

МИНИСТЕРСТВО НАУКИ И ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ
Федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования
«Национальный исследовательский томский политехнический университет»
(ФГАОУ ВО НИ ТПУ)



УТВЕРЖДАЮ

Проректор по науке и
трансферу технологий
Л.Г. Сухих

Л.Г. Сухих
20 " 11 2021 г.
М.П.

ОТЧЕТ О НАУЧНО-ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКОЙ РАБОТЕ

по теме:

ФУНДАМЕНТАЛЬНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ ПРОЦЕССОВ ГОРЕНИЯ И ДЕТОНАЦИИ
ПРИМЕНИТЕЛЬНО К РАЗВИТИЮ ОСНОВ ЭНЕРГОТЕХНОЛОГИЙ

(промежуточный)

Этап 2

Крупный научный проект по приоритетным направлениям научно-технологического развития в рамках подпрограммы «Фундаментальные научные исследования для долгосрочного развития и обеспечения конкурентоспособности общества и государства» государственной программы Российской Федерации «Научно-технологическое развитие Российской Федерации»

Договор на выполнение СЧ НИР от 09.10.2020 № № 236 (14.03-313/2020)

Руководитель СЧ НИР,
д-р физ. – мат. наук, профессор

Г.В. Кузнецов

(подпись, дата)

Г.В. Кузнецов

20.11.2021

Томск 2021

Список исполнителей

№ п/п	ФИО	Должность	Уч. степень, уч. звание	Подпись	Дата
1	Кузнецов Гений Владимирович	профессор	д.ф.-м.н., профессор		20.11.2021
2	Стрижак Павел Александрович	профессор, исследователь до 39 лет	д.ф.-м.н., профессор		20.11.2021
3	Глушков Дмитрий Олегович	доцент, исследователь до 39 лет	к.ф.-м.н., доцент		20.11.2021
4	Няшина Галина Сергеевна	ассистент, исследователь до 39 лет	к.т.н.		20.11.2021
5	Вершинина Ксения Юрьевна	доцент, исследователь до 39 лет	к.ф.-м.н.		20.11.2021
6	Волков Роман Сергеевич	доцент, исследователь до 39 лет	к.т.н.		20.11.2021
7	Высокоморная Ольга Валерьевна	доцент, исследователь до 39 лет	к.ф.-м.н.		20.11.2021
8	Пискунов Максим Владимирович	доцент, исследователь до 39 лет	к.ф.-м.н.		20.11.2021
9	Феоктистов Дмитрий Владимирович	доцент, исследователь до 39 лет	к.т.н.		20.11.2021
10	Курганкина Маргарита Александровна	ассистент, исследователь до 39 лет	к.т.н.		20.11.2021
11	Гайдукова (Яшутина) Ольга Сергеевна	инженер-исследователь, аспирант			20.11.2021
12	Антонов Дмитрий Владимирович	младший научный сотрудник, аспирант			20.11.2021
13	Шлегель Никита Евгеньевич	инженер-исследователь, аспирант			20.11.2021

РЕФЕРАТ

Отчет 48 с., 2 раздела, 38 рисунков, 2 таблицы, 2 приложения.

ВОДОУГОЛЬНОЕ ТОПЛИВО, ОРГАНОВОДУГОЛЬНОЕ ТОПЛИВО, ГОРЕНИЕ, РЕОЛОГИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА, ХАРАКТЕРИСТИКИ РАСПЫЛЕНИЯ, ФРАГМЕНТАЦИЯ, АНТРОПОГЕННЫЕ ВЫБРОСЫ, ОТНОСИТЕЛЬНЫЕ ПОКАЗАТЕЛИ ЭФФЕКТИВНОСТИ ТОПЛИВ

Экспериментально и теоретически исследованы перспективные составы композиционных топлив (компоненты, концентрации, методы приготовления и транспортировки). Определены характеристики эффективного распыления топлив при разных режимах сжигания. Выделены условия, обеспечивающие эффективное использование топливных композиций на всех этапах реализации энерготехнологий: приготовление, хранение, транспортировка, распыление, фрагментация, сжигание. Предложены методики выбора компонентов органоводоугольных суспензий с учетом энергетических, экологических, экономических и социальных индикаторов.

ОГЛАВЛЕНИЕ

ВВЕДЕНИЕ	5
1. Кинетические зависимости времени выгорания капель композиционных топлив от их характерных размеров, компонентного состава топливной смеси, свойств твердых и жидких компонентов, условий тепломассопереноса в многофазном потоке.....	6
2. Условия расширения пределов и интенсификации горения композиционных топлив (суспензий) за счет механизма микровзрывного диспергирования капель.....	25
ЗАКЛЮЧЕНИЕ.....	44
ПРИЛОЖЕНИЕ А	45
ПРИЛОЖЕНИЕ Б	45

ВВЕДЕНИЕ

Мировые цены на традиционные энергоресурсы растут, а экологическая нагрузка на окружающую человека среду вследствие увеличивающихся объемов промышленного производства остается очень высокой. Эти факторы стимулируют мировое сообщество продолжать поиск альтернативных, но надежных и экологичных источников энергии. Перевод энергетических объектов на композиционные жидкие топлива на основе отходов угле- и нефтепереработки может быть адекватной мерой, отвечающе как экономическим, так и экологическим вызовам современности.

В рамках второго этапа выполнения проекта проведены масштабные исследования характеристик зажигания и горения композиционных топлив разных составов в широком диапазоне условий нагрева. Выполнены исследования процессов зажигания и горения топливных смесей при разном способе сжигания (в виде суспензий, слоя, пеллета), имеющих в своем составе низкосортные топливные составляющие. Приведены результаты термогравиметрического анализа, использовавшиеся для определения кинетических характеристик горения топливных смесей. Разработаны модели зажигания гелеобразных топливных композиций. Предложены методы управления реологическими характеристиками топливных суспензий. Выполнены оценки экологических характеристик сжигания композиционных топлив на основе отходов угле- и нефтепереработки.

Продолжены исследования закономерностей и характеристик фрагментации капель ВУТ и ОВУТ: разработаны математические модели, учитывающие большую совокупность влияющих на характеристики распада факторов. Выполнены теоретические исследования фрагментации капель ВУТ и ОВУТ, при использовании разных критериев распада капель. Разработаны экспериментальные методики определения характеристик распыленного потока суспензионного топлива.

1. Кинетические зависимости времени выгорания капель композиционных топлив от их характерных размеров, компонентного состава топливной смеси, свойств твердых и жидких компонентов, условий тепломассопереноса в многофазном потоке

Исследование характеристик зажигания и горения капель композиционных топлив

Эффективное обращение с отходами является одной из важнейших проблем современности. Многие исследователи отмечают, что наиболее широкие возможности утилизации разнообразных промышленных, сельскохозяйственных и бытовых отходов предоставляет энергетическая отрасль [1]. В [2] рассмотрены вопросы сжигания различных видов биомассы, а также твердых бытовых отходов. Прямое сжигание отходов является устаревшим способом энергетической переработки [2] в отличие от пиролиза, газификации, анаэробного сбраживания, производства спирта. Несмотря на это, сжигание по-прежнему является основным способом термохимического преобразования биомассы, обеспечивая 97% производства биоэнергии [2]. Результаты многих исследований указывают на то, что показатели эффективности могут быть улучшены, если компоненты подвергаются совместному, а не моносжиганию [3]. При этом экологические и энергетические характеристики процессов существенно зависят от соотношения компонентов в сжигаемой топливной композиции [4,5].

Работы в рамках второго этапа выполнения проекта – в основном экспериментальные исследования процессов, связанных с утилизацией угольного шлама в комбинации с биомассой и маслами (растительными и индустриальными) при сжигании в разных формах – пеллетах, слое и в виде капель суспензии. Угольные шламы представляют большой энергетический ресурс, обладая достаточно высоким углеродосодержанием при средней зольности сухой массы 25–40%. При этом угольные шламы не востребованы вследствие слабой развитости или полного отсутствия технологий их энергетической утилизации. Ранние исследования [6,7] показали, что даже высокзолые угольные породы могут быть достаточно успешно использованы при совместном сжигании с биомассой.

Необходимо было решить следующие задачи:

- регистрация скоростей выгорания капель суспензионных топлив на основе угольного шлама при варьировании в широких диапазонах температур газов в печи, размеров капель топлива, а также концентраций компонентов суспензионного топлива;
- выделение стадий термохимического преобразования топлив, приготовленных на основе угольного шлама с добавками отработанного турбинного масла, древесных опилок, рапсового масла. Сопоставления трех подходов к сжиганию одних и тех же компонентов – в виде (1) пеллет; (2) рыхлого сухого слоя; (3) капель водной суспензии;
- изучение влияния условий приготовления трехкомпонентных топливных суспензий на характеристики их зажигания, горения, эмиссионного профиля, а также вязкости и статической стабильности;
- экспериментальное определение реологических и энергетических характеристик топливной суспензии на основе угольного шлама, стабилизированной несколькими перспективными добавками.

Компоненты топливных суспензий, методика эксперимента

Для приготовления топлив использовались следующие компоненты: шлам (отход флотации) коксующегося угля; коксующийся уголь; вода водопроводная; масло отработанное турбинное; древесные опилки; рапсовое масло; дизельное топливо; лигносульфонат натрия; соевый лецитин.

Угольный шлам обезвоживался путем просушивания в муфельной печи при температуре 105 °С в течение 2.5 часов. Угольный шлам в исходном состоянии содержит мелкодисперсные частицы размерами 20–150 мкм, которые могут формировать достаточно крупные агломераты. В экспериментах для поддержания однородности

гранулометрического состава исходные агломераты подвергались дроблению и затем с помощью сит выделялась фракция с размером частиц не более 100–140 мкм. Древесные опилки измельчались в роторной мельнице Pulverisette-14. Полученный древесный порошок также просеивался, чтобы получить фракцию со средними размерами частиц не более 100–140 мкм.

Изготовление пеллет проводилось с помощью пресс-формы и гидравлического пресса. Готовая смесь массой 0.4 г помещалась в пресс-форму и подвергалась уплотнению в течение 30 с под давлением около 5 кПа. После этого пеллет извлекался из пресс-формы. Диаметр образцов составлял 12.3 мм, а высота 2–3 мм. Для изготовления пеллет с добавками турбинного и рапсового масел использовался мелкопористый полимерный материал, который пропитывался маслом. Доля масла в пеллете не превышала 5%.

Приготовление суспензий на водной основе проводилось с помощью магнитной мешалки AIBOTE ZNCLBS-2500. Если композиция включала масло, то сначала готовилась водомасляная эмульсия, а затем добавлялся угольный шлам. Вода и масло смешивались при 2000 об/мин в течение 10 мин. Эмульсия и сухой угольный шлам смешивались в течение 15–20 минут со скоростью вращения магнитного ротора 1500 об/мин. Для измерения вязкости суспензий применялся ротационный реометр Brookfield DV3T (диапазон измерения 1–6·10⁶ мПа·с, точность ±1%, воспроизводимость ±0.2%), шпиндель LV-2 (диапазон измерения вязкости 50–100000 мПа·с). Статическая седиментационная стабильность суспензий оценивалась по результатам расчета индекса отделения воды (water separation ratio (WSR)) [8]: $WSR = (m_1/m_0) \cdot 100\%$, где m_0 – начальная масса воды в суспензии; m_1 – масса воды, выделившаяся в течение 72 часов при статичном хранении топлива при температуре 20±2 °С.

Схема экспериментального стенда приведена на рис. 1.1. Сжигание образцов топлив проводилось в модельной камере сгорания (муфельная трубчатая печь R50/250/13 Nabertherm GmbH). Температура в печи варьировалась в диапазоне 700–900 °С. Топливо помещалось в печь только после ее разогрева до заданной температуры. Подача топлива в печь была автоматизирована и синхронизирована с видеозаписью эксперимента (высокоскоростная камера Phantom Miro C110 совместно с программой Phantom Camera Control). Определялись следующие характеристики зажигания и горения топлива: время задержки газофазного (τ_{d1}) и гетерогенного (τ_{d2}) зажигания; длительность горения (τ_b); температура зажигания (T_{ign}); максимальная температура горения (T_d^{max}). Процедура идентификации моментов начала и окончания горения и ее обоснование изложены в [9]. Для измерения максимальной температуры горения образцов топлива использовался тепловизор Testo 885-2. Также проводилась серия экспериментов по измерению концентрации компонентов дымовых газов, образующихся при сжигании топлив. Для измерений использовался газоанализатор Test-1.

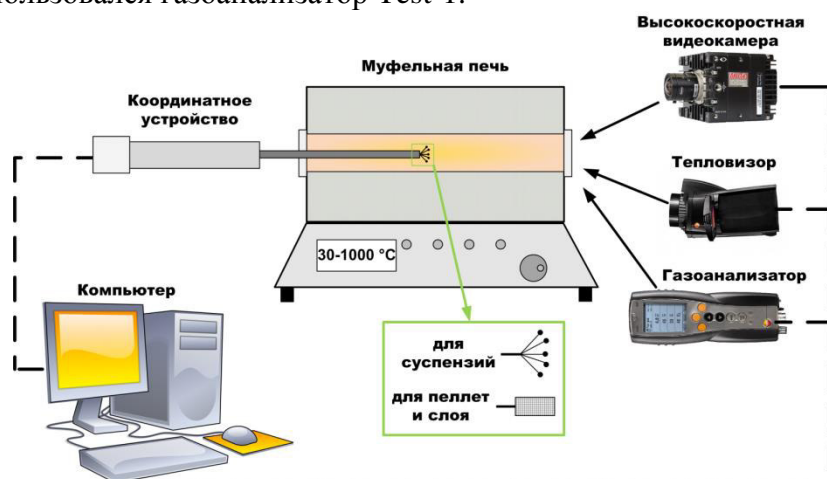


Рис. 1.1. Схема стенда для изучения характеристик зажигания и горения композиционных топлив.

Линейная скорость горения капле суспензий вычислялась с учетом начального среднего диаметра и длительности горения [10]: $V_b = d_0^2 / \tau_b$, где d_0 – начальный средний размер капли; τ_b – длительность горения. Массовая скорость горения с учетом начальной массы капли m_0 , массы несгоревшего остатка m_1 и длительности горения τ_b вычислялась по формуле: $V_m = (m_0 - m_1) / \tau_b$.

Основные полученные результаты

- Установлено, что устойчивое газофазное горение капле смесей «угольный шлам-вода» реализуется только при значительном росте начального размера капли (до 4.5–5 мм) и достаточно высоких температурах в печи (750–800 °С и выше). Инерционность зажигания топлив возрастала многократно (в 3–8 раз) при увеличении начального размера капли от 1 до 5 мм. Этот результат подтверждает важность контроля размера капле при их распылении для обеспечения дальнейшего стабильного горения. Для капле с начальным размером ≈ 2 мм линейная скорость выгорания изменялась в диапазоне 0.18–0.34 мм²/с (диапазон является общим для всех изученных составов топлив и температур в печи). Максимальная линейная скорость выгорания была характерна каплям размером около 3 мм и достигала значений 0.5–0.6 мм². Массовые скорости выгорания капле исследуемых топлив варьировались в диапазоне 0.0005–0.0018 г/с при варьировании начального размера капли в диапазоне 5–7 мм. Полнота выгорания распыленных капле топливных водосодержащих смесей выше при температурах в печи более 800 °С. При невысоких температурах газовой среды для большинства изученных суспензий существенно замедляется зажигание и растет продолжительность горения.

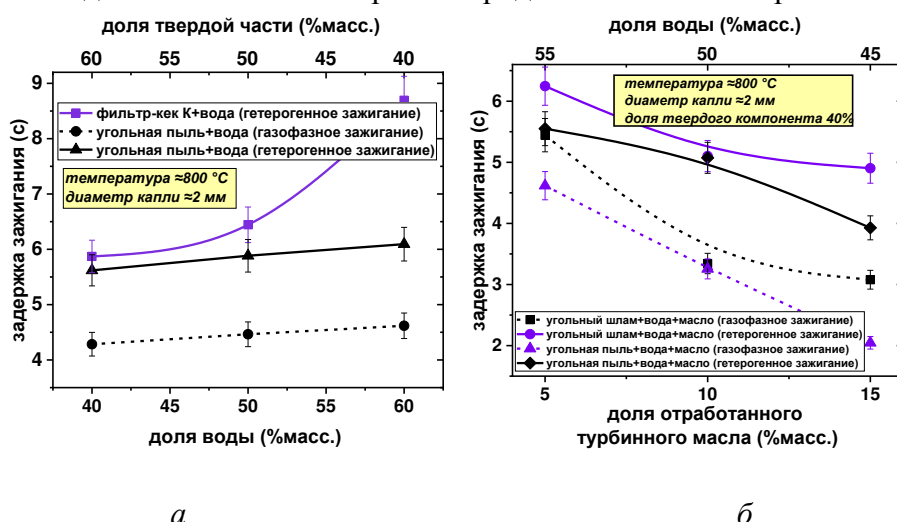


Рис. 1.2. Зависимости времен задержки зажигания капле суспензий от соотношения воды и твердого компонента (а) и от соотношения воды и турбинного масла в композиции (б).

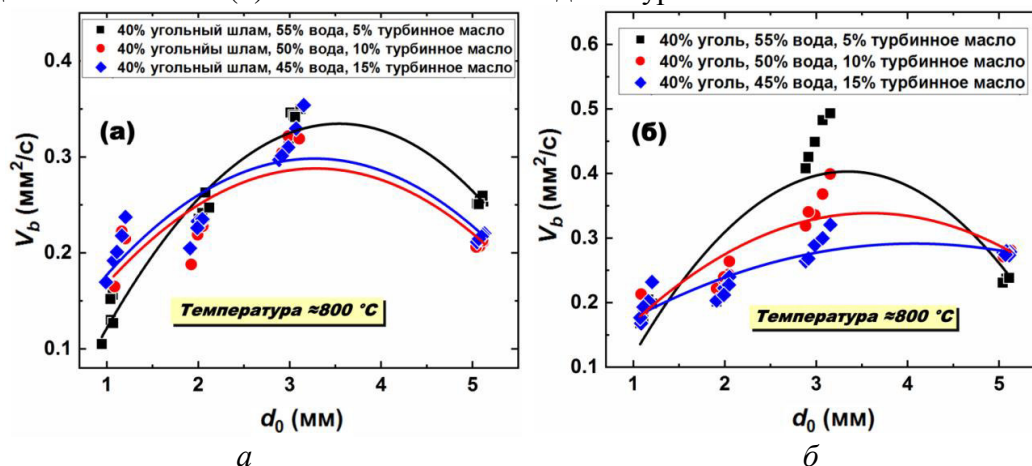


Рис. 1.3. Зависимости скорости выгорания капель от их начальных размеров: для топлив на основе угольного шлама, воды, отработанного масла (а); для топлив на основе угольной пыли, воды, отработанного масла (б).

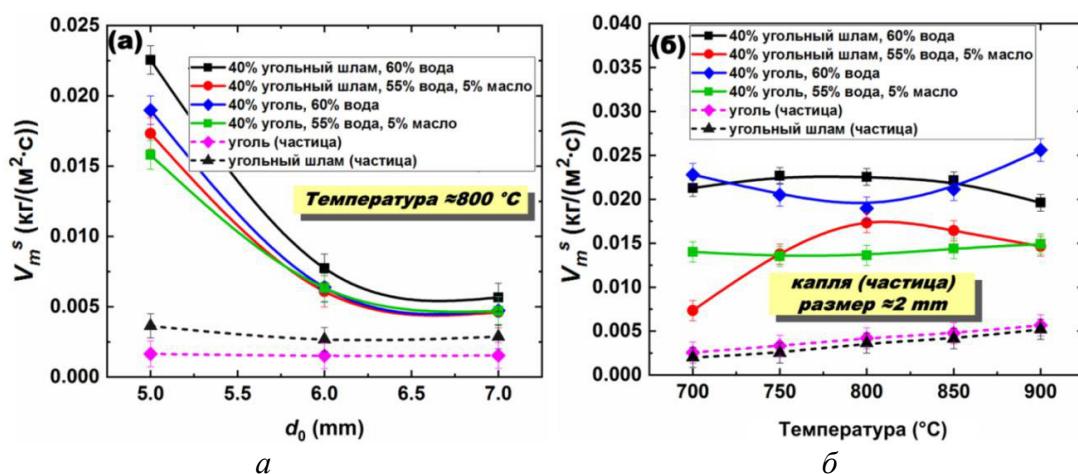


Рис. 1.4. Массовая скорость выгорания (с учетом площади поверхности реагирования) капель суспензий и частиц твердых топлив в зависимости от начального размера капли (а) и от температуры в печи (б).

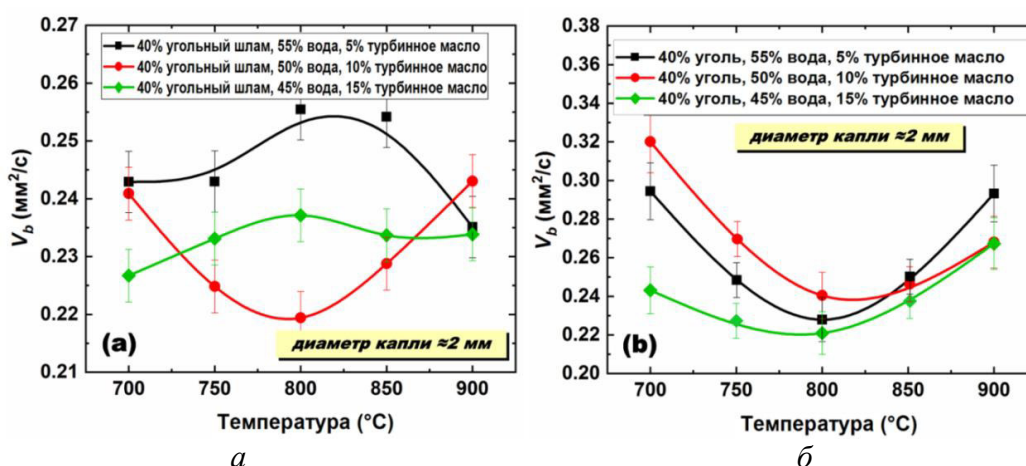


Рис. 1.5. Зависимости скорости выгорания капель суспензий от температуры в печи: для топлив на основе угольного шлама, воды, отработанного масла (а); для топлив на основе угольной пыли, воды, отработанного масла (б).

