

На правах рукописи



Нига́й Алекса́ндр Гера́симович

**МЕХАНИЗМЫ И ХАРАКТЕРИСТИКИ ЗАЖИГАНИЯ
ГЕЛЕОБРАЗНЫХ ТОПЛИВ**

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

Автореферат
диссертации на соискание ученой степени
кандидата физико-математических наук

Томск – 2021

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

Научный руководитель:

Глушков Дмитрий Олегович, кандидат физико-математических наук.

Официальные оппоненты:

Палецкий Александр Анатольевич, доктор физико-математических наук, федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт химической кинетики и горения имени В.В. Воеводского Сибирского отделения Российской академии наук (г. Новосибирск), лаборатория кинетики процессов горения, ведущий научный сотрудник.

Прокофьев Вадим Геннадьевич, доктор физико-математических наук, доцент, федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования «Национальный исследовательский Томский государственный университет», физико-технический факультет, кафедра математической физики, профессор.

Защита состоится 3 ноября 2021 г. в 14 час. 00 мин. на заседании диссертационного совета ДС.ТПУ.06 при ФГАОУ ВО «Национальный исследовательский Томский политехнический университет» по адресу: 634050, г. Томск, ул. Усова, д. 7, уч. корпус 8, ауд. 217.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке ФГАОУ ВО «Национальный исследовательский Томский политехнический университет» и на сайте: dis.tpu.ru.

Автореферат разослан 7 сентября 2021 г.

Ученый секретарь диссертационного совета
кандидат физико-механических наук



Глушков Дмитрий Олегович

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы исследования. В последние годы перспективы освоения ближнего и дальнего космоса, а также районов Крайнего Севера являются основными стимулами для развития ракетно-космической отрасли и энергетического машиностроения. Решение этих задач требует комплексного подхода к проведению фундаментальных исследований и использованию их результатов на практике для принятия рациональных технических решений при проведении опытно-конструкторских работ. В связи с этим актуальна проблема разработки новых топлив, изучения закономерностей физико-химических процессов и характеристик их зажигания и горения, т.к. к настоящему времени потенциал широко используемых твердых и жидких топлив раскрыт в полной мере в рамках современного уровня развития науки и техники.

Среди широкого разнообразия перспективных топливных композиций стоит выделить гелеобразные топлива, преимущества которых по сравнению с жидкими и твердыми топливами состоят в аспектах безопасности (в случае утечки или разлива выделяется малое количество паров; низкая чувствительность к ударам, трению и электростатическим разрядам; низкая вероятность случайного воспламенения, т.к. горение является контролируемым и может быть предотвращено; трещины в структуре геля не влияют на увеличение площади горения и неконтролируемое горение или взрыв), производительности (относительно высокий удельный импульс и импульс плотности; относительно простое управление энергией) и хранения (возможность длительного хранения; гибкая упаковка; относительно низкое осаждение частиц).

Состояние гелеобразных топлив (определяемое реологическими и физико-механическими характеристиками) в зависимости от их назначения и характеристик окружающей среды может значительно отличаться – от жидкого (с высокой вязкостью) до твердого (упруго деформируемого). В рамках теории горения в полной мере изучены механизмы и характеристики процессов, протекающих при нагревании твердых и жидких конденсированных веществ, разработаны соответствующие прогностические математические модели. Закономерности взаимосвязанных физико-химических процессов и их характеристики при зажигании и горении гелеобразных топлив существенно отличаются. Поэтому актуальной задачей является установление механизмов и характеристик зажигания перспективных гелеобразных топлив, приготовленных путем загущения горючих жидкостей неорганическими и органическими загустителями, в том числе с добавлением мелкодисперсных твердых частиц.

Степень разработанности темы исследования. Существенный вклад в развитие тематики гелеобразных топлив внесли такие исследователи, как В.Н. Манжай, М.С. Фуфаева, S.W. Baek, H.K. Ciezki, B.L. Gupta, B.V.S. Jyoti, D.P. Mishra, B. Natan,

K.W. Naumann, M.B. Padhwal, S. Rahimi, Y. Solomon, F.A. Williams и другие. Среди основных направлений исследований в рамках тематики гелеобразных топлив в последнее время внимание уделяется детальному изучению закономерностей и характеристик процессов течения и распыления гелеобразных топлив, а также процессов их зажигания и горения. Результаты таких исследований являются основой для разработки математических моделей физико-химических процессов, способствующих интенсификации проведения опытно-конструкторских работ, направленных на практическое применение гелеобразных топлив в качестве перспективных энергоресурсов. В связи с этим до настоящего времени для гелеобразных топлив остаются актуальными проблемы фундаментального характера, состоящие в необходимости разработки способов приготовления топливных составов на основе разных компонентов, определения их реологических и физико-механических характеристик, а также установления механизмов и характеристик процессов зажигания и горения топливных составов при разных условиях подвода теплоты.

Целью работы является установление по результатам экспериментальных исследований закономерностей (механизмов, характеристик, условий) зажигания группы ранее неизученных перспективных составов гелеобразных топлив на основе неорганических и полимерных органических загустителей, в том числе структурно-неоднородных, содержащих твердые мелкодисперсные горючие частицы, при лучисто-конвективном и локальном кондуктивном нагреве.

Цель достигается в диссертации путем решения следующих задач:

1. Экспериментальное обоснование возможности приготовления группы перспективных составов (пластически и упруго деформируемых) гелеобразных топлив, в том числе содержащих мелкодисперсные твердые горючие компоненты, и определение для этих составов реологических и физико-механических характеристик первичных топливных эмульсий и пеллет, соответственно.

2. Разработка экспериментальных методик, отличающихся от известных использованием программно-аппаратных комплексов высокоскоростной видеорегистрации быстропротекающих процессов, малоинерционной контактной регистрации температуры, для исследования процессов зажигания гелеобразных топлив при нагревании одиночных частиц в высокотемпературной среде окислителя и при взаимодействии топливных зарядов с локальными источниками нагрева с конечным запасом энергии.

3. Определение по результатам экспериментальных исследований процессов зажигания и горения группы перспективных составов гелеобразных топлив на основе этанола, керосина, дизельного топлива, отработанного масла, в том числе с добавлением мелкодисперсных твердых горючих частиц, основных характеристик и условий зажигания таких топлив.

4. Установление механизмов зажигания гелеобразных топлив в широких диапазонах варьирования параметров группы значимых факторов (температура источника нагрева, начальная температура топлива, компонентный состав топлива, начальный размер топливных частиц).

5. Разработка физических моделей процессов зажигания и горения гелеобразных топлив при нагреве одиночных частиц топлива в высокотемпературной среде окислителя и локальном кондуктивном нагреве топливных пеллет источником ограниченного теплосодержания.

Научная новизна работы. Впервые на основании результатов выполненного цикла экспериментальных исследований, состоящего в обосновании возможности приготовления топливных составов, определении реологических характеристик эмульсий и суспензий и физико-механических характеристик пеллет, установлении основных закономерностей и определении значимых характеристик процессов инициирования горения, разработана группа физических моделей зажигания гелеобразных топлив на основе этилового спирта, керосина, дизельного топлива, отработанного масла нефтяного происхождения, в том числе с добавлением мелкодисперсных твердых горючих компонентов, описывающих физико-химические процессы, протекающие при нагреве частиц топлива (или капель расплава) в высокотемпературной среде окислителя и при локальном кондуктивном нагреве топливных пеллет источником с конечным запасом энергии.

Теоретическая значимость. Результаты выполненных экспериментальных исследований представляют собой новые знания о механизмах и характеристиках протекания физико-химических процессов в теории горения конденсированных веществ, а также являются основой для разработки и верификации в перспективе математических моделей и алгоритмов численного решения задач зажигания и горения группы гелеобразных топлив, отличающихся компонентным составом, при разных механизмах подвода теплоты.

Практическая значимость. Для гелеобразных топлив, приготовленных на основе группы жидких горючих компонентов, определены предельные условия устойчивого зажигания, минимальные температуры источника энергии, необходимые для инициирования горения. Выявлены основные закономерности протекания физико-химических процессов в течение индукционного периода. Установлено влияние группы значимых факторов на характеристики зажигания.

Разработаны рекомендации для приготовления перспективных составов гелеобразных топлив, включающие описание способов подготовки компонентов, методов и условий их перемешивания, обеспечивающие стабильность топливных эмульсий и однородность структуры топливных пеллет.

