

УТВЕРЖДАЮ

Генеральный директор
АО «НПО Энергомаш»



И.В. Краснов

03.12 2025 г.

ОТЗЫВ

ведущей организации

на диссертационную работу

Цырендоржиева Эрдэни Сергеевича

«Моделирование рабочих процессов в камере сгорания термokatалитических жидкостных ракетных двигателей»,

представленную на соискание ученой степени кандидата технических наук
по специальности 1.1.9 «Механика жидкости, газа и плазмы»

Актуальность темы диссертационной работы

Среди жидкостных ракетных двигателей малой тяги (ЖРДМТ) двигатели, в которых для создания тяги используется высокотемпературный газ, полученный в результате каталитического разложения топлива, занимают особое место. Простота, а следовательно, надежность конструкции, стабильность рабочего процесса, длительная работоспособность – все эти показатели двигателей такого типа обеспечивают эффективное выполнение маневров разгонных блоков при ориентации космических аппаратов на околоземной орбите.

Однако, при длительной паузе в работе термokatалитических ЖРДМТ в условиях космического пространства происходит накопление тепла из-за каталитического разложения топлива и ограниченного теплоотвода. Другим негативным фактором является накопление примесей, снижающих каталитическую активность. Экспериментальное исследование этих особенностей в ряде случаев затруднено, в частности, из-за оптической непроницаемости среды катализатора и высоких температур продуктов горения.

Таким образом, актуальность темы диссертационной работы, связанная с математическим моделированием процесса каталитического разложения топлива, учитывающее сложный тепломассообмен в пористой структуре катализатора, не вызывает сомнения.

ОТДЕЛ КОРРЕСПОНДЕНЦИИ
И КОНТРОЛЯ ИСПОЛНЕНИЯ
ДОКУМЕНТОВ МАИ

«9» 12 2025.

Научная новизна и практическая значимость работы

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 разложения топлива в зависимости от числа Рейнольдса и начальной температуры каталитического пакета.

3 Получены аппроксимирующие зависимости, описывающие связь между массовым расходом, циклограммой подачи топлива, начальной температурой каталитического пакета, а также конструктивными характеристиками и финальным положением фронта разложения топлива.

Практическая ценность результатов работы определяется возможностью создания тепловых и динамических моделей двигательных установок, оценки надежности катализатора, подбора параметров каталитических пакетов, а также прогнозирования поведения фронта разложения топлива на различных режимах работы двигателя. Всё это позволит повысить уровень надежности и оптимизировать разрабатываемые изделия, уменьшить объем натурных испытаний и ускорить цикл разработки новых систем.

Достоверность результатов и обоснованность научных положений определяется учетом при моделировании процессов в камере сгорания термokatалитического ЖРД фундаментальных законов механики сплошной среды, а также сходимостью результатов расчетов и экспериментов.

Общие сведения о диссертационной работе

Основные результаты диссертации представлены в 4-х статьях в журналах, включенных в список ВАК, и 5-ти публикациях в трудах конференций.

Диссертационная работа состоит из введения, четырех глав, заключения, содержит – 118 машинописных листов, включающих 34 рисунков, 4 таблиц и список используемой литературы из 110 наименований.

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. обосновывается актуальность работы, сформулированы цели и задачи диссертационной работы. содержит – 118 машинописных листов, включающих 34 рисунков, 4 таблиц и список используемой литературы из 110 наименований.

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 задачи фильтрационного горения в камере сгорания термokatалитического ЖРДМТ, описанию физико-математической модели и численных методов для решения полученных систем дифференциальных уравнений.

Модель фильтрационного горения рассматривается как совокупность нескольких процессов, в так называемом, репрезентативном элементарном объеме, в который входят: твёрдая фаза, межпоровый газ и поверхностный газ.

Данный усредненный 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, 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. В качестве граничных условий заданы: скорость подачи газа вдоль оси реактора, состав подаваемого топлива, температура входящего потока; в выходном сечении (в конце пористой засыпки)

«мягкие» граничные условия для основных параметров; на стенке - условие непроницаемости и адиабатичности.

Рассмотрены численные методы решения системы уравнений математической модели. Аппроксимация уравнений проведена методом контрольных объемов. Для аппроксимации производных по времени 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, приведенными в работе Kesten по изучению фильтрационного горения термokatалитического ЖРДМТ при различных режимах работы двигателя. Получена сеточная сходимость и, по утверждению автора работы, хорошее совпадение на 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 нестационарного фильтрационного горения жидкого монотоплива в камере сгорания термokatалитического жидкостного ракетного двигателя малой тяги с адиабатическими стенками.

