

ОТЗЫВ

официального оппонента

доктора технических наук, профессора

Ремизова Александра Евгеньевича

на диссертационную работу Черновой Алены Алексеевны «Внутренняя газодинамика и топологическая структура локальных пространственно-временных зон с повышенным теплообменом в камере сгорания энергетических установок», представленную на соискание ученой степени доктора технических наук по специальности 1.1.9 – Механика жидкости, газа и плазмы в диссертационный совет Д 999.211.02, созданный на базе Пермского национального исследовательского политехнического университета и Пермского федерального исследовательского центра Уральского отделения Российской академии наук

Актуальность темы исследования

Диссертационная работа А.А. Черновой посвящена исследованию особенностей внутренней газодинамики и конвективного теплообмена в камерах сгорания энергетических установок. Изучаются и анализируются формирующиеся в каналах камеры сгорания пространственные нестационарные и стационарные структуры течения, выявляются их топологические структуры и влияние на тепловые потоки в элементы конструкции. Предложенные решения сопряженной задачи теплообмена в проточном тракте энергетической установки, учитывающие нестационарность положения границ массоподвода и работу установки на режимах регулирования. В работе сформирован, обоснован и апробирован новый обобщенный подход к исследованию нестационарного конвективного теплообмена в каналах сложной формы с массоподводом, позволяющим существенно повысить точность оценок тепловых потоков в конструктивные элементы камер сгорания энергетических установок. Исследование Черновой А.А. является актуальным, потому что позволяет получить данные о тепловом состоянии теплонапряженных элементов камеры сгорания энергоустановки для ряда её конструктивного исполнения.

Структура и содержание работы

Диссертация состоит из введения, шести глав, заключения и списка использованной в работе литературы. Во введении проведена краткая характеристика работы, сформулированы цели и задачи исследования, научная значимость и новизна, практическая значимость исследований и сформулированы положения, выносимые на защиту.

В первой главе проведен подробный литературный обзор, описана мотивация исследования. Рассмотрены типы и особенности течений, реализуемых в проточных трактах энергетических установок. Подробно описаны экспериментальный и теоретический подходы к исследованию внутрикамерных процессов в энергетических установках. Выявлена проблематика экспериментального исследования внутренней газодинамики и теплообмена в проточных трактах и застойных областях камер сгорания силовых энергетических установок. Проанализированы и обобщены результаты теоретического исследования внутрикамерных процессов в камерах сгорания. Показано, что вопросам учета характера (пространственности и нестационарности) формируемых в камере сгорания течений высокотемпературного газа при исследовании процессов конвективного теплообмена уделено недостаточно внимания. Приведено обоснование необходимости учета предыстории потока для корректной оценки тепловых потоков в элементы конструкции, а также актуальности решения научной проблемы, заключающейся в отсутствии обобщенного подхода к исследованию конвективного теплообмена в камере сгорания энергетической установки.

Во второй главе приведена подробная классификация режимов работы энергетической установки. Показаны особенности численного моделирования внутрикамерных процессов при работе энергетической установки на различных режимах. Приведена физическая постановка сопряженной задачи теплообмена в камере сгорания энергетической установки, на основе которой, с учетом обоснованных принятых физических допущений, сформирована обобщенная математическая постановка. Рассмотрены и проанализированы распространенные методы решения пространственной сопряженной задачи нестационарного теплообмена, обосновано применение метода контрольных объемов. В рамках решения задачи Суда апробированы используемые расчетные схемы и алгоритмы. Проведен анализ сеточной сходимости и валидация RANS моделей турбулентности. Показано, что модель турбулентности SST $k-\omega$ позволяет минимизировать погрешность величины коэффициента теплоотдачи, полученного в результате численного моделирования процесса.

В третьей главе формулируется обобщенный подход к исследованию процессов нестационарного конвективного теплообмена в проточных трактах энергетических установок, в том числе и с учетом движения границ массоподвода. Предложенный обобщенный подход основан на совместном применении топологических методов, теории катастроф, анализа конструктивных особенностей элементов и методов обработки результатов вычислительных экспериментов для выявления и описания топологических особенностей структуры потока и обусловленных данными особенностями локальных пространственно-временных зон повышенного

теплообмена для прогноза теплового состояния элементов конструкции энергетической установки. Обосновано применение подхода к систематизации и обобщению результатов многовариантного математического моделирования с использованием матриц взаимовлияния, приведен алгоритм их построения.

