

На правах рукописи



ЧУКАЛИН АНДРЕЙ ВАЛЕНТИНОВИЧ

**МАТЕМАТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ
ТЕПЛОВЫХ И ТУРБУЛЕНТНЫХ ПРОЦЕССОВ
НА ТЕПЛОАГРУЖЕННЫХ ПОВЕРХНОСТЯХ
С ПОЛУСФЕРИЧЕСКИМИ ДЕМПФИРУЮЩИМИ
ПОЛОСТЯМИ В ЭНЕРГЕТИЧЕСКИХ УСТАНОВКАХ**

Специальность 05.13.18 - Математическое моделирование,
численные методы и комплексы программ

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание учёной степени
кандидата технических наук

Пенза – 2019

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

Научный руководитель: доктор технических наук, доцент
Ковальногов Владислав Николаевич

Официальные оппоненты: **Щукин Андрей Викторович**
доктор технических наук, профессор, ФГБОУ
ВО «Казанский национальный исследователь-
ский университет им. А.Н. Туполева – КАИ»,
профессор кафедры «Теплотехника и энергетиче-
ское машиностроение»

Гарькина Ирина Александровна
доктор технических наук, профессор, ФГБОУ
ВО «Пензенский государственный университет
архитектуры и строительства», профессор ка-
федры «Математика и математическое модели-
рование»

Ведущая организация: ФГБОУ ВО «Казанский государственный энер-
гетический университет»

Защита состоится «18» июня 2019 г., в 14 часов, на заседании диссертационного совета Д 212.337.01 на базе ФГБОУ ВО «Пензенский государственный техно-
логический университет» по адресу: 440039, г. Пенза, пр. Байдукова /
ул. Гагарина, д. 1а/11, корпус 1, конференц-зал.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке ФГБОУ ВО «Пензенский
государственный технологический университет» и на сайте www.penzgtu.ru.

Автореферат разослан «6» мая 2019 г.

Ученый секретарь
диссертационного совета



Чулков Валерий Александрович

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы. Одним из основных способов достижения улучшенных технических характеристик современных и перспективных энергетических установок является повышение эксплуатационных параметров (температуры и давления) рабочего тела, что в свою очередь требует совершенствования существующих и разработки новых технических решений, направленных на обеспечение эффективной тепловой защиты элементов энергетических установок.

Значительные резервы повышения эффективности тепловой защиты энергетических установок связаны с оптимизацией процессов в пограничном слое рабочей среды с целью снижения турбулентных пульсаций и уменьшения турбулентного переноса. Последние десятилетия многие авторы акцентируют своё внимание на системах, способных эффективно управлять турбулентным переносом в пограничном слое. Однако на сегодняшний день удовлетворительного решения этой проблемы не получено: часть технических решений, направленных на снижение сопротивления трения, затруднительно применить за пределами лаборатории, надёжность других методов официально не подтверждена, а для некоторых решений отсутствуют подтверждающие эффективность применения количественные данные. Сдерживающим фактором для решения проблемы является отсутствие моделей турбулентного переноса, адекватно отражающих реакцию турбулентности на управляющие воздействия. В Ульяновском государственном техническом университете под руководством профессора Н.Н. Ковальногова выполнен комплекс работ по созданию теоретических основ моделирования процессов в пограничном слое, что обеспечивает целенаправленный поиск наилучших решений на основе предварительного расчётно-теоретического анализа и выявление путей снижения турбулентности потока около перфорированных поверхностей с демпфирующими полостями. Количественные параметры управления интенсивностью обменных процессов, а также значения эмпирических коэффициентов в применяемых моделях при этом определяются путем эксперимента.

Работа посвящена исследованию и разработке метода математического моделирования тепловых и турбулентных процессов в пограничном слое, а также определению эффективности тепловой защиты поверхностей при использовании полусферических демпфирующих полостей, в том числе в дисперсных потоках.

Тема диссертации соответствует приоритету п. 20, б «Стратегии научно-технологического развития Российской Федерации» (утверждена Указом Президента Российской Федерации от 01.12.2016, № 642) и напрямую связана с реализацией п. 8 «Приоритетных направлений развития науки, технологий и

техники в Российской Федерации» и п. 26 «Перечня критических технологий Российской Федерации» (утверждены 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.

Объектом исследования являются теплонагруженные поверхности энергетических установок и методы их тепловой защиты, основанные на использовании полусферических демпфирующих полостей.

Предметом исследования являются обменные процессы в пограничном слое, формирующемся на теплонагруженных поверхностях энергоустановок, и воздействие полусферических демпфирующих полостей на их интенсивность.

Цель работы – повышение эффективности тепловой защиты теплонагруженных поверхностей энергетических установок с полусферическими демпфирующими полостями путем отработки конструкции на основе математического моделирования тепловых и турбулентных процессов.

Для достижения этой цели решаются **следующие задачи**.

1. Разработка метода математического моделирования для исследования интенсивности турбулентного переноса на поверхности с полусферическими демпфирующими полостями в однородных и дисперсных потоках, основанного на сопряжённом решении системы дифференциальных уравнений пограничного слоя.

2. Разработка численного метода решения системы дифференциальных уравнений пограничного слоя для моделирования тепловых и турбулентных процессов в пограничном слое на теплонагруженных поверхностях с полусферическими демпфирующими полостями.

3. Разработка комплекса программ для исследования тепловых и турбулентных процессов в пограничном слое, а также оценки эффективности тепловой защиты теплонагруженных поверхностей с полусферическими демпфирующими полостями при обтекании поверхностей однородными и дисперсными потоками.

4. Выполнение компьютерного исследования тепловых и турбулентных процессов в пограничном слое, определение показателей эффективности тепловой защиты энергетической установки, оборудованной полусферическими

демпфирующими полостями на теплонагруженных поверхностях при их обтекании, в том числе дисперсными потоками.

Методы исследования. Работа реализована с использованием современных методов исследования, базирующихся на фундаментальных основах математического анализа, математического моделирования и численных методов решения уравнений, теории тепломассообмена, газодинамики и пограничного слоя.

Научная новизна заключается в следующем.

1. Разработан метод математического моделирования турбулентного переноса в пограничном слое при обтекании поверхности однородными и дисперсными потоками, отличающийся учётом показателей турбулентного переноса при наличии полусферических демпфирующих полостей, что позволяет количественно оценить эффективность их применения.

2. Разработан численный метод решения системы дифференциальных уравнений пограничного слоя, отличающийся адаптивным выбором ширины полосы интегрирования и шага разностной сетки в зависимости от актуальных толщин теплового и динамического пограничного слоя, что обеспечивает сходимость и устойчивость решения и позволяет повысить точность моделирования тепловых и турбулентных процессов в пограничном слое на теплонагруженных поверхностях с полусферическими демпфирующими полостями.

