

На правах рукописи



Цырендоржиев Эрдэни Сергеевич

**МОДЕЛИРОВАНИЕ РАБОЧИХ ПРОЦЕССОВ В КАМЕРЕ СГОРАНИЯ
ТЕРМОКАТАЛИТИЧЕСКИХ ЖИДКОСТНЫХ РАКЕТНЫХ
ДВИГАТЕЛЕЙ МАЛОЙ ТЯГИ**

Специальность: 1.1.9

«Механика жидкости, газа и плазмы»

Автореферат диссертации на соискание ученой степени кандидата
физико-математических наук

Москва – 2025

Работа выполнена в отделении 2 акционерного общества «Государственный научный центр Российской Федерации «Исследовательский центр имени М.В. Келдыша»

Научный руководитель: **Лаптев Игорь Вячеславович**
кандидат физико-математических наук, начальник отдела 40 акционерного общества «Государственный научный центр Российской Федерации «Исследовательский центр имени М.В. Келдыша»

Официальные оппоненты: **Козелков Андрей Сергеевич**
доктор физико-математических наук, начальник научно-исследовательского отдела - главный конструктор по направлению ЛОГОС-Аэрогидро Федерального государственного унитарного предприятия «Российский федеральный ядерный центр – Всероссийский научно-исследовательский институт экспериментальной физики», доцент

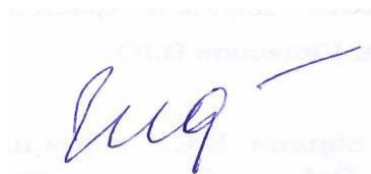
Харченко Николай Анатольевич
кандидат физико-математических наук, начальник лаборатории №1 Научно-исследовательского центра №43 федерального автономного учреждения «Центральный аэрогидродинамический институт имени профессора Н.Е. Жуковского» (ФАУ «ЦАГИ»)

Ведущая организация: Акционерное общество «НПО Энергомаш имени академика В.П. Глушко»

Защита диссертации состоится «26» декабря 2025 года в 10 ч. 00 мин. на заседании диссертационного совета 24.2.327.08 в федеральном государственном бюджетном образовательном учреждении высшего образования «Московский авиационный институт (национальный исследовательский университет)» (МАИ) по адресу: 125993, г. Москва, Волоколамское шоссе, д. 4.

Автореферат разослан « ____ » _____ 2025 года

Ученый секретарь
Диссертационного совета 24.2.327.08,
Доктор физико-математических наук,
в.н.с.



Гидаспов В.Ю.

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Работа посвящена исследованию рабочих процессов в камере сгорания терموкаталитических жидкостных ракетных двигателей малой тяги.

Актуальность работы. Перспективы развития ракетно-космической техники предъявляют повышенные требования к терموкаталитическим 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.

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), что требует регулярного мониторинга состояния и потенциальной необходимости в замене каталитического пакета.

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

В данной работе изучаются процессы в камере сгорания терموкаталитического ЖРДМТ. Методами численного моделирования исследуется фильтрационное горение. Предлагаются аппроксимирующие зависимости, которые могут быть использованы при проектировании терموкаталитических ЖРДМТ. Строится модель теплового состояния терموкаталитического ЖРДМТ.

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

Предметом исследования данной работы является фильтрационное горение в камере сгорания термокаталитического ЖРДМТ.

Основные задачи

В рамках данной работы решаются следующие задачи:

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.

Научная новизна:

1. Получены фазовые портреты фронта максимальной температуры в камере сгорания термokatалитического жидкостного ракетного двигателя малой тяги для различных условий 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.

Практическая ценность результатов 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.

Положения, выносимые на защиту

1. Функциональные зависимости, устанавливающие связь финального положения 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.

Апробация результатов исследования:

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 по теме диссертационной работы и вклад автора:

Основные положения диссертационной работы отражены в 4 публикациях, в том числе в 4х из них из перечня ВАК по специальности 1.1.9.

Личный вклад соискателя в работы [1-4] заключался в разработке математических моделей и численных методов, их программной реализации, выполнении расчетов и анализе результатов, написании текста публикации. Соавторы выполняли постановку задачи, участвовали в формировании выводов, анализе имеющихся в открытой печати источников, а также в написании текста публикаций.

Структура и объём диссертации.

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

СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении диссертации обоснована актуальность исследований, направленных на использование явления фильтрационного горения для создания тяги в термokatалитических жидкостных ракетных двигателях малой тяги, применяемых для коррекции орбит и ориентации космических аппаратов. Показана целесообразность перехода от трудоёмких экспериментальных методов к численному моделированию процессов

каталитического разложения топлива в пористых структурах. Изложены цели и задачи работы, поставленные на основе обзора литературы, приведенного в Главе 1, показаны научная новизна и практическая значимость результатов, полученных в данной работе.

В первой главе приведен **обзор литературы** по существующим экспериментальным и численным исследованиям фильтрационного горения, методам математического моделирования фильтрационного горения, исследованиям процесса фильтрационного горения, численным алгоритмам для расчета течений и теплообмена при разложении топлива в пористых средах.

Вторая глава посвящена постановке рассматриваемой в работе задачи о фильтрационном горении в камере сгорания термокаталитического ЖРДМТ, описанию физико-математической модели и численных методов для решения полученных систем дифференциальных уравнений.

