

Чернова Алена Алексеевна

**Внутренняя газодинамика и топологическая  
структура локальных  
пространственно-временных зон с повышенным  
теплообменом в камере сгорания  
энергетических установок**

Специальность 1.1.9. «Механика жидкости, газа и плазмы»

**АВТОРЕФЕРАТ**

диссертации на соискание ученой степени

доктора технических наук



## Общая характеристика работы

**Актуальность темы исследования и степень ее разработанности.** Энергетические установки представляют собой широкий круг изделий различного назначения, объединенных по принципу функционирования на основе процессов трансформации энергии из одного вида в другой. К данному классу устройств могут быть отнесены как элементы котельного оборудования, камеры сгорания и смешения химической и атомной промышленности, так и различные двигательные установки. При этом работа любых энергетических установок связана как с процессами горения, так и, как следствие, с теплофизическими процессами. Вследствие чего актуальным остается формулирование обобщенных подходов к исследованию процессов нестационарного конвективного теплообмена в проточных трактах и застойных областях камер сгорания таких устройств.

К классу энергетических установок относятся и реактивные, в том числе ракетные двигатели, для которых одной из приоритетных задач является оптимизация/проектирование конструкции ракетного двигателя с целью повышения его весового совершенства. Также актуальной остается задача существенного улучшения энергетических свойств горючих веществ. Вопросы повышения химической кинетики горючих составов освещены в работах академика РАН Г. В. Саковича, академика РАН В. Е. Панина. В работах показано, что улучшение энергетических свойств горючих смесей химическими методами имеет определенный предел. Поэтому актуальным остается разработка новых видов энергетических установок с конструктивно обусловленным повышением весового совершенства.

Теория и практика проектирования энергетических установок (ЭУ), в том числе твердотопливных ракетных двигателей, рассмотрены в работах академиков РАН А. М. Липанова, Ю. С. Соломонова, В. М. Фомина, В. Е. Алемасова, члена-корреспондента РАН М. И. Соколовского, профессоров Р. Е. Соркина, Б. А. Райзберга, Б. Т. Ерохина, С. Д. Панина, Д. И. Абугова, Б. В. Орлова, Г. Ю. Мазинга, А. М. Губертова, А. В. Алиева, И. Х. Фахрутдинова, А. В. Котельникова, Б. И. Ларионова, В. Ф. Приснякова, А. А. Шишкова, В. Н. Вилюнова, С. Д. Ваулина, Ф. Ф. Спиридонова.

В трудах приведены инженерные методики расчета рабочих процессов в камерах сгорания (КС) силовых энергетических установок, полученные на основании анализа экспериментальных данных для конкретных конструктивных исполнений двигателей. Экспериментальные работы по исследованию теплообмена в камерах сгорания двигателей при их работе на расчетных режимах малочисленны. В инженерных расчетах используются эмпирические зависимости, полученные для иных объектов исследования.

Экспериментальные исследования внутренней газодинамики и теплообмена представлены в работах академиков РАН В. А. Алексеенко, А. С. Коро-

теева, В. Е. Алемасова, профессоры А. М. Губертова, А. А. Шишкова, В. Н. Емельянова, А. А. Кураева, Б. В. Румянцева, С. Д. Панина, В. И. Терехова и их учеников, а также в работах Б. М. Меламеда, В. Н. Зайковского. Представленные результаты получены для конкретных конструктивных схем камер сгорания и каналов с массоподводом и не могут быть распространены на другие типы конструкций без предварительной валидации. Практически отсутствуют экспериментальные результаты по исследованию нестационарного конвективного теплообмена в проточных трактах и предсопловом объеме (ПО) КС ЭУ.

Методам численного моделирования внутрикамерных процессов в энергетических установках посвящены работы академиков РАН А. М. Липанова, В. Е. Алемасова, профессоры В. М. Дворецкого, Ю. Н. Васенина, А. Д. Рычкова, Г. Р. Шрагера, В. Н. Емельянова, С. А. Исаева, В. А. Тененева, Б. И. Ларионова, В. К. Волкова, А. В. Алиева, А. Ф. Сальникова, М. Ю. Егорова, Ф. Ф. Спиридонова, Г. А. Глебова. Подробно освещены вопросы построения численных методов и алгоритмов решения уравнений газовой динамики, применительно к процессам, протекающим в КС, особое внимание уделено аспектам численного разрешения турбулентных потоков и акустических колебаний, реализующихся в камере сгорания, газоходах и соплах. В работах приводится оценка корректности и целесообразности применения различных моделей газодинамических процессов к исследованию рабочих процессов в КС ЭУ.

Результаты численного моделирования пространственной газодинамики и конвективного теплообмена в проточных трактах КС ЭУ приведены в работах профессоры В. Н. Емельянова, В. А. Тененева, Б. Я. Бендерского, В. К. Волкова, А. В. Алиева, М. Ю. Егорова, Г. А. Глебова. Подробно освещены вопросы возникновения и развития акустических колебаний и продольных колебаний в энергетической установке и особенности газодинамики в каналах сложных форм, в том числе в каналах с массоподводом. В работах профессора В. Н. Емельянова даны оценки тепловых потоков.

Таким образом, вопросы учета предистории потока, газодинамической и теплофизической обстановки в проточных трактах и застойных зонах камеры сгорания, включая предсопловый объем, для адекватной оценки тепловых потоков вблизи конструктивных элементов остаются недостаточно изученными, а отсутствие обобщенного подхода к исследованию процессов нестационарного конвективного теплообмена в каналах сложной формы с массоподводом является актуальной проблемой.

**Объектом исследования** является камера сгорания энергетической установки.

**Предметом исследования** являются нестационарные пространственные турбулентные сжимаемые течения и конвективный теплообмен в камере сгорания энергетических установок с массоподводящими каналами сложной

формы поперечного сечения.

### **Цель диссертационной работы**

- формирование обобщенного подхода к исследованию процессов нестационарного конвективного теплообмена в каналах сложной формы с массоподводом;

- выявление, локализация и анализ трансформации локально-временных зон повышенного конвективного теплообмена на непроницаемых поверхностях камеры сгорания, для определения максимальных плотностей теплового потока.

### **Задачи исследования**

1. Построение, реализация, апробация и верификация математических моделей, описывающих процессы сопряженного теплообмена, протекающие в камере сгорания энергетической установки, включая вопросы оценки корректности используемых допущений, физических и математических моделей.

2. Многовариантное математическое моделирование процессов внутренней газодинамики и сопряженного теплообмена в камере сгорания на стационарном участке работы (в рамках пространственной квазистационарной постановки):

- многосопловой ЭУ различных конструктивных схем;

- ЭУ с утопленным соплом с каналами массоподвода различных форм поперечного сечения;

- в компенсационной (заманжетной) полости КС ЭУ;

3. Численное исследование нестационарной пространственной газодинамики и конвективного теплообмена в КС ЭУ с подвижными поверхностями подвода массы. Уточнение взаимосвязи топологических особенностей структуры потока рабочего газа и распределений плотности теплового потока.

4. Решение нестационарной пространственной задачи сопряженного теплообмена в КС ЭУ при изменении режима ее работы (переходные участки и участки регулирования).

5. Выявление и анализ устойчивых и неустойчивых локальных топологических зон, формирование которых предшествует перестройке потока в исследуемой области без влияния дополнительных возмущающих факторов.

6. Установление связи между конструктивными особенностями камеры сгорания энергетической установки и локальными характеристиками газодинамических и теплофизических процессов, протекающих в ней.

7. Выявление положения и трансформации локальных пространственно-временных зон повышенного теплообмена на основе анализа топологических особенностей структуры потока рабочего газа в КС различных конструктивных схем.

8. Разработка проблемно-ориентированного программного комплекса модульного вида для оценки значений локальных безразмерных коэффициентов

теплоотдачи в выявленных локальных пространственно-временных зонах повышенного теплообмена в КС для различных конструктивных схем энергетических установок с каналами массоподвода сложных форм.

**Методы исследования, достоверность и обоснованность результатов.** В диссертации используются методы моделирования внутрикамерных процессов в ЭУ, основанные на приближенном решении нестационарной осредненной по Фавру и Рейнольдсу системы уравнений математической физики (система уравнений сохранения, дополненная нестационарным уравнением теплопроводности, уравнением состояния Менделеева-Клапейрона и уравнением Сазерленда), замкнутой двухзонной моделью турбулентности Ментера. Решение полученной системы строится методом контрольных объемов с учетом поправки Rhie-Chow для связывания скорости и давления, дискретизация по времени производится неявным методом Эйлера. Для разрешения невязких потоков применяется противопоточная схема 2-го порядка точности, а для вязких потоков – схема центральных разностей 2-го порядка точности. Система разностных уравнений решается алгебраическим многосеточным методом, для ускорения сходимости которого используется метод сопряженных градиентов.

Достоверность и обоснованность полученных в диссертационной работе результатов обеспечена использованием фундаментальных законов сохранения, выраженных в уравнениях математической физики, применением апробированными методами их решения и подробной верификацией и валидацией численных схем и алгоритмов на экспериментальных данных и теоретических результатах, полученных другими авторами.

**Научная новизна** диссертационного исследования и результатов, полученных лично автором, заключаются в следующем:

1. Впервые выявлены и описаны локальные пространственно-временные топологические зоны повышения тепловых потоков в КС ЭУ различных конструктивных схем.

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

3. Для конкретных конструктивных схем энергетических установок, при их работе на стационарном режиме, впервые выявлены и описаны локальные топологические структуры, их расположение и трансформация в зависимости от изменения геометрии канала массоподвода. Получены плотности теплового потока в выявленных пространственных топологических зонах.

4. Впервые для нестационарных режимов работы ЭУ конкретных конструктивных схем выявлены локальные топологические структуры и их транс-

формация, в том числе описаны локальные топологические неустойчивости, формирование которых предшествует перестройке потока в КС.

5. Впервые 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.

6. Впервые на нестационарных режимах работы ЭУ выявлена трансформация топологических особенностей вблизи контактных поверхностей, реализуемая в виде перехода из устойчивой конфигурации в неустойчивую, сопровождаемая резким (в 3.2 и более раза) ростом теплового потока.

7. Впервые при проведении численного эксперимента на нестационарных режимах получены временные зависимости изменения коэффициента теплоотдачи в центральной узловой точке и областях входа потока в патрубки. Построены критериальные уравнения, справедливые для оценки нестационарного теплообмена при  $Sh \geq 7.5$  для оценки числа Нуссельта в центральной особой точке, периферийных седловых точках на сопловом дне и в области входа потока рабочего газа в патрубок.

**Соответствие паспорту специальности** Содержание диссертации соответствует паспорту специальности 1.1.9. «Механика жидкости, газа и плазмы», в частности, следующим областям исследований:

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

**Научная значимость работы.** Предложен обобщенный подход к исследованию процессов нестационарного конвективного теплообмена в каналах сложной формы с массоподводом, основанный на применении топологических методов гидродинамики для выявления и описания пространственно-временных зон повышенного теплообмена для последующего прогноза теплового состояния элементов конструкций камеры сгорания энергетической установки.

**Практическая значимость.** Полученные в работе результаты могут быть использованы при проектировании ЭУ для расчета теплового состояния конструктивных элементов и расчета толщины теплозащитных покрытий, что позволит уменьшить сроки проектирования изделий. В частности, полезными для практики являются:

1. Предложенный 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.

2. Применение предложенного обобщенного подхода к исследованию про-

цессов нестационарного конвективного теплообмена в каналах сложной формы с массоподводом для оценки интенсивности теплообмена позволяет повысить точность оценки безразмерных чисел Нуссельта в пространственно-временных зонах более чем на 50%, по сравнению с инженерными методами, основанными на применении формул Эккерта и Крауссольда.

