

АКЦИОНЕРНОЕ ОБЩЕСТВО
ГОСУДАРСТВЕННЫЙ НАУЧНЫЙ ЦЕНТР РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ
«ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ ЦЕНТР ИМЕНИ М. В. КЕЛДЫША»

На правах рукописи



УДК 621.454.2

Цырендоржиев Эрдэни Сергеевич
Моделирование рабочих процессов в камере сгорания
термокаталитических жидкостных ракетных двигателей малой тяги

Специальность: 1.1.9 «Механика жидкости, газа и плазмы»

Диссертация на соискание ученой степени
кандидата физико-математических наук

Научный руководитель:
кандидат физико-математических наук,
Лаптев Игорь Вячеславович

Москва – 2025

ОГЛАВЛЕНИЕ

ВВЕДЕНИЕ	3
Глава 1. ОСОБЕННОСТИ И МЕТОДЫ МОДЕЛИРОВАНИЯ ФИЛЬТРАЦИОННОГО ГОРЕНИЯ	17
Глава 2. МОДЕЛЬ НЕСТАЦИОНАРНОГО ФИЛЬТРАЦИОННОГО ГОРЕНИЯ	34
2.1 Основные уравнения и физические параметры	34
2.2 Валидация модели	49
Глава 3. ЧИСЛЕННОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ ПРОЦЕССА ФИЛЬТРАЦИОННОГО ГОРЕНИЯ	59
3.1. Параметрическое исследование	60
3.2 Тепловое состояние термокаталитического ЖРДМТ	85
Глава 4. КОМПЬЮТЕРНАЯ МОДЕЛЬ ТЕРМОКАТАЛИТИ- ЧЕСКОГО ЖРДМТ	94
4.1 Компьютерная модель термокаталитического ЖРДМТ	94
4.2 Численные методы и алгоритмы расчета	96
4.1 Валидация тепловой модели	100
ЗАКЛЮЧЕНИЕ	107
СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ	109

ВВЕДЕНИЕ

Использование явления фильтрационного горения для создания тяги жидкостного ракетного двигателя (ЖРД), способного корректировать траекторию движения разгонного блока в процессе вывода полезной нагрузки на орбиту, а также выполнять манёвры по ориентации космических аппаратов, таких как поддержание орбитальных параметров спутника, точное позиционирование и стабилизация телескопов и других научных платформ, набирает в последнее время всё большую популярность ввиду высокой надежности термokatалитических двигателей, достигаемой за счет:

- минимального количества подвижных элементов и в целом общей простоты конструкции, снижающей вероятность механических отказов;
- тщательного подбора и подготовки каталитической засыпки, обеспечивающей стабильность и высокую эффективность каталитической реакции;
- использования высокочистого топлива и строгого контроля примесей, предотвращающее процесс отравления каталитического пакета.

Термокаталитические двигатели состоят из следующих основных частей (рисунок 0.1): топливного бака; системы подачи, включающей в себя фильтр; пиротехнического или электромагнитного клапана, используемого для регулирования массового расхода топлива; камеры сгорания, оснащенной электронагревателем для предварительного нагрева каталитической засыпки, инжекторной пластины (форсунки), каталитического пакета и сопла Лавалья.

Электронагреватель камеры, размещенный с внешней стороны, используется перед первым пуском или после длительного простоя двигателя в условиях низких температур и обеспечивает нагрев каталитического пакета до температуры, необходимой для инициирования фильтрационного горения.

Топливо в камеру сгорания подается под давлением, в качестве газа наддува обычно используется азот или гелий. Типичное рабочее давление при наддуве составляет около 1–2 МПа, что обеспечивает эффективную подачу топлива к двигателю.

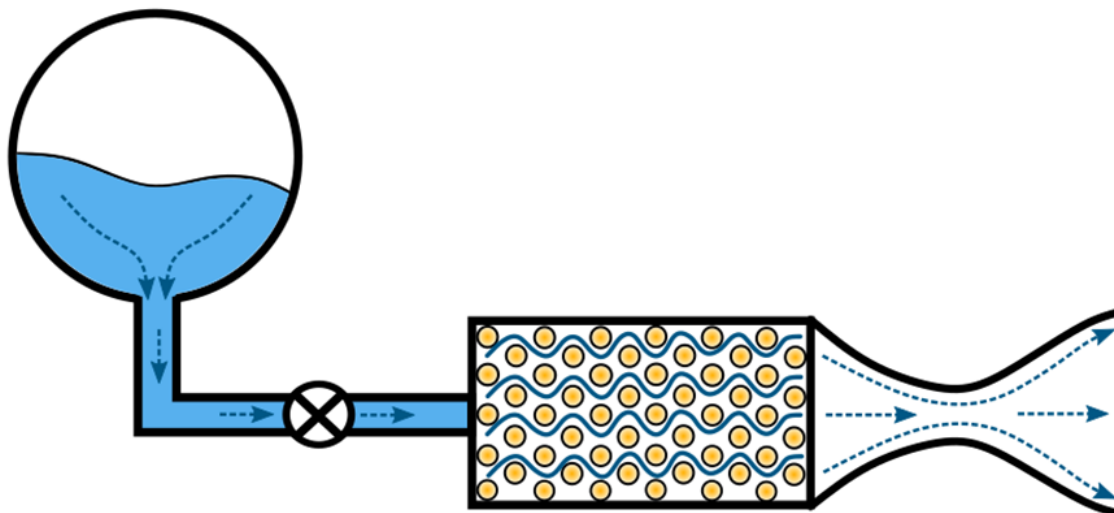


Рисунок 0.1 Схема термокаталитического жидкостного ракетного двигателя малой тяги

Поступающее через инжекторную пластину топливо в камеру сгорания равномерно распределяется по объему каталитического пакета, который состоит из гранулированного материала (сферических, цилиндрических частиц или гранул иной формы). Структура каталитического пакета может быть неоднородной, иметь градиентный характер с переменным размером гранул от входного сечения к выходному, что позволяет регулировать интенсивность теплообмена и скорость каталитической реакции. Помимо градиентного характера имеют место конфигурации с четкими границами раздела слоев засыпки, имеющих разную пористость или размер элементов пористой засыпки. Альтернативными вариантам являются структуры типа пчелиных сот или пористой пены.

При контакте с нагретой поверхностью пакета происходит каталитическое разложение топлива, в результате чего образуется смесь

высокотемпературных газов. Эти продукты разложения поступают в сопло Лавала, где расширяются и ускоряются, создавая реактивную тягу.

Жидкостные ракетные двигатели малой тяги обычно характеризуются следующими параметрами [101]:

- тяга в диапазоне 1–20 Н;
- давление в камере сгорания порядка 1–2 МПа;
- удельный импульс 150–230 с.

Перспективы развития ракетно-космической техники предъявляют повышенные требования к жидкостным ракетным двигателям малой тяги (ЖРДМТ), связанные с обеспечением надежности и длительной работоспособности в условиях продолжительных космических полетов. Одной из критических проблем является перегрев двигателя в режиме «длительного молчания», обусловленный накоплением тепла от каталитического разложения топлива и ограниченным теплоотводом в космическое пространство. Накопленное тепло кондуктивно распространяется по элементам конструкции и увеличивает температуру поступающего топлива, что приводит к росту адиабатической температуры в зоне фронта каталитического разложения, усиливая термические нагрузки на материалы и снижая их ресурс.

Наиболее простым решением проблемы перегрева является периодический дренаж монотоплива в окружающую среду для обеспечения теплосъема с конструкции жидким топливом. Однако данный подход связан с рядом недостатков, таких как увеличение массогабаритных характеристик системы хранения топлива, ведущее к снижению коэффициента массового совершенства и общей экономической эффективности двигателя.

Другим важным фактором, влияющим на работоспособность двигателя, является деградация катализатора с течением времени. Каталитическая засыпка подвержена таким процессам как отравление (накопление примесей, снижающих каталитическую активность) и

механическое разрушение (истирание гранул и трещинообразование) [72, 81, 106], что требует регулярного мониторинга состояния и потенциальной необходимости в замене каталитического пакета.

Таким образом, требуется поиск альтернативных решений, для повышения надежности ЖРДМТ. Это обуславливает необходимость в проведении комплексных экспериментальных и теоретических исследований процессов, протекающих в камере сгорания термокatalитических двигателей.

Экспериментальные исследования фильтрационного горения имеют ряд ограничений, связанных с высокими затратами экономических, временных и человеческих ресурсов. Помимо этого, следует отметить существование ряда трудностей, связанных непосредственно с детальным исследованием процессов, протекающих в камере сгорания ЖРДМТ, обусловленных оптической непроницаемостью среды и высокими температурами. В связи с этим наибольший интерес имеет место подход, основанный на проведении численных экспериментов. Данный подход подразумевает создание физико-химической математической модели процесса каталитического разложения топлива, учитывающего сложный тепломассообмен в пористой структуре катализатора.

Численное моделирование фильтрационного горения активно исследуется в литературе, где рассматриваются отдельные аспекты процесса, такие как влияние переизлучения в пористой среде, режимы теплообмена рабочего тела с пористой засыпкой, влияние параметров пористой структуры и начальной температуры на скорость распространения фронта и температуру в камере сгорания (реакторе). Множественность факторов, влияющих на фильтрационное горение, обуславливает высокую сложность математической модели явления, позволяющей адекватно его описывать.

Актуальность темы исследования и степень её проработанности

На современном этапе развития ракетно-космической отрасли наблюдается устойчивый интерес к применению двигательных установок малой тяги, использующих для создания рабочего тела явление фильтрационного горения. Это обусловлено целым рядом факторов, ключевыми из которых являются: высокая надежность, конструкционная простота, отсутствие необходимости в создании сложной системы зажигания и высокая эффективность [52, 74, 75, 78, 84, 102].

Наибольшее практическое применение на сегодняшний день получили термokatалитические двигатели, использующие в качестве монотоплива гидразин [92, 93] – высокоэнергетическое и хорошо изученное соединение. Примерами таких изделий являются ракетный двигатель С5.221 разработки КБхиммаш им. А.М. Исаева [3], двигатели, использующие каталитический пакет на основе Shell-405 [81, 96], а также Nammo MHT-1N. Одновременно с этим идет активное развитие экологически безопасной альтернативы, именуемой «зелеными» топливами: перекись водорода, ADN-смеси (топливо на основе нитрат аммония динитрамида используется в двигателе BOFORS LMP-103S [89]), HAN-смеси (топливо на основе гидроксиламмоний нитрата, используемое например в двигателе AF-M315E, созданном в рамках программы NASA Green Propulsion Infusion Mission [79]), а также гипергольные ионные жидкости [43, 85, 93]. Эти компоненты обладают менее выраженной токсичностью или же безвредны для окружающей среды (например, продуктами разложения перекиси водорода является водяной пар и кислород), и как следствие рассматриваются наиболее привлекательными для перспективных миссий ввиду сниженных требований по эксплуатации, как на этапах наземной экспериментальной отработки изделия, так и в полете (хранение и заправка).

Однако, переход к новому виду топлив требует пересмотра всей жизненной цепочки изделия, начинающейся с его проектирования. Требуется

рассмотреть новые каталитические пакеты, способные инициировать разложение в необходимых температурных и динамических условиях. Экспериментальное тестирование каждого варианта пары топливо-катализатор все равно требует значительных материальных и временных затрат, включающих в себя создание прототипов, проведение огневых испытаний и последующего за ними анализа результатов. Ограниченность методов прямого наблюдения для изучения фильтрационного горения приводит к необходимости использования косвенных методов регистрации положения и динамики фронта, массивы термопар, регистрирующих тепловой фронт, датчики давления, улавливающие волны давления, акустические датчики, рентгеновскую и нейтронную радиографию для визуализации внутренней структуры горячей зоны [45].

На этом фоне исключительно важной становится задача построения универсальной и физически обоснованной компьютерной модели терموкаталитического жидкостного ракетного двигателя и непосредственно модели фильтрационного горения, способной учитывать особенности разложения различных топливных составов в пористых катализаторах, имеющих различную конфигурацию (форма каталитического пакета и пористость). Такие модели позволят проводить численные эксперименты с высокой степенью достоверности, исследовать влияние различных параметров (расход топлива, геометрия камеры, структура катализатора и начальные условия), предсказывать тепловые и газодинамические характеристики, а также оптимизировать конструкцию двигателя на ранних этапах проектирования.

Особый интерес представляют процессы, протекающие в камере сгорания в условиях нестационарных и импульсных режимов подачи топлива [15]. Они традиционно считаются трудно анализируемыми в экспериментах.

Компьютерные же модели этих процессов требуют точной, устойчивой и адаптированной численной схемы. В таких условиях особенно

актуальными становятся методы, ориентированные на решение уравнений тепломассопереноса, сопряженные с кинетикой гетерогенной каталитической реакции и вероятным вторичным разложением продуктов реакции ввиду высоких температур в камере сгорания.

Детальное численное моделирование также открывает возможность для исследования таких сложных для определения в ходе экспериментальной отработки аспектов, как структура фронта разложения топлива, степень локализации тепловыделения, влияния переизлучения и эффекты неравновесного теплообмена между фазами.

К тому же, разработанная модель может быть использована для построения обобщённых инженерных зависимостей, пригодных для применения в расчетах на этапах предварительного проектирования. Например, с помощью такой модели возможно построение карты устойчивых положений фронта в пространстве таких параметров как пористость засыпки, скорость подачи топлива в камеру сгорания и начальная температура пористой засыпки. Применение карты устойчивых положений фронта при проектировании двигателя позволяет определять критические значения рабочих параметров и формировать рекомендации по выбору режимов работы, обеспечивающих необходимую степень надежности и эффективности двигателя при различных условиях эксплуатации.

Кроме того, предлагаемая модель может быть адаптирована для применения за пределами ракетно-космической отрасли. Например, процессы дожигания обедненных газов в энергетической отрасли и нефтегазовом секторе, или задача получения водорода из аммиака [91] имеют схожие физические характеристики с фильтрационным горением. Также актуальны задачи повышения пожаро- и взрывобезопасности в технологических установках, использующих пористые наполнители или каталитические пакеты. Таким образом, исследование не только отвечает

задачам космического двигателестроения, но и обладает высокой прикладной ценностью в смежных областях инженерной практики.

Цели диссертационной работы

Целью диссертационной работы является исследование процесса фильтрационного горения в камере сгорания термokatалитического жидкостного ракетного двигателя малой тяги, направленное на выявление закономерностей между параметрами работы двигателя и характеристиками протекания фильтрационного горения.

Достижение данной цели предполагает решение следующих задач:

1. Разработка физико-математической модели и метода моделирования процессов в камере сгорания термokatалитического жидкостного ракетного двигателя малой тяги;
2. Проведение параметрического исследования с целью получения аппроксимирующих зависимостей, связывающих финальное положение фронта с параметрами работы двигателя и его конструкцией.
3. Проведение параметрического исследования с целью анализа влияния параметров работы двигателя и его конструкции на тепловое состояние каталитического пакета.
4. Определение условий, обеспечивающих устойчивый режим работы термokatалитического жидкостного ракетного двигателей малой тяги.

Методы исследования и степень достоверности результатов

Достоверность и обоснованность применяемых математических моделей обусловлена использованием фундаментальных принципов математического моделирования механики сплошной среды.

Верификация и тестирование методики предполагают подтверждение достоверности полученных результатов путем сравнения с экспериментальными данными.

Обоснованность результатов подтверждается непротиворечивым характером полученных результатов решения с численными результатами других авторов, известными из литературы.

Научная новизна

1. Получены фазовые портреты фронта максимальной температуры в камере сгорания термokatалитического жидкостного ракетного двигателя малой тяги для различных условия работы двигателя.
2. Сформированы карты финальных положений фронта в зависимости от числа Рейнольдса и начальной температуры каталитического пакета.
3. Получены аппроксимирующие зависимости, описывающие связь между параметрами работы двигателя, такими как массовый расход, циклограмма подачи топлива, начальная температура каталитического пакета, а также конструктивными характеристиками и финальным положением фронта.
4. Предложена комплексная методика численного моделирования теплового состояния термokatалитического ЖРДМТ.

Положения, выносимые на защиту

1. Функциональные зависимости, устанавливающие связь финальное положение фронта максимальной температуры с безразмерными критериями Рейнольдса, Уомерсли, безразмерной температуры и пористости засыпки.
2. Карты положения фронта максимальной температуры, построенные для различных режимов работы двигателя, демонстрирующие пространственные распределения фронта в зависимости от числа Рейнольдса и безразмерной температуры.
3. Закономерности теплового состояния каталитической засыпки, определяющие характер накопления и распределения температуры внутри

каталитического пакета в зависимости от скорости подачи, начальной температуры и параметров циклограммы подачи.

4. Методика численного моделирования работы термокаталитического ЖРДМТ и компьютерная модель теплового состояния термокаталитического двигателя.

Теоретическая и практическая значимость работы

Исследование процесса фильтрационного горения сопряжено с трудностями, в основном обусловленными сложностью проведения экспериментальных работ. Оптическая непроницаемость пористой среды, обеспечивающей процессы испарения жидкого топлива, нагрева и разложения газифицированного топлива, не позволяет детально отслеживать параметры горения и влияние на них отдельных факторов, например, таких, как излучение. Кроме того, условия работы в камере сгорания термокаталитических ЖРДМТ отличаются высоким температурным и химическим градиентом, что ограничивает возможности размещения измерительных зондов и использования традиционных диагностических методов.

Предложенная в настоящей работе методика позволяет эффективно проводить многопараметрическое численное исследование фильтрационного горения жидкого топлива в камерах сгорания жидкостных двигателей малой тяги. Методика позволяет учитывать сопряженный теплообмен между газовой и твердой фазами, возможность нестационарной подачи топлива, а также кинетики гетерогенной каталитической и гомогенной реакции в газовой фазе. Это дает возможность воспроизводить широкий спектр рабочих режимов, включая импульсные и переходные, что особенно важно для двигателей с длительным временем автономной работы.

Теоретическая значимость работы заключается в развитии подходов к описанию и моделированию тепломассопереноса и химических превращений

в пористых структурах, типичных для термокаталитических двигателей. Полученные зависимости, методики анализа устойчивости и критерии формирования фронта могут быть использованы при дальнейшем развитии математических моделей процессов в пористых средах.

Практическая значимость работы обусловлена возможностью применения результатов моделирования для создания тепловых и динамических моделей двигательных установок, оценки надежности катализатора, подбора параметров каталитических пакетов, а также прогнозирования поведения фронта разложения топлива в условиях варьирования режимов работы двигателя. Это в свою очередь позволит повысить уровень надежности и оптимизировать разрабатываемые изделия, снизить объем натурных испытаний и ускорить цикл разработки новых систем.

Апробация работы

Основные результаты работы были представлены на всероссийских конференциях, таких как Восьмая Российская национальная конференция по теплообмену (г. Москва, 17-22 октября 2022 г.), конференция молодых ученых и специалистов АО ГНЦ «Центр Келдыша», XXIV школа-семинар молодых ученых и специалистов под руководством академика РАН А. И. Леонтьева посвященная столетию академика В. Е. Алемасова (г. Казань, 22-27 мая 2023 г.), II ежегодная научно-техническая конференция молодых ученых и специалистов предприятий госкорпорации Роскосмос (г. Москва, 20-21 ноября 2023 г.), II Всероссийская школа-семинар Национального центра физики и математики и Института теоретической и математической физики РФЯЦ-ВНИИЭФ для студентов и специалистов в области математического моделирования на супер-ЭВМ экса- и зеттафлопсной производительности (25-29 сентября 2023 г.), международная конференция

«Теоретические и прикладные задачи конвективного теплопереноса»
(13-15 декабря 2023 г.)

Публикации

Основные положения диссертации представлены в 9 публикациях, из них 4 статьи в журналах, включенных в список ВАК.

Публикации в журналах, включенных в список ВАК:

1. Козаев А. Ш., Миронов В. В., Негодяев А. С., Цырендоржиев Э. С. Создание отечественной платформы средств математического моделирования и инженерного анализа для решения практических задач разработки и оптимизации изделий ракетно-космической техники // Космические аппараты и технологии. 2024. №2
2. Лаптев И. В. Цырендоржиев Э. С. Моделирование процессов теплопереноса термодинамического жидкостного ракетного двигателя малой тяги // Труды МАИ. 2024, №138.
3. Цырендоржиев Э. С. Численное моделирование фильтрационного горения в камере сгорания термодинамического ЖРДМТ на монотопливе// Математическое моделирование и численные методы, 2025, №2, С.130-144.
4. Цырендоржиев Э. С. Исследование влияния режимов работы и конструкции термодинамического жидкостного ракетного двигателя малой тяги на тепловое состояние во время работы // Тепловые процессы в технике, 2025, Т. 17, №5, С. 225-234.

Публикации в трудах конференций:

5. Цырендоржиев Э. С., Ананьев А. В., Лаптев И. В. Тепловая модель термодинамического двигателя на гидразине // Восьмая российская национальная конференция по теплообмену (17–22 октября 2022 г., Москва, НИУ-МЭИ).

6. Цырендоржиев Э.С. Численное моделирование теплового состояния жидкостных ракетных двигателей на участках пассивной работы // Проблемы газодинамики и тепломассообмена в энергетических установках: Тезисы докладов XXIV школы-семинара молодых ученых и специалистов под руководством академика РАН А.И. Леонтьева посвященная столетию академика РАН В.Е. Алемасова (г. Казань, 22-27 мая 2023 г.). – Казань: ООО ПК «Астор и Я», 2023. – с. 364–365.
7. Цырендоржиев Э.С. Численное моделирование фильтрационного горения жидких топлив в камере сгорания термokatалитического ЖРДМТ // II Всероссийская школа-семинар Национального центра физики и математики и Института теоретической и математической физики РФЯЦ-ВНИИЭФ для студентов и специалистов в области математического моделирования на супер-ЭВМ эксa- и зеттафлопсной производительности. Тезисы. – Саров: ФГУП РФЯЦ ВНИИЭФ, 2023 – с. 100.
8. Цырендоржиев Э.С. Численное исследование фильтрационного горения гидразина в канале с адиабатическими стенками // Будущее ракетных двигателей и космических энергоустановок: II ежегодная научно-техническая конференция молодых ученых и специалистов предприятий госкорпорации Роскосмос (Москва, 20-21 ноября 2023 г.): тезисы докладов / Акционерное общество «Государственный научный центр Российской Федерации «Исследовательский центр имени М.В. Келдыша». – Москва: Издательство МГТУ им. Н. Э. Баумана, 2024. – с.42-45.
9. Цырендоржиев Э. С., Лаптев И. В. Влияние параметров работы термokatалитического жидкостного ракетного двигателя малой тяги на гидразине на процессы тепломассообмена в камере сгорания // Теоретические и прикладные задачи конвективного тепломассопереноса: материалы Международной конференции / под ред. М.А. Шеремета. – Томск: СТТ, 2023 - с. 80–81

Свидетельства о регистрации:

1. Ананьев А. В., Куроедов А.А., Лаптев И. В., Цырендоржиев Э.С. Программа для ЭВМ «Программа расчета параметров фильтрационного горения в камере сгорания ЖРДМТ» от 15.08.2023 №2023667463

Личный вклад автора

В соответствии с целями и задачами, сформулированными научным руководителем, соискателем проведена доработка математической модели и метода моделирования фильтрационного горения в пористой засыпке, обладающей неоднородностью пористости вдоль оси камеры сгорания двигателя. Метод реализован в форме программного модуля, учитывающего процессы тепломассопереноса в сопряженной постановке. Автором, совместно с научным руководителем, разработана методика компьютерного моделирования термодинамического ЖРДМТ как на базе платформы OpenFOAM [110], так и в пакете программ ЛОГОС [9]. Автором проведена серия численных экспериментов по исследованию фильтрационного горения в камере сгорания ракетного двигателя, выявлены закономерности рабочих параметров и сформулированы рекомендации по проектированию термодинамических ЖРДМТ.

Структура и объём работы

Диссертация состоит из введения, 4-х глав, заключения, содержит – 118 машинописных листов, включающих 34 рисунков, 4 таблиц и список используемой литературы из 110 наименований.

Глава 1. ОСОБЕННОСТИ И МЕТОДЫ МОДЕЛИРОВАНИЯ ФИЛЬТРАЦИОННОГО ГОРЕНИЯ

Процесс распространения зоны газофазной экзотермической реакции в пористой среде при подводе реагентов к зоне реакции – в последствии получивший название фильтрационного горения - был впервые зафиксирован в ходе экспериментальных работ советских исследователей [4, 5, 12]. Данный вид гетерогенного горения сразу же привлёк к себе внимание с точки зрения научного интереса ввиду богатой физики самого процесса. Участие двух или трёх фаз в условиях каталитического разложения топлива подразумевает под собой многообразие условий для протекания химической реакции, значительное количество отличных друг от друга стационарных и нестационарных режимов [46]. Среди этого множества процессов наиболее активно изучаются эффект рекуперации тепла, приводящего к увеличению энтальпии поступающего газа, что приводит к значительному отличию температуры в зоне реакции относительно других видов горения. Реализующийся адиабатический режим горения позволяет достичь температуры порядка 1200 °С.

Первая классификация режимов фильтрационного горения была предложена учёными Сибирского отделения РАН [6, 41]. В таблице Таблица 1.1 приведены эти режимы и их характерные особенности.

Таблица 1.1 Классификация режимов фильтрационного горения

Режим	Характерная скорость фронта	Особенности процесса
Низких скоростей	$\sim 10^{-4}$ м/с	Тепло от продуктов сгорания возвращается в зону подогрева, температура газа выше, чем температура твердой фазы
Высоких	$\sim 1 - 10$ м/с	Тепловая связь между газом и

Режим	Характерная скорость фронта	Особенности процесса
скоростей		твердым телом ослабляется, основную роль начинают играть аэродинамические взаимодействия
Звуковой	~100 м/с	Горение реализуется при высоких давлениях и температурах, но реакция не протекает полностью
Низкоскоростная детонация	~800 – 1500 м/с	Скорость фронта больше скорости звука, но ниже нормальной скорости детонации из-за потерь на рассеяние тепла в пористой матрице
Нормальная детонация	~1500 – 2000 м/с	Наличие ударного фронта перед зоной реакции и максимально возможная скорость горения для смеси

Предложенная классификация в дальнейшем была расширена в рамках работ по улучшению эффективности огнепреградителей. В рамках работы [107] было определено, что в пористых инертных средах и одиночных каналах с характерными размерами поровых каналов и при определенных скоростях вынужденной фильтрации газа, превышающих критические значения происходит перестраивание волны горения с ламинарного в турбулентно-подобный тип.

Однако классификация по скорости фронта пламени не является единственной. Для явления фильтрационного горения отмечается, что фронт пламени может как находиться в одном месте, так и двигаться в различных

направлениях. Было явно продемонстрировано [12], что движение фронта горения, направление которого совпадает с направлением подачи топлива, является неустойчивым, а движение, при котором фронт пламени движется навстречу – устойчивым, в связи с чем, появились первые попытки теоретически обосновать причины этого явления. Помимо спутного и встречного движения, возможно достижение ситуаций, обеспечивающих стационарность фронта. Одним из способов достижения такого состояния является подача компонентов с противоположных сторон пористого материала [29]. Стабилизация фронта интересна также с точки зрения эффективного использования тепла реакции, что нашло свое применение при утилизации отходов и получении синтез-газа [54, 97].

Стабильность фильтрационного пламени зависит от множества различных факторов – скорости подачи реагентов, конфигурации каталитического пакета и теплофизических свойств матрицы (засыпки термокаталитического пакета). При определенных условиях наблюдаются нестандартные режимы: автоколебания температуры и скорости фронта, периодическое прерывание горения, а также вращающиеся (спиральные) волны горения в цилиндрических образцах [46]. При этом, расчёты в рамках трехмерной постановки показали, что при использовании прямоугольных сечений камер сгорания имеют место еще более сложные апериодические колебания. Эти переходные режимы возникают при достижении определенных критических параметров (скорость фильтрации, размер пор и др.) и представляют собой не только фундаментальный интерес, но и имеют практическое значение для разработчиков двигателей. Колебания фронта могут приводить к неравномерному тепловыделению, пульсациям и деградации материала катализатора.

Вайнштейн, используя приближение бесконечно тонкой зоны реакции, сформулировал приближенный критерий устойчивости, который имеет понятный физический смысл, а также математически указал на

существование гидродинамической неустойчивости при условии незначительного различия коэффициентов фильтрации на фронте [7]. Развитием этого исследования становится работа [82] в рамках которой были проведены экспериментальные и теоретические работы по анализу условий устойчивости. Однако, данная работа содержит ряд существенных ограничений, которые значительно сужают область применимости физико-математической модели. Попытка устранить эту проблемы была предпринята в [10].

Результаты исследования [29] показали, что прогнозировать переходные процессы, опираясь исключительно на характеристики стационарных волн, соответствующих начальному и конечному состояниям системы, некорректно. В ходе перехода может формироваться устойчивая структура волны горения, которая не совпадает ни с исходным, ни с установившимся режимом. Пример подобного явления представляет собой стабилизация фронта горения на границе различных областей.

Помимо массового расхода влияние на устойчивость фронта горения оказывает и размер области, в котором происходит химическая реакция. В работе [27] рассмотрено влияние диаметра реактора на структуру пламени и на основании экспериментальных данных сформулирован критерий устойчивости волны горения.

Помимо экспериментальных и сугубо теоретических работ существует большой пласт литературы, посвящённый численному моделированию рассматриваемых процессов. Описанные теоретические работы по фильтрационному горению показывают, что использование режима низких скоростей является наиболее удобным в контексте прикладного использования данного явления, поэтому основные работы стали сосредотачиваться именно на этом аспекте фильтрационного горения. Среди преимуществ численного моделирования является его возможность в экономии денежных и временных ресурсов на подготовку эксперимента, а

также его эффективность с точки зрения многопараметрического анализа. Классическая постановка включает уравнения сохранения, а также уравнения химической кинетики.