3. Создан комплекс программ для исследования пограничного слоя, а также оценки эффективности тепловой защиты поверхностей, включающий в себя методику моделирования турбулентного переноса, алгоритм и процедуры численного исследования тепловых и динамических характеристик пограничного слоя и позволяющий моделировать пограничный слой на теплонагруженных поверхностях с полусферическими демпфирующими полостями.

4. Получены новые результаты исследования тепловых и турбулентных процессов в пограничном слое, оценки эффективности тепловой защиты поверхности с применением полусферических демпфирующих полостей, в том числе при обтекании поверхностей дисперсными потоками, позволяющие выработать рекомендации по улучшению тепловой защиты и повышению срока службы энергоустановок.

Практическая значимость работы заключается в создании комплекса программ для исследования пограничного слоя на поверхностях с полусферическими демпфирующими полостями, возникающего в высокоскоростных дисперсных потоках с градиентным полем температуры, применение которого дает возможность повысить эффективность тепловой защиты поверхности. Разработаны технические решения, направленные на повышение эффективности плё-

ночного охлаждения поверхности (патент РФ № 173450) и эффективное управление турбулентным переносом в пограничном слое (патент РФ № 186044).

Достоверность полученных результатов подтверждена сопоставлением полученных расчётных данных с результатами натурных экспериментов, а также данными, полученными другими авторами, и тестированием программного комплекса. Аутентичность численных расчётов обеспечивается применением адекватного (подтвержденного экспериментальными результатами) математического моделирования процесса турбулентного переноса, использованием апробированной разностной схемы, выбором сетки, обеспечивающей требуемую точность, анализом погрешности вычислений.

Основные положения, выносимые на защиту:

1. Метод математического моделирования турбулентного переноса в однородном и дисперсном пограничном слое энергетических установок, основанный на сопряжённом решении системы дифференциальных уравнений пограничного слоя и учитывающий воздействие полусферических демпфирующих полостей.

2. Численный метод решения системы дифференциальных уравнений пограничного слоя с адаптивным выбором ширины полосы интегрирования и шагов разностной сетки в зависимости от актуальных толщин теплового и динамического пограничного слоя энергетических установок.

3. Комплекс программ для моделирования и исследования эффективных систем тепловой защиты поверхностей с применением полусферических демпфирующих полостей, обтекаемых высокоскоростными дисперсными потоками.

4. Результаты исследования тепловых и турбулентных процессов в пограничном слое и оценки эффективности тепловой защиты поверхности с применением полусферических демпфирующих полостей в энергетических установках, в том числе при обтекании поверхностей дисперсными потоками, полученные в ходе вычислительного эксперимента с применением разработанного комплекса программ.

Реализация результатов работы. Исследования поддержаны Стипендией Президента Российской Федерации для молодых учёных и аспирантов, осуществляющих перспективные научные исследования и разработки по приоритетным направлениям модернизации российской экономики (проект СП-2069.2018.1 «Исследование и разработка технологии по управлению интенсивностью обменных процессов в турбулентном пограничном слое»), а также грантом Российского фонда фундаментальных исследований в рамках проекта № 16-38-60114 мол_а_дк «Разработка эффективных систем тепловой защиты поверхностей, обтекаемых высокоскоростными дисперсными потоками». Отдельные результаты получены при финансовой поддержке грантами Президен-

та Российской Федерации (проект МД-1576.2014.8) и РФФИ (проект № 15-48-02275-p_a).

Разработанный программный комплекс и методические рекомендации по исследованию обменных процессов в пограничном слое с температурным градиентом при обтекании поверхностей высокоскоростными дисперсными потоками используются в Ульяновской ТЭЦ-1 филиала «Ульяновский» ПАО «Т Плюс» при эксплуатации энергетического оборудования, а также в учебной деятельности Ульяновского государственного технического университета.

Апробация работы. Основные результаты исследования доложены на XV Минском международном форуме по тепло- и массообмену (Белоруссия, Минск, 2016 г.), XXI Школе-семинаре молодых ученых и специалистов под руководством академика РАН А.И. Леонтьева «Проблемы газодинамики и тепло-массообмена в энергетических установках» (Санкт-Петербург, 2017), на 14-й и 15-й международных конференциях по численному анализу и прикладной математике ICNAAM (Греция, Родос, 2016 и 2018 г., Салоники, 2017 г.), X школе-семинаре молодых учёных и специалистов академика РАН В.Е. Алемасова «Проблемы тепломассообмена и гидродинамики в энергомашиностроении» (Казань, 2016 г.), V молодёжном инновационном форуме (Ульяновск, 2016 г.), VII и X международных молодёжных научных конференциях «Гражданская авиация: XXI век» (Ульяновск, 2016 и 2018 гг.), ежегодных отчётных научно-технических конференциях Ульяновского государственного технического университета и научно-технических семинарах кафедры «Тепловая и топливная энергетика» в 2016 – 2017 г.г., седьмой Российской национальной конференции по теплообмену (Москва, 2018).

Публикации. По теме диссертации опубликована 21 работа, в том числе 8 статей в ведущих рецензируемых изданиях (из них 4 в зарубежных журналах, индексируемых в наукометрических базах Web of Science и Scopus, и 4 статьи в ведущем российском журнале из Перечня ВАК), получены 2 патента на полезные модели и 1 свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ.

Личный вклад автора. Все работы по теме диссертации осуществлены автором лично или при его основном участии: постановка задачи, выбор и разработка метода решения, проведение натурного эксперимента, разработка программного комплекса, проведение расчётов, обработка и обобщение полученных результатов, формирование выводов и заключения.

Структура и объем диссертации. Диссертация состоит из введения, четырёх глав, заключения, списка литературы (108 источников) и 4-х приложений, включает 163 страницы машинописного текста, 68 рисунков и 5 таблиц.

СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении раскрыта актуальность темы диссертации, приведены аргументы, 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 проведена оценка научно-технического уровня проработки проблемы прогнозирования и повышения эффективности тепловой защиты теплонагруженных элементов энергетических установок на основе анализа научно-технической литературы и патентной информации. Рассмотрены способы и особенности демпфирующих воздействий на турбулентный пограничный слой рабочего тела около теплонагруженных поверхностей. Проведён обзор математических моделей и методов численного анализа турбулентного переноса в пограничном слое, определены основные проблемы и особенности моделирования эффективности тепловой защиты поверхностей с демпфирующими полостями.

По результатам изучения научно-технической и патентной информации по теме диссертации сформулированы выводы.