3. Впервые для рабочих процессов в КС ЭУ проведен анализ применимости RANS моделей турбулентности для замыкания системы уравнений сохранения. Проведена валидация наиболее распространенных моделей турбулентности применительно к задачам сопряженного теплообмена на известных экспериментальных данных. Даны рекомендации по применению рассмотренных моделей турбулентности при расчете рабочих процессов в КС ЭУ. 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%.

4. Показана возможность корректного применения квазистационарного подхода для исследования газодинамики и конвективного теплообмена в КС ЭУ при работе установки на нестационарных режимах. Выявлены временные диапазоны стабилизации течений рабочего газа в камере при изменении режима работы ЭУ.

5. Выявлено, что применение канала звездообразной формы поперечного сечения с треугольной формой лучей компенсаторов приводит к интенсификации процессов теплообмена вблизи утопленного сопла: показано, что тепловые потоки в области топологических особенностей на входной поверхности утопленного сопла, при применении треугольной формы компенсаторов, возрастают на 47% и более, по сравнению с другими формами компенсаторов.

**На защиту выносятся** следующие основные результаты и положения:

1. Результаты многовариантного математического моделирования процессов сопряженного теплообмена в камере сгорания на стационарном участке работы (в рамках пространственной квазистационарной постановки):

- многосопловой ЭУ различных конструктивных схем;
- ЭУ с утопленным соплом и зарядами различных форм поперечного сечения;
- в компенсационной (заманжетной) полости КС ЭУ;

2. Результаты расчета конвективного теплообмена в КС ЭУ различных конструктивных схем с учетом изменения геометрии каналов массоподвода в рамках квазистационарного подхода.

3. Результаты численного исследования пространственной нестационарной газодинамики и конвективного теплообмена в КС многосопловой ЭУ при



учете движения поверхности подвода массы . Сопоставление топологических особенностей структуры течения рабочего газа и распределений теплового потока, полученных в рамках нестационарного подхода, с результатами квазистационарных расчетов.

4. Результаты решения нестационарной задачи сопряженного теплообмена в КС ЭУ при изменении режима ее работы (переходные участки и участки регулирования) в рамках пространственной постановки.

5. 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.

6. Обобщенный подход к исследованию процессов нестационарного конвективного теплообмена в каналах сложной формы с массоподводом.

**Личный вклад.** В совместных работах постановка задачи и обсуждения основных результатов проводились совместно с соавторами работ.

Все результаты и положения, выносимые на защиту, принадлежат лично автору диссертации.

**Апробация работы.** Основные результаты работы многократно докладывались и обсуждались на следующих конференциях и семинарах: XVI Международная конференция по методам аэрофизических исследований ISMAR-2012, Новосибирск, 2012. Всероссийская научно-техническая конференция «Ракетно-космические двигательные установки», Москва, 2013. VIII Международная конференция по внутрикамерным процессам и горению в установках на твердом топливе и ствольных системах (ICOS'2014), Москва, 2014. XXXIII Сибирский теплофизический семинар, посвященный 60-летию Института теплофизики им. С.С.Кутателадзе СО РАН, Новосибирск, 2017. IX Международная конференция по внутрикамерным процессам и горению в установках на твердом топливе и ствольных системах (ICOS'2017), Москва, 2017. Всероссийская научно-техническая конференция «Ракетно-космические двигательные установки», Москва, 2018. XXV Всероссийский семинар с международным участием по струйным, отрывным и нестационарным течениям, Санкт-Петербург, 2018. XIX Международная конференция по методам аэрофизических исследований ISMAR-2018, Новосибирск, 2018. XXXV Сибирский теплофизический семинар, посвященный 75-летию Заслуженного деятеля науки РФ Терехова Виктора Ивановича, Новосибирск, 2019. IV Всероссийская научная конференция «Теплофизика и физическая гидродинамика», Ялта, 2019. X Международная конференция по внутрикамерным процессам и горению в установках на твердом топливе и ствольных системах (ICOS'2020), Ижевск, 2020. XXXVI Сибирский теплофизический семинар, посвященный 70-летию академика С.В. Алексеенко, Новосибирск, 2020. V Всероссийская научная конференция «Теплофизика и физическая гидродинамика», Ялта,

2020. XX Международная конференция по методам аэрофизических исследований ISMAR-2020, Новосибирск, 2020. Международная научная конференция по применению технологий виртуальной реальности и смежных информационных систем в междисциплинарных задачах FIT-M, Москва, 2020. VI Всероссийская научная конференция «Теплофизика и физическая гидродинамика», Севастополь, 2021. XXXVII Сибирский теплофизический семинар, посвященный Году науки и технологий Российской Федерации и 60-летию первого полёта человека в Космос, Новосибирск, 2021. Частично результаты, представленные в работе, обсуждались на заседаниях НТС и УС Ижевского государственного технического университета имени М.Т. Калашникова.

Полностью диссертация обсуждалась на научных семинарах:

- семинаре кафедры «Механика композиционных материалов и конструкций» Пермского национального исследовательского политехнического университета, руководитель семинара д.т.н., профессор А. Н. Аношкин.

- семинаре кафедры Реактивных двигателей и энергетических установок Казанского национального исследовательского технического университета им. А.Н. Туполева - КАИ, руководитель семинара д.т.н., профессор Г. А. Глебов.

- Института механики сплошных сред УрО РАН, руководитель семинара д.ф.-м.н., профессор Т. П. Любимова.

- семинаре кафедры Математического моделирования систем и процессов Пермского национального исследовательского политехнического университета, руководитель семинара д.ф.-м.н., профессор П. В. Трусов.

- объединенном заседании кафедр «Тепловые двигатели и установки» и «Ракетная техника» Ижевского государственного технического университета имени М.Т. Калашникова.

**Публикации.** По материалам диссертации опубликовано более 50 печатных работ, из них 23 в изданиях, включенных в базы данных Web Of Science и Scopus, 21 в изданиях, рекомендованных ВАК.

**Структура и объем диссертации.** Диссертация состоит из введения, шести глав, заключения и списка используемых источников. Работа изложена на 313 страницах машинописного текста, включает 15 таблиц и 177 рисунков. Список используемых источников содержит 395 наименований.

## Содержание работы

**Во введении** обоснована актуальность диссертационной работы, сформулированы цели и задачи исследования, отмечены научная новизна, практическая значимость полученных результатов, сформулированы положения, выносимые на защиту.

**В первой главе** приведена классификация реализуемых в проточных трактах и застойных областях камеры сгорания энергетической установки те-

чений рабочего тела. Отмечено, что для эффективного проектирования камер сгорания ЭУ, в частности, для выбора типа и расчета толщины теплозащитного покрытия необходима информация о распределении полей газодинамических величин в трактах ЭУ.

Дан обзор существующих методов исследования внутрикамерных процессов в КС ЭУ. Из приведенного анализа результатов экспериментальных и численных исследований газодинамики и теплообмена в проточных трактах ЭУ видно, что внутрикамерные процессы, в том числе и процессы конвективного теплообмена, реализуемые в камерах сгорания, остаются недостаточно исследованными.

Аналитический обзор показал, что вне зависимости от конструктивных особенностей силовой энергетической установки для оценки интенсивности тепловых потоков вблизи теплонапряженных элементов конструкции камеры сгорания до настоящего времени используются такие эмпирические соотношения, как формулы Крауссольда, Эккерта, Гухмана-Илюхина, Петухова-Кириллова, что подтверждает необходимость разработки нового метода оценки теплообмена в камере сгорания энергетических установок, учитывающего как конструктивные особенности ЭУ, так и пространственность реализуемых в КС течений.

**Во второй главе** приведена физическая и математическая постановка задачи сопряженного теплообмена в КС ЭУ. Проведен анализ режимов работы ЭУ и обусловленных данными режимами особенностей протекающих в КС ЭУ внутрикамерных процессов. Рассмотрены существующие подходы к математическому моделированию физических процессов, протекающих в КС ЭУ на различных режимах работы установки. Приведен и обоснован квазистационарный подход для исследования внутрикамерных процессов, протекающих на стационарном участке работы установки, приведены ограничения и оценена допустимость его использования. Показано, что для решения нестационарных пространственных уравнений газовой динамики и теплопроводности, описывающих внутрикамерные процессы в ЭУ, целесообразно применение метода Эйлера второго порядка точности для разрешения уравнений по времени, метода контрольных объемов для дискретизации исходной системы уравнений по пространству. Приведены результаты тестирования численных схем и алгоритмов, показано корректность использования схем второго порядка точности для конвективных слагаемых и функций форм для аппроксимации диффузионных слагаемых уравнений сохранения.

Показано, что газовые потоки и теплообмен при работе энергетической установки на нестационарных (переходных) режимах, как и учет влияния изменения геометрии поверхности массоподвода во времени, целесообразно исследовать в рамках нестационарного подхода.

Обоснована корректность перехода к осредненным формам уравнений

сохранения для описания реализуемого в КС пространственного сжимаемого турбулентного течения с подключением различных моделей турбулентности. Решена задача валидации RANS моделей турбулентности для решения сопряженной задачи теплообмена в проточных трактах КС ЭУ. На основании верификации расчетных данных на известных экспериментальных зависимостях показано, что для корректного моделирования внутрикамерных процессов в проточных трактах ЭУ целесообразно для замыкания осредненной системы уравнений применять двухзонную модель турбулентности SST  $k-\omega$  Ментера.

Приводятся результаты верификации предложенной математической модели внутрикамерных процессов в проточных трактах КС ЭУ, апробации численных схем и алгоритмов на данных физических экспериментов. Проведенная валидация подтверждает корректность предложенной математической модели, численных схем и алгоритмов для численного исследования внутрикамерных процессов в проточных трактах и ПО ЭУ.

**В третьей главе** рассмотрены основные методы, в том числе, инженерные, оценки теплофизических параметров в КС ЭУ и представлен общий алгоритм их применения. Приведена характеристика и терминология методов топологии и теории катастроф, применительно к рассматриваемому классу задач.

Сформулирован и предложен обобщенный подход к исследованию процессов нестационарного конвективного теплообмена в каналах сложной формы с массоподводом, основанный на применении топологических методов гидродинамики для выявления и описания пространственно-временных зон повышенного теплообмена для последующего прогноза теплового состояния элементов конструкций ЭУ.

Показано, что в рамках предлагаемого подхода к исследованию внутрикамерных процессов в ЭУ интерпретация расчетных данных, в том числе и анализ особенностей структуры потока в проточных трактах и застойных областях КС ЭУ строится с использованием топологических методов для локализации возможных зон повышения интенсивности конвективного теплообмена и аналогии с методами теории катастроф для выявления причин возможных срывов течений, в том числе и для выявления локальных топологических неустойчивостей, предшествующих их устойчивым конфигурациям.

**В четвертой главе** приводятся результаты многовариантного математического моделирования квазистационарных сжимаемых пространственных турбулентных течений, в том числе и их тепловых режимов, реализующихся в проточных трактах, застойных областях и предсопломом объеме КС ЭУ различных компоновок (рис. 1) на стационарном участке работы установки.

Граничные условия для всех рассматриваемых типов КС, в общем случае, могут быть определены следующим образом: – на поверхностях массоподвода задаются температура и расход рабочего тела; – на твердых непрони-

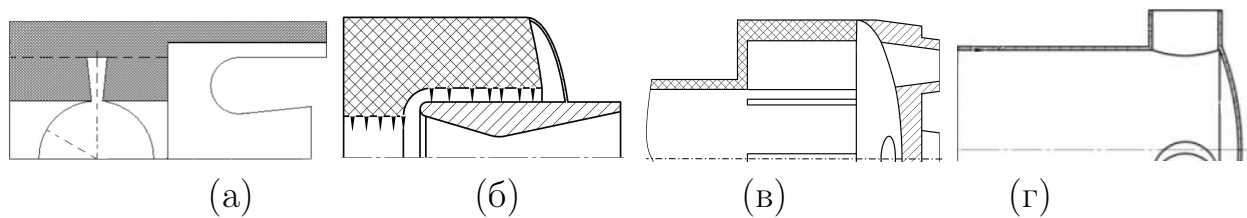


Рисунок 1 – Геометрические модели КС ЭУ с: утопленным соплом и каналом массоподвода звездообразной формы поперечного сечения (а); утопленным соплом и заманжетной полостью (б); многосопловой крышкой и цилиндрическо-щелевым каналом массоподвода (в); торцой формой поверхности вдува (г).

