

ТОМСКИЙ  
ПОЛИТЕХНИЧЕСКИЙ  
УНИВЕРСИТЕТ



На правах рукописи

*Паушк*

Паушкина Кристина Константиновна

**ВОСПЛАМЕНЕНИЕ И ГОРЕНИЕ  
ЧАСТИЦ ГЕЛЕОБРАЗНЫХ ТОПЛИВ  
В УСЛОВИЯХ ДИСПЕРГИРОВАНИЯ**

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание ученой степени  
кандидата физико-математических наук

1.3.17 – Химическая физика, горение и взрыв,  
физика экстремальных состояний вещества

Томск – 2025

Работа выполнена в Федеральном государственном автономном образовательном учреждении высшего образования «Национальный исследовательский Томский политехнический университет».

**Научный руководитель:**

**Глушков Дмитрий Олегович**

доктор технических наук, доцент, ФГАОУ ВО «Национальный исследовательский Томский политехнический университет», Исследовательская школа физики высокоэнергетических процессов, профессор

**Официальные оппоненты:**

**Смирнов Николай Николаевич**

доктор физико-математических наук, профессор, ФГБОУ ВО «Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова», кафедра газовой и волновой динамики Механико-математического факультета, профессор

**Якуш Сергей Евгеньевич**

член-корреспондент Российской академии наук, доктор физико-математических наук, ФГБУН Институт проблем механики имени А.Ю. Ишлинского Российской академии наук, директор

Защита состоится 19 декабря 2025 года в 14:00 часов на заседании диссертационного совета ДС.ТПУ.06 Национального исследовательского Томского политехнического университета по адресу: 634050, Россия, г. Томск, ул. Усова, д. 7, уч. корпус 8, ауд. 323.



С диссертацией можно ознакомиться в научно-технической библиотеке Томского политехнического университета и на сайте [dis.tpu.ru](http://dis.tpu.ru) при помощи QR-кода.

Автореферат разослан \_\_\_\_ октября 2025 года.

Ученый секретарь  
диссертационного совета ДС.ТПУ.06  
доктор технических наук, доцент

A handwritten signature in blue ink, consisting of stylized Cyrillic letters, likely representing the name of the scientific secretary.

Глушков Дмитрий Олегович

## ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

**Актуальность.** В условиях развития технологий и повышения требований к энергетической безопасности, устойчивости и экологичности актуальной задачей является создание новых видов топлива, в том числе применяемых в экстремальных климатических и эксплуатационных условиях. Перспективные гелеобразные топлива сочетают аспекты безопасности хранения и транспортировки, адаптивности компонентного состава под конкретные условия эксплуатации, а также такие топлива характеризуются относительно высокими энергетическими показателями. Их применение актуально как для автономных энергоустановок Крайнего Севера, так и для объектов авиакосмической отрасли. Несмотря на растущий интерес к гелеобразным топливам, до настоящего времени отсутствует теория, описывающая процессы их воспламенения и горения, особенно в условиях диспергирования, что значительно ограничивает возможности их практического применения. Поэтому актуальность диссертационной работы заключается во всестороннем изучении процессов зажигания и горения типичных гелеобразных топлив в условиях диспергирования капель расплавов при варьировании значимых факторов в широких диапазонах.

В настоящее время по тематике гелеобразных топлив можно выделить следующие основные направления исследований: описание механизмов загущения горючих жидкостей и структурных особенностей полученных топливных составов; установление характеристик псевдопластичного и тиксотропного поведения гелеобразных топлив в контексте хранения, транспортировки и распыления; изучение режимов и параметров распыления; исследование механизмов и характеристик воспламенения, в том числе самовоспламенения, и горения гелеобразных топлив на основе органических и неорганических загустителей; математическое и кинетическое моделирование, вопросы масштабирования технологии для практической реализации. В научной литературе тематика гелеобразных топлив упоминалась еще в 1930-х годах, но заметное развитие перечисленных выше направлений исследований началось не более 20 лет назад. Основное внимание в опубликованных работах уделено анализу свойств приготавливаемых топливных составов по различным рецептурам, а также экспериментальному исследованию характеристик транспортировки и распыления загущенных горючих жидкостей. Процессы воспламенения и горения таких топлив остаются менее изученными.

Наиболее значимые результаты в рамках тематики гелеобразных топлив получены известными специалистами: Solomon Y., Natan B., Patyal A., Mishra D.P., Padhwal M., Nachmoni G., Kunin A., Greenberg J.B., Cohen Y., He B., Nie W., He H., Gupta B.L., Varma M., Jyoti B.V.S., Naseem M.S., Baek S.W., Palaszewski B., Манжай В.Н., Фуфаева М.С., Бабук В.А., Глушков Д.О., Кузнецов Г.В., Стрижак П.А., Нигай А.Г., Гайдукова (Яшутина) О.С.

Наряду с экспериментальными исследованиями также проводится математическое моделирование перечисленных выше процессов. Как правило, типичные модели процесса зажигания капель гелеобразного топлива описывают два или три этапа: прогрев гетерогенной структуры, разрыв внешнего слоя загустителя и вдув горючих паров в высокотемпературную окружающую среду газообразного окислителя. Однако большинство математических моделей разработано с существенными допущениями, снижающими достоверность результатов численного моделирования характеристик физико-химических процессов. Как правило, при допущениях не принимают во внимание реально протекающие процессы, оказывающие влияние на искомые характеристики: прогрев частицы топлива, изменение

теплофизических свойств компонентов, теплопередачу в объеме гелеобразного топлива (в капле расплава), формирование центров нуклеации.

Также недостаточно полно исследованы процессы гетерогенной нуклеации, предшествующей диспергированию капли расплава топлива, и движения его фрагментов после разрыва оболочки загустителя. Отдельные публикации посвящены воспламенению в среде окислителя и даже отмечены эффекты частичного или полного диспергирования, но системный подход к комплексному исследованию процесса горения гелеобразных топлив не реализован.

**Цель диссертационной работы** – установление по результатам экспериментальных и теоретических исследований закономерностей и характеристик физико-химических процессов при зажигании и горении частиц гелеобразных топлив, в том числе структурно-неоднородных, в условиях диспергирования.

Для достижения цели диссертационной работы решались **задачи**:

1. Разработка экспериментальных подходов для исследования группы взаимосвязанных физико-химических процессов в условиях диспергирования частиц (капель расплавов) гелеобразных топлив с использованием методик высокоскоростной видеорегистрации, малоинерционных контактных и бесконтактных методов измерения температуры, а также методов термогравиметрии.

2. Установление основных характеристик процессов горения и диспергирования частиц (капель расплавов) гелеобразных топлив, в том числе структурно-неоднородных, при варьировании значимых параметров (компонентный состав топлива, температура окружающей среды, концентрация окислителя).

3. Установление влияния компонентного состава гелеобразных топлив на закономерности и характеристики протекания процесса горения в условиях диспергирования капель расплавов.

4. Разработка физических и математических моделей взаимосвязанных физико-химических процессов, протекающих при зажигании и горении гелеобразных топлив, в том числе структурно-неоднородных.

5. Численное моделирование процессов зажигания и диспергирования частиц (капель расплавов) гелеобразных топлив для установления диапазонов значений основных характеристик зажигания при варьировании значимых параметров в широких диапазонах (температура окружающей среды, начальная температура и начальный размер частиц топлива).

**Научная новизна работы.** Впервые на основании результатов экспериментальных исследований и численного моделирования будут разработаны основные положения теории зажигания энергоресурсов в гелеобразном состоянии, представляющие основу для решения практических задач применительно к проектированию и разработке перспективных воспламенительных и топливных систем энергогенерирующих объектов и авиакосмической техники. Полученная база экспериментальных и теоретических характеристик, механизмы и закономерности протекания физико-химических процессов, разработанные аналитические подходы, апробированные оригинальные экспериментальные методики, отлаженные современные стенды и верифицированные модели представляют интерес для научных лабораторий, деятельность которых направлена на развитие фундаментальных положений современной теории горения, а также развитие топливной тематики в части создания новых эффективных энергоресурсов и способов их сжигания.

**Теоретическая значимость работы.** Получение новых знаний в области химической физики способствует не только развитию фундаментальной науки, но и разработке теоретических основ перспективных промышленных технологий.

Формирование новых направлений исследований в рамках теорий горения и тепломассопереноса требует разработки нового подхода к изучению механизмов и характеристик взаимосвязанных физико-химических процессов, протекающих при разных механизмах теплоподвода в условиях воспламенения гелеобразных топлив. Развитие нового фундаментального направления в области химической физики позволит решить группу актуальных задач: сформировать отечественный научный задел применительно к развитию перспективных топливных технологий в теплоэнергетической и авиакосмической отраслях; сформулировать рекомендации к компонентному составу энергоресурсов в гелеобразном состоянии, условиям теплоподвода для реализации эффекта диспергирования капель расплавов, направленного на повышение эффективности и полноты выгорания компонентов топлива; создать прогностический аппарат в рамках механики сплошной среды и теории химической кинетики для прогнозирования характеристик процессов воспламенения топливных составов.

**Практическая значимость работы.** Сформулированные практические рекомендации энергоэффективного инициирования горения гелеобразных топлив в условиях диспергирования позволят разработать научно обоснованные решения для интенсивного развития современных топливных технологий, а также обеспечения технологического суверенитета России при внедрении передовых инженерных решений. Результаты диссертационной работы могут быть использованы при разработке и внедрении новых гелеобразных топлив как на энергетических установках различного назначения – котельных агрегатах, мини-ТЭЦ, объектах локальной теплоэнергетики, где гелеобразные топлива могут выступать в качестве основного или резервного топлива, так и в авиакосмической технике (газогенераторы и двигатели различного назначения). Учитывая широкую номенклатуру компонентов гелеобразных топлив, включая традиционные углеводороды (керосиновые и дизельные фракции), отходы нефтепереработки и отработанные масла, а также возможность создавать многокомпонентные структурно-неоднородные топливные системы с добавлением мелкодисперсных металлических и неметаллических частиц, применение разработанных подходов для научно обоснованного выбора состава гелеобразного топлива и режимов его сжигания позволит обеспечить эффективность и надёжность энергогенерирующих установок.