1. Исследованию пограничного слоя с воздействиями посвящено множество работ, авторы которых внесли значительный вклад в развитие теории: А.Ю. Вараксин, Э.П. Волчков, Ю.Ф. Гортышов, М.Е. Дейч, Н.Н. Ковальногов, В.М. Кулик, А.И. Леонтьев, Ю.Г. Назмеев, В.Н. Попов, А.С. Якимов, R.H. Shoulberg, J.F. Hill, M.A. Rivas, T. Cebeci, G.A. Crocco, C.C. Pappas, T. Tendeland, H. Schlichting. В литературе подробно исследовано влияние активных и пассивных способов управления пограничным слоем, а также особенности воздействия дисперсной фазы на поток рабочего тела в энергетических установках.

2. В рассмотренных работах представлены способы управления пограничным слоем и методы математического моделирования, позволяющие описать течения в пограничном слое при внешних воздействиях на него. Многие из способов управления нашли широкое применение в технике: в одних случаях благодаря возможности моделирования пограничного слоя, в других – благодаря широкой базе экспериментальных данных о функциональных возможностях способов управления. Работы, посвящённые исследованию эффективности воздействия полусферических демпфирующих полостей на обменные процессы, протекающие в пограничном слое в условиях температурного градиента, отсутствуют.

3. Математическое моделирование является наиболее эффективным инструментом для изучения обменных процессов, протекающих на поверхности с полусферическими демпфирующими полостями. Однако моделирование пото-

ков, взаимодействующих с полусферическими демпфирующими полостями, сопряжено с необходимостью преодоления сложностей и противоречий, связанных с математическим описанием процессов турбулентного обмена.

По результатам анализа научно-технической информации сформулированы цель, задачи, объект и предмет исследования, представленные выше.

Вторая глава посвящена математическому моделированию турбулентного пограничного слоя при обтекании поверхности с демпфирующими полостями полусферической формы, обеспечивающему возможность прогнозирования в вычислительном эксперименте эффективности тепловой защиты поверхности.

Эффективность тепловой защиты определяется формулой:

$$\Theta = (T_r - T_{adw}) / (T_r - T_{w0}) \quad , \quad (1)$$

где T_r – температура поверхности при отсутствии охлаждения (температура “восстановления” потока), К; T_{adw} – адиабатная температура стенки, К; T_{w0} – температура поверхности в начальной точке за охладителем, К.

Система уравнений, отражающая процессы движения и теплообмена дисперсного потока с воздействиями, представляется в виде:

– дифференциального уравнения энергии:

$$\left(u \frac{\partial T}{\partial x} + v \frac{\partial T}{\partial y}\right) \rho c_p = \frac{\partial}{\partial y} \left[(\lambda + \lambda_T) \frac{\partial T}{\partial y} \right] + (\mu + \mu_T) \left(\frac{\partial u}{\partial y} \right)^2 + u \frac{dp}{dx} + q_v; \quad (2)$$

– дифференциального уравнения движения:

$$\left(u \frac{\partial u}{\partial x} + v \frac{\partial u}{\partial y}\right) \rho = - \frac{\partial p}{\partial x} + \frac{\partial}{\partial y} \left[(\mu + \mu_T) \frac{\partial u}{\partial y} \right] + s_v; \quad (3)$$

– дифференциального уравнения неразрывности:

$$\frac{\partial(\rho u)}{\partial x} + \frac{\partial(\rho v)}{\partial y} = 0; \quad (4)$$

– уравнения состояния:

$$\rho = p / RT \quad , \quad (5)$$

где T – термодинамическая температура потока (К); u – продольная составляющая скорости (м/с); x – продольная координата (м); v – поперечная составляющая скорости (м/с); y – поперечная координата (м); ρ – плотность (кг/м³); c_p – удельная изобарная теплоёмкость (Дж/(кг·К)); λ – коэффициент теплопроводности (Вт/(м·К)); λ_T – коэффициент турбулентного переноса теплоты (Вт/(м·К)); μ – динамический коэффициент вязкости (Па·с); μ_T – коэффициент турбулентного переноса количества движения (Па·с); q_v – величина, характеризующая интенсивность внутренних источников теплоты, (Вт/м³); s_v – величина, характеризующая интенсивность внутренних источников количества движения (Н/м³); p – давление потока (Па); R – газовая постоянная (Дж/(кг·К)).

Для моделирования дисперсного потока газа с учетом его особенностей необходимо учитывать интенсивность внутренних источников теплоты q_v и количества движения s_v применительно к дисперсному пограничному слою:

$$s_v = \frac{0,75\rho_s\rho c_{fs}}{\rho_g d_s} |u_s - u| (u_s - u); \quad (6)$$

$$q_v = \frac{6\alpha_s\rho_s}{\rho_g d_s} (T_s - T), \quad (7)$$

где ρ_s – плотность конденсированной фазы (масса частиц, в единице объема среды) кг/м^3 ; α_s, c_{fs} – коэффициент теплоотдачи, $\text{Вт/(м}^2\cdot\text{К)}$, и коэффициент сопротивления частиц дисперсной среды; ρ_g – плотность вещества частиц, кг/м^3 ; d_s – диаметр частиц, м; u_s, T_s – скорость (м/с) и температура частиц, К.

Граничные и начальные условия для изолированной стенки и определения температуры восстановления потока T_r :

$$u = u_0(x, y); T = T_0(x, y); p = p_0; \quad (8)$$

$$y = 0; u = 0; dT/dy = 0; \quad (9)$$

$$y = \infty; du/dy = 0; dT/dy = 0. \quad (10)$$

При условии неизолированной стенки граничные условия для определения адиабатной температуры стенки T_{adw} имеют вид:

$$x=0\dots l, y=0; u=0; v=v_w(x); T=T_w(x); \quad (11)$$

$$x=l\dots\infty, y=0; u=0; v=0; \partial T/\partial y=0, \quad (12)$$

где значения скорости v_w и термодинамической температуры в ядре потока T_w полагаются известными.

Давление p , скорость u_∞ и температура T_∞ за пределами пограничного слоя определяются в результате расчета невязкого идеального течения в ядре потока.

Для замыкания системы уравнений (2) – (5) коэффициенты турбулентного переноса количества движения μ_T и теплоты λ_T определялись на основе модифицированной модели пути смешения Прандтля:

$$\mu_T = \rho l^2 \partial u / \partial y; \quad \lambda_T = \mu_T c_p / Pr_T, \quad (13)$$

где c_p – удельная изобарная теплоёмкость; Pr_T – число Прандтля; l – длина пути смешения, м.

$$l = \alpha y [1 - \exp(-\rho v_* y / 26\mu)]. \quad (14)$$

Здесь α – коэффициент, отображающий интенсивность турбулентного переноса количества движения в пограничном слое; $v_* = \sqrt{\tau_w / \rho}$ – динамическая скорость в рассматриваемой точке, м/с.