- Добавление отработанного турбинного масла в смесь «угольный шлам–вода» интенсифицировало зажигание и выгорание капель. При этом для заметного ускорения процесса достаточно использовать не более 5% масла. Более высокие концентрации масел или других подобных компонентов (например, нефтешламов) могут быть неблагоприятны для распыления суспензии вследствие роста вязкости последней. Также более высокие концентрации масел в суспензиях способствуют повышению концентраций газовых антропогенных выбросов. Скорости горения капель топлив при добавлении отработанного масла уменьшались по сравнению с топливами без добавки, особенно при увеличении температуры в камере сгорания. Полученный результат связан с увеличением периода горения и является следствием более полного выгорания топлива. Установленный эффект характерен в большей степени смесям на основе угольного шлама, чем угольной пыли.
- Прямое сжигание угольных шламов связано с большими технологическими проблемами вследствие неполного сгорания топлива, необходимости повышения температуры в печи, а также рисками крайне высокой скорости шлакования поверхностей

нагрева. Согласно полученным данным, скорости выгорания капель водоугольных топлив и суспензий на основе отходов в 2–3 раза больше, чем у частиц угольного шлама и угля аналогичных размеров. Полученные результаты обосновывают целесообразность утилизации угольных шламов в составе водных суспензий для повышения интегральных характеристик технологических процессов сжигания отходов углеобогащения.

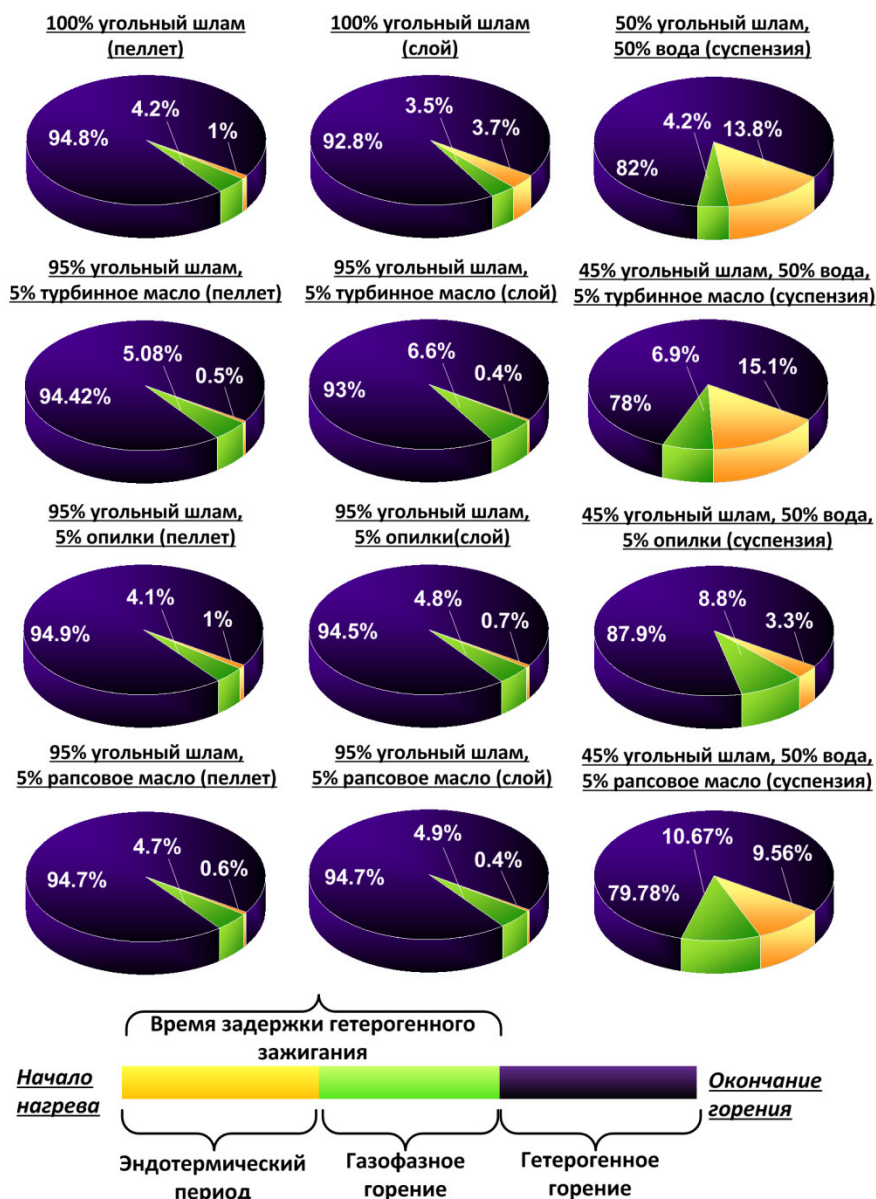


Рис. 1.6. Соотношение длительностей основных стадий процесса горения, реализующихся при нагреве топлива (температура в муфельной печи около 900 °С).

- Способ сжигания важен для топлив, приготовленных из низкорреакционных компонентов. В частности, угольные шламы достаточно инертны при моносжигании. Поэтому для достижения технологической эффективности, их целесообразнее использовать в комбинации с другими компонентами.
- Состав смеси во многом определяет скорость развития реакции горения. Ускорение газофазного зажигания как минимум в 2 раза происходило при добавлении в угольный шлам добавок – турбинного масла, опилок и рапсового масла. Уменьшение длительности эндотермической стадии было максимальным (в 3–6 раз) при смешении шлама с турбинным маслом. Наименьший эффект наблюдался при добавлении опилок.

- Добавление турбинного масла в шлам ускоряло протекание эндотермических процессов, но не всегда приводило к более быстрому гетерогенному зажиганию.
- Капли суспензии характеризовались достаточно длительным эндотермическим периодом в сравнении с пеллетированным топливом или сухой смесью, сжигаемой в виде рыхлого слоя. Это является фактором риска при запуске котла или в переходных режимах эксплуатации.
- Диффузия кислорода и продуктов горения в трещинах и порах образцов топлив может играть определяющую роль на эндо- и экзотермических стадиях, особенно при температуре в печи менее 800 °С.
- Минимальная температура устойчивого гетерогенного зажигания исследовавшихся топлив составила 450–500 °С.
- Пеллеты характеризовались наибольшей продолжительностью горения. Это обусловлено ограничением диффузионного переноса кислорода к внутренним слоям топлива, влияние которого может усилиться за счет постепенного формирования уплотненной зольной оболочки. При промышленном сжигании во избежание неполного выгорания потребуется интенсивное перемешивание топлива вихревыми методиками с окислителем и повышение температуры в котле.
- Капли суспензий демонстрировали более полное выгорание, чем смеси, сжигаемые в виде пеллета или сухого слоя. Поэтому утилизация угольных шламов в составе водных суспензий может быть очень перспективной при использовании технологий распыления капель.
- Добавление отработанного масла или древесной биомассы на завершающем этапе приготовления суспензии может интенсифицировать зажигание, но может привести к неполному сгоранию.
- Эффективность использования суспензии повышается, если поверхностно-активное вещество добавляется на начальном этапе приготовления при смешивании с жидкой компонентой.
- Технология итерационного смешивания компонентов (по ½ от их итоговой массы в суспензии) может способствовать лучшей гомогенизации суспензии и улучшению характеристик зажигания и выгорания на 10–15%. Дальнейшее увеличение шага дозирования к заметным изменениям не привело.
- Наиболее однородное стабильное топливо с приемлемой вязкостью (около 400 мПа·с при скорости сдвига 100 с⁻¹) можно получить с помощью кавитатора (коллоидной мельницы). Гомогенизатор и магнитная мешалка обеспечивают менее однородную и стабильную смесь, но за счет присутствия агломератов угольных частиц полученное топливо может воспламениться быстрее на 15–20%. Кавитаторы можно рекомендовать для промышленного использования. Они способствуют стабилизации результатов технологического процесса приготовления топлив.
- Особенности смешивания компонент топлива больше влияют на локальные характеристики процесса хранения, сжигания или горения, чем на общую эффективность.
- Относительная эффективность суспензии возрастает на 25–30% при замене угольной пыли на угольный шлам за счет экономической составляющей.
- Стабилизирующие добавки (лигносульфонат натрия, дизель, рапсовое масло) с массовой долей 1% масс. в смеси «угольный шлам – вода» ускоряли газофазное зажигание топлива на 15–25%. Соевый лецитин, наоборот, замедлял воспламенение на 25–35%. Наибольшее значение (0.917) итогового показателя эффективности, учитывающего набор энергетических, экологических и реологических характеристик, имеет суспензия «50% угольный шлам, 49% вода, 1% лигносульфонат натрия»; наименьшее (0.755) – суспензия «50% угольный шлам, 49% вода, 1% рапсовое масло».

- Технико-экономический анализ показал, что срок окупаемости вложений при переходе с угля на суспензию на основе угольного шлама составит не более 2 лет (с учетом приобретения оборудования, пуско-наладочных работ, эксплуатационных затрат).

Методы управления реологическими свойствами композиционных топлив

В рамках второго этапа выполнения проекта проведены эксперименты:

- По исследованию зависимостей эффективной вязкости и статической стабильности ВУС от времени, размеров твердых частиц, распределения частиц по размерам и фракций их упаковки, а также от свойств несущей среды суспензий.
- По установлению условий достижения приемлемых для промышленного использования стабильности и реологических параметров топливных ВУС в широком диапазоне температур (включая отрицательные).

Основные компоненты топливных суспензий

Твердые частицы суспензий – каменный уголь марки К и фильтр-кек марки К. В качестве основной жидкой компоненты суспензий применялась дистиллированная вода и сырая водопроводная вода, а также водно-солевые растворы ацетата аммония с молярной концентрацией соли 0.1 М и 1 М. Кроме того, в качестве добавок к дистиллированной воде использовалась группа смачивающих агентов – ПАВ, эмульгаторов прямых эмульсий, к которым относятся Неолы АФ 9-10 и 9-12, вспомогательное вещество ОП-7 и соевый лецитин, а также жидких сольвентов, включая н-бутанол, метиловые эфиры жирных кислот подсолнечного масла, рапсовое масло и коммерческое дизельное топливо, твердый пористый органический наполнитель – древесные сосновые опилки.

Основные приборы и методы исследований реологических свойств топливных суспензий

Для установления распределений размеров частиц, характерных каждой тонине помола, применен теневой метод макросъемки. Для реологических измерений («эффективная вязкость-скорость сдвига», «напряжение сдвига-скорость сдвига») применены ротационный вискозиметр Brookfield DV3T (диапазон измерения $1-6 \cdot 10^6$ мПа*с, точность ± 1 %, воспроизводимость $\pm 0,2$ %), шпиндель LV-2 (диапазон измерения вязкости 50 – 100000 мПа*с). Для измерения контактного угла порошки твердых частиц большей тонины помола прессовали при нагрузке 10 т в виде таблеток. На гладкой поверхности полученных таблеток проводили измерения статического контактного угла методом теневой съемки при нормальных условиях. Полученные изображения капель на поверхности таблеток обрабатывали с помощью программного обеспечения Drop Shape Analysis (Kruss). Измерение дзета-потенциала ВУС осуществлялось на приборе Zetasizer Nano ZS при температуре 25 °С (4W He-Ne лазер с длиной волны 633 нм). Статическая стабильность смесей, отражающая масштаб фазового разделения в суспензии, оценивалась при помощи коэффициента отделения воды [8]. Для определения стабильности по образованию твердого осадка из частиц угля или угольного шлама в объеме суспензии применен метод «проникающего стержня» [8]. Седиментационная устойчивость суспензий также оценивалась методом расчета средней скорости седиментации твердых частиц. Текучесть измерялась визуально с использованием метода, в котором при переливании суспензии из одной пробирки в другую формируется непрерывный поток, прерывистый поток или нет формирования потока, что в указанном порядке соответствует классам А, В или С. Для поддержания заданной температуры термостатирования образцов суспензий использовался криостат Kiss K6 фирмы «Huber», Германия (температурный диапазон от –25 °С до 200 °С, теплоноситель – смесь пропиленгликоля и воды в соотношении 50/50, отклонение температуры в рабочей емкости $\pm 0,05$ °С). Термостатирование образцов проводилось при температурах –5 °С, 0 °С, 5 °С и 25 °С. Образцы выдерживались при заданной температуре в течение 72 часов, поскольку такой временной интервал соответствует среднему времени жизни подобного топлива на объектах энергетического сектора.

Основные результаты исследований

- По результатам выполненных экспериментальных исследований рекомендованы методы управления (и прогнозирования) эффективной вязкостью и седиментационной стабильностью водоугольных суспензий на основе типичного каменного угля и углеродсодержащего отхода флотации этого угля.
- Показано, что в качестве основных факторов, влияющих на исследуемые характеристики, можно выделить отдельное и комбинированное добавление смачивающих агентов (синтетических и натуральных ПАВ, а именно Неонол АФ 9-12, Неонол АФ 9-10, ОП-7 и соевый лецитин, соответственно), жидких сольвентов (н-бутанол, метиловые эфиры жирных кислот подсолнечного масла, рапсовое масло и дизельное топливо) и твердых органических добавок (на примере древесных опилок).
- Составы на основе фильтр-кека с добавками являются более стабильными (часто без фазового разделения) а подмешивание соевого лецитина в комбинации или отдельно улучшает стабильность. Значительное снижение значений η_{100} при добавлении смачивающего агента в суспензию с уже подмешанным сольвентом зафиксировано как для ВУС на основе угля К, так фильтр-кека К.
- Показана взаимосвязь эффективной вязкости η_{100} , коэффициента отделения воды и дзета-потенциалом для ВУС с отдельным добавлением смачивателя (рис. 1.7а) и сольвента (рис. 1.7б).
- Установлено влияние дополнительной минерализации (при использовании водопроводной и дистиллированной воды, 0.1 и 1 М растворов ацетата аммония) несущей среды ВУС, размера и фракции упаковки твердых частиц в экспериментах с моно- и полидисперсными порошками угля и фильтр-кека на эффективную вязкость топливных суспензионных составов.

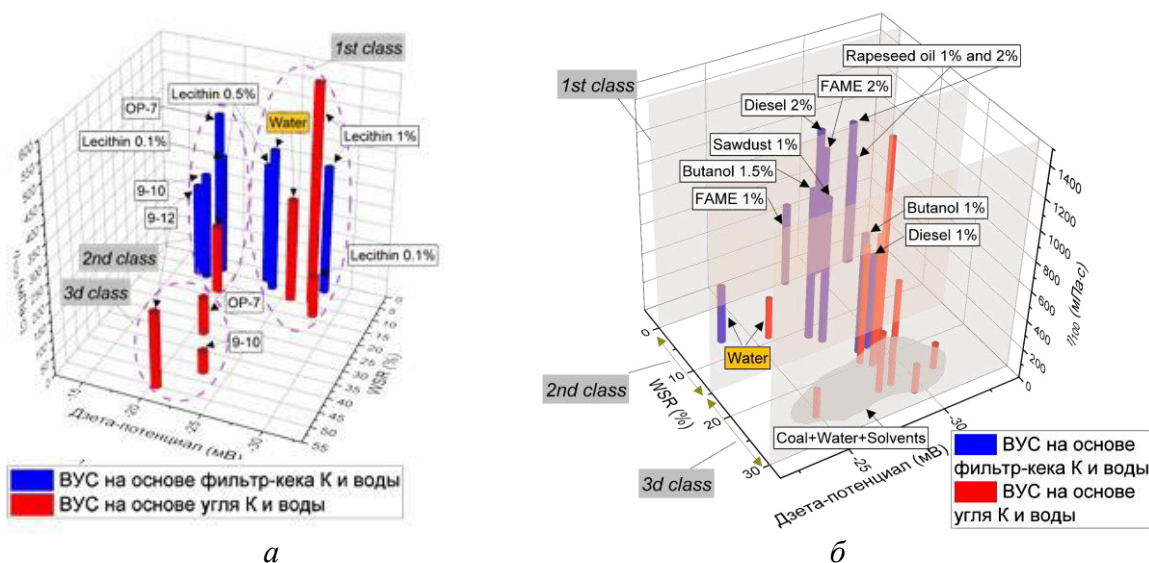


Рис. 1.7. Гистограммы, отражающие взаимосвязь между коэффициентом отделения воды, дзета-потенциалом и эффективной вязкостью при скорости сдвига 100 с^{-1} , для ВУС на основе фильтр-кека и угля К, приготовленных с добавлением ПАВ (а) и сольвентов (б); используются массовые концентрации компонентов.

- Снижение вязкости полидисперсных составов связано с упаковкой и средним диаметром твердых частиц. В большинстве измерений вязкости разработанных композиций ВУС значения η_{100} не превышали максимального эксплуатационного предела 1.0–1.2 Па·с, характерного для типичных водоугольных топлив.
- По результатам поискового исследования процессов фазового разделения, седиментационной устойчивости и текучести топливных ВУС выделены 11 образцов без фазового разделения при термостатировании образцов в течение 72 часов при

температурах 5 и 25 °С. Из этих образцов оказались устойчивы к фазовому разделению (с отслоением воды не более 10 %) при более низкой (0 °С) температуре только 9 образцов (рис. 1.8а) и при отрицательной температуре (-5 °С) 8 композиций (рис. 1.8б). В конечном итоге с учетом анализа показателей седиментационной устойчивости и текучести топливная ВУС на основе угольного шлама (50 масс.%) и воды (или 20-% по массе раствора глицерина в случае температур термостатирования 0 и -5 °С) (48 масс.%) с добавлением в качестве стабилизирующего агента кислого полифосфата натрия (1 масс.%) и в качестве диспергирующего агента – эмульгатора прямых эмульсий Неонола АФ 9–12 (1 масс.%) определена как наиболее стабильная композиция в рассматриваемых условиях проведения измерений, близких к эксплуатационным, по критериям эффективности процессов хранения и транспортировки суспензионных жидких топлив.

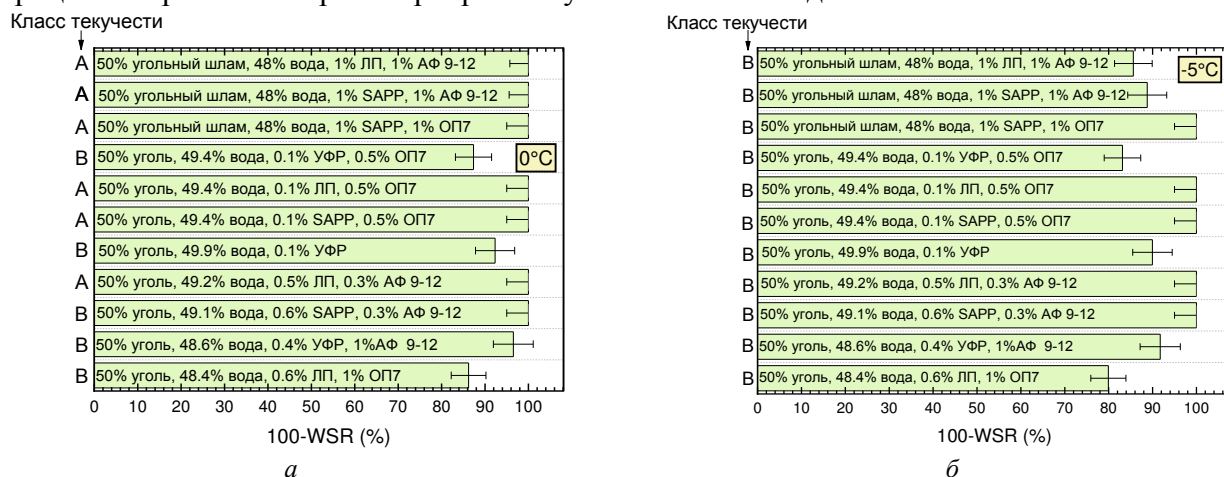


Рис 1.8. Фазовое разделение топливных ВУС после 72-часового термостатирования при температурах 0 °С (а) и -5 °С (б); используются массовые концентрации компонентов.

Экологические аспекты сжигания композиционных топлив

Регистрация концентраций антропогенных выбросов, образующихся при горении суспензионных топлив и угля, проводилась с применением стенда, представленного на рис. 1.9. В экспериментах применялась печь Nabertherm R 50/250/13. Состав газов и их концентрации определялись с помощью двух газоанализаторов: Testo-340 и Тест 1. Применение двух устройств обеспечивало высокую достоверность экспериментов. В комплекте с газоанализаторами использовались модульный зонд для забора газа из камеры сгорания и передачи его к чувствительным элементам газоанализаторов. Ввод топлива в муфельную печь осуществлялся с помощью координатного механизма. Сухая угольная пыль (размер частиц 100–140 мкм) помещалась на плоский держатель с применением специализированной формочки и пинцета после предварительного взвешивания. В начальный момент эксперимента топливо на держателе поступало в печь через одно отверстие, а через противоположное отверстие вводился зонд газоанализатора таким образом, чтобы его наконечник находился рядом с навеской топлива. Далее отверстия закрывались специальными заслонками из высокотемпературной изоляции. Таким образом обеспечивался контроль доступа кислорода в камеру сгорания. Газ, образующийся в процессе зажигания и горения, поступал через зонд в газоанализатор за счет создаваемой насосом тяги. Мониторинг динамики изменения основных газообразных продуктов в процессе горения осуществлялся с использованием программ «Easy emission» (Testo-340) и «Тест» (Тест 1).

В рамках настоящего исследования проведено сравнение группы топлив (уголь и суспензии на его основе) с использованием методов нормирования и расчета удельных концентраций загрязняющих веществ, выделяющихся при их сжигании. Выделены методики нормирования относительно: (i) массы сжигаемого топлива; (ii) выделяемой при горении тепловой энергии; (iii) удельных массовых выбросов в единицу времени; (iv)

удельных максимальных массовых выбросов; (v) удельных массовых выбросов, приходящихся на килограмм условного топлива (или 1 МДж теплоты). Расчет нормированных показателей осуществлялся согласно РД 34.02.305-98 «Методика определения валовых выбросов загрязняющих веществ в атмосферу от котельных установок ТЭС».