**Методология и методы исследования.** Методики выбора компонентов и приготовления топливных рецептов. Объект исследований – гелеобразные топлива различного состава. Компонентный состав будет формироваться с учетом обоснованных по результатам тестовых экспериментов и оценок критериев. Свойства компонентов и приготовленных топливных систем (теплота сгорания; технический анализ; температура, при которой происходит воспламенение) будут установлены в рамках методик, соответствующих международным стандартам.

Методы высокоскоростной регистрации быстропротекающих процессов воспламенения и горения топливных систем с использованием программно-аппаратного комплекса на базе цветных и монохромных высокоскоростных видеокамер. Методы измерения температуры: контактные измерения, основанные на применении малоинерционных миниатюрных термопар в комплекте с многоканальным осциллографом и ПК с оригинальным ПО; метод тепловизионной регистрации характеристик процессов эндо- и экзотермического реагирования. Оригинальные алгоритмы и программные коды для численного решения нелинейных нестационарных дифференциальных уравнений в частных производных, описывающих процессы тепломассопереноса с фазовыми переходами и химическим реагированием.

**Положения и основные результаты, выносимые на защиту:**

1. Диспергирование, обусловленное формированием гетерогенных центров парообразования, реализуется только при достижении условий нуклеации на поверхности раздела компонентов капли расплава. Поэтому необходимо, чтобы в топливной смеси в поверхностном натяжении одного жидкого компонента преобладала полярная составляющая (полярность  $>50\%$ ), а в поверхностном натяжении другого – дисперсионная составляющая (полярность  $\leq 10\%$ ). Процесс диспергирования возможно интенсифицировать до 2,5 раз путем введения в состав гелеобразного топлива до 30 % масс. пористых горючих микрочастиц, воздушные пузырьки в порах которых служат дополнительными центрами гетерогенного зародышеобразования.

2. Необходимым условием гарантированного диспергирования капли расплава структурно-неоднородного гелеобразного топлива при воспламенении является наличие в его составе: 45–50 % дисперсионного компонента, 45–50 % полярного компонента, не более 10 % твердых мелкодисперсных частиц, а достаточным – параметры окружающей среды, превышающие значения: температуры 600 °С, концентрации окислителя 12 %, плотности теплового потока 40 кВт/м<sup>2</sup>, скорости нагрева 50 град./с.

3. Диспергирование капли расплава гелеобразного топлива интенсифицирует массовую скорость выгорания компонентов вследствие кратного увеличения площади поверхности прогрева и испарения, при этом скорости движения мелкодисперсных фрагментов топлива после диспергирования капли расплава размером около 2 мм составляют 0,4–1,3 м/с, размеры области их выгорания составляют 8–14 мм.

4. Математическая модель, описывающая взаимосвязанные процессы теплопереноса, фазовых переходов и химического реагирования, диффузии летучих компонентов, формирования горючей парогазовой смеси, свободно-конвективной и лучистой теплопередачи, позволяет удовлетворительно прогнозировать характеристики зажигания частиц гелеобразных топлив в условиях диспергирования капли расплава. Оригинальная математическая модель позволяет определять диапазоны необходимых начальных условий (температура окружающей среды, начальный размер и начальная температура частицы топлива) для гарантированного зажигания частицы гелеобразного топлива в условиях диспергирования.

**Достоверность результатов диссертационного исследования.** Достоверность экспериментальных данных обеспечена использованием современных высокоточных средств измерений, гарантирующих необходимую пространственно-временную разрешающую способность, а также подтверждена статистическим анализом, включающим многократную повторяемость и оценку систематических и случайных погрешностей.

Достоверность результатов численного моделирования подтверждается консервативностью применённой разностной схемы (выполнением закона сохранения энергии), использованием расчетной сетки с наименьшей ошибкой дискретизации и удовлетворительным соответствием результатов численного моделирования экспериментальным данным.

**Связь работы с научными программами и грантами.** Тема диссертационной работы соответствует приоритетному направлению развития науки, технологий и техники в Российской Федерации «6. Рациональное природопользование» и критической технологии Российской Федерации «27. Технологии энергоэффективного производства и преобразования энергии на органическом топливе» (Указ Президента № 899 от 7 июля 2011 года «Об утверждении приоритетных направлений развития

науки, технологий и техники в Российской Федерации и перечня критических технологий Российской Федерации»).

Исследования в рамках подготовки диссертации проводились при поддержке грантов РНФ 18-13-00031 (Регистрационный номер: АААА-А18-118040590023-1) и 18-13-00031-П (Регистрационный номер: 121040200099-8) «Разработка физических и математических моделей зажигания гелеобразных топлив в условиях, характерных для космоса, Арктики и Антарктики» в 2018–2022 годах; Приоритет-2030 «Мультитопливные технологии замкнутого цикла для энергоустановок и двигателей» в 2022–2024 годах (Регистрационные номера: 122080900049-1, 123033100023-4, 124071600016-2); РНФ 25-29-00637 (Регистрационный номер: 125021902429-9) «Исследование закономерностей и характеристик горения самовоспламеняющихся топлив с гелеобразными компонентами» с 2025 года по настоящее время.

**Личный вклад автора.** Основные положения и результаты диссертационной работы получены соискателем лично. Вклад автора состоит в формулировке задач диссертационного исследования; установлении современного состояния тематики работы путем анализа отечественной и зарубежной литературы; разработке новых подходов и комбинаций методов решения поставленных задач; планировании и проведении теоретических и экспериментальных исследований; обработке и анализе полученных результатов; разработке физических и математических моделей исследуемых процессов, их верификации и валидации результатов численного моделирования; составлении практических рекомендаций; апробации результатов на научных конференциях и их опубликовании в рецензируемых периодических научных изданиях; формулировке защищаемых положений и основных выводов диссертационной работы.

**Апробация работы.** Основные положения и результаты диссертационной работы были представлены на следующих научных мероприятиях: 10-й Международный симпозиум «Неравновесные процессы, плазма, горение и атмосферные явления» (3–7 октября 2022 года, Сочи, Россия); 2-я Международная конференция «Физика и химия горения и экстремальных процессов» (12–16 июля 2022 года, Самара, Россия); XVI Минский международный форум по тепломассообмену (16–19 мая 2022 года, Минск, Беларусь); 10-й Международный семинар по структуре пламени (9–13 октября 2023 года, Новосибирск, Россия); XVII Минский международный форум по тепломассообмену (20–24 мая 2024 года, Минск, Беларусь); 11-й Международный симпозиум «Неравновесные процессы, плазма, горение и атмосферные явления» (7–11 октября 2024 года, Адлер, Сочи, Россия); X Всероссийская научная конференция «Теплофизика и физическая гидродинамика» (7–14 сентября 2025 года, Сочи, Россия).

**Публикации.** Основные научные результаты диссертационной работы представлены в 5 научных публикациях, из них 2 опубликовано в периодических изданиях, входящих в Перечень ведущих рецензируемых научных журналов и изданий, рекомендованных ВАК, 3 – в периодических изданиях, индексируемых в международных и российских базах данных Scopus и Web of Science; 10 – в трудах всероссийских и международных конференций; получен 1 патент на изобретение, 3 свидетельства о регистрации программ для ЭВМ.

**Структура и объем работы.** Диссертационная работа состоит из введения, четырех глав, заключения и списка литературы из 123 наименований; содержит 190 страниц машинописного текста, 63 рисунка, 12 таблиц, 3 приложения.

## СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

**Во введении** обоснована актуальность темы диссертационной работы, сформулирована цель и задачи исследований, отражена практическая значимость и новизна полученных результатов, представлены защищаемые положения.

**В первой главе** приведен анализ отечественных и зарубежных теоретических и экспериментальных исследований, посвящённых изучению воспламенения и горения гелеобразных топливных композиций. Выполнен обзор ключевых направлений актуальных научных исследований и перспективные векторы развития, систематизированы существующие подходы, обозначены основные нерешенные задачи, включая недостаточную изученность процессов, протекающих в капле расплава топлива при нагревании, и отсутствие универсальных математических моделей, описывающих стадии процесса зажигания многокомпонентных гелеобразных топлив.

**Вторая глава** содержит описание разработанных автором диссертации методик приготовления гелеобразных топлив, экспериментальных стендов, методик определения характеристик прогрева, испарения, воспламенения и горения частиц гелеобразных топлив.

Экспериментально обоснована возможность приготовления группы составов гелеобразных топлив, в том числе структурно неоднородных, на основе криогелей, содержащих горючие жидкости и мелкодисперсные металлические и неметаллические частицы: 25–50 % масс. водного раствора (10 % масс.) поливинилового спирта (ПВС) + 25–50 % масс. горючей жидкости (индустриальное масло И-40А, керосин ТС-1, бензин АИ-92, дизельное топливо) + 0–50 % масс. мелкодисперсных частиц (наночастицы алюминия, железа, меди или углеродистые (бурый уголь), инертные  $\text{SiO}_2$  микрочастицы). Процесс приготовления гелеобразного топлива включал несколько этапов: в водный раствор ПВС, полученный путем растворения ПВС в воде с температурой 85 °С с использованием верхнеприводной лопастной мешалки при скорости 500 об./мин., вводилась расчетная доля (50 % масс.) жидкого горючего компонента (масло, бензин, керосин или дизельное топливо) и эмульгатора (2 % об.) для приготовления первичной эмульсии в результате гомогенизации компонентов высокоскоростным миксером при 11000 об./мин. Полученную первичную эмульсию разделяли на части, которые в дальнейшем использовали для приготовления топливных составов, в том числе структурно неоднородных – путем введения порошков металлов и неметаллов до достижения заданной концентрации (10–50 % масс.) в условиях постоянного перемешивания лопастной мешалкой при 3000 об./мин. Полученные топливные смеси разливались в металлические цилиндрические ёмкости (диаметр 30 мм, высота 10 мм) и подвергались процессу криотропного гелеобразования. Криогель после не менее 5 циклов замораживания и оттаивания формировал гелеобразную структуру топливных составов, основу которой представляет полимерная матрица, в ячейках которой расположены мелкодисперсные капли горючей жидкости и воды, а также, в случае структурно-неоднородной топливной композиции – относительно равномерно распределённые частицы твёрдых добавок.