Коэффициент α , в рамках классической модели пути смешения Прандтля, является величиной постоянной ($\alpha = \alpha_0 = 0,4$), но при воздействиях на погра-

нический коэффициент может значительно изменяться. В работе предложена методика моделирования турбулентного переноса, позволяющая рассчитать коэффициент α в пограничном слое в условиях нестационарности, обусловленной ускорением потока в вязком подслое за счёт демпфирования энергии турбулентных вихрей на поверхности посредством полусферических демпфирующих полостей:

$$\frac{\alpha}{\alpha_0} = \sqrt{\frac{1 - 8,4 \cdot 10^5 A_v^* \bar{f}^2 \exp(1-n)}{1 + 21,4 \frac{u_\infty du_\infty/dx}{u_0 (du/dy)_{y=0}}}}. \quad (15)$$

где A_v^* – эмпирический коэффициент, характеризующий воздействие полусферических демпфирующих в зависимости от объёма полости; $\bar{f}$ – относительная площадь перфорации; n – количество перфорационных отверстий; u_0 – масштабное значение скорости (скорость в исходном сечении), м/с; u_∞ – скорость на внешней границе пограничного слоя, м/с.

Математическое моделирование турбулентного переноса позволяет исследовать воздействие полусферических демпфирующих полостей на обменные процессы, протекающие в высокоскоростном, тепловом пограничном слое с учётом качественных характеристик полостей.

В третьей главе представлены численный метод и алгоритмы моделирования обменных процессов в пограничном слое и эффективности тепловой защиты теплонагруженных поверхностей с применением полусферических демпфирующих полостей. Для решения системы дифференциальных уравнений пограничного слоя (2) – (4) использовался метод конечных разностей. В ходе анализа различных разностных схем для решения системы уравнений пограничного слоя определена неявная 6-точечная разностная схема 2-го порядка аппроксимации по пространственным переменным, исходя из условий затрат машинного времени и точности результатов расчёта. Расчёт параметров пограничного слоя и определение эффективности тепловой защиты поверхности с полусферическими демпфирующими полостями производится по алгоритму рис. 1. Численный метод реализуется в ходе четырёх этапов: первым этапом вводится сетка и все производные уравнения с начальными и граничными условиями заменяются алгебраическими комбинациями в виде разностных схем; вторым этапом решаются полученные уравнения методом прогонки и определяются коэффициенты турбулентного переноса μ_T , λ_T и теплофизические свойства потока ρ , c_p , λ , μ . Метод прогонки является наиболее удобным и экономичным по отношению к требуемой мощности компьютера, кроме того метод не позволяет в процессе вычислений накапливать ошибки округления. На третьем этапе определяется плотность массового потока ρv и поперечная скорость v . Четвёртым этапом идёт расчёт локальных и интегральных характери-

стик пограничного слоя Cf, St, H, T_r, Θ и т.д. в каждом сечении x вдоль рассматриваемой поверхности. Особенностью рассматриваемой задачи является необходимость ограничения и уточнения шагов сетки интегрирования, что связано с различием толщин теплового и динамического пограничных слоёв и градиентов скорости и температуры в пограничном слое, осложнённых воздействием полусферических демпфирующих полостей.

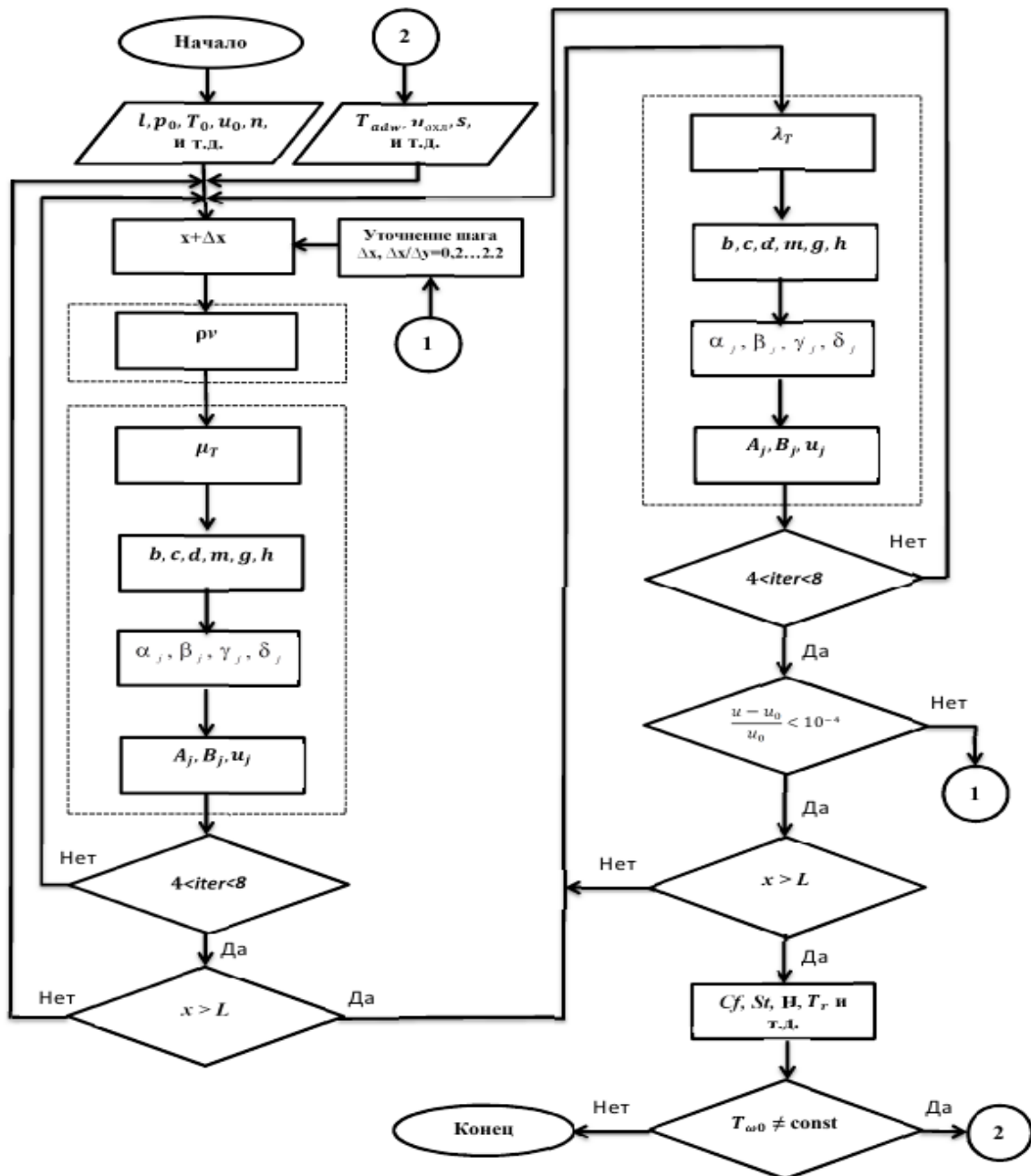


Рисунок 1 – Схема алгоритма расчёта обменных процессов в пограничном слое

Большие градиенты продольной скорости вблизи стенки на теплоизолированном участке требуют использования мелкой сетки, чтобы уменьшить погрешность аппроксимации дифференциальных операторов разностными. Ма-

лые градиенты температуры одновременно требуют использования крупной сетки, чтобы уменьшить погрешности округления при вычислении производных по поперечной координате. Эти же парадоксальные требования к параметрам сетки распространяются на участок формирования завесы и адиабатный участок. С целью повышения точности расчётов и сходимости итерационного процесса предусмотрен адаптивный выбор ширины полосы интегрирования и шагов разностной сетки в зависимости от текущей толщины пограничного слоя.

