

## **ОТЗЫВ**

**официального оппонента о диссертации**

**Черновой Алены Алексеевны**

**«Внутренняя газодинамика и топологическая структура локальных пространственно-временных зон с повышенным теплообменом в камере сгорания энергетических установок», представленной на соискание ученой степени доктора технических наук по специальности 1.1.9 – Механика жидкости, газа и плазмы**

**Актуальность исследований.** Жизнедеятельность человека сопряжена с понятием «энергия». С этим понятием мы знакомимся в быту, а затем постигаем научное значение этого термина. Как известно, все фундаментальные законы природы описываются посредством интегральных (слабая формулировка) или дифференциальных (сильная формулировка) уравнений, которые определяют сохранение и преобразование энергии. В настоящее время к проблемам добычи, получения и преобразования тепловой энергии приковано пристальное внимание специалистов. Это обусловлено всплеском так называемом альтернативной и «зеленой» энергетики.

Несмотря на очевидность и необходимость поиска дополнительных источников энергии важной задачей является модификация и поиск новых физических принципов для использования традиционных энергетических установок, которые применяются, например, в котельном оборудовании, в камерах сгорания и смешения в химической и атомной промышленности в различных двигательных агрегатах и установках.

Принципиальная сложность решения задач тепломассообмена обусловлена нестационарными процессами переноса энергии в трехмерном пространстве, что сильно затрудняет качественное и количественное исследование уравнений Навье-Стокса и их модификаций для сжимаемых сред. Проведение таких исследований всегда актуально и своевременно, поскольку интегрирование уравнений движения в этом случае всегда объясняется важностью прикладных исследований в механике деформируемых жидких и газообразных сред. Таким образом, актуальность диссертации А.А. Черновой не может вызывать сомнений.

Диссертационная работа А.А. Черновой посвящена теоретическому исследованию нестационарных трехмерных (пространственных) сжимаемых турбулентных течений теплопроводного газа в камере сгорания энергетических установок, имеющих массоподводящие каналы сложной формы поперечного сечения.

Для науки будет востребовано новое научное направление, предложенное автором диссертации, для исследования нестационарного конвективного теплообмена в каналах сложной формы с массоподводом и обнаружение и изменение локально-временных зон повышенного конвективного теплообмена на непроницаемых поверхностях камеры сгорания, которое заключается не только в выводе новых инженерных расчетных формул, но и в нетрадиционном исследовании гидродинамической устойчивости аппаратом математической теории катастроф.

**Структура и содержание диссертации.** Диссертация объемом 313 страниц состоит из введения, шести глав, заключения и библиографического списка, состоящего из 395 наименований. В диссертационной работе содержится 177 рисунков и 15 таблиц.

Во **введении** автором диссертационной работы обосновывается актуальность выбранной темы, сформулированы цели и задачи исследований, указана научная новизна и практическая значимость научных результатов, выносимых на защиту, приведены сведения об апробации работы, публикациях, структуре и объёме диссертации.

В **первой** главе диссертации представлен обзор литературы по теме диссертации. Автором на основе анализа большого числа библиографических источников приведена классификация течений рабочего тела, реализуемых в проточных трактах и застойных областях камеры сгорания энергетической установки. Показано, что для проектирования камер сгорания энергетических установок необходимо уметь вычислять распределения газодинамических полей в трактах энергетических установок.

Кроме того, автором диссертационной работы произведен библиографический обзор методов исследования внутрикамерных процессов в камерах сгорания энергетических установок. Показано, что процессы конвективного теплообмена в камерах сгорания остаются исследованными неполностью из-за сложности уравнений, описывающих конвекцию в устройствах.

Во **второй** главе приведена новая физическая и математическая постановка задачи сопряженного теплообмена в камерах сгорания

энергетических установок, позволяющая уточнить распределение тепловых потоков. Представлены и проанализированы существующие подходы к математическому моделированию физических процессов, протекающих в камерах сгорания энергетических установок при различных режимах работы. Приведен и обоснован квазистационарный подход для исследования процессов в камере, протекающих на стационарном участке работы установки, приведены ограничения и определена область применимости. Показано, что для решения нестационарных трехмерных конвективных уравнений газовой динамики лучше использовать метод Эйлера второго порядка точности по времени и метод контрольных объемов для дискретизации исходной системы уравнений по пространственным координатам. Приведены результаты «машинного», сеточного тестирования численных схем и алгоритмов, показана справедливость применения схем второго порядка для конвективных слагаемых для аппроксимации диффузионных слагаемых уравнений сохранения.

В **третьей** главе рассмотрены различные методы для расчета и оценивания теплофизических параметров в камерах сгорания энергетических установок. Разработан алгоритм использования топологических методов и аппарата математической теории катастроф. Разработан подход для исследования нестационарных процессов конвективного теплообмена в каналах с массоподводом. Новый метод основан на обобщении и модификации известных топологических методов гидродинамики. Показано, что новый метод применим для исследования внутрикамерных процессов в энергетических установках для интерпретации расчетных данных по расчету структуры потока газа в проточных трактах и застойных областях.