Установлены основные теплотехнические (теплота сгорания, теплопроводность, теплоемкость) и физико-механические (плотность, модуль упругости, предел прочности, потеря массы в процессе упругой деформации) характеристики гелеобразных топлив, в том числе структурно-неоднородных. Установлено, что по сравнению с маслonaполненным криогелем без добавок эффективная теплопроводность металлизированных составов (10–50 % масс.) выше на 3–45 %, в то время как состав с добавлением 30 % масс. углеродистых частиц характеризуется эффективной теплопроводностью на 14 % ниже. Среди рассмотренных гелеобразных

топлив предел упругости для состава с добавлением 30 % масс. углеродистых частиц – наибольший и составляет 10,8 кПа – на 37 % выше, чем для маслонаполненного криогеля без добавок, тогда как модуль упругости выше на 19 % и составляет 33,6 кПа. При введении в состав маслонаполненного криогеля наночастиц металла в концентрации 10–30 % масс. предел упругости снижается на 15 % – до 6,7–6,8 кПа, соответственно. При увеличении концентрации наночастиц металла до 50 % масс. предел упругости снижается до 1,2 кПа – на 85 % относительно маслонаполненного криогеля без добавок. Установлено, что добавление в состав маслонаполненного криогеля 10 % масс. наночастиц металла снижает модуль упругости на 13 % и предел прочности гелеобразного топлива на 24 %. Добавление металлических частиц в концентрации 30–50 % масс. повышает модуль упругости в 1,3–2,2 раза при одновременном снижении предела прочности в 1,4–9,0 раз, соответственно. Относительно высокая концентрация твердых частиц в составе гелеобразного топлива (50 % масс.) делает его хрупким вследствие значительного снижения результирующей концентрации полимера. Наибольшим пределом прочности среди рассмотренных топлив характеризуется состав с добавлением 30 % масс. углеродистых частиц – 631,8 кПа – на 31 % выше, чем для маслонаполненного криогеля без добавок.

В рамках диссертационной работы также была установлена потеря массы образцами гелеобразного топлива в процессе упругой деформации (под нагрузкой в 6,5 кПа) и длительного хранения на открытом воздухе. Наибольшей потерей массы в процессе упругой деформации характеризуется состав с добавлением металлических частиц с концентрацией 10 % масс.: потеря массы больше, чем у маслонаполненного криогеля без добавок в 2,2 раза. Наименьшими потерями массы в процессе упругой деформации характеризуются составы с добавками 30 % масс. твердых частиц: по сравнению с маслонаполненным криогелем без добавок потеря массы состава с добавлением углеродистых частиц меньше на 50 %, состава с добавлением металлических частиц – на 59 %. При использовании керосина, бензина или дизельного топлива в качестве горючей жидкости в составе гелеобразного топлива потеря массы повышается в 1,3–2,0 раза по сравнению с маслонаполненным криогелем без добавок.

Для определения потери массы при длительном хранении образцы помещались в одинаковые условия внешней среды (температура 22 °С, относительная влажность воздуха 45 %) на период 30 суток. Наибольшей скоростью и общей величиной потери массы при длительном хранении на открытом воздухе характеризуются составы гелеобразных топлив с керосином, бензином или дизельным топливом в качестве горючей жидкости – потеря массы этих составов составила 71–90 %. Это обусловлено более высокой летучестью этих жидкостей по сравнению с промышленным маслом. Введение твердых мелкодисперсных добавок значительно сокращает испарение воды и горючей жидкости, с одной стороны, по причине снижения доли жидкости в составе, с другой – по причине упрочнения полимерной матрицы. В случае добавления углеродистых частиц в состав гелеобразного топлива снижение потери массы при длительном хранении обусловлено дополнительной адсорбцией жидкостей поверхностью твердых частиц. Потеря массы при длительном хранении состава с добавкой 30 % масс. углеродистых микрочастиц составила 29 %, что в 1,7 раза меньше потери массы маслонаполненного криогеля без добавок.

Методом термогравиметрии в температурном диапазоне 25–1000 °С при скоростях нагрева 10–50 °С/мин установлены основные стадии термической конверсии гелеобразных топлив на основе маслонаполненного криогеля: испарение влаги, выход и горение летучих, горение твердой части топлива. Установлено, что добавки твердых мелкодисперсных частиц снижают скорости испарения в 1,2–2,7 раза (при температуре

до 250 °С), а скорости газофазного горения органической части топлив в 1,4–1,7 раз (250–450 °С), по причине замещения твердыми включениями части жидкостей в составе топлива. Значимое влияние добавление твердых частиц оказывает и в области относительно высоких температур (400–1000 °С), повышая энерговыделение (пиковые мощности энерговыделения в процессе окисления металла принимают значения в 1,5–3,0 раза выше, чем при газофазном или гетерогенном горении органической части топлива) и массу твердого негорючего остатка вследствие окисления горючих неметаллических (5–30 % от начальной массы) и металлических (45–50 % от начальной массы вследствие окисления металлов с приростом массы) включений.

Процесс воспламенения состава гелеобразного топлива с добавкой алюминия отличается от других металлизированных составов. Отличие состоит в большей стадийности процесса окисления алюминия, которое широко освещено в литературе. Стадийный механизм окисления нанопорошка алюминия обусловлен морфологическими переходами оксидной пленки алюминия при нагревании согласно следующей схеме: аморфный  $\text{Al}_2\text{O}_3$  –  $\gamma\text{-Al}_2\text{O}_3$  –  $\alpha\text{-Al}_2\text{O}_3$ .

Разработана методика проведения экспериментальных исследований процессов зажигания и горения одиночных частиц гелеобразных топлив в условиях диспергирования с использованием совокупности современных методов и измерительных систем: высокоскоростная видеосъемка для регистрации быстротекущих процессов, высокоскоростная инфракрасная пирометрия для получения полей температур в области воспламенения и горения топлива, малоинерционные контактные средства измерения температуры для повышения достоверности температурных измерений.

Экспериментальное исследование характеристик воспламенения и горения частиц гелеобразного топлива в условиях диспергирования проведено с использованием экспериментального стенда (рисунок 1), обеспечивающего возможность регулирования параметров: давления окружающей среды и концентрации кислорода. Внутри рабочей камеры герметичного бокса (рисунок 1) поддерживались стабильные экспериментальные условия: давление около 101,3 кПа и концентрация кислорода в диапазоне 5,5–21,0 %, а в области проведения экспериментов – температура окружающей среды  $T_g$  в диапазоне 400–1000 °С.

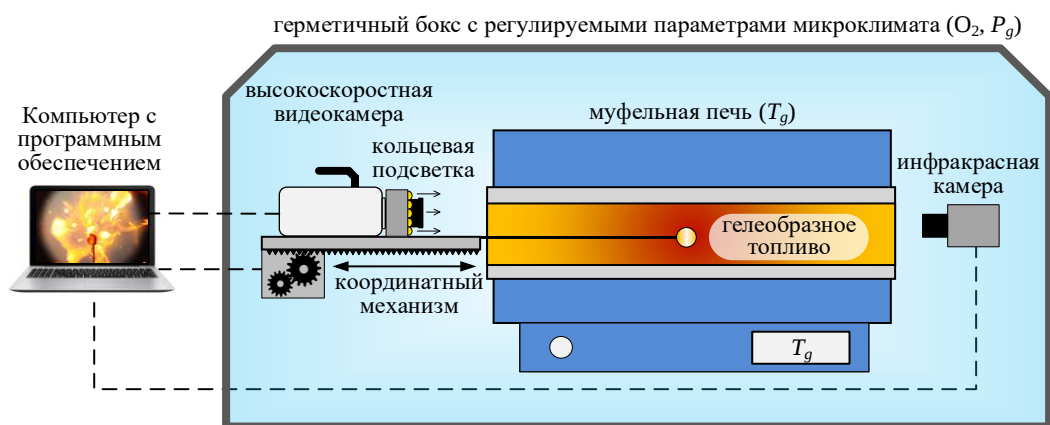


Рисунок 1 – Схема экспериментального стенда

Формирование высокотемпературной стационарной газовой среды ( $T_g$  до 1000 °С) осуществлялось в полости трубчатой муфельной печи с внутренним диаметром трубки 0,05 м и длиной 0,45 м (измерение температуры – встроенная ХА термopара). Эксперименты проводились с частицами гелеобразного топлива массой

5 мг. Масса регистрировалась с использованием электронных аналитических весов Vibra AF-225DRCE (диапазон измерений 0,001–92 г; дискретность 0,01 мг; приведённая погрешность – 0,1 %). В каждой серии из 5–10 экспериментов, проводимых при идентичных начальных условиях ( $T_g = \text{const}$ ,  $O_2 = \text{const}$ ), одиночные частицы гелеобразного топлива, расположенные на держателе из нихромовой проволоки диаметром 250 мкм, с помощью координатного механизма вводились в предварительно нагретую до температуры  $T_g$  полость печи со скоростью не более 0,1 м/с вдоль оси симметрии керамической трубки до ее середины. Высокоскоростная видеокамера (скорость видеорегистрации 5000 кадров в секунду при разрешении  $800 \times 600$  пикселей; глубина цвета 12 бит; размер пикселя 20 мкм; минимальное время экспозиции 1 мкс; автоматический триггер по изображению) располагалась на подвижной площадке координатного механизма, поэтому частица топлива находилась в фокальной плоскости объектива видеокамеры в течение всего эксперимента. Помимо высокоскоростной видеозаписи производилась регистрация протекающих процессов с помощью прецизионного тепловизионного комплекса, состоящего из инфракрасных камер Optris PI 640i / Optris PI 1M (Optris GmbH & Co., Германия) со следующими параметрами записи: регистрируемый температурный диапазон 150–900 °C / 575–1800 °C; спектральный диапазон 8–14 мкм / 0,85–1,1 мкм; частота регистрации 125 Гц / 80 Гц при разрешении  $640 \times 120$  пикселей /  $382 \times 288$  пикселей; систематическая погрешность от  $\pm 1\%$  ( $T < 1400$  °C) до  $\pm 2\%$  ( $T > 1400$  °C). Обработка видеозаписей выполнялась с помощью коммерческого программного обеспечения Phantom Camera Control (Vision Research, США), Tema Automotive (Image Systems AB, Швеция), Optris PIX Connect (Optris GmbH & Co., Германия).