В ходе серии методических расчётов определены оптимальные характеристики сетки: ширина полосы интегрирования для всех условий – не менее 175%, относительно пограничного слоя; изменение шага интегрирования Δx в зависимости от количества итераций N : для условия $N < 4$ шаг увеличивается в два раза; для условия $N > 8$ шаг уменьшается в два раза. Причём ограничение размера шага интегрирования Δx происходит по условию $\Delta x / \Delta y_{\min} = 0,2 \dots 2,2$, где $\Delta y_{\min}$ – минимальный шаг в поперечном направлении, $\Delta y_{\min} = 20$.

В четвёртой главе представлен разработанный комплекс программ для исследования обменных процессов в пограничном слое и систем тепловой защиты поверхностей, подверженных обтеканию высокоскоростными дисперсными потоками газов. Приведены результаты тестовых расчётов и результаты численного исследования эффективности тепловой защиты поверхности, содержащей демпфирующие полости полусферической формы, обтекаемой высокоскоростным дисперсным потоком.

Метод математического моделирования пограничного слоя совместно с вышеизложенным численным методом расчета пограничного слоя реализован в компьютерной программе, составленной на алгоритмическом языке C++ (свидетельство № 2017661244). Программа предназначена для моделирования и исследования систем тепловой защиты поверхностей, подверженных обтеканию высокоскоростными дисперсными потоками газов, и позволяет определить эффективность тепловой защиты с применением полусферических демпфирующих полостей, а также изучить обменные процессы, протекающие при условиях температурного градиента.

Тестирование комплекса программ выполнялось путём сопоставления данных с результатами натурного эксперимента, а также с данными Э.П. Волчкова по эффективности тепловой защиты поверхности. Относительные погрешности рассчитываемых показателей не превышают $\pm 4\%$.

Условия эксперимента: $u_0 = 21,4$ м/с; $V = 0,575$ см³ – объём полусферической полости; $l = 0,75$ м; $T = 295$ К; $\bar{f} = 0,02$. На рис.2 представлено сопоставление данных по профилям скорости в пограничном слое.

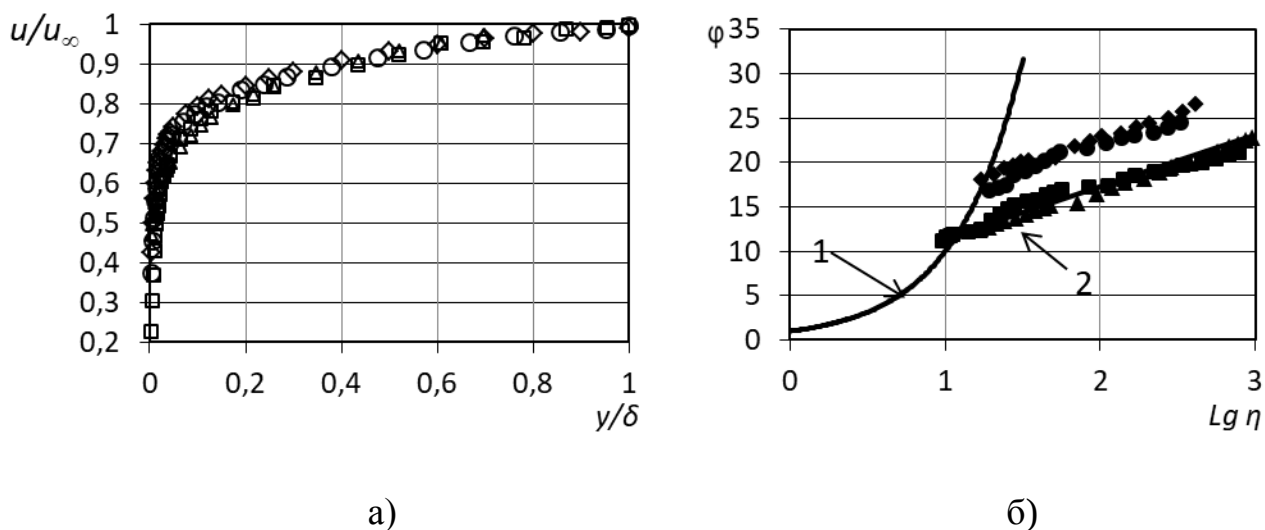


Рисунок 2 – Профили скорости в пограничном слое: а) в обычных координатах, в точке на поверхности $x = 0,55$ м; б) в универсальных координатах, в точке на поверхности $x = 0,55$ м; ■ – расчёт по предложенной методике для поверхности без полостей; ● – расчёт по предложенной методике для поверхности с полусферическими демпфирующими полостями; ◆ – результаты натурного эксперимента для поверхности с демпфирующими полостями полусферической формы; ▲ – результат натурного эксперимента для поверхности без полостей; 1 – расчет по выражению $\varphi = \eta$ для универсального профиля в вязком подслое турбулентного потока; 2 – расчет по выражению $\varphi = 5,85 \lg \eta + 5,56$ для универсального профиля в турбулентном ядре

Проверка достоверности расчета по определению эффективности завесы проведена путем сопоставления результатов численных расчетов, полученных в программном комплексе с результатами Э.П. Волчкова по определению эффективности тепловой защиты поверхности. Результат представлен на рис. 3.

