

УТВЕРЖДАЮ

Директор Федерального государственного бюджетного учреждения науки «Институт теоретической и прикладной механики им. С.А. Христиановича Сибирского отделения Российской академии наук», член-корреспондент РАН, доктор физико-математических наук



А.Н. Шиплюк

" 16 " мая 2022 г.

### ОТЗЫВ ВЕДУЩЕЙ ОРГАНИЗАЦИИ

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 диссертационном исследовании Черновой А.А. методами математического моделирования изучены и систематизированы вопросы нестационарного теплообмена в камерах сгорания энергетических установок (КС ЭУ). В частности, в работе рассмотрены проблемы нестационарного сопряженного теплообмена в КС ЭУ при массопроводе с подвижных границ, а также при изменении режимов работы камеры сгорания. Особое внимание уделено анализу топологических структур вблизи контактных поверхностей для квазистационарного и нестационарного режимов работы энергетических установок. Выполнено обобщение полученных результатов и предложен проблемно-ориентированный программный комплекс модульного вида для оценки значений локальных безразмерных коэффициентов теплоотдачи в выявленных локальных пространственно-временных зонах повышенного теплообмена в КС для различных конструктивных схем ЭУ.

**Актуальность темы диссертационной работы.** Актуальность представленной диссертационной работы обусловлена тем, что до настоящего времени отсутствовал обобщенный подход к расчету нестационарного конвективного теплообмена в КС ЭУ с различным конструктивным оформлением каналов с массопроводом и проточных трактах энергетических установок. В каналах камеры сгорания реализуется нестационарное пространственное турбулентное течение, на которое влияют как газодинамические, так и геометрические параметры установки. Локальные пространственно-временные зоны повышенного теплообмена на поверхностях камеры сгорания энергетической установки определяются топологическими особенностями структуры потока и их трансформацией в

зависимости от режима работы установки. Вследствие того, что экспериментально определять нестационарные тепловые потоки в элементы конструкции энергетических установок затруднительно, а учет изменения положения и геометрии поверхностей массопотока в процессе работы еще сильнее усложняет эту задачу, то разработка теоретических положений для расчета нестационарного конвективного теплообмена является, несомненно, актуальной темой.

**Общий анализ содержания диссертационной работы** производит впечатление последовательно проведенного исследования, направленного на получение новых теоретических и практических результатов в области решения проблемы разработки методических основ прогноза теплового состояния конструктивных элементов камеры сгорания энергетической установки. Структурно диссертация подразделяется на две части (по три главы в каждой). В первой части описано формирование, обоснование и апробация теоретического аппарата (в том числе математических моделей и разрабатываемого подхода). Вторая часть содержит исследование особенностей рабочих процессов в камере сгорания энергетических установок различных схем с последующим формированием, в рамках предложенного подхода, блока критериальных соотношений и алгоритма оценки теплового состояния элементов конструкции.

**Во введении** показана актуальность темы, приведена краткая характеристика работы, сформулированы цели и задачи исследований, отмечена научная новизна, практическая значимость полученных результатов и сформулированы положения, выносимые на защиту.

**В первой главе** приведена классификация формирующихся потоков в областях и проточных трактах различного конструктивного исполнения. Дан анализ существующих методов исследования рассматриваемых процессов и приведен обзор работ, посвященных исследованию внутрикамерных процессов в камерах сгорания. Показана необходимость учета предыстории потока для корректной оценки тепловых потоков вблизи конструктивных элементов энергетических установок и формирование нового обобщенного подхода к исследованию конвективного теплообмена в камере сгорания энергетической установки.

**Во второй главе** рассмотрены вопросы математического моделирования пространственной внутренней газодинамики и теплообмена в камере сгорания энергетической установки. Рассмотрены режимы работы установки и связанные с их особенностями подходы к моделированию этих процессов. На основе анализа физических особенностей, протекающих в проточных трактах камеры сгорания энергетической установки процессов, сформулированы используемые допущения. Проведена апробация расчетных схем и алгоритмах на примере решения задачи Сода. Обоснован выбор метода дискретизации исходной нестационарной системы уравнений сохранения по времени, приведены используемые при моделировании движения поверхности массоприхода алгоритмы деформации сеточного каркаса. Проведен анализ сеточной сходимости решения задачи внутренней газодинамики и теплообмена в камере сгорания энергетической установки.