В третьей главе приведены результаты исследования основных закономерностей и определения характеристик процессов воспламенения и горения гелеобразных топлив в условиях диспергирования капель расплавов. Описаны разработанные физические модели зажигания гелеобразных топлив в условиях диспергирования капли расплава гелеобразного топлива. Проанализировано влияние группы факторов на характеристики воспламенения и горения гелеобразных топлив.

На основании анализа экспериментальных данных разработана физическая модель зажигания частицы маслonaполненного криогеля в условиях диспергирования (рисунок 2) при лучисто-конвективном нагреве.

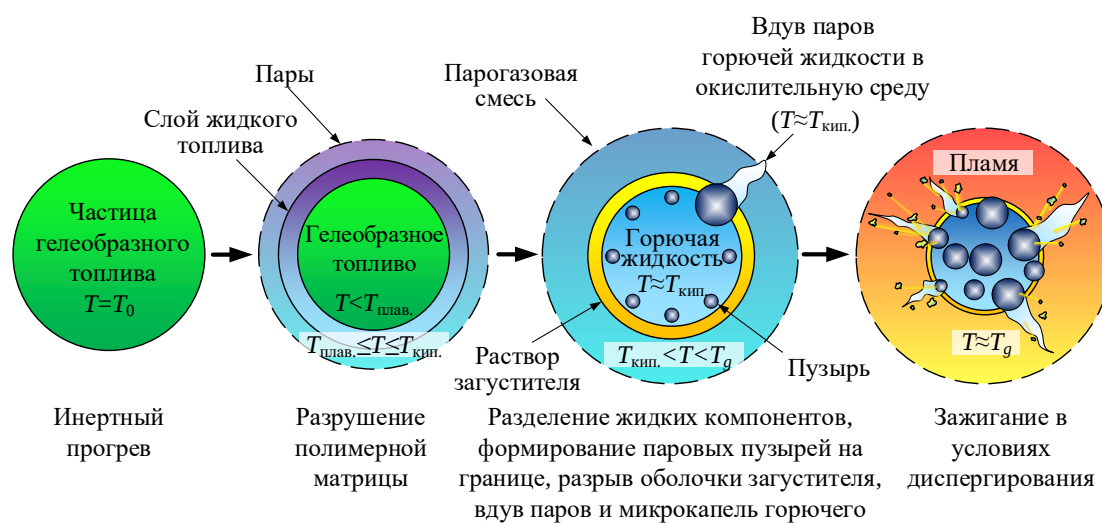


Рисунок 2 – Физическая модель зажигания частицы маслonaполненного криогеля в условиях диспергирования

При проведении экспериментальных исследований выявлена следующая совокупность взаимосвязанных физико-химических процессов, послужившая основой для разработки математической модели (глава 4). Частица топлива прогревается, в результате чего осуществляется переход топлива из гелеобразного состояния в жидкое вследствие плавления полимерного компонента топлива. Из-за разницы в поверхностном натяжении жидкие компоненты топлива разделяются: раствор загустителя (менее летучий компонент) образует оболочку на поверхности капли, а горючая жидкость (более летучий компонент) находится внутри капли под слоем раствора загустителя. Вследствие образовавшейся гетерогенной структуры дальнейший нагрев капли расплава приводит к образованию многочисленных центров нуклеации в окрестности поверхности раздела жидкостей. Это проявляется в образовании и росте одиночных паровых пузырьков, движущихся вдоль границы раздела «горючая жидкость – раствор загустителя». Увеличение количества пузырьков создает тепловое сопротивление процессу нагрева горючей жидкости, что является причиной реализации условий нестационарного нагрева капли расплава гелеобразного топлива. Когда количество пузырьков и их размеры превышают критические значения, толщина оболочки раствора загустителя уменьшается, схлопывание пузырька разрушает оболочку. Пары и мелкодисперсные фрагменты расплава топлива вдуваются в окружающую среду на расстояние от поверхности исходной капли, где температура выше, чем в ее окрестности (за счет испарения и поступления относительно холодных паров). Мелкодисперсные фрагменты топлива, двигаясь в высокотемпературной окружающей среде, интенсивно испаряются, тем самым увеличивая локальную концентрацию летучих, которые воспламеняются в относительно большой по размерам области.

Известно, что интенсивность формирования центров нуклеации существенно зависит от взаимной растворимости жидких компонентов: в системах с низкой растворимостью скорость нуклеации значительно выше, чем в полностью растворимых системах. Кроме того, на динамику зарождения пузырей оказывают влияние различия в летучести компонентов, а также температура и давление окружающей среды.

На основании приведенного анализа сформулированы необходимые и достаточные условия реализации процесса диспергирования капли расплава топлива: обязательно наличие нерастворимых жидких компонентов, входящих в топливную смесь, с близкими температурами кипения; достижение условий нуклеации на поверхности раздела компонентов.

Добавление в состав маслonaполненного криогеля мелкодисперсных твердых металлических частиц снижает интенсивность диспергирования капель расплава топлива при прочих идентичных условиях (рисунок 3). По причине относительно высокой теплопроводности металлических частиц теплота от поверхности интенсивнее отводится к центру частицы, в результате чего уменьшается градиент температуры в радиальном направлении, то есть теплота, необходимая для зарождения и роста пузырьков пара, рассеивается по объему топлива. Таким образом, пик интенсивности диспергирования смещается по времени в более позднюю стадию, и воспламенение происходит либо с частичным диспергированием (в случае относительно небольшого повышения теплопроводности), либо без диспергирования (в случае высокой теплопроводности топлива). Интенсивное диспергирование протекает уже после газофазного зажигания капли расплава топлива в условиях подвода дополнительной теплоты от процесса горения паров горючей жидкости. В таких условиях диспергирование не интенсифицирует зажигание капли расплава топлива, но после воспламенения интенсифицирует массовую скорость выгорания компонентов.

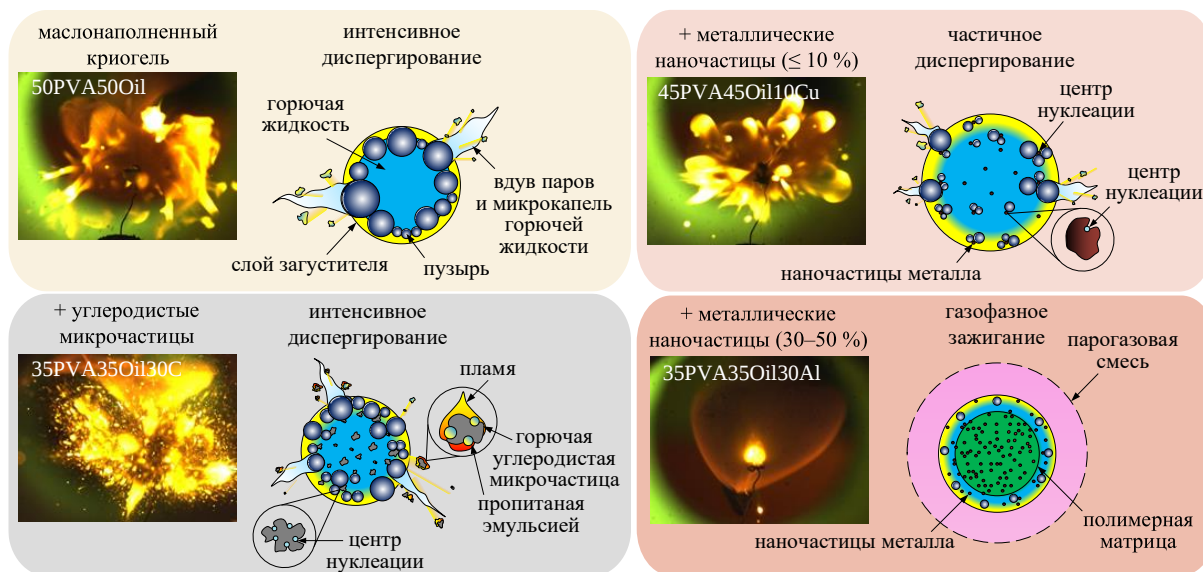


Рисунок 3 – Схемы механизмов зажигания гелеобразных топлив, в том числе с добавками металлических и неметаллических частиц

Углеродистые микрочастицы, в отличие от металлических наночастиц, с одной стороны, обладают меньшей теплопроводностью, обеспечивая высокий градиент температуры в радиальном направлении частицы, с другой стороны, имеют значительно более пористую структуру поверхности и содержат в микропорах пузырьки воздуха, которые могут служить центрами гетерогенного зародышеобразования. Поэтому в процессе прогрева образование зародышей паровых пузырей происходит преимущественно в порах твердых частиц, находящихся в объеме горючей жидкости, а не на границе «горючая жидкость – раствор загустителя». Поэтому введение в состав углеродистых микрочастиц значительно интенсифицирует процессы диспергирования.