Результаты диссертационной работы могут использоваться в авиакосмической отрасли, теплоэнергетике и энергетическом машиностроении для проектирования камер сгорания новых двигателей, расширения номенклатуры сырьевой топливной базы, обеспечения норм и требований пожаровзрывобезопасности, снижения экологической угрозы для окружающей среды.

Методы исследования. Вязкость топливных эмульсий определена с использованием вискозиметра в рамках широко известных методик (измерение в условиях регулируемого внешнего давления вискозиметрами Убеллоде и гидростатического давления вискозиметрами Оствальда, Кэннон-Фэнске и Пинкевича). Измерение скорости сдвига в областях низких и средних значений проводилось с применением реометра. Реологическое поведение топливных эмульсий описано в рамках модели Гершеля-Балкли, применяемой для описания характеристик течения псевдопластических жидкостей.

Исследование характеристик упругой деформации топливных пеллет выполнено с использованием стандартной методики в рамках модели упругой деформации на основе закона Гука. Модуль упругости определялся по экспериментальным данным, полученным при измерении деформации цилиндрического пеллета вдоль оси симметрии, в виде разницы его размеров до приложения и после снятия нагрузки, а также контролируемого значения напряжения, создаваемого в пеллете.

Экспериментальные исследования процессов зажигания и горения выполнены в рамках хорошо апробированной методики с использованием средств программно-аппаратного комплекса видеорегистрации быстропротекающих процессов, включающего высокоскоростную цветную видеокамеру Phantom V411 (Vision Research, США), программное обеспечение Tema Automotive (Image Systems AB, Швеция). При зажигании гелеобразного топлива металлической частицей выполнялось измерение температуры топливного пеллета в условиях плавления на разной глубине слоя с использованием малоинерционных термопар и высокоскоростного аналого-цифрового преобразователя. Для определения теплового потока, подводимого к частице (или капле расплава) гелеобразного топлива в течение индукционного периода, применялся оригинальный алгоритм, основанный на экспериментальных данных интенсивного изменения температур частицы (или капли расплава) и окружающей парогазовой среды в ее окрестности.

Положения, выносимые на защиту:

1. Обоснована возможность приготовления перспективных гелеобразных топлив при использовании в качестве загустителей полимерных криогелей. В результате цикла заморозки / оттаивания при температурах минус 15 °С и плюс 20 °С, соответственно, топливная эмульсия переходит в гелеобразное состояние, обусловленное формирова-

нием полимерной матрицы, в ячейках которой расположены мелкодисперсные капли горючей жидкости. Содержание последней в топливе может достигать 80 % (при концентрации загустителя в водном растворе 10 %).

2. Впервые экспериментально установлены механизмы зажигания одиночных частиц трех групп гелеобразных топлив на основе полимерного загустителя: маслonaполненных криогелей (без добавления твердых частиц); маслonaполненных криогелей, содержащих мелкодисперсные (менее 140 мкм) твердые горючие частицы; безмасляных криогелей, содержащих мелкодисперсные частицы. Для первого и второго механизмов характерно диспергирование капли расплава, интенсифицирующее прогрев и зажигание компонентов гелеобразного топлива. Третий механизм – аналогичен процессу зажигания частицы твердого натурального топлива.

3. Частицы гелеобразных топлив (массой 7–13 мг, размерами 2,5–3,1 мм) на основе широко распространенных горючих жидкостей (отработанное масло, рапсовое масло, этиловый спирт, дизельное топливо, керосин), в том числе с добавлением мелкодисперсных твердых горючих частиц, устойчиво воспламеняются (с последующим полным выгоранием) в условиях лучисто-конвективного нагрева при температурах источника 550–1000 °С. Времена задержки зажигания в зависимости от интенсивности подвода теплоты и компонентного состава топлива составляют 0,5–15 с (1–15 с для составов на основе маслonaполненных криогелей, 0,5–7 с для аналогичных составов с добавлением мелкодисперсных горючих частиц, 2–15 с для составов на основе мелкодисперсных твердых частиц без добавления жидкого горючего компонента). Если топливо не начало гореть в течение этого промежутка времени, то оно не будет гореть при более длительных временах вследствие полного испарения компонентов.

4. Варьирование начальной температуры топлива в широком диапазоне от -85 до 20 °С не влияет на механизм зажигания и горения топлива, но оказывает существенное влияние на время задержки зажигания. Чем меньше начальная температура топлива, тем больше длительность индукционного периода. Времена задержки зажигания и времена выгорания частиц топлив с температурой 20 °С и температурами в диапазоне от -85 до -40 °С отличаются на 25–95 %.

5. Впервые установлены скорости вдува паров в среду окислителя и движения мелкодисперсных фрагментов при диспергировании капель расплавов группы гелеобразных топлив. Скорости вдува паров горючего в окружающую газовую среду вблизи поверхности капли составляют до 3 м/с, размеры зон их распространения изменяются от 6 до 8 мм в зависимости от условий нагрева. Скорости движения мелкодисперсных фрагментов для криогелей на основе горючей жидкости составляют 1–2 м/с, для аналогичных составов с добавлением мелкодисперсных твердых частиц 1,5–2,5 м/с. Объемы

соответствующих областей выгорания мелкодисперсных фрагментов составляют $0,7-8,0 \text{ см}^3$ и $1,5-13,5 \text{ см}^3$.

6. Впервые экспериментально установлен механизм зажигания пеллет гелеобразных топлив разогретыми до высоких температур металлическими частицами, отличающийся от механизма зажигания горючих жидкостей последовательным протеканием двух фазовых превращений в течение индукционного периода и постепенным погружением локального источника энергии в приповерхностный слой топлива. В таких условиях время задержки зажигания не превышает длительности процесса полного погружения остывающей частицы в расплав топлива.

Степень достоверности результатов. При проведении экспериментальных исследований использовались современные методы обработки полученных данных с применением метрологически аттестованной контрольно-измерительной аппаратуры. Контроль температуры при заморозке гелеобразных топлив в морозильной камере Artico ULUF 15 обеспечивался встроенным термопреобразователем сопротивления НСХ Pt1000 с погрешностью измерения не более $0,1 \text{ }^\circ\text{C}$. При приготовлении топлив измерение объемных долей компонентов выполнялось при помощи стеклянных колб первого класса точности с погрешностью не более $0,5 \%$, выполненных по ГОСТ 1770-74. Массовые доли компонентов топлив определялись при взвешивании на электронных аналитических весах ViBRA AJH-420CE с дискретностью измерения 1 мг и погрешностью не более 5 мг . Допускаемая приведенная погрешность измерения вязкости эмульсий и суспензий вискозиметром Brookfield DV составляла менее 1% . При определении модуля упругости и предела прочности топливных пеллет применялся манометр МПТИ с классом точности $0,4$ и погрешностью измерения $0,24 \text{ кПа}$. Относительная погрешность измерения теплоты сгорания топлива аналитическим калориметром составляла не более $0,1 \%$. В экспериментах температура нагрева топливных и металлических частиц – источников зажигания контролировалась встроенной в муфельную печь термопарой НСХ ХА с погрешностью $\pm 1 \text{ }^\circ\text{C}$. Систематическая погрешность определения времен задержки зажигания не превышала $0,5 \%$. Случайные погрешности для серий из 5–10 экспериментов, выполненных при идентичных начальных условиях, составляли менее 10% . Погрешность канала измерения температуры топлива (для определения скорости распространения фронта плавления по координате соответствующей изотермы), состоящего из малоинерционной термопары НСХ ХА и осциллографа Rigol, составляла $1,5 \%$.

Связь работы с научными программами и грантами. Диссертационная работа выполнена на стыке двух направлений научной деятельности Национального исследовательского Томского политехнического университета «Рациональное природопользование и глубокая переработка природных ресурсов» и «Традиционная и атомная энер-

гетика, альтернативные технологии производства энергии». Основные результаты исследований в виде экспериментальных методик, теоретических следствий применяются в Национальном исследовательском Томском политехническом университете при подготовке магистров техники и технологии по направлениям «Теплоэнергетика и теплотехника», «Энергетическое машиностроение», а также аспирантов по направлениям «Физика и астрономия», «Электро- и теплотехника».