Проведена валидация RANS моделей турбулентности с использованием экспериментальных результатов, опубликованных в независимых источниках, а также даны оценки влияния моделей на характеристики пристеночных течений и коэффициенты теплоотдачи. Показано, что модель турбулентности SST  $k-\omega$  позволяет получить наиболее близкие к экспериментальным данным локальные распределения коэффициента теплоотдачи: расхождение модели с экспериментальными данными не превышает 8%. Даны рекомендации

по применению RANS моделей турбулентности при моделировании внутрикамерных процессов в энергетических установках.

**В третьей главе** рассмотрены методологические вопросы исследования конвективного теплообмена конструктивных элементов камеры сгорания энергетической установки. Приведена наиболее общая алгоритмизация применения распространенных методик оценки тепловых потоков в камере сгорания. Дано описание методов топологии и теории катастроф, рассмотрены аспекты применения данных методов для описания пространственной внутренней газодинамики энергетической установки.

Сформулирован и предложен обобщенный подход к исследованию процессов нестационарного конвективного теплообмена в проточных трактах энергетических установок, в том числе при подвижных границах вдува. Предложенный подход предполагает использование ряда положений топологических методов в гидродинамике для выявления, описания и анализа пространственно-временных зон; отдельных аспектов теории катастроф для анализа особенностей трансформации данных зон, анализа конструктивных особенностей элементов и методов обработки результатов вычислительных экспериментов для расчета безразмерного коэффициента теплоотдачи в данных зонах и последующего 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 результаты численного моделирования внутренней газодинамики и теплообмена в камере сгорания энергетических установок различных конструктивных схем, полученные в рамках квазистационарного подхода, и справедливые для стационарного режима работы.

Выявлены, описаны и проанализированы топологические особенности структуры потока, характерные для рабочих режимов энергетической установки с утолщенным соплом и каналом массоподвода звездообразной формы. Показана корреляция локализации топологических особенностей и пространственных зон повышенного теплообмена. Показано, что увеличение степени утолщенности сопла приводит к структурной перестройке потока в предсопловом объеме камеры сгорания: к образованию вихревых структур вблизи поверхности непроницаемого торца канала массоподвода и к увеличению плотности теплового потока в области входа потока в утолщенное сопло в 1.8 раза. Исследовано влияние формы канала массоподвода на теплообмен вблизи входной поверхности утолщенного сопла. Выявлено, что применение лучей компенсаторов трапециевидной формы для каналов массоподвода звездообразной формы поперечного сечения приводит к существенной (более 30%) интенсификации процессов теплообмена. Полученные расчетным путем критериальные уравнения для расчета числа Нуссельта сравнены с экспериментальными данными других авторов, получено удовлетворительно согласование данных, что говорит о достоверности полученных результатов.

Приведены результаты численного исследования пространственного течения газа и конвективного теплообмена в компенсационной полости камеры сгорания энергетической установки с утолщенным соплом. Выявлены и описаны топологические особенности структуры течения рабочего тела в заманжетной полости, получена полиномиальная зависимость числа Стэнтона по радиальной координате в компенсационной полости.

Рассмотрены результаты исследования особенностей внутрикамерных процессов в многосопловых энергетических установках различных конструктивных схем при их работе на стационарном участке. Выявлена инвариантность топологии потока газа вблизи соплового дна по отношению к конструктивным особенностям камеры сгорания (кривизна соплового дна, длина предсоплового объема, количество и положение газоходов). Обоснована некорректность использования аналогии со струйным течением для канала массоподвода цилиндрическо-щелевой формы при оценке величины теплового потока вблизи многосоплового дна. Показано, что использование эмпирических соотношений приводит к завышению значений напряжения трения на днище более чем в два раза. Приведены результаты исследования влияния геометрических параметров конкретного конструктивного исполнения камеры сгорания на внутреннюю газодинамику и конвективный теплообмен, получены критериальные уравнения для определения числа Нуссельта в локальных пространственно-временных областях повышения теплообмена на поверхности соплового дна и непроницаемого торца канала массоподвода, справедливые для всех рассмотренных конструктивных исполнений энергетических установок.