При прогреве состава с добавкой углеродистых частиц интенсивное диспергирование приводит к снижению времени задержки зажигания ( $t_d$ ) основной частицы топлива (рисунок 4а), в то время как для металлизированных топлив характерно частичное диспергирование до зажигания, что выражается в серии вспышек в окрестности основной частицы (рисунок 4в), не приводящее к снижению времени задержки зажигания.

Топлива с твердыми металлическими и неметаллическими частицами в составе характеризуются пиковыми температурами на 15–38 % выше (рисунок 4в) и временами полного выгорания выше до 2,5 раз, чем маслонаполненный криогель без добавок.

Наиболее существенные различия во временах задержки зажигания (рисунок 4а) гелеобразных топлив на основе маслонаполненных криогелей, в том числе с добавками твердых мелкодисперсных частиц, характерны для температур окружающей среды, близких к порогу воспламенения ( $T_g=600\text{ }^{\circ}\text{C}$ ) топливных композиций: времена задержки зажигания могут отличаться более чем в два раза. Минимальные значения времен задержки зажигания ( $t_d$ ) в диапазоне варьирования температур окружающей среды  $T_g=600\text{--}1000\text{ }^{\circ}\text{C}$  зарегистрированы для топливной композиции с добавкой углеродистых частиц (обозначение 35PVA35Oil30C, здесь численные значения – массовые концентрации водного раствора ПВС [PVA], масла [Oil], углеродистых частиц [C]) – на 6–22 % ниже, чем для маслонаполненного криогеля без добавок

(50PVA50Oil). Снижение  $t_d$  обусловлено протеканием процесса диспергирования на этапе прогрева.

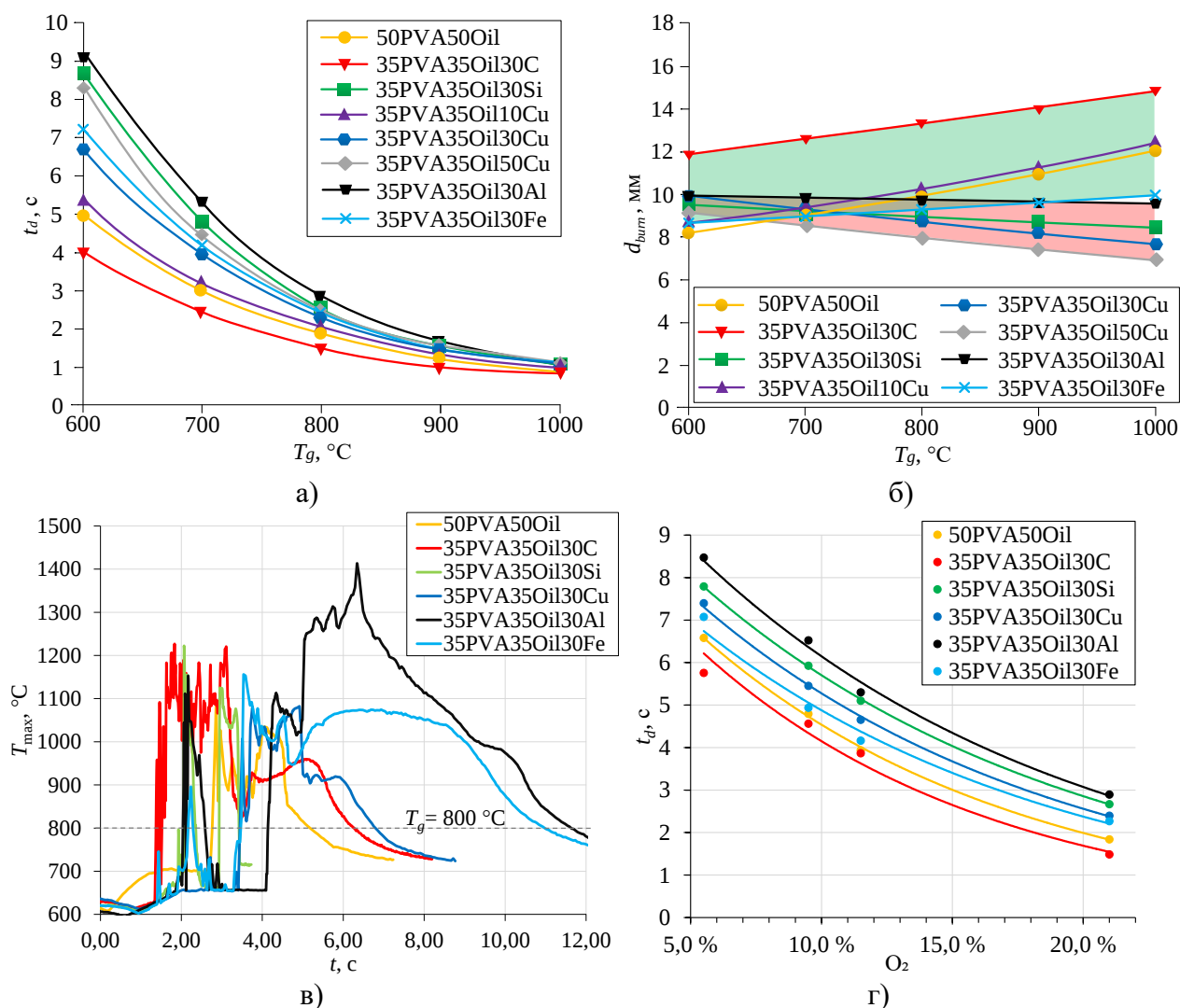


Рисунок 4 – Зависимости времен задержки зажигания (а) и среднего размера области выгорания топлива (б) от температуры окружающей среды ( $T_g$ ); тренды температуры (в) в области воспламенения и горения гелеобразного топлива при  $T_g=800$  °C; зависимости времен задержки зажигания (г) от концентрации окислителя в окружающей среде при  $T_g=800$  °C

Для металлизированных составов характерные времена задержки зажигания выше на 17–85 % по сравнению с маслonaполненным криогелем без добавок. Увеличение связано, во-первых, с уменьшением доли горючей жидкости в составе топлива вследствие замещения части жидких компонентов твердыми, а во-вторых – с увеличением эффективной теплопроводности топливной композиции и упрочнением полимерной матрицы, что подавляет протекание диспергирования до воспламенения основной частицы топлива. После плавления полимерного компонента топлива разделение несмешивающихся жидкостей (горючей жидкости и раствора загустителя) протекает менее интенсивно: при высоком содержании металлических частиц граница раздела формируется преимущественно в узкой приповерхностной области, что ограничивает проявление эффекта диспергирования во всем объеме топлива. На основе

полученных экспериментальных данных можно заключить, что содержание твёрдых металлических частиц с концентрацией 30–50 % масс. негативно влияет на временные характеристики зажигания и горения гелеобразных топлив – в частности, приводит к увеличению времени задержки зажигания и времени полного выгорания.

Для всех исследованных составов гелеобразных топлив установлены зависимости средних размеров (диаметров) области выгорания от температуры окружающей среды (рисунок 4б). Установлены две разные тенденции зависимости размеров области выгорания от температуры окружающей среды. Для составов с явно выраженным газофазным горением (без диспергирования капли расплава) характерны меньшие размеры области выгорания при больших температурах окружающей среды (рисунок 4б, красная область). Для диспергирующих в процессе прогрева и горения топливных составов характерна противоположная тенденция – размеры области выгорания больше при больших температурах окружающей среды (рисунок 4б, зеленая область). Размеры области выгорания зависят от дальности разлета мелкодисперсных фрагментов топлива, которая определяется скоростью их движения после диспергирования капли расплава. Таким образом, чем выше температура окружающей среды, тем интенсивнее протекают процессы диспергирования капли расплава, что ведет к возрастанию средней скорости движения мелкодисперсных фрагментов топлива и увеличению размеров области их выгорания.

Наибольшие значения средних размеров области выгорания и средней скорости движения фрагментов топлива, отделяющихся при диспергировании капли расплава, были зарегистрированы для топлива с добавлением углеродистых частиц (35PVA35Oil30C) во всем диапазоне исследованных температур окружающей среды. Данный эффект обусловлен формированием выраженного температурного градиента на фазовой границе «топливо – воздух» при зажигании состава с углеродистыми частицами. В условиях высокого температурного градиента происходит интенсификация процессов испарения летучих компонентов и, как следствие, стремительный рост паровых пузырьков, формирующихся в приповерхностном слое капли расплава. Чем выше интенсивность нагрева, тем больше скорость роста пузырьков внутри капли расплава, и тем более интенсивно протекает процесс её диспергирования, что сопровождается увеличением скоростей фрагментов топлива, отделяющихся от основной капли расплава, и размеров области выгорания. Кроме того, внутри отделившихся фрагментов расплава топлива могут протекать те же процессы нуклеации и схлопывания паровых пузырей, приводящие к вторичному диспергированию.

Подтверждено, что концентрация окислителя не влияет на протекание процессов, приводящих к нуклеации и диспергированию составов на основе маслonaполненных криогелей. Для всех составов гелеобразных топлив, характеризующихся диспергированием при  $O_2=21,0\%$ , диспергирование зарегистрировано при любой из рассмотренных концентраций окислителя ниже атмосферной ( $O_2=5,5–11,5\%$ ). Установлено, что в обедненной кислородом окружающей среде ( $O_2=5,5–11,5\%$ ) при температурах  $T_g=700–1000\text{ }^\circ\text{C}$  времена задержки зажигания гелеобразных топлив закономерно выше в 1,3–3,9 раза, чем при зажигании в окружающей среде с  $O_2=21\%$  (рисунок 4г). Поскольку процессы нуклеации и диспергирования, которые играют определяющую роль в интенсификации зажигания, слабо зависят от концентрации окислителя, последовательность этапов воспламенения исследованных топливных композиций остаётся неизменной независимо от концентрации кислорода в окружающей среде (рисунок 4г).