Тема диссертации соответствует приоритетным направлениям развития науки, технологий и техники в Российской Федерации (Указ Президента Российской Федерации № 899 от 7 июля 2011 года): «Транспортные и космические системы», «Энергоэффективность, энергосбережение, ядерная энергетика», а также Программе фундаментальных научных исследований в Российской Федерации на долгосрочный период (2021–2030 годы) (Распоряжение Правительства Российской Федерации № 3684-р от 31 декабря 2020 года): подпрограмма 2 «Фундаментальные и поисковые научные исследования».

Диссертационная работа выполнена в рамках реализации грантов РНФ № 18-13-00031 «Разработка физических и математических моделей зажигания гелеобразных топлив в условиях, характерных для космоса, Арктики и Антарктики» (2018–2020 гг., 2021–2022 гг.).

Личный вклад автора состоит в постановке задачи; планировании и проведении экспериментальных исследований; оценке случайных погрешностей измерения группы регистрируемых характеристик; обработке, анализе и обобщении полученных результатов; формулировании практических рекомендаций; апробации результатов на научных конференциях и их опубликовании в рецензируемых периодических научных изданиях; формулировке защищаемых положений и основных выводов диссертационной работы.

Апробация результатов. Основные положения и результаты диссертационного исследования докладывались и обсуждались на следующих научных мероприятиях: XXII Международный научный симпозиум студентов и молодых ученых имени академика М.А. Усова «Проблемы геологии и освоения недр», г. Томск, 2–7 апреля 2018 г.; Международная молодежная научная конференция «Тепломассоперенос в системах обеспечения тепловых режимов энергонасыщенного технического и технологического оборудования», г. Томск, 24–26 апреля 2018 г.; XV Международная конференция студентов, аспирантов и молодых ученых «Перспективы развития фундаментальных наук», г. Томск, 24–27 апреля 2018 г.; Международная научно-практическая конференция студентов и молодых ученых «Химия и химическая технология в XXI веке» имени профессора Л.П. Кулева, г. Томск, 21–24 мая 2018 г.; Международная конференция «Физика и химия горения (ConfPhysChem'18)», г. Самара, 24–28 июля 2018 г.; XXI Всероссийская научная конференции с международным участием «Сопряженные

задачи механики реагирующих сред, информатики и экологии», г. Томск, 17–19 сентября 2018 г.; Международная научно-практическая конференция «Экологическая, промышленная и энергетическая безопасность – 2018», г. Севастополь, 24–27 сентября 2018 г.; XV Всероссийская школа-конференция молодых ученых с международным участием «Актуальные вопросы теплофизики и физической гидрогазодинамики», г. Новосибирск, 20–23 ноября 2018 г.; Международная молодежная научная конференция «Тепломассоперенос в системах обеспечения тепловых режимов энергонасыщенного технического и технологического оборудования», г. Томск, 23–25 апреля 2019 г.; XXII Школа-семинар молодых ученых и специалистов под руководством академика А.И. Леонтьева «Проблемы газодинамики и тепломассообмена в энергетических установках», г. Москва, 20–24 мая 2019 г.; Всероссийская конференция «XXXV Сибирский теплофизический семинар», г. Новосибирск, 27–29 августа 2019 г.; 9-й Международный симпозиум по неравновесным процессам, плазме, горению и атмосферным явлениям NERCAR-2020, г. Сочи, 5–9 октября 2020 г.; XVI Всероссийская школа-конференция молодых ученых с международным участием «Актуальные вопросы теплофизики и физической гидрогазодинамики», г. Новосибирск, 24–27 ноября 2020 г.

Публикации. По теме диссертации опубликовано 7 научных работ общим объемом 10 печатных листов в высокорейтинговых зарубежных периодических изданиях, индексируемых международными наукометрическими базами данных Web of Science и Scopus: International Journal of Heat and Mass Transfer (ИФ=4,947, Q1); Journal of the Energy Institute (ИФ=4,748, Q1); Energy and Fuels (ИФ=3,421, Q2); Industrial and Engineering Chemistry Research (ИФ=5,278, Q1); Powder Technology (ИФ=4,142, Q1); Thermochemica Acta (ИФ=2,762, Q2); Acta Astronautica (ИФ=2,83, Q1). Опубликовано 13 работ в материалах всероссийских и международных конференций и симпозиумов.

КРАТКОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Структура и объём работы. Диссертационная работа состоит из введения, трех глав, заключения и списка литературы из 271 наименования; содержит 187 страниц машинописного текста, 55 рисунков и 11 таблиц.

Во введении обоснована актуальность темы диссертационной работы, сформулированы цель и задачи исследования, отражена научная новизна работы, ее теоретическая и практическая значимость, обоснована достоверность полученных результатов, приведены положения, выносимые на защиту и сведения об их апробации.

В главе 1 отражено современное состояние теоретических и экспериментальных исследований по тематике гелеобразных топлив. Выделено четыре основных направления исследований: разработка топливных составов на основе разных компонентов и изучение их реологических характеристик; исследование процессов течения гелеоб-

разных топлив (неньютоновских жидкостей) в каналах, их впрыск в камеру сгорания и последующее распыление; изучение процессов зажигания и горения топливных составов; применение топлив на практике в качестве перспективных энергоресурсов.

Сделан вывод о том, что в связи с широкой номенклатурой топливных составов влияние их компонентов на закономерности протекания и характеристики физико-химических процессов во время индукционного периода остается не изученным в полной мере. Также широко не представлены результаты исследований влияния диспергирования капли расплава топлива на механизм и характеристики зажигания.

Глава 2 содержит описание разработанных технологий приготовления четырех групп составов (пластически и упруго деформируемых) перспективных гелеобразных топлив, методик определения реологических характеристик топливных эмульсий и физико-механических характеристик топливных пеллет.

Гелеобразные топлива, рассматриваемые в рамках диссертационной работы, состоят из основного жидкого горючего компонента и загустителя. Кроме этого некоторые топливные составы содержат мелкодисперсные твердые горючие частицы. В качестве жидких горючих компонентов использовались: этанол, керосин, дизельное топливо и промышленное масло. Для формирования гелеобразной структуры топлив применялись неорганические (аэросил) и полимерные органические (поливиниловый спирт) загустители. В качестве модельного гелеобразного топлива использовалась тяжелая нефть с высоким содержанием парафинов. Методики приготовления разных составов гелеобразных топлив отличаются, но основным этапом является перемешивание компонентов топлива для растворения жидких или твердых мелкодисперсных (размер частиц составляет менее нескольких сотен микрометров) загустителей в горючей жидкости. В процессе приготовления состава компоненты топлива могут нагреваться для интенсификации их растворения путем перемешивания мешалкой или гомогенизатором для получения однородной структуры. Время перемешивания компонентов также может варьироваться в широких диапазонах от нескольких минут до нескольких часов.

На рисунке 1 представлена схема приготовления топливных составов на основе криогеля (водный раствор поливинилового спирта – ПВС). Экспериментально обоснована возможность приготовления группы составов однородных гелеобразных топлив на основе маслонеполненных криогелей: 100–20 % об. водный раствор ПВС (5, 10 % масс.) + 0–80 % об. масло, а также группы составов структурно-однородных гелеобразных топлив с добавлением мелкодисперсных твердых частиц (угольной пыли дисперсностью менее 140 мкм) на основе безмасляных и маслонеполненных криогелей: 90–50 % масс. водный раствор ПВС (10 % масс.) + 10–50 % масс. уголь; 37,8 % масс. водный раствор ПВС (10 % масс.) + 30 % масс. уголь + 32,2 % масс. масло.