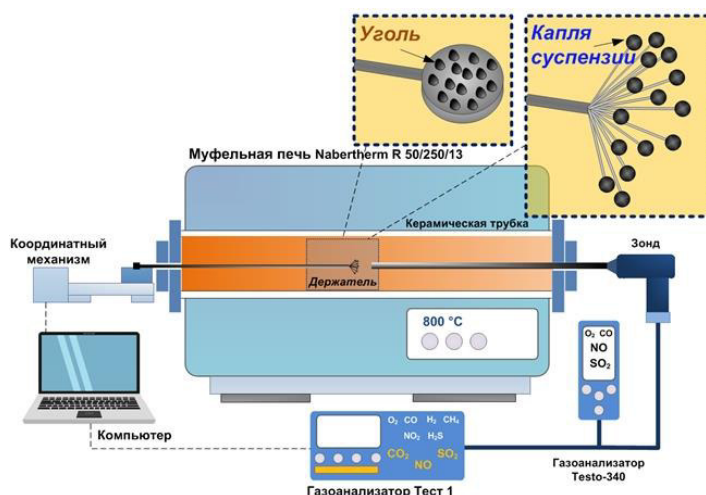


Рис. 1.9. Схема экспериментальной установки для регистрации антропогенных выбросов

По результатам экспериментов и проведенных расчетов получена обобщающая таблица, в которой представлены значения нормированных показателей для суспензий и угля.

Таблица 1.1. Нормированные показатели выбросов.

Топливо	Выбросы NO				Выбросы SO ₂				Выбросы CO ₂			
	мг/г	мг/с	г/МДж	г/кг у.т.	мг/г	мг/с	г/МДж	г/кг у.т.	мг/г	мг/с	г/МДж	г/кг у.т.
Уголь Д 100%	12.75	0.0022	0.23	6.61	6.45	0.0011	0.114	3.35	5650	0.98	100.06	2931
Уголь Д 50%, вода 50%	4.26	0.0011	0.15	4.29	2.02	0.0005	0.070	2.04	2470	0.63	84.99	2490
Фильтр-кек Д 50%, вода 50%	3.9	0.0005	0.12	3.45	2.7	0.0003	0.081	2.39	2412	0.32	72.80	2133
Фильтр-кек Д 50%, вода 45%, опилки 5%	3.98	0.0007	0.15	4.32	2	0.0004	0.074	2.17	1938	0.35	71.71	2101
Фильтр-кек Д 50%, вода 45%, турбинное масло 5%	3.37	0.0015	0.16	4.66	1.74	0.0008	0.082	2.40	1558	0.69	73.66	2158

Показано, что для одного топлива в зависимости от параметра нормирования (масса, время, теплота сгорания, условное топливо) значительно меняется количественное значение коэффициента выбросов, что делает невозможным их прямое сравнение. Следовательно, на практике при использовании альтернативных топлив, в частности суспензионных, на энергетических объектах необходим всесторонний учет большого числа параметров, который напрямую влияет на эмиссионные характеристики горения. Также полученные данные полезны при сопоставлении результатов исследования с нормативными документами и результатами других авторов при сравнении разных типов топлив. В ходе выполненных исследований установлено, что сжигание угля характеризовалось максимальными выбросами газообразных загрязняющих веществ вне

зависимости от массы топлива и температуры в камере сгорания. При сжигании суспензий концентрации CO_2 , SO_2 и NO_x снизились на 12–90% по сравнению с углем.

Также в рамках выполнения второго этапа проекта проведены экспериментальные исследования концентраций основных газовых компонентов (CO_2 , CO , H_2 , NO_x , SO_2), выделяющихся на стадиях пиролиза, газификации и горения топливных компонентов по отдельности и в составе суспензионных топлив. В модельной топочной камере (рис. 1.9) обеспечивался достаточно широкий диапазон температур среды – от 100 до 1000 °С. Установлены основные закономерности и особенности изменения концентраций газов на всех основных стадиях, протекающих при термическом разложении топлив (рис. 1.10).

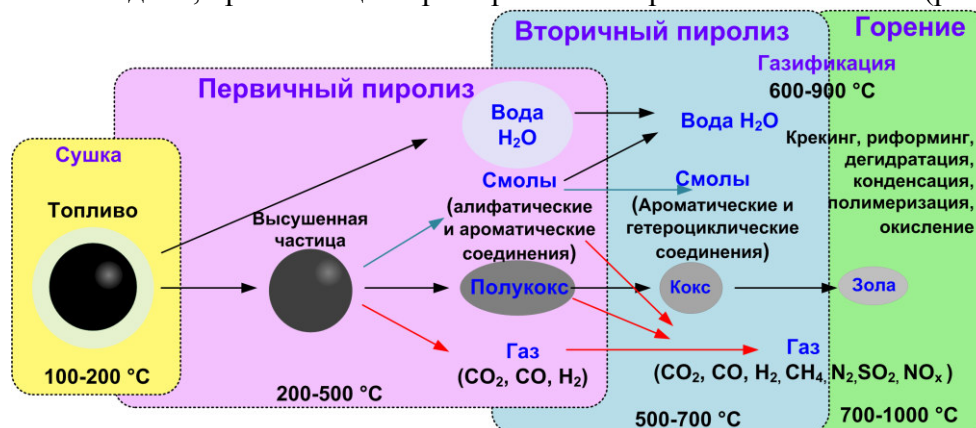


Рис. 1.10. Условия и стадии термического разложения топлива.

Установлено, что оксиды углерода являются основными газовыми выбросами при пиролизе и горении угольных топлив. Температура начала выделения диоксида углерода составила 200 °С, при этом интенсивное выделение данного газа регистрировалось при температурах свыше 550 °С на стадиях вторичного пиролиза и в момент начала активного горения. Отличия концентраций CO_2 при нагреве суспензий и сухих углей для температурного диапазона 700–1000 °С варьировались от 25 до 56%. Пиролиз суспензионных топлив характеризовался достаточно высокими концентрациями CO (до 65% выше, чем для угля) на стадиях первичного и вторичного пиролиза (до 550 °С). Это связано с большей площадью поверхности реагирования и образованием пор вследствие испарения воды. Пар в этом случае может выступать в качестве газифицирующего реагента в направлении превращения угля в летучие газы, что приводит к росту концентраций CO . Установлено, что применение добавок (опилок или отработанного турбинного масла) в составе суспензий способствовало росту средних концентраций CO при пиролизе. Разница в концентрациях CO на интервале температур 250–500 °С между ВУТ без примесей и ВУТ с добавками опилок или отработанного турбинного масла составила 28–42% и 15–47%, соответственно. Также выявлено, что начало интенсивного выделения газообразного CO и достижение экстремума для топлив с добавками происходило при более низких температурах, в результате чего эффективность пиролизующих установок может быть повышена. Показано, что применение водосодержащих топлив на основе угольного шлама характеризовалось повышенными концентрациями H_2 , особенно в зоне пиролиза. Концентрации превышали установленные значения для угля и сухого шлама на 12–96%. Зарегистрированный рост концентраций H_2 объясняется реакциями преобразования коксовой части и смолы в дополнительные молекулы H_2 в результате газификации, конверсии воды в газ и реакций риформинга смол. Пороговые температуры, по достижению которых фиксировался значительный рост концентраций SO_2 и NO_x составили 500 °С и 400 °С, соответственно. Выявлено, что максимальный положительный эффект от применения в составе водоугольных суспензий добавок биомассы достигается в температурном диапазоне от 850 °С до 1000 °С.

Математическое моделирование зажигания композиционного топлива

Доминирование кондуктивного теплового потока к поверхности топлива

При постановке задачи считалось, что на поверхность разогретого до высоких температур металлического цилиндра помещается образец топлива (газового гидрата или гелеобразного топлива) (рис. 1.11а), температура которого равна 203 К. Временной интервал с момента попадания образца топлива на поверхность цилиндра до выполнения условий зажигания представляет время задержки зажигания τ . При моделировании в качестве источника нагрева принят металлический цилиндр малых размеров.

Критерии зажигания, используемые при постановке задачи тепломассопереноса (рис. 1.11), принимались согласно представлениям современной теории зажигания конденсированных веществ: (i) энергия, выделяемая в результате химической реакции окисления горючего, больше теплоты, передаваемой от разогретой частицы топливу и формирующейся парогазовой смеси; (ii) температура смеси газообразных компонентов горючего в зоне реакции окисления превышает начальную температуру источника нагрева. Область решения задачи тепломассопереноса при кондуктивном нагреве показана на рисунке 1.11а.

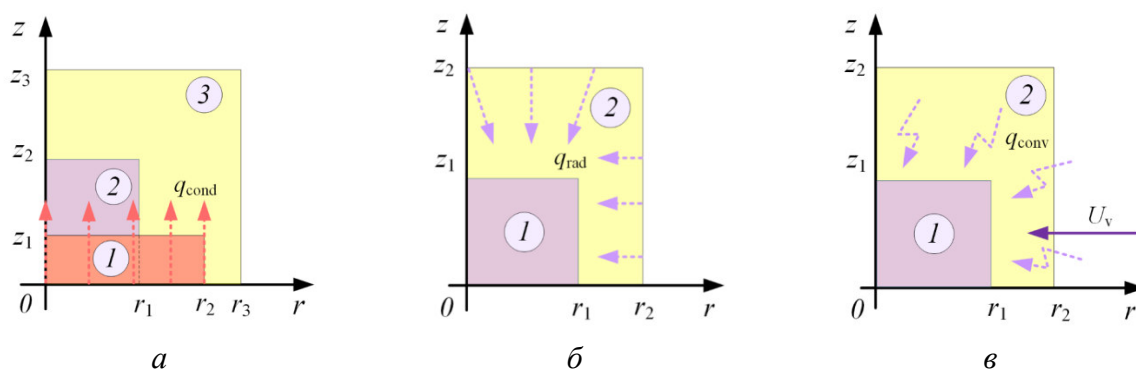


Рис. 1.11. Схема области решения задачи тепломассопереноса при: а) кондуктивном теплообмене: 1 – нагревающая поверхность; 2 – образец топлива; 3 – воздух, б) радиационном теплообмене, в) конвективном теплообмене: 1 – топливо; 2 – воздух.

Доминирование радиационного теплового потока к поверхности топлива

При постановке задачи считалось, что топливо, охлажденное до температуры 203 К, с помощью держателя вводится в неподвижный воздух, нагретый до высоких температур (973–1273 К). Конвекция газов в этой области не описывалась. Критерии зажигания, используемые при постановке задачи тепломассопереноса (рис. 1.11б), принимались аналогично зажиганию при доминировании кондуктивного теплового потока на поверхность образца топлива. Область решения задачи тепломассопереноса при радиационном нагреве показана на рисунке 1.11б.

Доминирование конвективного теплового потока к поверхности топлива

При постановке задачи считалось, что образец гелеобразного топлива с начальной температурой 203 К нагревается горелкой. Повышение температуры образца происходило за счет теплообмена с внешним воздухом, температура которого была выше температуры топлива. Зажигание происходило при скорости воздуха U_v , варьируемой в диапазоне 0.2–6 м/с. Область решения задачи тепломассопереноса при конвективном нагреве показана на рисунке 1.11в.

Результаты математического моделирования

Установлено, что для газового гидрата минимальная температура внешней среды, необходимая для зажигания, составляет около 973 К. Установлено, что в условиях конвективного нагрева имеет место снижение времен задержки зажигания газовых гидратов (до 8 %) при изменении коэффициента теплообмена в диапазонах 0–200 Вт/(м²·К), что соответствует скорости потока воздуха от 0 до 6 м/с. При радиационном

нагреве происходит значительное снижение времени задержки зажигания газовых гидратов (до 29 %) при росте степени черноты в диапазонах 0.85–0.99, что соответствует типичным материалам стенок муфельной печи и различных современных камер сгорания. Нагревать гидрат выше 1100 К с целью инициирования горения нерационально, так как в этом случае изменение коэффициента теплообмена практически не влияет на времена задержки зажигания. Таким образом, результаты можно использовать для обоснованного выбора температур инициирования горения гидратов при разных схемах теплообмена.

Следует отметить, что объемные концентрации парогазовой смеси при варьировании ключевых параметров в диапазонах $T=973\text{--}1273\text{ К}$ и $\alpha=0\text{--}200\text{ Вт}/(\text{м}^2\cdot\text{К})$ меняются в окрестности газового гидрата (0.5 мм) в диапазоне 30–90%, в области решения задачи в диапазоне 10–90%. Эти существенные изменения соотношений концентраций паров горючего компонента и окислителя в газовой фазе и объясняют ключевой результат – при изменении температуры внешней среды от 973 К до 1273 К происходит снижение времен задержки зажигания от 0.1 с до 0.0076 с. Наиболее заметно именно для схемы с конвективным нагревом проявляется температурная зависимость скоростей протекания исследованных реакций. В частности, температуры экспоненциально влияют на времена задержки зажигания, что хорошо видно из аппроксимационного выражения, полученного для описания устойчивого зажигания газового гидрата в условиях конвективного нагрева.

Установлено, что предельные плотности теплового потока, при которых происходит зажигание газового гидрата для схемы с радиационным нагревом, составляет $127\text{ кВт}/\text{м}^2$; для конвективного нагрева – $149\text{ кВт}/\text{м}^2$; для кондуктивного нагрева – $424\text{ кВт}/\text{м}^2$. Соответствующие отличия для трех схем нагрева обусловлены существенной разницей нагреваемых площадей поверхности образцов топлив. Чем выше значение этой площади, тем больше массовая концентрация вдуваемых паров горючего, интенсивнее протекает их взаимодействие с окислителем, и ускоряется процесс зажигания. Так как в составе образца топливного гидрата присутствует довольно большая доля воды, имеющей высокую теплоемкость и теплоту парообразования, то для зажигания важно интенсифицировать локальный прогрев приповерхностного слоя топлива и фазовые превращения.

Максимальные времена задержки зажигания гелеобразного топлива соответствовали схеме с радиационным нагревом (4.690–2.366 с при повышении температуры от 973 К до 1273 К). При кондуктивном нагреве времена задержки зажигания снижаются от 3.715 с до 1.568 с в зависимости от температуры источника в виде подложки. Минимальные времена задержки зажигания соответствуют конвективному нагреву и составляют 2.108–0.302 с. Для радиационного и кондуктивного нагрева при изменении T от 973 К до 1273 К времена задержки зажигания отличаются примерно в 2 раза, при конвективном нагреве отличие составляет в 7 раз. Эти особенности можно объяснить тем, что при кондуктивном и радиационном нагреве тепловой поток к поверхности топлива меняется достаточно умеренно при повышении температуры по сравнению с конвективным теплообменом. К тому же при кондуктивном нагреве подвод тепла к поверхности топлива осуществляется лишь с одной стороны, а при конвективном и радиационном нагреве образец топлива нагревается со всех сторон.

При изменении температуры T в диапазоне 873–1273 К и варьировании степени черноты 0.85–0.99 времена задержки зажигания гелеобразного топлива изменяются от 8.776 с до 2.366 с. Коэффициент излучения не влияет на времена задержки зажигания. Сособенно хорошо это заметно при высоких температурах (выше 1073 К). При температурах ниже 1073 К, влияние степени черноты очень слабо выражено. При $\varepsilon = 0.85\text{--}0.99$ и $T = 873\text{ К}$ τ снижается от 8.776 с до 8.763 с (изменение менее 1 %). Установлено, что в условиях конвективного нагрева происходит снижение времени задержки зажигания гелеобразного топлива (в среднем до 66 %) при изменении коэффициента теплообмена в диапазонах $0\text{--}200\text{ Вт}/(\text{м}^2\cdot\text{К})$, что соответствует скорости движения потока воздуха до 6 м/с. Минимальное снижение времени задержки зажигания от 0.778 с до 0.319 с (т.е. 59 %) соответствует температуре нагрева 1073 К, а максимальное температуре 1273 К – τ

изменяется от 0.302 с до 0.088 с (т.е. 71 %) в условиях варьирования значения α от 0 до 200 Вт/(м²·К). В условиях кондуктивного нагрева увеличение предэкспоненциального множителя реакции окисления от $8 \cdot 10^1 \text{ с}^{-1}$ до $8 \cdot 10^3 \text{ с}^{-1}$ при постоянной энергии активации приводит к значительному снижению времени задержки зажигания (в среднем до 96 %) при $T = 1173 \text{ К}$. При постоянном предэкспоненциальном множителе увеличение энергии активации от 40 до 70 Дж/моль приводит к увеличению времени задержки зажигания до 90 %. В условиях кондуктивного нагрева максимальное время задержки зажигания гелеобразного топлива реализуется при $E_a = 70 \text{ Дж/моль}$ и $k_0 = 8 \cdot 10^1 \text{ с}^{-1}$ и составляет 3.809 с. Минимальное время задержки зажигания ($\tau = 0.013 \text{ с}$) соответствует $E_a = 40 \text{ Дж/моль}$ и $k_0 = 8 \cdot 10^3 \text{ с}^{-1}$. Установленные диапазоны изменения времени задержки зажигания топлива при варьировании E_a и k_0 представляют интерес при использовании идентичных систем зажигания в условиях работы двигателей и камер сгорания с различными по компонентному составу топливами.

Установлено, что предельные плотности теплового потока, при которых происходит зажигание гелеобразного топлива с начальной температурой 203 К для схемы с радиационным нагревом, составляют 110 кВт/м², для конвективного нагрева – 149 кВт/м², для кондуктивного нагрева – 123 кВт/м².

Влияние добавки бурого угля, биомассы и полукокса к каменному углю на интенсификацию воспламенения основного топлива при безмазутной растопке котла

При безмазутной растопке угольных котлов одним из основных элементов системы является муфельный предтопок (рис. 1.12), который предварительно прогревается до относительно высоких температур (700–800 °С). Угольная пыль посредством пылепитателя подается в этот предтопок, где, двигаясь в воздушном потоке, прогревается и воспламеняется. Процесс горения топлива протекает в топке котла, где формируется факел горящей угольной пыли (рис. 1.12).

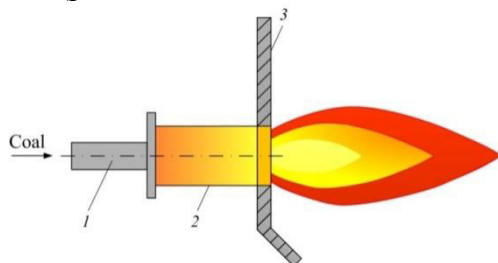


Рис. 1.12. Схема типичной системы безмазутной растопки угольного котла: 1 – пылепитатель; 2 – муфель; 3 – топка.

Экспериментальные исследования процесса зажигания выполнены как для топливных смесей на основе каменного угля с добавлением бурого угля, древесных опилок, полукокса, так и для всех четырех твердых топлив. Выбор таких компонентов топливных смесей обусловлен тем, что каменный уголь достаточно широко применяется в качестве основного топлива на ТЭС [11], полукокс применяется в качестве основного топлива как на металлургических заводах, так и в качестве добавочного топлива на ТЭС [12] для повышения калорийности основного топлива (каменного или бурого угля). В зависимости от типа сырья, технологии приготовления полукокса его характеристики, в том числе воспламенения, могут варьироваться в достаточно широких диапазонах. Древесные опилки и бурый уголь являются типичными высокорекреакционными твердыми топливами (из-за высокого содержания летучих), добавление которых к высококалорийному основному топливу ТЭС оказывает положительный эффект на интенсификацию процесса воспламенения. Приняты следующие обозначения для

компонентов топливных смесей (их основные характеристики, полученные в рамках стандартных методов технического и элементного анализа [13–15], приведены в табл. 1.2):
 No. 1 – полукокс, полученный высокотемпературным пиролизом угля марки ЗБ, разрез «Балахтинский» Канска-Ачинского угольного бассейна, Красноярский край;
 No. 2 – древесина хвойных пород;
 No. 3 – бурый уголь марки 2Б, разрез «Бородинский» Канска-Ачинского угольного бассейна, Красноярский край;
 No. 4 – каменный уголь марки Д, Кузнецкий угольный бассейн, Кемеровская область.

Таблица 1.2. Характеристики компонентов топливных смесей

No.	Технический анализ				Элементный состав				
	W^a , %	A^d , %	V^{daf} , %	$Q_{s,v}^a$, МДж/кг	C^{daf} , %	H^{daf} , %	N^{daf} , %	S^{daf} , %	O^{daf} , %
1	1.20	15.45	8.20	27.06	76.82	1.41	0.76	0.38	3.99
2	19.80	2.00	73.52	16.45	50.30	6.00	0.20	0.10	43.40
3	14.11	4.12	47.63	22.91	73.25	6.52	0.79	0.44	18.99
4	10.09	8.52	40.19	24.82	77.46	6.25	2.27	0.35	13.64

Исследование процессов зажигания топливных смесей и их отдельных компонентов в виде мелкодисперсных частиц выполнено с использованием хорошо апробированной экспериментальной методики и стенда, внешний вид которого приведен на рис. 1.13.

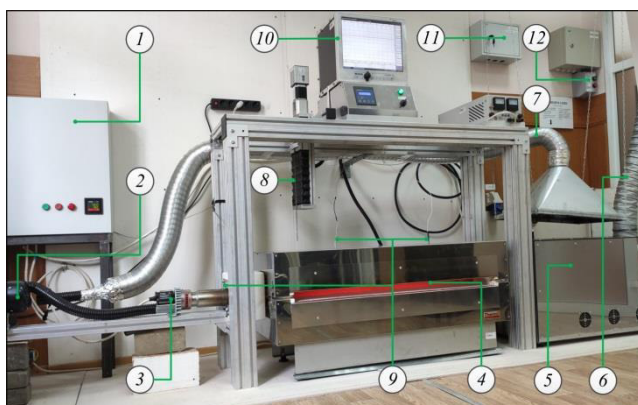


Рис. 1.13. Внешний вид экспериментального стенда: 1 – щит управления; 2 – воздушный вентилятор; 3 – воздухонагреватель; 4 – муфельная печь с кварцевой трубой; 5 – воздухоохладитель; 6 – вытяжная вентиляция; 7 – система рециркуляции разогретого воздуха; 8 – механизм ввода мелкодисперсных частиц топлива в поток разогретого воздуха; 9 – термопары; 10 – многоканальный регистратор; 11 – щит электропитания; 12 – блок управления вытяжной вентиляцией.