Модель фильтрационного горения рассматривалась как совокупность нескольких процессов, в так называемом репрезентативном элементарном объеме, представляющем из себя метод усреднения по объему, в который входят: твёрдая фаза, межпоровый газ и поверхностный газ.

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.

Под межпоровым газом в рамках рассматриваемой модели понималась движущуюся часть рабочего тела, заполняющая 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.

Поверхностный газ - часть рабочего тела, которая непосредственно взаимодействующая 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.

Схематическое представление основных процессов тепло- и массообмена приведено на рисунке 1. 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.

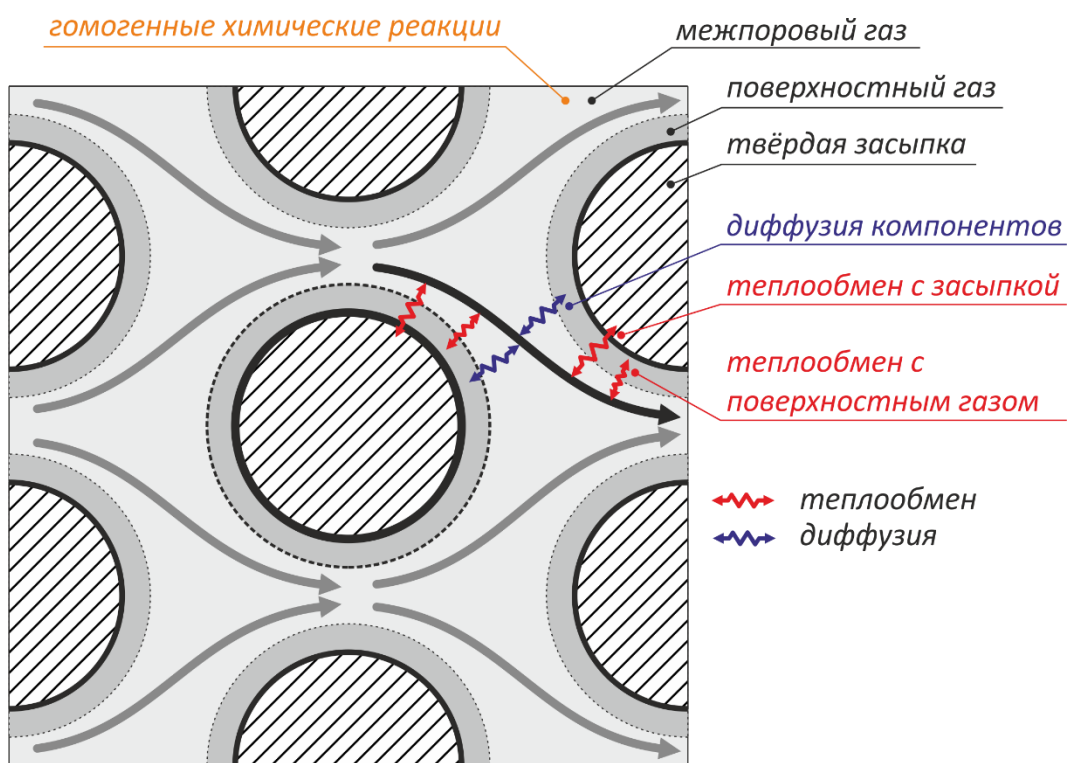


Рисунок 1 – Процессы в репрезентативном элементарном объеме

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

$$\frac{c_p(T)}{R} = a_1 + a_2T + a_3T^2 + a_4T^3 + a_5T^4$$

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

$$\frac{S(T)}{R} = a_1 \ln T + a_2T + \frac{a_3}{2}T^2 + \frac{a_4}{3}T^3 + \frac{a_5}{4}T^4 + a_7$$

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, задается постоянное значение давления; на стенке задается условие непроницаемости и адиабатичности.

Далее в работе рассмотрены численные методы для решения уравнений модели. Аппроксимация уравнений проводилась методом контрольных объемов. Для аппроксимации временных производных использовалась схема Эйлера, для конвективных членов TVD-схема с ограничителем van Leer, для диффузионных членов центральные разности (Gauss linear). Решение

полученной системы алгебраических уравнений осуществляется с помощью итерационного алгоритма PIMPLE.

Проведено тестирование модели путем сравнения с данными работы Kesten изучению фильтрационного горения термokatалитического ЖРДМТ при различных режимах работы двигателя. Получена сеточная сходимость и хорошее совпадение при стационарном режиме работы двигателя.

В третьей главе представлены результаты исследования фильтрационного горения.

В разделе 3.1 представлена постановка численного эксперимента и схема проведения численных экспериментов. Рассматривается осесимметричная задача о нестационарном фильтрационном горении жидкого монотоплива в камере сгорания термokatалитического жидкостного ракетного двигателя малой тяги с адиабатическими стенками. Расчетная область, изображенная на рисунке 2, представляет собой цилиндрическую область длиной $L = 90$ мм и диаметром $D = 60$ мм, заполненную сферическими частицами.

