстве с целью определения его эффективности и рациональной компоновки в газотурбинной установке. Исследование движения и теплообмена рабочего тела в трактах устройства газодинамической температурной стратификации и оценку эффективности стратификации проводилось по результатам численного моделирования по методике Цветовой Е.В. Применение техники охлаждения, основанной на применении газодинамической температурной стратификации обусловлено тем, что в дисперсном потоке в условиях направленного поперечного (инерционного) перемещения частиц в пограничном слое происходит интенсификация теплоотдачи.

Безразмерная плотность теплового потока \bar{q} , характеризующая эффективность газодинамической температурной стратификации, определяется параметрами, из которых четыре (γ , Pr , λ_1/λ_0 , R_1/R_0) являются связанными используемым рабочим телом. При этом особенным становится влияние числа M . При числах M больше 2,5 температура в пристеночном слое газа может достигать 575 К, что связано с переходом от обычно применяемых в авиационных конструкциях алюминиевых сплавов к более термостойким материалам. Это позволит избежать перегретых зон в теле лопатки, и сократить расход охлаждающего воздуха за счет снижения диаметров охлаждающих каналов.

Как видно из рисунка 5 наибольший эффект охлаждения дает создание эффективной завесы, но при использовании техники охлаждения, основанной на эффекте газодинамической температурной стратификации температура поверхности ниже, что позволяет избежать больших перепадов температур.

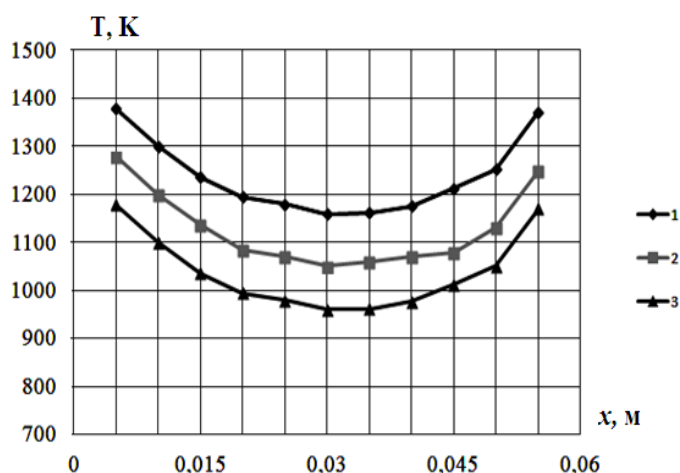


Рисунок 5 – Распределение температуры поверхности лопатки вдоль корыта при различных способах охлаждения:

1 – конвективное (без щелей);
 2 – с созданием завесы (10 щелей);
 3 – с применением газодинамической температурной стратификации.

Далее с использованием разработанного комплекса программ численно исследовались эффективность различных способов охлаждения, в том числе на перфорированных поверхностях корыта и спинки турбинной лопатки с глухими демпфирующими полостями при ее пленочном охлаждении. Температура охлаждаителя и его скорость выбрана совпадающей со скоростью основного потока на входе в турбинную решетку. Температура «торможения» основного потока задавалась равной 1500 К. В среднем сечении пера лопатки входная и выходная кромки прогреваются до 1425 К, в торце до 1433 К. При этом температура спинки и корыта ниже более чем на 100 К. Неравномерность прогрева лопатки, являющаяся существенным недостатком конвективно-заградительного охлаждения, существенно снижает срок ее эксплуатации. Наибольшее охлаждение достигается при совместном охлаждении рабочего тела и воздуха перед турбиной, но при этом происходит снижение КПД турбоустановки. Поэтому более рациональна схема, при которой реализуется подогрев рабочего тела в устройстве газодинамической температурной стратификации. На рисунке 6 приведена зависимость КПД от изменения температуры рабочего тела.