С помощью автоматизированного механизма 8 порция топлива массой 5 мг через керамический канал диаметром 6 мм, проходящий сквозь верхнюю крышку муфельной печи 4 (рис. 1.13) и соответствующее отверстие в стенке кварцевой трубы, вводилась в воздушный поток. Процессы, протекающие при движении мелкодисперсных твердых частиц в воздушном потоке (внутри кварцевого цилиндра) на протяжении 0.9 м, регистрировались через смотровую щель муфельной печи 4 (рис. 1.13) высокоскоростной цветной видеокамерой Phantom V411: скорость съемки 4000 к/с при разрешении 1008×56 пикселей, 12 бит, минимальное время экспозиции 1 мкс. Комплектно с видеокамерой использовался широкоугольный объектив Distagon 1.4/35 ZF.2 T*:

диафрагма при минимальном фокусном расстоянии 1.4, минимальное фокусное расстояние 35 мм. Видеокамера располагалась перпендикулярно трубчатой муфельной печи 4 на расстоянии около 2 м от нее. Автоматизированная обработка видеозаписей выполнялась с помощью ПО Phantom Camera Control и Tema Automotive.

Условия проведения такого эксперимента достаточно хорошо соответствуют реальным условиям горения твердого натурального топлива в топках котлов в отличие от условий широко распространенного термогравиметрического анализа угля при нагревании в окислительной среде.

При определении значений основной характеристики исследуемого процесса – времени задержки зажигания (t_d) для частиц разных размеров требовалось решить две задачи. Во-первых, идентифицировать момент зажигания частиц топлива. Во-вторых, установить длительность промежутка времени от момента ввода частиц в поток разогретого воздуха до момента их воспламенения, т.к. состав контрольно-измерительной системы экспериментального стенда (рис. 1.13) не позволял достоверно зарегистрировать первое событие (момент начала индукционного периода). Таким образом, время задержки зажигания t_d соответствует длительности временного периода между двумя событиями: ввод частиц топлива в поток разогретого воздуха ($t=0$); их воспламенение при движении в этом потоке ($t=t_d$).

Для углей, древесины, полукокса и топливных смесей на основе этих компонентов с разными размерами частиц проводились серии экспериментов (от 5 до 10) при постоянных значениях температуры (T_g) потока разогретого воздуха (диапазон 500–800 °С с шагом 50 °С) в кварцевом цилиндре муфельной печи 4 (рис. 1.13). Момент зажигания регистрировался автоматически по достижению (или превышению) порогового значения (220 в оттенках серого) интенсивности свечения в какой-либо точке в области видеорегистрации. Таким образом определялась координата плоскости (относительно $L=0$), перпендикулярной направлению движения воздушного потока, в которой загоралась частица топлива.

По результатам экспериментов были получены аппроксимационные выражения $t_d=f(x)$ для твердых частиц разной дисперсности (менее 40 мкм; 40–140 мкм; 140–250 мкм; 250–375 мкм; 375–800 мкм) после решения задачи, которая достаточно подробно описана авторами [16]. Предполагалось, что твердые частицы ($\rho_p=1500 \text{ kg/m}^3$) сферической формы (размеры соответствовали средним размерам указанных выше диапазонов $D_p=20 \text{ мкм}$, $D_p=90 \text{ мкм}$, $D_p=195 \text{ мкм}$, $D_p=313 \text{ мкм}$, $D_p=588 \text{ мкм}$) вводились с начальной скоростью $V_p=0$ в горизонтальный воздушный поток с характеристиками $V_a=5 \text{ м/с}$, $\rho_a=0.383 \text{ кг/м}^3$, $\mu_a=40.5 \cdot 10^{-6} \text{ Па}\cdot\text{с}$. Были приняты средние значения плотности и динамической вязкости воздуха в диапазоне температур 500–800 °С, т.к. их значения в этом диапазоне изменяются менее чем на 30 % и 20 %, соответственно. После ввода порции топлива в воздушный поток объемная концентрация частиц в условиях их движения в цилиндрической трубе диаметром 0.1 м составляла менее 0.02 (разреженная дисперсная система). Поэтому при решении сформулированной задачи рассматривалось движение одиночной частицы, характеристики которого не зависят от соседних частиц. В рамках используемого упрощенного подхода не учитывалось влияние динамического и теплового запаздывания частиц на характеристики воздушного потока. Предполагалось, что на частицу действует только сила сопротивления. Действие силы тяжести не учитывалось, т.к. при анализе видеogramм зарегистрировано прямолинейное движение частиц в горизонтальном направлении.

Установлено, что при указанных выше исходных данных режим течения частиц разных размеров в воздушном потоке характерен для переходной области, т.к. $Re=0.95$ – 27.80 (промежуточный режим обтекания частицы дисперсной фазы реализуется в диапазоне чисел Рейнольдса $Re=0.015$ – 700 [17]). В таких условиях зависимость безразмерной скорости движения частицы от безразмерного времени имеет вид [18]:

$$v = 1 - \frac{6\sqrt{6}}{\text{Re}} \left[\left(1 + \frac{6}{(\text{Re}|1-v_0|)^{2/3}} \right) \exp(\tau) - 1 \right]^{-3/2}, \quad (1.1)$$

где $\text{Re} = \frac{\rho_a V_a D_p}{\mu_a}$, $\tau = \frac{12\mu_a}{\rho_p D_p^2} t$, $v = \frac{V_p}{V_a}$.

На рис. 1.14 приведены зависимости безразмерных скоростей движения частиц от безразмерного времени, полученные с использованием выражения (1.1) для условия $v_0=0$ (начальная скорость частиц $V_p=0$) при числах Рейнольдса $\text{Re}=0.95-27.80$, соответствующих рассматриваемым средним размерам частиц $D_p=20$ мкм, $D_p=90$ мкм, $D_p=195$ мкм, $D_p=313$ мкм, $D_p=588$ мкм.

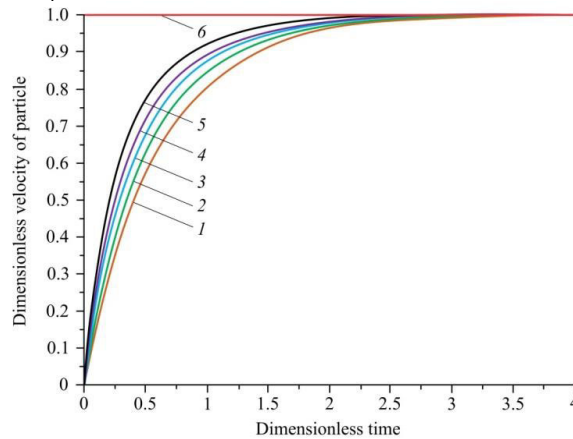


Рис. 1.14. Зависимости безразмерных скоростей частиц от безразмерного времени в условиях движения в воздушном потоке (кривая б) при: 1 – $\text{Re}=0.95$; 2 – $\text{Re}=4.26$; 3 – $\text{Re}=9.22$; 4 – $\text{Re}=14.80$; 5 – $\text{Re}=27.80$.

После перехода от безразмерной к размерной постановке получены мгновенные значения скоростей движения частиц разных размеров в воздушном потоке на промежутке от $x=0$ до $x=L$ (рис. 1.15а) и соответствующие времена достижения этими частицами поперечных сечений кварцевого цилиндра с координатами из указанного промежутка (рис. 1.15б).

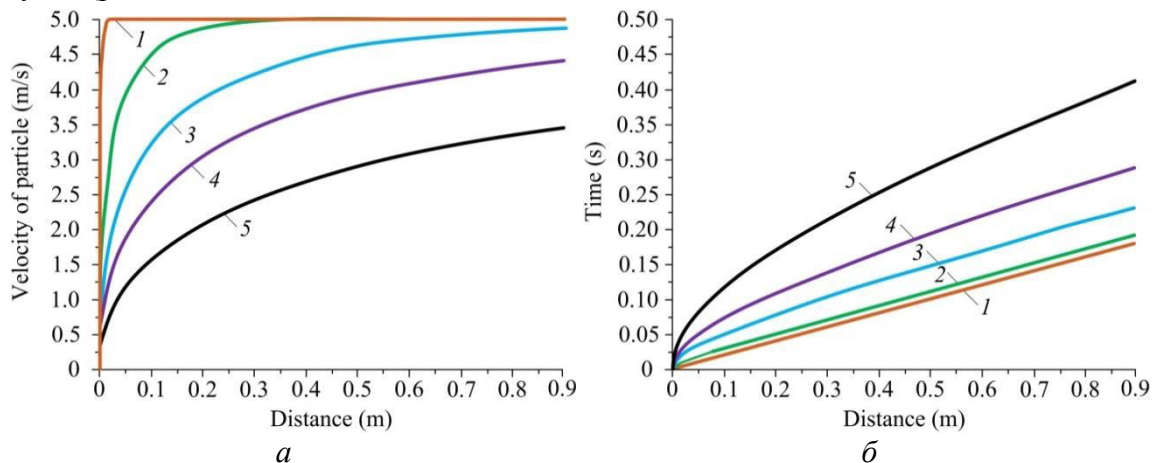


Рис. 1.15. Мгновенные значения скоростей движения частиц разных размеров в воздушном потоке на промежутке $x=0-0.9$ м (а) и соответствующие времена прохождения этими частицами аналогичных расстояний на промежутке $x=0-0.9$ м (б): 1 – $D_p=20$ мкм; 2 – $D_p=90$ мкм; 3 – $D_p=195$ мкм; 4 – $D_p=313$ мкм; 5 – $D_p=588$ мкм.

Для кривых (рис. 1.15б) получены следующие аппроксимационные выражения $t_d=f(x)$, которые использовались при обработке видеозаписей для определения времен задержки зажигания при $V_a=5$ м/с, $T_a=500-800$ °С, $x=0-0.9$ м.

Частицы средним размером 20 мкм (диапазон менее 40 мкм):

$$t_d=0.2x+0,0007, R^2=1. \quad (1.2)$$

Частицы средним размером 90 мкм (диапазон 40–140 мкм):

$$t_d=-3.6625x^6+10.774x^5-12.326x^4+6.9079x^3-1.9596x^2+0.4616x, R^2=0.9998. \quad (1.3)$$

Частицы средним размером 195 мкм (диапазон 140–250 мкм):

$$t_d=-8.3543x^6+24.398x^5-27.692x^4+15.422x^3-4.4134x^2+0.8496x, R^2=0.9992. \quad (1.4)$$

Частицы средним размером 313 мкм (диапазон 250–375 мкм):

$$t_d=-13.469x^6+39.101x^5-44.064x^4+24.331x^3-6.9074x^2+1.2469x, R^2=0.9987. \quad (1.5)$$

Частицы средним размером 588 мкм (диапазон 375–800 мкм):

$$t_d=-23.697x^6+68.524x^5-76.842x^4+42.164x^3-11.887x^2+2.0475x, R^2=0.9980. \quad (1.6)$$

Значения t_d вычислялись путем подстановки в выражения (1.2)–(1.6) значений координат x , соответствующих положению частиц в момент зажигания, которые были установлены ранее при анализе видеозаписей в рамках алгоритма ПО Phantom Camera Control. Систематическая и случайная погрешности определения времен t_d , обусловленные скоростью видеорегистрации и разбросом экспериментальных данных, не превышали 0.5 % и 15 %, соответственно.

Основные результаты выполненного исследования приведены в виде аппроксимационных зависимостей $t_d=f(T_a)$:

топливо No. 1 (полукокс):

дисперсность менее 40 мкм, $550 \leq T_a \leq 750$ °С: $t_d=-0.00068T_a+0.514, R^2=0.8865;$ (1.7)

дисперсность 40–140 мкм, $550 \leq T_a \leq 750$ °С: $t_d=-0.00063T_a+0.495, R^2=0.8991;$ (1.8)

дисперсность 140–250 мкм, $550 \leq T_a \leq 800$ °С: $t_d=-0.00054T_a+0.448, R^2=0.8963;$ (1.9)

дисперсность 250–375 мкм, $550 \leq T_a \leq 800$ °С: $t_d=-0.00038T_a+0.379, R^2=0.8719;$ (1.10)

дисперсность 375–800 мкм, $650 \leq T_a \leq 800$ °С: $t_d=-0.00019T_a+0.306, R^2=0.8932;$ (1.11)

топливо No. 2 (древесина):

дисперсность менее 40 мкм, $500 \leq T_a \leq 750$ °С: $t_d=-0.00063T_a+0.478, R^2=0.8976;$ (1.12)

дисперсность 40–140 мкм, $500 \leq T_a \leq 800$ °С: $t_d=-0.00052T_a+0.440, R^2=0.8965;$ (1.13)

дисперсность 140–250 мкм, $500 \leq T_a \leq 800$ °С: $t_d=-0.00053T_a+0.457, R^2=0.8878;$ (1.14)

дисперсность 250–375 мкм, $550 \leq T_a \leq 800$ °С: $t_d=-0.00027T_a+0.333, R^2=0.8745;$ (1.15)

дисперсность 375–800 мкм, $650 \leq T_a \leq 800$ °С: $t_d=-0.00017T_a+0.294, R^2=0.8653;$ (1.16)

топливо No. 3 (бурый уголь):

дисперсность менее 40 мкм, $500 \leq T_a \leq 750$ °С: $t_d=-0.00060T_a+0.472, R^2=0.8672;$ (1.17)

дисперсность 40–140 мкм, $500 \leq T_a \leq 800$ °С: $t_d=-0.00047T_a+0.419, R^2=0.8732;$ (1.18)

дисперсность 140–250 мкм, $500 \leq T_a \leq 800$ °С: $t_d=-0.00048T_a+0.436, R^2=0.8927;$ (1.19)

дисперсность 250–375 мкм, $550 \leq T_a \leq 800$ °С: $t_d=-0.00022T_a+0.319, R^2=0.8859;$ (1.20)

дисперсность 375–800 мкм, $650 \leq T_a \leq 800$ °С: $t_d=-0.00015T_a+0.290, R^2=0.8531;$ (1.21)

топливо No. 4 (каменный уголь):

дисперсность менее 40 мкм, $550 \leq T_a \leq 800$ °С: $t_d=-0.00050T_a+0.442, R^2=0.8154;$ (1.22)

дисперсность 40–140 мкм, $550 \leq T_a \leq 800$ °С: $t_d=-0.00043T_a+0.414, R^2=0.8763;$ (1.23)

дисперсность 140–250 мкм, $550 \leq T_a \leq 800$ °С: $t_d=-0.00031T_a+0.356, R^2=0.8537;$ (1.24)

дисперсность 250–375 мкм, $600 \leq T_a \leq 800$ °С: $t_d=-0.00022T_a+0.324, R^2=0.8077;$ (1.25)

дисперсность 375–800 мкм, $700 \leq T_a \leq 800$ °С: $t_d=-0.00013T_a+0.282, R^2=0.8279;$ (1.26)

топливная смесь No. 1 (полукокс) + No. 4 (каменный уголь), дисперсность 140–250 мкм:

75 % No. 1 + 25 % No. 4, $550 \leq T_a \leq 800$ °С: $t_d=-0.00046T_a+0.415, R^2=0.8679;$ (1.27)

50 % No. 1 + 50 % No. 4, $550 \leq T_a \leq 800$ °С: $t_d=-0.00040T_a+0.388, R^2=0.8495;$ (1.28)

25 % No. 1 + 75 % No. 4, $550 \leq T_a \leq 800$ °С: $t_d=-0.00034T_a+0.363, R^2=0.8857;$ (1.29)

топливная смесь No. 2 (древесина) + No. 4 (каменный уголь), дисперсность 140–250 мкм:

75 % No. 2 + 25 % No. 4, $500 \leq T_a \leq 800$ °С: $t_d=-0.00048T_a+0.436, R^2=0.8378;$ (1.30)

50 % No. 2 + 50 % No. 4, $550 \leq T_a \leq 800$ °С: $t_d=-0.00040T_a+0.398, R^2=0.8164;$ (1.31)

$$25 \% \text{ No. 2} + 75 \% \text{ No. 4}, 550 \leq T_a \leq 800 \text{ }^\circ\text{C}: t_d = -0.00034T_a + 0.370, R^2 = 0.8257; \quad (1.32)$$

топливная смесь No. 3 (бурый уголь) + No. 4 (каменный уголь), дисперсность 140–250 мкм:

$$75 \% \text{ No. 3} + 25 \% \text{ No. 4}, 500 \leq T_a \leq 800 \text{ }^\circ\text{C}: t_d = -0.00044T_a + 0.422, R^2 = 0.8046; \quad (1.33)$$

$$50 \% \text{ No. 3} + 50 \% \text{ No. 4}, 550 \leq T_a \leq 800 \text{ }^\circ\text{C}: t_d = -0.00038T_a + 0.389, R^2 = 0.8261; \quad (1.34)$$

$$25 \% \text{ No. 3} + 75 \% \text{ No. 4}, 550 \leq T_a \leq 800 \text{ }^\circ\text{C}: t_d = -0.00034T_a + 0.368, R^2 = 0.8157. \quad (1.35)$$

Результаты выполненных экспериментальных исследований, в том числе аппроксимационные выражения (1.7) – (1.35), применимы при проектировании, монтаже и предварительных испытаниях горелочных устройств на основе муфельных предтопок для систем безмазутной растопки котлов, так как они максимально приближены к реальным процессам воспламенения пылеугольного топлива на ТЭС. Стоит отметить, что воспламенение частиц твердых топлив при температурах окислителя 500–800 °С будет способствовать повышению технико-экономических показателей работы котла за счет снижения расход энергии на собственные нужды.

Литература

- [1] Fatehi H, Weng W, Li Z, Bai X-S, Aldén M. Recent Development in Numerical Simulations and Experimental Studies of Biomass Thermochemical Conversion. Energy & Fuels 2021. <https://doi.org/10.1021/acs.energyfuels.0c04139>.
- [2] Demirbas A. Combustion characteristics of different biomass fuels. Prog Energy Combust Sci 2004;30:219–30. <https://doi.org/10.1016/j.peccs.2003.10.004>.
- [3] Guo F, He Y, Hassanpour A, Gardy J, Zhong Z. Thermogravimetric analysis on the co-combustion of biomass pellets with lignite and bituminous coal. Energy 2020;197:117147. <https://doi.org/10.1016/j.energy.2020.117147>.
- [4] Ullah H, Liu G, Yousaf B, Ali MU, Abbas Q, Zhou C. Combustion characteristics and retention-emission of selenium during co-firing of torrefied biomass and its blends with high ash coal. Bioresour Technol 2017;245:73–80. <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2017.08.144>.
- [5] Yousaf B, Liu G, Abbas Q, Wang R, Ubaid Ali M, Ullah H, et al. Systematic investigation on combustion characteristics and emission-reduction mechanism of potentially toxic elements in biomass- and biochar-coal co-combustion systems. Appl Energy 2017;208:142–57. <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2017.10.059>.
- [6] Bi H, Wang C, Lin Q, Jiang X, Jiang C, Bao L. Combustion behavior, kinetics, gas emission characteristics and artificial neural network modeling of coal gangue and biomass via TG-FTIR. Energy 2020;213:118790. <https://doi.org/10.1016/j.energy.2020.118790>.
- [7] Zhang Y, Zhao J, Ma Z, Yang F, Cheng F. Effect of oxygen concentration on oxy-fuel combustion characteristic and interactions of coal gangue and pine sawdust. Waste Manag 2019;87:288–94. <https://doi.org/10.1016/j.wasman.2019.01.040>.
- [8] Wang R, Liu J, Gao F, Zhou J, Cen K. The slurring properties of slurry fuels made of petroleum coke and petrochemical sludge. Fuel Process Technol 2012;104:57–66. <https://doi.org/10.1016/j.fuproc.2012.07.006>.
- [9] Vershinina KY, Shlegel NE, Strizhak PA. Recovery of waste-derived and low-grade components within fuel slurries. Energy 2019;183. <https://doi.org/10.1016/j.energy.2019.07.031>.
- [10] Won J, Baek SW, Kim H. Autoignition and combustion behavior of emulsion droplet under elevated temperature and pressure conditions. Energy 2018;163:800–10. <https://doi.org/10.1016/j.energy.2018.08.185>.
- [11] Burdukov AP, Butakov EB, Chernova GV. Ignition and lighting of coal-fired boilers with mechanically activated micronized coal instead of fuel oil. J. Eng. Thermophys. 2020;29:492–502. <https://doi.org/10.1134/S1810232820030133>.
- [12] Yao H, He B, Ding G, Tong W, Kuang Y. Thermogravimetric analyses of oxy-fuel co-combustion of semi-coke and bituminous coal. Appl. Therm. Eng. 2019;156:708–721. <https://doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2019.04.115>.

- [13] ISO 11722:1999, Solid mineral fuels – Hard coal – Determination of moisture in the general analysis test sample by drying in nitrogen.
- [14] ISO 1171:2010, Solid mineral fuel – Determination of ash.
- [15] ASTM D5373-14e1, Standard Test Methods for Determination of Carbon, Hydrogen and Nitrogen in Analysis Samples of Coal and Carbon in Analysis Samples of Coal and Coke, ASTM International, West Conshohocken, PA, 2014.
- [16] Antonov DV, Kuznetsov GV, Strizhak PA. Mathematical simulation of the heat and mass transfer in the movement of liquid droplets in a gas medium under the conditions of their intense phase transformations. *J. Eng. Phys. Thermophys.* 2020;93;5;1055–1076. <https://doi.org/10.1007/s10891-020-02207-3>.
- [17] Arkhipov VA, Vasenin IM, Trofimov VF, Usanina AS. Stability of dispersed-particle shape at small Reynolds numbers. *Fluid Dyn.* 2013;48;2;143–150. <https://doi.org/10.1134/S0015462813020026>.
- [18] Arkhipov VA, Boiko VM, Goldin VD, Maslov EA, Orlov SE, Poplavskiy SV, Usanina AS, Zharova IK. Mathematical modelling of the liquid atomization process by cocurrent gas flow. *IOP Conf. Ser.: Mater. Sci. Eng.* 2016;124;1;012076. doi:10.1088/1757-899X/124/1/012076.