цаемых 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 КС ЭУ задаются условия III рода.

Рассматриваются вопросы корректности допущения о свойствах рабочего газа, в частности о гомогенности и не учете лучистого теплообмена. Необходимо отметить, что экспериментальные данные показывают, что в дозвуковой части КС превалирует теплообмен за счет конвекции. Результаты вычислительного эксперимента сравниваются с данными физического моделирования внутрикамерных процессов на модельных стендах. Сопоставление распределений коэффициента теплоотдачи по образующей утопленного сопла подтверждают корректность сформулированного допущения о свойствах рабочего тела.

В разделе 4.1 рассмотрены особенности реализуемых в проточных трактах КС ЭУ различных конструктивных схем течений и их влияние на теплообмен вблизи соплового дна. Параграф 4.1.1. посвящен анализу топологических особенностей потока рабочего тела в КС ЭУ с утопленным соплом и массоподводящим каналом звездообразной формы поперечного сечения (рис. 1,а), их связью с теплообменом в КС и исследованию влияния ряда конструктивных и эксплуатационных параметров на данные процессы.

Течение продуктов сгорания в канале звездообразной формы поперечного сечения при симметричном положении утопленного сопла и преобладании канального потока ( $k_g \leq 0,1$ , где  $k_g = G_n/G_k$ ) характеризуется формированием в области между компенсаторов парных симметричных вихревых структур (рис. 2,а), которые с потоком рабочего тела поступают в сопло. Образование вихревых структур обусловлено взаимодействием разнонаправленных потоков, вытекающих из компенсаторов с канальным потоком, и приводит как к формированию и последующему развитию в канале массоподвода вязкого подслоя, так и к существенной неравномерности продольных профилей скорости (рис. 2).

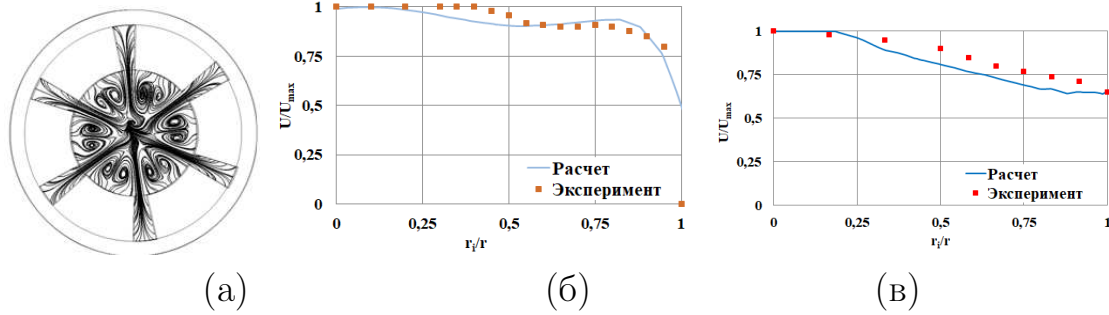


Рисунок 2 – Структура потока в выходном сечении канала (а) и профили продольной компоненты скорости в сечениях по компенсаторам (б) и между компенсаторами (в) звездообразного канала массоподвода

Течение рабочего тела вблизи входной поверхности утолщенного сопла характеризуется формированием симметричных, ориентированных по лучам компенсаторов точек торможения (рис. 3), в общем случае, реализуется режим с проникновением надсоплового потока газа к поверхности сопла с последующим его поступлением в сопло.

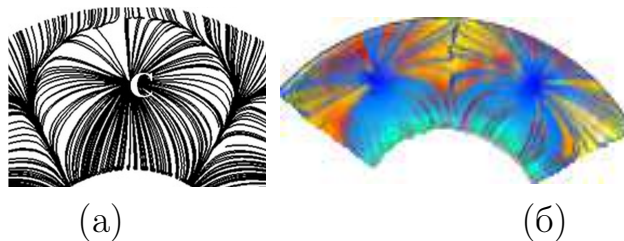


Рисунок 3 – Предельные линии тока на входной поверхности утолщенного сопла (а) и связь топологии потока вблизи входа в сопло с распределением теплового потока (б).

Получено критериальное уравнение для определения числа Нуссельта в точках торможения (С, рис. 3,а) на входной поверхности утолщенного сопла:

$$Nu = 1.31 \cdot Re^{0.864} \cdot Pr^{0.12} \quad \forall \quad 3 \cdot 10^5 \leq Re \leq 4.8 \cdot 10^5.$$

Сопоставление результатов оценки числа Нуссельта на основе предложенной зависимости и критериальных уравнений Крауссольда и Эккерта с экспериментальными данными (Савельев С. К., Емельянов В. Н., Бендерский Б. Я. Экспериментальные методы исследования газодинамики РДТТ. — СПб.: Недра, 2007. – 267 с.), приведенное на рис. 4, показывает, что рассмотренные инженерные методики, основанные на применении различных эмпирических уравнений, без учета особенностей течения газа в рассматриваемой области, имеют низкую степень достоверности.

Взаимодействие парных вихревых структур с надсопловым потоком приводит к перестройке течения в ПО и отрыву потока вблизи непроницаемого

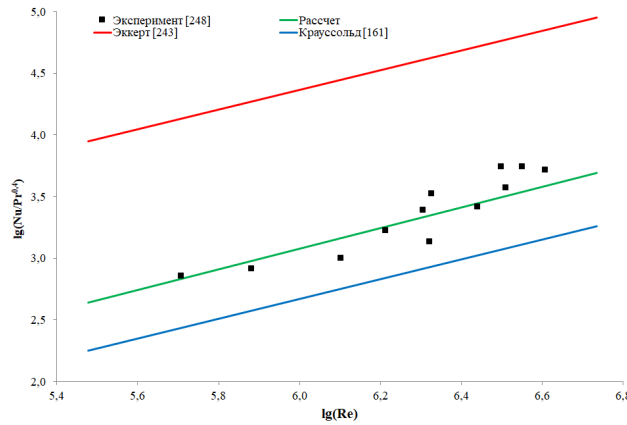


Рисунок 4 – Обобщенная зависимость безразмерного коэффициента теплообмена в точках торможения  $C$

торца канала массоподвода (рис. 5), что сопряжено с образованием локальных зон возвратных течений и отрывом потока в межщелевом пространстве.

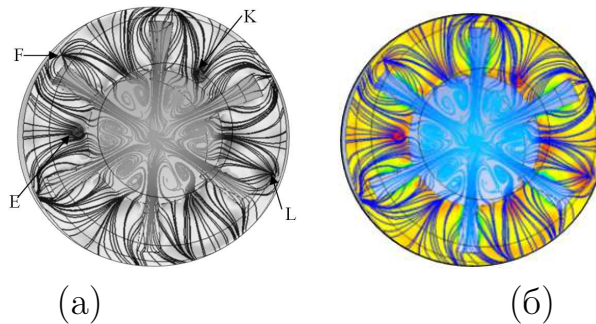


Рисунок 5 – Предельные линии тока на непроницаемой поверхности торца канала массоподвода (а) и связь топологии потока вблизи непроницаемого торца канала массоподвода с распределением теплового потока (б).

Из рис. 5 видно, что сопоставление структуры предельных линий тока с полученным распределением теплового потока по непроницаемой поверхности сопла позволяет однозначно установить связь между сформированными вблизи непроницаемой поверхности топологическими особенностями потока и положением локальных максимумов теплового потока.

В результате анализа результатов расчета получены критериальные зависимости для определения числа Нуссельта в особых точках (Е, F, K, L, рис. 5,б) вблизи непроницаемой поверхности торца канала массоподвода:

$$Nu = 0.87 \cdot Re^{0.811} \cdot Pr^{0.2}, \quad \forall \quad 10^4 \leq Re \leq 6.5 \cdot 10^5$$

. Выявлено, показано и обосновано, что увеличение степени утопленности сопла приводит к росту коэффициента  $k_g$ , при увеличении которого, соответственно, наблюдается упрощение топологии структуры потока вблизи входной части утопленного сопла. Также при росте коэффициента  $k_g$  наблюдается

постепенное оттеснение надсопловым потоком канального, что проявляется в увеличении зоны проникновения. При значениях коэффициента  $k_g \geq 0.87$  наблюдается полное оттеснение канального потока от входного сечения сопла надсопловым потоком. Показано, что увеличение  $k_g$  обуславливает рост интенсивности теплообменных процессов вблизи входной поверхности утолщенного сопла. Анализ результатов численного моделирования позволил построить критериальное уравнение для оценки значений числа Нуссельта в областях локального повышения теплового потока на входной поверхности утолщенного сопла с учетом коэффициента  $K_g$ :

$$Nu = 2 \cdot Re^{0.6} \cdot Pr^{0.6} \cdot k_g^{0.37}, \quad \forall \quad 1 \cdot 10^7 \leq Re \leq 2.18 \cdot 10^7, \quad 0.01 \leq k_g \leq 1.$$

Изучено влияние линейного эксцентриситета оси утолщенного сопла на газодинамику и теплообмен в ПО КС ЭУ с каналом массоподвода звездообразной формы поперечного сечения. Показано, что линейное смещение утолщенного сопла приводит к перестройке потока: так наблюдается неравномерное смещение вихревых структур в межщелевой части канала массоподвода – нарушается симметрия парной вихревой структуры, также наблюдается увеличение числа и укрупнение вихревых структур в предсопловом объеме, что обуславливает усложнение характера натекания потока на непроницаемый торец канала массоподвода. Выявлено изменение структуры предельных линий тока на входной поверхности утолщенного сопла: симметричная структура нарушается, отмечается образование одной особой точки в области максимального зазора. На основании результатов обработки численного эксперимента получены зависимости для определения числа Нуссельта в области взаимодействия интенсивных вихревых структур с непроницаемой торцевой поверхностью канала массоподвода (в особых точках):

$$Nu = 1.233 \cdot Re^{0.849} \cdot Pr^{0.2}, \quad \forall \xi = 0.5, \quad 0.33 \leq k_g \leq 1, \quad 3.1 \cdot 10^5 \leq Re \leq 6.5 \cdot 10^5.$$

Также построена зависимость для определения числа Нуссельта в особых точках на входной поверхности сопла:

$$Nu = 1.31 \cdot Re^{0.864} \cdot Pr^{0.12}, \quad \forall \xi = 0.992, \quad 1 \cdot 10^5 \leq Re \leq 6.5 \cdot 10^5, \quad 0.1 \leq k_g \leq 1.$$

Параграф 4.1.2 посвящен исследованию особенностей внутрикамерных процессов в заманжетной полости КС ЭУ (рис. 1,б). Выявлено и показано, что течение в заманжетной области обусловлено поступлением в полость части надсоплового потока рабочего тела.