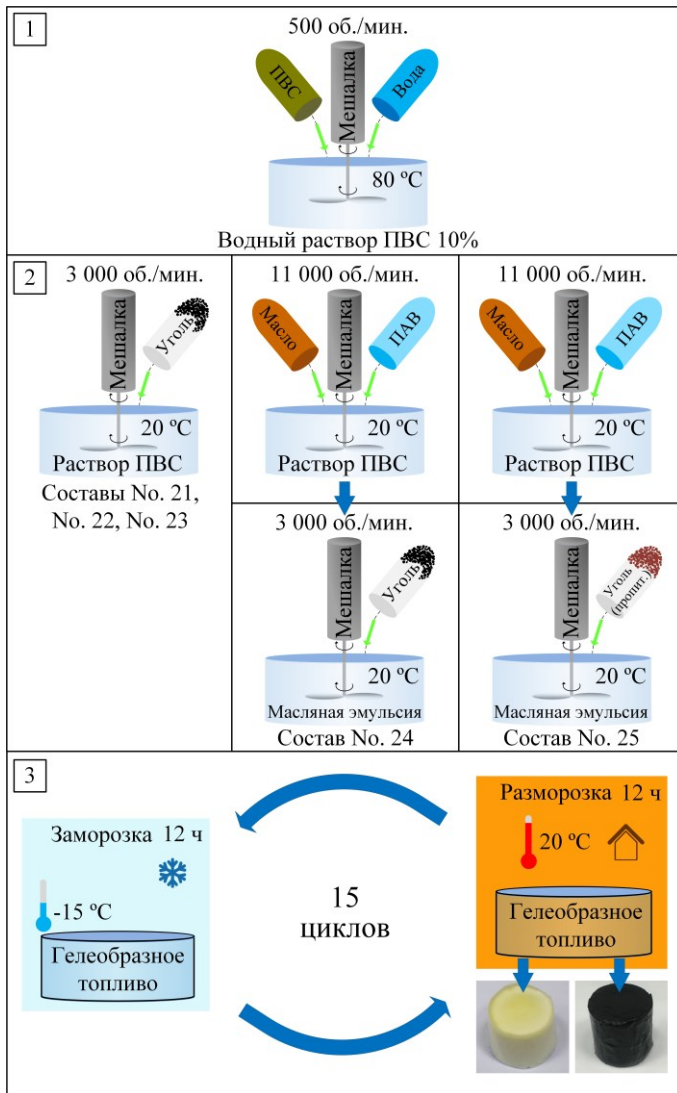


Рисунок 1 – Схема приготовления гелеобразных топлив на основе криогелей

При приготовлении маслonaполненных криогелей применялся эмульгатор Tween 80 (поверхностно-активное вещество – ПАВ) для повышения седиментационной устойчивости эмульсий.

Кроме этого экспериментально обоснована возможность приготовления группы составов гелеобразных топлив на основе керосина и дизельного топлива с применением загустителя диоксида кремния и противотурбулентной присадки: К-100 (100 % керосин), К-99 (1 % масс. диоксид кремния), К-95 (5 % масс. диоксид кремния), К-90 (10 % масс. диоксид кремния), К-85 (15 % масс. диоксид кремния), D-100 (100 % дизельное топливо), D-FTA (0,04 % масс. противотурбулентная присадка ForeFTA по ТУ 2458-002-10022712-2015), D-FTA02 (0,04 % масс. противотурбулентная присадка ForeFTA-02 по ТУ 20.59.42-015-10022712-2018).

Измерения реологических характеристик приготовленных топливных эмульсий проводились на вискозиметре Brookfield DV в диапазоне скоростей 0,1–250 об./мин.

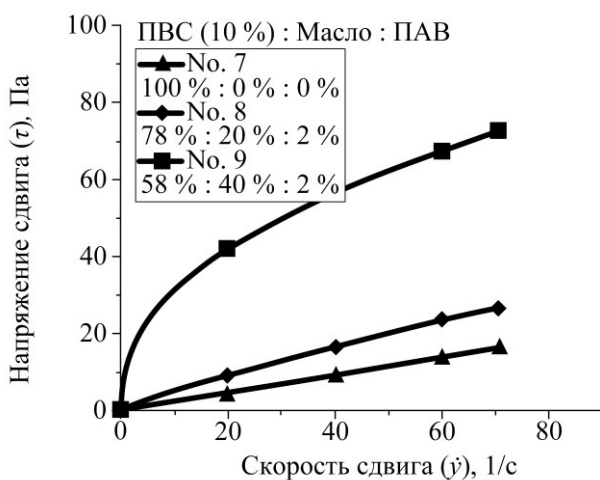


Рисунок 2 – Кривые течения эмульсий на основе 10 %-го водного раствора ПВС с разной концентрацией масла

Перед измерением каждый образец термостатировался при 20 °С в течение 30 минут. Погрешность при измерении температуры составляла $\pm 0,2$ °С. Для обработки данных использовалось ПО Brookfield Rheocalc T 1.1.13. Типичные кривые течения и кривые вязкости представлены на рисунках 2 и 3, соответственно.

Для описания реологического поведения масляных эмульсий использована модель Гершеля-Балкли ($\tau = \tau_0 + K \cdot \dot{\gamma}$), которая достаточ-

но хорошо описывает реологические свойства псевдопластических жидкостей и, как правило, применяется при анализе течения концентрированных эмульсий. Для приготовленных топливных эмульсий разного компонентного состава на основе результатов выполненного экспериментального исследования получены значения параметров в уравнении Гершеля-Балкли. Дисперсная фаза в водном растворе ПВС в виде мелкодисперсных капель масла характеризует псевдопластические свойства эмульсий. С ростом содержания дисперсной фазы в эмульсиях увеличивается отклонение их реологического поведения от ньютоновского течения жидкости (рисунки 2 и 3).

Исследование характеристик упругой деформации приготовленных топливных пеллет выполнено при температуре 20 °С. На гидравлическом прессе к цилиндрическим пеллетам прикладывалась нагрузка и регистрировалась деформация (γ) вдоль оси симметрии. Значения γ контролировались по показаниям электронного штангенциркуля. Создаваемые в пеллете напряжения (P) варьировались в диапазоне от 0,5 до 6,5 кПа и контролировались по показаниям эталонного преобразователя давления. В таком диапазоне напряжений деформация пеллет описывалась в рамках модели упругой деформации. Модуль упругости (G) топливных пеллет рассчитывался по формуле Гука $P=G\gamma$. Типичные результаты приведены на рисунке 4. Стоит отметить, что кроме модулей упругости и пределов прочности топливных пеллет установлен выход влаги (горючей жидкости) в условиях упругой деформации вдоль оси симметрии при приложении нагрузки 6,5 кПа. Установлено, что максимальная потеря влаги не превышала 4%. Полимерная матрица надежно удерживает мелкодисперсные капли масла в составе топлива до температуры 65 °С (температура плавления). Горючая жидкость не выходит на поверхность топливного пеллета, что снижает экологическую и пожарную опасность по сравнению с жидким топливом в обычном состоянии.

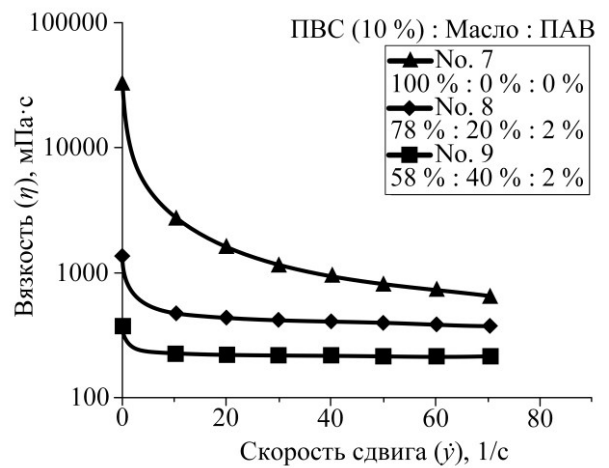


Рисунок 3 – Кривые вязкости эмульсий на основе 10 %-го водного раствора ПВС с разной концентрацией масла

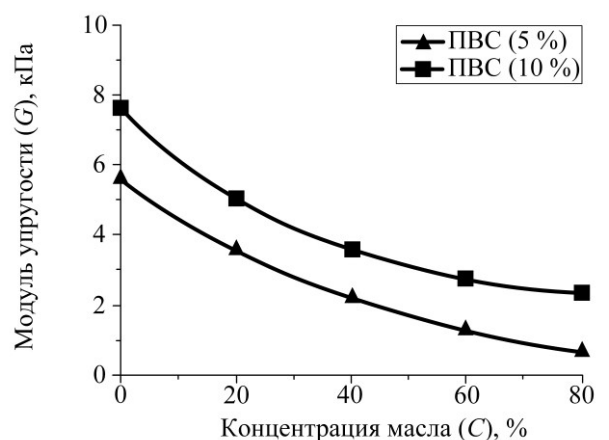


Рисунок 4 – Зависимости модуля упругости топливных пеллет маслonaполненных криогелей от концентрации масла при разных концентрациях водного раствора ПВС

В главе 3 приведены результаты исследования основных закономерностей и определения характеристик процессов зажигания гелеобразных топлив: маслонеполненных криогелей (без добавления твердых частиц); маслонеполненных криогелей, содержащих мелкодисперсные (менее 140 мкм) твердые горючие частицы; безмасляных криогелей, содержащих мелкодисперсные частицы; составов на основе этилового спирта с загустителем, на основе дизельного топлива с противотурбулентной присадкой в качестве загустителя, на основе керосина с диоксидом кремния, а также модельного состава на основе тяжелой нефти с высоким содержанием парафинов. Механизмы и характеристики зажигания гелеобразных топлив установлены в широких диапазонах варьирования параметров группы значимых факторов (температуры источника нагрева, начальной температуры топлива, компонентного состава топлива, начального размера топливных частиц).