2. Условия расширения пределов и интенсификации горения композиционных топлив (суспензий) за счет механизма микровзрывного диспергирования капель

Математическое моделирование теплопереноса в капле водоугольного топлива, приводящего к ее фрагментации

На базе полученных результатов экспериментальных исследований разработаны физическая и математическая модели для описания процессов теплопереноса в каплях перспективных водоугольных топлив (ВУТ) перед их фрагментацией вследствие интенсивного нагрева. Модель основана на решении системы уравнений теплопереноса с учетом установленных в проведенных экспериментах особенностей протекания процессов фрагментации капель ВУТ. Зарегистрированы значения времени задержки фрагментации капель ВУТ при нагреве с использованием критерия распада, установленного в проведенных экспериментах: в случае ВУТ – полное испарение влаги (воды) из капли топливной композиции. Проведены серии экспериментов для апробации модели, а также уточнения механизма реализации исследованных процессов. Установлено влияние на времена задержки фрагментации группы факторов: температура (773–2273 К), начальные размеры капель (0.05–1.55 мм), компонентный состав топлива (массовая концентрация твердых частиц от 40 до 60 %). Выделены условия интенсификации фрагментации и зажигания перспективных топливных суспензий.

На рис. 2.1 представлены типичные видеокadres процессов нагрева и распада капель водоугольных топлив при высокотемпературном нагреве. Особенности распада капель ВУТ с высокой массовой долей твердых составляющих (более 5 %) заключались в длительной этапной фрагментации с образованием крупных вторичных фрагментов размерами (радиусами) не менее 100 мкм. Интенсивность фрагментации (состоит в меньших временах задержки, большем количестве вторичных фрагментов, меньших размерах последних) топливных составов становилась выше с увеличением температуры нагрева. При анализе видеокadres хорошо видно, что приповерхностный слой капли ВУТ практически полностью высушивался. Лишь изредка регистрировался отрыв от поверхности капли влажных фрагментов. В связи с этим при математическом моделировании в качестве критерия фрагментации можно использовать полное высушивание приповерхностного слоя капли ВУТ. Видеокadres показали, что толщина такого приповерхностного слоя может достигать $(0.25–1.0)R_{d0}$. В связи с этим целесообразно выбирать условие высушивания такого слоя при последующей разработке физической и математической моделей.

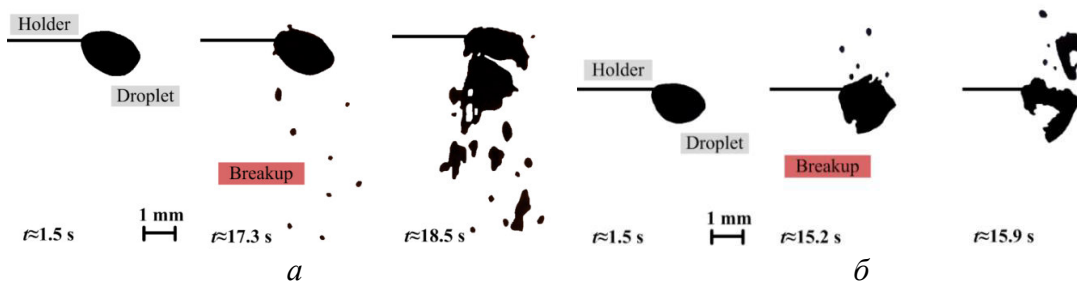


Рис. 2.1. Типичные видеокadres процессов нагрева и дробления капли водоугольного топлива. Исходные параметры: $T_g=773$ К; $R_{d0}=0.8$ мм; содержание воды = 50 %; Случай (а): $U_d=0$ м/с; Случай (б): $U_d=3$ м/с.

В экспериментах установлено, что фрагментация капель ВУТ происходит только при полном испарении влаги из приповерхностных слоев композиции, толщина приповерхностного слоя может достигать $(0.25-1.0)R_{d0}$. Поэтому в качестве критерия фрагментации ВУТ выбрано условие полного испарения влаги из приповерхностного слоя водоугольной капли. При моделировании рассмотрен предельный случай, регистрируемый в экспериментах, когда влага полностью выходит из топливной композиции, т.е. концентрация воды в центре капли ВУТ равняется нулю (уравнение 2.1), приповерхностный слой принимается равным размеру капли ВУТ R_d . При этом происходит заполнение полостей частицы ВУТ разогретым воздухом. Существенно возрастают термические напряжения в каркасе капли суспензии.

$$Y_w(R=0) = 0 \quad (2.1)$$

Видеокadres экспериментов иллюстрировали формирование на поверхности капли большой совокупности кратеров, которые в дальнейшем становились источниками полых каналов в каркасе образца топлива. Чем дольше протекал процесс, тем на большую глубину распространялись данные полые элементы. На кадрах видеogramм было хорошо видно, что чем больше кратеров на поверхности капли суспензии формировалось, тем быстрее протекал прогрев образца топлива. Это связано с повышением коэффициента аэродинамического сопротивления образца топлива и площади его поверхности (как следствие, площади интенсивного теплообмена). Увеличение давления паров внутри полостей и повышение термических напряжений способствует фрагментации капли.

Изучить процессы теплопереноса в капле перед фрагментацией на основе критерия (уравнение 2.1) можно с использованием простой математической модели теплопереноса discrete particle model (DPM) в Ansys Fluent. Модель DPM базируется методе Эйлера–Лагранжа, где газовая фаза рассматривается как континуум, а частица отслеживается индивидуально как дискретный объект. Схема области решения задачи теплопереноса в системе «капля ВУТ – высокотемпературная газовая среда» с сеткой (14400 элементов, 14641 узел) представлена на рис. 2.2. Данная модель позволяет рассмотреть предельный случай критерия фрагментации капель ВУТ, когда выполняется условие уравнения 1 (влага полностью выходит из топливной композиции). Заметим, что при моделировании условий фрагментации ВУТ по испарению влаги из приповерхностных слоев, когда размер приповерхностного слоя находится в диапазоне $(0.25-1.0)R_{d0}$, необходима разработка моделей теплопереноса с учетом распределений температуры внутри капель и диффузией твердых частиц.

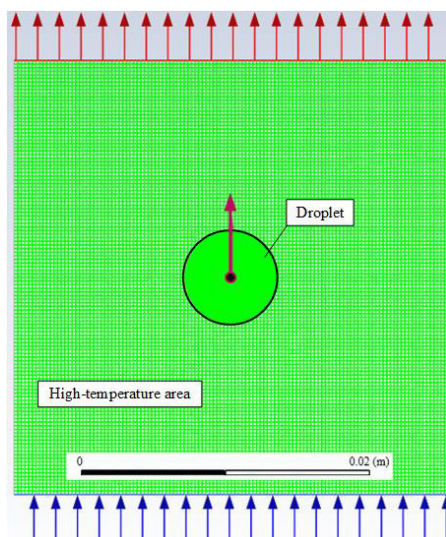


Рис. 2.2. Схема области решения задачи тепломассопереноса в системе «капля ВУТ – высокотемпературная газовая среда».

Капля ВУТ ($R_{d0}=0.05-1.55$ мм) с начальной температурой $T_{d0}=300$ К генерировалась с помощью инъекции одиночной капли и располагалась в геометрическом центре области решения рис. 2.2 ($X\text{-position}=0.015$ м; $Y\text{-position}=0.015$ м). Температура газов в области решения задавалась равной $T_g=773-2273$ К. Концентрация окислителя (кислорода O_2) принималась равной массовому содержанию кислорода в воздухе. Принято $\varphi_{O_2}=0.23$. Модель самосогласованным образом учитывает эффекты турбулентной механики жидкости, горения, диспергирования частиц, удаления летучих веществ, гетерогенной реакции полукоса и теплового излучения.

На рис. 2.3 представлено сравнение установленных в экспериментах и при математическом моделировании значений времен задержки фрагментации исследованного состава ВУТ. Установлено удовлетворительное согласие теоретических и экспериментальных данных в диапазоне температуры внешней среды от 720 до 820 К. Максимальные отклонения результатов не превышают 23%. Такое отклонение можно считать удовлетворительным вследствие существенной сложности протекания комплекса взаимосвязанных физико-химических процессов в капле ВУТ и малой окрестности ее поверхности при нагреве. Учет всех этих процессов при математическом моделировании приводит к росту требуемых вычислительных мощностей, предполагает использование группы эмпирических констант и выражений из экспериментов, но, как правило, несущественно влияет на отклонения теоретических результатов от экспериментальных данных. Выбор диапазона температур обусловлен ограничениями экспериментальной методики. Математическая модель позволяет выполнить расчеты в существенно более широком диапазоне. На рис. 2.3 хорошо видно, что с увеличением температуры газовой среды от 720 до 820 К времена задержки фрагментации капель ВУТ (массовая концентрация угольных частиц 40 %; массовая концентрация воды 60 %) снижаются в 1.48 раз в эксперименте и в 1.35 в теории, а капель ВУТ (массовая концентрация угольных частиц 50 %; массовая концентрация воды 50 %) снижаются в 1.4–1.5 раз в эксперименте и в 1.34 при математическом моделировании. Снижение времени задержки фрагментации с увеличением температуры связано главным образом с тем, что повышается количество теплоты, подводимой к поверхности многокомпонентной капли в единицу времени.

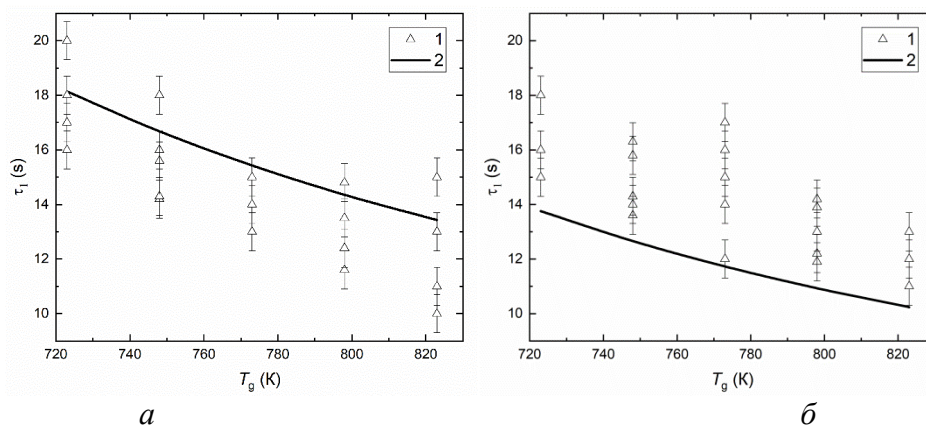


Рис. 2.3. Сравнение времен задержки фрагментации ВУТ: 1 – экспериментальные данные; 2 – результаты моделирования. Параметры: $R_{d0}=0.8$ мм; $U_d=3$ м/с. Случай (а): массовая концентрация угольных частиц 40 %; массовая концентрация воды 60 %; случай (б): массовая концентрация угольных частиц = 50 %; массовая концентрация воды 50 %.

Математическое моделирование фрагментации капель перспективных органоводоугольных топлив

Разработана модель для описания процессов фрагментации (в режимах паффинг и микро-взрыв) капель органоводоугольных (ОВУТ) топлив при интенсивном нагреве. Модель основана на аналитическом решении уравнения энергии в программном комплексе Matlab с учетом установленных в проведенных экспериментах особенностей протекания процессов фрагментации в ОВУТ. Приведены результаты теоретических исследований процессов фрагментации капель перспективных органоводоугольных топлив при нагреве с учетом кондукции, конвекции и излучения. В качестве основных компонентов органоводоугольных топлив использованы: вода, уголь, рапсовое масло. Зарегистрированы значения времени задержки фрагментации капель ОВУТ при нагреве с учетом кондукции, конвекции и радиации с использованием критерия распада, установленного в проведенных экспериментах – по перегреву межкомпонентной границы выше температуры кипения (нуклеации) воды. Проведены серии экспериментов для апробации моделей, а также уточнения механизмов реализации исследованных процессов. Установлено влияние на времена задержки фрагментации группы факторов: температура (773–2273 К), условия нагрева (кондуктивный, радиационный, конвективный или смешанный нагрев), начальные размеры капель (0.05–1.55 мм), компонентный состав топлива (концентрация твердых частиц от 0 до 60 %). Выделены условия интенсификации процессов фрагментации и зажигания перспективных топливных суспензий.

На рис. 2.4 представлены видеокдры процессов дробления капель вода/топливо с добавлением различной массовой концентрации угольных частиц ($Y_p=0-6$ %). Хорошо видно момент зарождения и последующего роста пузырька пара на границе между водой и топливом с последующим полным распадом родительской капли в режиме микро-взрыва. Неоднородности на границе между двумя компонентами (топливом и водой) выступают в качестве низкотемпературных центров зародышеобразования особенно при низких скоростях нагрева капель до 300 К/с, наблюдаемых в экспериментах. При этом чем меньше толщина пленки между горючим и химически инертным компонентом (водой), тем более вероятно достижение условия начала зарождения паровой фазы и микро-взрывного распада в зоне с наименьшей толщиной топливной оболочки.

При добавлении угольных частиц в состав топливной композиции тенденция зарождения пузырьков паровой фазы на межкомпонентной границе не всегда выполняется. Это связано с тем, что примеси в виде твердых частиц углей также выступают в качестве низкотемпературных центров зародышеобразования, как и неровности межкомпонентной границы, вследствие чего регистрируются локальные

перегревы, приводящие к режиму «паффинг» (частичный распад). С увеличением концентрации твердого компонента регистрируется отклонение формы капли топливной композиции от сферической, появляются поры и выступы, происходит трансформация поверхности капли в процессе нагрева и испарения приповерхностного слоя.

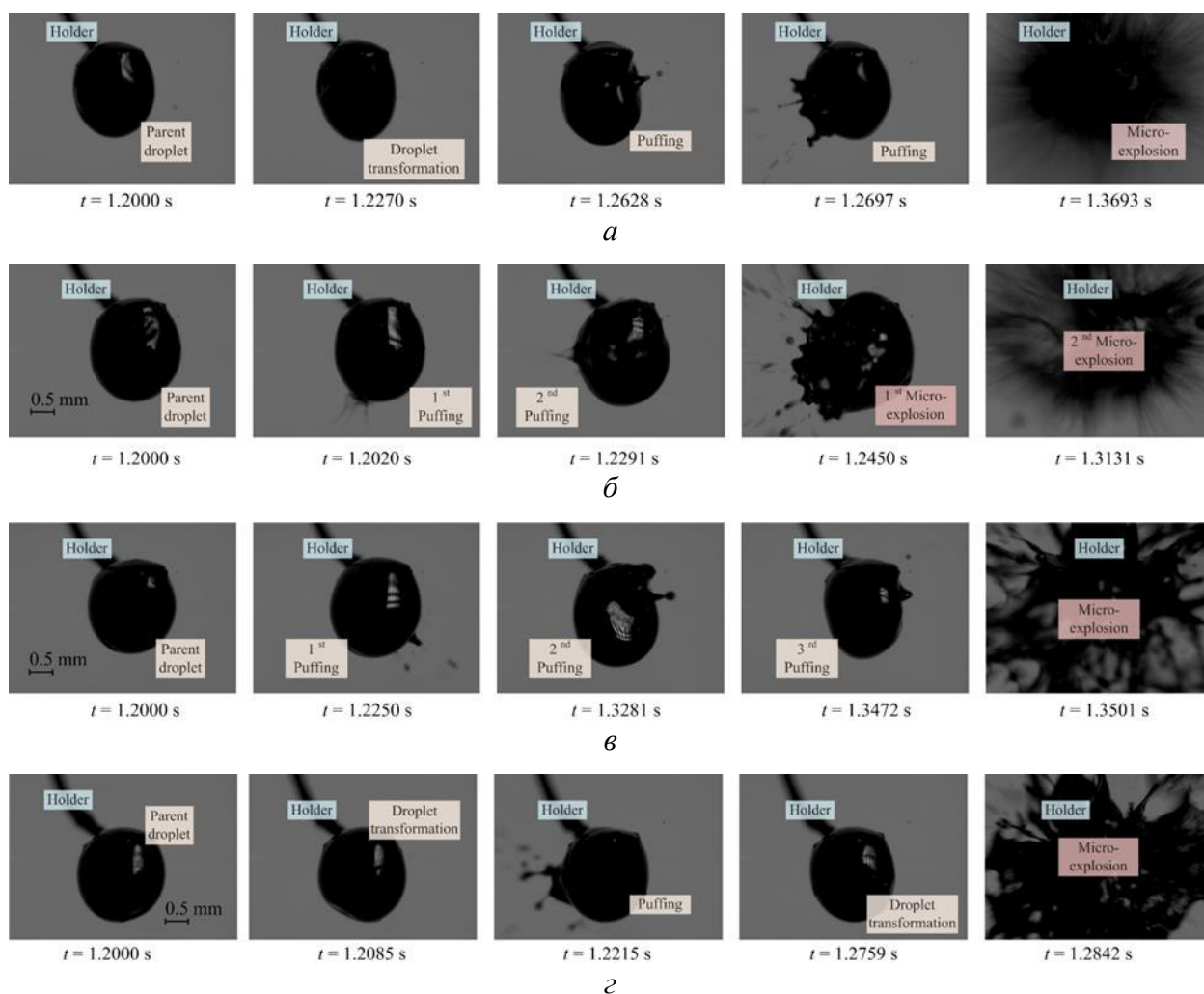


Рис. 2.4. Типичные видеокадры процессов дробления капли органоводоугольного топлива ($T_g \approx 850$ К; $R_{d0} \approx 0.9$ мм; объемная концентрация воды ≈ 10 %). Случай (а): массовая концентрация угольных частиц ≈ 20 %. Случай (б): массовая концентрация угольных частиц ≈ 30 %. Случай (в): массовая концентрация угольных частиц ≈ 40 %. Случай (г): массовая концентрация угольных частиц ≈ 60 %.

Схема области решения задачи при изучении условий и характеристик фрагментации капли ОВУТ показана на рис. 2.5. Модель основана на предположении о том, что сферическая капля воды представляет собой ядро и располагается по центру, а горючий компонент – оболочку. Такие условия типичны топочным пространствам при раздельном впрыске горючего и негорючего компонентов, а также реализуются при интенсивном нагреве капель эмульсий, в результате чего частицы дисперсной фазы, т.е. микрокапельки воды агломерируют, и формируются так называемые водяные ядра.

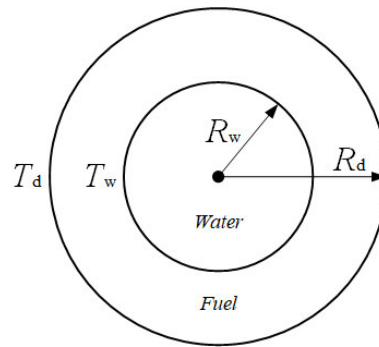


Рис. 2.5. Схема области решения задачи по изучению фрагментации капли ОВУТ, где R_w и R_d – радиус капли воды и топлива, соответственно. T_w и T_d – температура на границе раздела вода/топливо и температура в приповерхностном слое капли, соответственно.

На рис. 2.6 представлены зависимости времени задержки микро-взрывного распада от концентрации твердых частиц угля при двух значениях температуры газовой среды ($T_g \approx 850$ К и $T_g \approx 1100$ К). Хорошо видно, что с увеличением концентрации твердых частиц угля растет разница между результатами эксперимента и теории, и при этом времена задержки распада в эксперименте ниже значений, полученных при численном моделировании. Это обусловлено главным образом активацией низкотемпературных центров парообразования с увеличением концентрации угольных частиц. Чем больше концентрация угольных частиц, тем большее количество потенциальных низкотемпературных центров парообразования, которые приводят к более быстрому зарождению паровой фазы. В результате чего времена задержки распада в эксперименте значительно ниже теоретических. Для приближения результатов численного моделирования к эксперименту важным является учет зарождения паровой фазы не только на неровностях границы раздела вода/топливо, но и на угольных частичках. Однако в данный момент такие модели сложно разработать в виду отсутствия достоверной теории интенсивных фазовых превращений при кипении на низкотемпературных центрах парообразования. Менее достоверным, но надежным является подход, при котором учитываются эффективные значения теплофизических свойств жидких и твердых компонентов. Удовлетворительная разница между экспериментом и теорией с использованием такого подхода наблюдается для концентраций угольных частиц менее 30 %.

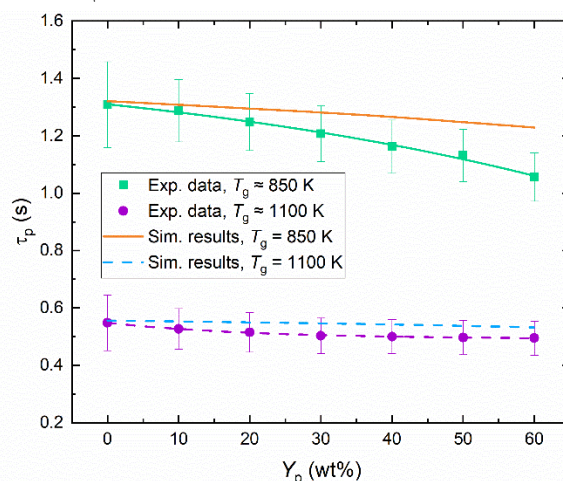


Рис. 2.6. Зависимости времени задержки микро-взрывного распада от концентрации твердых частиц угля при двух значениях температуры газовой среды ($T_g \approx 850$ К и $T_g \approx 1100$ К). Параметры: $P_{amb} = 101325$ Па; $R_{d0} = 0.9$ мм; объемная концентрация воды = 10 %; объемная концентрация топлива (рапсового масла) с твердыми частицами ($Y_p = 0-60$ %) = 90 %.