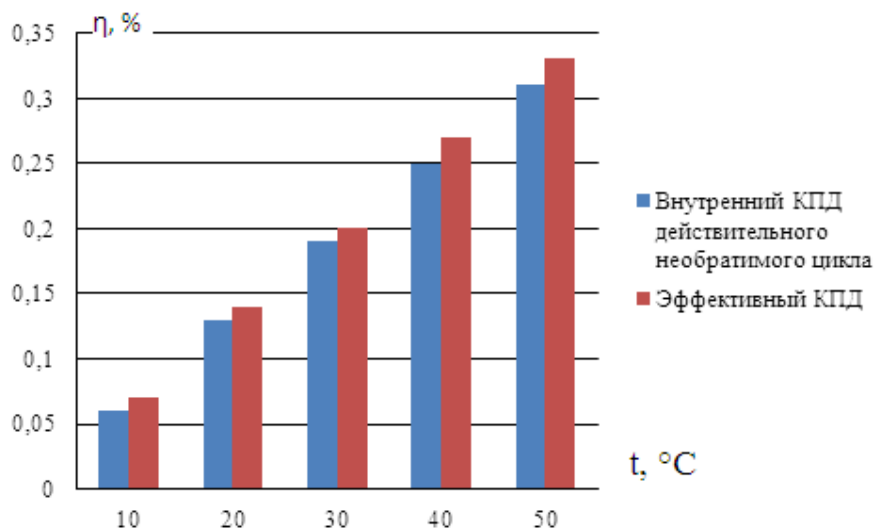


Рисунок 6 – Зависимость КПД от изменения температуры

Из рисунка 6 видно, что при возрастании температуры газа перед турбиной за счет использования устройства газодинамической температурной стратификации для его подогрева происходит увеличение КПД турбомашин. Данная схема реализована в техническом решении, защищенном патентом РФ на изобретение № 2557793.

ОСНОВНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ РАБОТЫ

1. Разработан метод математического моделирования тепловых процессов в лопаточном аппарате, обеспечивающий возможность учитывать газодинамическую обстановку в пограничных слоях межлопаточного пространства посредством сопряженного численного решения системы дифференциальных уравнений пограничного слоя и задачи нестационарной теплопроводности лопатки.

2. Проведено математическое моделирование тепловых процессов в лопаточном аппарате на основе сопряженного решения задачи теплопроводности лопатки и задачи пограничного слоя с учетом газодинамической обстановки, а именно при конвективном охлаждении лопатки турбомашин с использованием демпфирующих полостей, а также при использовании газодинамической температурной стратификации.

3. Разработаны методики численного расчета и алгоритмы программной реализации для математического моделирования тепловой защиты лопаточного аппарата, реализующие разработанный метод математического моделирования тепловых процессов и обеспечивающие заданную точность расчетов эффективности тепловой защиты лопаточного аппарата при сокращении вычислительных затрат.

4. Создан комплекс программ для моделирования и исследования посредством вычислительного эксперимента теплового состояния лопаток турбомашин при различных способах их тепловой защиты, обеспечивающий повышение результативности исследования.

5. Адекватность разработанных методов и комплекса программ для моделирования подтверждена удовлетворительным согласованием результатов вычислительного эксперимента с данными натурных экспериментов, полученными другими авторами.

6. Результаты моделирования и исследования различных способов охлаждения лопаток турбин, показали, что наилучшие результаты обеспечивает комбинированное конвективно-плёночное охлаждение, которое по сравнению с обычным охлаждением позволяет при сохранении параметров рабочего тела максимальную температуру лопатки уменьшить в 1,6 раза.

7. На основании численного моделирования установлено, что применение газодинамической температурной стратификации обеспечивает дополнительное охлаждение рабочих поверхностей лопатки более чем на 50°C. Наиболее перспективным является способ, при котором происходит подогрев рабо-

чего тела в устройстве газодинамической температурной стратификации, что позволяет повысить КПД турбоустановки на 0,33 % при повышении температуры рабочего тела на 50 °С и сократить неравномерность распределения температуры по телу лопатки.

ОСНОВНЫЕ ПУБЛИКАЦИИ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ

Публикации в изданиях, рекомендованных ВАК РФ

1. Ковальногов В.Н., Федоров Р.В., Генералов Д.А. Исследование теплового состояния лопаток турбомашин с помощью программно-информационного комплекса // Известия МГТУ «МАМИ», 2014. – №4 (22). – Т.1. – С. 27-32.

2. Федоров Р.В., Генералов Д.А., Корнилова М.И. Математическое моделирование и численный анализ теплового состояния лопаток турбомашин, обтекаемых сверхзвуковым дисперсным потоком // Автоматизация процессов управления, 2014. – №4(38). – С.55-60.