Проведена сравнительная оценка исследованных составов гелеобразных топлив на основе совокупности их теплоэнергетических и физико-механических характеристик. Для каждого состава рассчитаны относительные показатели эффективности путем нормирования их 15 значимых параметров относительно лучших значений в выборке с учетом важности каждой характеристики: доля твердого негорючего остатка; время задержки зажигания при различной концентрации окислителя в окружающей среде; время полного выгорания; температура, при которой происходит воспламенение; величина потери массы в процессе упругой деформации и при длительном хранении на открытом воздухе; теплота сгорания; максимальная температура в области воспламенения и горения; средний размер области выгорания; средняя скорость разлета мелкодисперсных фрагментов топлива при диспергировании; интенсивность диспергирования; предел прочности, модуль упругости и предел упругости. Установлено, что для топлива с добавлением мелкодисперсных углеродистых частиц и для маслonaполненного криогеля без добавок показатели относительной эффективности на 21–64 % выше, чем для остальных составов, что обусловлено, как их оптимальными для реализации процесса диспергирования теплофизическими характеристиками (низкая эффективная теплопроводность; высокая пористость частиц; низкая температура, при которой происходит воспламенение компонентов), так и повышенной прочностью полимерной матрицы, подходящей для длительного хранения и транспортировки (низкая скорость испарения горючей жидкости, относительно высокая адсорбирующая способность твердых частиц).

Для обоснования гипотезы о физическом механизме диспергирования капель расплавов гелеобразных топлив в условиях зажигания выполнен анализ группы свойств отдельных компонентов, входящих в состав топлив. Установлено, что на интенсивность процесса диспергирования, и в целом на возможность реализации этого эффекта, главным образом влияет соотношение дисперсионных и полярных составляющих свободной поверхностной энергии компонентов, входящих в состав топлив: интенсивность протекания диспергирования будет тем выше, чем больше разность между полярностями компонентов, входящих в топливную композицию. Сформулированы рекомендации для создания состава с наилучшими характеристиками для обеспечения гарантированного зажигания и горения топлива в условиях интенсивного диспергирования при лучисто-конвективном нагреве: включить в состав гелеобразного топлива минимум две жидкости, из них хотя бы одну горючую жидкость, с максимальной разностью значений полярности между собой; обеспечить близкое соотношение концентраций полярной и дисперсионной жидкостей; выбирать жидкости таким образом, чтобы температура кипения жидкости, образующей внутреннюю субкаплю в гетерогенной структуре расплава топлива, была ниже или равна температуре кипения жидкости, образующей оболочку капли; в случае включения в состав твердых мелкодисперсных частиц обеспечить максимальную пористость частиц и их относительно невысокую концентрацию (не более 10 %) при условии относительно равномерного распределения частиц в объеме топлива; использовать компоненты, влияющие на снижение эффективной теплопроводности итогового состава гелеобразного топлива.

**Четвертая глава** содержит анализ и описание установленных зависимостей между характеристиками зажигания частиц маслonaполненных криогелей и начальными условиями системы «топливо – воздух», полученными на основе совокупности экспериментальных данных и результатов численного моделирования процессов зажигания гелеобразных топлив в условиях диспергирования капель расплавов. Экспериментально подтверждено, что для гелеобразного топлива на основе

маслонаполненного криогеля время от начала нагрева до момента достижения частицей топлива условий диспергирования на порядок больше времени протекания процесса диспергирования до момента воспламенения. Соответственно, для практического применения время задержки зажигания частиц гелеобразного топлива может быть определено как время от начала прогрева до момента зажигания первого отделившегося фрагмента топлива в результате диспергирования основной капли расплава.

Разработан новый подход к моделированию процесса диспергирования капли расплава гелеобразного топлива при зажигании, заключающийся в том, что критерием начала диспергирования принято условие достижения температурой на границе «горючая жидкость – раствор загустителя» значения температуры нуклеации, которая не равна температуре кипения горючей жидкости, как принимается в большинстве известных подобных моделей, а принимает некоторое значение, соответствующее темпу нагрева топлива. При разработке математической модели данный подход позволяет более полно описывать нестационарные процессы, приводящие к реализации диспергирования и более достоверно прогнозировать их характеристики при варьировании начальных условий в широких диапазонах.

Температура зародышеобразования (температура нуклеации  $T^N$ ), рассчитанная по экспериментальным и теоретическим данным, принимает следующий вид в зависимости от темпов нагрева ( $T_{oil}^b$  – температура кипения горючей жидкости):

$$\begin{cases} T^N = T_{oil}^b + 0,145 \cdot \left( \frac{dT}{dt} \right)^{0,018} & \text{при } 0 < \frac{dT}{dt} < 300 \text{ град./с;} \\ T^N = T_{oil}^b + 0,205 \cdot \left( \frac{dT}{dt} \right)^{0,042} & \text{при } 300 \text{ град./с} \leq \frac{dT}{dt} < 10^6 \text{ град./с.} \end{cases}$$

Этапы взаимодействия частицы гелеобразного топлива с высокотемпературной окружающей средой, характеризующие процессы, протекающие до достижения условий нуклеации: 1) инертный прогрев до температуры плавления полимерного компонента гелеобразного топлива (условие перехода к следующей расчетной схеме:  $T(r=R_d) \geq T^{\text{melt}}$ ); 2) переход топлива из гелеобразного состояния в жидкое, сопровождающееся формированием фронта плавления, который продвигается от внешней границы частицы к центру (условие перехода:  $(R_{liq}-R_{gel})/\Delta r \geq 3$ ); 3) разделение жидких компонентов расплава вследствие различия поверхностных натяжений: горючая жидкость формирует внутренний слой, а раствор загустителя – оболочку на поверхности и испаряется (условие перехода:  $R_{gel}/\Delta r < 3$ ); 4) после полного перехода гелеобразного топлива в жидкое состояние происходит прогрев расплава, сопровождающийся испарением раствора загустителя с поверхности капли (условие останова расчета:  $(R_{PVA}-R_{oil})/\Delta r < 3$ ). Достижение температурой на границе «горючая жидкость – раствор загустителя» температуры нуклеации ( $T(r=R_{oil}) \geq T^N$ ), означает формирование первого зародыша пузырька и принималось в качестве критерия окончания расчета. Время от начала прогрева до этого события принималось как время достижения условий нуклеации ( $t_N$ ). Это время также регистрировалось в экспериментах, проводимых для валидации результатов математического моделирования.

Согласно полученным экспериментальным данным, после достижения условий формирования первого зародыша пузырька в течение короткого промежутка времени происходит интенсивное диспергирование, сопровождающееся разлетом мелкодисперсных фрагментов топлива от основной капли расплава. Отделяющиеся фрагменты расплава топлива попадают в высокотемпературную область окружающей

среды за пределами низкотемпературной области, сформированной парами, в результате чего данные фрагменты интенсивно испаряются и воспламеняются. Это ведет к воспламенению парогазовой смеси в окрестности основной капли расплава и устойчивому горению топлива. Поэтому для практического применения математическая модель достижения условий нуклеации дополнена моделью зажигания единичного отделившегося фрагмента расплава гелеобразного топлива ( $r_d=0,05$  мм) при движении в высокотемпературной окружающей среде. Разработанная двухстадийная модель зажигания частицы гелеобразного топлива в условиях диспергирования отражает экспериментально установленную закономерность воспламенения частицы гелеобразного топлива в течение относительно короткого промежутка времени после формирования первого зародыша пузырька в результате разлета и воспламенения мелкодисперсных фрагментов расплава топлива. Начальные условия в модели зажигания единичного отделившегося фрагмента расплава топлива соответствуют условиям окончания предыдущего этапа – достижения частицей гелеобразного топлива условий нуклеации. Этапы взаимодействия отделившегося фрагмента расплава гелеобразного топлива с разогретой окружающей средой, характеризующие процессы, протекающие от момента реализации диспергирования до достижения условий зажигания: 1) прогрев жидких компонентов расплава и испарение раствора загустителя (условие перехода:  $(r_{PVA}-r_{oil})/\Delta r < 3$ ); 2) испарение горючей жидкости (условие останова расчета:  $r_{oil}/\Delta r < 3$ ). В качестве критерия зажигания принято условие превышения температурой в зоне экзотермического реагирования температуры окружающей среды ( $T > T_g$ ).

Взаимосвязанные процессы тепломассопереноса, фазовых переходов и химического реагирования в области решения описываются системой нелинейных нестационарных дифференциальных уравнений в частных производных в сферической системе координат в одномерной постановке вследствие равномерности подвода теплоты к поверхности. Ниже приведены фрагменты математической модели для одной из расчетных схем, описывающей протекающие процессы.

