

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.С. Осубов



ОТЧЕТ О НАУЧНО-ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКОЙ РАБОТЕ

по теме:

ФУНДАМЕНТАЛЬНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ ПРОЦЕССОВ ГОРЕНИЯ И ДЕТОНАЦИИ
ПРИМЕНИТЕЛЬНО К РАЗВИТИЮ ОСНОВ ЭНЕРГОТЕХНОЛОГИЙ

(промежуточный)

Этап 1

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

A handwritten signature in blue ink, appearing to be 'Г.В. Кузнецов', written over a horizontal line.

Г.В. Кузнецов

(подпись, дата)

20.11.2020

Томск 2020

Список исполнителей

№ п/п	ФИО	Должность	Уч. степень, уч. звание	Подпись	Дата
1	Кузнецов Гений Владимирович	профессор	д.ф.-м.н., профессор		20.11.2020
2	Стрижак Павел Александрович	профессор	д.ф.-м.н., профессор		20.11.2020
3	Глушков Дмитрий Олегович	доцент	к.ф.-м.н., доцент		20.11.2020
4	Няшина Галина Сергеевна	ассистент	к.т.н.		20.11.2020
5	Вершинина Ксения Юрьевна	доцент	к.ф.-м.н.		20.11.2020
6	Волков Роман Сергеевич	доцент	к.т.н.		20.11.2020
7	Высокоморная Ольга Валерьевна	доцент	к.ф.-м.н.		20.11.2020
8	Пискунов Максим Владимирович	доцент	к.ф.-м.н.		20.11.2020
9	Феоктистов Дмитрий Владимирович	доцент	к.т.н.		20.11.2020
10	Гайдукова (Яшутина) Ольга Сергеевна	инженер-исследователь, аспирант			20.11.2020
11	Антонов Дмитрий Владимирович	инженер-исследователь, аспирант			20.11.2020

РЕФЕРАТ

Отчет 40 с., 11 рис., 4 табл., 15 источн.

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

Экспериментально и теоретически с использованием современных методов исследованы и обоснованы 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 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. Основные компоненты органоводоугольных композиций	6
2. Свойства и характеристики органоводоугольных композиций	6
3. Деформация капель органоводоугольных композиций	9
4. Фрагментация капель органоводоугольных композиций	11
5. Распыление органоводоугольных композиций	19
6. Характеристики газовых выбросов и золы при сжигании органоводоугольных композиций	23
7. Математическое моделирование горения капель органоводоугольных композиций	25
8. Относительные показатели эффективности топлив	27
ЗАКЛЮЧЕНИЕ	33
СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ	34
ПРИЛОЖЕНИЕ А	36
ПРИЛОЖЕНИЕ Б	39

ВВЕДЕНИЕ

В рамках первого этапа выполнения проекта проведен анализ современного состояния исследований мирового научного сообщества процессов приготовления, хранения, транспортировки, распыления, фрагментации и сжигания топливных композиций на основе сырьевых, энергетических, сельскохозяйственных и бытовых отходов. Проведены экспериментальные исследования основных теплофизических и реологических характеристик компонентов в отдельности и композиций с различным составом, определен элементный состав, установлены характеристики процессов фрагментации, распыления, зажигания и горения перспективных топлив. При обобщении результатов фундаментальных экспериментальных исследований установлены относительные показатели эффективности органоводоугольных топливных композиций с использованием многокритериальных методов оценки. По результатам экспериментов разработаны физическая и математическая модели горения капель перспективных органоводоугольных композиций. По результатам теоретических исследований установлены характеристики процессов зажигания и горения перспективных топлив в условиях, соответствующих топочным камерам паровых и водогрейных котлов. Определены условия, при которых можно адекватно прогнозировать характеристики горения органоводоугольных топлив в топках котлов с применением авторских программных кодов (Matlab, Delfi, Visual C++) и коммерческих пакетов (Ansys Fluent, Comsol Multiphysics).

1. Основные компоненты органоводоугольных композиций

Органоводоугольные (ОВУТ) и водоугольные (ВУТ) топлива представляют гомогенные смеси нескольких компонентов. В общем случае суспензия ОВУТ включает твердую и жидкую составляющие. В частных случаях как твердая, так и жидкая части могут включать несколько горючих и негорючих компонентов. Ниже представлены перечни перспективных (по экологическим, энергетическим, экономическим, технологическим и/или социальным критериям) компонентов для приготовления топливных смесей, а также типичные диапазоны массовых и/или объемных концентраций компонентов (определены на основе научно-практического опыта, анализа публикаций по реологии, распылению, зажиганию и горению топливных суспензий).

Твердые горючие компоненты: каменные и бурые угли; торф; угольные отходы (шламы, фильтр-кеки, промпродукт); биомасса и древесные компоненты (кора, опилки, древесный уголь); твердые бытовые отходы (картон, резина, пластик, целлюлозно-бумажные материалы и др.). Общая массовая доля твердых составляющих в топливной суспензии может варьироваться от 40% до 60%. В настоящем исследовании использовались угли и кеки марок: Т – тощий, Д – длиннопламенный, Ж – жирный, Г – газовый, СС – слабоспекающийся, К – коксующийся.

Жидкие горючие компоненты (массовые доли 5–15%): масла нефтяного происхождения (отработанные и исходные); нефтяные шламы; тяжелая нефть и мазут; растительные масла; глицерин; спирты и др. Типичный жидкий негорючий компонент – вода (массовая доля 40–60%) для подготовки смесей может быть водопроводной, технической, сточной, дистиллированной и др.

Помимо перечисленных в состав суспензии могут вводиться компоненты, улучшающие стабильность или снижающие вязкость (синтетические и природные ПАВы, масла, крахмал, лигнин, камедь и др.). Их массовая доля, как правило, варьируется в диапазоне 0.5–5%.