В рамках одной из таких работ [76] было показано, что ещё одним параметром, оказывающим влияние на устойчивость, являются потери тепла за счёт излучения. Здесь можно проследить ещё один факт в пользу численного моделирования. Высокая температура в реакторе, являющаяся причиной высокоэнергетичного радиационного излучения, не позволяет осуществить фиксацию необходимых данных для построения качественной теории. Работа Хаяши заключалась в сравнении теплового состояния двухсекционной горелки при её работе в горячей и холодной средах [56]. Результаты численных экспериментов позволяют делать вывод о влиянии пиковой температуры в зоне реакции на структуру пламени. Увеличение температуры или снижение потерь положительно влияет на устойчивость фронта горения.

Но не только внешняя стенка реактора может быть источником излучения. Палесский в своей работе предположил, что источником радиационного излучения может служить и сама засыпка [33]. В рамках работы при помощи численного моделирования им было проведено сравнение двух постановок: первая подразумевала, помимо внешнего излучения, наличие радиационного теплового потока внутри пористой структуры (аппроксимация Эддингтона), вторая постановка использовала в качестве граничного условия только внешнее излучение. Результаты работы демонстрируют значительное влияние излучения пористой засыпки на стабилизацию фронта горения, возможности снижения максимальной температуры и увеличения размера зоны горения, что важно при конструировании пористых горелок.

Конфигурация пористой среды, размер и форма частиц/пор, пористость, теплоемкость и теплопроводность материала матрицы, наличие

или отсутствие катализатора на поверхности матрицы существенно влияют на характер фильтрационного горения. Высокопористые материалы с развитой поверхностью обеспечивают большую поверхность контакта реагирующего потока с твердым скелетом засыпки, усиливая теплоперенос между твердой фазой и рабочим телом. При этом, высокопористые материалы обладают более низким значением коэффициентов гидравлического сопротивления потоку топлива [53].

В рамках работы [98] были проведены экспериментальное и расчетное исследования двухсекционной камеры сгорания с целью определения влияния отношения длин секций с большей и меньшей пористостью на положение фронта горения. В данной работе были проведены измерения радиального распределения температуры, перепада давления по длине каталитического пакета и состав продуктов реакции. Предложенная расчетная модель имеет хорошее соответствие при более высоком значении коэффициента избытка окислителя, но плохое соответствие при нижнем пределе. Это связано с рядом причин, главной из которых является несоответствие свойств материала, используемого в расчётах и экспериментах.

Лаевский и Яушева в своей работе [28] с помощью одномерной двухтемпературной модели движения фронта через реактор с химически инертной пористой средой исследовали влияние соотношения пористости двух секций, коэффициента теплопроводности и теплоемкости на скорость фронта пламени, причем наибольший интерес как раз представлял процесс перехода фронта из одной секции в другую.

Использование многосекционных наполнителей в форме пористых засыпок позволило выдвинуть гипотезу о возможном влиянии зазора между секциями на устойчивость фронта горения. Варьирование величины зазора между засыпкой из оксида алюминия и пеной из карбида кремния показало важность данного параметра для модели [51]. Полученные результаты

хорошо коррелируют с представлениями о важности кондуктивного теплообмена для поддержания стабильности фронта горения. Увеличения зазора приводило к уменьшению температуры пламени и последующему его затуханию.

Также в работах [48, 49] была выдвинута гипотеза о влиянии размера и структуры пористой среды на устойчивость фронта горения. Результатом исследований оказался вывод о том, что не только размер пор, но и способ создания пористости оказывает влияние на структуру пламени. Увеличение размера частиц засыпки позволяет увеличить температуру в зоне реакции, в то время как увеличение размера пор пены никак не влияет на конечный результат. В целом данная работа поднимает вопрос о влиянии способа передачи тепла внутри пористой среды и может служить предметом глубокого исследования.

Полная модель фильтрационного горения является достаточно сложной, но реализующиеся условия протекания реакции предполагают возможность упрощения модели за счет исключения ряда слагаемых. Наиболее часто такому редуцированию подлежит процесс межфазного теплообмена. Модель, использующая предположение о бесконечно интенсивном теплообмене между пористой средой и топливом была рассмотрена подробно в [22]. Качественно новым результатом исследования явился вывод, что реакцию горения возможно затормозить за счёт внутреннего теплового взаимодействия, что приводит к неполному выгоранию поступающего реагента. В рамках статьи показано, что в таких случаях система уравнений может быть сведена к простой однотемпературной модели, состоящей из двух уравнений. Данная модель может быть эффективно использована для инженерных расчётов в случае, когда теплообмен между рабочим телом и пористой засыпкой допустимо рассматривать, как бесконечно большой. Решение этой системы уравнений было получено методом сращиваемых асимптотических разложений в [31].

Развитием данной работы стал новый подход к моделированию распространения волны горения, который основан на двухтемпературной модели, базирующейся на методах, приведенных в [27]. Однако для таких моделей поднимается вопрос об устойчивости численного моделирования для широкого спектра начальных условий, а решение данной проблемы плохо освещено в литературе.

Помимо предположения о бесконечно быстром теплообмене между рабочим телом и пористой средой, математические модели могут быть упрощены за счёт исключения из рассмотрения некоторых процессов, таких как конвективно-диффузионный перенос тепла в топливе. Такой подход представлен в работе [23]. Согласно данным, описанным в этой статье увеличение энтальпии поступающего к фронту горения топлива, осуществляется исключительно за счёт процесса переноса тепла от пористой среды в газ, а скорость движения фронта горения может быть определена в соответствии с моделью теплового взрыва.

Комплексный подход к анализу влияния каждого слагаемого в математической модели фильтрационного горения был осуществлен в рамках работы Хеннеке [57]. Его работы по численному моделированию обедненной метано-воздушной смеси показали важность учета механизма химической реакции в ходе фильтрационного горения. Для снижения временных затрат на численное моделирование было проведено упрощение системы уравнений для смесей с низким содержанием горючего за счёт исключения газофазной диффузии и радиационного теплового потока. Также в контексте данной работы поднимается вопрос о влиянии механизма реакции на протекание всего процесса в целом.

Данный вопрос действительно важен так как термоэлектрокаталитические двигатели используют засыпки на основе оксида алюминия или карбида кремния, покрытого иридием, являющегося катализатором реализующихся в камере химических реакций. Работа Гао [50]

посвящена сравнению фильтрационного горения, протекающего в условиях инертной пористой засыпки и пористой среды, покрытой катализатором. В работе продемонстрировано что инертные и каталитические засыпки демонстрируют разную чувствительность к таким факторам как изменение конструкции и свойств пористого слоя при управлении положением фронта горения и температурными характеристиками пламени.

В основном, работы в этой области посвящены решению прикладных индустриальных задач, а в качестве программного обеспечения, моделирующего процессы фильтрационного горения, применяются специальные коммерческие средства, такие как ANSYS Fluent. Впервые использование средств CFD для моделирования термоэлектродокаталитических двигателей малой тяги были продемонстрированы в [109]. Целью работы была оптимизация пористой засыпки и конструкции двигателя в целом. Учет процессов сопряженного теплообмена при фильтрационном горении реализован через механизм пользовательских функций, расширяющих возможности коммерческого программного обеспечения. Ещё одним примером аналогичного подхода является работа Хоу по моделированию процесса разложения гидразина на пористой засыпке в стационарной постановке [59]. Данная работа является обобщением существующих на данный момент наработок по моделированию фильтрационного горения в цилиндрическом реакторе.

Среди недостатков этих работ можно выделить допущение о стационарности процесса и невозможность тонкой настройки решения, что приводит к значительным временным затратам при моделировании. Эта ресурсоёмкость может быть объяснена существованием двух принципиальных проблем.

Первая проблема – это разномасштабность реализующихся в камере сгорания процессов, обусловленная наличием процессов горения [14]. Особенно важно здесь отметить сложность моделирования одновременно

взаимодействия кинетического и диффузионного режимов, которое порождает такую важную макрохарактеристику, как нормальная скорость распространения пламени. Попытки численного определения данной величины являются предметом большого количества работ, к разбору которых мы обратимся ниже.

Вторая проблема – появление дополнительного масштаба специфичного для фильтрационного горения, обусловленного характерными временами передачи тепла. Масштаб кондуктивного теплопереноса, вообще говоря, является самым главным для явления фильтрационного горения и требует наибольшего внимания при моделировании.

Для решения этих проблем был применен подход с делением рабочего пространства на отдельные зоны согласно характерным процессам происходящим в них.

Наиболее известной работой по качественному изучению фильтрационного горения, а также численному моделированию стационарного и нестационарного режимов работы термokatалитического ракетного двигателя при различных условиях работы являются исследования Кестена [66–70]. Несмотря на комплексность предложенной математической модели двигателя, использованное в модели упрощение, заключающееся в том, что вся энергия, высвободившаяся в ходе разложения гидразина, мгновенно тратится на испарение свежей порции топлива, не позволяет в полной мере оценить реальную температуру в камере сгорания двигателя, и, что более критично, предсказать аварийные режимы работы двигательной установки.

Более полная модель была предложена в ходе работы по упрощению математической модели Кестена, где было предложено выделять три пространственные зоны в реакторе: зона подогрева, двухфазная зона и постиндукционная зона (postinduction) [103]. В зоне подогрева, как и в работе Кестена, предполагается, что вся высвобожденная в ходе реакции

разложения энергия тратится для нагрева гидразина до точки кипения. В двухфазной зоне сосуществуют жидкое топливо, которое не успело испариться и продолжается фазовый переход с образованием паров гидразина. В конце этой зоны происходит полное разложение уже окончательно испарившегося гидразина на водород, азот и аммиак. В третьей зоне происходит дальнейшее разложение полученного аммиака на водород и азот. Существенной проблемой является тот факт, что данная модель подходит только для двигателей на гидразине, в то время как двигатели малой тяги могут использовать в качестве топлива другие виды реагентов.

Рычков и Шокина в своей работе [34] предложили дробление рабочей области камеры термokatалитического двигателя на три зоны, для двух из которых применяются грубые расчётные сетки, а для одной – более мелкая расчётная сетка. Зоны грубой сетки применялись в областях, в которых масштабы процессов довольно велики (подогрев и испарение топлива), а зона мелкой сетки была построена для участка, в котором происходят химические реакции. Такое дробление позволяет использовать нересурсоёмкие явные разностные схемы в зонах грубой сетки, а основной вычислительный ресурс направить на решение уравнений аппроксимированных с помощью неявных схем. Существенной проблемой данного подхода является то, что построенные сетки стационарны и не учитывают движение фронта горения, в том числе за пределами мелкой сетки, что влечет за собой неустойчивость расчетного процесса. Кроме того, известно, что применение явных и неявных схем имеет свои недостатки. Явная схема требует использования малых шагов по времени, что увеличивает физическое время расчетов, а преимущества неявных схем нивелируется их сложностью за счет необходимости решения систем алгебраических уравнений.

Лаевский и Яушева в своей работе [27] промоделировали режим низких скоростей. Они выделили три зоны: зона нагрева, зона реакции и зона тепловой релаксации. Физически это выглядит, как перенос тепла по

пористому телу из зоны тепловой релаксации (здесь разогретые продукты газофазной реакции передают тепло в пористое тело) в зону подогрева (прогретое пористое тело нагревает горючую смесь). Проблему статичности сеток они решают путём введения маркеров, по которым происходит отслеживание перемещении фронта горения. Данная информация используется в дальнейшем для перестроения расчетной сетки и интерполяции данных с предыдущей расчетной сетки на новую.

Схожий подход с дифференциацией характерных зон в камере сгорания термokatалитических двигателей был использован в работе [108], где применялась теория гранулированного диффузионного пламени для моделирования горения микроалюминия и перекиси водорода. Данный подход является перспективным и, возможно, что эти модели найдут широкое применение для анализа разложения жидкого монотоплива в уплотненных слоях.

Предложенные одномерные модели с их схемой разделения на характерные зоны камеры термokatалитических двигателей позволили упростить процесс вычислений, за счёт использования нересурсоёмких алгоритмов на участках, где временные и пространственные масштабы процессов схожи и сконцентрировать все усилия на участках, где происходит химическое разложение. В потенциале данная методика могла бы быть расширена для использования в двумерной и трехмерной постановках.

Идея об увеличении числа измерений в задаче была развита в рамках работ Носовой [16, 25]. Для этого автор работы переписывает систему уравнений в смешанной постановке и реализует алгоритм на основании модификации конечно-элементного метода Равиарта [90].

Недостатком этих моделей является жесткая привязка к двумерным задачам. Этот вопрос может быть решён за счёт использования метода конечных элементов, где появляется возможность моделирования реакторов произвольной формы [32]. Численные расчёты, использующие

модифицированную схему, хорошо согласуются с экспериментальными данными, а использование методов распараллеливания приводит к увеличению производительности алгоритма. Переход к большему количеству измерений позволил в ходе численного эксперимента зафиксировать неоднородность структуры волны горения по радиальной координате за счёт перетоков тепла в стенку и точнее предсказывать появление неустойчивых режимов. Следующим этапом данной работы может быть применение подхода дробления на зоны не только для задач фильтрационного горения газов, но и фильтрационного горения жидких топлив. Данная задача требует введения дополнительной зоны, на протяжении которой происходит фильтрация и испарение несжимаемой жидкой фазы. Таким образом, модель минимизирует количество допущений, необходимых для составления физико-математической модели фильтрационного горения.

В контексте изучения внутрикамерных процессов термokatалитических ЖРДМТ следует отметить, что применение таких типов ракетных двигателей в своей сути подразумевает использование жидких компонентов, так как их высокая плотность позитивно сказывается на размерах бака, а, следовательно, и массогабаритных характеристиках конечного изделия. Однако, следует отметить, что хоть фильтрационное горения жидкостей включает в себя дополнительный процесс в виде испарения топлива, качественно процессы горения жидких и газообразных монотоплив по своей сути схожи. Несмотря на существенную разницу в скоростях распространения пламени, явно прослеживается аналогия между режимами горения жидких монотоплив и газа, ввиду схожести основных структурных характеристик волн горения и механизмов переноса тепла [64]. В таком случае рассмотрение работ по фильтрационному горения не только жидких топлив, но и газов в рамках данного обзора является оправданным. Помимо этого, Какуткина в другой своей работе [65] указывает на принципиальную схожесть между процессами фильтрационного горения и горения в узкой

трубке, что позволяет экстраполировать имеющиеся данные по такому виду горения на пористую область.

Моделирование процесса фильтрации несжимаемой жидкости с использованием метода конечных элементов было подробно рассмотрено Лаевским [26]. Используемая в публикации модель реализована на основе смешанного метода конечных элементов с использованием пространства Равьяра-Тома и схемы предиктор-корректор второго порядка точности. Используемая модель позволяет одновременно учитывать баланс масс, капиллярные силы и точную связь между скоростями фаз, что делает модель более физически корректной.

Говоря о прикладном применении модели фильтрационного горения в камерах термokatалитических двигателей для целей аэрокосмической отрасли, существенно важной задачей в рамках исследования данного процесса является определение скорости распространения фронта разложения. Например, непосредственное вычисление скорости фронта с использованием каких-либо характерных значений, полученных в ходе решения начально-краевой задачи фильтрационного горения, сталкивается с проблемой устойчивости конечного численного решения, при этом показано, что процедуры осреднения не позволяют с достаточной точностью прогнозировать фактическое положение фронта [27].

Описанные выше модели опираются на допущение, связанное со стационарностью «поля» пористости, однако за все время исследования и отработки термokatалитических двигателей был выявлен эффект спекания пористой засыпки из-за значительных температур [60]. Данный параметр может значительно увеличивать гидравлическое сопротивление засыпки, что уменьшает реализуемое в камере сгорания давление.

В работе [8] был проведен ряд численных экспериментов, направленных на моделирование процесса фильтрационного горения в засыпке. В рамках этого исследования был проведен имитационный

численный анализ, в котором слой катализатора рассматривался как одномерная пористая среда. Результирующие физические явления были исследованы с учетом изменений характеристик слоя катализатора, вызванных разрушением его гранул. Из наблюдений за различными экспериментами с горячим обжигом было определено, что в ситуациях отказа разложения преимущественно повреждалась область, находившаяся ближе к входному сечению камеры сгорания. Были смоделированы различные случаи, основанные на дроблении и потере массы гранул катализатора. В качестве результатов расчетов получены распределения температуры, массовой доли частиц, скорости гетерогенной реакции и давления после разрушения слоя катализатора. Давление на выходе из камеры разложения и тяга на выходе из сопла контролировались с течением времени.

Помимо физического разрушения вследствие термоциклических нагрузок, приводящих к уменьшению площади поверхности катализатора и перераспределению пористости по длине каталитического пакета за счет появления локальных уплотнений и пустот, имеет место изменение теплофизических свойств каталитического слоя со временем, обусловленное теми же причинами. Спекание гранул приводит к снижению удельной поверхности теплообмена между рабочим телом и засыпкой, а превращение гранул в мелкий порошок приводит к уменьшению коэффициента теплопроводности пористого каркаса так как эффективное значение теплопроводности пропорционально $1 - \varepsilon$.

Наиболее полная на текущий момент модель фильтрационного горения жидкого монотоплива была представлена в работе Асенцио [39, 40]. Описываемая в работе математическая модель опирается на монографию Кестена, однако является значительной её модификацией, позволяющей использовать для моделирования фильтрационного разложения не только гидразина на конкретной засыпке из катализатора Shell-405, но и любого друга топлива. Созданный на основании предложенной Асенцио модели

конечно-объёмный решатель на основе базового решателя reactingFoam платформы OpenFOAM [58] требует незначительной доработки в виде возможности учёта неоднородности распределения пористости по длине реактора, создания сопряженного решателя на его базе, а также обобщения используемого в работе параметра, именуемого извилистостью, который может характеризовать как форму элементов засыпки или же пористой структуры в целом.

Говоря о границах применимости указанной модели следует отметить, что при всей её комплексности, необходимо в качестве исходных данных задавать константы химических реакций, получение которых представляют собой трудоемкий процесс, особенно если речь идет о новых топливных составах. Помимо сложности в определении констант химических реакций, вычислительная сложность моделирования полного кинетического механизма требует использования значительных вычислительных ресурсов. Однако в работах [53] показано, что возможно сокращение подробного кинетического механизма до одностадийной модели, при этом она правильно воспроизводит скорость газовой выделенной и теплообразования. Но даже в такой постановке, эффект разномасштабности процессов, описанный ранее вводит ограничения на максимальный шаг по времени, а, следовательно, проведение численных экспериментов все равно требует затрат значительных вычислительных ресурсов.

Следует отметить, что значения коэффициента теплообмена вычисляются на основе эмпирических методик и могут потребовать уточнения ввиду особенностей устройства каталитического пакета, представляющего из себя не просто среду с межпоровыми каналами. В действительности элементы засыпки, используемые для формирования каталитического пакета имеют пористую поверхностную структуру, что дополнительно влияет на теплообмен между твердой матрицей и рабочим телом.

На основании проведенного литературного обзора можно сказать, что несмотря на значительный объем экспериментальных и теоретических исследований, многие аспекты фильтрационного горения остаются недостаточно изученными. В частности, не обобщены закономерности влияния скорости подачи топлива, начальной температуры каталитического пакета, пористости засыпки на положение и устойчивость фронта разложения, а также тепловое состояние камеры сгорания термокatalитического жидкостного ракетного двигателя малой тяги. Все это обуславливает необходимость проведения исследования фильтрационного горения, направленного на выявление закономерностей протекания процесса и прогнозирование рабочих характеристик двигателя.

Глава 2. МОДЕЛЬ НЕСТАЦИОНАРНОГО ФИЛЬТРАЦИОННОГО ГОРЕНИЯ

В данной главе представлено подробное описание численной модели фильтрационного горения жидкого монотоплива в условиях, характерных для работы термokatалитического ЖРДМТ. Сформулирована постановка задачи, включающая взаимодействие между межпоровым газом, поверхностным газом и твердой фазой пористой засыпки. Рассмотрены базовые физические допущения и соотношения, описывающие процессы в камере сгорания. Описан алгоритм дискретизации и решения системы уравнений, описывающей физико-математическую модель фильтрационного горения.

Во втором разделе главы продемонстрирована постановка численного эксперимента, которая будет использована при проведении параметрического исследования. Постановка включает в себя геометрические характеристики камеры сгорания и пористой засыпки, теплофизические свойства материалов засыпки, а также значения, используемые при вычислении констант химических реакций.

2.1 Основные уравнения и физические параметры

Математическая нестационарная модель фильтрационного горения жидкого монотоплива включает в себя уравнения сохранения массы, сохранения момента импульса и сохранения энергии в газовой фазе, а также процессы переноса тепла по пористой структуре.

Использованная в работе модель основывается на следующих допущениях:

- Процессом перехода жидкого монотоплива в газовую фазу пренебрегаем, ввиду принципиально схожести процессов фильтрационного

горения жидких монотоплив и его паров, а также на малую толщину зоны испарения, рассматриваются процессы взаимодействия пористой структуры и газовой фазы.

- В газовой фазе имеют место процессы гомогенного разложения в межпоровой области и гетерогенные процессы на поверхности элементов пористой структуры, то есть химическое превращение разделяется на 2 вида: реакция в объеме пор (газ-газ) и реакции на поверхности частиц (газ-твёрдое тело).
- Пористая засыпка изотропная, для определения значений пористости и эффективной площади поверхности реакции используются формулы для отдельных элементов пористой засыпки в виде частиц, форма которых приближена к сферической.
- Ламинарный характер течения газа через пористый слой. Данное допущение обусловлено тем фактом, что размер пор намного меньше характерного масштаба турбулентности для заданных скоростей фильтрации.

Модель из [39] может быть представлена как совокупность нескольких процессов, в так называемом репрезентативном элементарном объеме [42, 103], представляющем из себя метод усреднения по объему, в который входят: твёрдая фаза, межпоровый газ и поверхностный газ (рисунок 2.1).

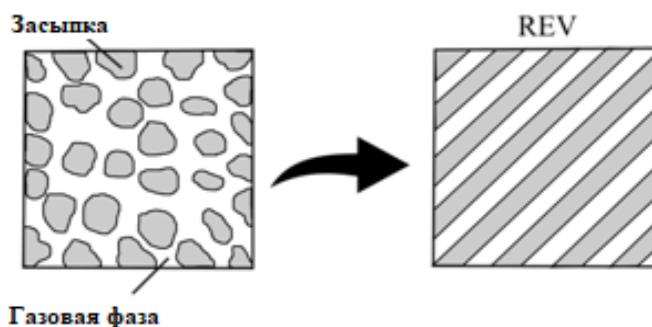


Рисунок 2.1 Переход от реальной геометрии к репрезентативному элементарному объему

Данный подход позволяет связать микроскопическое строение среды с макроскопическими уравнениями модели, не рассматривая в явном виде каждую пору, а описывая среду как условно однородную смесь газа и твердого каркаса. Аппроксимированная рабочая область будет включать в себя пористую засыпку, межпоровый газ и поверхностный газ, определение которых указано далее.

Под межпоровым газом в рамках рассматриваемой модели будем понимать движущуюся часть рабочего тела, заполняющую межпоровое пространство каталитического пакета, в объеме которого происходят гомогенные реакции. Газ в межпоровом пространстве участвует в теплообмене как с твердым телом, так и с поверхностным газом.

Под поверхностным газом будем понимать часть рабочего тела, которая непосредственно взаимодействует с поверхностью элементов, составляющих каталитический пакет. В этой зоне протекает гетерогенная химическая реакция — каталитическое разложение компонентов топлива и образующихся продуктов, сопровождающаяся массопереносом между газом, находящимся в порах и на поверхности катализатора. Одновременно происходят диффузия реагентов в поры частиц пористой засыпки, а также процессы адсорбции и десорбции на их поверхности.

После того как были определены основные понятия, используемые в модели, перейдем к детальному рассмотрению процессов, характерных для каждой компоненты, входящий в состав репрезентативного элементарного объема.

Схематическое представление основных процессов тепло- и массообмена в межпоровом газе приведено на рисунке 2.2. Синими стрелками обозначены направления переноса массы между межпоровым и поверхностным газами, внутри которых также протекают гомогенные химические реакции. Красными стрелками показаны пути теплообмена: он

осуществляется как между межпоровым и поверхностным газами, так и между газовой фазой и пористой засыпкой.

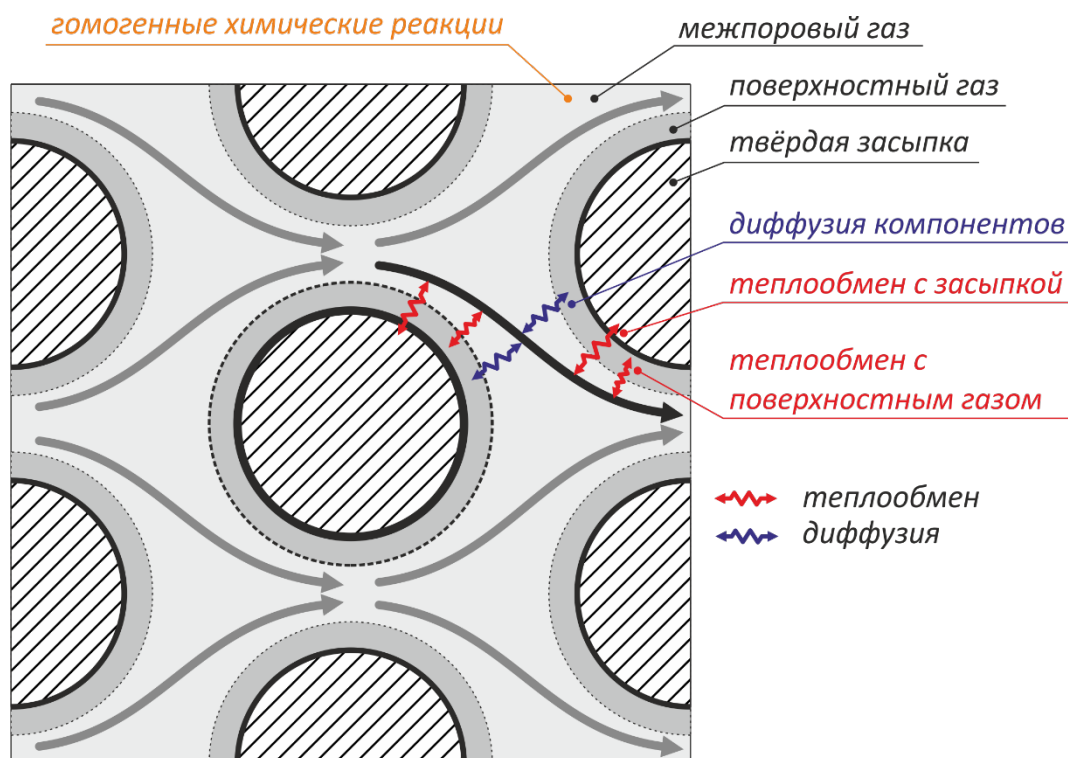


Рисунок 2.2 Процессы в межпоровом газе

Описанные выше процессы в межпоровом пространстве описываются системой уравнений, включающей уравнение сохранения массы для всей смеси, уравнения сохранения массы для отдельных компонентов, а также уравнения сохранения импульса и энергии.

$$\varepsilon \frac{\partial \rho}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho \mathbf{v}) = \dot{m}, \quad (1)$$

$$\varepsilon \frac{\partial (\rho Y_i)}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho Y_i \mathbf{v}) - \nabla \cdot (\varepsilon \rho D_i \nabla Y_i) = \varepsilon \dot{\omega}_i - a_s K_i \rho_\Sigma (Y_i - \tilde{Y}_i), \quad (2)$$

$$\frac{1}{\varepsilon} \frac{\partial (\rho \mathbf{v})}{\partial t} + \frac{1}{\varepsilon^2} \nabla \cdot (\rho \mathbf{v} \mathbf{v}) = -\nabla p + \frac{\mu}{\varepsilon} \nabla^2 \mathbf{v} - Da \cdot \mu \mathbf{v} - F \cdot \rho |\mathbf{v}| \mathbf{v}, \quad (3)$$

$$\varepsilon \frac{\partial (\rho E)}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho E \mathbf{v}) - \nabla \cdot (\varepsilon h \nabla a) = \varepsilon q + \frac{\partial p}{\partial t} + Q_c + \tilde{Q}. \quad (4)$$

где ε – пористость засыпки, a_s – поверхность пористой засыпки, \dot{m} – источниковый член, описывающий массообмен между межпоровым и

поверхностным газом, $\dot{\omega}_i = W_i \sum_r^{N_r} \nu_{i,r} \omega_r$ – скорость изменения концентрации i -го компонента в ходе гомогенной реакции, W_i – молекулярная масса компонента, $\nu_{i,r}$ – стехиометрический коэффициент, $\omega_r = k(T) \prod_j C_j^{\nu_{j,r}}$ – скорость протекания реакции, $k(T)$ – константа химической реакции, C – концентрация компонента, K_i – коэффициент массообмена i -го компонента, Y_i – массовая доля i -го компонента в межпоровом газе, \tilde{Y}_i – массовая доля i -го компонента в поверхностном газе, ρ, μ, a – плотность, динамическая вязкость, температуропроводность межпорового газа, Da – число Дарси, F – число Форхгеймера, E – полная энергия, q – энергия выделяющаяся в ходе гомогенной реакции, $Q_c = \alpha(T_c - T)$ – источниковый член, связанный с теплообменом с пористой средой, $\tilde{Q} = \alpha(T_c - \tilde{T})$ – источниковый член, описывающий теплообмен с поверхностным газом, $\rho_\Sigma = \frac{\rho\varepsilon + \tilde{\rho}\varepsilon_p}{\varepsilon + \varepsilon_p}$ – плотность смеси межпорового и поверхностного газа.

Коэффициент массообмена рассчитывался с учётом эффективной диффузии, характеризующей совокупное влияние свойств диффундирующего вещества и геометрии пористой структуры. При этом учитывались безразмерное число Шервуда и характерный размер частиц каталитической засыпки:

$$K_i = \frac{\overline{D_i^{eff}} Sh}{d_{pa}}$$

где D_{eff} – эффективный коэффициент диффузии для i -го компонента, Sh – число Шервуда, d_{pa} – размер элемента засыпки.