В рамках квазистационарного подхода исследовано влияние геометрии поверхности массоподвода на реализуемые в камере сгорания внутрикамерные процессы. Показано, что увеличение диаметра цилиндрического канала подвода массы приводит к трансформации топологических особенностей вблизи соплового дна и в области торца канала и уменьшению плотности теплового потока. В камере сгорания с торцевым подводом массы топологические особенности потока остаются инвариантны к по отношению к положению поверхности вдува. Получены критериальные уравнения для оценки значений чисел Нуссельта в пространственно-временных зонах, справедливые для различных положений поверхности массоподвода.

В пятой главе рассмотрены результаты численного моделирования нестационарной пространственной газодинамики и конвективного теплообмена в камере сгорания многосопловой энергетической установки при ее работе на стационарном участке и на переходных режимах. Выявлена трансформация топологических особенностей структуры потока в предсопловом объеме при изменении геометрии цилиндрическо-щелевого канала, описаны и проанализированы переходы локальных топологических особенностей от устойчивых к неустойчивым конфигурациям, с последующим переходом в устойчивую форму. Зафиксированы временные периоды трансформаций локальных топологических особенностей, выявлена катастрофа течения и обусловленный катастрофой резкий существенный рост плотности теплового потока в области соплового дна. Построены временные зависимости изменения локальных безразмерных коэффициентов теплоотдачи и критериальные выражения для их оценки в пространственно-временных областях повышенного теплообмена на поверхности соплового дна и непроницаемого торца канала массоподвода многосопловой энергетической установки с цилиндрическо-щелевой формой поперечного сечения канала массоприхода. Обосновано, что центральная особая точка на поверхности соплового дна многосопловой камеры сгорания с торцевым подводом массы инвариантна по отношению к положению поверхности массоподвода. Показана корреляция результатов моделирования в рамках квазистационарного подхода с результатами расчетов, выполненных в рамках нестационарного подхода.

Изучены особенности реализуемых в камере течений и теплообмена при работе энергетической установки с торцевой поверхностью массопровода на режимах регулирования. Показано, что поток вблизи входа в патрубки стабилизируется по истечении 5 мс от начала режима регулирования (нагнетания/спада) давления, при этом стабилизация потока вблизи соплового днища происходит медленнее формирования локальных зон обратных и возвратных течений на 3 мс.

Выявлено, что максимальных значений тепловой поток достигает в области периферийных седловых точек для энергетических установок с торцевым расположением газоходов и в области отрыва потока (межпатрубковые периферийные точки типа «седлофокус»/«неустойчивый фокус»), что коррелируется с распределением теплового потока по сопловому дну, полученному в рамках квазистационарного подхода. На основании обработки результатов вычислительных экспериментов получены критериальные уравнения для определения числа Нуссельта в выявленных локальных пространственно-временных зонах с повышенным теплообменом для различных схем многосопловых энергетических установок. Показана корректность предложенного обобщенного подхода к исследованию процессов нестационарного конвективного теплообмена в каналах сложной формы с массопроводом как при работе установки на режимах регулирования, так и на стационарном участке.

**В шестой главе** рассмотрены вопросы формирования методики оценки интенсивности теплообмена в локальных пространственно-временных зонах повышенного теплообмена на основе предложенного обобщенного подхода. Приведена предлагаемая классификация проточных трактов КС по типам влияния конструктивных особенностей на реализуемые топологические особенности структуры потока вблизи конструктивных элементов, а также формирование и трансформацию локальных пространственно-временных зон повышенного теплового потока. Разработана методика оценки интенсивности тепловых потоков вблизи поверхностей конструктивных элементов камеры сгорания. Приведена информация о созданном на основе предложенной методики программном комплексе для инженерного расчета значений локальных безразмерных коэффициентов теплоотдачи в пространственно-временных зонах повышенного теплообмена в камере сгорания энергетической установки.