В **четвертой** главе рассматриваются проблемы и способы многовариантного математического моделирования квазистационарных сжимаемых пространственных турбулентных течений и тепловых режимов, в проточных трактах, застойных областях и предсопловом объеме камер сгорания энергетических установок с различными (четырьмя) компоновками. Для каждой компоновки сформулированы граничные условия. На поверхностях массоподвода задаются температура и расход рабочего тела; на твердых непроницаемых поверхностях задаются условия прилипания и непротекания; – между границей твердого тела и газом ставится граничное условие IV рода; на выходной границе задаются мягкие граничные условия; на внешних поверхностях задаются условия III рода. При проведении расчетов было установлено, что при

осесимметричном положении поворотного управляющего сопла в канале массоподвода звездообразной формы поперечного сечения наблюдается формирование парных симметричных вихревых структур, которые с потоком рабочего тела поступают в сопло. Взаимодействие данных вихревых структур с надсопловым потоком приводит к его перестройке в предсопловом объеме, отрыву потока вблизи непроницаемого торца канала массоподвода и к интенсификации процессов теплообмена вблизи непроницаемого торца. Предложен новый подход к оценке интенсивности теплообмена вблизи непроницаемых поверхностей камеры сгорания, основанный на предварительном анализе топологических особенностей течения газа вблизи теплонапряженных поверхностей. Обосновано применение зависимости числа Нуссельта в зависимости от числа Прандтля и Рейнольдса по обобщенному степенному закону.

**Пятая** глава посвящена разработке методов решения задач для нестационарных газодинамических и теплофизических процессов, протекающих в камерах сгорания энергетических установок. Установлена качественная и количественная оценка изменения топологических особенностей структуры газодинамического потока в предсопловом объеме при изменении геометрии канала массоподвода на переходных режимах (для участков подъема и сброса давления). Было убедительно показано, что сопоставление результатов математического моделирования при квазистационарном подходе с расчетами, выполненными при нестационарном описании находится в удовлетворительном (теоретическом и инженерном) соответствии. Приведены графические зависимости от времени изменения локальных коэффициентов подобия теплоотдачи в областях особых точек и локальных максимумов интенсивности. Выведены соотношения для оценки теплового потока в областях топологических особенностей на поверхности соплового дна и вблизи входа потока в газоходы. Кроме того, убедительно доказана корректность предложенного в главе нового подхода для исследования и оценки теплового состояния элементов конструкции энергетических установок при нестационарном подходе, с учетом движения поверхности массоподвода и на переходных режимах.

В заключительной, **шестой**, главе сформирована методика оценки интенсивности теплообмена в локальных пространственно-временных зонах, в которых наблюдается интенсивный теплообмен на основе подхода, предложенного автором диссертации. Составлена база данных критериальных зависимостей, учитывающих влияние следующих факторов: конструктивные особенности энергетических установок,

влияние геометрии массопотока, нестационарность рабочих процессов и учет времени переходных процессов. Разработана методика оценки интенсивности теплообмена, основанная на обобщении топологических особенностей структуры потока с выделением локальных пространственно-временных зон повышенного теплообмена.

**В заключении** рукописи приведены выводы по результатам диссертационного исследования А.А. Черновой.

**Научная новизна.** В представленной к защите диссертации на соискание ученой степени доктора технических наук в качестве основных научных результатов можно выделить:

1. Впервые установлены и описаны локальные пространственно-временные топологические зоны повышения тепловых потоков в камерах сгорания энергетических установок различных конструктивных схем.
2. Впервые установлены закономерности распределения тепловых потоков вблизи теплонапряженных поверхностей камеры сгорания для нестационарного и стационарного режимов работы энергетических установок посредством критериальной связи между различными факторами.
3. Впервые установлены и описаны локальные топологические структуры, их расположение и трансформация в зависимости от изменения геометрии канала массопотока для конструктивных схем энергетических установок, работающих на стационарном режиме.
4. Впервые для нестационарных режимов работы энергетических установок для определенных классов конструктивных схем установлены локальные топологические структуры, изучена их трансформация, исследована локальная топологическая неустойчивость, которая обусловлена гидродинамической и конвективной перестройкой потока в камере сгорания.
5. Впервые проведено сравнение локально-временных топологических зон для квазистационарного и нестационарного режимов работы энергетических установок. Установлена достоверная корреляция результатов математического моделирования при квазистационарном подходе с численными расчетами нестационарного способа описания гидродинамических процессов.

**Соответствие паспорту специальности.** Научные исследования, представленный в диссертации, соответствует паспорту специальности 1.1.9 – Механика жидкости, газа и плазмы. Оппонент выражает согласие с

автором рукописи А.А. Черновой, что наиболее точно и полно отражают тему исследований следующие пункты паспорта специальности:

1. Ламинарные и турбулентные течения.
3. Аэродинамика и теплообмен летательных аппаратов.
5. Гидродинамическая устойчивость.