Уравнение теплопроводности:

$$\rho_i(T)C_i(T)\frac{\partial T_i}{\partial t} = \frac{1}{r^2} \frac{\partial}{\partial r} \left( \lambda_i(T)r^2 \frac{\partial T_i}{\partial r} \right).$$

Уравнение энергии для парогазовой смеси:

$$\rho_{gas}(T)C_{gas}(T)\frac{\partial T_{gas}}{\partial t} = \frac{1}{r^2} \frac{\partial}{\partial r} \left( \lambda_{gas}(T)r^2 \frac{\partial T_{gas}}{\partial r} \right) + Q_f w_f(T).$$

Уравнение диффузии паров раствора загустителя ( $i \rightarrow PVA$ ) или горючей жидкости ( $i \rightarrow f$ ) в окружающей среде:

$$\left\{ \begin{array}{l} \rho_{gas}(T)\frac{\partial Y_i}{\partial t} = \rho_{gas}(T)\frac{1}{r^2} \frac{\partial}{\partial r} \left( D_i(T)r^2 \frac{\partial Y_i}{\partial r} \right) - w_i(T); \\ Y_i + Y_{air} = 1; \\ w_{PVA} = 0; \quad w_f(T) = \rho_{gas} \cdot Y_f \cdot Y_{air} \cdot k_0 \cdot \exp \left( \frac{-E_a}{R(T+273)} \right). \end{array} \right.$$

Граничные условия (из модели достижения условий нуклеации):

$$\left. \frac{\partial T}{\partial r} \right|_{r=0} = 0; \quad \left. \frac{\partial Y_{pva}}{\partial r} \right|_{r=R_i} = 0; \quad T|_{r=R_i} = T_g; \quad \left. \frac{\partial Y_{air}}{\partial r} \right|_{r=R_i} = 0.$$

$$\left\{ \begin{array}{l} -\lambda_{gel} \frac{\partial T_{gel}}{\partial r} \Big|_{r=R_{gel}^-} = -\lambda_{oil}(T) \frac{\partial T_{oil}}{\partial r} \Big|_{r=R_{gel}^+}; \quad -\lambda_{oil}(T) \frac{\partial T_{oil}}{\partial r} \Big|_{r=R_{oil}^-} = -\lambda_{PVA} \frac{\partial T_{PVA}}{\partial r} \Big|_{r=R_{oil}^+}; \\ R_{gel} = r|_{T_{melt}}; \quad T|_{r=R_{gel}^+} = T|_{r=R_{gel}^-}. \quad T|_{r=R_{oil}^+} = T|_{r=R_{oil}^-}. \end{array} \right.$$

$$\begin{cases} -\lambda_{PVA} \frac{\partial T_{PVA}}{\partial r} \Big|_{r=R_{PVA}} = -\varepsilon \sigma \left( (T_g)^4 - (T|_{r=R_{PVA}})^4 \right) - \alpha_{air}(T) (T_g - T|_{r=R_{PVA}}) + L_{PVA} W_{PVA}(T); \\ \frac{\partial Y_{pva}}{\partial r} \Big|_{r=R_{PVA}} = -\frac{W_{PVA}(T)}{\rho_{pva} D_{pva}(T)}. \end{cases}$$

Координата границы «горючая жидкость – раствор загустителя» вычислялась из условия разделения расплава топлива на составляющие жидкие компоненты согласно их массовым долям:

$$R_{oil} = \sqrt[3]{\frac{\rho_{PVA}(T) R_{PVA}^3 + \mu_{PVA} \rho_{oil}(T) R_{gel}^3}{\mu_{PVA} \rho_{oil}(T) + \rho_{PVA}(T)}}.$$

Координата границы «раствор загустителя – окружающая среда» вычислялась по изменению объема капли за шаг по времени  $\Delta t$  при массовой скорости испарения раствора загустителя  $W_{PVA}$ :

$$R_{PVA} = \sqrt[3]{(R_{PVA} + \Delta r)^3 - \frac{3(R_{PVA} + \Delta r)^2 W_{PVA}(T) \Delta t}{\rho_{PVA}(T)}}.$$

Граничные условия (из модели зажигания единичного фрагмента гелеобразного топлива):

$$\frac{\partial T}{\partial r} \Big|_{r=0} = 0; \frac{\partial Y_{pva}}{\partial r} \Big|_{r=r_i} = 0; T|_{r=r_i} = T^N + \frac{u_d \cdot t \cdot (T_g - T^N)}{R_l - R_{PVA}}; \frac{\partial Y_{air}}{\partial r} \Big|_{r=r_i} = 0; \frac{\partial Y_f}{\partial r} \Big|_{r=r_i} = 0.$$

$$\begin{cases} -\lambda_{oil}(T) \frac{\partial T_{oil}}{\partial r} \Big|_{r=r_{oil}} = -\varepsilon \sigma \left( (T_g)^4 - (T|_{r=r_{oil}})^4 \right) - \alpha_{air}(T) (T_g - T|_{r=r_{oil}}) + L_{oil}(T) W_{oil}(T); \\ \frac{\partial Y_f}{\partial r} \Big|_{r=r_{oil}} = -\frac{W_{oil}(T)}{\rho_f D_f(T)}; r_{oil} = \sqrt[3]{(r_{oil} + \Delta r)^3 - \frac{3(r_{oil} + \Delta r)^2 W_{oil}(T) \Delta t}{\rho_{oil}(T)}}. \end{cases}$$

Для численного решения системы дифференциальных уравнений разработан алгоритм, основанный на комплексном применении методов конечных разностей, итерационного метода и метода прогонки в рамках неявной четырёхточечной разностной схемы. Структура алгоритма обеспечивала пошаговую проверку условий, характеризующих реализацию одного из перечисленных выше этапов индукционного процесса на каждом временном шаге. В рамках примененной численной схемы осуществлялся пересчет координат границ, а также контроль выполнения условий окончания расчёта.

Получено удовлетворительное соответствие результатов численного моделирования экспериментальным данным (рисунок 5), как на этапе достижения условий нуклеации (при варьировании температуры окружающей среды в диапазоне  $T_g=400-800$  °C отличие результатов не превышает 12 %; при варьировании начального размера частицы в диапазоне  $R_d=0,05-2,0$  мм отличие результатов не превышает 25 %), так и на этапе зажигания частицы гелеобразного топлива в условиях диспергирования (при варьировании температуры окружающей среды в диапазоне  $T_g=600-1000$  °C отличие результатов не превышает 20 %; при варьировании начального размера частицы в диапазоне  $R_d=0,05-2,0$  мм отличие результатов не превышает 17 %).

С использованием разработанной двухстадийной математической модели зажигания частицы гелеобразного топлива в условиях диспергирования определены диапазоны необходимых начальных условий (температура окружающей среды, начальный размер и начальная температура частицы) для гарантированного зажигания частицы гелеобразного топлива в условиях диспергирования. Установлена пороговая температура окружающей среды, необходимая для зажигания частиц гелеобразного

топлива с начальным размером до 2,0 мм в условиях диспергирования составляет  $T_g^{\min}=580$  °С. В то же время для частиц с начальным размером более 2,0 мм  $T_g^{\min}$  будет зависеть, как от начального размера, так и от начальной температуры частицы гелеобразного топлива, однако будет принимать значения не менее 580 °С (рисунок 5г).

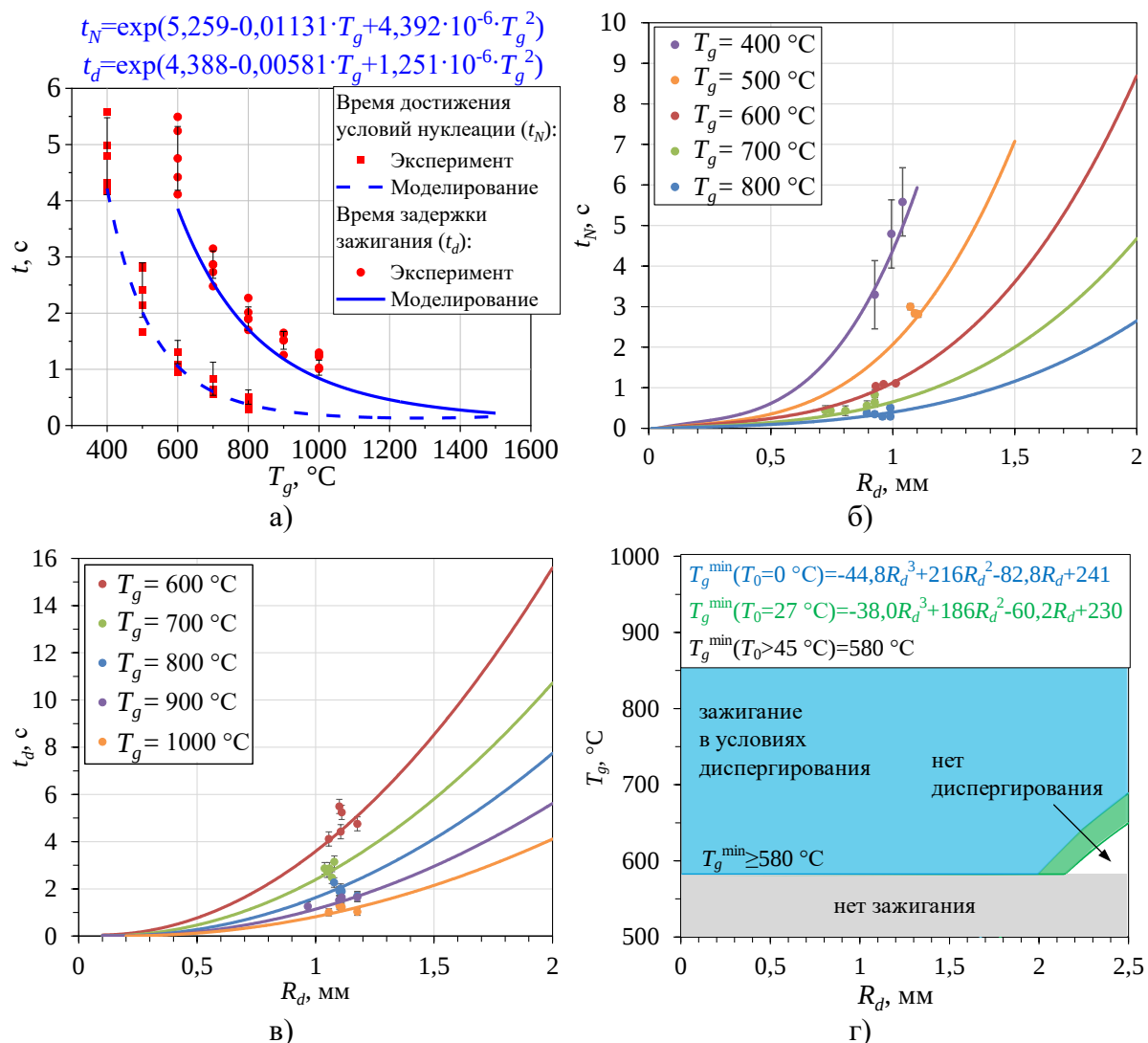


Рисунок 5 – Зависимости времен достижения условий нуклеации ( $t_N$ ) и времен задержки зажигания ( $t_d$ ), полученные при экспериментальном исследовании (точки) и численном моделировании (линии), от температуры окружающей среды ( $T_g$ ) при начальном размере частицы гелеобразного топлива  $R_d=1$  мм (а), от начального размера частицы ( $R_d$ ) гелеобразного топлива при варьировании температуры окружающей среды в диапазоне  $T_g=400$ – $800$  °С (б), от начального размера частицы гелеобразного топлива при варьировании температуры окружающей среды в диапазоне  $T_g=600$ – $1000$  °С (в). Области (выделены цветом) необходимых начальных условий для частиц гелеобразного топлива (начальный размер  $R_d$  и начальная температура  $T_0$ ) и окружающей среды (температура окружающей среды  $T_g$ ) для гарантированного зажигания в условиях диспергирования (г)

Установлены зависимости между характеристиками зажигания частиц маслonaполненных криогелей (время задержки зажигания, характерный размер области зажигания) и входными параметрами системы «топливо – воздух» (температура окружающей среды, начальная температура и начальный размер частиц топлива),

которые являются основой для разработки технических решений, направленных на применение гелеобразных топлив в теплоэнергетических и двигательных установках.