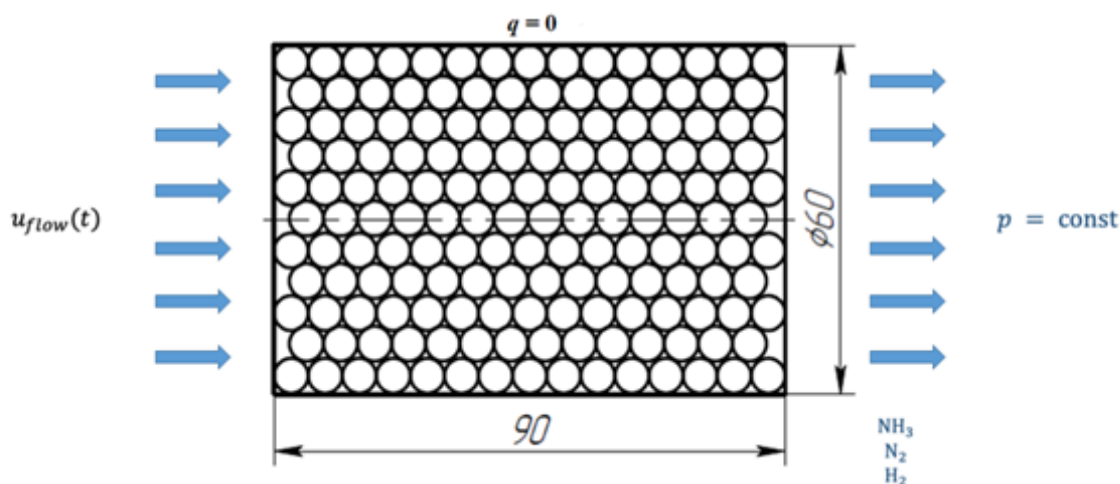


Рисунок 2 Схема расчетной области

В разделе 3.2 представлено параметрическое исследование влияния различных параметров, характеризующих режим работы двигателя, на положение фронта максимальной температуры и тепловое состояние каталитического пакета. В качестве варьируемых параметров был выбран

следующий набор: начальная температура каталитического пакета, скорость подачи топлива в камеру сгорания, пористость каталитического пакета и циклограмма подачи топлива в камеру сгорания, данные параметры были обезразмерены для повышения наглядности и удобства интерпретации результатов численных экспериментов.

Перед проведением параметрического исследования представлена методика анализа динамика фронта. 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 x – скорость изменения его положения \dot{x} ». Пример фазового портрета, полученного в ходе численного эксперимента, представлен на рисунке 3. На фазовом портрете видно, что при достижении определенного значения скорости фронт начинается смещаться к выходному сечению.

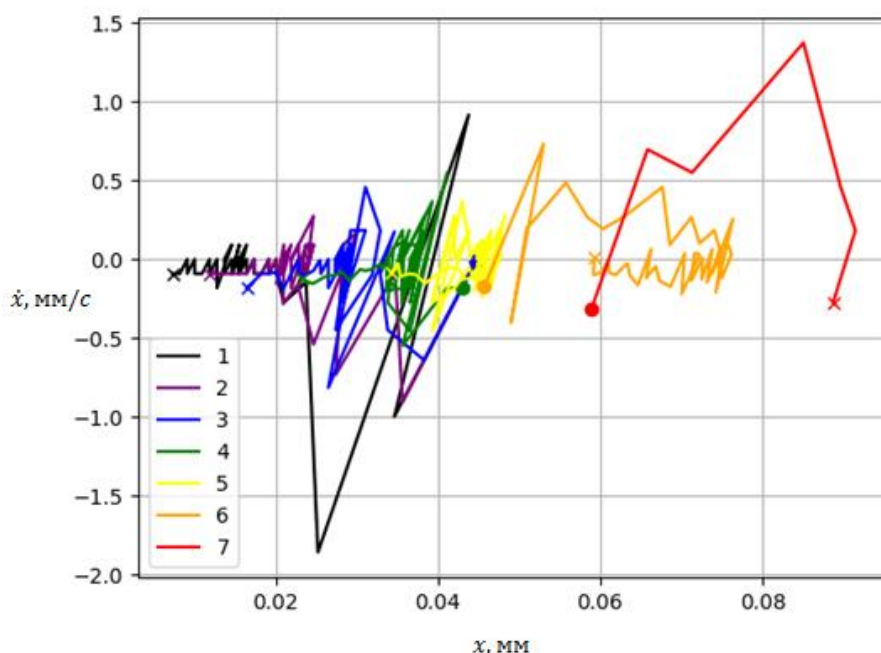


Рисунок 3 Фазовые портреты фронтов при различных скоростях подачи топлива в камеру сгорания (1...7 м/с)

Результаты численных экспериментов были обобщены в виде критериальных зависимостей и карт финальных положений фронта.

Ниже, на рисунке 4 приведен пример карты положений фронта для засыпки с пористостью $\varepsilon = 0,4$.