Значение числа Шервуда определялось следующим соотношением [105]:

$$Sh = 2 + 1,1 Re_{pa}^{0,6} Sc^{\frac{1}{3}},$$

где $Re_{pa} = \frac{\varepsilon v \rho_{\Sigma} d_{pa}}{\mu_{\Sigma}}$ – число Рейнольдса, $Sc = \frac{\mu}{D_{eff} \rho_{\Sigma}}$ – число Шмидта, $\mu_{\Sigma} = \frac{\varepsilon \mu + \varepsilon_p \tilde{\mu}}{2}$ – вязкость смеси поверхностного и межпорового газов.

Значение эффективного коэффициент диффузии для течения в пористых средах определялось из соотношения:

$$\frac{1}{D_i^{eff}} = \frac{1}{D_i^{eff}} + \frac{1}{\tilde{D}_i^{eff}} = \frac{1}{\frac{\varepsilon}{\tau} D_i} + \frac{1}{\frac{\varepsilon}{\tau} \tilde{D}_i},$$

где D_i – коэффициент диффузии в пористой среде для межпорового газа, \tilde{D}_i – коэффициент диффузии в пористой среде для поверхностного газа, τ – извилистость. Непосредственно сами коэффициенты диффузии для компонента в многокомпонентной газовой смеси определялись согласно правилу Уилки:

$$D_i = \frac{1 - X_i}{\sum_{i \neq j} \frac{X_j}{D_{ij}}}$$

где D_{ij} – бинарный коэффициент диффузии, X_i и X_j – молярные доли компонентов i и j . Бинарный коэффициент диффузии определялся следующим соотношением:

$$D_{ij}(p, T) = D_{ij}(p_r, T_r) \left(\frac{p_r}{p} \right) \left(\frac{T_r}{T} \right)^{\frac{3}{2}},$$

где p_r, T_r – референсные значения давления и температуры, $D_{ij}(p_r, T_r)$ – коэффициент диффузии, вычисленный при референсных значениях. Рассмотрим формулу Чепмена-Энскога для определения коэффициента диффузии:

$$D_{ij} = \frac{0,0188 \cdot T^{\frac{3}{2}} \cdot \sqrt{\frac{1}{M_i} + \frac{1}{M_j}}}{p \sigma_{ij}^2 \Omega_{ij}^{(1,1)}(T^*)},$$

где M_i и M_j – молекулярная масса компонентов i и j , $\sigma_{ij} = \frac{\sigma_i + \sigma_j}{2}$ – среднее значение диаметра столкновения, $\Omega_{ij}^{(1,1)}(T^*)$ – интеграл столкновений, T^* – приведенная температура. Из приведенной выше формулы можно заметить, что значение коэффициента диффузии уже зависит от давления и температуры, однако использование референсных значений позволило снизить нагрузку на вычислительные мощности путем кэширования референсного значения.

Неоднородность пористости по длине камеры сгорания, характерная для реальных конструкций, которые допускают использование блоков с различной пористостью, а также возможная анизотропия этого параметра требует разрешать такие сопряжения как «пористая среда с порозностью ε_1 – пористая среда с порозностью ε_2 ». Следует отметить, что обработка разрывов пористости представляет собой непростую задачу [86]. Одним из физических ограничений является необходимость при решении системы уравнений гарантировать на границе разрыва непрерывность теплового потока $\lambda_1 \frac{\partial T_1}{\partial n} = \lambda_2 \frac{\partial T_2}{\partial n}$. Рассматривая математическую составляющую следует отметить, что на границе контрольных объемов требуется аккуратно переинтерполировать значения пористости. Значение на границе можно определить как:

$$\varepsilon_f = \frac{\varepsilon_1 + \varepsilon_2}{2},$$

где ε_1 – пористость первого участка, ε_2 – пористость второго участка, ε_f – значение на границе раздела.

При этом следует обратить внимание, что возможно использование и блоков из различных материалов. В случае различия теплофизических свойств материалов засыпки двух соседних блоков имеет место использование среднего гармонического значения:

$$\lambda_f = \frac{\lambda_1 \lambda_2}{2(\lambda_1 + \lambda_2)},$$

где λ_f – теплопроводность на границе контрольных объемов, λ_1 – теплопроводность первого участка, λ_2 – теплопроводность второго участка.

Зависимость динамической вязкости компонентов газовой смеси от температуры описывалась в соответствии с моделью Сазерленда в следующем виде:

$$\mu = A_s \frac{T^{\frac{3}{2}}}{T + T_s},$$

A_s, T_s - эмпирические константы, зависящая от газа.

Представленная модель достоверно воспроизводит экспериментальные результаты в требуемом для численного анализа диапазоне параметров. Значения используемых в ней коэффициентов были выбраны в соответствии со справочными данными [44].

Для расчёта температурных зависимостей теплоёмкости, энтальпии и энтропии применялась модель NASA [80], основанная на полиномиальных аппроксимациях следующего вида:

$$\frac{c_p(T)}{R} = a_1 + a_2 T + a_3 T^2 + a_4 T^3 + a_5 T^4$$

$$\frac{H(T)}{RT} = a_1 + \frac{a_2}{2} T + \frac{a_3}{3} T^2 + \frac{a_4}{4} T^3 + \frac{a_5}{5} T^4 + \frac{a_6}{T}$$

$$\frac{S(T)}{R} = a_1 \ln T + a_2 T + \frac{a_3}{2} T^2 + \frac{a_4}{3} T^3 + \frac{a_5}{4} T^4 + a_7$$

где R – универсальная газовая постоянная.

Значение константы скорости химической реакции определялось на основе температурной формы уравнения Аррениуса:

$$k = AT^\beta e^{-\frac{T_a}{T}},$$

где $k(T)$ – константа скорости химической реакции, A – предэкспоненциальный множитель, β – температурный показатель (эмпирический параметр), $T_a = \frac{E_a}{R}$ – температурный аналог энергии активации, T – температура.

Далее остановимся на рассмотрении процессов в поверхностном газе. На рисунке 2.3 направления движения компонентов топлива, поступающих в реакционную зону, а также продуктов реакции обозначены синими стрелками. В свою очередь красными стрелками указаны направления теплообмена в системе.

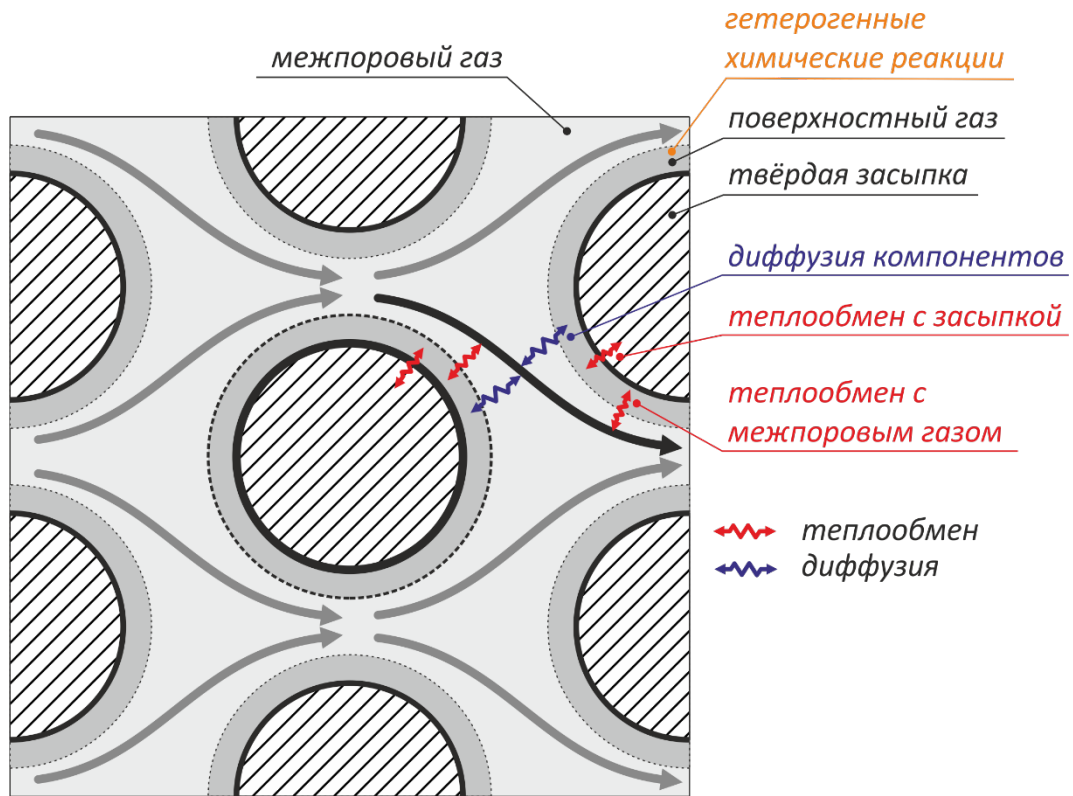


Рисунок 2.3 Процессы в поверхностном газе

Система уравнений, описывающая поверхностный газ включает в себя уравнения сохранения массы для смеси и для компонента смеси, а также уравнение сохранения энергии:

$$\varepsilon_p \frac{\partial \tilde{\rho}}{\partial t} = -\dot{m}, \quad (5)$$

$$\varepsilon_p \frac{\partial (\tilde{\rho} \tilde{Y}_i)}{\partial t} = \dot{\tilde{\omega}}_i + a_s K_i \rho_\Sigma (Y_i - \tilde{Y}_i), \quad (6)$$

$$\varepsilon_p \frac{\partial (\tilde{\rho} \tilde{h})}{\partial t} = \varepsilon_p \tilde{q} + \tilde{Q}_c - \tilde{Q}. \quad (7)$$

где ε_p – пористость частиц, $\tilde{\rho}$ – плотность поверхностного газа, \tilde{h} – энтальпия поверхностного газа, \tilde{Y}_i – массовая доля i -го компонента в поверхностном газе, $\dot{\tilde{\omega}}$ – скорость изменения концентрации i -го компонента в ходе гетерогенной реакции, \tilde{q} – тепловыделение в ходе гетерогенной химической реакции, \tilde{Q}_c – источниковый член, описывающий теплообмен между поверхностным газом и пористой засыпкой, $\rho_\Sigma = \frac{\rho\varepsilon + \tilde{\rho}\varepsilon_p}{\varepsilon + \varepsilon_p}$ – плотность смеси межпорового и поверхностного газа.

Термодинамические свойства смеси идеальных газов для поверхностного газа рассчитывались по тем же методическим принципам, что и для межпорового газа.

Для пористой среды (рисунок 2.4) характерен кондуктивный механизм теплопереноса, осуществляемый между соседними частицами каталитической засыпки. Помимо теплопереноса внутри самой засыпки имеет место и теплообмен с межпоровым и поверхностными газами.

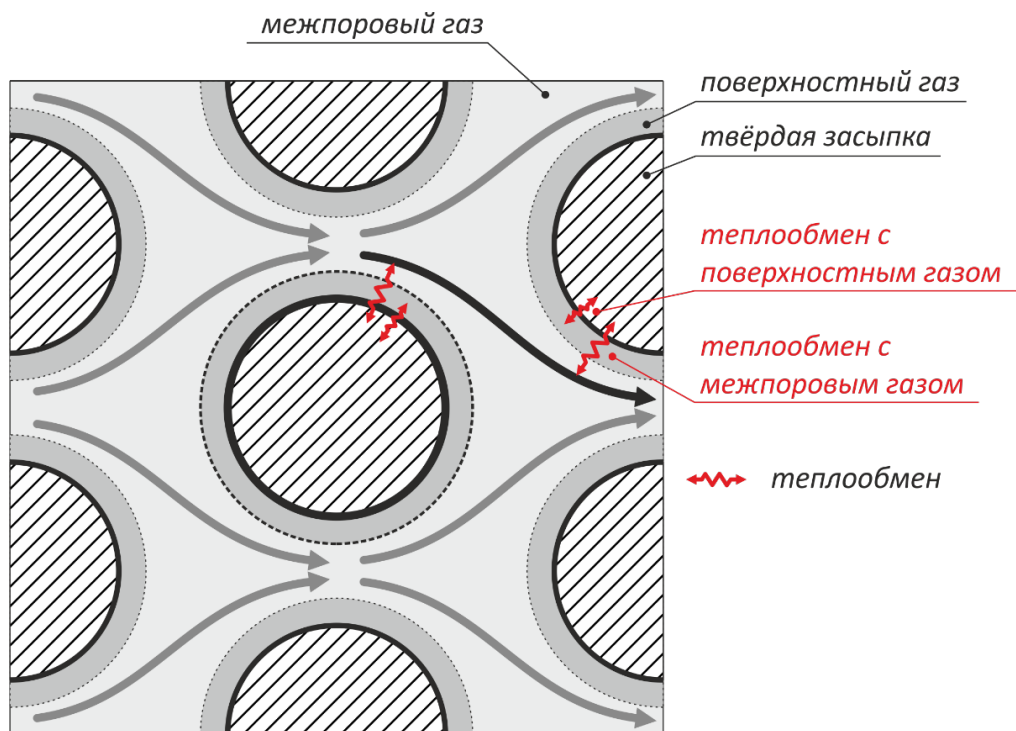


Рисунок 2.4 Процессы в пористой среде

Математическое описание теплового состояния пористой засыпки сводится к решению уравнения нестационарной теплопроводности:

$$(1 - \varepsilon - \varepsilon_p) \frac{\partial(\rho_c c_{p,c} T_c)}{\partial t} = \nabla \cdot ((1 - \varepsilon - \varepsilon_p) \lambda_c \nabla T_c) - Q_c - \tilde{Q}_c \quad (8)$$

где $\rho_c, c_{p,c}, \lambda_c, T_c$ – плотность, теплоёмкость при постоянном давлении, коэффициент теплопроводности и температура пористой засыпки.

Межфазный теплообмен между твердым каркасом и окружающими его газовыми фазами определялись на основании локальных значений числа Нуссельта, позволяющего выразить интенсивность теплоотдачи в безразмерной форме. Число Нуссельта определялось следующим эмпирическим соотношением [105]:

$$Nu = 2 + 1,1 Re_{pa}^{0,6} Pr^{\frac{1}{3}},$$

где $Pr = \frac{\mu_m C_{pm}}{\lambda_m}$ – число Прандтля, $C_{pm} = \frac{\varepsilon C_p + \varepsilon_p \tilde{C}_p}{\varepsilon + \varepsilon_p}$ – удельная теплоемкость при постоянном давлении смеси межпорового и поверхностного газов, $\lambda_m = \frac{\varepsilon \lambda + \varepsilon_p \tilde{\lambda}}{\varepsilon + \varepsilon_p}$ – коэффициент теплопроводности смеси.

В качестве начальных условий в расчетной области задаются однородные по пространству распределения термодинамических и гидродинамических параметров, соответствующих состоянию системы до момента подачи топлива. А именно, в начальный момент времени предполагается, что:

$$T_c(\mathbf{x}, 0) = T_{c,0}$$

$$T(\mathbf{x}, 0) = T_0,$$

$$Y_i(\mathbf{x}, 0) = Y_{i,0}$$

$$\tilde{Y}_i(\mathbf{x}, 0) = \tilde{Y}_{i,0},$$

$$v(\mathbf{x}, 0) = v_0,$$

$$p(\mathbf{x}, 0) = p_0,$$

где T_c – температура пористой засыпки, T – температура межпорового газа, Y_i, \tilde{Y}_i – массовые доли i -го компонента в межпоровом и поверхностном газе соответственно, \mathbf{v} – вектор скорости газа в межпоровом пространстве, p – давление.

Граничные условия определяются следующим образом:

На входе в камеру сгорания задаются:

- скорость подачи газа вдоль оси реактора: $v_x = u_{flow}(t)$,
- состав подаваемого топлива: $Y_i = Y_{i,in}$,
- температура входящего потока: $T = T_{in}$

В выходном сечении (в конце пористой засыпки) задаются мягкие граничные условия для основных параметров:

$$\frac{\partial \mathbf{v}}{\partial n} = 0; \frac{\partial Y_i}{\partial n} = 0; \frac{\partial T}{\partial n} = 0;$$

На стенке задается условие непроницаемости и адиабатичности:

$$\mathbf{v} \cdot \mathbf{n} = 0; \frac{\partial Y_i}{\partial n} = 0; \frac{\partial T}{\partial n} = 0.$$

Для решения системы уравнений (1)-(8), описывающей процессы переноса массы и энергии в пористой среде, применяется метод контрольных объемов [83] (Finite Volume Method, FVM), используемый в рамках платформы OpenFOAM. Данный метод основывается на интегрировании уравнений переноса по элементарным ячейкам расчетной сетки – так называемым контрольным объемам. Общая процедура дискретизации с применением данного метода включает следующие ключевые этапы:

1. Исходные дифференциальные уравнения интегрируются по объему ячейки.

2. С использованием теоремы Остроградского-Гаусса полученные интегральные выражения могут быть преобразованы в поверхностные, определяемые как суммы потоков переменной через грани контрольных объемов.

3. Поверхностные и объемные интегралы аппроксимируются с использованием значений на гранях контрольных объемов. Для дискретизации диффузионных членов использовался метод центральных разностей Gauss linear. для дискретизации конвективных членов используется схема van Leer [73], обеспечивающая второй порядок точности. Схема van Leer относится к классу TVD-схем [55] и позволяет достичь высокой точности решения без осцилляций на резких градиентах.

Рассмотрим подробнее алгоритм вычисления значения переменной на грани двух контрольных объемов с использованием схемы van Leer. Прежде чем определить значение на границе, предварительно следует определить значение r , характеризующее градиент переменной ϕ :

$$r = \frac{\phi_C - \phi_{UP}}{\phi_D - \phi_C},$$

где ϕ_C – значение переменной в текущей ячейке, ϕ_D – значение переменной в ячейке ниже по потоку, ϕ_{UP} – значение переменной во второй ячейке вверх по потоку.

Значение ограничителя определяется следующим выражением:

$$\psi(r) = \frac{2r}{1+r}.$$

Интерполированное значение на грани будет определяться с помощью следующего соотношения:

$$\phi_f = \phi_C + \frac{1}{2}\psi(r)(\phi_D - \phi_C),$$

где ϕ_f – значение на грани.

После проведения описанной выше процедуры дискретизации, уравнения переноса, использованные в модели, принимают следующий вид.

Уравнение сохранения массы для межпорового газа:

$$\frac{V_C \varepsilon}{\Delta t} (\rho_C^{n+1} - \rho_C^n) + \sum_f \rho_f \mathbf{v}_f \cdot \mathbf{S}_f = -V_C \dot{m}_C,$$

Уравнение сохранения для массовых долей компонентов в межпоровом газе:

$$\begin{aligned} \frac{V_C \varepsilon}{\Delta t} ((\rho Y_i)_C^{n+1} - (\rho Y_i)_C^n) + \sum_f (\rho Y_i)_f (\mathbf{v}_f \cdot \mathbf{S}_f) - \varepsilon \sum_f (\rho_f D_{i,f}) \frac{Y_{i,N} - Y_{i,C}}{d_{CN}} \cdot S_f \\ = V_C [\varepsilon_C \dot{\omega}_{i,C} - a_{s,C} K_{i,C} \rho_{\Sigma,C} (Y_{i,C} - \tilde{Y}_{i,C})], \end{aligned}$$

Уравнение сохранения момента импульса для межпорового газа:

$$\begin{aligned} \frac{V_C}{\varepsilon \Delta t} ((\rho \mathbf{v})_C^{n+1} - (\rho \mathbf{v})_C^n) + \frac{1}{\varepsilon^2} \sum_f (\rho \mathbf{v})_f (\mathbf{v}_f \cdot \mathbf{S}_f) \\ = - \sum_f p_f \mathbf{S}_f + \frac{1}{\varepsilon} \sum_f \mu_f \cdot \frac{\mathbf{v}_N - \mathbf{v}_C}{d_{CN}} \cdot S_f - Da \cdot \mu_C \cdot \mathbf{v}_C \cdot V_C \\ - F_i \rho |\mathbf{v}_C| \mathbf{v}_C, \end{aligned}$$

Уравнение сохранения энергии для межпорового газа:

$$\begin{aligned} \frac{V_C \varepsilon}{\Delta t} ((\rho E)_C^{n+1} - (\rho E)_C^n) + \sum_f \rho_f E_f (\mathbf{v}_f \cdot \mathbf{S}_f) - \varepsilon \sum_f h_f \cdot \frac{a_N - a_C}{d_{CN}} \cdot S_f \\ = V_C \left(\varepsilon q + \frac{p_C^{n+1} - p_C^n}{\Delta t} + (Q_C + \tilde{Q}) \right) \end{aligned}$$

Уравнение сохранения массы для поверхностного газа:

$$\frac{V_C \varepsilon}{\Delta t} (\tilde{\rho}_C^{n+1} - \tilde{\rho}_C^n) = -\dot{m}_C V_C,$$

Уравнение сохранения массовых долей компонентов в поверхностном газе:

$$\frac{\varepsilon_p V_C}{\Delta t} ((\rho \tilde{Y}_i)_C^{n+1} - (\rho \tilde{Y}_i)_C^n) = V_C (\tilde{\omega}_{i,C} + a_{s,C} K_{i,C} \rho_{\Sigma,C} (Y_{i,C} - \tilde{Y}_{i,C})),$$

Уравнение сохранения энергии в поверхностном газе:

$$\frac{V_C \varepsilon_p}{\Delta t} ((\tilde{\rho} \tilde{h})_C^{n+1} - (\tilde{\rho} \tilde{h})_C^n) = V_C (\varepsilon_p \tilde{q}_C + (\tilde{Q}_C)_C - \tilde{Q}_C),$$

Уравнение сохранения энергии в твердой фазе:

$$\begin{aligned} & \frac{V_C(1 - \varepsilon - \varepsilon_p)}{\Delta t} ((\rho_c c_{p,c} T)_C^{n+1} - (\rho_c c_{p,c} T)_C^n) \\ & = \sum_f (1 - \varepsilon - \varepsilon_p) \lambda_f \frac{T_C - T_N}{d_{CN}} S_f - V_C(Q_{c,c} + \tilde{Q}_{c,c}) \end{aligned}$$

Решение полученной системы алгебраических уравнений осуществляется с помощью итерационного алгоритма PIMPLE [77], реализованного в OpenFOAM. Метод PIMPLE объединяет преимущества двух классических подходов:

- SIMPLE (Semi-Implicit Method for Pressure Linked Equations) [88] обеспечивает устойчивость расчета при больших временных шагах,
- PISO (Pressure Implicit with Splitting of Operators) [62] обеспечивает точную коррекцию давления и скорости в нестационарных задачах.

Расчет по алгоритму PIMPLE, по сути, представляет собой на каждом временном шагу несколько внешних итераций SIMPLE, каждая из которых включает в себя несколько внутренних коррекций давления и скорости как в PISO.

Более подробно структура расчета по алгоритму PIMPLE для решаемой задачи представлена ниже:

1. Обновление параметров рабочих сред, вычисление термодинамических и транспортных свойств (теплоёмкость, вязкость, плотность и др.)
2. Решение уравнений сохранения массовых долей компонентов,
3. Решение уравнения сохранения энергии,
4. Решение дискретизированного уравнения сохранения момента импульса.

На этом этапе предполагается, что давление известно с предыдущей итерации, и уравнение решается с целью предсказать новое значение скорости \mathbf{v}^* .

5. Определение значения давления, путем решения уравнения вида:

$$\nabla \cdot \left(\frac{1}{A_p} \nabla p \right) = \nabla \cdot \mathbf{v}^*,$$

где A_p – диагональный коэффициент системы уравнений сохранения момента импульса. Данное уравнение получается путем подстановки скорости в уравнение неразрывности.

6. Коррекция скорости с учетом нового значения давления:

$$\mathbf{v}^{n+1} = \mathbf{v}^* - \frac{1}{A_p} \nabla (p^{n+1} - p^n)$$

7. Согласование поля давления и скорости с учетом нелинейности и нестационарности путем итерации по этапам 5–6 несколько раз.

8. После этого на основании полученных значений температуры и компонентного состава пересчитываются источниковые члены, характеризующие скорость образования и расходования компонентов.

9. Проверка условий выхода и при необходимости возврат к первому этапу.

Для повышения устойчивости численного решения при условии, что необходимо обеспечить минимальные вычислительные затраты в реализованной схеме расчета применяется одна внешняя итерация по алгоритму PIMPLE, в рамках которой производится двойная коррекция полей давления и скорости.

2.2 Валидация модели

Прежде чем переходить к анализу влияния различных факторов на процессы в камере сгорания термokatалитического ЖРДМТ, проведем сравнение результатов численного моделирования с экспериментальными данными, представленными в отчете Кестена [69], включающем в себя информацию об эволюции температуры межпорового газа в различных сечениях. При этом, в работе рассматриваются различные режимы подачи топлива в камеру сгорания.

В рамках настоящего исследования рассматривается осесимметричная задача о нестационарном фильтрационном горении жидкого монотоплива в камере сгорания термokatалитического жидкостного ракетного двигателя малой тяги с адиабатическими стенками.

В начальный момент времени $t = 0$ с в камеру сгорания поступает монотопливо в виде пара, который начинает взаимодействовать с каталитическим пакетом, характеризующимся пористостью ε и начальной температурой $T_{c,0}$. Массовый расход топлива определяется заданной скоростью u_{flow} , при этом вектор скорости направлен вдоль оси реактора. В выходном сечении задается постоянное давление $p = 1$ МПа. В качестве граничного условия на стенке используется условие прилипания. Схема расчетной области приведена на рисунке 2.5, где показаны основные направления потоков и характерные геометрические размеры расчетной области.

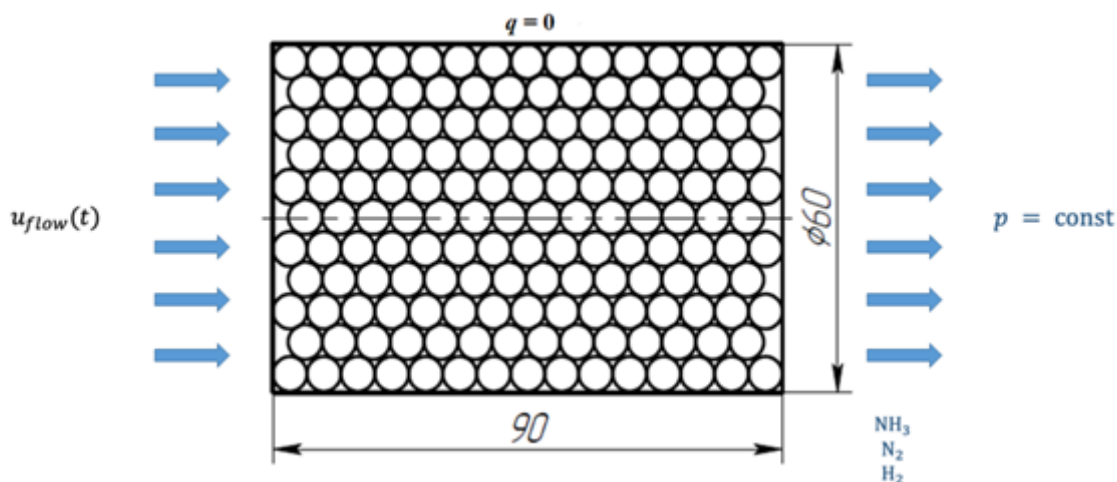


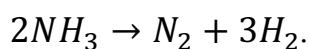
Рисунок 2.5 Схема расчетной области

В результате каталитической реакции разложения монотоплива формируется газовая смесь водорода, азота и аммиака, которая с остаточными парами топлива образует межпоровый и поверхностный газы. Значения коэффициентов, используемых при вычислении теплофизических и термодинамических параметров в диапазоне температур $T=200-6000$ К, представлены в таблице 2.1.

Таблица 2.1 Коэффициенты для определения термодинамических и теплофизических свойств

	H_2		N_2		NH_3	
	200-1000 К	1000-6000 К	200-1000 К	1000-6000 К	200-1000 К	1000-6000 К
a_1	2,34433112	2,93286575	3,53101	2,95258	4,46075151	2,09566674
a_2	$7,98052075 \cdot 10^{-3}$	$8,26608026 \cdot 10^{-4}$	$-1,23661 \cdot 10^{-3}$	0,0013969	$-5,68781763 \cdot 10^{-3}$	$6,14750045 \cdot 10^{-3}$
a_3	$-1,94781510 \cdot 10^{-5}$	$-1,46402364 \cdot 10^{-7}$	$-5,02999 \cdot 10^{-7}$	$-4,92632 \cdot 10^{-7}$	$2,11411484 \cdot 10^{-5}$	$-2,00328925 \cdot 10^{-6}$
a_4	$2,01572094 \cdot 10^{-8}$	$1,54100414 \cdot 10^{-11}$	$2,43531 \cdot 10^{-9}$	$7,8061 \cdot 10^{-11}$	$-2,02849980 \cdot 10^{-8}$	$3,01334626 \cdot 10^{-10}$
a_5	$-7,37611761 \cdot 10^{-12}$	$-6,888048 \cdot 10^{-16}$	$-1,40881 \cdot 10^{-12}$	$-4,60755 \cdot 10^{-15}$	$6,89500555 \cdot 10^{-12}$	$-1,71227204 \cdot 10^{-14}$
a_6	-813,065581	-917,935173	-1046,98	-923,949	-6707,54514	-6309,45436
a_7	-1,02432865	0,683010238	2,96747	5,87189	-1,34450793	9,59574081

Разложение аммиака в каталитическом реакторе сопровождается образованием газовой смеси, состоящей из азота и водорода. С точки зрения стехиометрии процесс можно представить в виде реакции:



Для расчета скорости реакции использовались следующие кинетические параметры: предэкспоненциальный множитель $A = 2,53 \cdot 10^{12}$, энергия активации, выраженная в температурной форме $T_a = 27777,78$, показатель при температурном множителе $\beta = 0$.

Значения коэффициентов, используемых в модели Сазерленда представлены в таблице 2.2.