**В заключении** сформулированы основные результаты, полученные в диссертационной работе.

**Научная новизна** рассматриваемой работы характеризуется следующими основными результатами, полученными на основе применения численных методов:

- Выявлены и описаны локальные пространственно-временные топологические зоны повышения тепловых потоков в камерах сгорания различных конструктивных схем.

- Получены распределения тепловых потоков вблизи непроницаемых поверхностей камеры сгорания для нестационарного и стационарного режимов работы энергетической установки. Выявлена и показана количественная связь между описанными топологическими зонами, их трансформацией и конвективным теплообменом в камере в виде критериальных соотношений.

- Выявлены, проанализированы и систематизированы локальные пространственные топологические структуры, формируемые в камерах сгорания энергетических установок конкретных конструктивных схем, при работе установок на стационарном режиме. Описаны и обоснованы расположения и трансформации выявленных локальных топологических

структур при изменении геометрии канала массоподвода. Получены плотности теплового потока в выявленных пространственных топологических зонах.

- Выявлены и описаны режимы топологических неустойчивостей и срыва течений, реализуемые в каналах и трактах энергетических установок с массоподводом на нестационарных режимах работы. Описаны локальные топологические неустойчивости, формирование которых предшествует перестройке потока в камере сгорания.

- Проведено сравнение локально-временных топологических зон для квазистационарного и нестационарного режимов работы энергетических установок. Показана корреляция результатов моделирования в рамках квазистационарного подхода с результатами расчетов, выполненных в рамках нестационарного подхода.

- На нестационарных режимах работы энергетических установок выявлена трансформация топологических особенностей вблизи непроницаемых поверхностей, реализуемая в виде перехода из устойчивой конфигурации в неустойчивую, сопровождаемая резким ростом теплового потока.

- Получены временные зависимости изменения коэффициента теплоотдачи в локальных пространственно-временных областях повышенного теплообмена, справедливые при функционировании энергетической установки на нестационарных режимах. Построены критериальные уравнения для оценки нестационарного конвективного теплообмена (числа Нуссельта) в выявленных и описанных локально-топологических зонах повышенного теплообмена.

**Теоретическая и практическая значимость результатов исследований.** Разработанный автором обобщенный подход, методология, алгоритмы исследования процессов нестационарного конвективного теплообмена в каналах сложной формы с массоподводом и полученные результаты могут быть использованы при проектировании камер сгорания энергетических установок для расчета теплового состояния конструктивных элементов и расчета толщины теплозащитных покрытий, что позволит уменьшить сроки проектирования изделий.

**Достоверность и обоснованность** полученных автором результатов обеспечивается использованием при построении моделей фундаментальных законов сохранения, применением апробированных методик решения, согласованностью результатов расчетов с известными экспериментальными данными и решениями, полученными другими авторами.

**Автореферат** в полной мере отражает содержание диссертации, в нем последовательно раскрыты поставленные цели и задачи исследования, представлены основные результаты работы, сформулированы положения, выносимые на защиту. Результаты и выводы в автореферате соответствуют поставленным целям исследования.

По работе имеется ряд **вопросов и замечаний**:

1. Автор привела в списке литературы около 400 источников. Однако, во введении и других разделах ссылки на литературу, подчас, включают в себя более 10-ти источников. Для примера, в разделе 1.2.4. указано: «Известен широкий ряд экспериментальных исследований процессов теплообмена в технических устройствах различной степени сложности [11, 98, 127, 129–131, 171, 182, 240, 242, 336, 338, 344, 352, 361, 363, 365, 366, 369, 371, 374, 376, 391, 395]». Полагаем, что такой анализ литературы выглядит поверхностным. С нашей точки зрения, анализ литературы следовало бы сделать более четким, привязанным к конкретным задачам и конфигурациям, исследованным в работе.