Моделирование микро-взрывной фрагментации двухжидкостных капель с использованием трех критериев их распада

Приведены результаты моделирования процессов микро-взрывной фрагментации двухжидкостных капель при интенсивном нагреве в газовой среде с использованием трех постановок, отличающихся критериями распада: по перегреву границы раздела вода/топливо выше температуры начала взрывного кипения, по критическому размеру (радиусу) пузыря перед распадом, по превышению давления в паровой пленке. Установлены времена задержки распада капель как функции от температуры внешней газовой среды, начального размера капли, концентрации компонентов. Выполнено сравнение теоретических значений времен задержки распада капель с зарегистрированными в экспериментах. Выделены границы применимости трех подходов к прогнозированию характеристик микро-взрывной фрагментации.

С использованием математических моделей, отличающихся критериями распада (по перегреву межкомпонентной границы выше температуры начала взрывного кипения, по критическому размеру (радиусу) пузыря перед распадом, по превышению давления в паровой пленке) установлены времена задержки микро-взрывного распада капель как функции от температуры внешней газовой среды (рис. 2.7), начального размера капли (рис. 2.7б), концентрации компонентов (рис. 2.7в). Ключевые входные параметры варьировались в широких диапазонах: $T_a=500-1000$ К, $R_{d0}=0.05-1$ мм, $\eta_w=5-95$ %. Эти диапазоны соответствуют перспективным технологиям вторичного измельчения топлив в энергетических установках и дизельных двигателях.

Полученные результаты (рис. 2.7) показывают, что на отличия τ_d при использовании различных критериев микро-взрывного распада многокомпонентных капель достаточно умеренно влияют: температура газовой среды и начальные размеры (радиусы) капель. Максимальные отличия времени задержки распада по трем критериям не превышают 8 %. Существенное влияние на времена задержки микро-взрывного распада оказывает концентрация дисперсной фазы (воды). Хорошо видно (рис. 2.7с), что при использовании критериев распада по перегреву воды на межкомпонентной границе выше температуры начала взрывного кипения с увеличением концентрации химически инертного компонента (воды) времена задержки распада нелинейно увеличиваются, а по критерию превышения давления в паровой пленке снижаются. Это обусловлено главным образом тем, что в случае критерия по температуре начала взрывного кипения определяющее влияние на времена задержки распада оказывает увеличение эффективной теплоемкости топливной композиции (времена задержки снижаются), а в случае критерия по превышению давления паров – увеличение силы, вызванной давлением паров воды, обусловленное ростом площади поверхности водяного ядра (времена задержки увеличиваются).

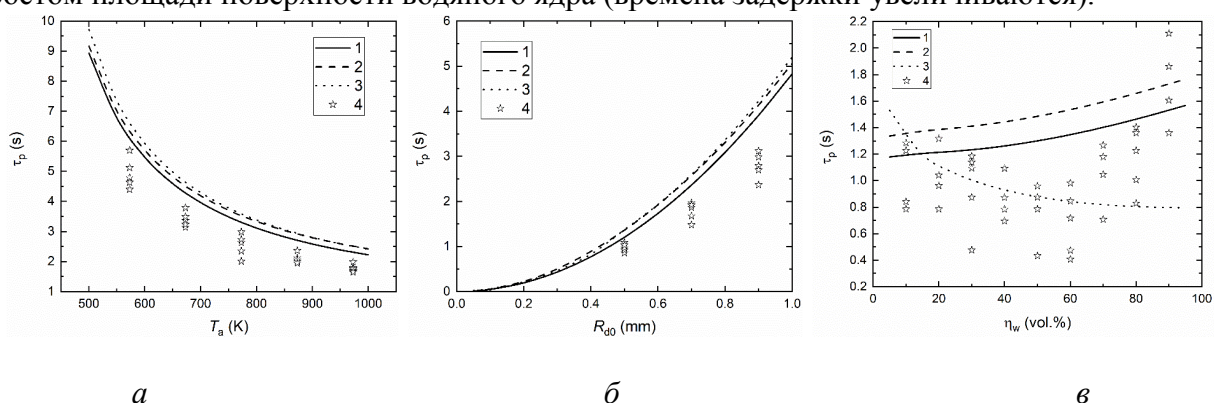


Рис. 2.7. Времена задержки микро-взрывного распада капель вода/дизельное топливо как функции от температуры внешней газовой среды (а), начальных размеров капель (б) и концентраций химически инертного компонента (воды) (в) с использованием трех критериев фрагментации: 1 – по перегреву межкомпонентной границы; 2 – по

достижению критического размера (радиуса) пузыря; 3 – по превышению давления в паровой пленке; 4 – экспериментальные данные.

Как показали результаты экспериментальных и теоретических исследований зависимости времени задержки распада от концентрации горючей жидкости имеют существенно нелинейный вид, который иллюстрирует сложный механизм разрушения многокомпонентных капель при нагреве. Теоретические расчеты (рис. 2.7) продемонстрировали существенное влияние выбранного критерия распада на зависимости времени задержки распада от концентрации дисперсной фазы (воды). Для приближения результатов теоретических расчетов к экспериментальным данным важным является учет всех трех критериев (по перегреву межкомпонентной границы выше температуры кипения (или нуклеации), по превышению давления в паровой пленке) при прогнозировании времен задержек распада. Необходимым и достаточным условием фрагментации капель должно быть достижение условий одного из трех критериев распада. Наиболее часто используемый критерий по температуре начала взрывного кипения на границе вода/топливо позволяет получать максимальное приближение к экспериментальным данным при учете несимметричности топливной оболочки вокруг водяного ядра.

Фрагментация капель стабилизированных суспензионных топлив

Ключевая проблема, сдерживающая активное и широкое использование суспензионных топлив в энергетике, состоит в существенной седиментации твердых частиц в течение времени хранения и транспортировки. Как следствие, состав топливных суспензий достаточно быстро и существенно меняется при выкачивании очередного слоя из емкостей. Один из возможных вариантов решения данной проблемы состоит в использовании стабилизирующих добавок. Для получения мелких топливных фрагментов перспективными считаются технологии первичного и вторичного измельчения суспензионных топлив. С их применением можно получить капли размерами ниже 10 мкм. Наиболее эффективная технология вторичного измельчения базируется на микровзрывном распаде капель за счет перегрева воды в составе топлива до температуры выше температуры нуклеации. В настоящей работе изучено влияние основных стабилизирующих добавок к суспензионным топливам на характеристики фрагментации капель: инерционность нагрева до условий распада, длительность разрушения, режим, количество, размеры, скорости движения. В качестве стабилизирующих добавок использовались: соевый лецитин и лигносульфонат натрия. Основные компоненты топливных суспензий: вода, рапсовое масло, дизельное топливо, КЕК и уголь марки К, соевый лецитин и лигносульфонат натрия. Нагрев до условий фрагментации проводился при температуре внешней газовой среды 450–1050 К. Получены математические выражения для установленных зависимостей.

На рис. 2.8 представлен внешний вид используемых топливных композиций. При варьировании добавок даже в малых концентрациях 1% масс. наблюдается изменение внешнего вида суспензий. В некоторых случаях, за счет высокой вязкости, суспензия больше похожа на пасту, которая характеризуется низкой текучестью и высокой стабильностью. Также могут появляться пленки на поверхности топливной смеси.

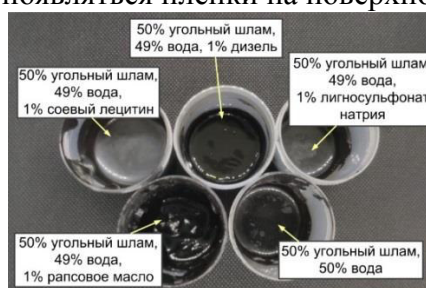


Рис. 2.8. Внешний вид используемых топливных смесей.

На рис. 2.9 показаны кадры с изображением процессов испарения, высыхания и фрагментации капель C50W49D1 ($R_{d0}=0.934$ мм) при $T_a \approx 450$ К.

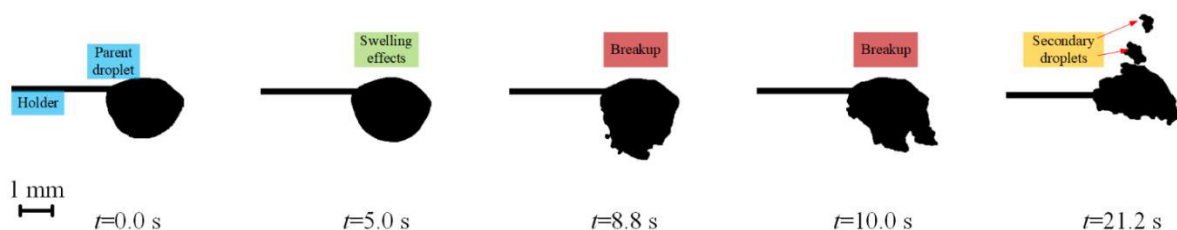


Рис. 2.9. Кадры с изображением процессов испарения, высыхания и фрагментации капель C50W49D1 ($R_{d0}=0.934$ мм) при $T_a \approx 450$ К.

На рис. 2.10 приведены временные характеристики процессов испарения и высыхания до фрагментации капель C50W49D1.

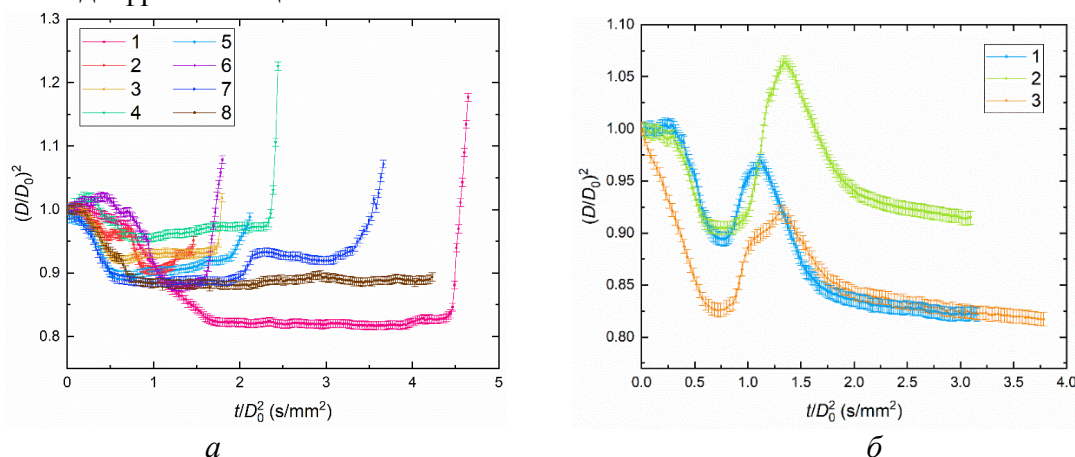


Рис. 2.10. Временные характеристики испарения и высыхания до фрагментации капель C50W49D1: *a* – при $T_a \approx 450$ К (1 – $R_{d0}=1.0529$ мм; 2 – $R_{d0}=1.3952$ мм; 3 – $R_{d0}=1.0696$ мм; 4 – $R_{d0}=0.9492$ мм; 5 – $R_{d0}=1.0195$ мм; 6 – $R_{d0}=1.1064$ мм; 7 – $R_{d0}=0.9527$ мм; 8 – $R_{d0}=0.9996$ мм); *б* – при $T_a \approx 950$ К (1 – $R_{d0}=1.3436$ мм; 2 – $R_{d0}=1.2290$ мм; 3 – $R_{d0}=0.9339$ мм).

Идентификация компонентов суспензионного топлива в распыленном потоке

Целью исследования в рамках второго этапа выполнения проекта являлись идентификация и выделение отдельных твердых (фильтр-кек, опилки) и жидких (вода, рапсовое масло) фаз в аэрозольном потоке ВУТ и ОВУТ с использованием оптических методов. Основные задачи исследования: адаптация бесконтактных панорамных оптических техник (плоскостная лазерная индуцированная флуоресценция – LIF, интерферометрическая техника – IPI, теневая макросъемка – SP) для целей выделения отдельных твердых (фильтр-кек, опилки) и жидких (вода, рапсовое масло) фаз в аэрозольном потоке ВУТ и ОВУТ; определение с применением вышеперечисленных методик (LIF, IPI, SP) компонентного состава капель в аэрозольном потоке ВУТ и ОВУТ; получение информации об однородности/неоднородности аэрозольного потока ВУТ и ОВУТ, а также определение основных влияющих факторов; определение преимуществ, недостатков, ограничений и погрешностей бесконтактных панорамных оптических техник (LIF, IPI, SP) при их использовании в целях определения отдельных твердых и жидких фаз в аэрозольном топливном потоке.

Компоненты суспензионных топлив

Для приготовления суспензий в экспериментах в качестве основного компонента использовался фильтр-кек длиннопламенного каменного угля. Твердый компонент предварительно измельчался в быстроходной роторной мельнице “Pulverisette 14” и затем просеивался. Размеры твердых частиц кека не превышали $d_p \approx 80$ мкм. В качестве

дополнительных компонентов использовались древесные опилки (сосна, размеры частиц 120–140 мкм), а также рапсовое масло.

Лазерная индуцированная флуоресценция

Метод лазерной индуцированной флуоресценции [1–3] (LIF) основан на регистрации естественной флуоресценции молекул флуорофора (органического красителя), возбуждаемой лазерным излучением, специализированными видеокамерами с набором оптических светофильтров. Данная группа методов предназначена для определения таких характеристик, как толщина пленок [1], температура жидкости [2] и концентрация [3]. Как правило, используются следующие составы флуоресцентных красителей [1–3]: Rhodamine B, Rhodamine 6G, Sulforhodamine B. Выбор флуорофора обусловлен характеристиками используемого оборудования (прежде всего длиной волны источника лазерного излучения), условиями эксперимента и внешними факторами (температура, освещенность, свойства объекта исследований). Для реализации измерений с применением метода LIF в настоящей работе применялся флуорофор Rhodamine B. Последний вводился в емкость с водой. Затем из данной емкости выполнялся забор воды для изготовления суспензий и проведения экспериментов.

Эксперименты с каплями (методология и результаты)

В качестве основного оборудования стенда (рис. 2.11) для реализации измерений методом LIF использовались: импульсный лазер “Quantel EverGreen 200”, CCD видеокамера “Imperx IGV B2020M” (разрешение кадра – 2048×2048 pixels, тип изображения – монохромное, разрядность изображения – 16 bit, частота съемки – 4 fps), объектив “Nikon 200 mm f/4 AF-D Macro”, оптический светофильтр для нейтрализации избыточного лазерного излучения.

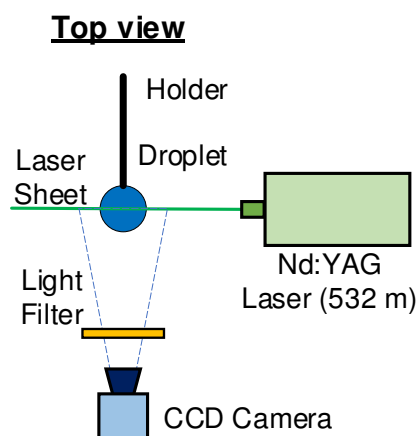


Рис. 2.11. Схема экспериментального стенда.

По результатам исследования необходимо было установить группу определяющих факторов: влияние размера капли воды на интенсивность свечения; влияние концентрации в капле кека и древесных опилок на интенсивность свечения; интенсивность свечения капель рапсового масла.

Каждый эксперимент включал несколько этапов:

- капля необходимого состава (объемом от 2.5 мл до 25 мл) формировалась электронным одноканальным дозатором “Finpipete Novus” и закреплялась на стальном держателе (в виде тонкой полой трубки с внутренним и внешним диаметрами 0.3 мм и 0.5 мм, соответственно) (рис. 2.11);
- между каплей и видеокамерой устанавливался светофильтр (рис. 2.11), пропускающий свет с длиной волны свыше 580 нм (для исключения попадания на матрицу CCD видеокамеры отраженного от капли зеленого света лазера);
- с частотой 4 fps запускалась регистрация кадров капли на CCD видеокамеру, капля рассекалась по оси симметрии (вдоль вертикальной плоскости) плоским ножом Nd:YAG лазера. Для управления экспериментом, контроля параметров видеокамеры и лазера,

сохранения видеокadres использовалось программное обеспечение “Actual Flow”. Для каждой капли выполнялась серия из 30–50 кадров, для каждого состава не менее трех серий;

– видеокadres обрабатывались с использованием программного обеспечения “DaVis”.

Обработка видеокadres осуществлялась с учетом последовательных этапов (рис. 2.12):

– полученные ранее изображения из каждой экспериментальной серии загружались в ПО “DaVis”;

– проводилось усреднение интенсивности серии изображений с использованием процедуры “Statistics”. Для каждой серии получалось одно усредненное изображение, интенсивность каждого отдельного пикселя на котором рассчитывалось как среднее арифметическое значение интенсивности аналогичных пикселей на каждом кадре из серии изображений;

– выполнялась нейтрализация шумов на изображении (сглаживание исходного изображения) с использованием процедуры “Smoothing Filter” (по области 3×3 pixels);

– проводилась процедура маскирования фона с использованием процедуры “Algorithmic Mask”. В процессе данной операции всем пикселям, имеющим значение интенсивности ниже интенсивности фона, присваивалось нулевое значение. Интенсивность остальных пикселей оставалась без изменений;

– вычислялась средняя интенсивность свечения капли. Находилось среднее арифметическое значение интенсивности всех пикселей (имеющих значение интенсивности выше нуля) на изображении.

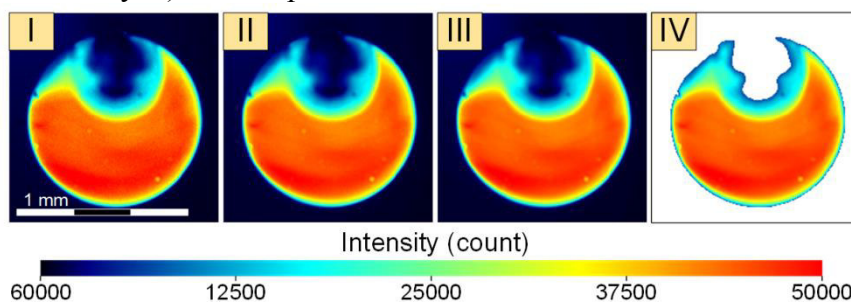


Рис. 2.12. Иллюстрация процесса обработки кадров с каплями в ПО “DaVis” (I – исходное изображение; II – процедура “Statistics”; III – процедура “Smoothing Filter”; IV – процедура “Algorithmic Mask”).

Вышеописанные процедуры позволили выполнить эксперименты при варьировании концентрации кека в суспензии в диапазоне 5–50 wt% с целью анализа абсорбирования кеком флуорофора Rhodamine B. На рис. 2.13 приведены видеогаммы капель суспензии для нескольких массовых концентраций кека.

Установлено (рис. 2.13), что увеличение концентрации кека в суспензии свыше 27–30 масс. % делает каплю абсолютно непрозрачной для лазерного ножа, тем самым способствуя снижению интенсивности свечения (флуоресценции) капли практически до нуля. На рис. 2.14 приведена зависимость интенсивности свечения капли суспензии от массовой концентрации кека в последней. Установленная особенность (рис. 2.14) может быть использована для определения концентрации кека в отдельных каплях ВУТ в аэрозольном потоке.

На рис. 2.15 приведены видеогаммы капли суспензии (концентрация кека 12.5 масс. %) в начале эксперимента, а также спустя 45 с после его начала. Регистрировалось (рис. 2.15) непрерывное оседание твердых частиц в капле. При этом в начале эксперимента средняя светимость капли суспензии составила около 2000 ед., а после оседания частиц кека в нижней части капли – около 9000 ед., что очень близко к интенсивности свечения капли чистой воды без примеси кека. Однако стоит отметить, что

в случае рассмотрения аэрозольного потока данная особенность, очевидно, не способна повлиять на интенсивность свечения капель вследствие малых (как правило, менее 300 мкм) размеров и высоких (более 5 м/с) скоростей движения [4].

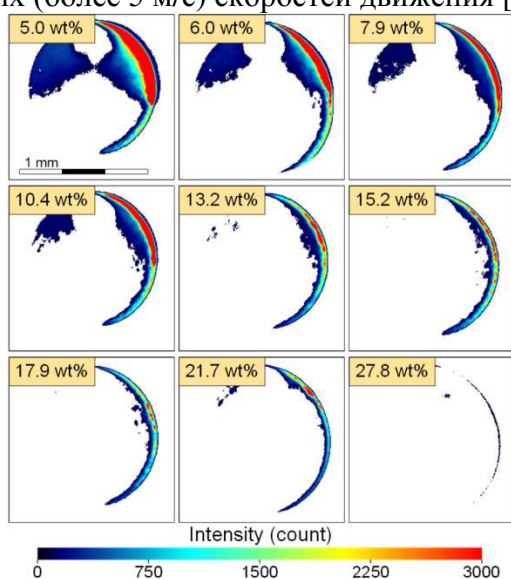


Рис. 2.13. Видеogramмы капель суспензии для нескольких массовых концентраций (5–27.8 масс. %) кека.

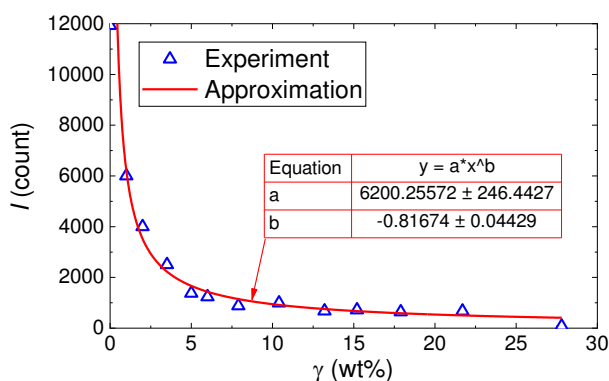


Рис. 2.14. Зависимость интенсивности свечения капли суспензии от массовой концентрации кека.