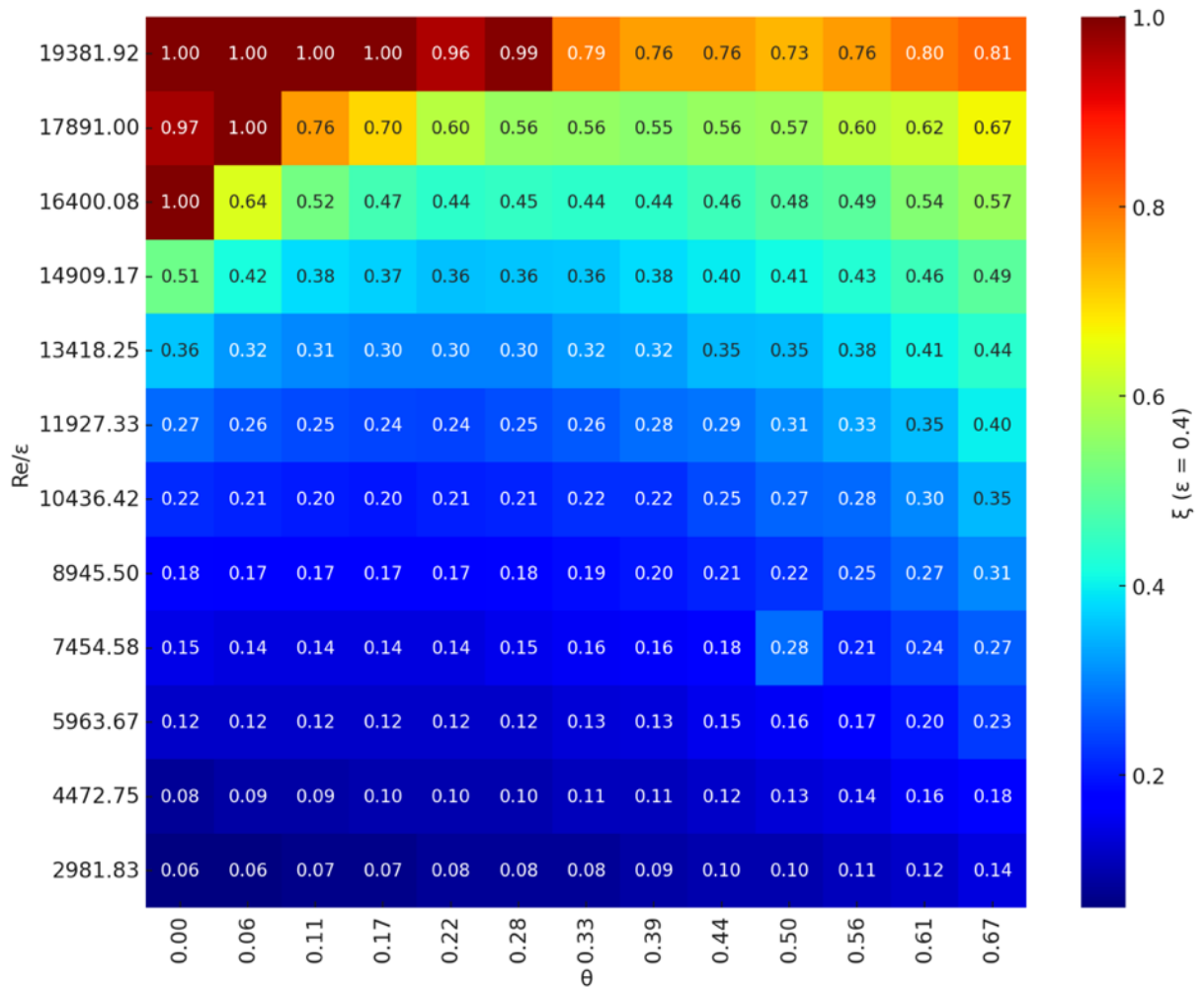


Рисунок 4 Карта устойчивых положений фронтов ($\varepsilon = 0,4$)

Изображенная на рисунке 4 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.

Данные с карты можно представить 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:

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

Для более корректной интерпретации модели применена z-нормализация, позволяющая более корректно оценить вклад каждой компоненты в итоговый результат. По итогу регрессионная модель приняла следующий вид:

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

где стандартизованные переменные выражаются через исходные параметры следующим образом:

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

Для анализа влияния пористости была построена карта разностей положения фронта для каталитических пакетов с пористостями $\varepsilon = 0,4$ и $\varepsilon = 0,5$. Из карты, представленной на рисунке 5 видно, что изменение пористости обладает выраженным нелинейным характером, особенно проявляясь в зонах с высокими скоростями подачи топлива. Также видно, что 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. 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.