2. Рисунок 2.1 повторяет рисунок 1.1. На рисунке 2.1 не обозначена заглушка 3 из последующего описания. Кажется, рисунок не соответствует последующему описанию.
3. Автор в начале диссертации приводит список основных обозначений и, в дальнейшем, не разъясняет формулы. Хотя некоторые формулы, где много переменных, не помешало бы сопроводить обозначениями. Например, система уравнений 2.1.-2.5 содержит переменную  $k_{ii}$ , которая не приведена в списке обозначений. Некоторые обозначения неправильные, например:  $e_0$  – начальное положение поверхности массоподвода, а  $e$  – площадь поверхности массоподвода. Но  $e$  – это, судя по всему, положение поверхности горения.
4. Система уравнений 2.29, за исключением последней формулы, повторяет систему 2.9, но выше упомянута формула 2.3. Здесь нужно было сослаться на систему 2.9 и дополнить ее формулой для массоподвода.
5. В системе уравнений 2.24 показатель степени  $\phi$  в плоской постановке должен быть равен нулю.
6. На стр. 71 указано, что «Наиболее информативным, с точки зрения оценки корректности используемых схем, является вычисление параметров на границе контактного разрыва (рис. 2.7)». Однако на рис. 2.7 показаны распределения давления и скорости, на которых контактного разрыва нет.
7. На стр. 75-76 описан метод Рунге-Кутты для аппроксимации по времени и далее указано, что «...наибольшее распространение для решения задач нестационарной газодинамики получил модифицированный метод Эйлера второго порядка точности». Следует отметить, что модифицированный метод Эйлера второго порядка точности – это частный случай методов Рунге-Кутты.
8. В пп. 2.6, где исследуется влияние модели турбулентности, первый тестовый пример (рис. 2.8) решается в трехмерной формулировке. Здесь можно было ограничиться осесимметричной постановкой.
9. В выводах к главе 2 указано, что «...замыкание осредненной системы уравнения будет строиться на основе модели турбулентности transition SST». Однако в последующих главах везде используется  $k-\omega$  SST модель турбулентности Ментера. Как объясняется это противоречие?
10. В 3-й главе на стр. 110-111 указано, что «...применение численных методов для моделирования газодинамических и теплофизических процессов в КС ЭУ требует обязательной верификации и валидации на экспериментальных данных. В силу чего, применение методик вычислительного эксперимента на этапах разработки новых изделий является не целесообразным». Но такое утверждение противоречит всей идеологии диссертации. Здесь требуется разъяснение автора.
11. Не понятно в рамках какого подхода сделан расчет коэффициента теплоотдачи, служащий обоснованием применимости допущения гомогенности свойств рабочего газа представленный на рис. 4.2.
12. При сопоставлении расчетных и экспериментальных данных по коэффициенту теплообмена данные приводятся в нормированном виде (например, рис. 4.13). Как количественно соотносятся максимумы коэффициента теплообмена в расчете и эксперименте?

13. Следует отметить, что при представлении цветных картин полей различных параметров (например, рис. 4.30 и др.) течения, автор не приводит цветовой шкалы величины этих параметров.
14. В табл. 4.2, где приведено сравнение касательных напряжений, полученное в результате теоретической оценки и, непосредственно, в трехмерном расчете, величина напряжения различается на два порядка. Как автор объясняет такое различие? В какой точке рассчитывается напряжение?
15. На стр. 183-184 два раза повторяется абзац «Полученные распределения коэффициента теплоотдачи (рис. 4.71) показывают, что применение канала звездообразной формы поперечного сечения с треугольной формой лучей компенсаторов приводит к интенсификации процессов теплообмена вблизи утопленного сопла (рис. 4.71,б). При этом локальные максимумы коэффициента теплоотдачи соответствуют положению особых точек, определяемых геометрией компенсаторов».
16. Для каждой расчетной задачи автор многократно повторяет однотипные граничные условия. Можно было ограничиться ссылкой на эти условия и приводить только изменяющиеся параметры.
17. По результатам расчетов, изложенным в 4-й и 5-й главах можно высказать следующее общее замечание. При переходе от одной расчетной конфигурации к другой автору следовало бы более подробно останавливаться на обосновании выбора той или иной расчетной конфигурации.