Получены и сопоставлены с экспериментальными данными (Савельев С. К., Емельянов В. Н., Бендерский Б. Я. Экспериментальные методы исследования газодинамики РДТТ. — СПб.: Недра, 2007. – 267 с.) распределения



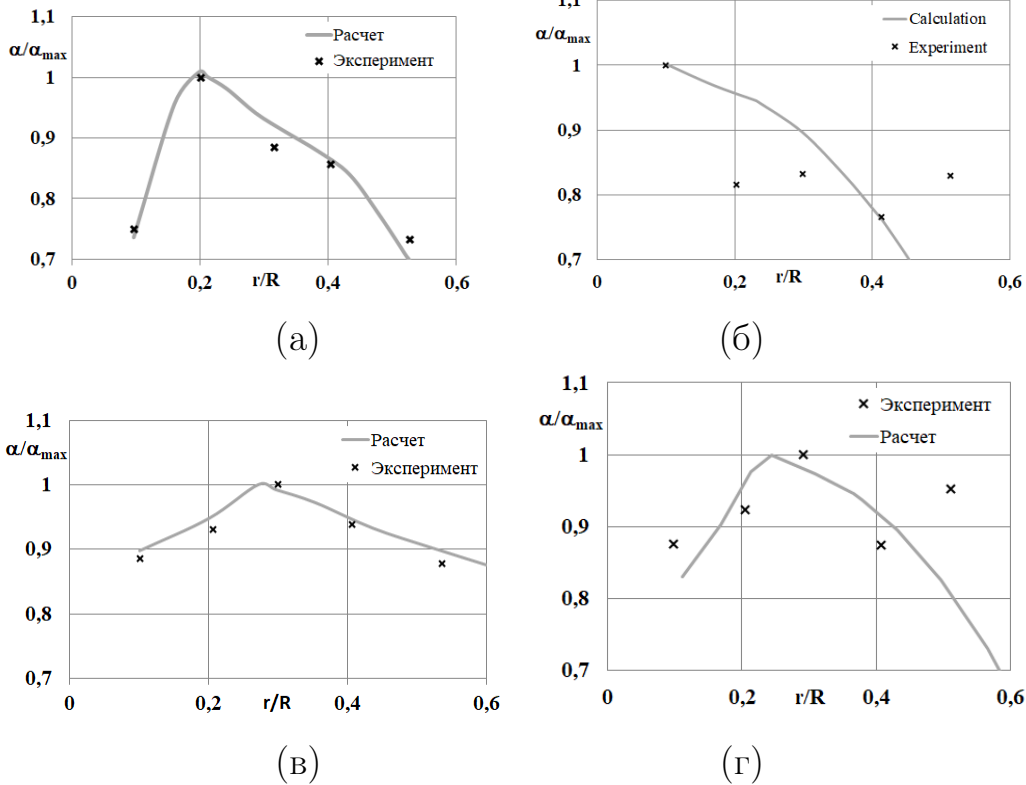


Рисунок 6 – Распределение относительного коэффициента теплоотдачи по относительной радиальной координате для углов  $\phi = 0^\circ$  (а),  $\phi = 45^\circ$  (б),  $\phi = 90^\circ$  (в) и  $\phi = 180^\circ$  (г) в заманжетной полости.

безразмерного коэффициента теплоотдачи по относительной радиальной координате для угла  $\phi = (0, 45, 90, 180)^\circ$  (рис. 6).

В общем случае, для области локального максимума коэффициента теплоотдачи, вне зависимости от величины угловой координаты, справедливы выражения

$$St_{max} = \frac{\alpha}{c_p \rho u} \simeq 0.21, \quad St = 0.26 \cdot (r/R)^2 + 0.08 \cdot (r/R) + 0.24.$$

Особенности внутренней газодинамики и конвективного теплообмена в проточных трактах КС многосопловых ЭУ (рис. 1, в-г) рассмотрены в параграфе 4.1.3. Выявлено и показано, что взаимодействие потоков из щелевых компенсаторов с каналым приводит к образованию в межщелевой области цилиндрического канала (рис. 7) парных вихревых структур, поступающих в предсопловой объем. Ввиду того, что оси симметрии сопел и щелевых компенсаторов не совпадают, происходит разворот поступающего рабочего тела в предсопловом объеме. При этом часть газа направляется непосредственно в сопла. Разворачивающийся поток вторично взаимодействует с поступающими из канала вихревыми структурами, образуя пространственные циркуляционные области, следы которых, в виде предельных линий тока, можно

наблюдать вблизи непроницаемой поверхности торца канала массоподвода.

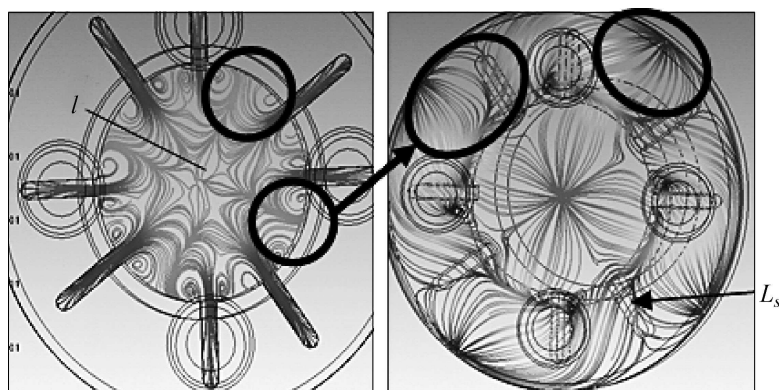


Рисунок 7 – Структура потока в канале и вблизи непроницаемого торца массоподвода

Таким образом показано, что течение в ПО многосопловой КС с цилиндрическо-щелевым каналом массоподвода имеет сложную пространственную конфигурацию. На основании анализа трансформации профиля продольной составляющей скорости обосновано, что применение предположения о струйном характере натекания потока на сопловое дно некорректно, а использование эмпирических, определяемых профилем скорости, соотношений, справедливых для струйных течений, приводит к завышению значений напряжения трения на днище более чем в два раза.

Предложено построение оценки величины теплового потока вблизи сопловой крышки на основе топологического подхода. Так структура потока вблизи сопловой крышки характеризуется (рис. 8,а) наличием центральной узловой точки, линий растекания между газоходами и несколькими седловыми точками вблизи периферийной области крышки, образованными вследствие разворота потока.

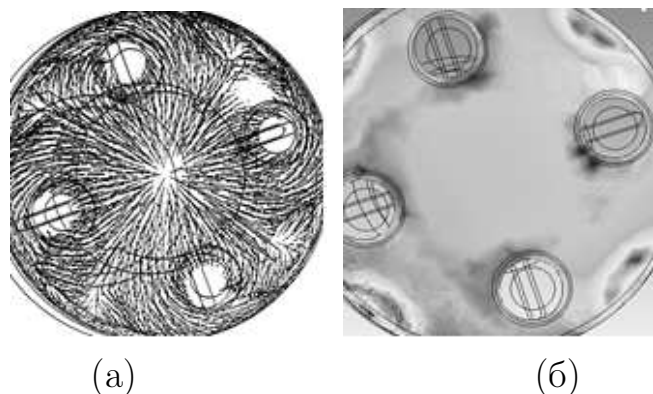


Рисунок 8 – Предельные линии тока (а) и распределение теплового потока (б) вблизи четырехсопловой крышки с радиальным расположением газоходов.

Максимальных значений тепловой поток достигает в области седловых точек (рис. 8, б), узловая точка же характеризуется повышением коэффициента теплоотдачи. При этом, тепловые потоки в центральной узловой точке, в общем случае ( $1 \cdot 10^4 \leq Re \leq 5 \cdot 10^5$ ), могут быть оценены с использованием критериального соотношения

$$Nu = 0.18 \cdot Re^{0.57} \cdot Pr^{0.4}.$$

Особенности внутрикамерных процессов в ПО ЭУ при расположении газоходов на цилиндрической поверхности КС рассмотрены на примере течения газа в проточных трактах ЭУ с торцевой поверхностью массоприхода (рис. 1, г). Необходимо отметить, что геометрия ПО КС определяет образование в межпатрубковом пространстве возвратных течений, обусловленных разворотом потока рабочего тела для последующего поступления в газоходы. Взаимодействие локальных межпатрубковых возвратных течений с поверхностью соплового дна приводит к формированию на периферии днища, вблизи его кромки, четырех симметрично расположенных седловых точек. Показано, что течение ПС вблизи соплового дна характеризуется образованием центральной узловой точки - точки торможения потока.

Необходимо отметить, что расположение газоходов на цилиндрической поверхности КС приводит к упрощению структуры потока рабочего тела в предсопловом объеме. На основании обработки результатов вычислительных экспериментов получено критериальное уравнение для определения числа Нуссельта в центральной узловой точке четырехсоплового дна КС ЭУ с торцевой поверхностью массоприхода:

$$Nu = 4.5 \cdot Re^{0.5} \cdot Pr^{0.3} \forall Re \in (1 \cdot 10^4 \div 5.3 \cdot 10^5).$$

Исследовано влияние количества газоходов, их углового положения и кривизны соплового дна на газодинамику и теплообмен в ПО КС ЭУ. Выявлено, что увеличение числа патрубков приводит к упрощению структуры потока, к формированию равномерного растекания потока газа по направлению к газоходам (рис.9), а также к уменьшению интенсивности тепловых потоков вблизи соплового дна.

Получены критериальные выражения для оценки числа Нуссельта – в центральной особой точке:

$$Nu = 4.5 \cdot \left(\frac{4}{N}\right) \cdot Re^{0.5} \cdot Pr^{0.3}, \quad \forall Re \in (1 \cdot 10^4 \div 1 \cdot 10^6);$$

– в периферийных седловых точках:

$$Nu = 4.5 \cdot \left(\frac{4}{N}\right) \cdot Re^{0.5} \cdot Pr^{0.33} \quad \forall Re \in (1 \cdot 10^4 \div 1 \cdot 10^6,)$$

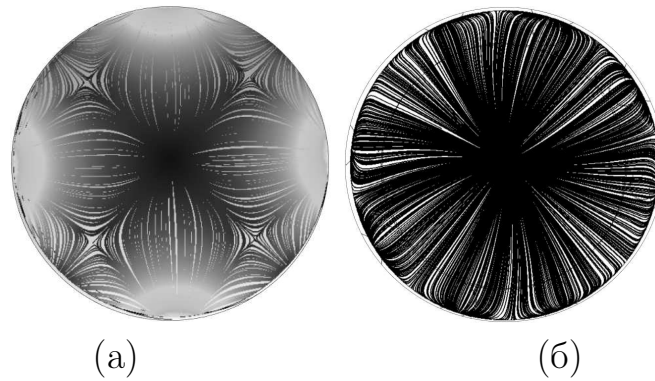


Рисунок 9 – Предельные линии тока на поверхности сопловой крышки для четырехпатрубковой КС (а) и для восьмипатрубковой КС (б).

где  $N$  - число газоходов.

Проанализировано влияние углового положения газоходов на структуру потока газа и теплообмен в ПО КС ЭУ. Показано, что изменение углового положения газоходов существенно влияет на газодинамическую обстановку в предсопловом объеме и, как следствие, на теплообмен вблизи соплового дна. Так, уменьшение величины угла между газоходами приводит к понижению интенсивности процессов теплообмена.

Выявлены и описаны три, определяемые величиной угла между патрубками ( $\alpha$ ), режима течения рабочего тела. Показано, что формирование продольных вихревых структур в межпатрубковом пространстве, характерное для  $40^\circ \leq \alpha \leq 70^\circ$ , сопровождается как увеличением скорости потока вблизи сопловой крышки на 173%, так и увеличением завихренности потока в выходных сечениях патрубков (на 41%). При этом теплообмен в межпатрубковой области (в области локального максимума) может быть корректно оценен с помощью критериального выражения

$$Nu = 4.5 \cdot Re^{0.5} \cdot Pr^{0.33}.$$

Исследовано влияние кривизны соплового дна на газодинамику и конвективный теплообмена в ПО КС многосопловой ЭУ с торцевой поверхностью массоподвода. Установлено, что увеличение кривизны крышки приводит как к локальному увеличению коэффициента теплоотдачи в области входа потока в газоходы, так и к уменьшению средней по сопловому дну величины плотности теплового потока, сопровождаемому увеличением неравномерности его распределения.