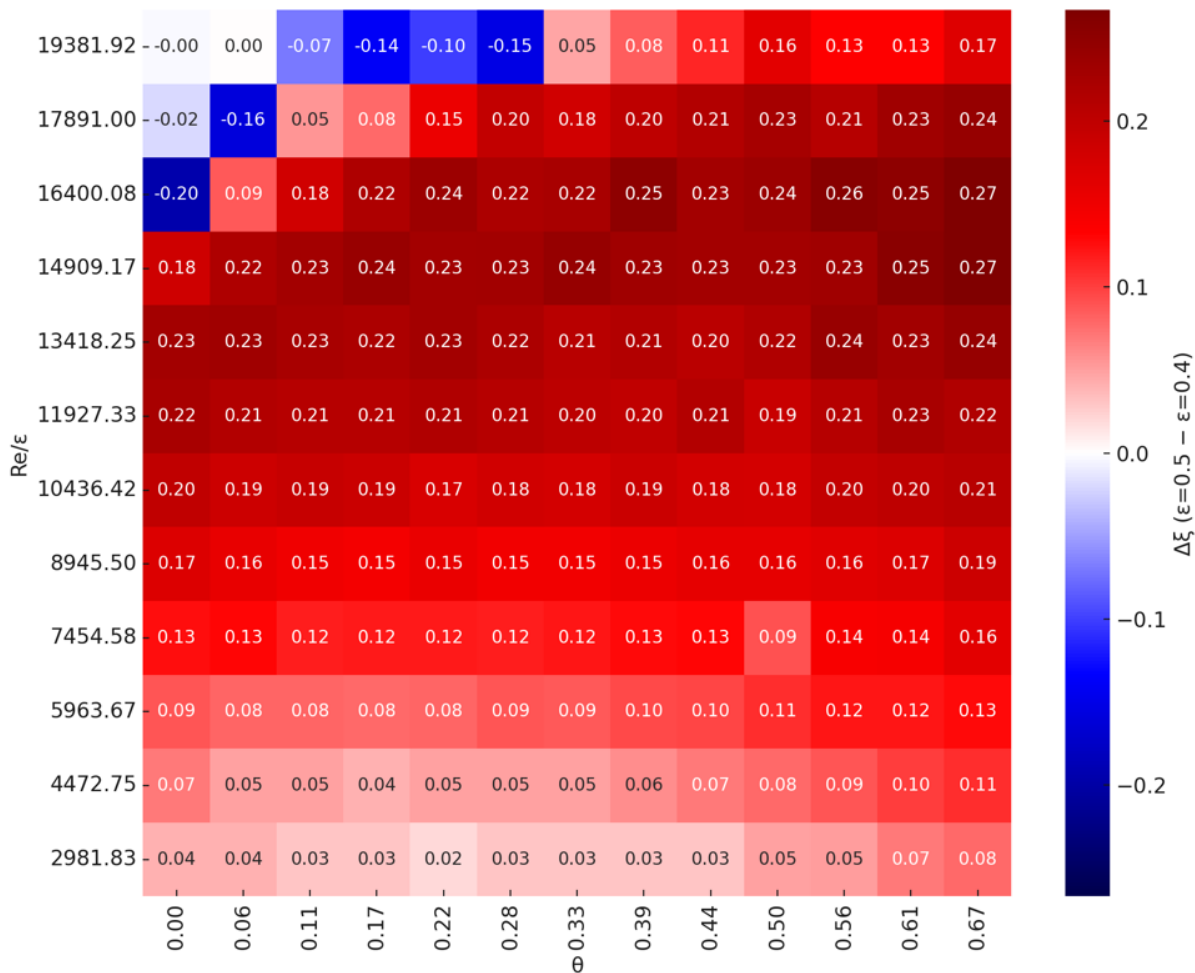


Рисунок 5 Карта разностей положений фронтов

между двумя случаями $\varepsilon = 0,4$ и $\varepsilon = 0,5$

Далее в разделе рассмотрено влияние частоты подачи топлива в камеру сгорания на положение фронта.

Был представлен график зависимости положения фронта в конечный момент времени от частоты для каталитических пакетов с пористостью $\varepsilon = 0,4$ и $\varepsilon = 0,5$. На рисунке 6 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.