Отмеченные замечания не снижают общую положительную оценку диссертационной работы.

**Заключение.** Диссертация Черновой А.А. соответствует отрасли "технические науки", а ее содержательная часть и полученные результаты соответствуют паспорту специальности 1.1.9. Механика жидкости, газа и плазмы по областям исследований "Ламинарные и турбулентные течения" (п.4), "Аэродинамика и теплообмен летательных аппаратов" (п.10), "Гидродинамическая устойчивость" (п.14). Диссертационная работа Черновой А.А. "Внутренняя газодинамика и топологическая структура локальных пространственно-временных зон с повышенным теплообменом в камере сгорания энергетических установок" является завершенной научно-квалификационной работой, в которой на основании выполненных автором исследований разработаны теоретические положения, совокупность которых можно квалифицировать как научное достижение в области создания методологических основ прогноза теплового состояния конструктивных элементов камеры сгорания энергетической установки.

Диссертация удовлетворяет требованиям пп. 9, 11 "Положения о присуждении ученых степеней", предъявляемым к докторским диссертациям, а ее автор Чернова Елена Алексеевна заслуживает присуждения ученой степени доктора технических наук по специальности 1.1.9. Механика жидкости, газа и плазмы.

Диссертация обсуждена и одобрена на Общеинститутском семинаре ИТПМ СО РАН «Теоретическая и прикладная механика» под председательством чл.-корр. РАН Шиплюка А.Н. и академика РАН Фомина В.М. (Протокол № 1 от 21.01.2022)



Отзыв составили:

заведующий лабораторией №12 «Волновых процессов в ультрадисперсных средах»

ИТПМ СО РАН, к.ф.-м.н.

630090, г. Новосибирск, ул. Институтская, 4/1 (383) 330-85-38, bedarev@itam.nsc.ru  
(01.02.05 – Механика жидкости, газа и плазмы)

Бедарев Игорь Александрович

Я, Бедарев Игорь Александрович, даю согласие на обработку моих персональных данных, связанную с защитой диссертации и оформлением аттестационного дела А.А. Черновой.

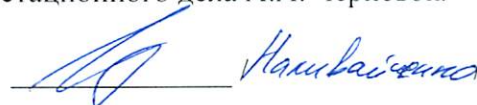
 / Бедарев И.А.

заведующий лабораторией №5 «Аэрогазодинамики больших скоростей» ИТПМ СО РАН, к.т.н.

630090, г. Новосибирск, ул. Институтская, 4/3 (383) 330-18-95, denis@itam.nsc.ru  
(01.02.05 – Механика жидкости, газа и плазмы)

Наливайченко Денис Геннадьевич

Я, Наливайченко Денис Геннадьевич, даю согласие на обработку моих персональных данных, связанную с защитой диссертации и оформлением аттестационного дела А.А. Черновой.

 / Наливайченко Д.Г.

23.05.2022

Подписи Бедарев И.А. и Наливайченко Д.Г. удостоверяю:

Ученый секретарь ИТПМ СО РАН  
К.ф.-м.н.

630090, г. Новосибирск, ул. Институтская, 4/1 (383) 330-42-79, adm@itam.nsc.ru



Кратова Юлия Владимировна



### Сведения об организации

Федерального государственного бюджетного учреждения науки «Институт теоретической и прикладной механики им. С.А. Христиановича Сибирского отделения Российской академии наук»

Адрес: 630090, г. Новосибирск, ул. Институтская, 4/1.

Тел. (383) 330-42-68.

Email: admin@itam.nsc.ru

Web: http://itam.nsc.ru/