Анализ полученных данных позволил выявить критериальные зависимости чила Нуссельта в виде  $Nu = h \cdot Re^f \cdot Pr^l \cdot k^j$  в области:

- периферийной седловой точки на сопловом дне, справедливые для  $Re \in ((0.8 \div 100) \cdot 10^4)$ ,  $Pr \in (0.4 \div 0.9)$ , где коэффициента  $h, f, l, j$  определены как 0.9, 0, 56, 0, 6 и  $-0, 85$ , соответственно;

- отрыва в межпартубковой области на корпусе КС, справедливые для  $Re \in ((0.8 \div 100) \cdot 10^4)$ ,  $Pr \in (0.4 \div 0.9)$ , где коэффициенты  $h, f, l, j$  определены как 0,5, 0,65, 0,5 и  $-0,9$ , соответственно;
- центральной узловой точке на сопловом дне, справедливые для  $Re \in ((0.8 \div 100) \cdot 10^4)$ ,  $Pr \in (0.4 \div 0.9)$ , где коэффициенты  $h, f, l, j$  определены как 0,6, 0,52, 0,9 и  $-0,35$ , соответственно.

Раздел 4.2 посвящен исследованию влияния формы поперечного сечения канала массоподвода на рабочие процессы в КС ЭУ. В параграфе 4.2.1 рассмотрены особенности течения продуктов сгорания в КС ЭУ с утопленным соплом на примере КС с каналами массоподвода различных форм. Выявлено, что при малом числе компенсаторов в областях взаимодействия канального и щелевых потоков образуются парные вихревые структуры, прослеживающиеся до среза сопла. Увеличение числа компенсаторов приводит к упрощению структуры течения в канале, а именно, к отсутствию парных вихревых структур. Также выявлено, что переход от трапецевидной формы компенсаторов к треугольной приводит к изменению профиля продольной скорости на выходе из канала за счет увеличения зоны смешения. Использование четырехлепесткового канала и канала с проточкой приводит к формированию более равномерного и наполненного профиля скорости в выходном сечении канала - максимальное значение продольной составляющей скорости составляет 67% от аналогичного значения для двенадцатищелевого канала.

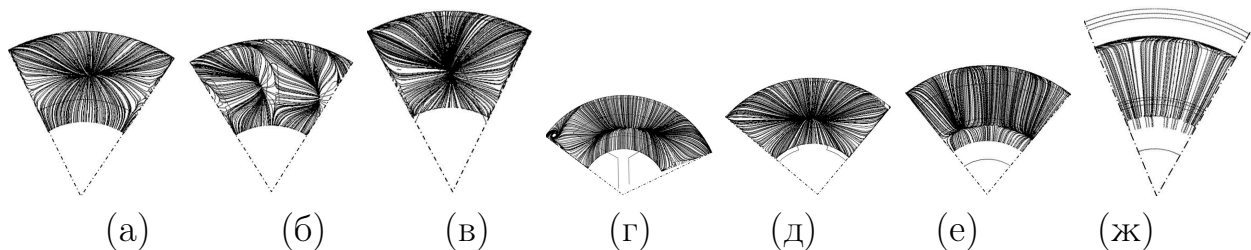


Рисунок 10 – Предельные линии тока вблизи входной поверхности утопленного сопла ЭУ с каналом с шестилучевым (а), с двенадцатилучевым (б), с шестилучевым звездчатым (в), с трехлопастным (г) и с четырехлопастным (д) поперечным сечением, в каналах пилообразной формы (е) и в канале с проточкой (ж).

Выявлено, что для всех каналов с компенсаторами отмечается формирование на входной поверхности утопленного сопла точек торможения (рис. 10), расположение которых обуславливается геометрией канала массоподвода, что соответствует экспериментальным данным. Для пилообразной формы канала, как и для канала с кольцевой проточкой, реализуется режим с проникновением надсоплового потока в сопло, характеризующийся формированием зон

смещения потоков в предсопловом объеме КС. Полученные распределения коэффициента теплоотдачи показывают, что применение канала звездообразной формы поперечного сечения с треугольной формой компенсаторов приводит к интенсификации процессов теплообмена вблизи утолщенного сопла. При этом, локальные максимумы коэффициента теплоотдачи соответствуют положению особых точек, определяемых геометрией компенсаторов.

В параграфе 4.2.2 рассмотрено влияние формы поперечного сечения канала массоподвода на внутрикамерные процессы в многосопловой ЭУ. Выявлено образование центральной узловой точки типа узел слияния, и центральной седловой точки, являющихся точками торможения потока. При этом, структура предельных линий тока для ЭУ с двенадцатищелевым, цилиндрическим и торцевым каналами массоприхода, также характеризуется наличием четырех линий растекания, локализующихся по радиусу от центра крышки к периферии между патрубками. Структура предельных линий тока, образованных потоком газа вблизи поверхности соплового дна ЭУ со звездообразной формой канала массоподвода, характеризуется наличием четырех периферийных узловых точек, локализованных вблизи газоходов. При этом, центральная особая точка характеризуется локальным минимумом коэффициента теплоотдачи, а локальные увеличения теплового потока фиксируются вблизи газоходов. Также отмечено некоторое изменение теплового потока вблизи линий растекания. Показано, что для четырехсопловой ЭУ со звездообразной формой канала массоприхода наблюдается образование двух локальных максимумов теплоотдачи в областях периферийных узловых точек. Выявлено, что максимальная величина коэффициента теплоотдачи характерна для двенадцатищелевого канала.

В разделе 4.3 рассмотрены вопросы влияния изменения геометрии канала массоподвода на теплообмен в ПО многосопловой ЭУ. В параграфе 4.3.1 приводятся результаты исследования влияния положения поверхности вдува на внутрикамерные процессы в КС многосопловой ЭУ с цилиндрическощелевым каналом массоподвода. Показано, что увеличение диаметра канала приводит к перестройке структуры потока вблизи соплового дна (рис. 13) и исчезновению периферийных отрывных зон. Так увеличение радиуса цилиндрического канала до  $\bar{r}_i = 0.72$  приводит к уменьшению максимальной плотности теплового потока в особой точке и в отрывных зонах на сопловом дне в 2.04 и в 3.6 раза, соответственно.

Теплообмен в центральной узловой точке на сопловой крышке для рассмотренных размеров каналов, можно оценить по критериальному уравнению

$$Nu_C = 0.18 \cdot Re^{0.57} \cdot Pr^{0.4}, \quad \forall Re \in (1.2 \cdot 10^5 \div 3 \cdot 10^5).$$

Для оценки теплообмена в области отрыва потока при входе газа в сопло

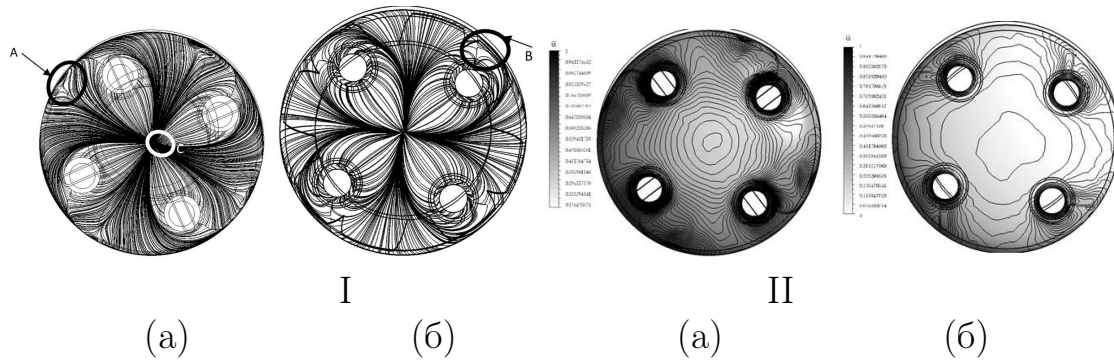


Рисунок 11 – Предельные линии тока (I) и линии  $\alpha = const$  на поверхности соплового дна (II) в начале (а) и конце (б) стационарного участка работы установки

справедливо критериальное уравнение

$$Nu_B = 24 \cdot Re^{0.25} \cdot Pr^{0.4}, \quad \forall Re \in (1.2 \cdot 10^5 \div 3 \cdot 10^5).$$

Для определения тепловых потоков вблизи непроницаемого торца может быть использовано критериальное уравнение

$$Nu = 3.8 \cdot Re^{0.37} \cdot Pr^{0.4}, \quad \forall Re \in (0.8 \cdot 10^5 \div 1.8 \cdot 10^5).$$

Влияние изменения положения поверхности вдува на внутрикамерные процессы в ЭУ с четырехсопловой крышкой и торцевой формой поверхности массоподвода рассмотрено в параграфе 4.3.2. Описаны особенности структуры потока для всех рассматриваемых конфигураций КС, выявлены режимы течения газа в зависимости от длины КС. Показано, что наличие и локализация узловой точки инвариантна по отношению к положению поверхности массоподвода. Получена зависимость числа Нуссельта в центральной узловой точке — точке торможения :

$$Nu = 4.5 \cdot Re^{0.5} \cdot Pr^{0.33},$$

справедливая для любого положения поверхности массоподвода.

**В пятой главе** рассматриваются вопросы учета нестационарности газодинамических и теплофизических процессов, протекающих в КС ЭУ. Так раздел 5.1 посвящен исследованию влияния перемещения поверхности массоподвода при работе установки на стационарном участке работы на особенности течения рабочего тела и конвективный теплообмен в проточных трактах многосопловой КС ЭУ. Исследование влияния нестационарного процесса движения поверхности вдува цилиндрическо-щелевого канала массоприхода на внутрикамерные процессы в проточных трактах многосопловой ЭУ приведено в параграфе 5.1.1. Выявлена, описана и проанализирована трансформация

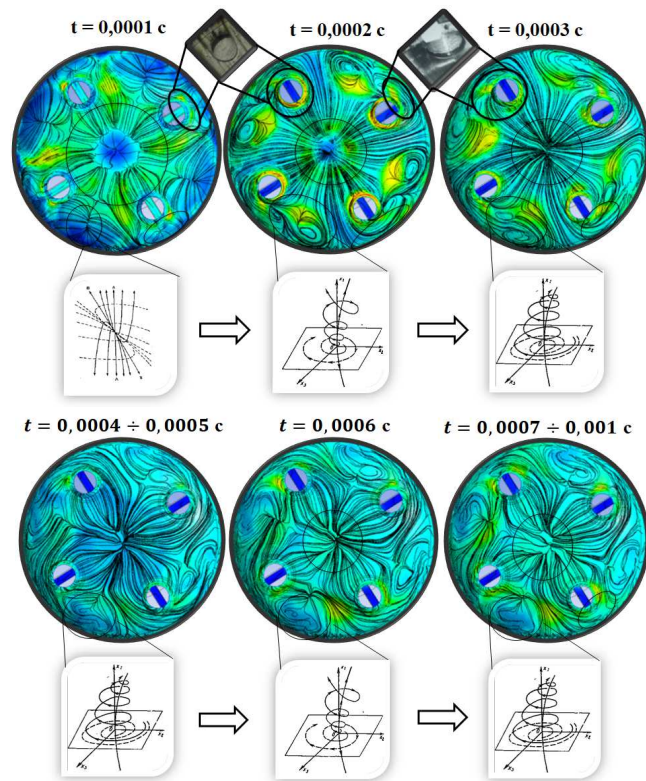


Рисунок 12 – Трансформация периферийных структур вблизи сопловой крышки при работе ЭУ.

топологических особенностей структуры потока в предсопловом объеме при изменении геометрии канала массоподвода (рис. 12).