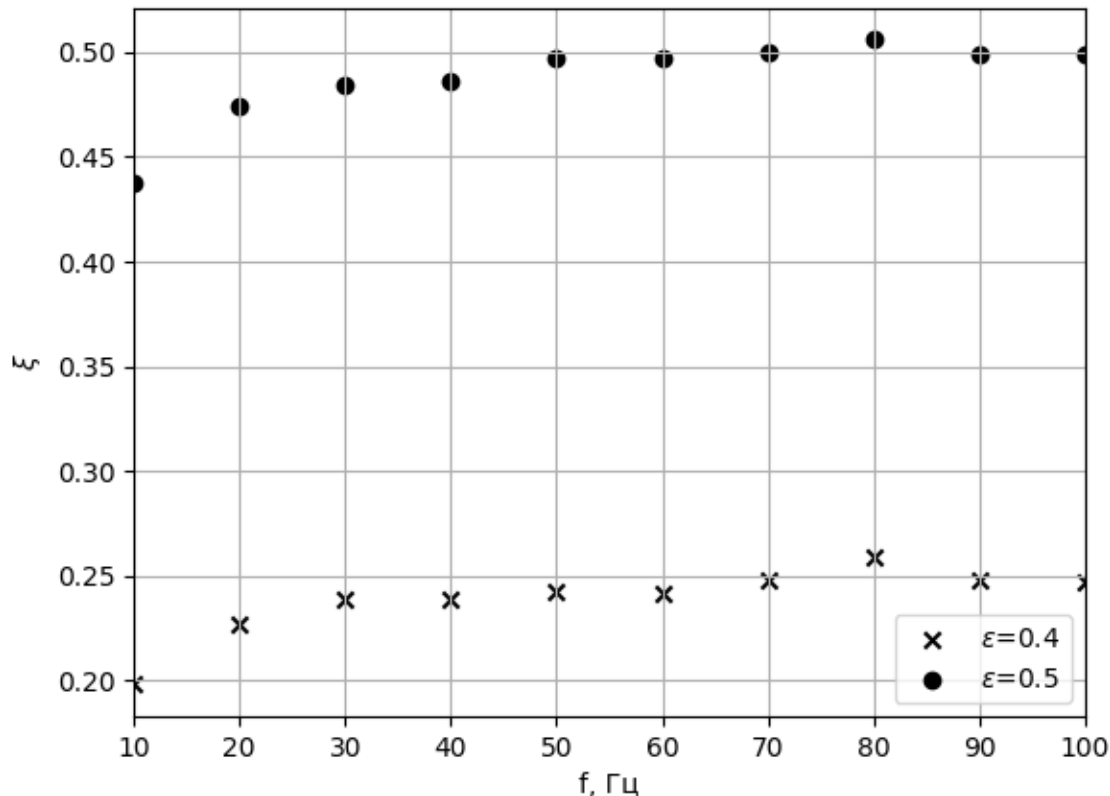


Рисунок 6 Зависимость положения фронта от частоты подачи топлива

Данное поведение отражено в критериальной зависимости безразмерного положения фронта от чисел Рейнольдса и Уомерсли. 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 анализа влияния варьируемых параметров на тепловое состояние каталитического пакета был введен безразмерный параметр $\varphi = \frac{Q-Q_0}{Q_0}$, характеризующий количество накопленной внутренней энергии. 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 7). Из графика видно, что с увеличением начальной температуры скорость роста внутренней энергии снижается, постепенно достигая предельного значения, определяемого адиабатической температурой разложения компонентов топлива.

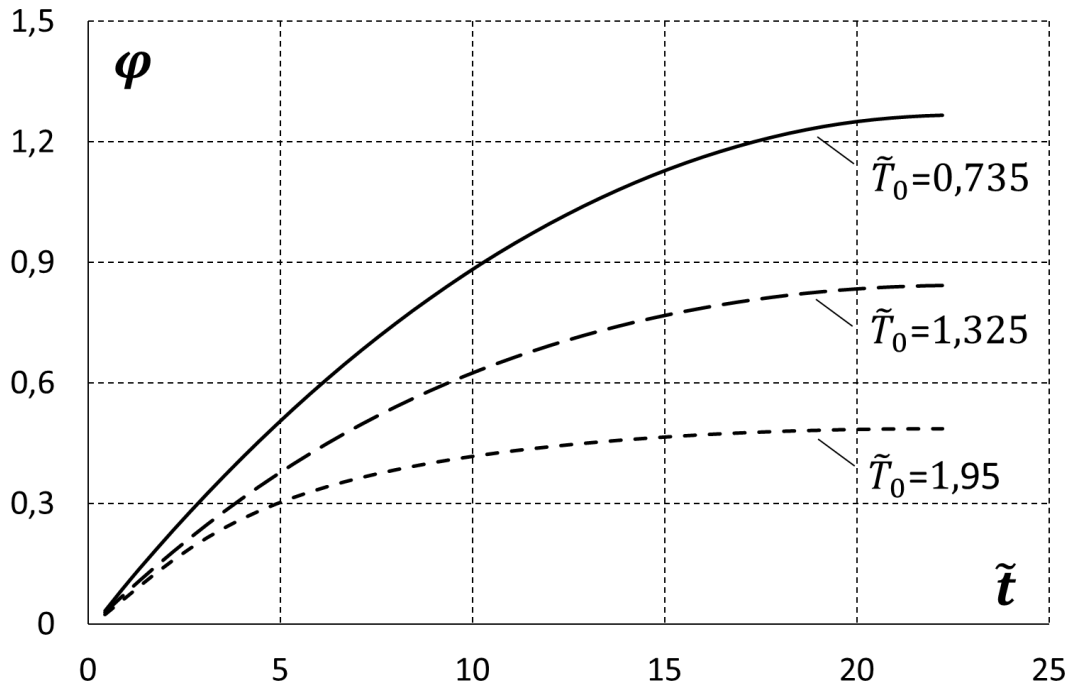


Рисунок 7 Изменение значения относительной внутренней энергии каталитического пакета для различных значений начальной температуры каталитического пакета $\tilde{T}_0 = T_{init}/T_0$ ($T_0=400$ К)

Во второй серии численных экспериментов (рисунок 8) показано, что повышение скорости подачи топлива увеличивает суммарное тепловыделение и теплопередачу в пористую среду, однако рост аккумулированной энергии в каталитическом пакете носит нелинейный, ограниченный характер. Выявлено существование критического массового расхода, при превышении которого дополнительное тепло не успевает поглощаться пористой структурой заданной геометрии: усиливающийся конвективный теплообмен выносит всё большую долю выделившейся энергии из камеры, снижая эффективность её накопления в засыпке.