Исследования выполнены в условиях локального кондуктивного нагрева топливных пеллет разогретыми до высоких температур металлическими частицами в форме

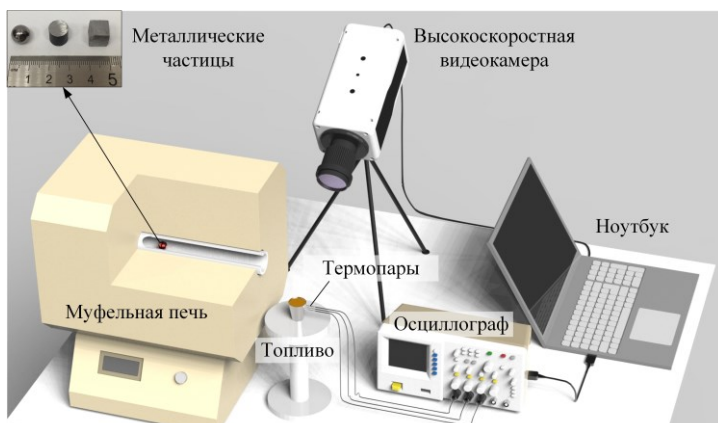


Рисунок 5 – Схема экспериментального стенда локального кондуктивного нагрева топлива металлическими частицами

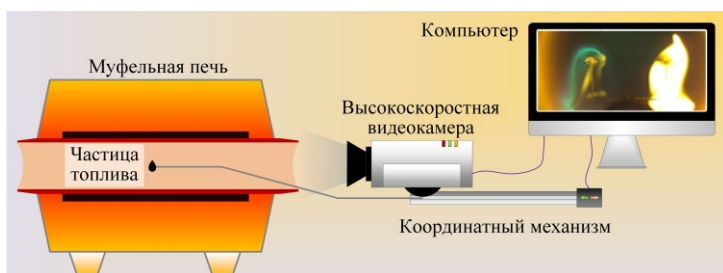


Рисунок 6 – Схема экспериментального стенда лучисто-конвективного нагрева частицы топлива

сферы, диска, куба с характерным размером 10 мм (рисунок 5), а также в условиях лучисто-конвективного нагрева одиночных топливных частиц массой 5, 10, 20 мг в полости предварительно прогретой муфельной печи (рисунок 6).

При идентичных начальных условиях проводились серии из 5–10 экспериментов. Процессы, протекающие в течение индукционного периода, регистрировались высокоскоростной видеокамерой Phantom V411 (Vision Research, США). Обработка и анализ видеозаписей выполнялись при помощи ПО Tema Automotive (Image Systems AB, Швеция).

Программно-аппаратный комплекс высокоскоростной видеорегистрации позволял проводить детальный анализ взаимосвязанных физико-химических процессов в течение индукционного периода, определять времена задержки зажигания (t_d). Значения t_d вычислялись по длительности временного периода между моментами, соответствующими двум событиям. Первое событие – это начало нагрева топлива ($t=0$), которое

контролировалось с помощью автотриггера по моменту контакта металлической частицы с поверхностью топливного пеллета (рисунок 5) или ввода частицы топлива в полость муфельной печи (рисунок 6). Второе событие – это зажигание топлива ($t=t_d$), которое контролировалось по моменту достижения предельного значения интенсивности свечения в области видеорегистрации. Алгоритм обработки видеозаписей (ПО Tema Automotive) покадрово контролировал значения оттенков серого (от 0 до 255 – от черного до белого цвета, соответственно) в каждой точке (пикселе) области видеорегистрации (в черно-белой цветовой гамме). В этой цветовой гамме интервал интенсивности свечения 220–255 соответствовал процессу горения топлива. Момент зажигания регистрировался автоматически по достижению (или превышению) значения интенсивности свечения 220 (в оттенках серого) в какой-либо точке в контролируемой окрестности металлической частицы (рисунок 5) или капли расплава топлива (рисунок 6). После определения момента зажигания алгоритм обработки видеозаписи контролировал устойчивость этого процесса по нарастанию среднего значения интенсивности свечения в области видеорегистрации. Систематическая погрешность определения времен t_d , обусловленная скоростью видеорегистрации (минимум 1000 к/с), не превышала 0,5 %. Случайные погрешности для серий из 5–10 экспериментов, выполненных при идентичных начальных условиях, составляли не более 10 % в широком диапазоне варьирования температур источников нагрева.

Типичные кадры зажигания модельного гелеобразного топлива (тяжелой нефти) в условиях локального кондуктивного нагрева источником ограниченного теплосодержания приведены на рисунке 7.

Приповерхностный слой топлива прогревался за счет энергии локального источника в результате кондуктивной

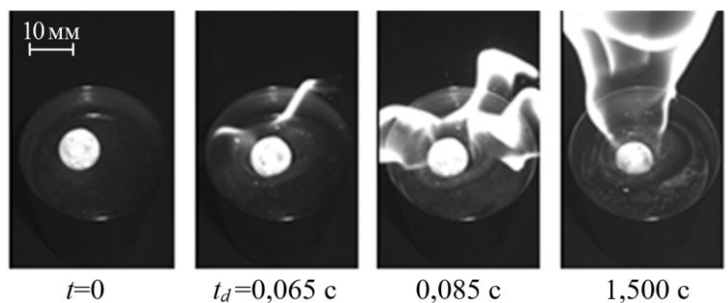


Рисунок 7 – Кадры видеogramмы зажигания гелеобразного топлива при его начальной температуре $-13\text{ }^{\circ}\text{C}$ стальной частицей в форме сферы размером 10 мм с начальной температурой $1077\text{ }^{\circ}\text{C}$

теплопередачи. Металлическая частица остывала в течение индукционного периода. В результате теплоотвода в топливо и окружающую газовую среду температура частицы уменьшалась на $100\text{--}150\text{ }^{\circ}\text{C}$ при близких к предельным условиям зажигания. В окрестности границы контакта горячей частицы с топливом последовательно реализовывались два эндотермических фазовых перехода – плавление и испарение. После внедрения металлической частицы в приповерхностный слой гелеобразного топлива в результате инерционного осаждения она погружалась в топливо еще на $1\text{--}2\text{ мм}$ при его плавлении в течение быстропротекающего индукционного периода. В экспериментах не

было зарегистрировано кипение расплавленного топлива до момента зажигания. Полученный результат позволяет сделать вывод о том, что относительно холодные горючие пары поступали в газовую среду с поверхности расплавленного гелеобразного топлива. Температура начала кипения топлива составляла около $77\text{ }^{\circ}\text{C}$ (легкие фракции). Таким образом, температура продуктов испарения расплавленного топлива, поступающих в газовую среду, не превышала это значение. В окрестности локального источника энергии формировалась горючая парогазовая смесь. Она прогревалась при движении вдоль боковых граней горячей частицы. Газофазное зажигание (рисунок 7) происходило при достижении предельных концентраций горючих паров и температуры парогазовой смеси.

Установленные зависимости $t_d=f(T_p)$ (рисунок 8) имеют близкий к линейному характер при варьировании начальной температуры горячей частицы в достаточно широком диапазоне $T_p=777\text{--}1077\text{ }^{\circ}\text{C}$. Интенсивность переходного процесса возрастает менее чем на 30 % при большем теплосодержании источника энергии, характеризующем его начальной температурой. Результаты выполненного исследования позволили сделать вывод, что основной характеристикой зажигания гелеобразного топлива при локальном нагреве является минимальная температура частицы, необходимая для инициирования горения. Увеличение начальной температуры локального источника энергии при превышении пороговых условий для зажигания топлива несущественно влияет на снижение времени задержки зажигания (рисунок 8) при умеренно низких (от -73 до $17\text{ }^{\circ}\text{C}$) начальных температурах топлива.