В четвертой главе рассмотрены особенности внутренней газодинамики и конвективного теплообмена в камере сгорания энергетических установок различных конструктивных схем, исследованные в рамках квазистационарного подхода. Выявлены, описаны и проанализированы как локальные пространственно-временные зоны повышенного теплообмена в энергетической установке с утопленным соплом и каналом массоподвода звездообразной формы поперечного сечения, так и определяющие их пространственные топологические структуры, формируемые в камере сгорания. Исследовано влияние конструктивных параметров камеры сгорания (в том числе формы поверхности массоподвода) на формирование и трансформацию выявленных топологических особенностей, а также на тепловое состояние элементов конструкции. Получены критериальные зависимости числа Нуссельта от чисел Рейнольдса и Прандтля в описанных локальных зонах повышенного теплообмена. Исследованы топологические особенности структуры потока газа в заманжетной полости, получено изменение числа Стэнтона по радиальной координате. Выявлена инвариантность топологии структуры потока вблизи соплового дна по отношению к конструктивным особенностям камеры сгорания многосопловых энергетических установок. Получены критериальные уравнения для определения числа Нуссельта в выявленных областях повышенного теплообмена на поверхности соплового дна и непроницаемого торца канала массоподвода энергетических установок различных компоновочных схем. Сравнение результатов численных расчетов с экспериментом показало их удовлетворительную сходимость.

В пятой главе рассмотрены результаты моделирования процессов нестационарной пространственной газодинамики и конвективного теплообмена в камере сгорания многосопловой энергетической установки с цилиндрической и торцевой поверхностями подвода массы при работе установки на стационарном участке режима регулирования. Показано, что движение границ подвода массы приводит к перестройке топологических особенностей структуры потока в камере сгорания. Выявлены режимы неустойчивости (циклический переход от неустойчивой конфигурации к устойчивой) и их периодичность, переход к «катастрофе течения». Показано, что «катастрофа течения» приводит к резкому существенному росту плотности теплового потока. Получены временные зависимости изменения локальных безразмерных коэффициентов теплоотдачи и критериальные выражения для их оценки в пространственной-временных областях

повышенного теплообмена для энергоустановок различного конструктивного исполнения. Установлена корреляция результатов моделирования в рамках квазистационарного подхода с результатами расчетов, выполненных в рамках нестационарного подхода.

В шестой главе рассмотрены методологические вопросы оценки интенсивности теплообмена в локальных пространственно-временных зонах с использованием сформированного обобщенного подхода. Разработана классификация конструктивных элементов, каналов и трактов камер сгорания по типу, реализуемых в камере топологических особенностей структуры потока. Приведена классификация локальных пространственно-временных зон повышенного теплового потока вблизи конструктивных элементов. Предложена методика оценки интенсивности тепловых потоков в конструктивные элементы камеры сгорания. Приведена информация о разработанном на основе предложенной методики программном комплексе для инженерного расчета значений локальных относительных коэффициентов теплоотдачи в пространственно-временных зонах повышенного теплообмена в камере сгорания энергетической установки.

Новизна полученных результатов

В диссертации А.А. Черновой получены новые и имеющие высокую научную ценность результаты, к которым следует отнести как выявленные и подробно описанные локальные пространственно-временные топологические зоны с повышенными тепловыми потоками в камерах сгорания различных конструктивных схем, их трансформация и режимы, приводящие к срыву течения, так и сформированный обобщенный подход к исследованию нестационарного конвективного теплообмена в каналах сложной формы с массоподводом.

Достоверность результатов исследования

Достоверность полученных в диссертации результатов обеспечивается корректным использованием при построении моделей фундаментальных законов сохранения, применением апробированных методик решения, согласованностью результатов расчетов с известными экспериментальными данными и решениями, полученными другими авторами. Основные результаты опубликованы в ведущих рецензируемых журналах из Перечня ВАК и приравненных к ним зарубежных, а также докладывались на международных и всероссийских конференциях.

Теоретическая и практическая значимость

Результаты диссертации А.А. Черновой имеют важное теоретическое значение, а разработанный обобщенный подход вносит существенный вклад в развитие методологических основ исследования сопряженного нестационарного конвективного теплообмена в энергетических установках. Практическая ценность

работы обусловлена возможностью использования результатов исследования при проектировании энергетических установок, для расчета теплового состояния конструктивных элементов и расчета толщины теплозащитных покрытий.