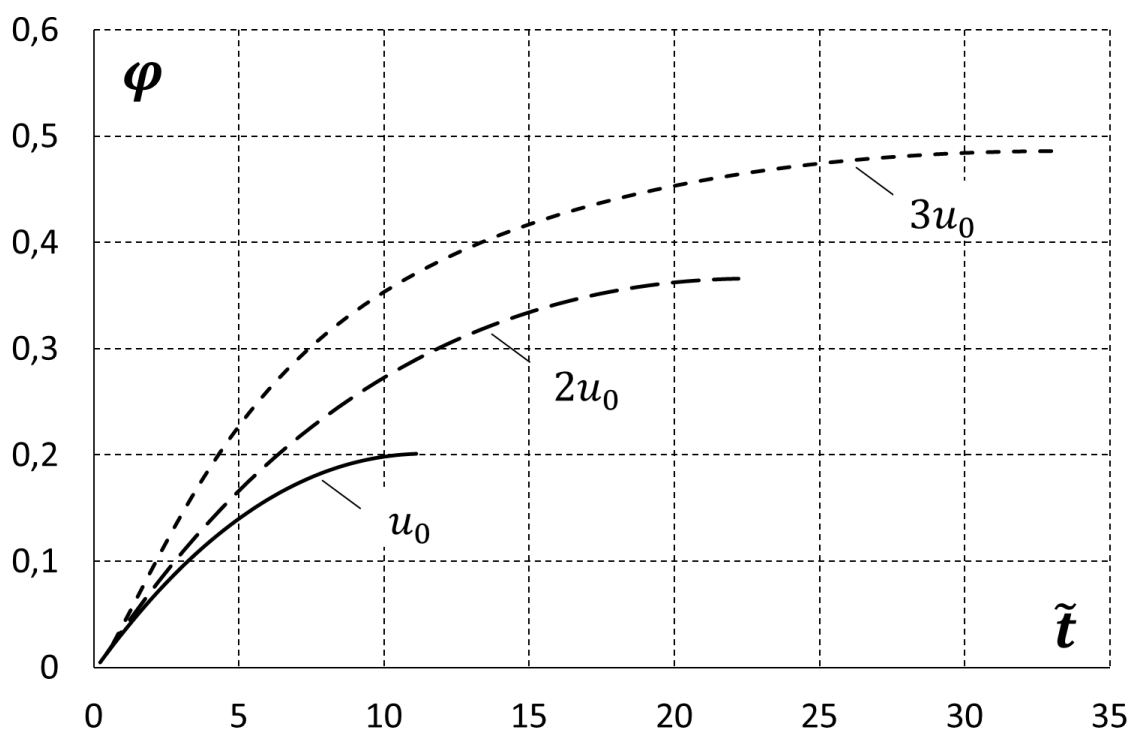


Рисунок 8 Эволюция относительной внутренней энергии при различной скорости подачи топлива u_0

В третьей серии численных экспериментов (рисунок 9) исследовано влияние пористости ε каталитической засыпки на тепловое состояние пакета. Показано, что варьирование ε приводит к конкуренции двух эффектов: изменение эффективной удельной поверхности контакта топлива с катализатором, определяющей интенсивность тепловыделения, и изменение объёма твёрдой фазы, аккумулирующей тепло $V_c = (1 - \varepsilon)V_{\text{total}}$. В результате численно установлено существование оптимального диапазона пористости ε^* , при котором достигается максимум накопленной в пористой структуре энергии; при переходе от малых к большим ε система проходит через указанное предельное («оптимальное») состояние.

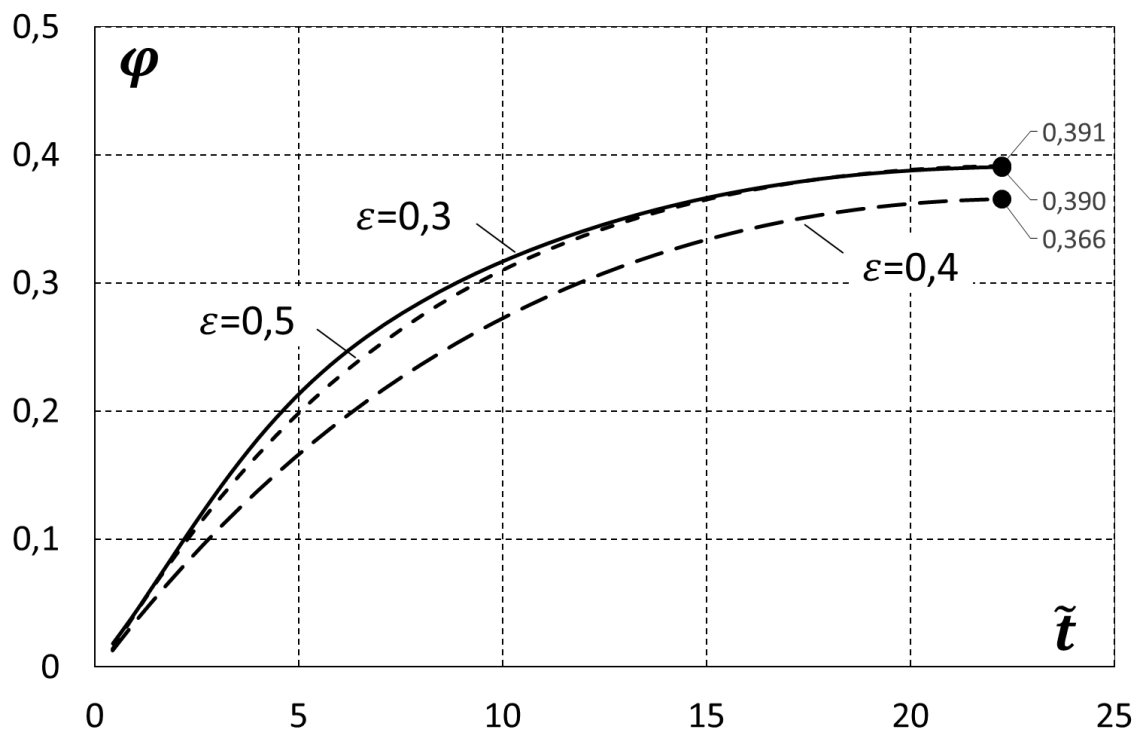
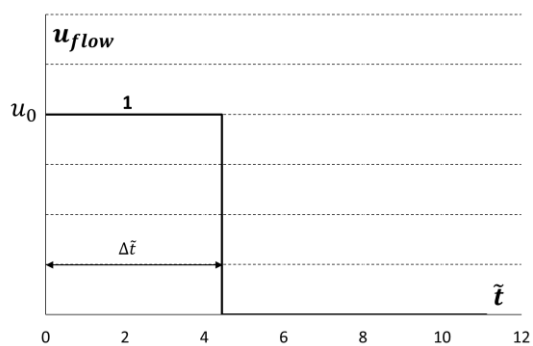
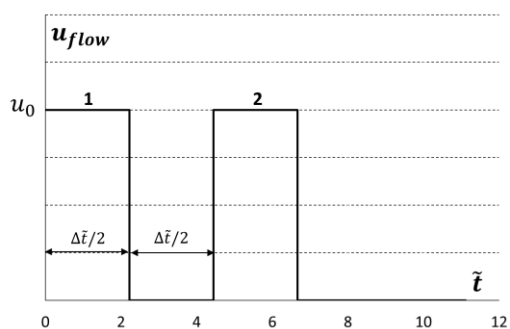