Таблица 2.2 Значения коэффициентов для формулы Сазерленда

	H_2	N_2	NH_3
A_s	$6,36 \cdot 10^{-7}$	$1,406 \cdot 10^{-6}$	$1,297 \cdot 10^{-6}$
T_s	293,8	61,67	293,1

Каталитический пакет представляет собой засыпку из сферических элементов, выполненных из материала Shell-405, представляющего из себя оксид алюминия Al_2O_3 , на поверхность которого нанесен катализатор – иридий (*Ir*). В рамках представленного исследования зависимость теплофизических свойств от температуры данного материала не учитывается, используемые в расчетах данные приведены ниже в таблице Таблица 2.3.

Таблица 2.3 Теплофизические свойства материала засыпки

Свойство, ед. изм.	Значение
Плотность, кг/м ³	2186
Теплоемкость, кДж/(кг · К)	923
Коэффициент теплопроводности, Вт/(м · К)	0,07

Подача топлива в камеру сгорания осуществляется согласно циклограмме, зависящей от цели численного эксперимента. При

исследовании влияния параметров (кроме влияния режима подачи топлива) будем рассматривать подачу топлива с постоянным массовым расходом в течении всего расчёта ($\dot{m} = const$).

Расчётная область была разбита на структурированную гексагональную сетку, включающую 10 ячеек в радиальном и 200 ячеек в осевом направлениях. Выбор данной размерности сетки обоснован исследованием на сходимость численного решения, в рамках которого сравнивались ключевые параметры течения и процессов тепломассопереноса. Увеличение числа ячеек сверх указанных значений не приводило к заметному изменению вычисляемых параметров, что подтверждает достаточную детализацию сетки для поставленной задачи.

Пример пространственного распределения полей температуры и давления, полученных в результате численного эксперимента представлены на рисунке 2.6.



а



б

Рисунок 2.6 Распределение температуры пористой среды(а) и давления в реакторе (б)

Непрерывная подача

Для начала рассмотрим режим, при котором осуществляется непрерывная подача топлива в камеру сгорания. В этом случае в камеру сгорания подается топливо с удельным массовым расходом $\rho u = 31,7 \frac{\text{кг}}{\text{м}^2 \cdot \text{с}}$. На рисунке 2.7 представлен графики изменения температуры межпорового газа в сечении $x = 24,34$ мм, прерывистой линией показаны данные из [69], сплошной линией результаты численного эксперимента, полученные по предложенной автором методике расчёта. Сопоставление кривых показывает хорошую согласованность между данными Кестена и результатами численного эксперимента, максимальное расхождение не превышает 11%.

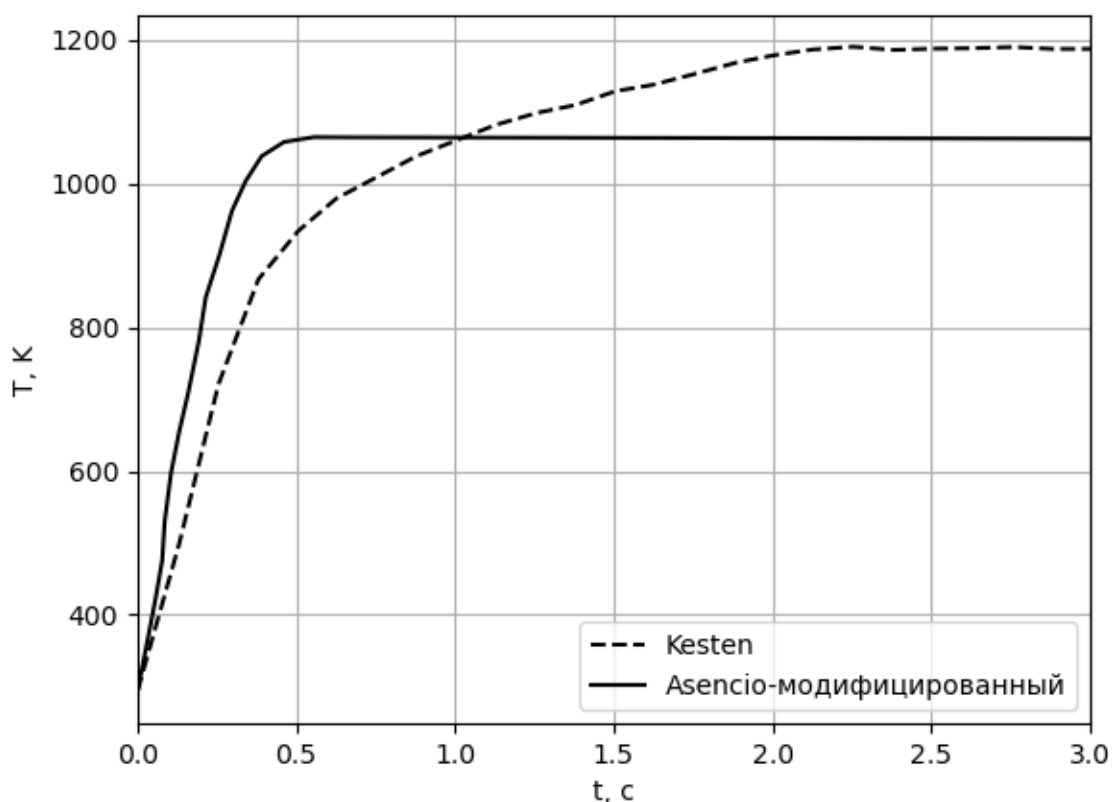


Рисунок 2.7 Изменение температуры межпорового газа при постоянной подаче топлива (сечение $x = 24,34$ мм).

Импульсный режим (D=50%)

Далее рассмотрим предложенную в [69] циклограмму работы двигателя в импульсном режиме, включающая в себя серию из 15 импульсов длительностью 60 мс, во время которых подается топливо с удельным массовым расходом $\rho u = 28,12 \frac{\text{кг}}{\text{м}^2 \cdot \text{с}}$. Длительность паузы между включениями составляет 60 мс. Циклограмма подачи топлива представлена на рисунке 2.8.

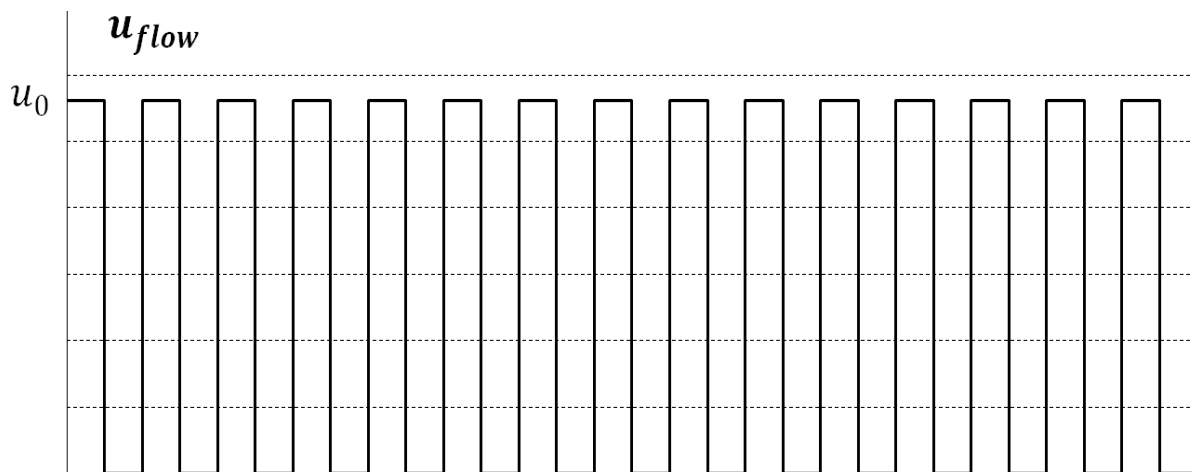


Рисунок 2.8 Циклограмма подачи топлива для импульсного режима

На рисунке 2.9 представлены кривые, описывающие изменение температуры межпорового газа. Сопоставление кривых показывает хорошую согласованность между данными Кестена и результатами численного эксперимента, максимальное расхождение не превышает 14%.

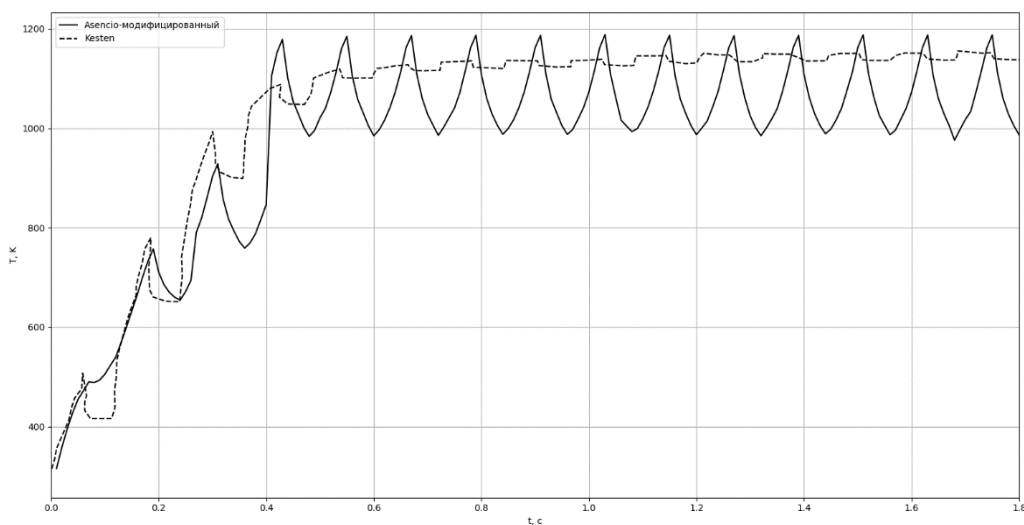


Рисунок 2.9 Изменение температуры межпорового газа при импульсной подаче топлива с коэффициентом заполнения $D = 50\%$ (сечение $x = 15,85$ мм)

Импульсный режим ($D=20\%$)

Рассмотрим еще один режим импульсной работы двигателя, отличающийся от предыдущего режима длительностью паузы между включениями, которая составляет 240 мс. Значение удельного массового расхода такое же, как и в прошлом численном эксперименте. Циклограмма подачи топлива представлена на рисунке 2.10.

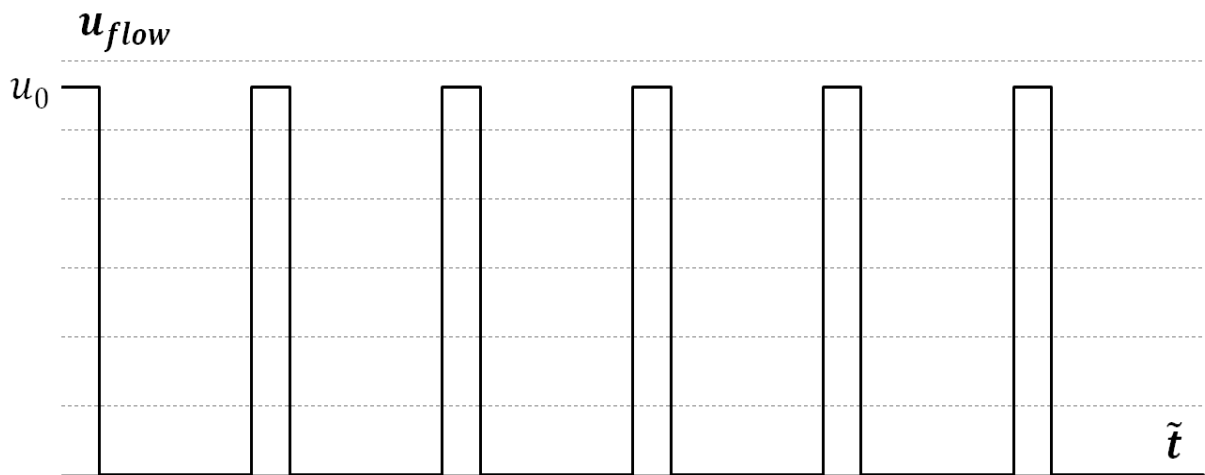


Рисунок 2.10 Циклограмма подачи топлива для импульсного режима

На рисунке 2.11 представлены кривые, описывающие изменение температуры межпорового газа. Сопоставление кривых показывает хорошую согласованность между данными Кестена и результатами численного эксперимента, максимальное расхождение не превышает 17%.

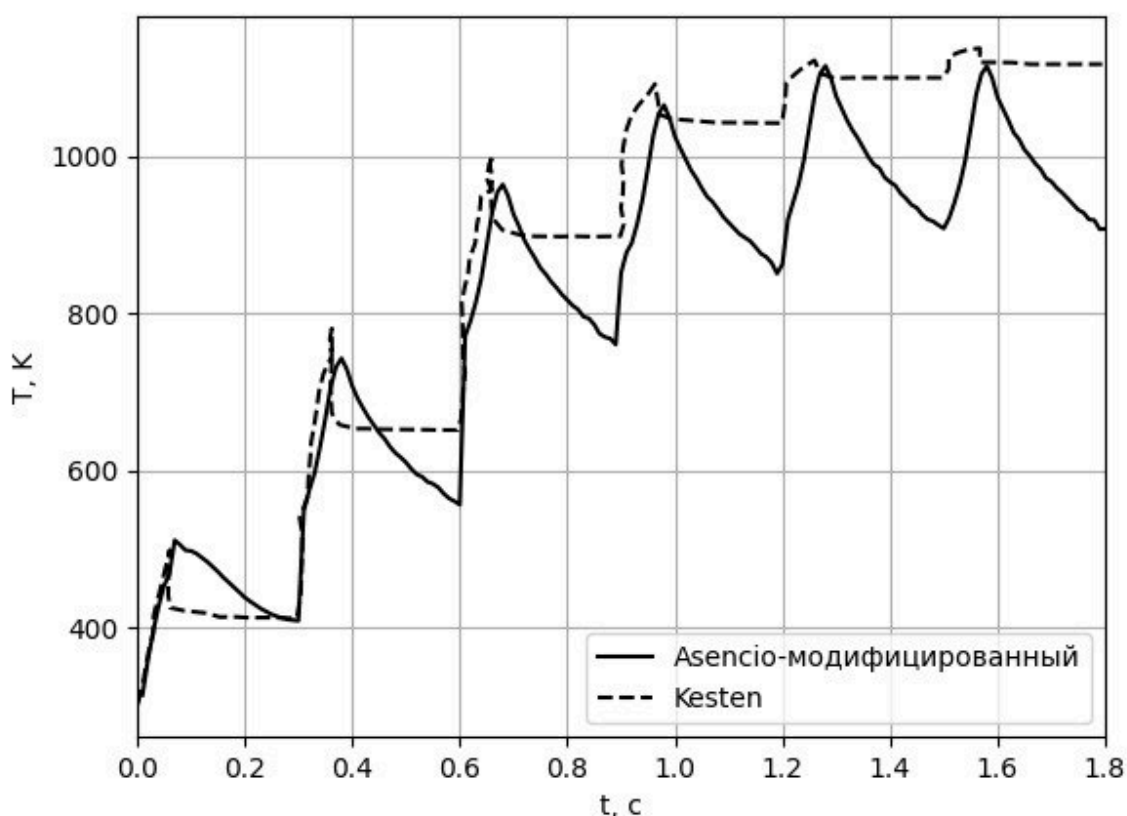


Рисунок 2.11 Изменение температуры межпорового газа при импульсной подаче топлива с коэффициентом заполнения $D = 20\%$ (сечение $x = 15,85$ мм)

Выводы по главе 2.

1. Описана физико-математическая модель фильтрационного горения жидкого монотоплива в пористой каталитической среде, учитывающей процессы тепломассопереноса в межпоровом газе, поверхностном газе и в твердой фазе. Модель включает в себя систему уравнений сохранения массы, импульса и энергии с учетом гомогенных и гетерогенных химических реакций. Модель может быть использована с достаточной точностью для проведения численного моделирования и анализа влияния различных параметров на динамику внутрикамерных процессов.

2. Рассмотрен процесс дискретизации уравнений с использованием метода конечных объемов, схемы центральных разностей для диффузионных членов и TVD-интерполяции van Leer для конвективных членов.

3. Описан алгоритм решения полученной системы алгебраических уравнений методом PIMPLE.

4. Представлены результаты валидации модели фильтрационного горения, показано, что при моделировании стационарной подачи достигается минимальная погрешность равная 11 %. Моделирование импульсных режимов приводит к увеличению погрешности, при этом отмечается, что с уменьшением коэффициента заполнения качество результатов снижается до значений относительной погрешности в 17 %.

Глава 3. ЧИСЛЕННОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ ПРОЦЕССА ФИЛЬТРАЦИОННОГО ГОРЕНИЯ

В данной главе проводится численное исследование фильтрационного горения в камере сгорания термokatалитического ЖРДМТ с целью анализа влияния рабочих параметров на внутрикамерные процессы.

В первом разделе главы продемонстрирована постановка численного эксперимента, которая будет использована при проведении параметрического исследования.

Второй раздел настоящей главы посвящен исследованию влияния ключевых параметров – скорости подачи топлива, циклограммы его подачи, начальной температуры засыпки и её пористости – на положение фронта максимальной температуры. Описана методика построения фазовых портретов фронта максимальной температуры и формирования карт финальных положений фронта.

В разделе 3 настоящей главы рассматривается влияние тех же параметров на тепловое состояние пористой засыпки. Введен численный критерий, характеризующий степень накопления энергии каталитическим пакетом.

3.1. Постановка численного эксперимента и описание схемы расчетов

В данном исследовании рассматривается постановка задачи, изложенная в разделе 2 главы 2 — осесимметричная нестационарная задача фильтрационного горения жидкого монотоплива в камере сгорания термokatалитического ЖРД малой тяги. Камера сгорания рассматривается как система с адиабатическими стенками.

В камеру сгорания в начальный момент времени $t = 0$ с поступает монотопливо в виде паров и начинает взаимодействовать с засыпкой,

имеющей пористость ε и начальную температуру $T_{c,0}$. Значение массового расхода определяется заданной скоростью u_{flow} , вектор скорости направлен вдоль оси реактора. В выходном сечении поддерживается постоянное давление $p = 1$ МПа. На стенке задаётся условие прилипания. Схема расчетной области представлена на рисунке 2.5.

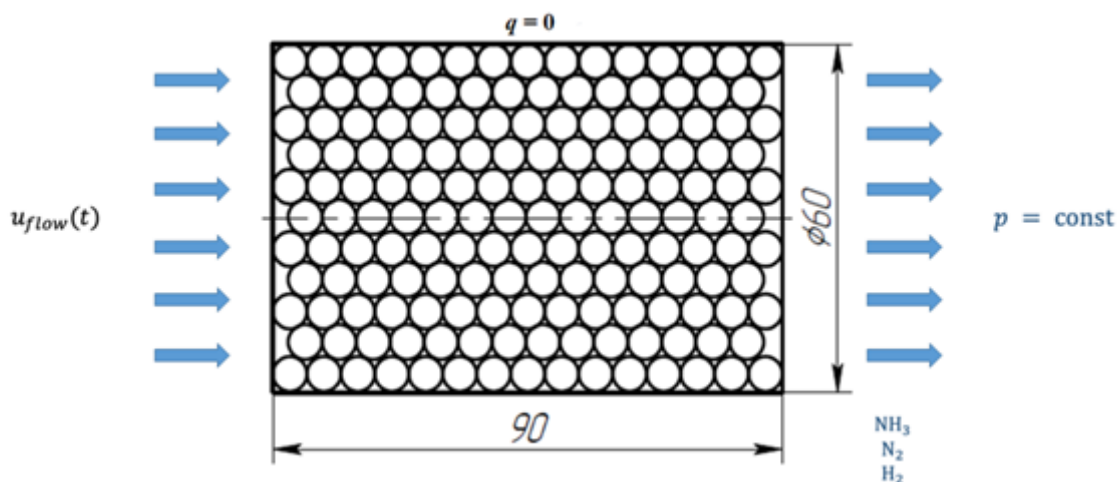


Рисунок 3.1 Схема расчетной области

На схеме представлены основные направления потоков и характерные размеры рассматриваемой области.

3.2. Параметрическое исследование

Существует несколько способов влияния на характер работы термokatалитического ЖРДМТ.

Первым фактором является обеспечение требуемой начальной температуры пористой засыпки для эффективного инициирования реакции разложения монотоплива. Избыточное увеличение начальной температуры пористой засыпки требует от изделия обеспечения достаточно емкого источника питания, что в свою очередь влияет на автономность и компактность системы, поэтому в общем случае требуется минимизировать энергопотребление. Кроме того, следует отметить, что высокая температура

потенциально может привести к возникновению высокотемпературного фронта возле входного сечения, что приведет к переходу от фильтрационного горения в камере сгорания к гомогенному в трубопроводной арматуре. При этом недостаточная начальная температура приводит к неэффективному использованию каталитического пакета.

Другим параметром, влияющим на режим работы термокаталитического двигателя, является пористость каталитического пакета, значение которой устанавливается ещё на начальном этапе проектирования изделия. Пористость определяет не только гидродинамическое сопротивление, и, как следствие, распределение скоростей и давления по длине пористой засыпки, но и на величину удельной поверхности катализатора, участвующей в разложении топлива. В связи с этим, подробное исследование и анализ влияния данного параметра на эксплуатационные характеристики и общий тепловой режим изделия представляется одной из ключевых задач при проектировании и последующей оптимизации конструкции.

Скорость подачи топлива непосредственно определяет условия протекания реакции, стабильность фронта разложения и тепловыделение в камере сгорания. Низкая скорость может привести к снижению интенсивности реакции и возникновению зон с недостаточным тепловыделением, его постепенному смещению к входному сечению и возможному затуханию реакции. При увеличении скорости подачи может наблюдаться увеличение стабильности реакции, обусловленное большим тепловыделением, однако допускается существование критической скорости подачи топлива, которая может привести к избыточному охлаждению или же сносу фронта за пределы каталитического пакета.

Следующим важным аспектом, определяющим режим работы двигателя, является режим подачи топлива. Рассматриваемый класс изделий зачастую является двигателями ориентации, что вносит свою специфику в

протекание внутрикамерных процессов, проявляющуюся в режиме работы изделия. Большую часть времени изделие работает в импульсном режиме, что, как известно, негативно сказывается на тепловом режиме изделия. Частые кратковременные включения и выключения приводят к повторяющимся тепловым ударам, которые, в свою очередь, значительно ускоряют износ каталитической засыпки из-за термоциклической усталости материала. Причем импульсный режим работы может приводить к такому распределению температуры по длине засыпки после первого включения, которое будет приводить к резкому изменению скорости фронта при последующих импульсах. К тому же, как было показано в экспериментальной программе JAXA [47], сокращение длительности импульса и времени между импульсами приводит к более быстрому ухудшению характеристик двигателя. При использовании двигателей первого поколения наблюдается снижение тяги двигателя до 38% для засыпки Shell-405 и до 14% тяги для катализатора H-KC12GA. При этом, внедрение улучшений (замена инжектора, удлинение конструкции и др.) приводит к снижению удельного импульса двигателя на уровне 6%.

На основании приведенных выше обоснований в рамках комплексного численного исследования процессов в камере сгорания термокаталитического ЖРДМТ в рамках настоящего исследования предусматривается варьирование следующих основных параметров:

- скорость поступающего в реактор топлива u_{flow} , для выявления устойчивых рабочих режимов и исключения условий неустойчивости фронта;
- циклограмма подачи топлива $u_{flow}(t)$, позволяющая исследовать влияние импульсного режима работы на тепловые характеристики изделия;
- начальная температура пористой засыпки $T_{c,0}$, с целью определения оптимального баланса между эффективностью запуска и минимальным энергопотреблением системы;

- пористость засыпки ε , с подробным анализом ее влияния на устойчивость фронта горения.

Результаты численного исследования позволяют получить обоснованные рекомендации по выбору оптимальных значений указанных параметров, разработать эффективные алгоритмы управления работой двигателя и значительно улучшить его ресурсные и эксплуатационные показатели.

Ключевым параметром при проектировании ракетного двигателя является обеспечение высокого удельного импульса тяги, определяемого как отношение тяги к массовому расходу. Примем, что условия окружающей среды постоянны, тогда выражение для удельного импульса тяги можно записать как:

$$I_y = w_a + \frac{p_a F_a}{\dot{m}}$$

где w_a – скорость газа на выходе из сопла;

p_a – статическое давление газа на выходе из сопла;

F_a – площадь среза сопла;

\dot{m} – массовый расход газа через сопло.

Так как в рамках численного эксперимента значение давления в выходном сечении каталитического пакета зафиксировано, а значение массового расхода можно зафиксировать, рассмотрим, как начальная температура пористой засыпки влияет на скорость в выходном сечении сопла. Известно [11], что скорость на срезе сопла зависит от молекулярной массы рабочего тела и температуры в камере сгорания и эти величины связаны следующим соотношением:

$$w_a \sim \sqrt{\frac{T^*}{M}}$$

Для некоторых компонентов процесс разложения монотоплива разбивается на несколько этапов, включающих в себя непосредственно сам

процесс разложения монотоплива, а затем процесс разложения первичных продуктов разложения. Процесс вторичного разложения может являться эндотермической реакцией, то есть реакцией, в ходе которой происходит поглощение тепла, а следовательно, приводит к уменьшению температуры в камере сгорания. Однако, следует иметь в виду, что в процессе диссоциации возможно уменьшение общей молекулярной массы рабочего тела за счет образования более легких компонентов. Оба этих факта и вид формулы, используемой для оценки скорости на срезе сопла явно утверждают о возможности постановки оптимизационной задачи.

Однако, вычисленные значения $\sqrt{\frac{T^*}{M}}$ для различных комбинаций скорости подачи компонента и начальной температуры засыпки показали практически линейную зависимость данного параметра от варьируемых параметров. При рассмотрении отдельных составляющих рассматриваемого параметра можно заметить, что увеличение начальной температуры хоть и способствует уменьшению молекулярной массы смеси, однако, этот вклад незначителен относительно скорости роста температуры в камере сгорания даже при наличии эндотермической реакции.

Для более детального рассмотрения процесса формирования рабочего тела построим зависимости степени превращения X от числа Дамкёлера и числа Шмидта. Степень превращения X в данном случае будем определять, как суммарную массовую долю простых веществ в выходном сечении каталитического пакета:

$$X = \sum_i Y_i,$$

где Y_i – массовая доля простых веществ.

Число Дамкёлера определяет отношение скорости течения химической реакции к скорости других процессов, в нашем случае гидродинамических, тогда данный безразмерный параметр определим, как

$$Da_I = \frac{k}{\left(\frac{u}{L}\right)} = \frac{k \cdot L}{u},$$

где k – константа скорости реакции, c^{-1} ; L – длина расчетной области, м; u – скорость подачи компонента, м/с. Учитывая, что скорость фильтрации больше скорости подачи компонента и зависит от пористости среды, то можно рассматривать число Дамкёлера в следующем виде:

$$Da_I = \frac{kL\varepsilon}{u}.$$

Число Шмидта определяет соотношение кинематической вязкости среды к коэффициенту диффузии компонента и записывается как:

$$Sc = \frac{\mu}{\rho D},$$

где μ – динамическая вязкость подаваемого компонента при температуре, равной начальной температуре засыпки, ρ – плотность подаваемого газа, D – эффективный коэффициент диффузии образованного компонента.

Оба числа позволят наглядно идентифицировать доминирующие механизмы (конвективный перенос, диффузия, химическая кинетика), определить оптимальные условия и оценить чувствительность состава рабочего тела к параметрам работы двигателя.

Для получения зависимостей будем варьировать значение числа Шмидта в диапазоне $Sc = 0,6 - 2,5$, а число Дамкелера будет варьироваться в диапазоне $Da_I = 10^{-7} - 10^0$.

Результаты проведенного численного эксперимента представлены на рисунке 3.2.

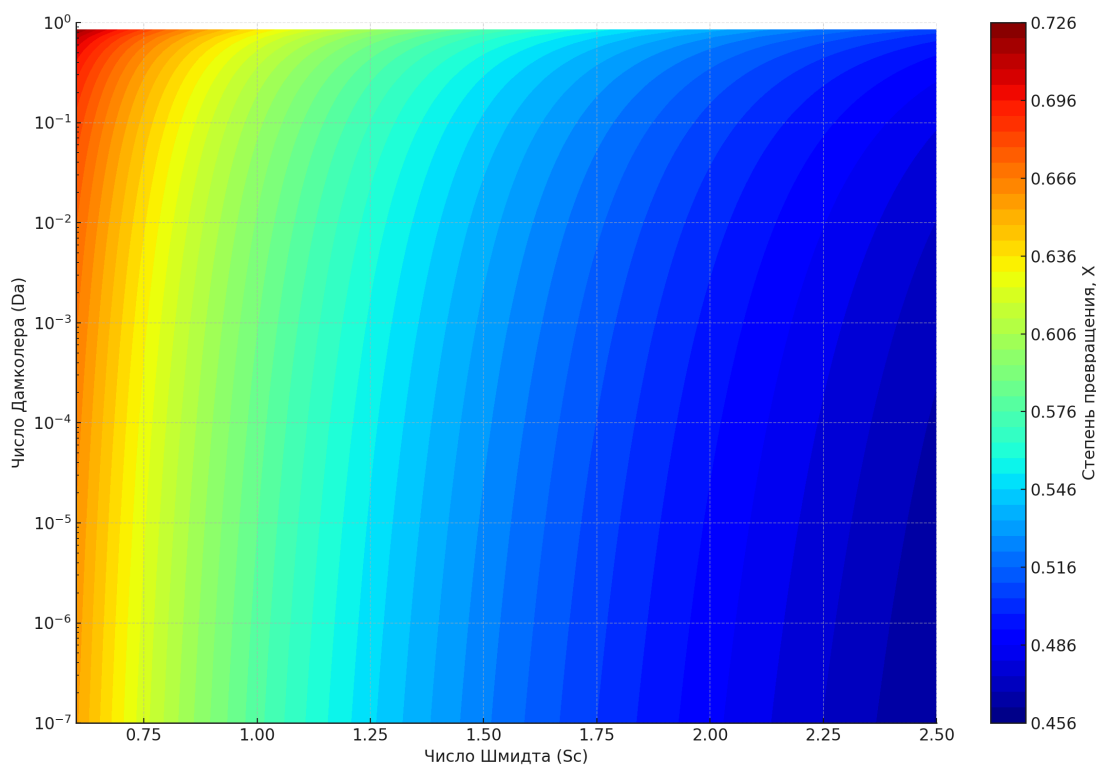


Рисунок 3.2 Степень превращения в зависимости от числа Дамкёлера и числа Шмидта

Картина имеет относительно монотонный характер, поэтому рассмотрим степень влияния безразмерных параметров на итоговый показатель выбрав для этого два сечения $Sc = const$ и $Da_I = const$.