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

Результаты численных экспериментов обобщены в виде критериальных зависимостей и карт финальных положений фронта разложения, на одной из которых виден недиагональный характер распределения финальных положений фронта. Такое распределение явно свидетельствует о наличии нелинейных эффектов и взаимодействии между безразмерными характеристиками течения и теплообмена.

Для анализа влияния пористости построена карта разностей положения фронта, на которой видно, что изменение пористости обладает выраженным нелинейным характером, который особенно проявляется в зонах с высокими скоростями подачи топлива. Кроме того, в зонах повышенных скоростей подачи топлива 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.

Рассмотрено влияние на положение фронта частоты подачи топлива в камеру сгорания. Показано, что при импульсном режиме и при небольшой скорости подачи можно добиться смещения фронта вправо.

Для анализа влияния варьируемых параметров на тепловое состояние каталитического пакета введен безразмерный параметр, характеризующий количество накопленной внутренней энергии. В серии расчётных экспериментов варьировалась начальная температура пористой засыпки. Показано, что с увеличением начальной температуры, скорость роста внутренней энергии снижается, постепенно достигая предельного значения, определяемого адиабатической температурой разложения компонентов топлива. Также 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.

В численных экспериментах установлено существование оптимального диапазона пористости, при котором достигается максимум накопленной в пористой структуре энергии, а применение импульсных режимов должно быть нормировано по параметрам циклограммы и времени работы во избежание перегрева и снижения ресурса.

В главе 4 выполнено численное исследование теплового состояния термокatalитического ЖРДМТ 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 Заключение сформулированы наиболее важные, по мнению автора, результаты работы.

Рекомендации по использованию диссертации

Результаты работы могут быть применены при моделировании рабочих процессов проектировании и испытаниях термокatalитических жидкостных ракетных двигателей малой тяги для разгонных блоков, а также для систем ориентации космических аппаратов.

Замечания по содержанию диссертации

По содержанию диссертации можно сделать следующие замечания:

1. В разделах «Научная новизна» и «Положения, выносимые на защиту» упоминается методика численного моделирования. Однако в тексте диссертации такие методики отсутствуют. Представлены только постановка различных исследовательских задач, схем и методов численного эксперимента.
2. Оценка минимальной и максимальной оценки моделирования (валидация решателя) производится по экспериментальным данным Кестена А.С., но не указывается с какой погрешностью определены эти данные.

Заключение о соответствии диссертационной работы критериям, установленным в Положении о присуждении ученых степеней

Диссертация Цырендоржиева Эрдэни Сергеевича является законченной и самостоятельно выполненной научно-квалификационной работой, включающей в себя совокупность новых научных результатов, полученных при исследовании процесса фильтрационного горения в камере термokatалитического жидкостного двигателя малой тяги. Цель работы достигнута. Диссертация написана технически грамотным языком, содержит логически стройный материал. Автореферат и публикации автора достаточно полно отражают основные выводы и результаты работы. Диссертация соответствует всем требованиям Положения о порядке присуждения ученых степеней, предъявляемым к кандидатским диссертациям, утвержденного Постановлением Правительства Российской Федерации от 24 сентября 2013 года № 842, а её автор, Цырендоржиев Эрдэни Сергеевич, заслуживает присуждения ему ученой степени кандидата физико-математических наук по специальности 1.1.9. «Механика жидкости, газа и плазмы».

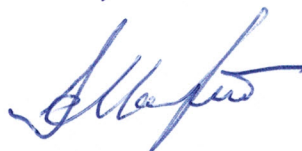
Диссертационная работа Цырендоржиева Эрдэни Сергеевича и отзыв рассмотрены и одобрены на заседании НТС АО «НПО Энергомаш» (протокол № 07-2025 от 01.12.2025 г.).

Главный специалист,
кандидат техн. наук



В.Д. Гапонов

Главный специалист,
доктор техн. наук



Д.С. Мартыросов

Акционерное общество «Научно-производственное объединение «Энергомаш им. Академika В.П. Глушко», Химки, ул. Бурденко.
Телефон: +7 (495)-286-91-13, эл. почта: energo@nporem.ru

С отзывом согласован 03.12.2025 г. / Э.С. Цырендоржиев