**Научная и практическая значимость работы.** В диссертационной работе предложен новый подход для исследования процессов нестационарного конвективного теплообмена в каналах сложной формы с массоподводом. Разработанные новые методы решения задач являются обобщением и модификацией известных топологических методов гидродинамики (методов топологического интегрирования уравнений движения сред) для обнаружения и описания пространственно-временных зон теплообмена для диагностики и прогнозирования температурного поля элементов конструкций камеры сгорания энергетических установок.

Разработанные в диссертационной работе новые теоретические парадигмы нестационарного конвективного теплообмена могут быть применены при проектировании различных энергетических установок при моделировании и задании определенного функционирующего теплового состояния конструктивных элементов и расчета толщины теплозащитных покрытий. Это позволит сократить время производства ответственных промышленных энергетических объектов со снижением себестоимости, повышением качества и снижением аварийности.

**Достоверность и обоснованность результатов, представленных в диссертации** результатов обеспечивается использованием фундаментальных законов сохранения гидродинамики и нестационарного теплообмена, записанных в виде уравнений гидродинамики и конвекции (математической физики), применением классических и модифицированных хорошо зарекомендовавших себя численных методов интегрирования уравнений движения деформируемых сред (уравнений Навье-Стокса и Обербека-Буссинеска), тщательной верификацией и валидацией численных схем и алгоритмов на экспериментальных данных и теоретических результатах, полученных другими исследователями.

Результаты, представленные в диссертационной работе А.А. Черновой, прошли апробацию, что отрадно видеть, на множестве всероссийских и международных конференциях и 5 научных семинарах, опубликованы в 61 печатной работе, 21 из которых в научных статьях, входящих в Перечень ВАК и 23 являются статьями, опубликованными в рецензируемых научных журналах, индексируемых в международных базах данных Web of Science и Scopus.

### **Соответствие автореферата содержанию диссертации.**

Автореферат достаточно ясно, полно и правильно отражает структуру, основные результаты и выводы диссертации.

**Замечания по диссертации и автореферату.** При ознакомлении с диссертационной работой и авторефератом диссертации не возникает существенных замечаний по представлению материала. Довольно редкое качество присутствует у соискателя ученой степени: А.А. Чернова подробно объясняет новые научные результаты. В диссертации и автореферате имеется значительное количество неточностей и опечаток, не влияющих на восприятие научных результатов. Тем не менее отмечу некоторые дискуссионные и технические моменты, возникшие при ознакомлении с диссертацией и авторефератом:

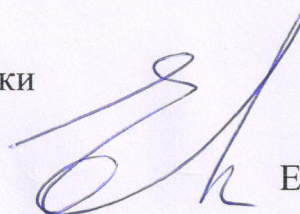
1. Интересно, что шифр специальности на первой странице диссертации и автореферата оформлен по-разному. Это является опечаткой или изменением правил, произошедших между публикацией диссертации и авторефератом в открытом доступе?
2. Во второй главе не понятен выбор моделей турбулентности для их сравнения между собой. Какая из них оказалась лучше? По каким причинам отдается предпочтение: по физическим или по вычислительным?
3. При оценке сеточной сходимости непонятны способы доказательства и каков эталон, чтобы утверждать об удовлетворительном численном решении нелинейных задач гидрогазодинамики?
4. В тексте диссертации и автореферат мелькает часто выражение «обобщенный подход». Необходимо было более четко пояснить в чем модификация и обобщение. Хотелось бы узнать от автора диссертации о каждом обобщении известных подходов, анонсированных в диссертации.

Высказанные замечания носят рекомендательный характер и не влияют на понимание рецензентом рукописи. Отмечу, что рецензент оценивает чрезвычайно положительно колоссальный объем исследований, но при чтении текста сложилось впечатление о некой поспешности при изложении материала.

**Заключение.** Диссертационная работа Черновой Алены Алексеевны «Внутренняя газодинамика и топологическая структура локальных пространственно-временных зон с повышенным теплообменом в камере сгорания энергетических установок» соответствует требованиям пунктам 9-14 Постановления Правительства РФ 842 от 24 сентября 2013 г. «О порядке присуждения ученых степеней» с изменениями и дополнениями

№335 от 30 июля 2014 г., 21 апреля, 2 августа 2016. Автор диссертации достоин присуждения ученой степени доктора технических наук по специальности 1.1.9 – Механика жидкости, газа и плазмы.

Доктор физико-математических наук  
специальности 01.02.05 (1.1.9) – Механика жидкости, газа и плазмы,  
Главный научный сотрудник,  
заведующий сектором  
нелинейной вихревой гидродинамики  
ФГБУН Институт машиноведения  
имени Э.С. Горкунова УрО РАН



Е.Ю. Просвирыков

20.05.2022 года

Почтовый адрес: 620049, г. Екатеринбург, ул. Комсомольская, 34,  
ФГБУН Институт машиноведения имени Э.С. Горкунова УрО РАН.  
Номер телефона: +7(343)374-20-38, +79826545223.  
E-mail: [evgen\\_pros@mail.ru](mailto:evgen_pros@mail.ru)

Подпись Евгения Юрьевича Просвирыкова заверяю:  
ученый секретарь  
ФГБУН Институт машиноведения  
имени Э.С. Горкунова УрО РАН



А.М. Поволоцкая