В заключении приведены основные **выводы** по результатам диссертационной работы.

## ВЫВОДЫ

1. Разработанные экспериментальные подходы, основанные на применении методик высокоскоростной видеорегистрации, малоинерционных контактных и бесконтактных методов измерения температуры, а также термогравиметрии, позволили установить пороговые значения температуры окружающей среды (550–650 °С), обеспечивающие воспламенение типичных гелеобразных топливных композиций в условиях диспергирования капель расплава. При варьировании параметров системы в широких пределах (исследованы частицы восьми составов гелеобразного топлива размером около 2 мм при температурах окружающей среды 600–1000 °С и концентрациях окислителя 5,5–21,0 %) времена задержки зажигания варьируются от 1 до 16 с, скорости движения мелкодисперсных фрагментов топлива после диспергирования капли расплава – от 0,3 до 1,4 м/с, средние размеры (диаметр) области выгорания компонентов топлива – от 7 до 15 мм.

2. Сформулирована и обоснована гипотеза, основанная на представлениях термодинамики смачивания и теории двухкомпонентной поверхностной энергии веществ и материалов, о влиянии компонентного состава гелеобразных топлив на закономерности и характеристики протекания их горения в условиях диспергирования. Диспергирование, обусловленное формированием гетерогенных центров парообразования, реализуется только при достижении условий нуклеации в окрестности раздела компонентов капли расплава. Поэтому необходимо, чтобы в топливной смеси в поверхностном натяжении одного жидкого компонента преобладала полярная составляющая (полярность > 50 %), а в поверхностном натяжении другого – дисперсионная составляющая (полярность ≤ 10 %). Диспергирование возможно интенсифицировать до 2,5 раз путем введения в состав гелеобразного топлива пористых горючих микрочастиц, воздушные пузырьки в порах которых служат дополнительными центрами гетерогенного зародышеобразования.

3. При проведении экспериментальных исследований в условиях лучисто-конвективного нагрева для составов гелеобразных топлив на основе маслонеполненного криогеля разработана физическая модель стадий развития процесса диспергирования. Частица гелеобразного топлива при нагревании переходит в жидкое состояние в результате плавления полимерного компонента, из-за разницы в поверхностном натяжении раствор загустителя образует оболочку на поверхности капли горючей жидкости. Дальнейший прогрев капли приводит к формированию гетерогенных зародышей пузырей на поверхности раздела жидкостей, паровые пузырьки увеличиваются в размерах и разрушают оболочку раствора загустителя, вдувая при схлопывании горючие пары и мелкодисперсные фрагменты топлива в высокотемпературную окружающую среду и интенсифицируя горение основной капли расплава топлива.

4. Добавление в гелеобразную топливную композицию металлических частиц в концентрации 30 % масс. снижает интенсивность диспергирования капель расплава топлива в 2,7–3,4 раза при прочих идентичных условиях по причине относительно высокой теплопроводности металлов. В результате воспламенение происходит либо с частичным диспергированием (в случае относительно небольшого повышения теплопроводности), либо без диспергирования (в случае высокой теплопроводности). Диспергирование протекает уже после газофазного воспламенения топлива (характерное

время пика интенсивности диспергирования принимает значения в 1,2–2,2 раза больше, чем для маслonaполненного криогеля без добавок) в условиях подвода дополнительной теплоты от горения паров горючей жидкости, что интенсифицирует массовую скорость выгорания компонентов основной капли расплава топлива до 2 раз.

5. На основании экспериментальных и теоретических исследований разработана двухстадийная математическая модель зажигания гелеобразных топлив на основе маслonaполненных криогелей в условиях диспергирования. Она включает модель достижения условий нуклеации при взаимодействии частицы гелеобразного топлива с окружающей средой в условиях лучисто-конвективного нагрева, а также модель зажигания единичного отделившегося фрагмента расплава гелеобразного топлива, учитывающую температурную неоднородность вблизи поверхности основной капли расплава топлива, обусловленную испарением раствора загустителя и горючей жидкости. Получено удовлетворительное соответствие результатов численного моделирования экспериментальным данным как на этапе достижения условий нуклеации (при варьировании температуры окружающей среды в диапазоне 400–800 °С отличие результатов не превышает 12 %; при варьировании начального размера частиц в диапазоне 0,05–2,00 мм отличие результатов не превышает 25 %), так и на последующем этапе зажигания частицы гелеобразного топлива в условиях диспергирования (при варьировании температуры окружающей среды в диапазоне 600–1000 °С отличие результатов не превышает 20 %; при варьировании начального размера частиц в диапазоне 0,05–2,00 мм отличие результатов не превышает 17 %).

6. С применением разработанных физических и математических моделей выполнены параметрические исследования, позволившие установить зависимости между выходными характеристиками (время задержки зажигания, характерный размер области зажигания) и входными параметрами (температура окружающей среды, начальная температура и начальный размер частиц топлива) для условий, соответствующих перспективным энергетическим установкам и двигателям.

7. С применением метода многопараметрического анализа проведена сравнительная оценка относительной эффективности исследованных составов гелеобразных топлив на основе совокупности их характеристик. Для топлива с добавлением мелкодисперсных углеродистых частиц и для маслonaполненного криогеля без добавок показатели относительной эффективности на 21–64 % выше, чем для остальных составов, что обусловлено как их оптимальными для реализации процесса диспергирования характеристиками (низкая эффективная теплопроводность, высокая пористость частиц, низкая температура зажигания компонентов), так и повышенной прочностью полимерной матрицы, подходящей для длительного хранения и транспортировки (низкая скорость испарения горючей жидкости, относительно высокая адсорбирующая способность твердых частиц).

## ОСНОВНЫЕ ПУБЛИКАЦИИ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ

### Публикации в изданиях, входящих в перечень российских рецензируемых научных журналов (перечень ВАК)

1. Глушков, Д. О. Характеристики микровзрывного диспергирования частиц гелеобразного топлива при зажигании в высокотемпературной воздушной среде / Д. О. Глушков, А. Г. Нигай, **К. К. Паушкина**, А. О. Плешко // Горение и взрыв. – 2022. – Т. 15, № 3. – С. 35–45.

2. Глушков, Д. О. Математическая модель зажигания частицы гелеобразного топлива в высокотемпературной воздушной среде / Д. О. Глушков, **К. К. Паушкина**, А. О. Плешко // Химическая физика. – 2023. – Т. 42, № 2. – С. 37–48.

### Публикации в изданиях, индексируемых в международных базах данных Scopus и Web of Science

1. Glushkov, D. O. Characteristics of micro-explosive dispersion of gel fuel particles ignited in a high-temperature air medium / D. O. Glushkov, **K. K. Paushkina**, A. O. Pleshko, V. S. Vysokomorny // Fuel. – 2022. – Vol. 313. – Article number 123024.

2. Glushkov, D. O. Ignition and combustion behavior of gel fuel particles with metal and non-metal additives / D. O. Glushkov, **K. K. Paushkina**, A. O. Pleshko, V. A. Yanovsky // Acta Astronautica. – 2023. – Vol. 202. – P. 637–652.

3. Glushkov, D. O. Gel fuels: Preparing, rheology, atomization, combustion (Review) / D. O. Glushkov, **K. K. Paushkina**, A. O. Pleshko // Energies. – 2023. – Vol. 16. – Article number 298.

### Патент на изобретение

1. Глушков Д. О., Нигай А. Г., **Паушкина К. К.** Упругодеформируемое гелеобразное топливо // Патент на изобретение, 25.07.2022, RU2794674 C1.

### Свидетельства о регистрации программ для ЭВМ

1. Антонов Д. В., Глушков Д. О., **Паушкина К. К.** Расчет характеристик воспламенения частицы гелеобразного топлива в высокотемпературной среде окислителя в условиях диспергирования // Программа для ЭВМ – 2022. – № 2022683130 – опубли. 01.12.2022.

2. Глушков Д. О., Клепиков Д. М., **Паушкина К. К.** Программа обработки видеозаписей для построения температурных полей нестационарных процессов горения и взрыва методом высокоскоростной двухцветной пирометрии // Программа для ЭВМ – 2022. – № 2022663029 – опубли. 11.07.2022.

3. Антонов Д. В., Глушков Д. О., **Паушкина К. К.** Расчет компонентного состава капли композиционного топлива в процессе выгорания // Программа для ЭВМ – 2021. – № 2021617043 – опубли. 05.05.2021.

Издание подготовлено в авторской редакции.  
Отпечатано на участке цифровой печати  
Издательства Томского государственного университета  
Заказ № \_\_\_\_\_ от «\_\_» \_\_\_\_\_ 2025 г. Тираж 100 экз.  
г. Томск, Московский тр. 8, тел. (3822) 53-15-28  
[publish.tsu.ru](http://publish.tsu.ru)