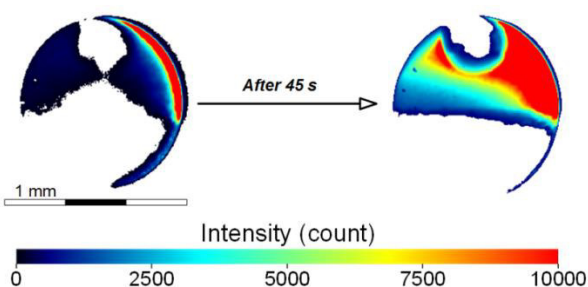


Рис. 2.15. Видеogramмы капли суспензии (концентрация кека 12.5 масс. %) в начале эксперимента (слева), а также спустя около 45 с после его начала (справа).

Также проанализированы интенсивности светимости капель с типичными добавками рапсового масла и древесных опилок, используемыми при приготовлении ОБУТ [4–6]. На рис. 2.16 приведены видеogramмы капель воды, рапсового масла, эмульсии воды и рапсового масла (в концентрации 10 масс. %), а также суспензии воды и опилок (в концентрации 10 масс. %). При этом в экспериментах использовались два разных оптических светофильтра, пропускающих свет с длиной волны свыше 580 нм и 680 нм, соответственно.

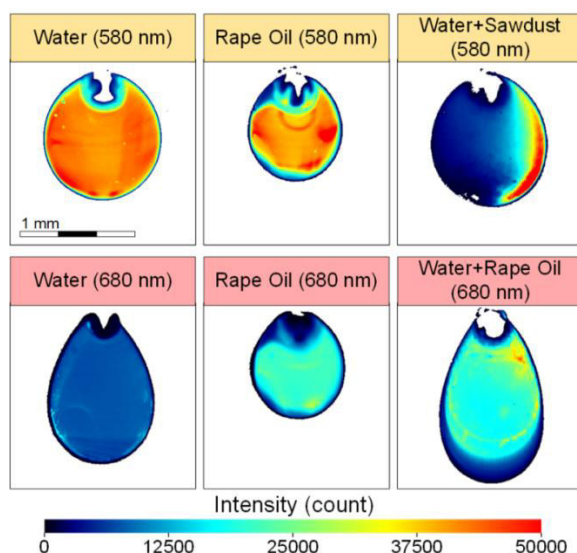


Рис. 2.16. Видеограммы каплей воды, рапсового масла, эмульсии воды и рапсового масла (в концентрации 10 масс. %), а также суспензии воды и опилок (в концентрации 10 масс. %), полученные при использовании двух различных типов оптических светофильтров.

На рис. 2.17 приведена гистограмма, иллюстрирующая средние интенсивности свечения каплей воды, рапсового масла, эмульсии воды и рапсового масла (в концентрации 10 масс. %), а также суспензии воды и опилок (в концентрации 10 масс. %).

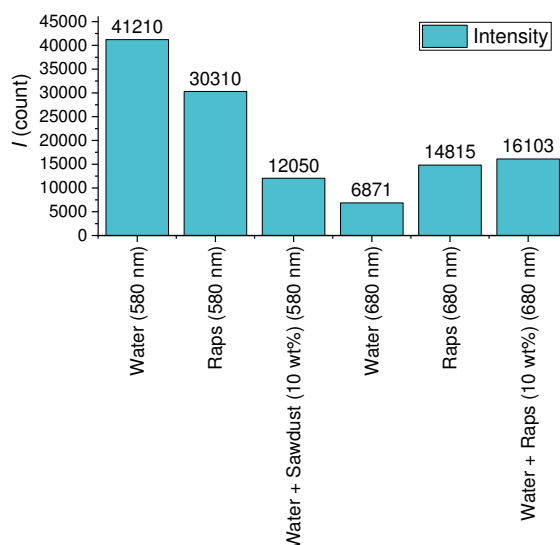


Рис. 2.17. Гистограмма, иллюстрирующая средние интенсивности свечения каплей воды, рапсового масла, эмульсии воды и рапсового масла (в концентрации 10 масс. %), а также суспензии воды и опилок (в концентрации 10 масс. %), соответствующие видеограммам, показанным на рис. 2.16.

По результатам экспериментов (рис. 2.16, 2.17) обосновано, что рапсовое масло обладает свойствами флуоресценции, что хорошо коррелирует с результатами опытов [7]. При этом показано, что интенсивность эмиссии рапсового масла ниже, чем у воды на 26%, в диапазоне длин волн свыше 580 нм, а в диапазоне длин волн свыше 680 нм, напротив, на 115% выше (рис. 2.17). То есть, даже при наличии в воде флуорофора Rhodamine В в диапазоне свыше 680 нм капли воды можно достоверно отличить от капель рапсового масла (при одинаковых настройках регистрирующей аппаратуры). При этом эмульсия воды и рапсового масла в том же диапазоне длин волн отличается по светимости от чистого рапсового масла всего на 8%. Также важным заключением является то, что при

добавлении к воде древесных опилок в концентрации 10 масс. % интенсивность свечения (флуоресценции) капли снижается в 3.4 раза по сравнению с каплей воды без примесей (рис. 2.17). При содержании в капле твердых частиц с такой же концентрацией светимость снижается более, чем в 12 раз (рис. 2.14). Таким образом, можно заключить, что при одновременном содержании в капле двух вышерассмотренных компонентов сигнал флуоресценции зарегистрировать невозможно.

Эксперименты с аэрозольным потоком ВУТ: методика и основные результаты

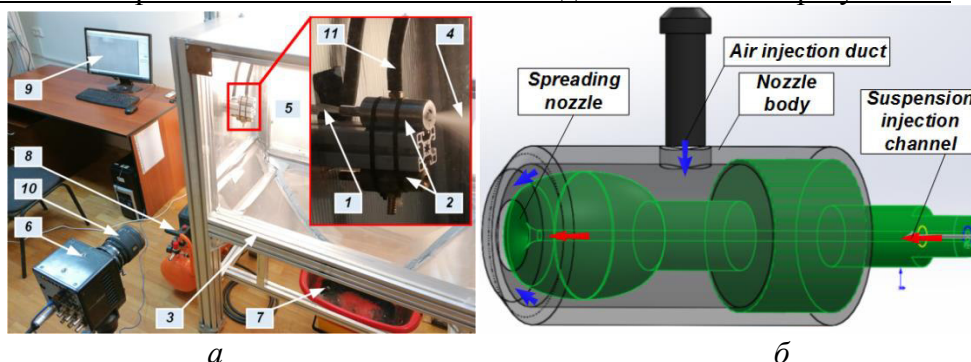


Рис. 2.18. Внешний вид экспериментального стенда (а): 1 – шток для выдавливания суспензии; 2 – форсунки; 3 – камера для распыления суспензии; 4 – струя топлива; 5 – система прожекторов; 6 – высокоскоростная видеокамера; 7 – емкость для сбора топлива; 8 – воздушный компрессор; 9 – персональный компьютер; 10 – объектив; 11 – канал подачи воздуха на форсунку; и форсунки (б).

Универсальная конструкция форсунки позволяет впрыскивать жидкие и пылевидные топлива. Конструкция форсунки (рис. 2.18б) представляет три соединенных между собой детали: корпус для формирования потока воздуха, распылитель (сопло) с нестандартной схемой головной части с внутренней подачей жидкости или суспензии и штуцера для нагнетания воздуха с определенным давлением. Материал корпуса и сопла – нержавеющая сталь, штуцер латунный. Диаметр выходного сопла форсунки – 4 мм. Следует отметить, что штуцер распложен перпендикулярно корпусу. Это важно, так как характеристики формируемого потока воздуха влияют на размеры, скорость и траектории движения генерируемых капель, т.е. на геометрию струи.

При выполнении экспериментальных исследований использовалось несколько составов: (#1) кек – 50 масс. %, вода – 50 масс.% (ВУТ); (#2) кек – 50 масс.%, вода – 45 масс.%, рапсовое масло – 5 масс.% (ОВУТ); (#3) кек – 50 масс.%, древесные опилки – 5 масс.%, вода – 45 масс.% (ОВУТ); (#4) вода без примесей; (#5) рапсовое масло без примесей. Для приготовления составов (#1-#4) использовалась как вода с добавлением флуорофора Rhodamine В (в концентрации 50 мг/л), так и без него. Приготовление каждого типа суспензии (#1-3) выполнялось не ранее чем за 10–15 минут до начала соответствующего эксперимента.

На рис. 2.19 приведены мгновенные и усредненные видеogramмы потока капель для всех исследованных составов (с использованием, а также без использования оптического светофильтра, не пропускающего свет с длиной волны менее 580 нм). На мгновенных видеogramмах потока (рис. 2.19) хорошо видно, что без использования оптического светофильтра для всех исследованных составов хорошо визуализируются отдельные капли. Однако при установке светофильтра, не пропускающего свет с длиной волны менее 580 нм, капли остаются видимыми лишь для воды с примесью флуорофора Rhodamine В, а также рапсового масла. Данный результат обусловлен наличием свойств к флуоресценции данных составов. Для составов с примесью кека (рис. 2.19) интенсивность свечения потока колеблется на уровне светимости фона изображения (20–24 ед.). Однако, при наличии в суспензии флуорофора Rhodamine В, становится возможным

идентифицировать отдельные капли в потоке. Таки капли обладают интенсивностью свечения в диапазоне 26–32 ед. Столь низкая светимость обусловлена высокой концентрацией кека в выделенных каплях. Для вычисления абсолютной средней интенсивности свечения исследованных составов найдены усредненные изображения потоков (рис. 2.19). На рис. 2.20 приведена гистограмма, иллюстрирующая средние интенсивности свечения составов с использованием, а также без использования оптического светофильтра, не пропускающего свет с длиной волны менее 580 нм.

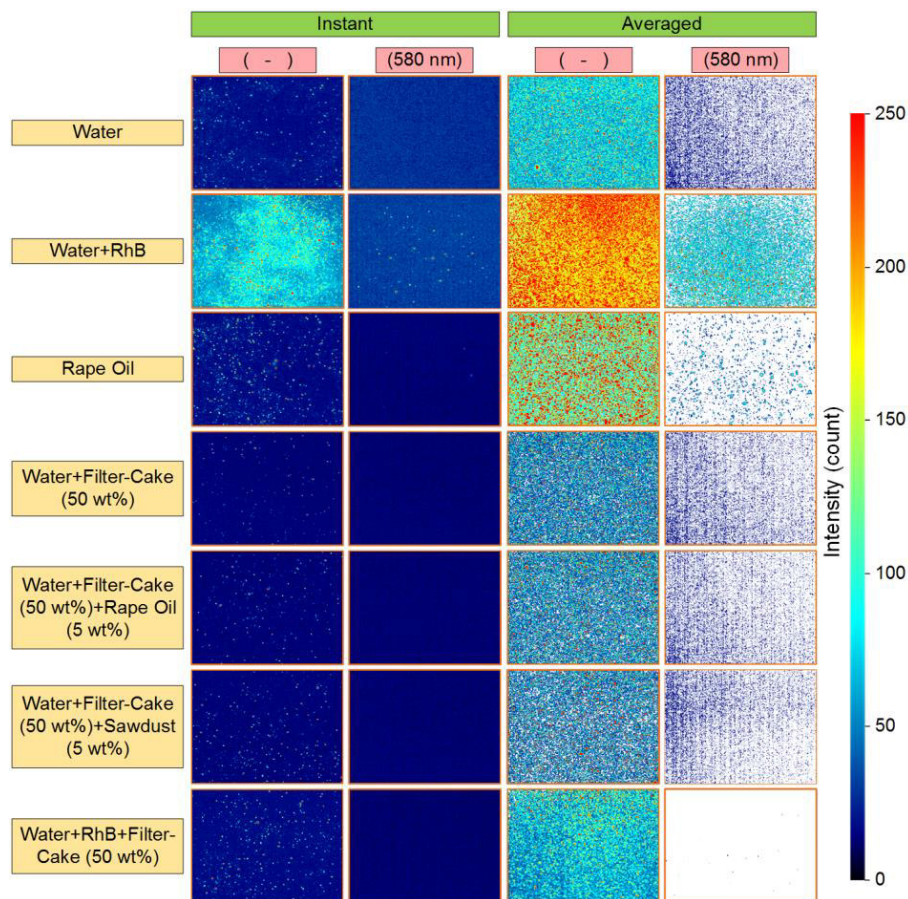


Рис. 2.19. Мгновенные и усредненные при обработке видеogramмы аэрозольного потока для всех исследованных составов (с использованием (справа), а также без использования (слева) оптического светофильтра, не пропускающего свет с длиной волны менее 580 нм).

Анализируя результаты, представленные на рис. 2.20, можно отметить, что последние хорошо согласуются с результатами, полученными при анализе интенсивности свечения одиночных капель. Так, средняя интенсивность свечения аэрозоля рапсового масла (при регистрации через оптический светофильтр, не пропускающий свет с длиной волны менее 580 нм) ниже аналогичной интенсивности водяного аэрозоля с примесью флуорофора Rhodamine B (согласуется с результатами рис. 2.17). Для составов, не обладающих флуоресцентными свойствами (вода; вода+фильтр-кек (50 масс. %); вода+фильтр-кек (50 масс. %) + опилки (5 масс. %)), средняя светимость аэрозольного потока падает до минимальных значений, сопоставимых с интенсивностью свечения фона (рис. 2.20) (при регистрации через оптический светофильтр, не пропускающий свет с длиной волны менее 580 нм). Для состава вода+RhB+фильтр-кек (50 масс. %) средняя интенсивность свечения зарегистрированных капель составила 28 ед. (рис. 2.20), что все же выше интенсивности фонового шума, но, за вычетом фонового шума, почти в 8 раз ниже интенсивности свечения воды с примесью флуорофора Rhodamine B (80 ед.). Используя ранее полученную зависимость (рис. 2.14), можно обосновать, что средняя

концентрация кека в таких каплях составляет 5–6 масс. %. Использование оптического светофильтра, не пропускающего свет с длиной волны менее 580 нм, позволяет выделить отдельные капли суспензии с достаточно малой (1–6 масс. %) концентрацией кека, но не позволяет проанализировать весь поток в целом.

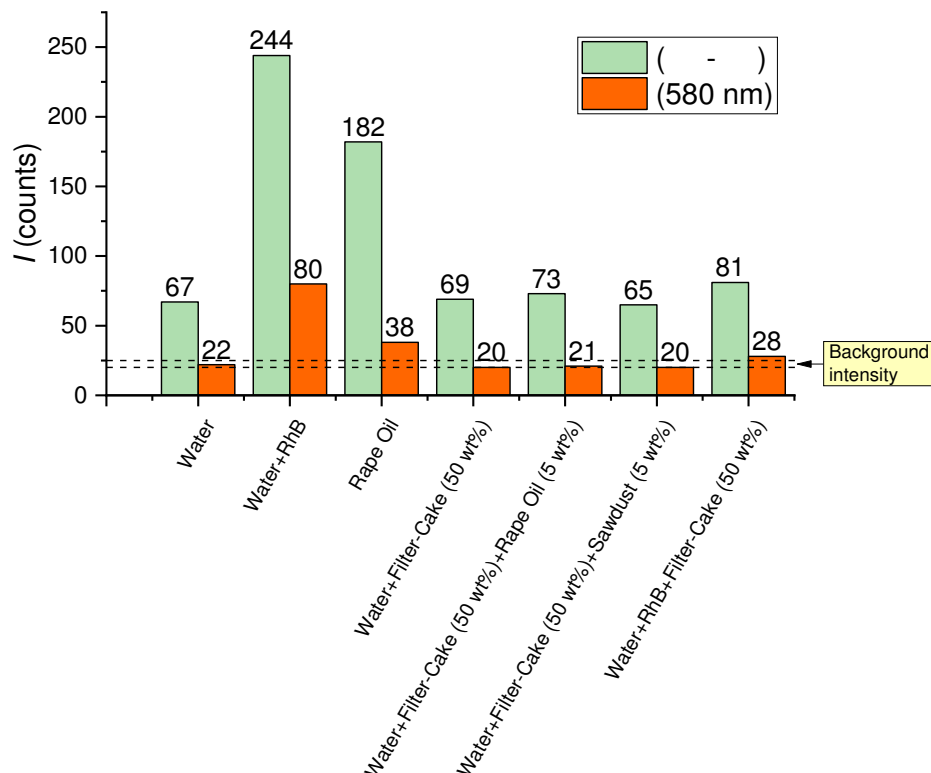
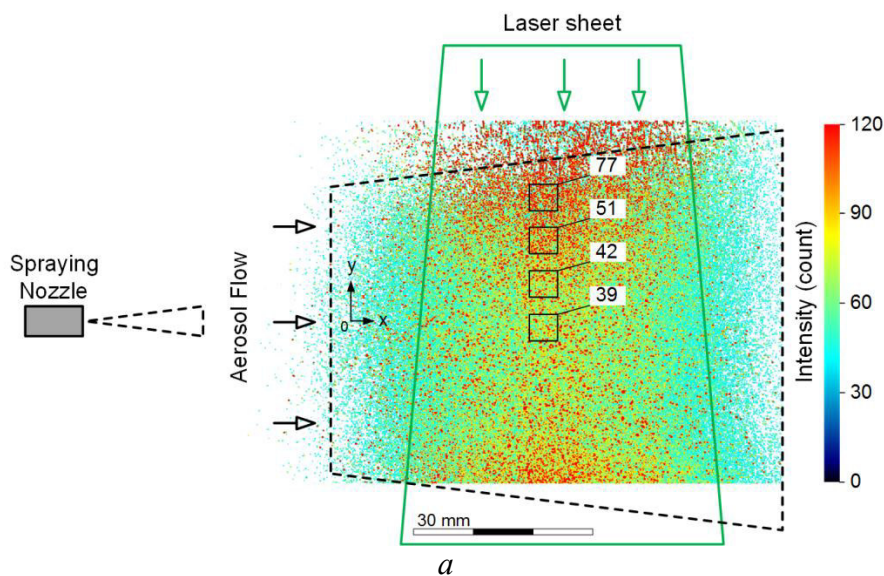
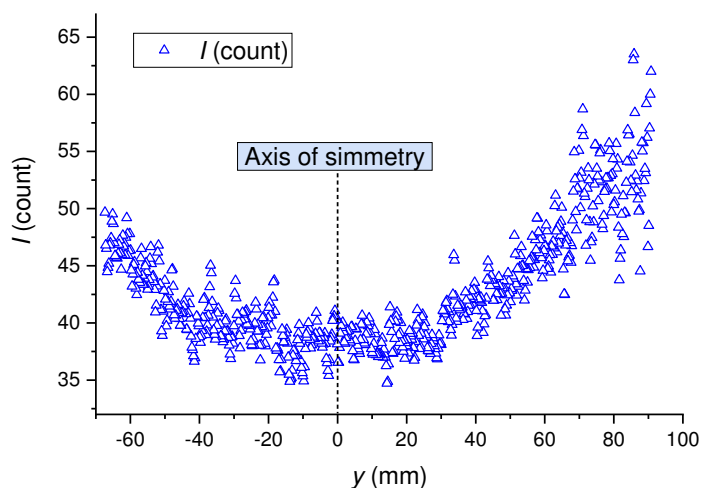


Рис. 2.20. Гистограмма средних интенсивностей свечения исследованных составов (с использованием, а также без использования оптического светофильтра, не пропускающего свет с длиной волны менее 580 нм).

На рис. 2.21 приведена усредненная видеограмма (после обработки) потока суспензии (вода+RhB+фильтр-кек (50 масс. %)).





б

Рис. 2.21. Усредненная видеограмма (после обработки) потока ВУТ (вода+RhB+фильтр-кек (50 масс. %)) (а), а также распределение интенсивности в вертикальном сечении потока (б). Эксперимент без использования оптического светофильтра.

На рис. 2.21 показано, что на периферии аэрозольного потока суспензии интенсивность свечения капель почти в 2 раза выше, чем в ядре (вблизи оси симметрии форсуночного устройства). Такой результат (в совокупности с ранее полученными данными, представленными на рис. 2.14) косвенно свидетельствует о том, что по мере удаления от оси симметрии факела распыления концентрация воды в отдельных каплях суспензии возрастает. При этом необходимо отметить, что снижение интенсивности свечения потока в центральной части не связано с существенным поглощением каплями лазерного излучения, так как по мере движения ножа лазера ближе к нижней кромке потока (рис. 2.21) интенсивность свечения также возрастает.

На рис. 2.22 приведены зависимости интенсивности свечения отдельных капель в потоке от их размеров для нескольких рассмотренных в экспериментах составов. Рост размера капли приводит к увеличению интенсивности ее свечения. Данный результат хорошо согласуется с результатами, полученными при анализе интенсивностей свечения одиночных капель. Так же видно (рис. 2.22а), что без использования оптического светофильтра при анализе отдельных капель в общем потоке нет возможности определить компонентный состав аэрозольного облака, в отличие от анализа средних полей интенсивности свечения (рис. 2.19, 2.20). В то же самое время при использовании фильтра, не пропускающего свет с длиной волны менее 580 нм (рис. 2.22б) становится возможным отличить капли воды без и с примесью кек (при этом все же невозможно отделить капли рапсового масла от капель суспензии). Так, при равных размерах капель, интенсивность свечения капель воды без примесей в 2–10 раз выше интенсивности свечения капель суспензии. При этом с ростом размеров капель эта разница существенно возрастает, что (при сопоставлении с данными рис. 2.14) говорит о росте концентрации кек в каплях суспензии. Сопоставление данного результата (рис. 2.22) с данными рис. 2.21 позволяет утверждать, что капли с минимальной концентрацией кека находятся на периферии потока, а с максимальной, наоборот, движутся в его центре. По результатам данного анализа построен график зависимости концентрации кек от размера капли суспензии (рис. 2.23).