Замечания по диссертационной работе

1. Замечания по оформлению диссертации:

- встречается обозначение одного параметра (например массового расхода) различными символами;
- допускается излишняя вольность в терминологии, например, модель турбулентности Менгера является не двухзонной (стр. 15), а двухпараметрической. Весьма спорны термины "учёт газодинамической обстановки" на стр.48 и "уравнения внутренней баллистики в камере сгорания" на стр. 95;
- при обзоре литературы с целью формирования задачи исследования в рамках диссертационной работы ссылка на собственную публикацию (стр. 43) не совсем уместна;
- имеются претензии к оформлению некоторых рисунков. Так на рис. 2.2 отсутствует обозначение осей координат, а на рис.2.10 и 2.13 для координаты S , отложенной по оси абсцисс, не определены начало отсчёта и направление

2. Замечания по содержанию диссертации:

- при анализе работ, посвящённых исследованию течения газа в каналах различной формы с массоподводом (раздел 1.2.3) было бы целесообразно рассмотреть работы по исследованию газодинамики и теплообмена в охлаждаемых сопловых аппаратах высокотемпературных турбин;
- отсутствует достаточное обоснование отказа от учёта влияния теплообмена излучением при моделировании рабочего процесса в камере сгорания (раздел 1.2.4);
- в разделе 2.3 перечислены восемь допущений, принятых при моделировании рабочего процесса, но нет оценки степени влияния на результат моделирования каждого из сделанных допущений, а также оценки общей погрешности результата расчёта по модели с этими допущениями;
- не ясно, выдерживается ли подобие по числам Маха и Рейнольдса при сравнении результатов расчёта и эксперимента, представленных на рис. 2.21;
- в главе 4 приводятся полученные расчётным путём критериальные уравнения для чисел Нуссельта применимые в указанных диапазонах чисел Рейнольдса и Прандтля, но при этом нет информации о критическом числе Рейнольдса (попадает или нет в указанный диапазон) и отсутствует сопоставление величин

коэффициентов критериального уравнения с их значениями для известных решений в подобных или схожих условиях;

- на рис. 5.22 показаны области в которых число Нуссельта уменьшается при неизменном числе Рейнольдса. Какими физическими процессами это объясняется?

- разработанная методика оценки конвективного теплообмена предлагает при расчёте числа Рейнольдса в качестве характерного размера принимать диаметр центрального цилиндрического канала (стр. 266). Для случаев сложной формы поперечного сечения канала, которые представляют наибольший интерес, в качестве характерного размера следовало бы принять не геометрический, а гидравлический диаметр, определяемый как отношение четырёх площадей к периметру канала сложной формы.

3. Замечания по выводам:

- выводы по главе 1 (раздел 1.4 на стр. 45) не содержат результатов анализа проблем и достижений в области исследования внутрикамерных процессов в камерах сгорания энергоустановок, что подразумевает формулировка названия первой главы диссертации;

- в выводах по главе 3 отсутствуют выводы по ключевому разделу 3.3 в котором описывается обобщённый подход к исследованию процессов нестационарного теплообмена;

- выводы по главе 4 содержат 13 пунктов, каждый из которых в большей степени соответствует констатации полученного результата, а не общим выводам по результатам решения задач диссертационной работы в части стационарного теплообмена.

Замечания в целом не оказывают существенного влияния на общее положительное впечатление от диссертационной работы и могут быть учтены при дальнейших работах по этой тематике.

Заключение о соответствии диссертации критериям, установленным в Положении о присуждении ученых степеней.

Считаю, что диссертация Черновой Алены Алексеевны «Внутренняя газодинамика и топологическая структура локальных пространственно-временных зон с повышенным теплообменом в камере сгорания энергетических установок» на соискание ученой степени доктора технических наук является законченной научно-квалификационной работой. Автором получены новые результаты, относящиеся к механике жидкости, газа и плазмы. Опубликовано значительное количество работ в авторитетных изданиях в области механики жидкости, газа и плазмы, в которых

раскрыты все основные положения, результаты . Текст автореферата полностью соответствует тексту диссертации.

Диссертация Черновой Алены Алексеевны «Внутренняя газодинамика и топологическая структура локальных пространственно-временных зон с повышенным теплообменом в камере сгорания энергетических установок» соответствует всем требованиям положения «О порядке присуждения ученых степеней», утвержденного Постановлением Правительства Российской Федерации от 24 сентября 2013 года № 842, предъявляемым к докторским диссертациям, а ее автор, Чернова Алёна Алексеевна, заслуживает присуждения ей ученой степени доктора технических наук по специальности 1.1.9 – Механика жидкости, газа и плазмы.

Официальный оппонент:

Доктор технических наук, профессор,
ФГБОУ ВО «Рыбинский государственный
авиационный технический университет
имени П.А. Соловьева», заведующий
кафедрой "Авиационные двигатели"

« 18 » мая 2022

Ремизов Александр Евгеньевич

Почтовый адрес: 152930 г. Рыбинск, Ярославская обл., ул. Пушкина, 53

Телефон: 910-819-88-12

E-Mail: ad@rsatu.ru

Подпись Ремизова Александра Евгеньевича _____

Проректор по науке и
цифровой трансформации
РГАТУ имени П.А. Соловьева

А.Н. Сутягин