Рисунок 9 Эволюция относительной внутренней энергии при различной пористости засыпки ε

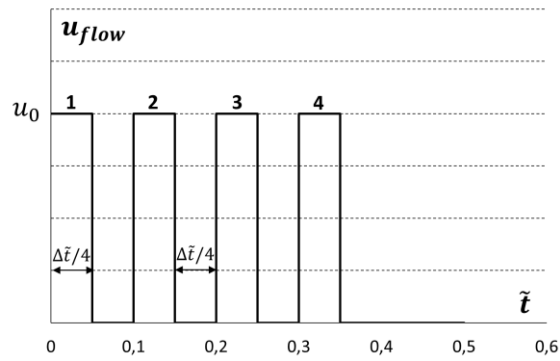
В рамках оценки влияния импульсного режима подачи топлива рассмотрены несколько циклограмм при неизменной суммарной массе, отличающиеся числом импульсов (рисунок 10).



a)



б)



в)

Рисунок 10 Циклограммы подачи топлива ($u_0=2$ м/с, $\Delta\tilde{t}=4,44$),

а – циклограмма №1, б – циклограмма №2, в – циклограмма №3.

Результаты численного эксперимента (рисунок 11) показали существенный рост тепловой нагрузки на пористую засыпку при импульсной работе по сравнению с эквивалентной по массе непрерывной подачей. Увеличение дискретности впрыска сопровождается неполным теплоотводом в паузы между подачей топлива и накоплением энергии в твёрдой фазе, что приводит к повышенным максимальным температурам и ускоряет деградацию каталитического пакета. Следовательно, применение импульсных режимов должно быть нормировано по параметрам циклограммы и времени работы во избежание перегрева и снижения ресурса.

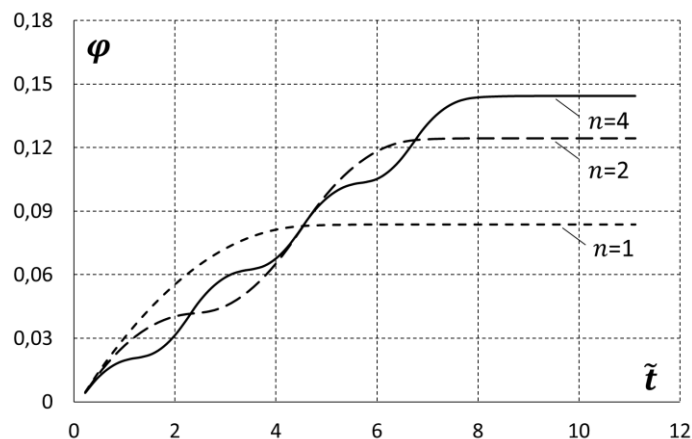


Рисунок 11 Эволюция относительной внутренней энергии при различных циклограммы подачи топлива (n – количество импульсов)

В главе 4 выполнено численное исследование теплового состояния термokatалитического ЖРД малой тяги на основе 3D-модели конструкции с учётом сопряжённого теплообмена твёрдых элементов, фильтрационного горения и теплообмена в трубопроводах и сопле. Геометрия и расчётная сетка сформированы в «ЛОГОС», расчёт теплопроводности реализован методом конечных объёмов, а течения в трубопроводах заменены квазиодномерной кондуктивно-конвективной моделью с неявной схемой и аппроксимацией Самарского.

В Заключении сформулированы следующие наиболее важные результаты работы:

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 термokatалитического ЖРДМТ, позволяющая проводить численное исследование процессов теплообмена в камере сгорания и оптимизировать ее конструктивные параметры.

ПУБЛИКАЦИИ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ:

1. Козаев А. Ш., Миронов В. В., Неодяев 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 тепломассопереноса термokatалитического жидкостного ракетного двигателя малой тяги // Труды МАИ. 2024, №138.
3. Цырендоржиев Э. С. Численное моделирование фильтрационного горения в камере сгорания термokatалитического ЖРДМТ на монотопливе// Математическое моделирование и численные методы, 2025, №2, С.130-144.
4. Цырендоржиев Э. С. Исследование влияния режимов работы и конструкции термokatалитического жидкостного ракетного двигателя малой тяги на тепловое состояние во время работы // Тепловые процессы в технике, 2025, Т. 17, №5, С. 225-234.