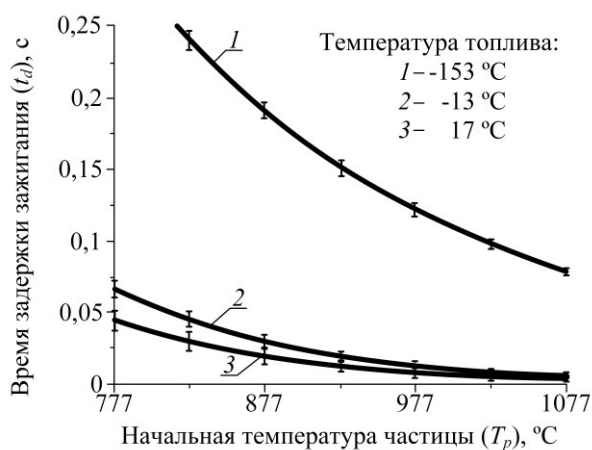


Рисунок 8 – Времена задержки зажигания гелеобразного топлива в зависимости от начальной температуры стальной частицы в форме сферы размером 10 мм

При близких к криогенным начальным температурам топлива ($-153\text{ }^{\circ}\text{C}$) длительность индукционного периода возрастает в 3–5 раз (рисунок 8) по сравнению с областью умеренно низких (от -73 до $17\text{ }^{\circ}\text{C}$) температур. Полученный результат объясняется достаточно существенным влиянием стадий инертного прогрева и плавления топлива на времена задержки зажигания. В таких условиях требуются большие затраты энергии на инициирование горения топлива. С течением времени из-за теплоотвода в окружающую среду температура металлической частицы достаточно существенно снижается. Совокупное влияние этих взаимосвязанных процессов проявляется в увеличении времен задержки зажигания.

При проведении исследований с использованием экспериментального стенда, схема которого приведена на рисунке 6, начальные массы частиц гелеобразных топлив

При проведении исследований с использованием экспериментального стенда, схема которого приведена на рисунке 6, начальные массы частиц гелеобразных топлив

и капля горючих жидкостей в обычном состоянии были идентичны. Далее будут представлены результаты для образцов топлив массой 10 мг. На рисунках 9–12 приведены типичные кадры видеороликов процессов зажигания капли индустриального масла в обычном состоянии и частиц группы составов гелеобразного топлива на основе смеси этого масла с полимерным загустителем (ПВС): 48 % об. водный раствор ПВС (10 % масс.) + 50 % об. масло + 2 % об. ПАВ (рисунок 10); 70 % масс. (48 % об. водный раствор ПВС (10 % масс.) + 50 % об. масло + 2 % об. ПАВ) + 30 % масс. уголь (рисунок 11); 70 % масс. водный раствор ПВС (10 % масс.) + 30 % масс. уголь (рисунок 12).

Установлено, что если частица гелеобразного топлива не зажглась в течение определенного промежутка времени, то она (как и капля жидкого топлива) не начнет гореть и при более длительных временах прогрева, т.к. компоненты топлива полностью испарятся. Далее будут приведены только результаты устойчивого зажигания, т.е. если топливо начинало гореть, то процесс протекал до полного выгорания его компонентов.

Полученные результаты (рисунки 9–12) позволяют сделать вывод о существенно разных механизмах зажигания как жидких и гелеобразных топлив, так и разных компонентных составов последних.

В условиях нагрева горючей жидкости в обычном состоянии испарение протекает на поверхности капли. В ее окрестности формируется горючая парогазовая смесь. Т.к. фазовое превращение протекает при температурах, не превышающих температуру кипения жидкости при атмосферном давлении, то формирующаяся парогазовая смесь в среде окислителя прогревается в течение некоторого времени до достижения предельных условий (концентрации горючего и температуры), необходимых для ее зажигания. В процессе выгорания масла размер капли жидкости монотонно

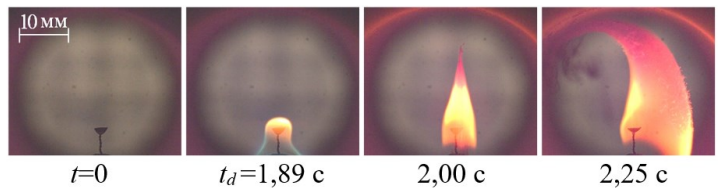


Рисунок 9 – Кадры видеороликов зажигания капли масла при $T_g=800\text{ }^\circ\text{C}$

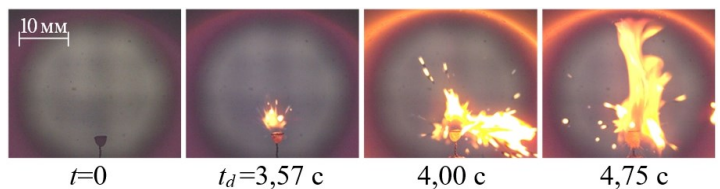


Рисунок 10 – Кадры видеороликов зажигания частицы гелеобразного топлива на основе маслonaполненного криогеля при $T_g=800\text{ }^\circ\text{C}$

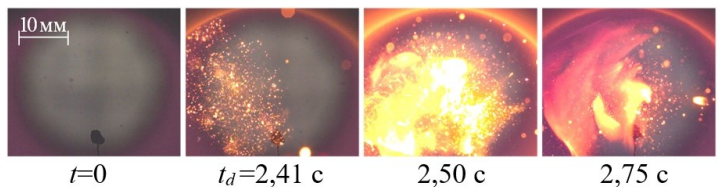


Рисунок 11 – Кадры видеороликов зажигания частицы гелеобразного топлива на основе маслonaполненного криогеля, содержащего частицы угля, при $T_g=800\text{ }^\circ\text{C}$

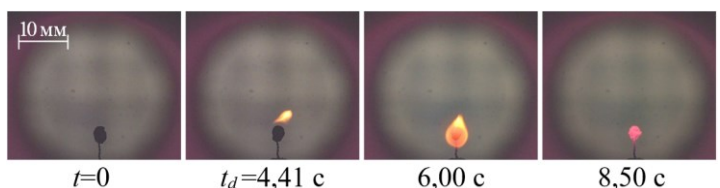


Рисунок 12 – Кадры видеороликов зажигания частицы гелеобразного топлива на основе безмасляного криогеля, содержащего частицы угля, при $T_g=800\text{ }^\circ\text{C}$

уменьшается (рисунок 9). Изменение размера во времени достаточно хорошо описывается известная линейная зависимость изменения квадрата диаметра капли от времени.

Загущение горючей жидкости ведет к достаточно существенному изменению закономерностей физико-химических процессов при зажигании частицы гелеобразного топлива (рисунок 10). На начальном этапе нагрева последовательно реализуется два фазовых превращения – плавление и испарение. В процессе плавления компоненты топлива разделяются. На поверхности капли формируется оболочка из расплавленного загустителя. Под этой оболочкой располагается горючая жидкость. Вследствие такой структуры капли при ее нагреве протекают следующие процессы, не характерные для индукционного периода при нагреве капли однородной горючей жидкости: формирование пузырьков в приповерхностном слое капли; рост их числа и размеров, сопровождающиеся изменением формы и размеров капли расплава топлива; схлопывание пузырьков, сопровождающееся диспергированием исходной капли с отделением группы капель существенно меньшего размера и выходом паров горючей жидкости в среду окислителя через слой загустителя (внешнюю оболочку капли). Чем выше концентрация загустителя, тем более явно выражены перечисленные выше физико-химические превращения при нагревании капли расплава гелеобразного топлива. Это ведет к ухудшению условий формирования горючей парогазовой смеси в окрестности капли расплава и увеличению продолжительности индукционного периода.