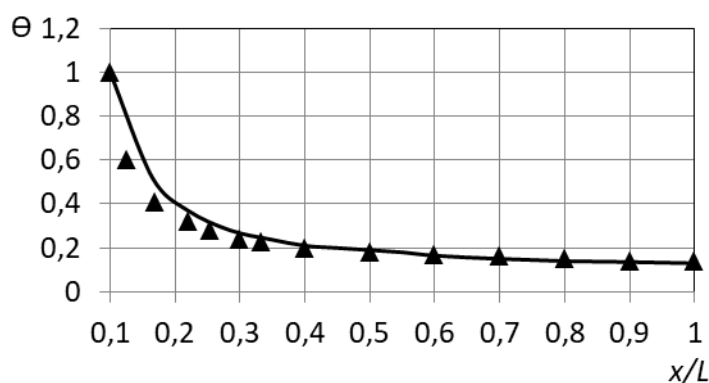


Рисунок 3 – Сопоставление результатов расчёта эффективности завесы: ▲ – результаты расчёта эффективности тепловой защиты с использованием комплекса программ; линия – результат расчёта эффективности тепловой защиты Э.П.Волчкова

С использованием комплекса программ проведено исследование коэффициента сопротивления трения и теплоотдачи в пограничном слое, результаты представлены на рис. 4.

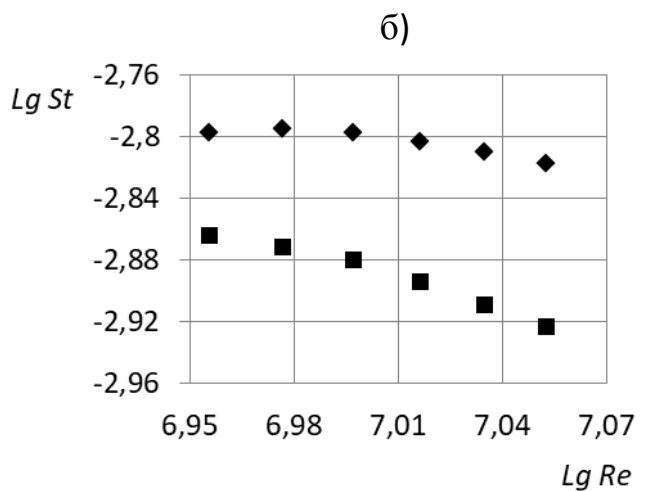
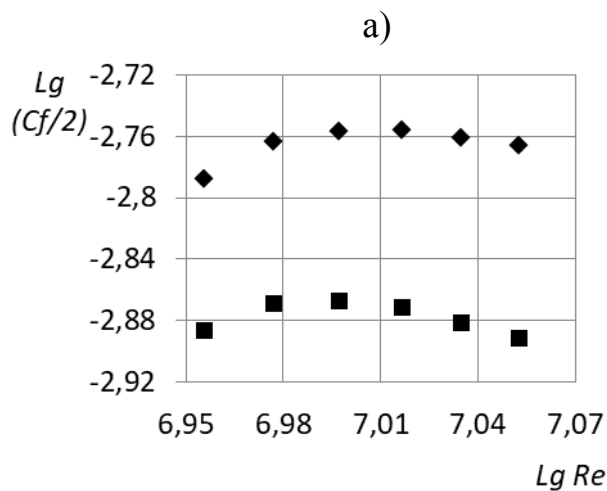
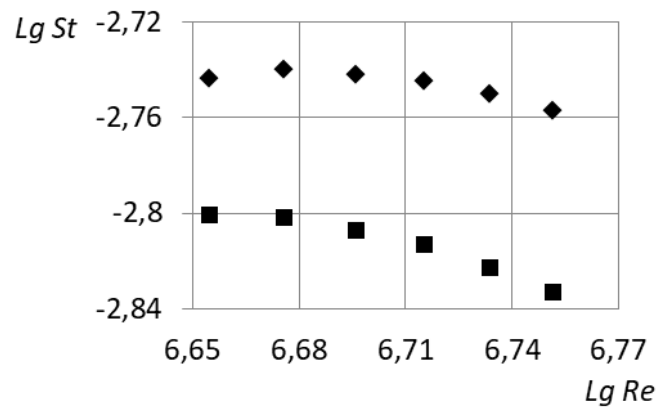
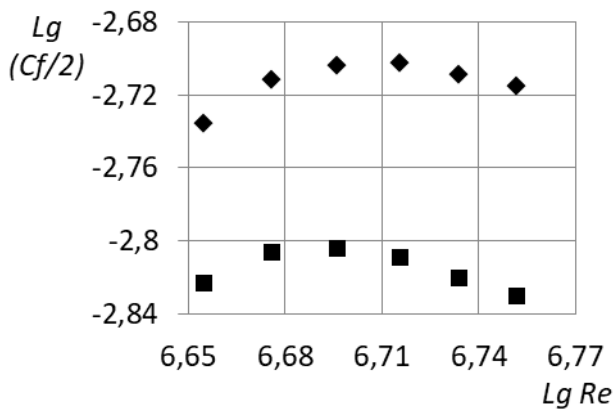
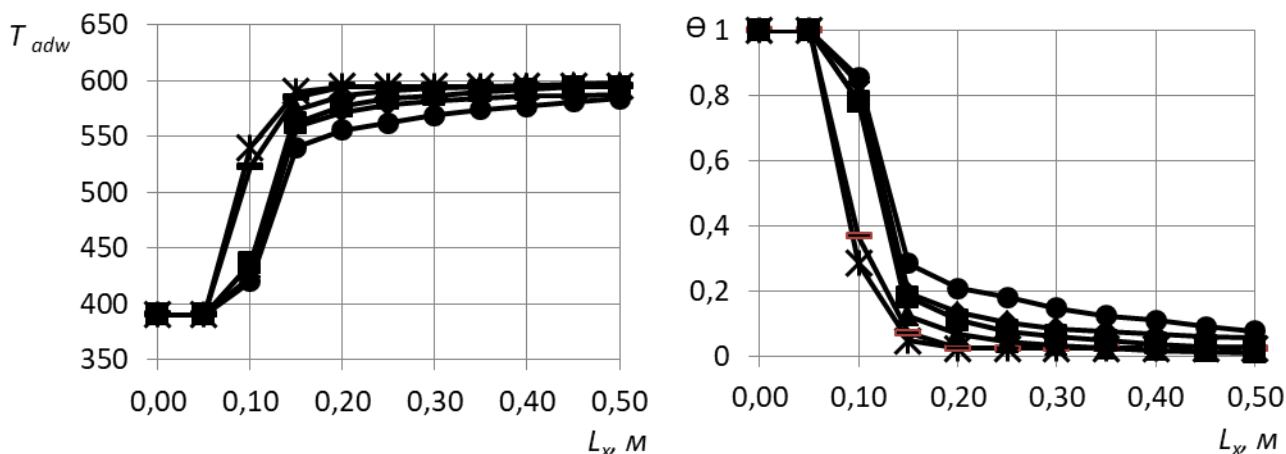


Рисунок 4 – Исследование (а, в) коэффициента сопротивления трения и (б, г) теплоотдачи турбулентного потока: $\blacklozenge$ – поверхность без полостей; $\blacksquare$ – поверхность с полусферическими демпфирующими полостями

Полученные результаты свидетельствуют о значительном снижении турбулентного переноса в пограничном слое при воздействии полусферических демпфирующих полостей, что приводит к снижению коэффициента сопротивления трения на 22%, теплоотдачи турбулентного потока на 17%.