По результатам анализа рис. 2.23 можно сделать обоснованное заключение о том, что используемый в настоящем исследовании подход позволяет визуализировать отдельные капли суспензии, концентрация кека в которых составляет менее 7 масс. % (хорошо согласуется с выводами по результатам анализа рис. 2.20). При $\gamma > 7$ масс. % интенсивность свечения капель слишком мала и сопоставима с фоновым шумом (в данном

случае, порядка 20–24 ед.). Использование полученной зависимости (рис. 2.23) может способствовать оценке концентрации примеси кек в отдельных каплях суспензионного аэрозольного потока.

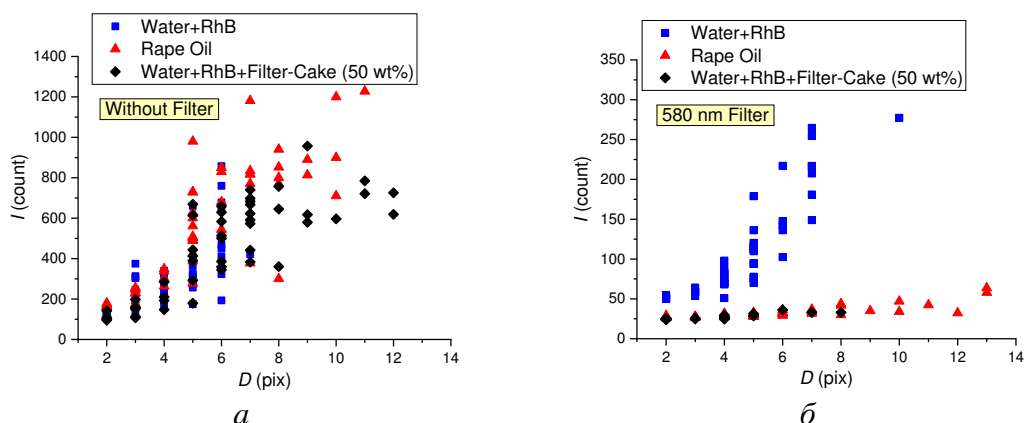


Рис. 2.22. Значения интенсивности свечения отдельных капель в потоке для нескольких рассмотренных в экспериментах составов без использования (а), а также с использованием (б) оптического светофильтра, не пропускающего свет с длиной волны менее 580 нм.

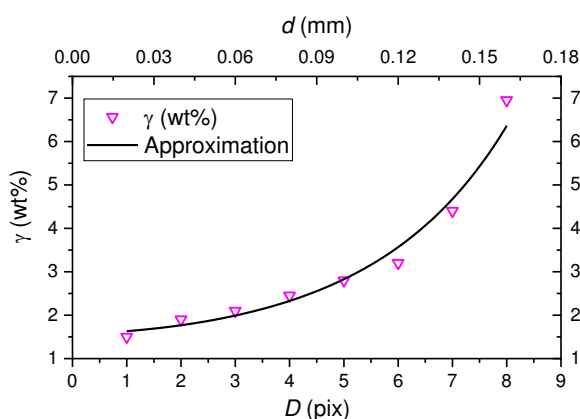


Рис. 2.23. Зависимость концентрации кек от размера капли суспензии.

Основные выводы

- метод лазерной индуцированной флуоресценции (LIF) позволяет выделить в общем аэрозольном потоке ВУТ и ОВУТ как отдельные капли чистых жидкостей (вода, рапсовое масло), входящих в исходный состав суспензионных топлив, так и оценить среднюю концентрацию твердой компоненты (кек) в каплях аэрозоля;
- вне зависимости от исследуемого состава рост размера капли приводит к увеличению интенсивности ее свечения. При этом для разных составов скорость роста отличается;
- частицы кек в составе суспензии абсорбируют флуорофор Rhodamine B, за счет чего светимость воды в исследуемом составе после его приготовления снижается на 70-75% относительно начального значения;
- увеличение концентрации кек в капле приводит к нелинейному снижению интенсивности ее свечения (флуоресценции). При концентрации кек в суспензии свыше 27–30% капля становится абсолютно непрозрачной для лазерного ножа, тем самым интенсивность свечения (флуоресценции) капли снижается практически до нуля;
- при фоторегистрации потока с использованием оптического светофильтра, не пропускающего свет с длиной волны менее 580 нм, при равных размерах капель, интенсивность свечения отдельных капель воды без примесей (вода+RhB) в 2–10 раз выше интенсивности свечения капель суспензии (вода+RhB+фильтр-кек (50 масс. %));

- при распылении состава вода (50 масс. %)+фильтр-кек (50 масс. %) средняя концентрация кека в зарегистрированных (по результатам анализа среднего поля интенсивности потока) каплях суспензионного аэрозоля составила выше 15 масс. %;
- при использовании оптического светофильтра, не пропускающего свет с длиной волны менее 580 нм, метод LIF позволяет достоверно определить компонентный состав отдельных капель суспензии в общем потоке, концентрация кека в которых составляет менее 6 масс. %. При $\gamma > 6$ масс. % интенсивность свечения отдельных капель слишком мала и сопоставима с фоновым шумом;
- капли с минимальной концентрацией кека находятся на периферии потока, а с максимальной, наоборот, движутся в его центре (ядре);
- при анализе интенсивности свечения отдельных капель в аэрозольном потоке ВУТ зарегистрировано, что с уменьшением размера (диаметра) капли ниже 0.15 мм концентрация кека в последней снижается с 7% до 1%.

Литература:

- [1] Wang C, Pei Y, Qin J, Peng Z, Liu Y, Xu K, Ye Z. Laser induced fluorescence investigation on deposited fuel film from spray impingement on viscous film over a solid wall. *Energy* 231 (2021) 120893. <https://doi.org/10.1016/j.energy.2021.120893>.
- [2] Zhou J, Yang W, Yin Y, Zhou Q, Chen S, Du Y, Mu J. Improved two-color LIF thermometry for gas–liquid system by optical flow algorithm. *Exp. Fluids* 62 (2021) 125. <https://doi.org/10.1007/s00348-021-03221-8>.
- [3] Shin D, Satija A, Lucht RP, Spray characteristics of standard and alternative aviation fuels at high ambient pressure conditions. *Exp. Therm. Fluid Sci.* 130 (2022) 110511. <https://doi.org/10.1016/j.expthermflusci.2021.110511>.
- [4] Kuznetsov GV, Strizhak PA, Valiullin TR, Volkov RS. Atomization behavior of composite liquid fuels based on typical coal processing wastes. *Fuel Proc. Tech.* 225 (2022) 107037. <https://doi.org/10.1016/j.fuproc.2021.107037>.
- [5] Nyashina GS, Kuznetsov GV, Strizhak PA. Effects of plant additives on the concentration of sulfur and nitrogen oxides in the combustion products of coal-water slurries containing petrochemicals, *Environmental Pollution* 258 (2020) 113682. <https://doi.org/10.1016/j.envpol.2019.113682>.
- [6] Vershinina K, Strizhak P, Dorokhov V, Romanov D. Combustion and emission behavior of different waste fuel blends in a laboratory furnace. *Fuel* 285 (2021) 119098. <https://doi.org/10.1016/j.fuel.2020.119098>.
- [7] Sikorska E, Wójcicki K, Kozak W. et al., Front-face fluorescence spectroscopy and chemometrics for quality control of cold-pressed rapeseed oil during storage. *Foods* 8 (2019) 665. <https://doi.org/10.3390/foods8120665>.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В результате выполнения второго этапа исследований получены запланированные результаты и достигнуты требуемые индикаторы. В частности, выполнена оценка возможности управления реологическими свойствами композиционных топлив. Представлены результаты масштабных исследований термогравиметрического анализа по определению кинетических характеристик горения твердотопливных смесей. Продолжены исследования закономерностей и характеристик фрагментации капель ВУТ и ОВУТ: разработаны математические модели, учитывающие большую совокупность влияющих на характеристики распада факторов. Выполнены теоретические исследования фрагментации капель ВУТ и ОВУТ при использовании разных критериев распада капель. Экспериментально определены скорости выгорания капель органоводоугольных топлив. Выполнены исследования процессов зажигания и горения топливных смесей (в виде суспензий, слоя, пеллета), имеющих в своем составе низкосортные горючие составляющие. Проведены экспериментальные и теоретические исследования процессов зажигания газовых гидратов при разных схемах подвода тепла. Проведены оценки экологических показателей сжигания композиционных топлив. Опубликовано 11 статей по результатам исследований в журналах первого квартиля, индексируемых базами данных Web of Science и Scopus. Доля молодых исследователей в коллективе исполнителей составила 92.3 %.

ПРИЛОЖЕНИЕ А

1. Перечень статей, опубликованных по результатам выполнения первого второго этапов НИР

- 1.1. G.V. Kuznetsov, R.S. Volkov, P.A. Strizhak. Determining water content in a liquid fuel by the luminosity of its droplet. *Chemical Engineering Science*. 2021. V. 233. Article number 116415. DOI: 10.1016/j.ces.2020.116415
- 1.2. O.S. Gaydukova, S.Y. Misyura, P.A. Strizhak. Investigating regularities of gas hydrate ignition on a heated surface: Experiments and modelling. *Combustion and Flame*. 2021. V. 228. Pp. 78–88. DOI: 10.1016/j.combustflame.2021.01.028
- 1.3. D.O. Glushkov, R.I. Egorov, D.M. Klepikov. High-speed contactless measurements of temperature evolution during ignition and combustion of coal-based fuel pellets. *International Journal of Heat and Mass Transfer*. 2021. V. 175. Article number 121359. DOI: 10.1016/j.ijheatmasstransfer.2021.121359
- 1.4. D.V. Antonov, G.V. Kuznetsov, R.M. Fedorenko, P.A. Strizhak. Micro-explosion of a two-component droplet: How the initial temperature of the water core affects the breakup conditions and outcomes. *Powder Technology*. 2021. V. 383. Pp. 378–387. DOI: 10.1016/j.powtec.2021.01.006
- 1.5. V.V. Dorokhov, G.V. Kuznetsov, K.Yu. Vershinina, P.A. Strizhak. Relative energy efficiency indicators calculated for high-moisture waste-based fuel blends using multiple-criteria decision-making. *Energy*. 2021. V. 234. Article number 121257. DOI: 10.1016/j.energy.2021.121257
- 1.6. V.V. Dorokhov, G.V. Kuznetsov, G.S. Nyashina, P.A. Strizhak. Composition of a gas and ash mixture formed during the pyrolysis and combustion of coal-water slurries containing petrochemicals. *Environmental Pollution*. 2021. V. 285. Article number 117390. DOI: 10.1016/j.envpol.2021.117390
- 1.7. Kseniya Vershinina, Sergei Shevyrev, Pavel Strizhak. Coal and petroleum-derived components for high-moisture fuel slurries. *Energy*. 2021. V. 219. Article number 119606. DOI: 10.1016/j.energy.2020.119606
- 1.8. G.V. Kuznetsov, G.S. Nyashina, P.A. Strizhak, T.R. Valiullin. Experimental research into the ignition and combustion characteristics of slurry fuels based on dry and wet coal processing waste. *Journal of the Energy Institute*. 2021. V. 97. Pp. 213–224. DOI: 10.1016/j.joei.2021.05.001
- 1.9. Ksenia Vershinina, Galina Nyashina, Pavel Strizhak. Lab-Scale Combustion of High-Moisture Fuels From Peat, Coal Waste and Milled Lignite. *Waste and Biomass Valorization*. 2021. DOI: 10.1007/s12649-021-01482-2
- 1.10. Antonov D.V., Vershinina K.Yu., Kuznetsov G.V., Strizhak P.A. Mathematical Simulation of Ignition of an Organic Coal–Water Fuel Droplet. *Journal of Engineering Physics and Thermophysics*. 2021. V. 94. P. 949–962. DOI: 10.1007/s10891-021-02372-z
- 1.11. Glushkov D.O., Matiushenko A.I., Nurpeiis A.E., Zhuikov A.V. An experimental investigation into the fuel oil-free start-up of a coal-fired boiler by the main solid fossil fuel with additives of brown coal, biomass and charcoal for ignition enhancement. *Fuel*. 2021. V. 223. 106986. DOI: 10.1016/j.fuproc.2021.106986

2. Перечень научных мероприятий, в рамках которых выполнена апробация результатов второго этапа НИР

- 2.1. P.A. Strizhak, G.S. Nyashina and K.Yu. Vershinina. The use of biomass for pyrolysis, direct combustion and coincineration with waste-derived fuel slurries // *Proceedings of the 13th International Conference on Sustainable Energy & Environmental Protection, University of*

- Natural Resources and Life Science, 13–16 September 2021, BOKU, Vienna, Austria, Pp. 32–36.
- 2.2. Вершинина К.Ю., Дорохов В.В., Романов Д.С., Стрижак П.А. Характеристики совместной утилизации угольных и растительных отходов при сжигании в виде пеллет, слоя и капель суспензий // Сборник тезисов всероссийской конференции «XXXVII Сибирский теплофизический семинар». Новосибирск. 14–16 сентября 2021. С. 69.
- 2.3. Вершинина К.Ю., Дорохов В.В., Романов Д.С. Относительные показатели энергетической утилизации высоковлажных смесей на основе отходов // Сборник трудов III международной научной конференции «Энерго-ресурсоэффективность в интересах устойчивого развития (SEWAN)». Санкт-Петербург, 19-24 апреля. 2021. С. 28–29.
- 2.4. Вершинина К.Ю., Дорохов В.В., Романов Д.С. Горение капель суспензионных топлив на основе угольных шламов, угольной пыли и отработанного турбинного масла // Сборник тезисов X международного российско-казахстанского симпозиума «Углекислота и экология Кузбасса». Кемерово. 12–13 июля. 2021. С. 21.
- 2.5. Вершинина К.Ю., Дорохов В.В., Романов Д.С., Стрижак П.А. Многофакторный анализ энергетической утилизации угольных, нефтяных и растительных отходов в составе топливных суспензий // Тезисы XI Всероссийской конференции с международным участием «Горение топлива: теория, эксперимент, приложения», 09-12 ноября 2021, Новосибирск. С. 46.
- 2.6. Р.С. Волков, О.В. Высокоморная, П.А. Стрижак, Г.В. Кузнецов. Деформация и дробление капель композиционных топлив при воздействии воздушного потока // Материалы XXII Международной конференции по вычислительной механике и современным прикладным программным системам (ВМСППС'2021), 4–13 сентября 2021 г., Алушта, Крым. С. 327–329.
- 2.7. Г.В. Кузнецов, П.А. Стрижак, Р.С. Волков. Особенности распыления композиционных жидких топлив на основе фильтр-кека каменного угля // Тезисы докладов XI Всероссийской конференции с международным участием «Горение топлива: теория, эксперимент, приложения», 9–12 ноября 2021 г., Новосибирск. С. 10.
- 2.8. Гайдукова О.С., Стрижак П.А. Характеристики процесса зажигания газового гидрата при нагреве радиационным и конвективным тепловыми потоками // Сборник докладов Всероссийской конференции с элементами научной школы для молодых учёных XXXVII «Сибирский теплофизический семинар», 14-16 сентября 2021 г., г. Новосибирск, с. 146.
- 2.9. Гайдукова О.С., Стрижак П.А. Исследование закономерностей процесса зажигания газовых гидратов при кондуктивном теплообмене // Сборник тезисов докладов XXIII Школы-семинара молодых ученых и специалистов под руководством акад. РАН А.И. Леонтьева «Проблемы газодинамики и теплообмена в энергетических установках», 24-28 мая 2021 г., г. Екатеринбург, с. 226-227.
- 2.10. Гайдукова О.С., Стрижак П.А., Мисюра С.Я. Исследование закономерностей процесса зажигания газовых гидратов при индукционном нагреве // Сборник трудов III международной научной конференции «Энерго-ресурсоэффективность в интересах устойчивого развития», 19-24 апреля 2021 г., г. Санкт-Петербург, с. 32-33.
- 2.11. Гайдукова О.С., Стрижак П.А. Закономерности процесса зажигания газовых гидратов // Сборник тезисов докладов «Углекислота и экология Кузбасса», 12-13 июля 2021 г., г. Кемерово, с. 23.
- 2.12. Гайдукова О.С., Стрижак П.А. Численное исследование закономерностей процесса зажигания газовых гидратов // Сборник тезисов докладов Всероссийской научной конференции «XII семинар вузов по теплофизике и энергетике», 25-27 октября 2021 г., г. Сочи, с. 21.
- 2.13. Гайдукова О.С., Стрижак П.А. Теоретическое исследование условий зажигания гелеобразного топлива при разных схемах нагрева // Материалы Шестнадцатой всероссийской (восьмая международная) научно-технической конференции студентов,

- аспирантов и молодых ученых «Энергия-2021», 6-8 апреля 2021 г., г. Иваново, том 1, с. 128.
- 2.14. Гайдукова О.С., Стрижак П.А., Мисюра С.Я. Зажигание газовых гидратов при разных видах теплообмена // Сборник тезисов докладов XI Всероссийской конференции с международным участием «Горение топлива: теория, эксперимент, приложения», 9-12 ноября 2021 г., г. Новосибирск, с. 47.
- 2.15. Няшина Г.С., Стрижак П.А., Дорохов В.В. Состав газов, образующихся при горении органоводоугольных композиций. Углекислотная и экология Кузбасс: X Международный Российско-Казахстанский симпозиум: сборник тезисов докладов, Кемерово, 12-13 июля 2021. Кемерово: ФИЦ УУХ СО РАН, 2021. С. 67.
- 2.16. Няшина Г.С., Дорохов В.В., Стрижак П.А. Оценка экологических показателей сжигания перспективных водоугольных композиций. XXXVII Сибирский теплофизический семинар: Всероссийская конференция с элементами научной школы для молодых учёных: сборник тезисов докладов, Новосибирск, 14-16 сентября 2021. Новосибирск: Институт теплофизики СО РАН, 2021. С. 158.
- 2.17. К.Ю. Вершинина, П.А. Стрижак, Г.В. Кузнецов. Критические условия воспламенения суспензионных топлив при утилизации отходов угле- и нефтепереработки. V Конгресс «Фундаментальные исследования и прикладные разработки процессов переработки и утилизации техногенных образований», 23–26 ноября 2021 г., Екатеринбург.

3. Перечень статей, опубликованных по результатам выполнения второго этапов НИР

- 1.1. G.V. Kuznetsov, R.S. Volkov, P.A. Strizhak. Determining water content in a liquid fuel by the luminosity of its droplet. *Chemical Engineering Science*. 2021. V. 233. Article number 116415. DOI: 10.1016/j.ces.2020.116415
- 1.2. O.S. Gaydukova, S.Y. Misyura, P.A. Strizhak. Investigating regularities of gas hydrate ignition on a heated surface: Experiments and modelling. *Combustion and Flame*. 2021. V. 228. Pp. 78–88. DOI: 10.1016/j.combustflame.2021.01.028
- 1.3. D.O. Glushkov, R.I. Egorov, D.M. Klepikov. High-speed contactless measurements of temperature evolution during ignition and combustion of coal-based fuel pellets. *International Journal of Heat and Mass Transfer*. 2021. V. 175. Article number 121359. DOI: 10.1016/j.ijheatmasstransfer.2021.121359
- 1.4. V.V. Dorokhov, G.V. Kuznetsov, K.Yu. Verшинina, P.A. Strizhak. Relative energy efficiency indicators calculated for high-moisture waste-based fuel blends using multiple-criteria decision-making. *Energy*. 2021. V. 234. Article number 121257. DOI: 10.1016/j.energy.2021.121257
- 1.5. V.V. Dorokhov, G.V. Kuznetsov, G.S. Nyashina, P.A. Strizhak. Composition of a gas and ash mixture formed during the pyrolysis and combustion of coal-water slurries containing petrochemicals. *Environmental Pollution*. 2021. V. 285. Article number 117390. DOI: 10.1016/j.envpol.2021.117390
- 1.6. G.V. Kuznetsov, G.S. Nyashina, P.A. Strizhak, T.R. Valiullin. Experimental research into the ignition and combustion characteristics of slurry fuels based on dry and wet coal processing waste. *Journal of the Energy Institute*. 2021. V. 97. Pp. 213–224. DOI: 10.1016/j.joei.2021.05.001
- 1.7. Glushkov D.O., Matiushenko A.I., Nurpeiis A.E., Zhuikov A.V. An experimental investigation into the fuel oil-free start-up of a coal-fired boiler by the main solid fossil fuel with additives of brown coal, biomass and charcoal for ignition enhancement. *Fuel*. 2021. V. 223. 106986. DOI: 10.1016/j.fuproc.2021.106986

ПРИЛОЖЕНИЕ Б

Сведения об участниках проекта

№ п/п	ФИО (полностью) участника проекта	Год рождения	Должность в организации-исполнителе	Ученая степень, уч. звание	Является аспирантом (да / нет)
1	Кузнецов Гений Владимирович	1949	профессор	д.ф.-м.н., профессор	-
2	Стрижак Павел Александрович	1985	профессор	д.ф.-м.н., профессор	-
3	Глушков Дмитрий Олегович	1988	доцент	к.ф.-м.н., доцент	-
4	Няшина Галина Сергеевна	1992	ассистент	к.т.н.	-
5	Вершинина Ксения Юрьевна	1992	доцент	к.ф.-м.н.	-
6	Волков Роман Сергеевич	1987	доцент	к.т.н.	-
7	Высокоморная Ольга Валерьевна	1984	доцент	к.ф.-м.н.	-
8	Пискунов Максим Владимирович	1991	доцент	к.ф.-м.н.	-
9	Феоктистов Дмитрий Владимирович	1983	доцент	к.т.н.	-
10	Курганкина Маргарита Александровна	1992	ассистент	к.т.н.	-
11	Гайдукова (Яшутина) Ольга Сергеевна	1993	инженер-исследователь		да
12	Антонов Дмитрий Владимирович	1996	младший научный сотрудник		да
13	Шлегель Никита Евгеньевич	1995	инженер-исследователь		да

Общая численность участников проекта – 13 чел.

Доля аспирантов и молодых ученых (до 39 лет) в общей численности участников проекта из ТПУ составляет 92.3 %, что соответствует целевому значению показателя результатов выполнения СЧ НИР.