Как видно из рис. 12, увеличение диаметра канала массоподвода обуславливает перестройку структуры потока вблизи соплового дна. Отмечается изменение структуры потока на периферии днища между соплами. Так перестройка возвратных, локализованных в межсопловой части периферийной области предсоплового объема, течений приводит к трансформации особой точки типа «неустойчивый узел» в особую точку типа «неустойчивый фокус» с последующей ее периодической трансформацией (с частотой 1 в 0.0003 с) в особую точку типа «седлофокус» и обратно в точку типа «неустойчивый фокус», что связано с формированием отрывного течения вблизи входа в сопло. Согласно терминологии теории катастроф, переход от устойчивой конфигурации топологических особенностей потока к неустойчивым классифицируется как «катастрофа течения» и приводит к необратимым скачкообразным изменениям физических параметров. Выявлено и показано, что наблюдаемая катастрофическая перестройка течения сопровождается резким увеличением плотности тепловых потоков (рис. 13) в точке торможения на сопловом дне.

Показано, что перестройка течения, обусловленная движением границ массоподвода, сопровождается увеличением плотности тепловых потоков в периферийной области ПО более чем в 2 раза, при этом после формирования



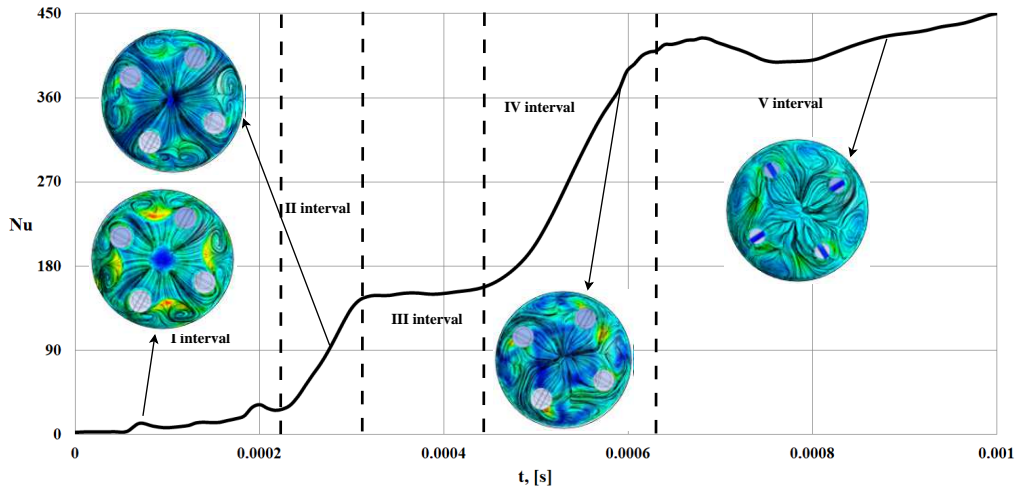


Рисунок 13 – Зависимость числа Нуссельта в зонах с топологическими особенностями в межсопловой части от времени.

отрывной зоны в области входа потока газа в сопло наблюдается стабилизация тепловых потоков вблизи сопловой крышки (рис. 14).

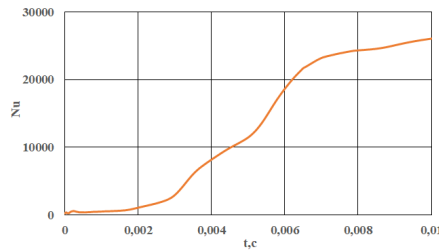


Рисунок 14 – Зависимость числа Нуссельта в зонах с топологическими особенностями в межсопловой части от времени.

Сопоставление временной зависимости изменения скорости ПС на выходе из канала с временной зависимостью изменения числа Нуссельта в центральной особой точке на поверхности сопловой крышки позволяет построить для времени  $t \geq 0.005$  с (рис. 15) критериальное соотношение для оценки числа Нуссельта в данных особых точках:

$$Nu = 1.05 \cdot Re^{0.78} \cdot Pr^{0.4}, \quad \forall Re \in (3.24 \cdot 10^2 \div 1.41 \cdot 10^5), Pr \in (0.2 \div 0.9).$$

Проанализировано влияние изменения геометрии массоподводящего канала на структуру потока рабочего тела вблизи непроницаемого торца канала массопвода (рис. 16). Выявлено, что центральная особая точка типа «узел», трансформируется в пространственную конфигурацию особой точки типа «седло» с последующим переходом в «неустойчивый узел». При этом, локализация особых точек смещается из центральной области торца канала

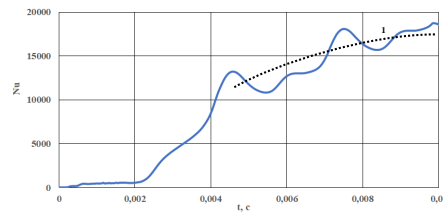


Рисунок 15 – Зависимость числа Нуссельта в точке торможения от времени, где кривая 1 – значение числа Нуссельта, подчиняющееся критериальному уравнению.

на периферию канала. Данный процесс сопровождается локальным ростом интенсивности тепловых потоков (вблизи особых точек), при понижении интегральных по сечению значений теплового потока. При достижении времени работы ЭУ  $t = 0.0045$  с наблюдается стабилизация течения и установление тепловых потоков вблизи непроницаемого торца.

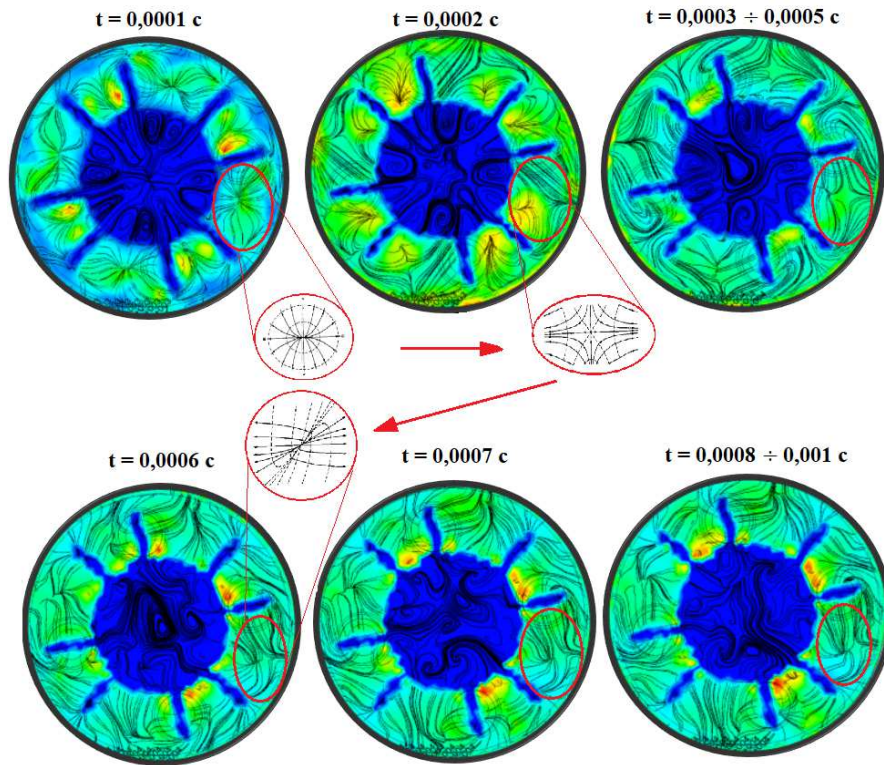


Рисунок 16 – Перестройка структуры потока вблизи непроницаемого торца канала массоподвода.

Выявлено и обосновано, что с учетом изменения скорости течения газа в канале массоподвода, для оценки тепловых потоков в области топологических особенностей на поверхности непроницаемого торца канала массоподвода корректно применение полученного в рамках квазистационарного подхода

критериального уравнения:

$$Nu = 483 \cdot Re^{0.37} \cdot Pr^{0.4}, \quad \forall Re \in (3.24 \cdot 10^2 \div 1.41 \cdot 10^5), Pr \in (0.2 \div 0.9).$$

Параграф 5.1.2 посвящен исследованию влияния нестационарного процесса движения торцевой поверхности массоподвода на внутрикамерные процессы в ПО КС. В начальные моменты работы ЭУ наблюдается незначительная перестройка профилей скорости вблизи входа в патрубки и вблизи соплового дна, обусловленная нестационарностью исследуемых процессов. Установившийся профиль характеризуется как автомодельностью для различных моментов времени  $t \leq 0.002$  с, так и равномерностью. Распределенный вдув с поверхности при характерной для начальных моментов работы ЭУ малой длине ПО КС, в совокупности приводят к формированию постоянного по поперечному сечению КС профиля. По достижению времени работы установки  $t = 0.004$  с наблюдается стабилизация течения в ПО КС с реализацией структуры потока вблизи сопловой крышки аналогичной структуре, полученной в рамках квазистационарного подхода. Локальные максимумы коэффициента теплоотдачи приходятся на зону входа потока в патрубки, что соответствует экспериментальным данным. При этом, тепловой поток в центральной особой точке для  $Re \in (2.37 \cdot 10^5 \div 1.47 \cdot 10^7)$ ,  $Pr \in (0.2 \div 0.9)$  может быть оценен критериальным уравнением:

$$Nu = 28.2 \cdot Re^{0.495} \cdot Pr^{0.4}$$

. Число Нуссельта в области входа в патрубок для  $Re \in (2.37 \cdot 10^5 \div 1.47 \cdot 10^7)$ ,  $Pr \in (0.2 \div 0.9)$  может быть описано зависимостью:

$$Nu = 0.48 \cdot Re^{0.68} \cdot Pr^{0.4}.$$

В разделе 5.2 проанализированы топологические особенности структуры потока, реализующиеся в ПО КС при работе установки на переходных режимах. Показано, что рост давления в КС при смене режима работы ЭУ приводит к формированию акустических возмущений в КС с одной стороны, и обуславливает перестройку структуры потока рабочего тела в камере, с другой. Наблюдается деформация и сгущение изолиний скорости. При этом, деформирование изотак обусловлено скоростным напором, а сгущение – работой установки на режиме повышения давления. Выявлено и показано, что структура изотак вблизи соплового днища инвариантна по отношению к изменению режима работы установки. Зафиксировано характерное для всех рассмотренных режимов работы ЭУ образование вблизи центра днища точек торможения.

Проанализирована трансформация профилей скорости в ПО КС ЭУ в сечениях до и после патрубков. Отмечено, что перестройка продольных про-

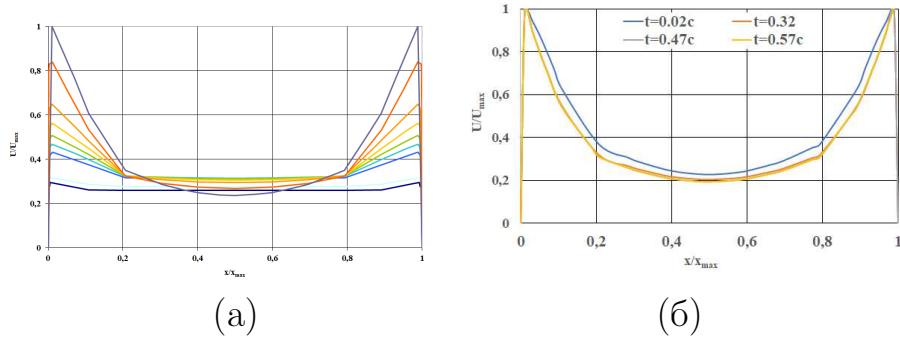


Рисунок 17 – Трансформация профиля скорости при движении по потоку в момент времени  $t = 0.57$  (а) и изменение профиля скорости в сечении перед патрубками (б) в процессе работы ЭУ

филей скорости завершается переходом к автомодельным профилям к моменту времени  $t \leq 0.005$  с для сечения перед патрубками и  $t \leq 0.008$  с для сечения после патрубков.