Одним из способов интенсификации испарения и зажигания гелеобразного топлива и повышения энергетических характеристик его горения является добавление мелкодисперсных горючих частиц. Это ведет к повышению эффективной теплопроводности топлива и снижению поверхностного натяжения расплава. Частицы, расположенные в приповерхностном слое капли расплава, интенсивно аккумулируют энергию окружающей газовой среды. Происходит разогрев мелкодисперсных твердых частиц. В течение процесса испарения концентрация частиц в приповерхностном слое возрастает. Образующиеся пузырьки пара изменяют локальные теплофизические характеристики неоднородной капли. Вероятным механизмом интенсификации процесса испарения в такой системе является увеличение радиационного теплового потока к поверхности капли, а также доли поглощаемой энергии. В окрестности каждой частицы происходит испарение компонентов топлива со скоростью, существенно превышающей скорости их испарения без твердых включений с поверхности жидкости. Таким образом, из-за неравномерного прогрева и испарения внутри капли топлива (в окрестности мелкодисперсных частиц) происходит ее интенсивное диспергирование. Под действием силы давления паров твердые частицы вдуваются в парогазовую смесь в окрестности капли топлива (рисунок 11). Темпера-

тура этих частиц и паров горючего, вдуваемых в среду окислителя, относительно невысока. По мере удаления мелкодисперсных частиц угля от поверхности топлива возрастают температура окружающей среды и интенсивность испарения горючей жидкости. При достижении предельных условий происходит зажигание паров горючего в окрестности движущихся частиц угля, а затем и самих частиц. Далее процесс экзотермического реагирования из этой зоны распространяется по всему объему горючей парогазовой смеси (от внешней границы в глубинные слои), сформировавшейся в течение индукционного периода. Диспергирование капли расплава топлива интенсифицирует как процесс зажигания, так и выгорания.

В условиях диспергирования капель расплавов гелеобразных топлив установлено, что скорости вдува паров горючего в окружающую газовую среду вблизи поверхности капли составляют до 3 м/с. Скорости движения мелкодисперсных фрагментов для криогелей на основе горючей жидкости составляют 1–2 м/с, для аналогичных составов с добавлением мелкодисперсных твердых частиц 1,5–2,5 м/с. Объемы соответствующих областей выгорания мелкодисперсных фрагментов составляют 0,7–8,0 см³ и 1,5–13,5 см³.

Существенно другой механизм зажигания характерен для гелеобразного топлива на основе криогелей, содержащих только твердые горючие частицы (рисунок 12). Установлено, что при варьировании в широких диапазонах как концентрации угля в составе гелеобразного топлива, так и начальной температуры частиц в течение индукционного периода протекает идентичная совокупность физико-химических процессов, аналогичная процессам зажигания относительно крупных частиц твердого натурального топлива. Отличие характерно для начальной стадии процесса, когда при нагревании гелеобразного топлива протекает процесс плавления. После испарения влаги при дальнейшем прогреве твердого остатка происходит термическое разложение угля, выделяются летучие компоненты, в окрестности частицы формируется горючая газовая смесь, которая зажигается при достижении предельных условий (рисунок 12). В момент зажигания пламя имеет форму сферы. Размер этой области эквивалентен 2–3 начальным размерам частицы топлива. Размер формирующейся газовой зоны в момент зажигания тем больше, чем выше концентрация угля в составе гелеобразного топлива и чем ниже температура источника нагрева.

Типичные значения времен задержки зажигания частиц группы топливных составов и капель горючих жидкостей в обычном состоянии, на основе которых приготовлены гелеобразные топлива, приведены на рисунках 13–16. Начальные массы, температуры частиц гелеобразных топлив и капель горючих жидкостей идентичны и составляют 10 мг и 20 °С, соответственно.

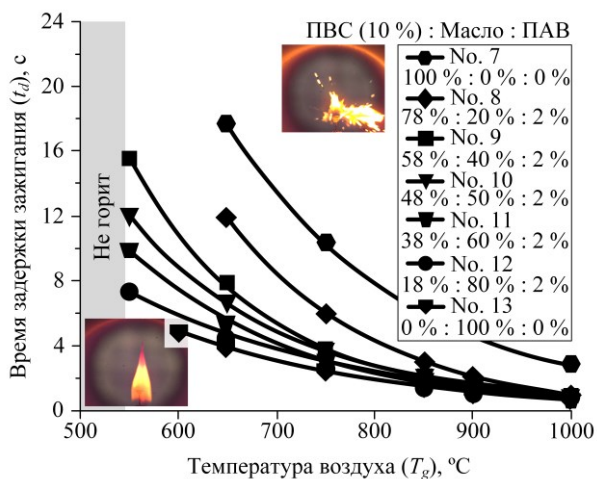


Рисунок 13 – Времена задержки зажигания капель масла в обычном состоянии и частиц гелеобразных топлив на основе маслосодержащих криогелей (10 % масс. водный раствор ПВС) с разной концентрацией масла

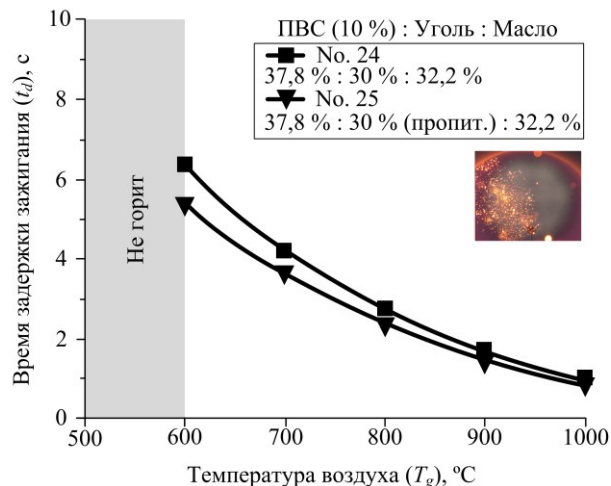


Рисунок 14 – Времена задержки зажигания частиц гелеобразных топлив на основе маслосодержащих криогелей (10 % масс. водный раствор ПВС), содержащих частицы угля и отличающихся способом приготовления

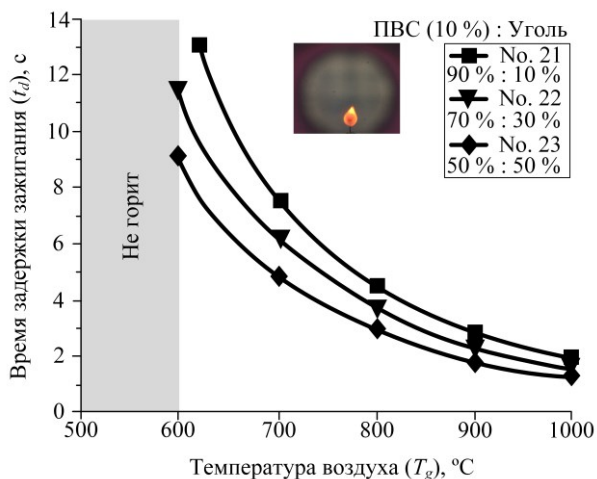


Рисунок 15 – Времена задержки зажигания частиц гелеобразных топлив на основе безмасляного криогеля (10 % масс. водный раствор ПВС), содержащих мелкодисперсные частицы угля с разной концентрацией

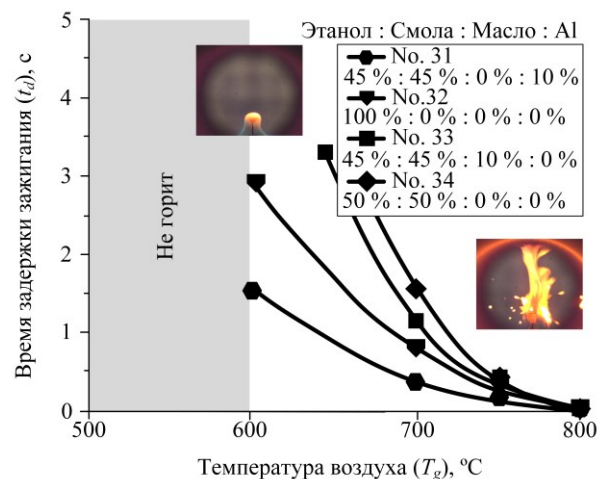


Рисунок 16 – Времена задержки зажигания капель этанола в обычном состоянии и частиц гелеобразных топлив на его основе, загущенных канифолью (сосновой смолой)

Стоит отметить, что минимальные температуры разогретого воздуха, при которых происходит зажигание гелеобразных топлив, соответствуют температурам, при которых воспламеняются капли жидких или твердых горючих компонентов в обычном состоянии. Частицы гелеобразных топлив (массой 7–13 мг, размерами 2,5–3,1 мм) на основе широко распространенных горючих жидкостей (индустриальное масло, рапсовое масло, этиловый спирт, дизельное топливо, керосин), в том числе с добавлением мелкодисперсных твердых горючих частиц, устойчиво воспламеняются при температурах источника нагрева 550–1000 °С. Времена задержки зажигания составляют 1–15 с для составов на основе маслосодержащих криогелей, 0,5–7 с для аналогичных составов с

добавлением мелкодисперсных горючих частиц, 2–15 с для составов на основе мелкодисперсных твердых частиц без добавления жидкого горючего компонента. Если топливо не начало гореть в течение этого промежутка времени, то оно не будет гореть при более длительных временах вследствие полного испарения жидких и термического разложения твердых компонентов.