Проведено исследование эффективности плёночного охлаждения поверхности, содержащей демпфирующие полости полусферической формы, обтекаемой высокоскоростным дисперсным потоком. Результаты представлены на рис.5. Численное исследование проводилось для ровной перфорированной поверхности с демпфирующими полостями полусферической формы $\bar{f} = 0,02$, обтекаемой дисперсным потоком воздуха, скорость которого за пределами пограничного слоя составляет $u_\infty = 150$ м/с, $l = 0,5$ м. Температура T^* и давление p^* заторможенного потока в расчетах полагались постоянными ($T^* = 600$ К; $p^* = 0,1$ МПа). Формирование пограничного слоя начиналось от передней кромки

пластины, при этом на участке длиной 0,05 м. моделировался вдув охладителя (воздуха) с температурой $T_{\text{охл}} = 390$ К.



а)

б)

Рисунок 5 – Результаты численного исследования тепловой защиты поверхности при обтекании высокоскоростным дисперсным потоком: а) распределение по длине пластины адиабатной температуры стенки; б) распределение эффективности тепловой защиты по длине пластины: ● – поверхность с демпфирующими полостями, коэффициент воздействия частиц $G = 5 \cdot 10^{-7}$; ■ – гладкая поверхность, коэффициент воздействия частиц $G = 5 \cdot 10^{-7}$; ◆ – поверхность с демпфирующими полостями, коэффициент воздействия частиц $G = 5 \cdot 10^{-5}$; ▲ – гладкая поверхность, коэффициент воздействия частиц $G = 5 \cdot 10^{-5}$; — – поверхность с демпфирующими полостями, коэффициент воздействия частиц $G = 5 \cdot 10^{-3}$; х - гладкая поверхность, коэффициент воздействия частиц $G = 5 \cdot 10^{-3}$

С применением демпфирующих полостей полусферической формы значительно возрастает эффективность тепловой защиты поверхностей, обтекаемых высокоскоростными газовыми потоками. Подавление энергии турбулентных вихрей на поверхности приводит к снижению турбулентного перемешивания потоков и теплопередачи от потока к стенке. В дисперсном пограничном слое, с увеличением коэффициента воздействия частиц, влияние полусферических демпфирующих полостей на эффективность охлаждающей завесы значительно снижается. Но в потоках с умеренным воздействием частиц $G = 5 \cdot 10^{-7}$ эффективность демпфирующих полостей остаётся высокой, что позволяет увеличить эффективность тепловой защиты на $\theta = 0,078$, а температуру снизить на 16 К. Применение демпфирующих полостей в однородном потоке позволяет повысить эффективность тепловой защиты на $\theta = 0,12$ и снизить температуру поверхности на 25К. На основе полученных результатов предложены технические решения, направленные на: повышение эффективности плёночного охла-

ждения поверхности (патент РФ № 173450); повышение эффективности управления турбулентным переносом в пограничном слое (патент РФ № 186044).

ЗАКЛЮЧЕНИЕ И ВЫВОДЫ

1. Разработан метод математического моделирования для исследования интенсивности турбулентного переноса на поверхности с полусферическими демпфирующими полостями в однородных и дисперсных потоках, основанный на сопряжённом решении системы дифференциальных уравнений пограничного слоя, в энергетических установках.

2. Разработан численный метод решения системы дифференциальных уравнений пограничного слоя для моделирования тепловых и турбулентных процессов в пограничном слое на теплонагруженных поверхностях с полусферическими демпфирующими полостями.

3. Разработаны процедуры численного исследования в сложных термогазодинамических условиях в пограничном слое с учётом воздействия полусферических демпфирующих полостей, обеспечивающие устойчивость и сходимость решения.

4. Создан комплекс программ для моделирования и исследования систем тепловой защиты поверхностей, обтекаемых высокоскоростными дисперсными потоками, обеспечивающий повышение результативности исследований комбинированных систем охлаждения теплонагруженных элементов с применением полусферических демпфирующих полостей в энергетических установках.

5. Адекватность разработанного метода математического моделирования пограничного слоя и комплекса программ подтверждена сопоставлением тестовых расчётов с результатами натурных экспериментов и результатами авторов, проводивших схожие исследования.

6. Проведено математическое моделирование и численное исследование эффективности влияния полусферических демпфирующих полостей на турбулентный пограничный слой, установлено снижение коэффициента сопротивления трения на поверхности до 22% и теплоотдачи потока до 17% по сравнению с традиционными решениями.

7. Проведено математическое моделирование и численное исследование эффективности тепловой защиты с применением полусферических демпфирующих полостей при обтекании высокоскоростными дисперсными потоками. Выявлено, что полусферические демпфирующие полости в значительной степени стабилизируют тепловую завесу на поверхности, снижая температуру последней на 25 К и повышая значение эффективности завесы θ на 0,12. В неоднородном потоке эффективность охлаждения поверхности значительно снижается, причём увеличение концентрации частиц приводит к снижению эффек-

тивности тепловой защиты поверхности, наибольший результат повышения эффективности тепловой защиты θ достигает 0,078, а снизить температуру поверхности в таких условиях удаётся на 16 К.

8. На основе математического моделирования поверхностей с полусферическими демпфирующими полостями выявлены и защищены патентами новые технические решения, применение которых способствует совершенствованию способов управления обменными процессами в пограничном слое с температурным градиентом.

Публикации по теме диссертации

В журналах, входящих в базы данных Web of Science и SCOPUS:

1. Kovalnogov, V.N. Development and investigation of the technologies involving thermal protection of surfaces immersed in disperse working medium flow / Kovalnogov, V.N., Fedorov, R.V., Khakhaleva, L.V., Generalov, D.A., Chukalin, A.V. // International Journal of Energy for a Clean Environment. – 2016. – №17 (2-4). – P. 223-239.

2. Kovalnogov, V.N., Fedorov, R.V., Khakhaleva, L.V., Chukalin, A.V., Bondarenko, A.A., Kovrizhnykh, E.N. The mechanism and theoretical basis of the management of intensity of the heat transfer control through periodic influences on the turbulent boundary layer // AIP Conference Proceedings, 1863, 560016 (2017); doi: 10.1063/1.4992699.

3. Kovalnogov, V.N., Fedorov, R.V., Khakhalev, Y.A., Khakhaleva, L.V., Chukalin, A.V. Application of the results of experimental and numerical turbulent flow researches based on pressure pulsations analysis // AIP Conference Proceedings, 1863, 560018 (2017); doi: 10.1063/1.4992701.