Выявлено и обосновано, что по истечении 5 мс от начала режима регулирования (нагнетания/спада) давления наблюдается стабилизация потока газа вблизи патрубков, а стабилизация потока вблизи соплового днища происходит медленнее на 3 мс из-за формирования локальных зон обратных и возвратных течений. При этом, в области центральной узловой точки наблюдается экстремум (минимум) коэффициента теплоотдачи, локальные максимумы коэффициента теплоотдачи в процессе работы ЭУ приходятся на области газоходов, отмечено увеличение коэффициента теплоотдачи в областях периферийных межпатрубковых седловых точек.

В результате моделирования выявлены временные зависимости изменения коэффициента теплоотдачи в центральной узловой точке, периферийных седловых точках и областях входа потока в патрубки, а также временная зависимость изменения скорости вдува рабочего тела. Анализ полученных зависимостей позволил построить критериальные уравнения, справедливые для стабилизированного течения ( $t \leq 0.008$ с) для оценки числа Нуссельта в:

– центральной особой точке ( $Re \in (4.3 \cdot 10^5 \div 1.3 \cdot 10^8)$ ,  $Pr \in (0.2 \div 0.9)$ ):

$$Nu = 2.4 \cdot Re^{0.45} \cdot Pr^{0.4};$$

– периферийных седловых точках  $Re \in (4.3 \cdot 10^5 \div 1.3 \cdot 10^8)$ ,  $Pr \in (0.2 \div 0.9)$ ):

$$Nu = 31 \cdot Re^{0.4} \cdot Pr^{0.4};$$

– в области входа потока ПС в патрубок ( $Re \in (4.3 \cdot 10^5 \div 1.3 \cdot 10^8)$ ,  $Pr \in (0.2 \div 0.9)$ ):

$$Nu = 8.6 \cdot Re^{0.55} \cdot Pr^{0.4}.$$

**В шестой главе** рассмотрены вопросы формирования методики оценки интенсивности теплообмена в локальных пространственно-временных зонах повышенного теплообмена на основе предложенного обобщенного подхода.

Приведены предлагаемая классификация проточных трактов КС по типам влияния конструктивных особенностей тракта на реализуемые топологические особенности структуры потока вблизи конструктивных элементов, а также формирование и трансформацию локальных пространственно-временных зон повышенного теплового потока вблизи поверхностей данных элементов.

Предложена методика оценки интенсивности тепловых потоков вблизи поверхностей конструктивных элементов камеры сгорания ЭУ с учетом газодинамической предыстории потока и топологических особенностей потока вблизи конструктивного элемента.

Предложенная универсальная по отношению к конструктивной схеме ЭУ методика оценки интенсивности теплообмена в КС, на основе алгоритма оценки теплового потока в локальных пространственно-временных областях реализована (рис. 18) в виде программного кода для инженерного расчета значений локальных безразмерных коэффициентов теплоотдачи в пространственно-временных зонах повышенного теплообмена в КС.

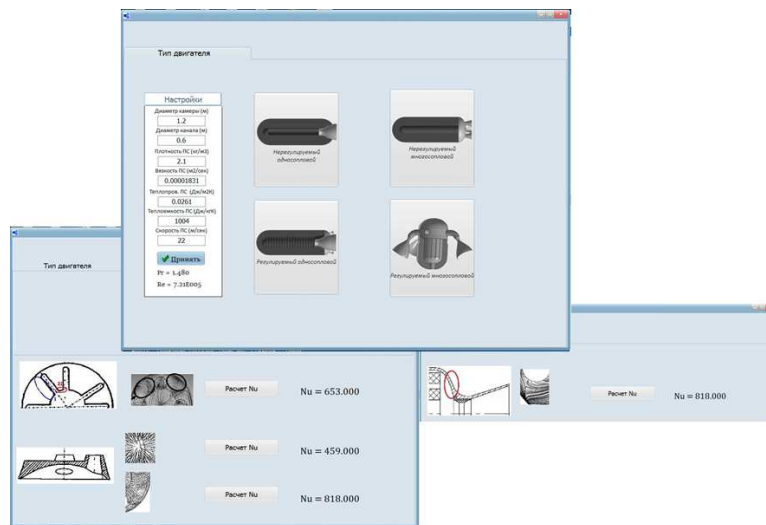


Рисунок 18 – Интерфейс программной реализации предложенной методики.

Для использования предложенного проблемно-ориентированного программного комплекса модульного вида в качестве исходных данных, на первом этапе, необходима информация о типе рассматриваемой установки, в частности, о диаметрах КС и канала массоподвода (выходного сечения), а также о плотности, вязкости, теплоемкости (при постоянном давлении) и теплопроводности рабочего тела. Далее пользователю предлагается последовательный выбор конструктивных особенностей рассматриваемого исполнения КС ЭУ. После указания всех доступных в реализованном комплексе конструктивных

особенностей, программа представляет пользователю схемы расположения локальных пространственно-временных зон топологических особенностей, с изображением реализуемого типа особенностей и выдает рассчитанные по исходным данным значения чисел Нуссельта в данных областях.

## Заключение

По результатам работы можно сделать следующие выводы и привести результаты:

1. Выявлены и описаны локальные пространственно-временные топологические зоны повышенных тепловых потоков в КС ЭУ различных конструктивных схем.

2. Получены распределения тепловых потоков вблизи теплонапряженных поверхностей камеры сгорания для стационарного и нестационарного режимов работы энергетической установки.

3. На основании результатов валидации RANS моделей турбулентности для решения задач сопряженного теплообмена в КС ЭУ выявлено и показано, что применение модели турбулентности SST  $k-\omega$  Ментера является наиболее корректным как с точки зрения топологических особенностей структуры потока в КС ЭУ, так и для получения локальных распределений коэффициента теплоотдачи.

4. Для конкретных конструктивных схем ЭУ, при их работе на стационарном режиме выявлены и описаны локальные топологические структуры, их расположение и трансформация в зависимости от изменения геометрии канала. Получены плотности теплового потока в выявленных пространственных топологических зонах.

5. Для нестационарных режимов работы ЭУ конкретных конструктивных схем выявлены локальные топологические структуры и их трансформация, в том числе описаны локальные топологические неустойчивости, формирование которых предшествует перестройке потока в КС ЭУ. Проведено сравнение локально-временных топологических зон для квазистационарного и нестационарного режимов. Показана корреляция результатов моделирования в рамках квазистационарного подхода с результатами расчетов, выполненных в рамках нестационарного подхода.

6. Выявлена и описана трансформация топологических особенностей вблизи контактных поверхностей, реализуемая в виде перехода из устойчивой конфигурации в неустойчивую, сопровождаемая резким (в 3.2 и более раза) ростом теплового потока.

7. При проведении численного эксперимента на нестационарных режимах работы ЭУ впервые получены временные зависимости изменения коэффициента теплоотдачи в центральной узловой точке и областях входа потока в патрубки. Построены критериальные уравнения, справедливые для

оценки нестационарного конвективного теплообмена при времени работы ЭУ  $t \leq 0.008$  с для оценки числа Нуссельта в центральной особой точке, периферийных седловых точках на сопловом дне и в области входа потока газа в патрубков.

8. Сформирован обобщенный подход к исследованию процессов нестационарного конвективного теплообмена в каналах сложной формы с массоподводом.

9. Разработан проблемно-ориентированный 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.

## ОСНОВНЫЕ ПУБЛИКАЦИИ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ

- в изданиях, индексируемых в базах данных **Web of Science**,  
**Scopus**

1. Benderskiy B., Frankovsky P, Chernova A. Numerical simulation of intrachamber process in the power plant // Applied Sciences. 2021. №11(11). P. 4990.

2. Benderskiy B. Ya., Chernova A. A. Influence of charge shape on heat exchange of recessed nozzle // Journal of Physics: Conference Series. 2021. №2057(1). P. 012013.

3. Benderskiy B. Ya., Chernova A. A. Flow structure topology in a combustion chamber during solid grain geometry charge // AIP Conference Proceedings. 2021. №2351. P.030064.

4. Benderskiy B. Y., Chernova A. A. Heat exchange in the back lip cavity of the large solid-propellant rocket motor // Journal of Physics: Conference Series. 2020. №1675(1). P. 012022.

5. Benderskiy B. Y., Chernova A. A. Influence of recessing nozzle extent on a process of heat exchange in the combustion chamber of a solid fuel rocket engine // Journal of Physics: Conference Series. 2020. №1677(1). P. 012035.

6. Benderskiy B. Y., Chernova A. A. Features of heat transfer in a pre-nozzle volume of a solid-propellant rocket motor with charges of complex shapes // Thermophysics and Aeromechanics. 2018. №25(2). Pp. 265 — 272.

7. Benderskiy B. Y., Chernova A. A. Formation of vortex structures in channeks with mass injection and their interaction with surfaces in solid-fuel rocket engines // Thermophysics and Aeromechanics. 2018. №22(2). Pp. 185-190.

8. Koroleva M. R., Mishchenkova O. V., Chernova A. A. Air curtain with cross fan operation study // AIP Conference Proceedings. 2021. №2351. P.030084.

9. Reader T., Chernova A. A., Tenenev V. A. Incorporation of fluid compressibility into the calculation of the stationary mode of operation of a hydraulic device

at high fluid pressures // Russian journal of nonlinear dynamics. 2021. №17(2). Pp. 195 – 209.

10. Koroleva M. R., Saburova E. A., Chernova A. A. Studying the efficiency of cooling and resistance of ribbed tubular elements // Journal of Physics: Conference Series. 2020. №1675(1). P. 012009.

11. Gizzatullina A., Koroleva M., Mishchenkova O, Chernova A. Numerical investigation of cooling down and aerodynamic resistance in ribbed tubular elements // Proceeding – 2020 Ivannikov Ispras Open Conference, ISPRAS 2020. 2020. №9394095. Pp. 142 – 149.

12. Koroleva M. R., Mishchenkova O. V., Kelemen M, Chernova A. A. Theoretical research of the internal gas dynamics processes of measurements of hot air curtain with cross-flow fan // MM Science journal. 2020. №June. PP. 3966 – 3972.

13. Raeder T., Tenenev V. A., Chernova A. A. Numerical simulation of unstable modes for a safety valve // Vestnik Tomskogo Gosudarstvennogo universiteta, Matematika i Mekhanika. 2020. №68. Pp. 109-115.

14. Benderskiy B., Bozec P., Klotov A., Abo Issa N., Terentyev A., Chernova A. Aerodynamics of the flow paths of the vacuum unit of a special cleaning vehicle in mining areas // Acta montanistica Slovaca. 2019. №24(4). Pp. 342-350.

15. Raeder T., Tenenev V. A., Chernova A. A. Multilevel simulation of direct operated safety valve // Proceeding – 2018 Ivannikov Ispras Open Conference, ISPRAS 2018. 2018. №9675134. Pp. 109 – 115.

16. Dmitriev A. P., Milutinsky I. L., Chernova A. A. Application of the gas ejection for water-alternated-gas injection for heterogeneous oil carbonate formation // AIP Conference proceeding. 2018. №2027. Pp. 040078.

17. Koroleva M. R., Mishchenkova O. V., Raeder T., Tenenev V. A., Chernova A. A. Numerical simulation of the process of activation of the safety valve // Computer research and modeling. 2018. №10(4). Pp.495 – 509.

18. Tonkov L., Chernova A. Generation and development of surface waves on the interface boundary of viscous fluid oscillating drop // MATEC web of conferences. 2017. №13(2). Pp. 05020.

19. Chernova A. A. Limitation of the contact angle in the problem of a drop of a liquid on a vibrating substrate // Nelineinaya dynamika. 2017. №13(2). Pp. 165 – 179.