В заключении сформулированы основные результаты и выводы:

1. Приготовлены четыре группы составов (общее число 26) перспективных гелеобразных топлив (пластически и упруго деформируемых), в том числе содержащих мелкодисперсные твердые горючие частицы. Определены реологические характеристики первичных топливных эмульсий (100–20 % об. водный раствор ПВС (5, 10 % масс.) + 0–80 % об. масло), для которых напряжение сдвига возрастает нелинейно с увеличением скорости сдвига в диапазоне 0–70 1/с, что характерно для типичных неньютоновских жидкостей. Установлены физико-механические характеристики топливных пеллет. Отличие их модулей упругости для составов на основе 5 %-го и 10 %-го водных растворов ПВС составляет 27–71 % при разных концентрациях жидкого горючего компонента в составе топлива. Пределы прочности пеллет на основе 5 %-го водного раствора ПВС в диапазоне варьирования концентрации масла 0–80 % отличаются на 85 % (от 16 до 2,5 кПа), пеллет на основе 10 %-го водного раствора ПВС – на 80 % (от 60 до 11 кПа). При идентичных концентрациях масла отличие пределов прочности пеллет на основе 5 %-го и 10 %-го водных растворов ПВС составляет 73–78 %.

2. Разработаны экспериментальные методики исследования процессов зажигания частиц гелеобразных топлив при нагреве в высокотемпературной неподвижной среде окислителя и топливных пеллет при взаимодействии с разогретыми до высоких температур металлическими частицами, отличающиеся от известных использованием программно-аппаратных комплексов высокоскоростной видеорегистрации быстропротекающих процессов, малоинерционной контактной регистрации температуры.

3. По результатам выполненных экспериментальных исследований процессов зажигания и горения группы составов гелеобразных топлив на основе этанола, керосина, дизельного топлива, отработанного масла, в том числе с добавлением мелкодисперсных твердых горючих частиц, установлено отличие закономерностей протекания физико-химических процессов и их характеристики при зажигании горючих жидкостей в обычном состоянии и гелеобразных топлив на их основе. Более длительный индукционный период обусловлен протеканием эндотермического процесса плавления гелеобразного топлива на начальном этапе прогрева.

4. Установлены механизмы зажигания одиночных частиц трех групп гелеобразных топлив на основе полимерного загустителя: маслonaполненных криогелей (без до-

бавления твердых частиц); маслonaполненных криогелей, содержащих мелкодисперсные (менее 140 мкм) твердые горючие частицы; безмасляных криогелей, содержащих мелкодисперсные твердые частицы. Для первой и второй групп характерно диспергирование капли расплава, интенсифицирующее прогрев и зажигание компонентов гелеобразного топлива. Механизм зажигания третьей группы топлив аналогичен процессу инициирования горения относительно крупной частицы твердого натурального топлива.

5. Установлены условия устойчивого зажигания частиц группы топливных составов при лучисто-конвективном нагреве. Минимальные температуры разогретого воздуха, при которых происходит зажигание, соответствуют температурам, при которых воспламеняются капли жидких топлив в обычном состоянии. Частицы гелеобразных топлив (массой 7–13 мг, размерами 2,5–3,1 мм) на основе широко распространенных горючих жидкостей (отработанное масло, рапсовое масло, этиловый спирт, дизельное топливо, керосин), в том числе с добавлением мелкодисперсных твердых горючих частиц, устойчиво воспламеняются при температурах источника нагрева 550–1000 °С. Времена задержки зажигания составляют 1–15 с для составов на основе маслonaполненных криогелей, 0,5–7 с для аналогичных составов с добавлением мелкодисперсных горючих частиц, 2–15 с для составов на основе мелкодисперсных твердых частиц без добавления жидкого горючего компонента. Если топливо не начало гореть в течение этого промежутка времени, то оно не будет гореть при более длительных временах вследствие полного испарения жидких и термического разложения твердых компонентов.

6. Показано, что варьирование начальной температуры топлива в широком диапазоне от -85 до 20 °С не влияет на механизм зажигания и горения топлива, но оказывает существенное влияние на время задержки зажигания. Чем меньше начальная температура топлива, тем больше длительность индукционного периода. Времена задержки зажигания и времена выгорания частиц топлив с температурой 20 °С и температурами в диапазоне от -85 до -40 °С отличаются на 25–95 %.

7. В условиях протекания процессов диспергирования капель расплавов группы составов гелеобразных топлив установлено, что скорости вдува паров горючего в окружающую газовую среду вблизи поверхности капли составляют до 3 м/с, размеры зон их распространения изменяются от 6 до 8 мм в зависимости от условий нагрева. Скорости движения мелкодисперсных фрагментов для криогелей на основе горючей жидкости составляют 1–2 м/с, для аналогичных составов с добавлением мелкодисперсных твердых частиц 1,5–2,5 м/с. Объемы соответствующих областей выгорания мелкодисперсных фрагментов составляют 0,7–8,0 см³ и 1,5–13,5 см³.

8. Экспериментально установлен механизм зажигания пеллет гелеобразных топлив разогретыми до высоких температур металлическими частицами, отличающийся

от механизма зажигания горючих жидкостей последовательным протеканием двух фазовых превращений в течение индукционного периода и постепенным погружением локального источника энергии в приповерхностный слой топлива. В таких условиях время задержки зажигания не превышает длительности процесса полного погружения разогретой частицы в расплав топлива.

9. Разработаны физические модели процессов зажигания и горения гелеобразных топлив при нагреве одиночных частиц топлива в высокотемпературной среде окислителя и локальном кондуктивном нагреве топливных пеллет источником ограниченного теплосодержания, представляющие основу для разработки и верификации прогностических математических моделей.

ПУБЛИКАЦИИ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ

1. Glushkov D. O. The gel fuel ignition at local conductive heating / D. O. Glushkov, **A. G. Nigay**, O. S. Yashutina // **International Journal of Heat and Mass Transfer**. – 2018. – Vol. 127. – P. 1203–1214.
2. Glushkov D. O. Heat and mass transfer induced by the ignition of single gel propellant droplets / D. O. Glushkov, G. V. Kuznetsov, **A. G. Nigay**, O. S. Yashutina // **Journal of the Energy Institute**. – 2019. – Vol. 92, No. 6. – P. 1944–1955.
3. Glushkov D. O. Effects of the initial gel fuel temperature on the ignition mechanism and characteristics of oil-filled cryogel droplets in the high-temperature oxidizer medium / D. O. Glushkov, **A. G. Nigay**, V. A. Yanovsky, O. S. Yashutina // **Energy and Fuels**. – 2019. – Vol. 33, No. 11. – P. 11812–11820.
4. Vershinina K. Y. Oil-filled cryogels: New approach for storage and utilization of liquid combustible wastes / K. Y. Vershinina, D. O. Glushkov, **A. G. Nigay**, V. A. Yanovsky, O. S. Yashutina // **Industrial and Engineering Chemistry Research**. – 2019. – Vol. 58, No. 16. – P. 6830–6840.
5. Glushkov D. O. Ignition mechanism and characteristics of gel fuels based on oil-free and oil-filled cryogels with fine coal particles / D. O. Glushkov, G. V. Kuznetsov, **A. G. Nigay**, V. A. Yanovsky, O. S. Yashutina // **Powder Technology**. – 2020. – Vol. 360. – P. 65–79.
6. Glushkov D. O. Kinetic properties of gas-phase combustion of gel fuels based on oil-filled cryogels / D. O. Glushkov, G. V. Kuznetsov, R. B. Tabakaev, D. B. Altynbaeva, **A. G. Nigay** // **Thermochimica Acta**. – 2020. – Vol. 686. – Article number 178553.
7. Glushkov D. O. Influence of gellant and drag-reducing agent on the ignition characteristics of typical liquid hydrocarbon fuels / D. O. Glushkov, G. V. Kuznetsov, **A. G. Nigay**, V. A. Yanovsky // **Acta Astronautica**. – 2020. – Vol. 177. – P. 66–79.