4. Kovalnogov, V.N., Fedorov, R.V., Chukalin, A.V., Suranov, D.V. Mathematic modeling of convective heat transfer and friction of plate at harmonic pressure oscillations of a homogeneous flow // AIP Conference Proceedings, 1978, 470023 (2018); doi: 10.1063/1.5044093.

Публикации в журналах, входящих в Перечень ВАК:

5. Ковальногов В.Н. Математическое моделирование и численный анализ ламинаризации в перфорированной трубе с демпфирующими полостями / В.Н. Ковальногов, Р.В. Федоров, Л.В. Хахалева, А.В. Чукалин // Автоматизация процессов управления. – 2015. – №4(42). – С.108-114.

6. Ковальногов, В.Н. Новые технические решения на основе математического моделирования лопаточного аппарата турбомашин / В.Н. Ковальногов, Д.В. Генералов, А.В. Чукалин, Р.В. Федоров, А.А. Плеханова // Автоматизация процессов управления. – 2017. – № 3 (49). – С. 43-48.

7. Ковальногов, В.Н. Исследование влияния числа демпфирующих полос-

тей на сопротивление трения турбулентного потока / В.Н. Ковальногов, А.В. Чукалин, Л.В. Хахалева, Р.В. Федоров, А.А. Плеханова // Автоматизация процессов управления. – 2017. – № 1 (47). – С. 34-39.

8. Ковальногов, В.Н. Математическое моделирование и численный анализ эффективности тепловой защиты с применением полусферических демпфирующих полостей / В.Н. Ковальногов, А.В. Чукалин, Л.В. Хахалева, Р.В. Федоров // Автоматизация процессов управления. – 2018. – № 4 (54). – С. 89 - 95.

Патенты на полезные модели, свидетельство о госрегистрации программ для ЭВМ:

9. Пат. на полезную модель № 173450 Российская Федерация: МПК F23R3/06 Жаровая труба камеры сгорания газотурбинного двигателя с демпфирующими полостями / Ковальногов В.Н., Фёдоров Р.В., Хахалева Л.В., Чукалин А.В., Корнилова М.И.; заявитель и патентообладатель Ульян. гос. тех. ун-т – № 2016144774; опубл. 28.08.2017, Бюл. № 25.

10. Пат. на полезную модель № 186044 Российская Федерация: МПК F15D1/06 Демпфирующая поверхность / Ковальногов В.Н., Федоров Р.В., Чукалин А.В., Хахалева Л.В.; заявитель и патентообладатель Ульян. гос. тех. ун-т – № 2018131418; опубл. 27.12.2018, Бюл. № 36.

11. Свидетельство о государственной регистрации программ. продукта: № 2017661244. Программный комплекс для моделирования и исследования эффективных систем тепловой защиты поверхностей, обтекаемых высокосортными дисперсными потоками / Фёдоров Р.В., Ковальногов В.Н., Чукалин А.В.; Ульяновский государственный технический университет 06.10.2017.

Публикации в прочих изданиях:

12. Чукалин, А.В. Экспериментальное исследование сопротивления трения при обтекании поверхностей с демпфирующими полостями / А.В. Чукалин // Сборник VIII международной молодежной научной конференции. – Ульяновск: УИ ГА, 2016. – С. 251-252.

13. Ковальногов, В.Н. Исследование турбулентного переноса и температуры в пограничном слое при изменении конфигурации демпфирующих полостей / В.Н. Ковальногов, Р.В. Фёдоров, Л.В. Хахалева, А.В. Чукалин // Проблемы тепломассообмена и гидродинамики в энергомашиностроении: материалы докладов X школы-семинара молодых учёных и специалистов академика РАН В.Е. Алемасова. – Казань: Академэнерго, 2016. – С. 248-251.

14. Ковальногов, В.Н. Математическое моделирование и численный анализ эффективности систем тепловой защиты, поверхностей обтекаемых высокоскоростными потоками / В.Н. Ковальногов, Р.В. Фёдоров, Л.В. Хахалева, А.В. Чукалин, М.И. Корнилова // Проблемы тепломассообмена и гидродинамики в энергомашиностроении: материалы докладов X школы-семинара молодых

учёных и специалистов академика РАН В.Е. Алемасова. – Казань: Академэнерго, 2016. – С. 62-66.

15. Чукалин, А.В. Перфорированная поверхность с демпфирующими полостями и её применение в системах тепловой защиты / А.В. Чукалин // Пятый молодёжный инновационный форум. – Ульяновск: УлГТУ, 2016. – С. 462-465.

16. Ковальногов, В.Н. Влияние относительного объёма демпфирующих полостей на сопротивление трения турбулентного потока / В.Н. Ковальногов, Р.В. Фёдоров, Л.В. Хахалева, А.В. Чукалин // XV Международный форум по тепло- и массообмену. – Минск: ИТМО им. А.В. Лыкова НАНБ, 2016. – Т.1. – С. 253-257.

17. Ковальногов, В.Н. Воздействие на турбулентный поток посредством демпфирующих полостей / В.Н. Ковальногов, Р.В. Фёдоров, Л.В. Хахалева, А.В. Чукалин // Вузовская наука в современных условиях: сб. материалов 50-й научно-технической конференции. – Ульяновск: УлГТУ, 2016. – С. 26-29.

18. Чукалин, А.В. Исследование влияния формы демпфирующей полости на турбулентный пограничный слой / А.В. Чукалин // Вузовская наука в современных условиях: сб. материалов 51-й научно-технической конференции. – Ульяновск: УлГТУ, 2017. – С. 30-33.

19. Ковальногов, В.Н. Численное исследование эффективности тепловой защиты поверхности, обтекаемой высокосортными потоками, за счёт демпфирующих полостей / В.Н. Ковальногов, А.В. Чукалин, Р.В. Фёдоров, Л.В. Хахалева // Тезисы докладов XXI Школы – семинара молодых учёных и специалистов под руководством акад. РАН Леонтьева «Проблемы газодинамики и тепломассообмена в энергетических установках». – Санкт-Петербург: Издат. дом МЭИ, 2017. – Т.2. – С. 270-272.

20. Чукалин, А.В. Математическое моделирование и анализ турбулентного переноса на демпфирующей поверхности / А.В. Чукалин // Сборник X международной молодёжной научной конференции. – Ульяновск: УИ ГА, 2018. – С. 223 – 224.

21. Чукалин, А.В. Экспериментальное исследование пограничного слоя на перфорированной поверхности с демпфирующими полостями / А.В. Чукалин, В.Н. Ковальногов, Р.В. Фёдоров, А.А. Бондаренко, А.Н. Мирошин // Труды седьмой Российской национальной конференции по теплообмену. М.: Издат. дом МЭИ, 2018. – Т.2. – С.373 – 376.