20. Chernova A. A., Kopysov S. P., Tonkov L. E. Simulation of a liquid drop on a vibrating hydrophobic surface // IOP Conference series: Materials science and engineering. 2016. №158(1). Pp. 012026.

21. Kuz'min I. M., Tonkov L. E., Chernova A. A. Turbulence modeling approaches to prediction of the over expanded supersonic nozzles side load // Izvestiya instituta matematiki i informatiky Udmurtskogo gosudarstvennogo universiteta. 2015. №2. Pp. 93 – 98.

22. Kopysov S. P., Tonkov L. E., Chernova A. A. Application of VOF and



SPH to solve problems with a developed free surface // *Izvestiya instituta matematiki i informatiky Udmurtskogo gosudarstvennogo universiteta*. 2015. №2. Pp. 76 — 84.

23. Sarmakeeva S. S., Tonkov L. E., Chernova A. A. Meshfree methods for simulation fluid-structure interactions // *Izvestiya instituta matematiki i informatiky Udmurtskogo gosudarstvennogo universiteta*. 2017, №2. Pp. 36 — 44.

**- в изданиях, рекомендованных ВАК**

24. Бендерский Б. Я., Чернова А. А. Исследование теплообмена в камере сгорания РДТТ в рамках модели гомогенного газа // *Химическая физика и мезоскопия*. 2021. Т. 23, №4. С.412-429.

25. Бендерский Б. Я., Чернова А. А. Исследование теплообмена в КС РДТТ в рамках модели гомогенного газа // *Химическая физика и мезоскопия*. 2021. Т. 23, №4. С.412-429.

26. Бендерский Б. Я., Чернова А. А. Теплообмен в камере сгорания ракетного двигателя при изменении геометрии канально-щелевого заряда твердого ракетного топлива // *Труды МАИ*. 2020. №111. С.5.

27. Королева М. Р., Чернова А. А. Влияние изменения положения горящего свода на внутреннюю баллистику энергетической установки с торцевой поверхностью массоподвода // *Вестник Рыбинской государственной технологической академии им. П. А. Соловьева*. 2020. №1(52). С.22 — 28.

28. Бендерский Б. Я., Чернова А. А. Особенности теплообмена в предсопловом объеме РДТТ с зарядами сложной формы // *Теплофизика и аэромеханика*. 2018. Т.25, №2. С.277 — 284.

29. Бендерский Б. Я., Чернова А. А. Формирование вихревых структур в каналах с массоподводом и их взаимодействие с поверхностями РДТТ // *Теплофизика и аэромеханика*. 2015. Т.22 №2. С. 295 — 200.

30. Бендерский Б. Я., Саушин П. Н., Тененёв В. А., Чернова А. А. Особенности моделирования внутрикамерных процессов в энергоустановке, оснащенной утолненным соплом // *Космонавтика и ракетостроение*. 2012. №1(66). С. 156 — 161.

31. Бендерский Б. Я., Саушин П. Н., Чернова А. А. Пространственная газовая динамика в узлах энергетических установок летательных аппаратов // *Вестник Казанского государственного технического университета им. А. Н. Туполева*. 2011. №1. С. 8 — 11.

32. Бендерский Б. Я., Саушин П. Н., Чернова А. А. Моделирование внутрикамерных процессов в многосопловых энергетических установках // *Полет. Общероссийский научно-технический журнал*. 2011. №1. С. 31 — 34.

33. Бендерский Б. Я., Чернова А. А. Моделирование высокотемпературных внутрикамерных процессов в многосопловых энергетических установках // *Химическая физика и мезоскопия*. 2010. Т. 12, №3. С. 301 — 306.

34. Редер Т., Тененев В. А., Чернова А. А. Численное моделирование неустойчивых режимов работы предохранительного клапана // Вестник Томского государственного университета. Математика и механика. 2020. №68. С. 141 — 157.

35. Королева М. Р., Сбоева Т. А., Фертикова Д. С., Чернова А. А. Исследование течения воздуха в рабочем объеме воздушно-тепловой завесы // Химическая физика и мезоскопия. 2019. Т. 21. №3. С. 403 — 409.

36. Королева М. Р., Мищенкова О. В., Редер Т., Тененев В. А., Чернова А. А. Численное моделирование процесса срабатывания предохранительного клапана // Компьютерные исследования и моделирование. 2018. Т. 10, №4. С. 495 — 509.

37. Кузьмин И. М., Сармакеева А. С., Чернова А. А. Исследование топологических особенностей дорезонансных колебаний капли на вибрирующей подложке // Химическая физика и мезоскопия. 2017. Т. 19, №2. С. 201 — 219.

38. Кузьмин И. М., Сармакеева А. С., Чернова А. А. Моделирование колебаний капли жидкости, лежащей на вибрирующем недеформируемом основании // Химическая физика и мезоскопия. 2016. Т. 18, №4. С. 515 — 523.

39. Кузьмин И. М., Тонков Л. Е., Чернова А. А. Численное моделирование взаимодействия сверхзвукового потока газа с деформируемым соплом // Химическая физика и мезоскопия. 2015. Т. 17, №4. С. 531 — 537.

40. Кузьмин И. М., Тонков Л. Е., Чернова А. А. Моделирование турбулентности в соплах с высокой степенью расширения и оценка параметров боковой составляющей тяги // Известия Института математики и информатики Удмуртского государственного университета. 2015. №2 (46). С. 93 — 98.

41. Копысов С. П., Тонков Л. Е., Чернова А. А., Сармакеева А. С. Моделирование взаимодействия с преградой потока несжимаемой жидкости методами VOF И SPH // Вестник Удмуртского университета. Математика. Механика. Компьютерные науки. 2015. Т. 25, №3. С. 405 — 420.

42. Копысов С. П., Тонков Л. Е., Чернова А. А. Численное моделирование отрывных течений при старте сопла // Интеллектуальные системы в производстве. 2013. №2 (22). С. 24 — 31.

43. Копысов С. П., Тонков Л. Е., Чернова А. А. Постановка граничных и начальных условий при моделировании процесса запуска сопла // Химическая физика и мезоскопия. 2013. Т. 15, №2. С. 216 — 222.

44. Копысов С. П., Тонков Л. Е., Чернова А. А. Двухстороннее связывание при моделировании взаимодействия сверхзвукового потока и деформируемой пластины. Сравнение численных схем и результатов эксперимента // Вычислительная механика сплошных сред. 2013. Т. 6, №1. С. 78 — 85.

45. Копысов С. П., Тонков Л. Е., Чернова А. А. Сравнение слабо и жесткосвязных постановок при моделировании взаимодействия сверхзвукового потока и деформируемой панели // Химическая физика и мезоскопия. 2012. Т.

14, №4. С. 544 — 551.

**- прочие**

46. Бендерский Б. Я., Чернова А. А. Численное моделирование внутрикамерных процессов в энергетической установке при учете движения массоподводящей поверхности // Сборник тезисов международной научной конференции FIT-M 2020. 2020. С. 123-128.

47. Бендерский Б. Я., Чернова А. А. Влияние изменения геометрии канально-щелевого заряда твердого топлива на теплообмен в предсопловом объеме РД // Внутрикамерные процессы и горение в установках на твердом топливе и ствольных системах (ИСОС'2020). Сборник трудов Десятой Всероссийской конференции. 2020. С. 36-43.

48. Бендерский Б. Я., Чернова А. А. Исследование влияния изменения поверхности горения канально-щелевого заряда на внутреннюю газодинамику // XXV Всероссийский семинар с международным участием по струйным, отрывным и нестационарным течениям. 2018. С. 42-43.

49. Chernova A. A., Bendersky B. Ya. Gas dynamics and heat exchange process in plenum capacity of solid fuel rocket engines, theory and experiment // XIX International conference on the methods of aerophysical research (ICMAR 2018). abstracts. Edited by Academician V.M. Fomin, Russian National Committee on Theoretical and Applied Mechanics, Russian National Committee for IFToMM (International Federation for the Promotion of Mechanism and Machine Science), Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences and etc., 2018. С. 27-28.

50. Бендерский Б. Я., Чернова А. А. Моделирование процессов теплообмена в проточных трактах РДТТ с зарядом типа "звезда" // XXXIII Сибирский теплофизический семинар, посвященный 60-летию Института теплофизики им. С.С.Кутателадзе СО РАН. Всероссийская конференция с элементами научной школы для молодых ученых, Тезисы докладов. 2017. С. 138.

51. Бендерский Б. Я., Чернова А. А. Особенности процесса теплообмена в предсопловом объеме РДТТ с многосопловыми крышками // Внутрикамерные процессы и горение в установках на твердом топливе и ствольных системах (ИСОС'2017). Сборник трудов Девятой Всероссийской конференции. 2017. С. 29-36.

52. Кузьмин И. М., Лучихина Е. А., Сармакеева А. С., Тонков Л. Е., Чернова А. А., Александров А. В. О механизмах образования микротечений в капле жидкости, лежащей на вибрирующей недеформируемой подложке // Проблемы механики и материаловедения. Труды Института механики УрО РАН. Ижевск, 2017. С. 35-51.

53. Королева М. Р., Симоненко К. Е., Чернова А. А. Влияние конструктивных параметров газового эжектора на эффективность его работы // Наука и техника в газовой промышленности. 2017. №4 (72). С. 47-54.

54. Копысов С. П., Кузьмин И. М., Тонков Л. Е., Чернова А. А. Численное решение сопряженной задачи о нестационарном взаимодействии несимметричного отрывного течения с деформируемым сверхзвуковым соплом // Внутрикамерные процессы и горение в установках на твердом топливе и ствольных системах (ICOS'2014). 2014. с. 137-142.

55. Тонков Л. Е., Чернова А. А. Моделирование возникновения боковой составляющей тяги осесимметричного сверхзвукового сопла // Сеточные методы для краевых задач и приложения. Материалы Десятой Международной конференции. 2014. С. 598-602.

56. Бендерский Б. Я., Чернова А. А. Связь топологических особенностей структуры потока с теплообменом в каналах энергетических установок // Ракетно-космические двигательные установки. Материалы Всероссийской научно-технической конференции, Москва, 2013. 2013. С. 26-29.

57. Тонков Л. Е., Чернова А. А., Копысов С. П. Моделирование несимметричных отрывных течений при старте сопла двигателя // Труды Математического центра имени Н. И. Лобачевского. лекционные материалы молодежной научной школы-конференции в рамках Десятой Всероссийской конференции «Сеточные методы для краевых задач и приложения». 2013. С. 84-97.

58. Bendersky V. Ya., Chernova A. A. Flow patten topological singularities in power units' air flow // 16th International Conference on the Methods of Aerophysical Research. ICMAR 2012. 2012. С. 35-36.

59. Бендерский Б. Я., Чернова А. А. Верификация программного комплекса ANSYS CFX 11 на примере задач газодинамики энергетических установок летательных аппаратов // Струйные, отрывные и нестационарные течения. тезисы докладов. Редактор: Матвеев С.К., 2010. С. 26-28.

60. Чернова А. А. Теплообмен в предсопловом объеме камеры сгорания ракетного двигателя с торцевым зарядом // Внутрикамерные процессы и горение в установках на твёрдом топливе и в ствольных системах (ICOS-2008). Шестая Всероссийская конференция. Российская академия наук, Российская академия ракетных и артиллерийских наук, Научный совет по горению и взрыву при президиуме РАН, Институт прикладной механики УРО РАН, ФЦДТ «Союз», Санкт-Петербургский государственный политехнический университет, Балтийский государственный технический университет «Военмех». 2008. С. 136-140.

61. Черепов В. И., Бендерский Б. Я., Чернова А. А. Физическое моделирование внутрикамерных процессов в регулируемом двигателе на холодном воздухе // Ракетно-космические двигательные установки. 2008. С. 35-36.