Рассмотрим в каких диапазонах меняется степень превращения X при зафиксированных значениях числа Дамкелера. Из анализа графика можно сделать вывод о том, что степень превращения монотонно и интенсивно снижается с ростом числа Шмидта, что соответствует условиям высокой вязкости и низкой диффузионной способности смеси.

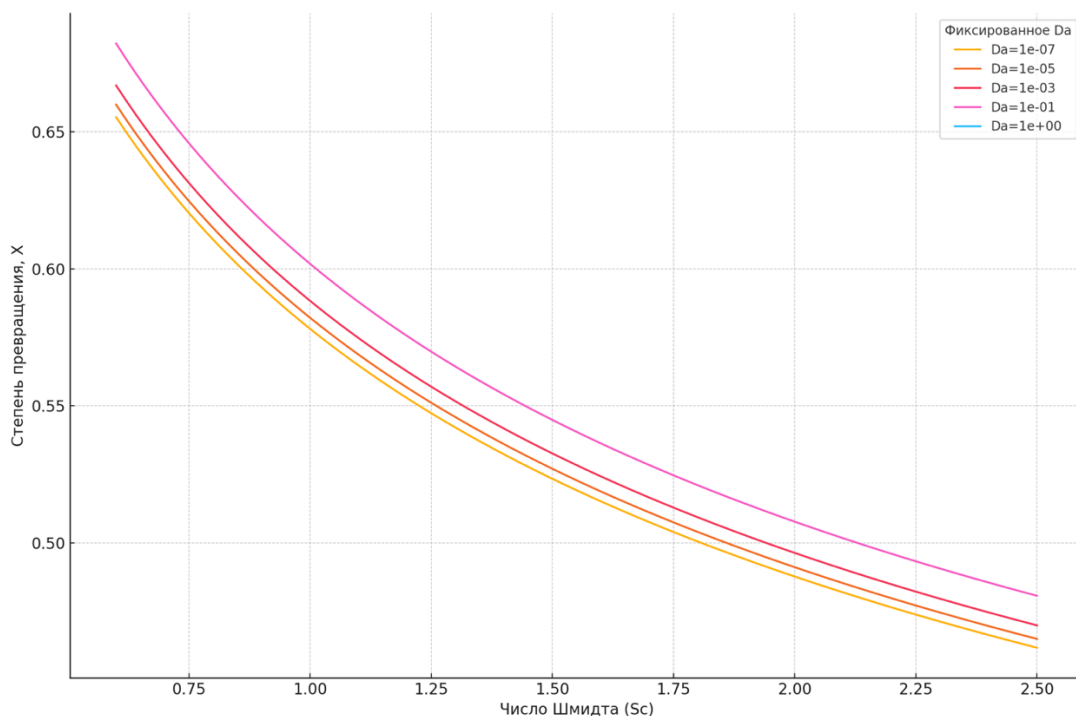


Рисунок 3.3 Зависимость степени превращения от числа Шмидта при различных числах Дамкелера

При фиксировании различных значений числа Дамкелера на рисунке 3.4 наблюдается более плавное и менее выраженное изменение степени превращения в широком диапазоне безразмерного параметра, при этом наибольшие изменения наблюдаются в области малых значений, а при больших значениях степень превращения стабилизируется и становится практически линейной, показывая, что кинетические изменения менее критичны по сравнению с диффузионными характеристиками.

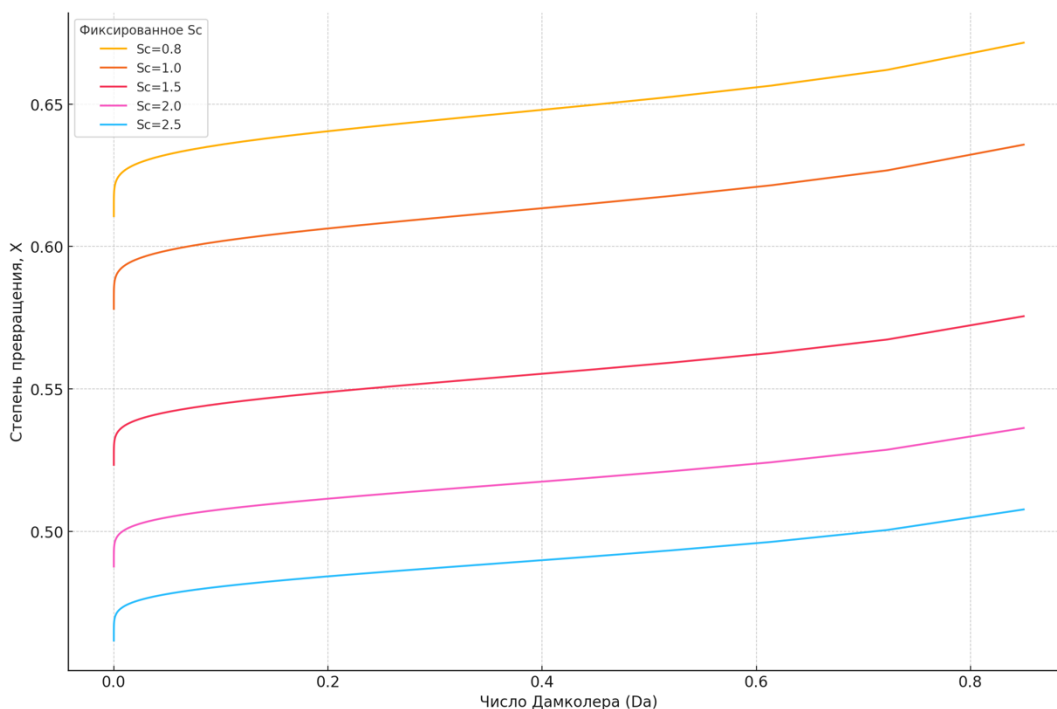


Рисунок 3.4 Зависимость степени превращения от числа Дамкелера при различных значениях числа Шмидта

Полученные в ходе численного эксперимента данные можно аппроксимировать с помощью степенной функции следующего вида:

$$X(Sc, Da) = 0,6019 \cdot Sc^{-0,2454} \cdot |\log_{10} Da|^{-0,0207}.$$

Для термокаталитических ЖРДМТ можно выделить несколько характерных фронтов: фронт разложения монотоплива, фронт максимальной температуры пламени, фронт максимальной температуры каталитического пакета. Определение положения и скорости перемещения каждого из них имеет важное значение при проектировании изделий. Так, при приближении фронта максимальной температуры пламени и фронта разложения монотоплива к входному сечению камеры сгорания может привести к самопроизвольному разложению топлива в трубопроводной арматуре двигательной установки.

Положение точки максимальной температуры пористой засыпки служит информативным показателем теплонагруженности изделия и позволяет более обоснованно оценивать размеры области, в которой

возможно развитие деградиционных процессов засыпки под воздействием термоциклических нагрузок. Положение точки с наибольшей температурой и значение температуры в этой точке хоть и является критическим параметром, поскольку накладывает ограничения на используемые конструкционные материалы, но все же позволяет однозначно говорить о том нужно ли принимать специальные меры по обеспечению теплового режима.

Анализ динамики фронта может выполняться различными методами. Применение спектрального и сингулярного анализов к временным рядам, описывающим изменение его положения, позволяет выявить частотные закономерности колебаний, определить характерные пики, соответствующие отдельным режимам неустойчивости, а также оценить такие параметры, как период и амплитуда колебаний [37].

Несмотря на информативность спектрального и сингулярного анализов при выявлении частотных характеристик процесса, их применение не позволяет получить полное представление об устойчивости стационарных состояний системы. Эти методы эффективно фиксируют периоды колебаний и особенности поведения неустойчивых фронтов, однако не дают информации о существовании и свойствах устойчивых режимов. Для получения более полной информации и определения устойчивых и неустойчивых режимов фильтрационного горения эффективно применение метода построения фазовых портретов. Фазовый портрет представляет собой графическое изображение динамики системы в пространстве «положение фронта – скорость изменения его положения» [99]. При такой визуализации стационарные состояния и их устойчивость проявляются через наличие аттракторов – областей, к которым стремятся траектории системы при малых отклонения начальных условий. Аттракторы фазового портрета демонстрируют устойчивые положения фронта, когда с течением времени положение фронта стабилизируется в заданном диапазоне и его скорость приближается к нулю. В противном случае, если фазовая траектория будет

иметь циклический характер или же вовсе хаотична, использование параметров работы, приведших к такой ситуации, является нецелесообразным конструкторским решением. Кроме того, в рамках данного исследования режим работы системы считается неустойчивым в том случае, если за время подачи топлива в камеру сгорания фронт достигает конца пористой засыпки. Такое поведение свидетельствует о неэффективном использовании конструктивных особенностей двигателя и нарушении устойчивости рабочего процесса.

Помимо информации, необходимой для построения карт устойчивости работы изделия, данный метод анализа также позволяет формировать карты положения фронта при условии, что он стабилизировался в определённой области реактора. При построении карт будем концентрироваться на рассмотрении фронта максимальной температуры межпорового газа. Особенностью засыпки, применяемой в рамках рассматриваемой модели термokatалитического двигателя, является низкая теплопроводность материала. Следствием этого является тот факт, что в пористой засыпке не наблюдается искривление фронта, поэтому положение фронта можно определять путем анализа распределения температуры вдоль оси реактора. Существует несколько подходов для вычисления скорости изменения положения фронта [35], в настоящей работе для построения фазовых портретов значение скорости \dot{x} для момента времени t_i определялось методом центральных разностей:

$$\dot{x}(t_i) = \frac{dx}{dt} = \frac{x_{i+1} - x_{i-1}}{t_{i+1} - t_{i-1}}.$$

Для нулевой точки:

$$\dot{x}_0 = \frac{x_1 - x_0}{t_1 - t_0}.$$

В последней:

$$\dot{x}_N = \frac{x_N - x_{N-1}}{t_N - t_{N-1}}.$$

Для повышения наглядности и удобства интерпретации результатов численных экспериментов варьируемые параметры были приведены к безразмерному виду.

Относительная начальная температура θ засыпки определялась следующим соотношением:

$$\theta = \frac{T_{c0} - T_{ref}}{T_{ad} - T_{ref}},$$

где T_{ref} – минимальная температура засыпки, T_{ad} – адиабатическая температура пламени.

Скорость подачи была приведена к числу Рейнольдса Re_{pa} , записанному в форме, применяемой для описания течений в пористых средах:

$$\frac{Re_{pa}}{\varepsilon} = \frac{\rho u_{flow} d_{pa}}{\mu},$$

где d_{pa} – размер элементов пористой засыпки, ρ – плотность межпорового газа, μ – динамическая вязкость подаваемого монотоплива. Такой способ обезразмеривания нужен для демонстрации влияния пористости на положение фронта при прочих равных условиях.

Положение фронта x было отнесено к размеру расчетной области L и определялось как:

$$\xi = \frac{x}{L}.$$

Карты устойчивости формируются в следующих координатах: относительная начальная температура засыпки θ – относительная скорость подачи топлива $\frac{Re}{\varepsilon}$.

Перед построением карт устойчивости была рассмотрена альтернативная постановка задачи, согласно которой в начальный момент времени половина расчётной области заполнена парами монотоплива. Предполагается, что топливо уже продиффундировало к поверхности

катализатора, и с началом расчёта запускается процесс его разложения. Расчётная область изначально нагрета равномерно до температуры 500 К. В этот момент межпоровый газ обладает скоростью, соответствующей заданным граничным условиям.

На рисунке 3.5 представлены фазовые портреты для серии численных экспериментов, имеющих цель установить влияние скорости подачи топлива в камеру сгорания на положение фронта. Различными цветами обозначены кривые, соответствующие скоростям подачи, отмеченным на легенде в диапазоне 1...7 м/с. На графике положение первой точки в фазовом пространстве обозначено маркером в виде круга, а последняя вычисленная точка отмечена крестиком.

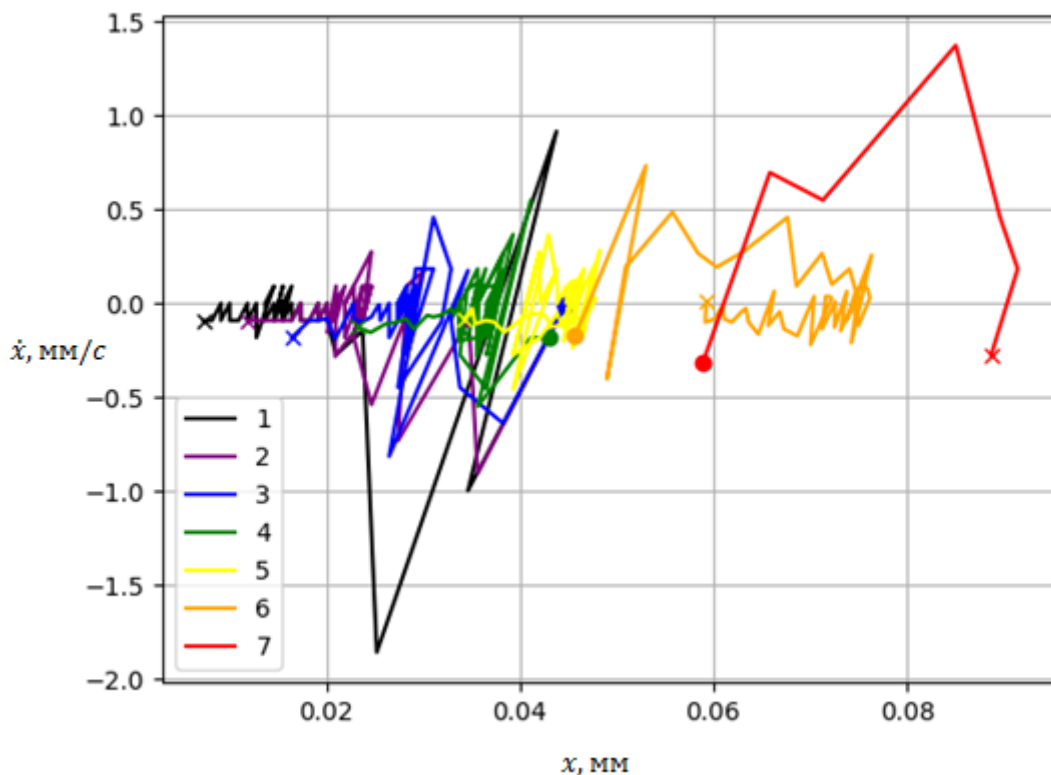


Рисунок 3.5 Фазовые портреты фронтов при различных скоростях подачи топлива в камеру сгорания (1...7 м/с)

Анализ фазовых портретов показывает, что в большинстве рассмотренных случаев, несмотря на периодические колебания скорости, обусловленные инерционностью тепловых процессов в пористой засыпке, фронт в целом демонстрирует тенденцию к смещению в сторону входного сечения. Однако, отметим, что при достижении определенного критического уровня подачи топлива ситуация изменяется, фронт начинает продвигаться в сторону выходного сечения камеры сгорания.

Вернемся к описанной в начале главы исходной постановке задачи и проведем серию расчетов, направленную на формирование карты положений фронта. Ниже, на рисунке 3.6 приведена карта положений фронта для засыпки с пористостью $\varepsilon = 0,4$.

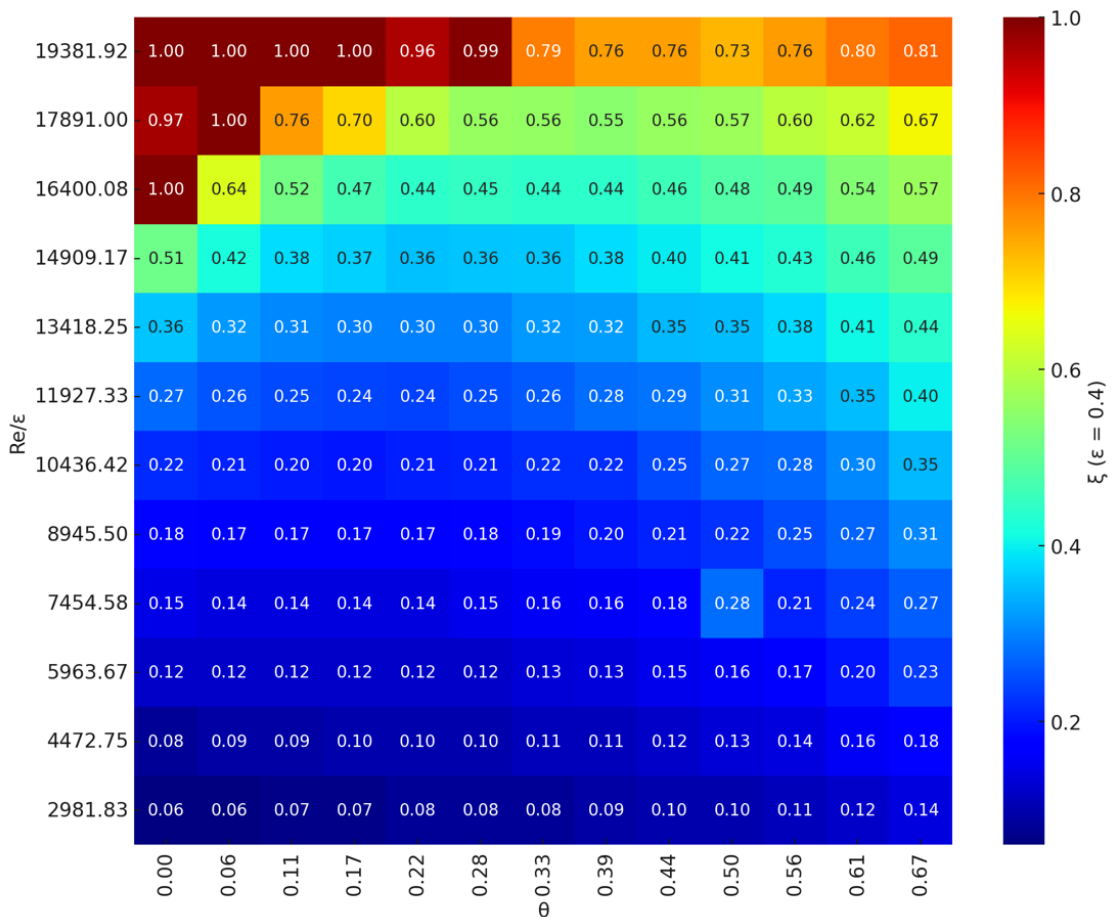


Рисунок 3.6 Карта устойчивых положений фронтов ($\varepsilon = 0,4$)

Изображенная на рисунке 3.6 карта отчетливо демонстрирует недиагональный характер распределение финальных положений фронта. Такое распределение явно свидетельствует о наличии нелинейных эффектов и взаимодействии между безразмерными характеристиками течения и теплообмена. Это указывает на необходимость проведения глубокого анализа с целью количественной оценки влияния параметров и их комбинаций на итоговое устойчивое положение фронта.

Для проведения такого анализа целесообразно воспользоваться регрессионным подходом, который позволит количественно охарактеризовать степень влияния отдельных факторов и их совместного действия на исследуемую величину. В качестве подходящей модели была выбрана полиномиальная регрессия второго порядка, поскольку она достаточно проста в интерпретации и одновременно способна учитывать как линейные, так и нелинейные взаимодействия между параметрами. Данная модель представляется в виде разложения по базисным функциям второго порядка в двумерном признаковом пространстве, образованном комбинацией критериев Re/ε и θ , которые отражают влияние режима течения и теплопереноса:

$$\xi\left(\frac{Re}{\varepsilon}, \theta\right) = -0,00002 \cdot \frac{Re}{\varepsilon} - 0,19301 \cdot \theta - 0,00004 \cdot \frac{Re}{\varepsilon} \cdot \theta + 0,91248 \cdot \theta^2.$$

Коэффициент детерминации полученной модели составляет $R^2 = 0,994$, что свидетельствует о высокой точности аппроксимации и позволяет использовать критериальную зависимость в качестве инструмента для инженерных расчетов. Также был проведен анализ моделей более высокого порядка, однако их применение не привело к заметному повышению точности, при этом можно утверждать, что интерпретация такой модели усложнена.

С учётом значительной разницы между абсолютными значениями рассматриваемых переменных, достигающей 4–5 порядков, прямолинейная

интерпретация коэффициентов регрессионной модели становится затруднительной и не позволяет четко оценить относительный вклад каждого параметра в итоговый результат. Для преодоления этого ограничения была использована процедура стандартизации признаков (z -нормализация), которая приводит исходные переменные к единому масштабу с нулевым средним значением и единичным стандартным отклонением [63].

После применения z -нормализации регрессионная модель приняла следующий вид:

$$\xi \left(\left(\frac{Re}{\varepsilon} \right)_s, \theta_s \right) = 0,22501 + 0,22221 \cdot \frac{Re_s}{\varepsilon} + 0,00091 \cdot \theta_s + \\ + 0,08495 \cdot \left(\frac{Re}{\varepsilon} \right)_s^2 - 0,03661 \cdot \left(\frac{Re}{\varepsilon} \right)_s \cdot \theta_s + 0,03807 \cdot \theta_s^2,$$

где стандартизованные переменные выражаются через исходные параметры следующим образом:

$$\left(\frac{Re}{\varepsilon} \right)_s = \frac{\frac{Re}{\varepsilon} - 11304,55}{5227,54}, \\ \theta_s = \frac{\theta - 0,3295}{0,2094}.$$

Анализ коэффициентов в стандартизованных переменных однозначно демонстрирует, что вклад скорости подачи топлива существенно превышает вклад начальной температуры засыпки. Коэффициент перед линейным членом стандартизованного числа Рейнольдса $\left(\frac{Re}{\varepsilon} \right)_s$ превышает аналогичный коэффициент для стандартизованной температуры θ_s примерно в 240 раз. Кроме того, квадратичные члены также демонстрируют преобладание влияния скорости подачи в 2–3 раза, подчеркивая важность правильного выбора параметров, влияющих на гидродинамику.

Рассмотрим теперь влияние значения пористости каталитического пакета на положение фронта. Отметим, что пористость оказывает влияние не только на гидродинамические характеристики внутрикамерных процессов за

счет изменения эффективных коэффициентов проницаемости и теплоемкости, но и на термохимические его характеристики, поскольку от площади контактной поверхности, доступной для гетерогенной каталитической реакции зависит интенсивность реакции. Чтобы количественно оценить этот эффект была проведена еще одна серия численных экспериментов, направленных на формирование еще одной карты финальных положений фронтов, которая представлена на рисунке 3.7.

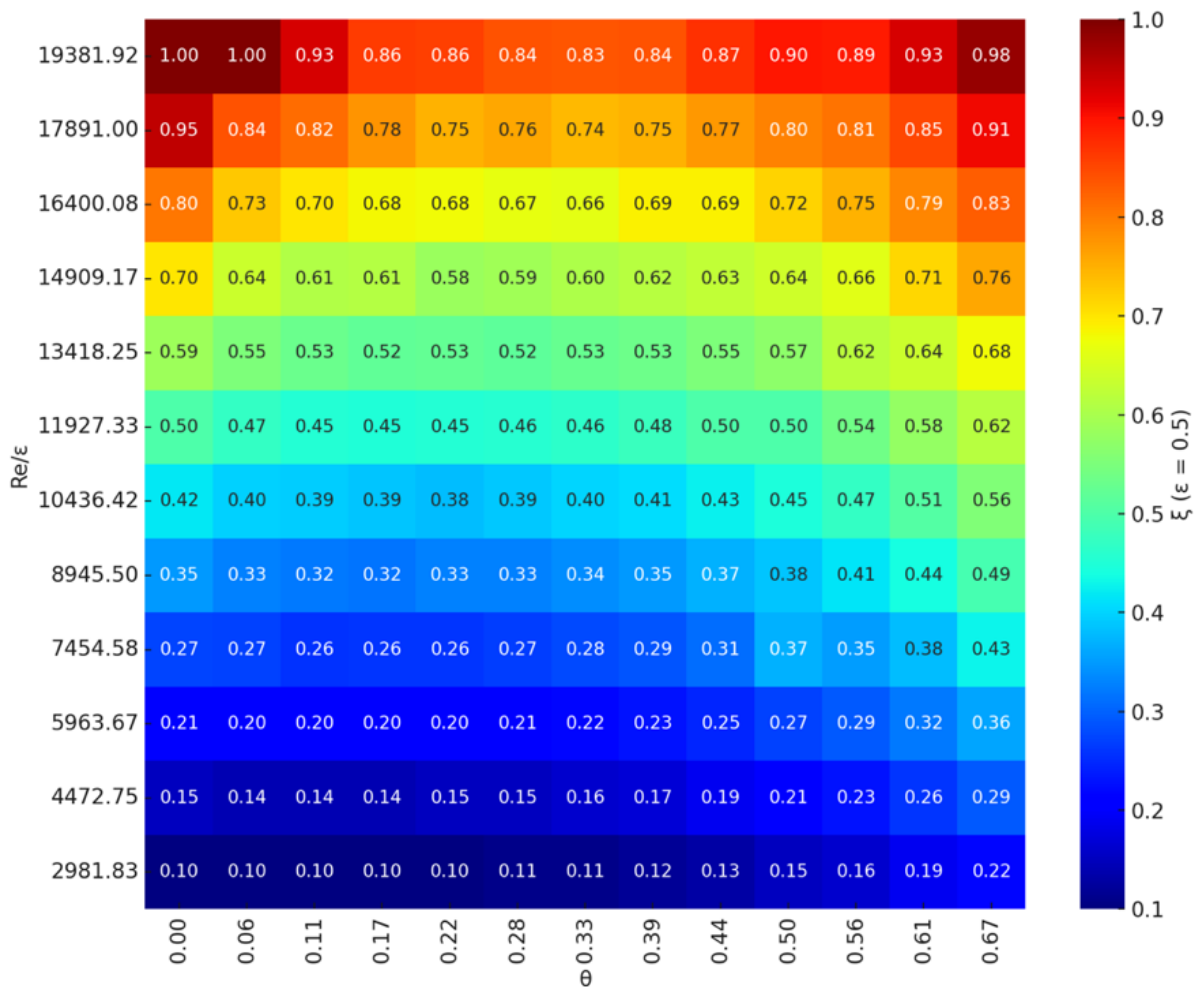


Рисунок 3.7 Карта устойчивых положений фронтов ($\varepsilon = 0,5$)

Построим регрессионную модель и для данной карты в том же пространстве критериев Re/ε и θ :

$$\xi\left(\frac{Re}{\varepsilon}, \theta\right) = 0,00003 \cdot \frac{Re}{\varepsilon} - 0,30747 \cdot \theta - 0,00001 \cdot \frac{Re}{\varepsilon} \cdot \theta + 0,90516 \cdot \theta^2.$$

В стандартизованных переменных регрессионная модель имеет следующий вид:

$$\xi \left(\left(\frac{Re}{\varepsilon} \right)_s, \theta_s \right) = 0,42278 + 0,24031 \cdot \frac{Re_s}{\varepsilon} + 0,02929 \cdot \theta_s + \\ + 0,02107 \cdot \left(\frac{Re}{\varepsilon} \right)_s^2 - 0,01497 \cdot \left(\frac{Re}{\varepsilon} \right)_s \cdot \theta_s + 0,03936 \cdot \theta_s^2,$$

где значение стандартизованных переменных через обычные выражается как:

$$\left(\frac{Re}{\varepsilon} \right)_s = \frac{\frac{Re}{\varepsilon} - 11143,45}{5271,78}, \\ \theta_s = \frac{\theta - 0,3295}{0,2094}$$

Сравнивая полученную карту финальных положений фронта для пористости $\varepsilon = 0,5$ с ранее рассмотренной аналогичной картой для пористости $\varepsilon = 0,4$, можно сделать вывод о том, что в данном случае увеличение пористости привело к заметному смещению фронта в сторону выходного сечения реактора. Для более наглядной демонстрации и возможности количественно оценить влияние изменения пористости построим дополнительно карту разностей положений фронтов между двумя вышерассмотренными картами для пористостей $\varepsilon = 0,4$ и $\varepsilon = 0,5$. Такая разностная карта, представленная на рисунке 3.8, позволит четко визуализировать зоны максимального и минимального влияния изменения пористости, а также оценить масштаб и пространственную неоднородность этого эффекта.