Публикации в изданиях, включенных в базы Scopus и WoS

3. Vladislav N. Kovalnogov, Ruslan V. Fedorov, Dmitry A. Generalov, Yury A. Khakhalev, and Aleksandr A. Zolotov. Numerical research of turbulent boundary layer based on the fractal dimension of pressure fluctuations // AIP Conference Proceedings 1738, 480004 (2016); doi: 10.1063/1.4952240

4. Vladislav N. Kovalnogov, Ruslan V. Fedorov, and Dmitry A. Generalov. Modeling, research and development the technology of cooling of turbine engine blades // AIP Conference Proceedings, 1648, 850032 (2015); doi: 10.1063/1.4913087.

5. Kovalnogov V.N., Fedorov R.V., Generalov D.A. Modeling and Development of Cooling Technology of Turbine Engine Blades // International Review of Mechanical Engineering, 2015. – Vol. 9. – N. 4. – P.331-335; doi: 10.15866/ireme.v9i4.5740.

Публикации в других изданиях

6. Генералов Д.А., Магазинник К.М., Сагитова К.Р. Теплоотдача и сопротивление трения в соплах Лавалья и на плоской пластине // Энергетика, экология, химия: сб. студ. науч. работ. – Ульяновск: УлГТУ, 2011. – С.113-114.

7. Генералов Д.А. Тепловая защита лопаток турбомашин // Вузовская наука в современных условиях: сб. материалов 47-й науч.-техн. конф. – Ульяновск: УлГТУ, 2013. – Ч.1. – С. 44-47.

8. Ковальногов В.Н., Федоров Р.В., Генералов Д.А. Разработка способов тепловой защиты турбинных лопаток на основе вычислительного эксперимента в среде turboworks // Промышленная теплотехника, 2013. – Т. 35. – №7.– С. 71-74.

9. Ковальногов В.Н., Генералов Д.А. Исследование теплового состояния лопаток турбомашин с помощью программно-информационного комплекса //

IX Школа-семинар по проблемам тепломассообмена и гидродинамики в энергомашиностроении. – Казань: КГЭУ, 2014. – С. 227-231.

10. Ковальногов В.Н., Генералов Д.А. Исследование теплового состояния лопаток турбомашин // Шестая Российская национальная конференция по теплообмену. – Т. 3. – С. 181-182.

11. Ковальногов В.Н., Федоров Р.В., Генералов Д.А., Золотов А.Н. Моделирование эффективности тепловой защиты лопаток газотурбинной установки // Проблемы газодинамики и тепломассообмена в энергетических установках: (XX Школа-семинар молодых ученых и специалистов под руководством акад. РАН А.И. Леонтьева). – М.: Издательский дом МЭИ, 2015. – С. 255-256.

12. Генералов Д.А., Золотов А.Н. Разработка программно-информационного комплекса для моделирования и исследования теплового состояния лопаток турбин / Молодежный инновационный форум Приволжского федерального округа. – Ульяновск: УлГТУ, 2015. – С. 131-134.

13. Ковальногов В.Н., Федоров Р.В., Генералов Д.А. Разработка эффективных способов повышения экономичности газовых турбин // IX Семинар ВУЗов по теплофизике и энергетике: сборник материалов докладов. – Казань: КГЭУ, 2015. – Т. IV. – С. 29-35.

14. Генералов Д.А. Способы охлаждения лопаток авиационных газотурбинных двигателей // Гражданская авиация: XXI век. – Ульяновск: УВАУ-ГА, 2015. – С. 186-187.

15. Генералов Д.А., Золотов А.Н. Разработка программно-информационного комплекса для исследования теплового состояния лопаток турбомашин и отработки технологий их тепловой защиты / Сборник тезисов участников форума «Наука будущего – наука молодых». – Севастополь, 2015. – Т. 1. – С. 90-92.

Патенты и свидетельства о регистрации программных продуктов

16. Газотурбинный двигатель [Текст]: пат. 2557793 РФ: (51) МПК F02C 3/20 (2006.01), F02C 3/34 (2006.01)/ Ковальногов В.Н., Генералов Д.А., Школин Е.В.; заявитель и патентообладатель Ульяновский государственный технический университет. – № 2014110128/06; заявл. 14.03.2014; опубл. 27.07.2015. Бюл. № 21. – 6 с.

17. Генералов Д.А., Ковальногов В.Н., Федоров Р.В. Программа для расчета теплового состояния лопаток турбомашин / Свидетельство о государственной регистрации программ для ЭВМ № 2014616247 от 18.06.2014.