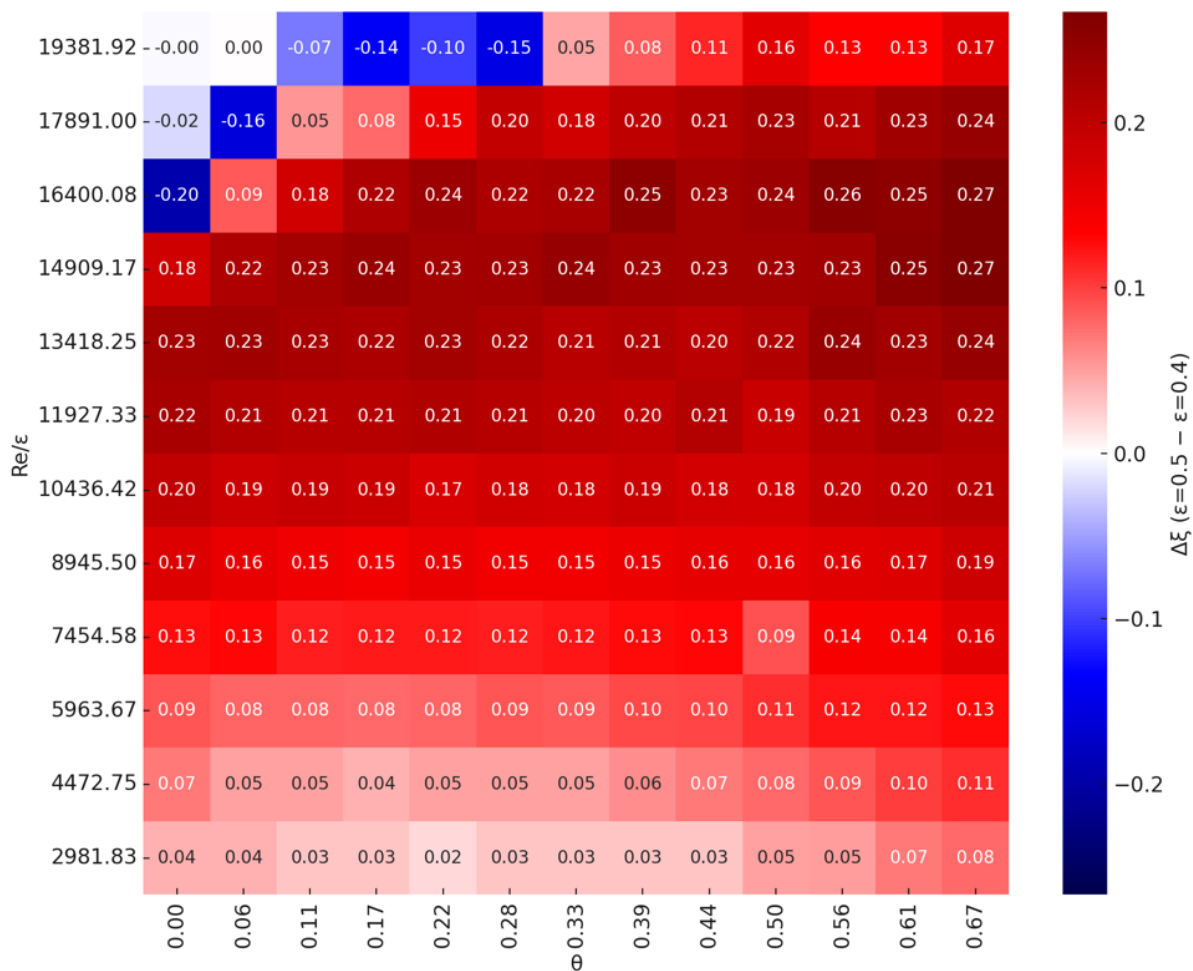


Рисунок 3.8 Карта разностей положений фронтов между двумя случаями $\varepsilon = 0,4$ и $\varepsilon = 0,5$

Анализ полученной карты позволяет сделать следующие выводы:

1. Изменение пористости обладает выраженным нелинейным характером, особенно проявляясь в зонах с высокими скоростями подачи топлива;
2. В зонах повышенных скоростей подачи монотоплива разность положений фронта достигает наибольших значений, что свидетельствует о более высокой чувствительности системы к изменениям структуры и геометрических параметров каталитической засыпки именно в этих областях.
3. При высоких скоростях подачи топлива также существенно возрастает чувствительность положения фронта к начальной температуре

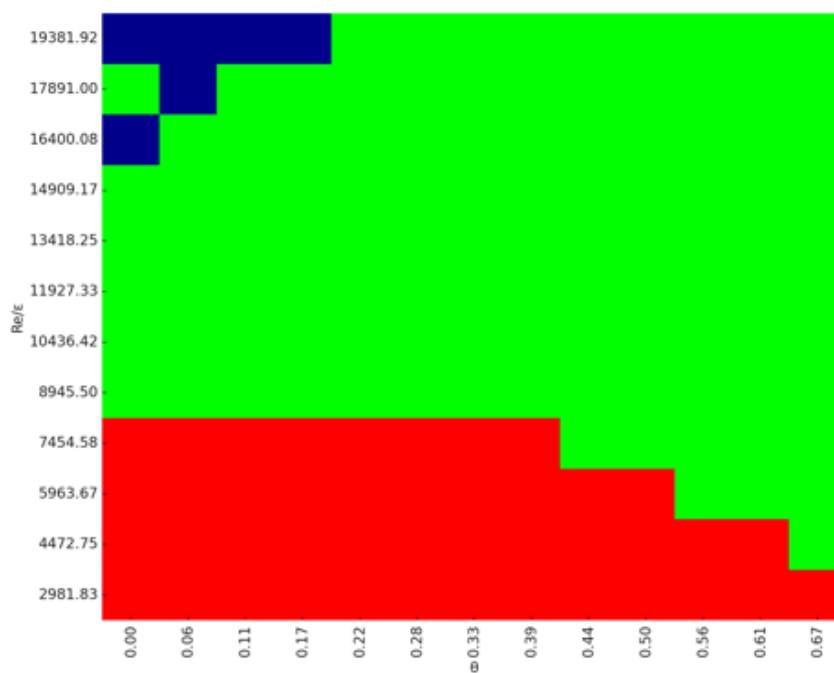
засыпки, что указывает на необходимость тщательного контроля за термическими условиями запуска двигателя при больших значениях массового расхода.

Данные выводы могут учитываться при разработке рекомендаций при проектировании и при создании систем управления рассматриваемых двигателей.

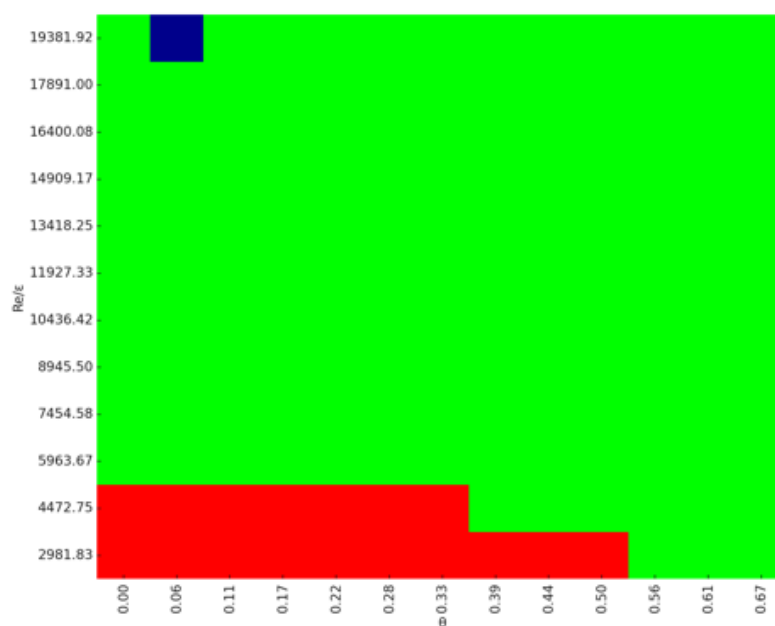
Карты на рисунках 3.6 – 3.7 могут быть использованы для определения безопасных режимов эксплуатации изделия, для этого необходимо определить какие режимы будут считаться безопасными. Введем понятие «безопасной» области и сравним как она изменяется при варьировании пористости каталитического пакета. Под «безопасной» областью в рамках данной работы будем понимать диапазон, в котором положение фронта стабилизируется в пределах $\xi \in (0,16; 0,94)$. Выбор данных границ обусловлен толщиной фронта, вычисление значение которого в рамках данной работы основан на анализе температурного градиента: толщиной фронта считалось расстояние между двумя точками, расположенными по обе стороны от максимума температуры, в которых абсолютное значение градиента снижалось ниже заданного порогового уровня. В качестве такого порога было выбрано значение 100 К/м, что позволило надёжно выделять наиболее активную зону реакции и адекватно оценивать степень локализации фронта. Следует отметить, что толщина фронта также может служить критерием устойчивости: более узкий фронт соответствует более стабильному режиму работы двигателя. Дополнительный сдвиг левой границы диапазона обусловлен высокой адиабатической температурой пламени и выполняет функцию теплового буфера, снижающего риск самовоспламенения топлива в подводящей трубопроводной арматуре.

На карте устойчивости красным цветом обозначена область, в которой фронт располагается слишком близко к входному сечению ($\xi < 0,16$), зелёным — зона устойчивой работы системы; синим — участки, где

произошёл или потенциально может произойти срыв фронта с пористой части ($\xi > 0,94$):



а



б

Рисунок 3.9 Карты устойчивых режимов работы термokatалитического ЖРДМТ (а – $\epsilon = 0,4$; б – $\epsilon = 0,5$)

На рисунке 3.9 наглядно показано, что варьирование значения пористости каталитического пакета влияет на количество конфигураций параметров работы изделия, не приводящих к аварийным ситуациям. Еще одним выводом является тот факт, что снижение гидродинамического сопротивления при одновременном уменьшении эффективной поверхности каталитического разложения способствует стабилизации фронта на большем расстоянии от входного сечения.

Рассмотренная выше картина справедлива для случаев, когда топливо в камеру сгорания подается непрерывно. Но эксплуатация термокаталитических ЖРДМТ подразумевает использование импульсных режимов. Импульсный режим работы характеризуется периодическим включением и выключением подачи топлива в камеру сгорания. В данных условиях фронт не достигает стационарного состояния и может характеризоваться сложной динамикой изменения его положения. Рассмотрим, как влияет частота подачи топлива f на положение фронта, для этого рассмотрим набор циклограмм, в которых будем варьировать частоту подачи топлива в диапазоне $f = 10 \dots 100$ Гц с шагом 10 Гц, при этом будут выполняться следующие условия:

- $m = \int_0^t u(t)dt = const,$
- $D=50\%$ – коэффициент заполнения,
- $t=0,5$ с – время работы двигателя.

Для анализа импульсного режима можно использовать следующий метод, позволяющий описывать поведение системы в дискретные моменты времени, привязанные к окончаниям внешних импульсов.

Метод заключается в том, что непрерывная траектория движения фронта в фазовом пространстве заменяется дискретным отображением. Для этого фазовое пространство системы, описывающее положение фронта и его скорость будем рассматривать не непрерывно во времени, а только в фиксированные моменты, в рассматриваемом случае это момент окончания

каждого импульса подачи топлива. Процедура построения будет выглядеть следующим образом. Состояние системы будем фиксировать в моменты времени:

$$t_n = n\tau_{\text{имп}},$$

где $n = 1, 2, 3, \dots$, $\tau_{\text{имп}}$ – период импульсной подачи топлива. В результате фазовая траектория преобразуется в последовательность точек $\{(\xi, \xi)\}$.

Построим фазовый портрет для следующего набора параметров:

- пористость среды $\varepsilon = 0,4$;
- скорость подачи топлива в камеру сгорания $u_{\text{flow}} = 4$ м/с.

Фазовый портрет для импульсного режима представлен на рисунке 3.10.

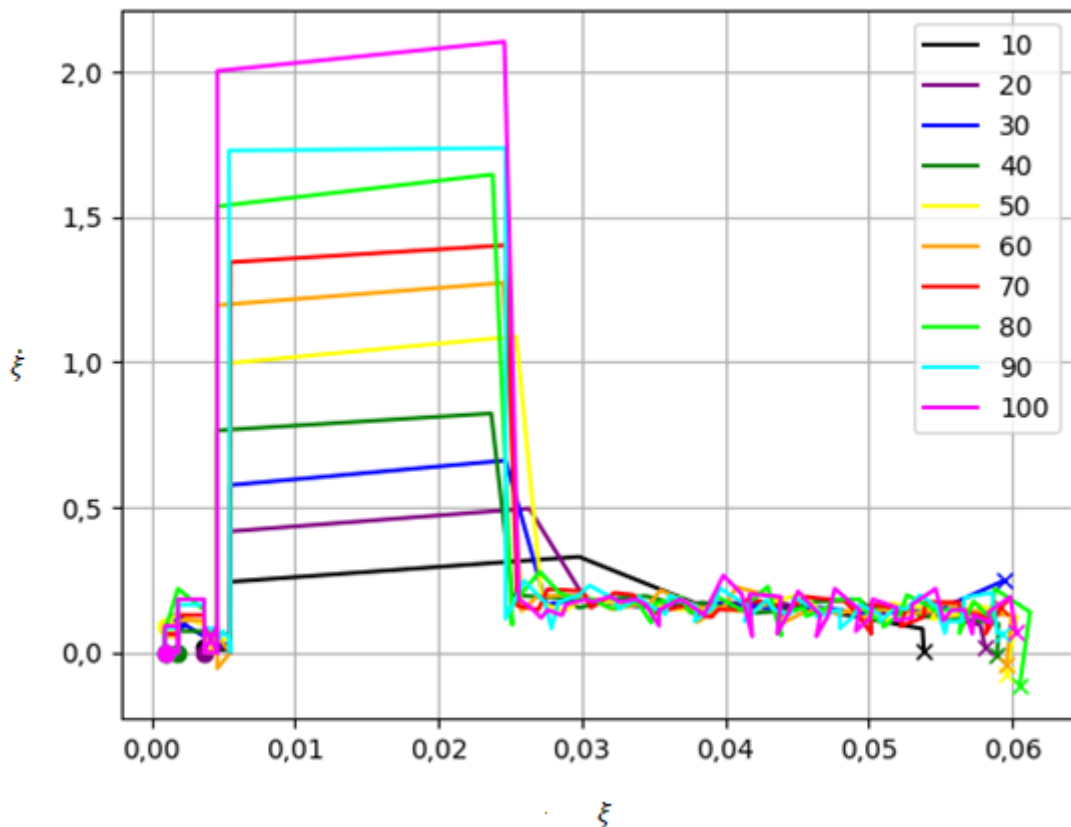


Рисунок 3.10 Фазовые траектории для импульсного режима

Анализируя положение точек на плоскости, можно делать выводы о характере поведения фронта в импульсном режиме. Однако следует отметить, что из-за того, что время работы ограничено, выход на стационарный режим не рассматривается, следовательно говорить о существовании аттракторов невозможно. Поэтому в данном случае рассмотрим, где будет располагаться фронт в конечный момент работы двигателя. Беря за пример фазовый портрет, представленный на рисунок 3.11, построим график зависимости положения фронта в конечный момент времени от частоты для каталитических пакетов с пористостью $\varepsilon = 0,4$ и $\varepsilon = 0,5$.

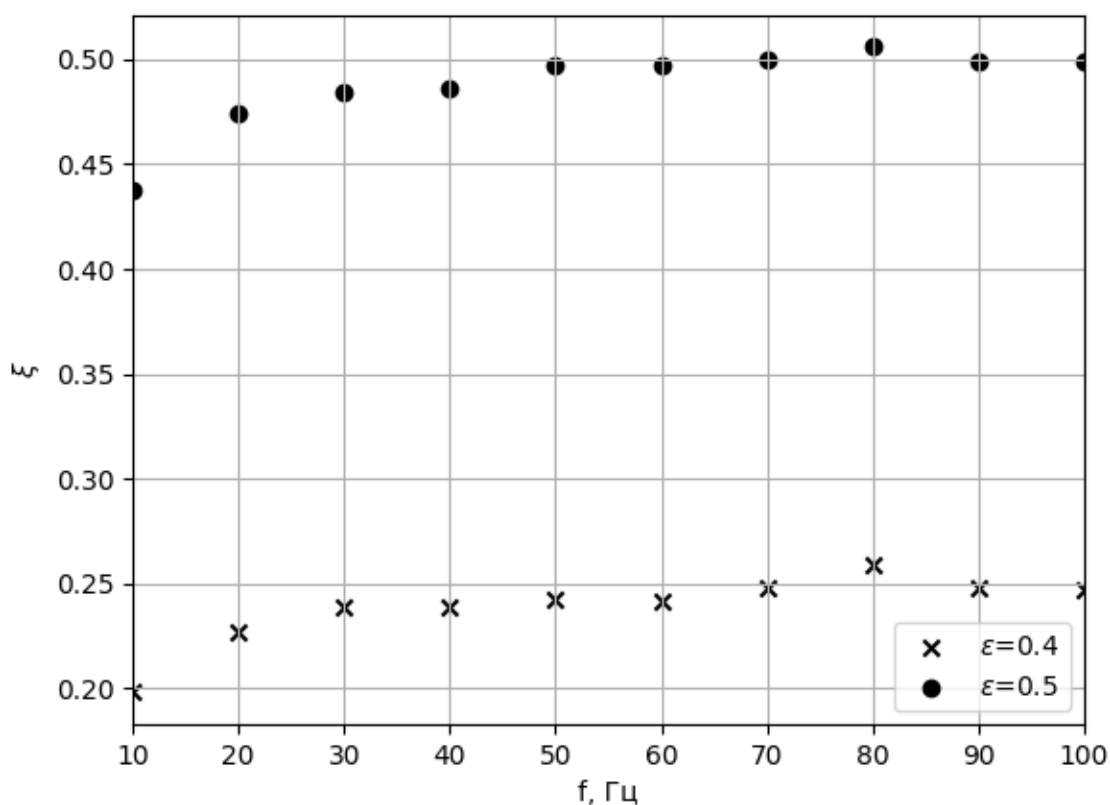


Рисунок 3.11 Зависимость положения фронта от частоты подачи топлива

Из рисунка видно, что использование импульсного режима позволило при небольшой скорости подачи добиться смещения фронта вправо, при этом заметно, что значения безразмерного положения фронта выходят на полку, и

после достижения определенной частоты подачи она не так выражено влияет на данный параметр.

Для обобщения и выявления общих закономерностей, не зависящих от условий эксперимента, будем использовать безразмерные критерии. Для обезразмеривания частоты было выбрано число Уомерсли Wo , характеризующее соотношение между темпом пульсации потока жидкости и её вязкостью. Значение числа Уомерсли определялось следующим соотношением:

$$Wo = L \sqrt{\frac{2\pi f \rho}{\mu}},$$

где f – частота подачи, ρ – плотность рабочего тела, μ – динамическая вязкость, L – характерная длина области.

Число Рейнольдса определялось как:

$$Re = \frac{\rho v L}{\mu},$$

где v – скорость подачи монотоплива.

Полученные экспериментальные данные были подвергнуты регрессионному анализу, что позволило установить количественные зависимости между исследуемыми критериями и безразмерной глубиной проникновения фронта ξ . Результатом проведенного анализа стали следующие аппроксимирующие модели.

Для среды со значением пористости $\varepsilon = 0,4$, аппроксимационная модель со значением коэффициента детерминации равным $R^2 = 0,979$ приняла вид:

$$\xi(Wo, Re) = -0,3528 + 0,02573 \cdot \ln(Wo) + 1,14 \cdot 10^{-6} \cdot Re.$$

Для среды со значением пористости $\varepsilon = 0,5$ зависимость описывается формулой:

$$\xi(Wo, Re) = -0,437 + 0,0431 \cdot \ln(Wo) + 1,82 \cdot 10^{-6} \cdot Re.$$

Значение коэффициента детерминации R^2 для данной модели равно 0,995.

По аналогии с представленным выше исследованием для более углубленного анализа и определения относительного вклада каждого из рассмотренных факторов была выполнена -нормализация значения переменных $\ln(Wo)$ и Re .

В результате аппроксимирующие модели в стандартизированном виде приобрели следующую форму для пористости $\varepsilon = 0,4$:

$$\xi(Wo, Re) = 0,2334 + 0,009 \cdot (\ln(Wo))_s + 0,1299 \cdot Re_s,$$

и для пористости $\varepsilon = 0,5$:

$$\xi(Wo, Re) = 0,4682 + 0,0151 \cdot (\ln(Wo))_s + 0,2065 \cdot Re_s,$$

где

$$(\ln(Wo))_s = \frac{\ln(Wo) - 7,40975}{0,351234},$$

$$Re_s = \frac{Re - 343507,2}{122681,14}.$$

3.3 Тепловое состояние термokatалитического ЖРДМТ

При формировании рекомендаций о надежности работы изделия необходимо обратить внимание на тепловое состояние двигателя, поэтому следует рассмотреть ряд интегральных характеристик, позволяющих оценить теплонагруженность изделия.

С этой точки зрения следует обратить внимание на внутреннюю энергию засыпки, которую можно определить по следующей формуле:

$$Q = \int \rho_c(1 - \varepsilon)c_{p,c}T_c dV. \quad (9)$$

где -внутренняя энергия засыпки, ρ_c – плотность материала каталитического пакета, ε – пористость засыпки, $c_{p,c}$ – теплоемкость материала пористой засыпки, T_c – температура пористой засыпки.

Учитывая, что в рамках модели теплофизические характеристики пористой засыпки считаются постоянными, а из-за низкой теплопроводности материала пористой засыпки (что подразумевает равномерное распределение температуры по радиусу реактора) для некоторого характерного времени задача может считаться квазиодномерной. Тогда значение внутренней энергии равно:

$$Q = (1 - \varepsilon) \int \rho_c c_{p,c} S T_c dx. \quad (10)$$

Для определения степени влияния варьируемых параметров на тепловое состояние в камере сгорания ЖРДМТ отнесем значение внутренней энергии в произвольный момент времени к его состоянию в начальный момент, тогда отслеживаемый параметр примет следующий вид:

$$\varphi = \frac{Q - Q_0}{Q_0} \quad (11)$$

Эволюцию значения внутренней энергии засыпки будем рассматриваться относительно безразмерного времени $\tilde{t} = \frac{u_{flow}}{L} t$.

В первой серии расчётных экспериментов варьировалась начальная температура пористой засыпки (рисунок 3.12). Из графика видно, что с увеличением начальной температуры скорость роста внутренней энергии снижается, постепенно достигая предельного значения, определяемого адиабатической температурой разложения компонентов топлива.

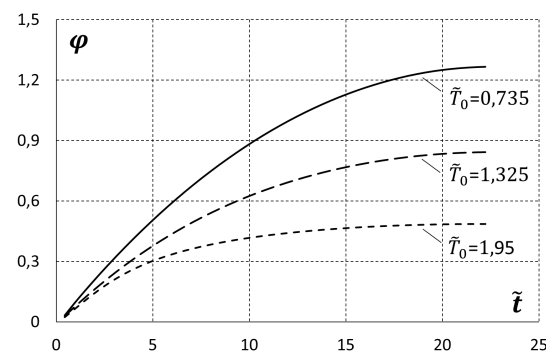


Рисунок 3.12 Изменение значения относительной внутренней энергии каталитического пакета для различных значений начальной температуры

$$\tilde{T}_0 = T_{init}/T_0 \quad (T_0=400 \text{ K})$$

Результаты второй серии численных экспериментов, в которых варьировалась скорость подачи топлива, представлены на рисунке 3.13. Ввод дополнительной массы топлива в расчетную область за счет увеличения скорости подачи привело к росту количества выделяемой энергии, и соответственно к росту передаваемой энергии в пористую среду. При этом их результатов расчетов видно, что с увеличением скорости подачи количество накопленной в каталитическом пакете энергии возрастает непропорционально. Это прежде всего связано с существованием критического значения массового расхода, при котором дополнительная энергия не успевает передаваться в пористую структуру заданных размеров. Вероятной причиной является усиление конвективного теплообмена при повышении скорости потока, вследствие чего всё большая часть выделившейся энергии покидает камеру сгорания, не переходя в тепловую энергию засыпки.

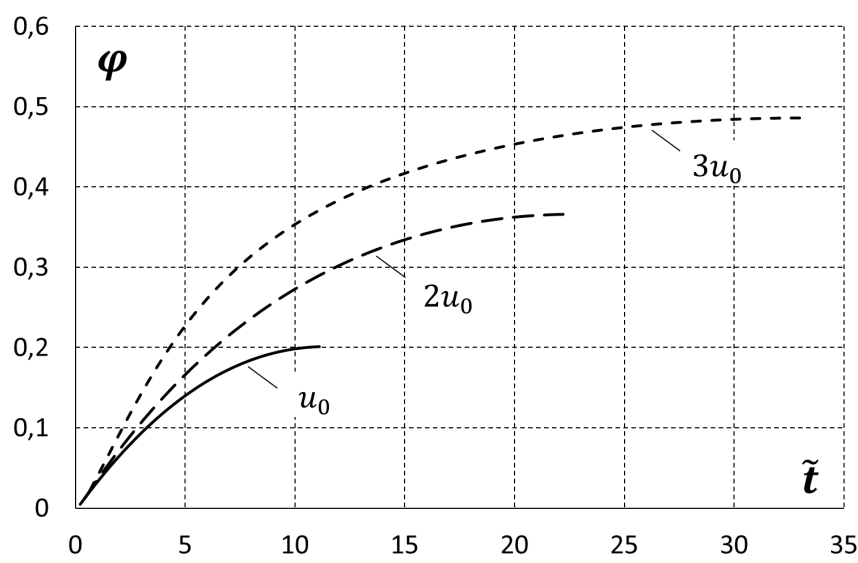


Рисунок 3.13 Эволюция относительной внутренней энергии при различной скорости подачи топлива u_0

Третья серия численных экспериментов направлена на определение степени влияния пористости засыпки на тепловое состояние каталитического пакета. Изменение пористости приводит к изменению эффективной площади поверхности контакта топлива с катализатором, что, в свою очередь,

отражается на количестве тепла, выделяющегося в процессе каталитического разложения. При этом количество запасенной в пористой среде энергии соразмерно объему твердого тела $V_c = (1 - \varepsilon)V_{total}$. Таким образом, можно выделить «оптимальное» значение пористости, при котором достигается баланс между максимальным выделением тепла и его наиболее эффективным (практически полным) поглощением пористой структурой. Из рисунка 3.14 видно, что при переходе от меньших значений пористости к большим система проходит через это предельное, оптимальное состояние.

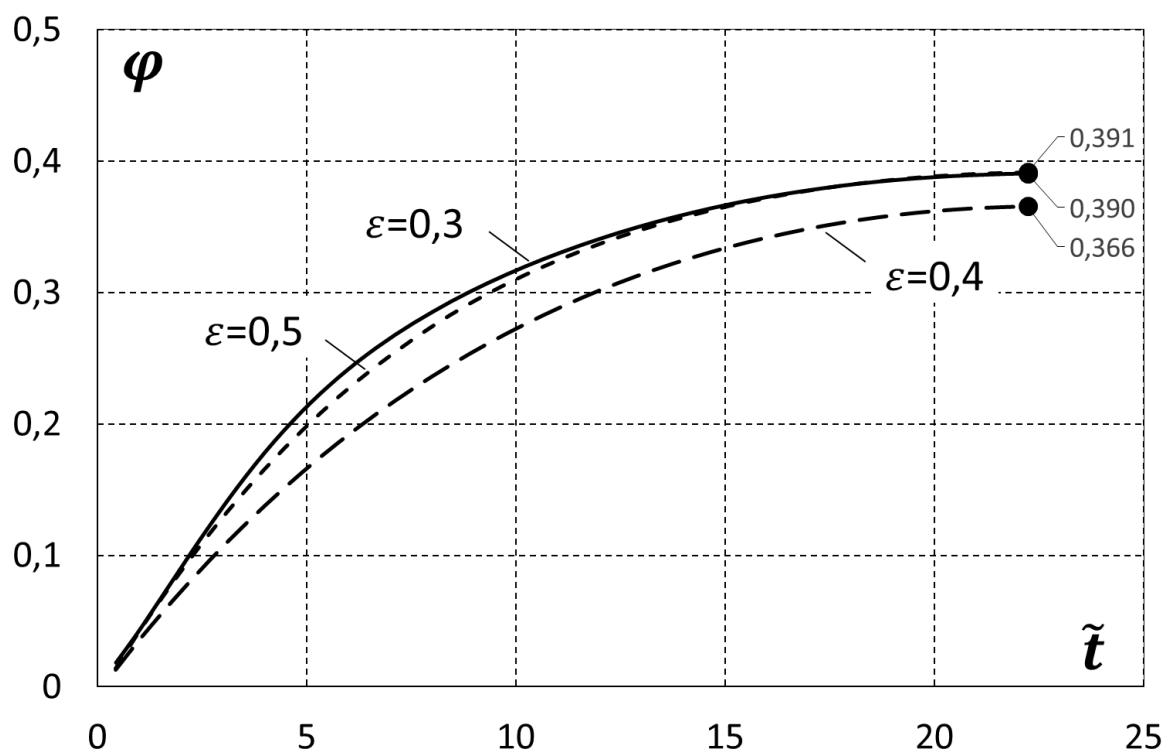
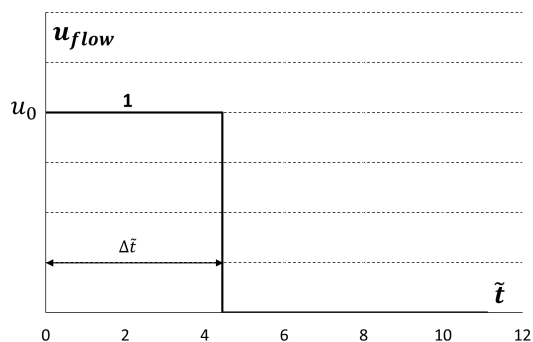


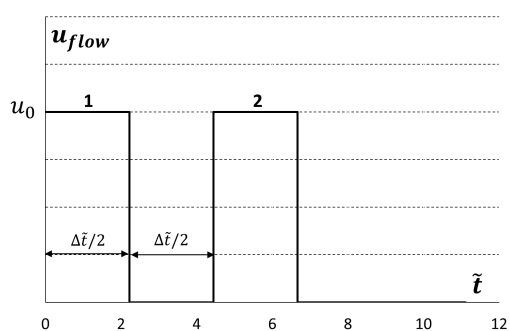
Рисунок 3.14 Эволюция относительной внутренней энергии при различной пористости засыпки ε

Как ранее указывалось, эксплуатация термокatalитических ЖРДМТ сопряжена с использованием импульсного режима подачи топлива. Для оценки влияния данного фактора рассматривается несколько циклограмм работы двигателя, представленных на рисунке 3.15. Суммарная масса топлива, подаваемая в камеру сгорания, остаётся одинаковой для всех

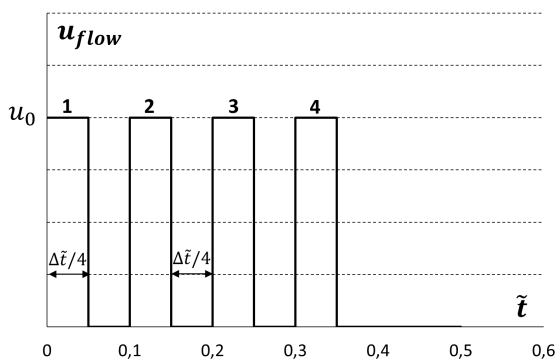
импульсных режимов, циклограммы отличаются только числом импульсов с помощью которых топливо поступает в камеру сгорания.



а)



б)



в)

Рисунок 3.15 Циклограммы подачи топлива ($u_0=2$ м/с, $\Delta\tilde{t}=4,44$),
а – циклограмма №1, б – циклограмма №2, в – циклограмма №3.

На основании результатов численного эксперимента (рисунок 3.16) можно сделать вывод, что при импульсном режиме работы двигателя тепловая нагрузка на пористую среду существенно возрастает. Следовательно, применение таких режимов должно быть ограничено во избежание перегрева и деградации каталитической засыпки.

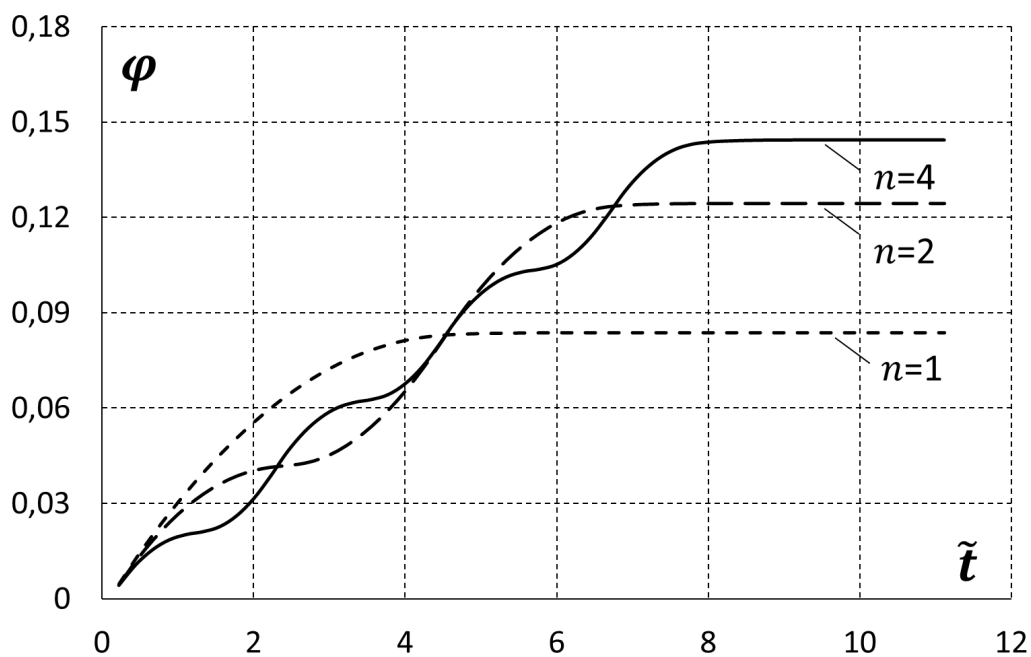


Рисунок 3.16 Эволюция относительной внутренней энергии при различных циклограммы подачи топлива (n – количество импульсов)

Указанные на рисунке 3.15 циклограммы подачи монотоплива имеют значение коэффициента заполнения $D = 50\%$, однако в практике [79] имеют место циклограммы с различными значениями коэффициента заполнения. Рассмотрим, как влияет данный фактор на возможность аккумуляции тепла пористой засыпкой. В рамках пятой серии численных экспериментов будем варьировать значение коэффициента заполнения D , а общее количество поступающего в камеру сгорания топлива будет оставаться постоянным. Это необходимо для того чтобы исключить влияние количества потенциально подведенного к системе тепла. Поддержание постоянства подаваемой в камеру сгорания массы топлива возможно за счет изменения массового расхода. Иными словами, при уменьшении длительности импульса скорость подачи топлива пропорционально увеличивается. Циклограммы подачи топлива в камеру сгорания представлены на рисунке 3.17.

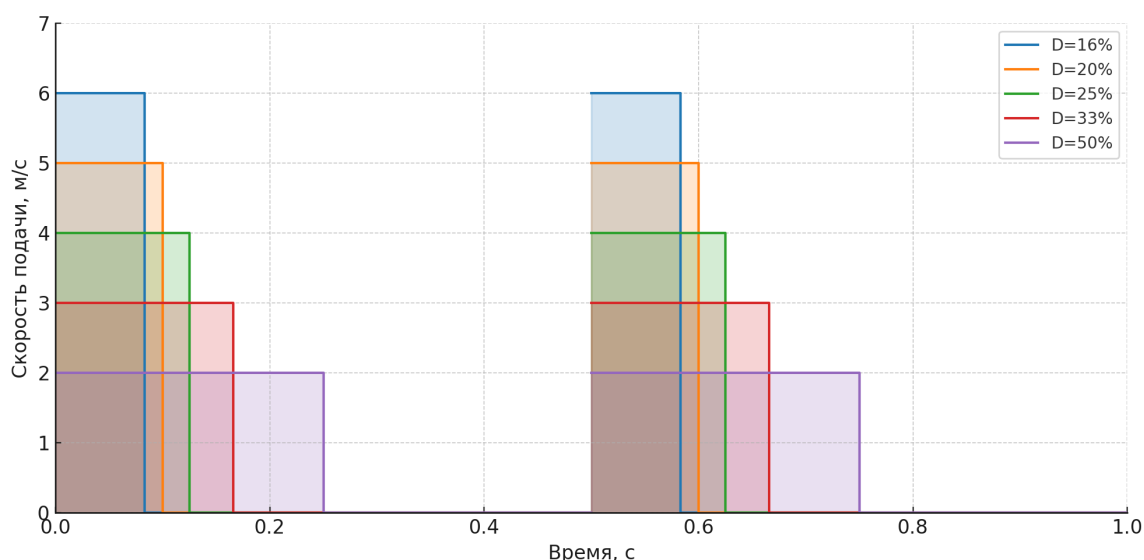


Рисунок 3.17 Циклограммы подачи топлива
($D = 16\%, 20\%, 25\%, 33\%, 50\%$)

По результатам моделирования получены графики эволюции относительной внутренней энергии пористой засыпки (Рисунок 3.18). При анализе графиков заметно, что с уменьшением коэффициента заполнения наблюдается увеличение количества накопленной пористой засыпкой энергии. Несмотря на то, что уменьшение коэффициента заполнения сопровождается увеличением скорости подачи монотоплива, увеличение паузы между включениями приводит к невозможности отвести тепло с помощью конвекции.

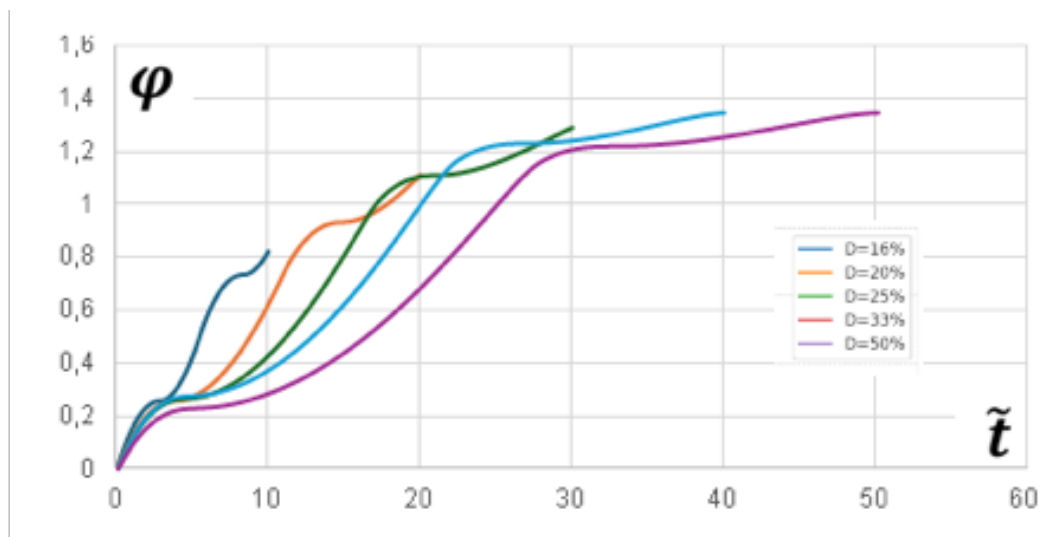


Рисунок 3.18 Эволюция относительной внутренней энергии при варьировании коэффициента заполнения

Выводы по главе 3

1. Проведено исследование влияния скорости и способа подачи топлива, начальной температуры пористой засыпки и её пористости на положение фронта максимальной температуры камеры сгорания. Получены карты финальных положений фронта, а также представлены функциональные зависимости в стандартизованных переменных, демонстрирующие степень влияния параметров на смещение фронта от входного сечения. Показано, что увеличение скорости подачи компонента способствует движению фронта в направлении выходного сечения.
2. Проведено исследование влияния режимов работы термokatалитического ЖРДМТ. Продемонстрировано, что увеличение количества импульсов подачи при том же интегральном значении поданного в камеру сгорания массы топлива приводит к более эффективному накоплению тепла засыпкой. Также показано, что форма циклограммы подачи топлива в двигатель влияет на эффективность

накопления энергии засыпкой – уменьшение коэффициента заполнения
 D приводит к росту накопленной системой энергии.

Глава 4. КОМПЬЮТЕРНАЯ МОДЕЛЬ ТЕРМОКАТАЛИТИЧЕСКОГО ЖРДМТ

В данной части работы рассматривается компьютерная модель теплового состояния терموкаталитического ЖРД малой тяги. Разработанная компьютерная модель может быть использована для проведения исследования влияния рабочих параметров двигателя на его тепловой режим, выявления и обобщения закономерностей, полезных при проектировании новых изделий, а также для проведения оценки теплового состояния двигателя в целом [17, 36]. Кроме того, выполнено сравнение результатов численного моделирования с данными натурных испытаний.

4.1 Компьютерная модель термокаталитического ЖРДМТ

Рассматривается задача о температурном состоянии термокаталитического жидкостного ракетного двигателя малой тяги. В рамках задачи необходимо определить изменение полей распределения температуры по конструкции ЖРДМТ с учетом сопряженного теплообмена.

Компьютерная модель термокаталитического жидкостного ракетного двигателя малой тяги (ЖРДМТ) основывается на реальной конфигурации изделия и включает в себя следующие ключевые компоненты:

Геометрическая модель

Геометрическая модель термокаталитического ЖРД малой тяги представляет собой упрощённую, но при этом достаточно детализированную конфигурацию реального изделия. При её построении учитывались конструктивные особенности, оказывающие существенное влияние на теплоперенос: радиационно-кондуктивный обмен теплом между элементами конструкции и конвективный теплообмен между жидкостью, газовой средой и поверхностями внутренних элементов двигателя.

Дискретная модель

Расчётная сетка представляет собой совокупность непересекающихся контрольных объёмов. Степень дискретизации зависит от особенностей геометрической модели, выбранного шага по времени, теплофизических свойств материалов, из которых состоят элементы конструкции. В частности, для материалов с низким термическим сопротивлением допустимо использование менее детализированной сетки без существенной потери точности расчётов, что позволяет значительно снизить затраты вычислительных ресурсов.

Модели физических процессов

Используемые при создании тепловой модели двигателя математические модели описывают важнейшие механизмы теплопереноса и источники теплового воздействия:

- кондуктивный теплопереноса в твердых элементах конструкции;
- конвективный теплообмен между жидким монотопливом и элементами трубопроводной арматуры;
- фильтрационное горение жидкого монотоплива;
- конвективный теплообмен в сопле,
- радиационный нагрев элементов конструкции от внешних источников излучения;

Свойства материалов

Большие значения температур в камере сгорания обуславливают необходимость использования теплофизических свойств материалов в виде зависимостей их от температуры для адекватного учета их поведения в моделях теплопереноса. Эти данные определяются в виде таблиц или функциональных зависимостей, задаваемых в расчетной модели.

4.2 Численные методы и алгоритмы расчета

Численное решение поставленной задачи реализовано с использованием сочетания метода конечных объемов (для твердых тел и фильтрационного горения) и метода конечных разностей (для одномерных моделей течения). В качестве платформы, на базе которой строится компьютерная модель изделия, используется пакет программ конечно-объемного анализа «ЛОГОС» [18], предоставляющий инструменты для расчета на сложных трехмерных сетках. Программный модуль «ЛОГОС-Тепло» предназначен для решения трёхмерного нестационарного уравнения теплопроводности с учётом дополнительных источников тепла. Специфические для рассматриваемого двигателя физические процессы реализованы посредством пользовательских функций и дополнительных процедур, разработанных автором на основе открытых интерфейсов вычислительной среды. В результате сформирован собственный алгоритм расчёта, интегрированный в универсальный тепловой решатель.

Построение тепловой вычислительной модели ракетного двигателя предполагает оптимизацию между достоверностью расчёта и скоростью его выполнения. В ходе разработки изделия выполняется серия расчётных итераций, что делает особенно важным минимизацию вычислительных затрат. Продолжительные интервалы виртуальных испытаний, достигающие $10^4 - 10^5$ с, усиливают требования к производительности используемых численных методов и стабильности алгоритмов.

Пакет программ «ЛОГОС» позволяет создавать модели сопряженного теплообмена, который имеет место при течении жидкого топлива по переходнику и истечении продуктов разложения через сверхзвуковое сопло. Целевым параметром в таких расчётах является коэффициент теплообмена, определение которого при вычислениях с использованием трёхмерных систем инженерного анализа требует создания дискретной модели области

течения с детальным разрешением пристеночной области. Получающаяся в итоге расчётная сетка, с большим количеством объемных элементов, а также непосредственное использование моделей гидро- и газодинамики может привести к уменьшению необходимого дискретного шага по времени для обеспечения сходимости решения и соответственно увеличить суммарное время расчёта. Поэтому в рамках настоящей работы принято решение о замене задачи сопряженного теплообмена на реализацию дополнительной функциональности, позволяющей учитывать эти явления посредством использования эмпирических методик.

Теплообмен между жидким топливом и стенками трубопроводной арматуры

В области трёхмерного участка трубопроводной арматуры постановка задачи сведена к квазиодномерному нестационарному кондуктивно-конвективному течению жидкого монотоплива в канале:

$$\rho c \left(\frac{\partial T}{\partial t} + v \frac{\partial T}{\partial x} \right) = \lambda \frac{\partial^2 T}{\partial x^2} + Q(x, t),$$

где $Q(x, t) = \alpha \cdot (T_w - T)$ – источниковый член, учитывающий теплообмен, между стенкой трубопровода и движущимся монотопливом, v – скорость монотоплива.

Данное уравнение замыкалось с помощью следующих начальных:

$$T(x, 0) = T_0,$$

и граничных условий:

$$T(0, t) = T_1;$$

$$\lambda \frac{\partial T}{\partial x} \Big|_{x=l} = 0.$$

Для данного случая уравнение было приведено к безразмерному виду:

$$\frac{\partial \theta}{\partial \tau} + V \frac{\partial \theta}{\partial \xi} = \frac{\partial^2 \theta}{\partial \xi^2} + \tilde{Q}(\xi, \tau),$$

где $\tau = \lambda t / (c\rho l^2)$ – безразмерное время, l – длина трубопровода, $\theta = \frac{T(x,t)-T_0}{T_1-T_0}$

– безразмерная температура, $\tilde{Q}(\xi, \tau) = \frac{Q(x,t) \cdot l^2}{\lambda(T_1-T_0)}$ – безразмерный источник

тепла. При таком обезразмеривании граничные условия примут следующий вид:

$$\begin{aligned}\theta(0, \tau) &= 1; \\ \frac{\partial \theta(1, \tau)}{\partial \xi} &= 0,\end{aligned}$$

а начальное условие примет следующий вид:

$$\theta(\xi, 0) = 0.$$

Дополнительно обратим внимание на источниковый член, при замене $Q(x, t)$ на $\alpha \cdot (T_w - T)$ получим:

$$\tilde{Q}(\xi, \tau) = \frac{Q(x, t) \cdot l^2}{\lambda(T_1 - T_0)} = \frac{\alpha \cdot l^2}{\lambda} \cdot \frac{T_w - T}{(T_1 - T_0)} = Bi \cdot (\theta_w - \theta).$$

где Bi – число Био.

Для определения значения коэффициента конвективного теплообмена α на участке подвода монотоплива к двигателю используется эмпирическая зависимость следующего вида [18]:

$$Nu = \frac{\alpha D}{\lambda} = 0,023 \cdot Pr^{0,4} \cdot Re^{0,8}$$

где $Re = \frac{\rho U D}{\mu}$ – число Рейнольдса, $Pr = \frac{\mu c}{\lambda}$ – число Прандтля, D –

диаметр канала, μ – динамический коэффициент вязкости монотоплива, c – теплоёмкость монотоплива, λ – коэффициент теплопроводности монотоплива, U – среднерасходная скорость монотоплива в канале.

Решение уравнение кондуктивно-конвективного теплопереноса осуществляется методом конечных разностей с использованием неявной разностной схемы.

При использовании достаточно малого шага по пространству и небольших скоростях подачи топлива в камеру сгорания справедлива следующая аппроксимация:

$$1 - \frac{Vdh}{2} = \frac{1}{1 + \frac{V\Delta h'}{2}}$$

Тогда уравнение кондуктивно-конвективного переноса можно записать в виде конечных разностей с преобразованием Самарского [20]:

$$\begin{aligned} \frac{\theta_i^{j+1} - \theta_i^j}{\Delta\tau} + \frac{V_i + |V_i|}{2} \cdot \frac{\theta_i^{j+1} - \theta_{i-1}^{j+1}}{\Delta h} + \frac{V_i - |V_i|}{2} \frac{\theta_{i+1}^{j+1} - \theta_i^{j+1}}{\Delta h} = \\ = \frac{\theta_{i+1}^{j+1} - 2\theta_i^{j+1} + \theta_{i-1}^{j+1}}{\left(1 + \frac{|V_i|\Delta h}{2}\right)(\Delta h)^2} + Bi \cdot (\theta_{w,i}^j - \theta_i^j). \end{aligned}$$

Полученное разностное уравнение представляет собой трехдиагональную систему линейных алгебраических уравнений, которая эффективно решается методом прогонки.

Полученное решение в виде распределения температуры $T(x) = \theta(\xi)(T_1 - T_0) + T_0$ использовалось для постановки граничного условия III рода для задачи кондуктивного переноса тепла по конструкции.

Важной частью работы стало построение алгоритма соответствия между 3D и 1D моделями. Для этого была реализована процедура, автоматически сопоставляющая участки течения для 1D модели поверхностным сеточным элементам неструктурированной расчётной сетки 3D модели.

Течение продуктов разложения монотоплива после пористой засыпки

При расчёте коэффициента конвективного теплообмена в сопле использовалась методика В. С. Авдеевского [1]. Значение коэффициента конвективного теплообмена определялось следующим критериальным соотношением:

$$\alpha_w = St_w \cdot \rho_w \cdot U \cdot c_{pw},$$

где $St_w = 0,0326 Re_w^{-0,2} Pr_w^{0,6} \left(\frac{h_w}{h_r}\right)^{0,39} \left(1 + \frac{k-1}{2} rM^2\right)^{0,11}$ – число Стэнтона, ρ_w – плотность продуктов разложения, U – скорость продуктов разложения, c_{pw} – изобарная теплоёмкость продуктов разложения при температуре T_w .

Распределение температуры продуктов реакции в сопле определяется с использованием газодинамической функции температуры τ [21]:

$$T = T_f \cdot \tau(\lambda, k),$$

где λ – относительная скорость продуктов разложения, k – показатель адиабаты продуктов разложения.

При расчёте теплообмена в камере сгорания, в области между выходным сечением каталитического пакета и входным сечением сопла, значение коэффициента конвективного теплообмена принималось постоянным по длине и определялось равным коэффициенту во входном сечении сопла.

4.1 Валидация тепловой модели

Для валидации разработанной компьютерной модели рассматривается автономный режим работы термокаталитического ЖРД малой тяги в условиях наземных испытаний. Циклограмма работы двигателя включает следующие стадии, представленные на рисунке .1:

- Электронагреватель мощностью 15 Вт, установленный на внешней поверхности камеры сгорания, включается на 3600 с, обеспечивая постепенный разогрев термокаталитического пакета.
- После завершения этапа нагрева система переходит в режим пассивного охлаждения продолжительностью $t_{\text{ожид}} = 600$ с;

- После отключения нагревателя производится кратковременная подача монотоплива в камеру сгорания длительностью 20 секунд с расходом $G = 0,023$ кг/с.

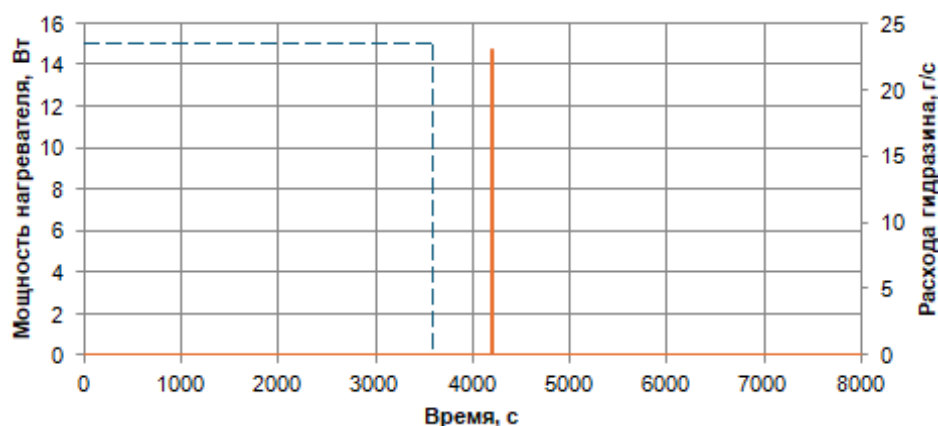


Рисунок 4.1 Циклограмма работы двигателя, пунктирная линия – работа нагревателя, сплошная линия – подача топлива

В начальный момент времени задаётся однородное распределение температуры:

- по конструкции двигателя – 289 К;
- во входном трубопроводе и клапане – 293 К.

Валидация модели проводилась путём сравнения экспериментально измеренных температур в контрольных точках, указанных на рисунке 4.2, с соответствующими значениями, полученными в результате численного моделирования.

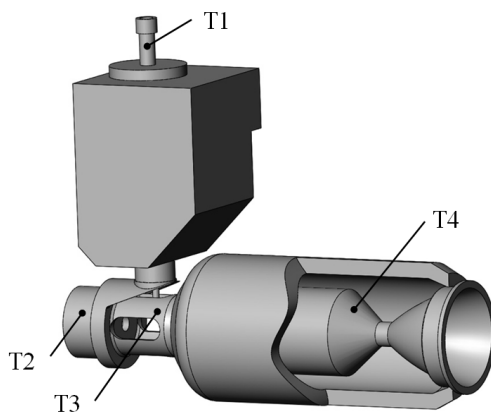
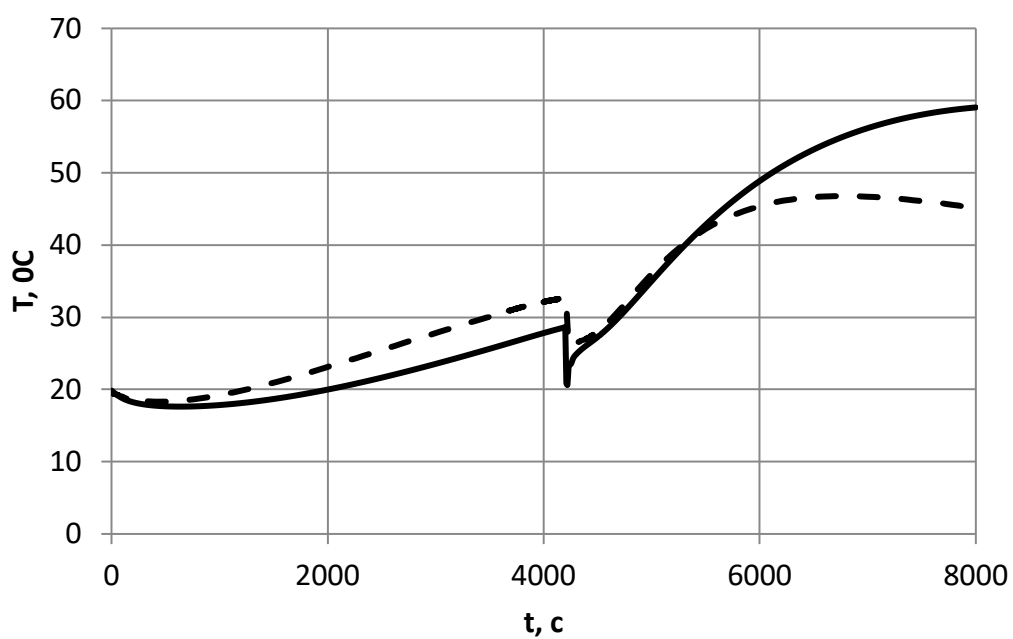
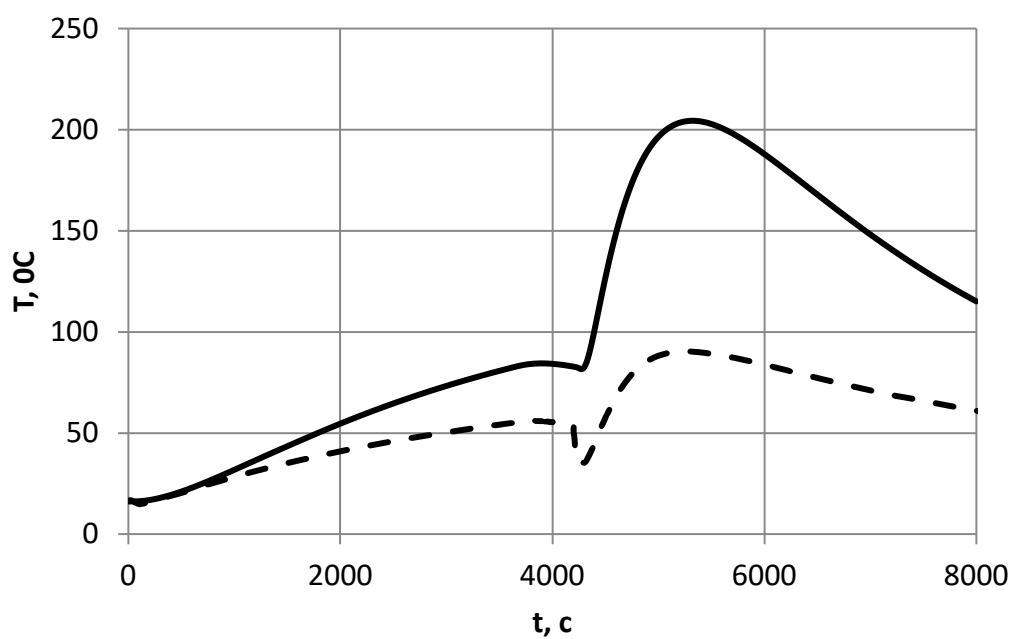


Рисунок 4.2 Схема расположения датчиков температуры

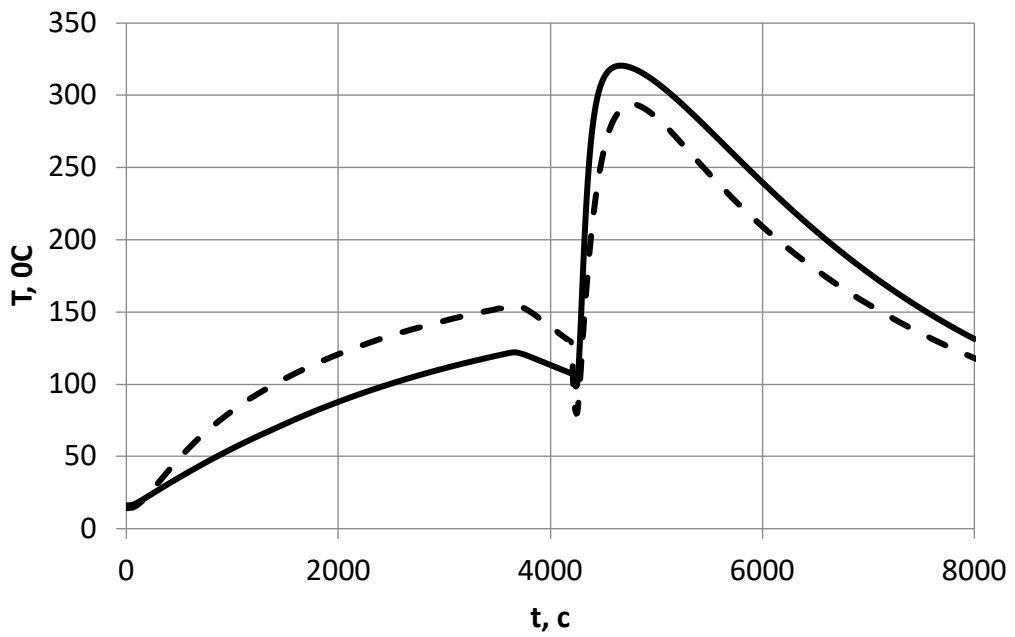
Результаты численного моделирования, а также их сравнение с данными огневых испытаний в точках установки температурных датчиков представлены на рисунке 4.3.



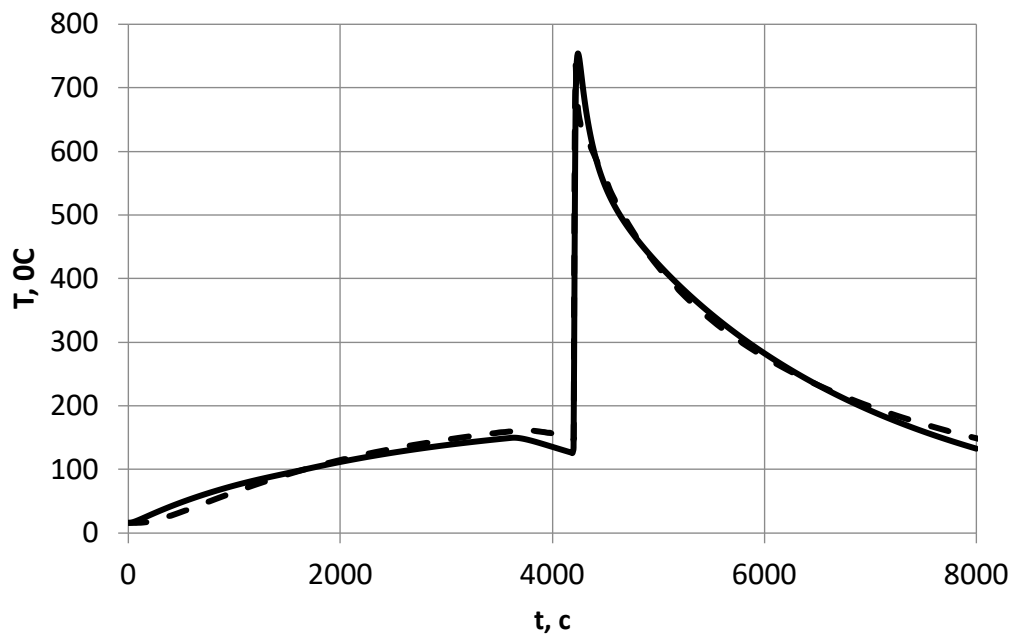
а)



б)



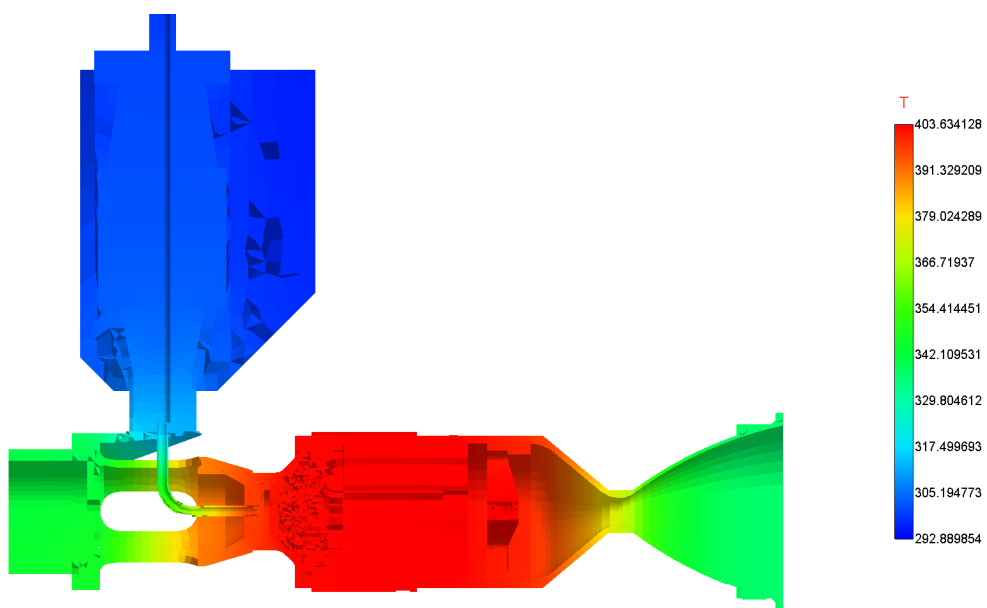
в)



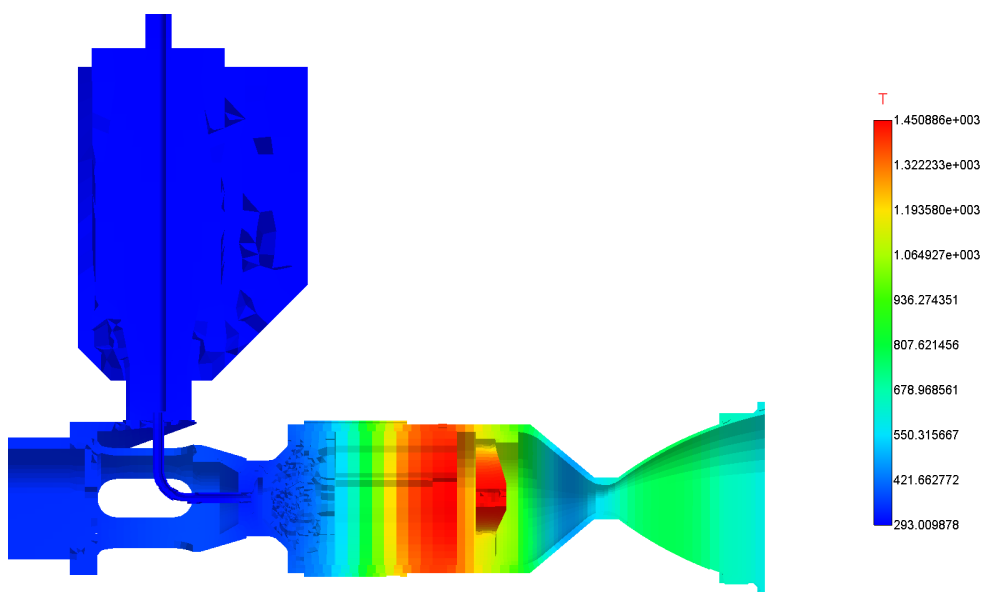
г)

Рисунок 4.3 Изменение температуры на датчиках с течением времени
 а) датчик Т1 б) датчик Т2 в) датчик Т3 г) датчик Т4, пунктирная линия –
 экспериментальные данные, сплошная линия – результаты численного
 моделирования

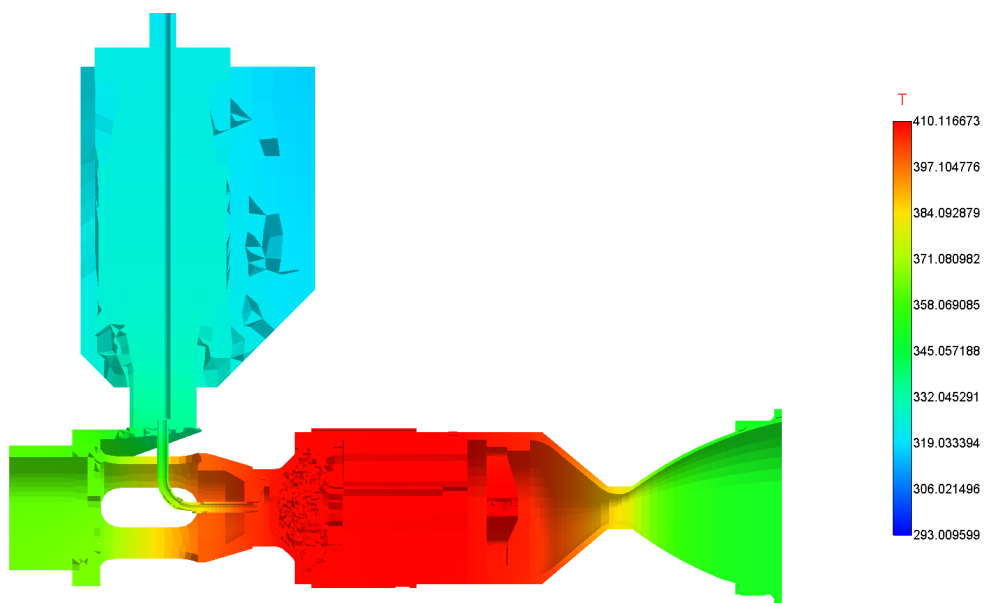
Температурные поля, полученные в результате численного моделирования, представлены на рисунке 4.4.



a)



б)



в)

Рисунок 4.4 Температурные поля в различные моменты времени

а) $t = 4200$ с, б) $t = 4220$ с, в) $t = 8000$ с

Следует отметить, что между результатами численного моделирования и данными натурных испытаний по распределению температур в отдельных точках наблюдаются количественные расхождения. Выявленные отклонения не являются случайными и могут быть обусловлены совокупностью факторов, связанных как с особенностями постановки численного эксперимента, так и с конструктивными характеристиками установки и спецификой проведения измерений в реальных условиях. Перечислим основные причины, оказывающие наибольшее влияние на отклонение расчетных температур по сравнению с экспериментальными данными:

- упрощение конструкции двигателя: в расчетной геометрии не моделировались некоторые второстепенные элементы, например кронштейны крепления двигателя к испытательному стенду и дополнительные массивные элементы, имеющие место возле мест крепления датчиков Т3 и Т4. Несмотря на использование теплоизолирующих элементов с высокими показателями термического

сопротивления их теплоотвод мог повлиять на завышение расчетных температур относительно экспериментальных данных.

- дополнительным источником расхождения является незначительное несоответствие положений температурных датчиков в расчётах и в экспериментах.
- допущения физико-математической модели фильтрационного горения и используемые в компьютерной модели упрощения, направленные на ускорение расчетов.

Выводы по главе 4.

1. Предложена компьютерная модель термokatалитического ЖРДМТ. Модель учитывает ключевые физические процессы, протекающие в изделии, включая нестационарный тепломассоперенос в пористой каталитической структуре, теплообмен между газовой, твердой и жидкой фазами, а также взаимодействие с конструктивными элементами камеры сгорания.
2. Проведена валидация предложенной модели на тестовой задаче, описывающей нестационарное распространение тепла по конструкции ракетного двигателя. Расчеты выполнены с использованием условий, соответствующих лабораторным экспериментам. Сравнение рассчитанных результатов с помощью предложенной модели показало максимальную относительную погрешность не более 15%, что подтверждает адекватность выбранных физико-математических моделей и корректность численной реализации.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

На основании результатов исследований, представленных в настоящей диссертационной работе, можно сформулировать следующие выводы:

1. Описана физико-математическая модель и метод моделирования процессов фильтрационного горения в камерах сгорания термokatалитических ЖРД с учётом неоднородности пористости засыпки.
2. Физико-математическая модель представлена в виде программного средства в среде OpenFOAM. Проведена валидация решателя, включающая в себя сравнение результатов расчетов с экспериментальными данными для различных циклограмм подачи топлива в камеру сгорания. По результатам валидации показано, что максимальная погрешность в 17% достигается при условиях низкого коэффициента заполнения, в то время как во время стационарной подачи максимальная погрешность равна 11%.
3. Выполнены параметрические исследования влияния начальной температуры каталитической засыпки, пористости и скорости подачи топлива на устойчивость фронта разложения монотоплива. Показано, что устойчивость фронта преимущественно зависит от массового расхода. Показано, что в регрессионной модели со стандартизированными переменными коэффициент при линейном члене, соответствующем скорости подачи топлива в 240 раз больше коэффициента при аналогичном члене для переменной, характеризующей начальную температуру топлива. При этом выявлены нелинейные эффекты чувствительности системы к изменениям параметров.
4. Получены карты финальных положений фронта разложения, позволяющие сформулировать практические рекомендации по выбору рабочих режимов термokatалитических ЖРДМТ.

5. Установлено, что при подаче одного и того же количества топлива в камеру сгорания, количество накопленной пористой засыпкой энергии увеличивается. При переходе от режима подачи с одним импульсом к четырем приводит к увеличению количества накопленной энергии в 1,5 раза.
6. Предложена методика анализа устойчивости фронта разложения с использованием фазовых портретов. Данный подход позволяет идентифицировать устойчивые и неустойчивые режимы, позволяющие формировать представленные в работе карты устойчивых режимов. Показано существование области значений, в рамках которой финальное положение фронта находится в зоне каталитического пакета.
7. Разработана и валидирована на результатах огневых стендовых испытаний компьютерная модель термокаталитического ЖРДМТ, позволяющая проводить численное исследование процессов теплообмена в камере сгорания и оптимизировать ее конструктивные параметры.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Авдуевский В. С., Галицейский Б. М., Глебов Г. А. Основы теплопередачи в авиационной и ракетно-космической технике / В. С. Авдуевский, Б. М. Галицейский, Г. А. Глебов, Москва: Машиностроение, 1992.
2. Арнольд В. И. Математические методы классической механики / В. И. Арнольд, Москва: Наука, 1989. 472 с.
3. Асюшкин В. А., Викуленков В. П., Ишин С. В. Итоги создания и начальных этапов эксплуатации межорбитальных космических буксиров типа «Фрегат» // Вестник НПО им. С. А. Лавочкина. 2014. № 1. С. 3–9.
4. Бабкин В. С. [и др.]. О механизме распространения волн горения в пористой среде при фильтрации газа 1982. С. 1157–1161.
5. Бабкин В. С., Бунев В. А., Коржавин А. А. Распространение пламени в пористых инертных средах // Горение газов и натуральных топлив. Черноголовка. 1980. С. 87–89.
6. Бабкин В. С., Коржавин А. А., Лаевский Ю. М. О множественности режимов фильтрационного горения газов // Доклады РАН. 2011. № 6 (436). С. 756–759.
7. Вайнштейн П. Б. Об устойчивости газового пламени в пористых средах // Физика горения и взрыва. 1992. № 1 (28). С. 28–34.
8. Ван-Дайк М. Методы возмущений в механике жидкостей / М. Ван-Дайк, Москва: Мир, 1967.
9. Вишняков А. Ю. [и др.]. Пакет программ ЛОГОС. Модуль расчета сопряженных и связанных задач теплопереноса // Труды Московского физико-технического института. 2014. № 4 (6). С. 158–167.
10. Доброго К. В., Жданок С. А. К теории термогидродинамической неустойчивости фронта фильтрационного горения газа // Физика горения и взрыва. 1999. № 5 (35). С. 14–20.

11. Дорофеев А. А. Основы теории тепловых ракетных двигателей / А. А. Дорофеев, Москва:, 2010. 463 с.
12. Дробышев В. И. [и др.]. Фильтрационное горение газов // Физика горения и взрыва. 1983. № 2 (19). С. 17–26.
13. Жданок С. А., Доброго К. В. Физика фильтрационного горения газов / С. А. Жданок, К. В. Доброго, Минск: Ин-т тепло- и массообмена имени А. В. Лыкова, 2002. 204 с.
14. Зельдович Я. Б. Математическая теория горения и взрыва / Я. Б. Зельдович, 1980.
15. Какуткина Н. А. Переходные процессы при фильтрационном горении газов // Физика горения и взрыва. 2004. (40(5)). С. 62–73.
16. Кандрюкова Т. А., Лаевский Ю. М. О некоторых подходах к моделированию фильтрационного горения газа // Сибирский журнал индустриальной математики. 2015. (18(4)). С. 49–60.
17. Коватова Ю. С., Богачева Д. Ю. Оценка теплового состояния камеры сгорания жидкостных ракетных двигателей малой тяги, работающего на экологически чистых компонентах // Труды МАИ. 2013.
18. Кожаев Д. А. [и др.]. Программный модуль пакета программ «ЛОГОС» - модульная интеграционная платформа (ЛОГОС-МИП), версия 2017.
19. Коул Дж. Методы возмущений в прикладной математике / Дж. Коул, Москва: Мир, 1972.
20. Крайнов А. Ю., Миньков Л. Л. Численные методы решения задач тепло- и массопереноса / А. Ю. Крайнов, Л. Л. Миньков, Томск: STT, 2016.
21. Кутателадзе С. С., Леонтьев А. И. Тепломассообмен и трение в турбулентном пограничном слое / С. С. Кутателадзе, А. И. Леонтьев, Энергоатомиздат, 1985.
22. Лаевский Ю. М. К теории фильтрационного горения газов // Физика горения и взрыва. 1984. № 6 (20). С. 3–13.

23. Лаевский Ю. М., Бабкин В. С. Фильтрационное горение газов // Распространение тепловых волн в гетерогенных средах. 1988. С. 108–145.
24. Лаевский Ю. М., Бабкин В. С. Распространение тепловых волн в гетерогенных средах // под ред. Ю.Ш. Матроса. Новосибирск. 1988. С. 108–145.
25. Лаевский Ю. М., Носова Т. А. Вычислительные модели фильтрационного горения газа // Сибирский журнал индустриальной математики. 2020.
26. Лаевский Ю. М., Попов П. Е., Калинин А. А. Моделирование фильтрации двухфазной жидкости смешанным методом конечных элементов. // Математическое моделирование. 2010. № 3 (22). С. 74–90.
27. Лаевский Ю. М., Яушева Л. В. Численное моделирование фильтрационного горения газа на основе двухуровневых полунявных разностных схем // Вычислительные технологии. 2007. № 2 (12).
28. Лаевский Ю. М., Яушева Л. В. Моделирование процессов фильтрационного горения газа в неоднородных пористых средах // Сибирский журнал вычислительной математики. 2009. № 2 (12). С. 171–187.
29. Манелис Г. Б. [и др.]. Автоволновые процессы при фильтрационном горении в противоточных системах // Успехи химии. 2012. № 9 (81). С. 855–873.
30. Могилевич Л. И. Об асимптотическом методе решения нелинейных задач газовой динамики со слабыми ударными волнами. Некоторые вопросы теории коротких волн. // Изв. вузов. 1972. № 12. С. 77–83.
31. Новиков С. С., Рязанцев Ю. С. К теории стационарной скорости распространения фронта экзотермической реакции в конденсированной среде // Журнал прикладной механики и технической физики. 1965. № 3 (6). С. 43–48.
32. Носова Т. А. Вычислительные модели фильтрационного горения газа в режиме низких скоростей 2018.

33. Палесский В. Ф., Фурсенков Р. В., Минаев С. С. Моделирование фильтрационного горения газов в цилиндрической пористой горелке с учетом радиационного теплообмена // Физика горения и взрыва. 2014. № 6 (50). С. 3–10.
34. Рычков А. Д., Шокина Н. Ю. Математические модели фильтрационного горения и их приложения // Вычислительные технологии. 2003. № 2 (8). С. 124–144.
35. Садриддинов П. Б. Определение скорости фронта фильтрационного горения газов // Вестник Таджикского национального университета. 2015. № 4 (1). С. 17–20.
36. Формалев В. Ф., Колесник Методика, алгоритм и программный комплекс по определению теплового состояния охлаждаемых микроракетных двигателей // Труды МАИ. 2014. (78).
37. Abarbanel H. Analysis of observed chaotic data / H. Abarbanel, Springer Science&Business Media-е изд., 2012. 271 с.
38. Anflo K., Thormalen P., Persson M. Hot-firing tests using a low temperature derivative of LMP-103S 2013.
39. Asencio J. R. Estudo numerico do processo de decomposicao em camaras cataliticas de propulsores monopropelentes 2019.
40. Asencio J. R., Savonov I. R., Intini M. R. An Open-source Solver to Model the Catalytic Decomposition of Monopropellants for Space Thrusters // Journal of Aerospace Technology and Management. 2020. (12).
41. Babkin V. S. Filtration combustion of gases. Present state of affairs and prospects // Pure and Applied Chemistry. 1993. (65). С. 335–344.
42. Bear J. Dynamics of fluids in porous media / J. Bear, Courier Corporation, 2013. 781 с.
43. Bhosale V. K., Kulkarni S. G., Kulkarni P. S. Ionic Liquid and Biofuel Blend: A Low-cost and High Performance Hypergolic Fuel for Propulsion Application // ChemistrySelect. 2016.

44. Chase J., Malcolm W. NIST-JANAF thermochemical tables. // *Journal of Physics and Chemical Reference Data*. 1998.
45. Fang J. [и др.]. Experimental Study of the Catalytic Ignition Characteristics of a Dual-Mode Ionic Liquid Propellant in Model Thrusters // *Energies*. 2022. № 22 (15). С. 8730.
46. Firsov A. N., Ozerovskaya N. I., Shkandinskii K. G. Unsteady Modes of Filtration Combustion // *Combustion, Explosion and Shock Waves*. 2010. № 4 (46). С. 371–379.
47. Fujii G. [и др.]. The development results of the long life 1N hydrazine monopropellant thruster // *The Journal of Space Technology and Science*. 2003. № 1 (28). С. 37–47.
48. Gao H. B. Experimental study of combustion in a double-layer burner packed with alumina pellets of different diameters. // *Applied energy*. 2012. (100). С. 295–302.
49. Gao H. B. Methane/air premixed combustion in a two-layer porous burner with different foam materials // *Fuel*. 2014. (115). С. 154–161.
50. Gao H. B. Two-dimensional numerical study of methane-air combustion within catalytic and non-catalytic porous medium. // *Frontiers in Chemistry*. 2020. (8).
51. Gao H. B., Feng X. B., Qu Z. Combustion in a hybrid porous burner packed with alumina pellets and silicon carbide foams with a gap // *Journal of Energy Engineering*. 2017. № 5 (143).
52. Garrigues L., Coche P. Electric propulsion: comparisons between different concepts. // *Plasma Physics and Controlled Fusion*. 2011. (12).
53. Guan J. W. [и др.]. Effects of catalyst bed porosity and mass flow rate on decomposition and combustion processes of a HAN-based monopropellant thruster // *Vacuum*. 2021. (194).

54. Guerrero F. [и др.]. Syngas production from the reforming of typical biogas composition in an Inert Porous media reactor // *Frontiers in Chemistry*. 2020. (8). C. 145.
55. Harten A. High resolution schemes for hyperbolic conservation laws // *Journal of Computational Physics*. 1983. № 3 (49). C. 357–393.
56. Hayashi T. C., Malico I., Pereira J. C. F. Effect of different downstream temperatures on the performance of a two-layer porous burner // *Combustion Theory and Modelling*. 2010. № 3 (14). C. 405–423.
57. Henneke M. R., Ellzey J. L. Modeling of filtration combustion in a packed bed. // *Combustion and Flame*. 1999. № 4 (117). C. 832–840.
58. Holtzmann T. Mathematics, numerics, derivations and OpenFOAM / T. Holtzmann, 2017. 172 с.
59. Hou B. Steady-state behavior of liquid fuel hydrazine decomposition in packed bed // *AIChE Journal*. 2015. № 3 (61). C. 1064–1080.
60. Hwang C. H. Effects of catalyst bed failure on thermochemical phenomena for a hydrazine monopropellant thruster using Ir/Al₂O₃ catalyst // *Industrial & Engineering Chemistry Research*. 2012. № 15 (51). C. 5382–5593.
61. Igarashi S. [и др.]. Development Status of the 0.5N class Low-Cost Thruster for Small Satellite. Cincinnati:, 2018.C. 4753.
62. Issa R. I. Solution of the implicitly discretised fluid flow equations by operator-splitting // *Journal of Computational Physics*. 1986. № 1 (62). C. 40–65.
63. James G. An Introduction to statistical learning / G. James, New York:, 2013.
64. Kakutkina N. A. Limiting phenomena in the filtration combustion liquid monopropellants // *Combustion, Explosion and Shock Waves*. № 2 (45). C. 29–39.
65. Kakutkina N. A. Regimes of filtration combustion of liquid monopropellants // *Combustion, Explosion and Shock Waves*. (44).
66. Kesten A. S. Analytical study of catalytic reactors for hydrazine decomposition 1966.

67. Kesten A. S. Analytical Study of Catalytic Reactors for Hydrazine Decomposition Washington: NASA:, 1967.
68. Kesten A. S. Analytical study of catalytic reactors for hydrazine decomposition 1968.
69. Kesten A. S. Analytical Study of Catalytic Reactors for Hydrazine Decomposition Washington: NASA:, 1969.
70. Kesten A. S. Turbulent diffusion of heat and mass in catalytic reactors for hydrazine decomposition // Journal of Spacecraft and Rockets. 1970. № 1 (7). C. 31–36.
71. Laevsky Yu. M., Yausheva L. V. Simulation of gaseous phase filtration combustion in heterogeneous porous media // Siberian Journal of Computational Math. 2009. (12). C. 171–187.
72. Lee K. H. Firing Performance Measurement of Monopropellant Decomposition Catalyst and Domestic Development Status // Journal Korean Society of Propulsion Engineers. 2006. № 10 (3). C. 109–117.
73. Leer B. van Towards the Ultimate Conservative Difference Scheme V. A Second-order Sequel to Godunov's Method // Journal of Computational Physics. 1979. № 1 (32). C. 101–136.
74. Lemmer K. Propulsion for cubesats // Acta Astronautica. 2017. (134). C. 231–243.
75. Leverone F., Cervine A., Gill E. Cost of analysis of solar propulsion systems for microsatellite applications // Acta Astronautica. 2019. (155). C. 90–110.
76. Malico I., Pereira J. C. F. Numerical study on the influence of radiative properties in porous media combustion // ASME Journal of Heat and Mass Transfer. № 5 (123). C. 951–957.
77. Maric T., Hopken J., Mooney K. G. The OpenFOAM Technology Primer / T. Maric, J. Hopken, K. G. Mooney, OpenFOAM-v2012.1-е изд., 2021. 423 с.

78. Martinez-Sanchez M., Pollard J. E. Spacecraft electric propulsion-an overview. // *Journal of Propulsion and Power*. 1998. № 5 (14). С. 688–699.
79. Masse R. [и др.]. AF-M315E propulsion system advances and improvements 2016.С. 4577.
80. McBride B. J., Gordon S., Reno M. A. Coefficients for Calculating Thermodynamoc and Transport Properties of Individual Species / B. J. McBride, S. Gordon, M. A. Reno, 94 с.
81. McRight P. Confidence Testing of Shell 405 and S-405 Catalysts in a Monopropellant Hydrazine Thruster 2005.С. 3952.
82. Minaev S. S., Potytnyakov S. I., Babkin V. S. Combustion wave instability in the filtration combustion of gases // *Combustion, Explosion and Shock Waves*. 1994. № 3 (30). С. 306–310.
83. Moukalled F., Mangani L., Darwish M. The Finite Volume Method / F. Moukalled, L. Mangani, M. Darwish, Springer International Publishing, 2016.
84. Mujeebu M. A. [и др.]. A review of investigations on liquid fuel combustion in porous inert media // *Progress in Energy and Combustion Science*. 2009. № 2 (35). С. 216–230.
85. Naseem M. S. Hypergolic studies of ethanol based gelled Bi-Propellant system for propulsion application. // *Propellants Explos. Pyrotech*. 2017.
86. Nield D. A., Bejan A. Convection in Porous Media / D. A. Nield, A. Bejan, Springer, New York, NY-е изд., New York:, 2006.
87. Novikov S. S., Ryazantsev Yu. S. On the theory of stationary propagation velocity of the front of an exothermic reaction in a condensed medium // *Applied Mechanics and Technical Physics*. 1965. № 3 (6). С. 43–48.
88. Patankar S. V., Spalding D. B. A calculation procedure for heat, mass and momentum transfer in three-dimensional parabolic flows // *International Journal of Heat and Mass Transfer*. 1972. № 10 (15). С. 1787–1806.
89. Persson M. [и др.]. A family of thrusters for ADN-based monopropellant LMP-103S 2012.С. 3815.

90. Raviart P. A., Thomas J. A mixed finite element method for 2-nd order elliptic problems // *Lecture Notes in Mathematics*. 1977. (606). С. 292–315.
91. Reaple N. [и др.]. Modeling-aided coupling of catalysts, conditions, membranes, and reactors for efficient hydrogen production from ammonia // *Reaction Chemistry & Engineering*. 2023. № 5 (8). С. 989–1004.
92. Sackhiem R. L., Masse R. K. Green propulsion advancement: challenging the maturity of monopropellant hydrazine // *Journal of Propulsion and Power*. 2014. № 2 (30). С. 265–276.
93. Sam I. I. [и др.]. Exploring the possibilities of energetic ionic liquids as non-toxic hypergolic bipropellants in liquid rocket engines // *Journal of Molecular Liquids*. 2022. (350). С. 118–217.
94. Sanchez T. C. [и др.]. Development of an analytical model of hydrazine decomposition motors. 1975.
95. Sarazov A. V. [и др.]. Modeling Object Motion on Arbitrary Unstructured Grids Using an Invariant Principle of Computational 23 Domain Topology: Key Features // *Symmetry*. 2023. № 11 (15). С. 2081.
96. Schmitz B., Smith W. W. Development of design and scaling criteria for monopropellant hydrazine reactors employing shell 405 spontaneous catalyst / B. Schmitz, W. W. Smith, Final Rep. NASA, 1967.
97. Shi J. [и др.]. Pore-Level Study of Syngas Production From Fuel-Rich Partial Oxidation in a Simplified Two-Layer Burner // *Frontiers in Chemistry*. 2019. (7). С. 793.
98. Smucker M. T., Ellzey J. L. Computational and experimental study of a two-section porous burner. // *Combustion Science and Technology*. 2004. № 8 (176). С. 1171–1189.
99. Strogatz S. H. *Nonlinear dynamics and chaos: with applications to physics, biology, chemistry, and engineering.* / S. H. Strogatz, Chapman and Hall/RC, 2024.

100. Sutton G. P. History of Liquid Propellant Rocket Engines in the United States // Journal of Propulsion and Power. 2003. (6). С. 978–1007.
101. Sutton G. P., Biblarz O. Rocket propulsion elements / G. P. Sutton, O. Biblarz, John Wiley & Sons, 2011.
102. Trummala A. R., Dutta A. An overview of cube-satellite propulsion technologies and trends // Aerospace. 2017. № 4 (4).
103. Urrita J. L. [и др.]. Development of an analytical model of hydrazine decomposition motors.
104. Vafai K. Handbook of porous media / K. Vafai, Crc Press, 2015. 923 с.
105. Wakao N., Funazkri T. Effect of fluid dispersion coefficients on particle-to-fluid mass transfer coefficients in packed beds. Correlation of sherwood numbers // Chemical Engineering Science. 1978. № 10 (33). С. 1375–1384.
106. Wucherer E. J. Hydrazine Catalyst Production-Sustaining S-405 Technology 2003.С. 5079.
107. Zamaschikov V. V. Special regime of filtration combustion of gases // Doklady Physical Chemistry. 2009. (428).
108. Zaseck C. R., Son S. F., Pourpoint T. L. Combustion of micron-aluminum and hydrogen peroxide propellants // Combustion and Flame. 2013. № 1 (160).
109. Zhou X., Hitt D. L. Numerical modeling of monopropellant decomposition in a micro-catalyst bed 2005.С. 5033.
110. The Open Source CFD Toolbox: version 5.0 // OpenFOAM Foundation. OpenFOAM [Электронный ресурс]. URL: <https://openfoam.org>.