2. Свойства и характеристики органоводоугольных композиций

Данные о реологических характеристиках композиционных жидких топлив необходимы при определении их пригодности для практического использования, в

частности, при транспортировке, хранении, распылении. Главным образом, вязкость топлив влияет на организацию процесса перекачивания топлива по трубопроводам и эффективность распыления форсунками [1,2]. Согласно [1], динамическая вязкость суспензионных топлив не должна превышать 1.2 Па·с (при скорости сдвига слоя 100 с^{-1}). Более высокие значения вязкости значительно усложняют перекачивание смеси и ее распыление. Другим важным свойством суспензионных топлив является стабильность. Чем меньше скорость расслоения смеси на жидкую и твердую фракции, тем стабильнее топливо. Повышение стабильности позволяет дольше хранить приготовленную смесь без перемешивания [2,3].

На рис. 2.1 приведен внешний вид оборудования для подготовки компонентов и приготовления смесей и типичные результаты. Твердые компоненты просушивались, измельчались в роторной мельнице (Pulverisette 14), просеивались с использованием набора сит. Затем с помощью гомогенизатора и магнитной мешалки (AIBOTE ZNCLBS-2500-350) приготавливалась многокомпонентная смесь. Для определения вязкости топливных смесей использован вискозиметр Brookfield DV3T.



Рис. 2.1. Оборудование (а – роторная мельница, б – магнитная мешалка, в – вискозиметр) и типичные зависимости динамической вязкости от скорости сдвига для фильтр-кеков разных марок каменных углей (z)

Все исследуемые суспензии являются неньютоновскими жидкостями, т.к. значения их вязкости зависят от изменения градиента скорости (рис. 2.1, z). Псевдопластичное поведение суспензий является технологически выгодным. Если при отсутствии внешних воздействий (хранение) суспензия имеет повышенную

вязкость, это способствует сохранению стабильности благодаря сниженной скорости осаждения частиц. Вязкость снижается при нарушении статичности (встряхивание, перемешивание и др. воздействия), что позволяет легче транспортировать смесь по трубопроводу или распылять ее через форсунки [4].

Установлено, что наименьшим значением вязкости из исследованных отходов углеобогащения обладает суспензия на основе фильтр-кека длиннопламенного каменного угля (марка Д). При варьировании скорости сдвига в диапазоне 10–100 с⁻¹ вязкость такой суспензии изменяется от 1040.72 до 157.06 мПа·с. Наибольшим диапазоном изменения вязкости обладают топливные суспензии на основе фильтр-кеков угля Г (газовый) и угля Ж (жирный). Диапазон изменения составил от 4676.36 до 453.22 мПа·с для кека Г и от 4066.97 до 631.66 мПа·с для кека Ж. Проведенные эксперименты показали, что наиболее стабильной суспензией является композиция на основе фильтр-кека угля Д. Осаждение суспензии началось на третий день эксперимента, доля отслоившейся жидкости составила не более 2%. Наименее стабильной смесью является топливо с добавкой фильтр-кека угля Т (тощий). Доля отделившейся жидкости составила 15.7%.

При варьировании массовой доли фильтр-кека угля К (коксующийся) от 40% до 60% вязкость топливной смеси изменялась в диапазоне 170–1400 мПа·с. В условиях длительного хранения стабильность составов росла при повышении доли твердого компонента в смеси.

Следующим этапом проведения исследований стала оценка влияния доли жидкого горючего компонента на вязкость и стабильность топливной смеси. В исследованиях использовано отработанное турбинное масло вследствие его доступности и больших ежегодных объемов накопления на энергетических предприятиях. Вязкость смеси при 5% отработанного масла составила 492.5 мПа·с, что приемлемо для перекачивания органоводоугольной суспензии по трубам и распылению в форсунках котельных агрегатов [1]. Однако добавка большей доли масла не позволяет эффективно транспортировать суспензию по трубопроводу или распылять ее форсунками. Все исследованные смеси с добавкой масла не расслаивались в течение длительного времени хранения (7 суток).

Исследовано влияние тонины помола на реологические характеристики группы перспективных органоводоугольных топлив. Определение характеристик топлив на

основе бурого угля показало, что меньшей тонине помола (использовались частицы размером 80, 100 и 140 мкм) соответствует меньшая вязкость топливной смеси (при скорости сдвига 100 с^{-1} вязкость варьировалась в диапазоне 180–274 мПа·с). При совместном использовании углей двух помолов (размеры частиц 100 и 140 мкм) наименьшей вязкости удалось достичь для топлива с составом «уголь марки Д (размеры частиц 140 мкм) 15%, уголь марки Д (размеры частиц 100 мкм) 35%, вода 50%» (вязкость составила 202 мПа·с). Наибольшей стабильностью характеризуется состав «уголь марки Д (размеры частиц 140 мкм) 25%, уголь Д (размеры частиц 100 мкм) 25%, вода 50%».

Заключительным этапом проведенных экспериментов в этом разделе стало определение влияния введения добавки в виде биомассы (на примере опилок) на реологические характеристики топливной смеси. Массовая концентрация опилок варьировалась в диапазоне 2.5–10%. Установлено, что наиболее широким диапазоном изменения вязкости (12063.69–396.12 мПа·с) обладает суспензия, содержащая 10% опилок. При скоростях сдвига 100 с^{-1} вязкость всех суспензий соответствует диапазону, подходящему для перекачки таких смесей по трубопроводу и дальнейшему распылению форсунками.

3. Деформация капель органоводоугольных композиций

На рис. 3.1 приведен внешний вид экспериментального стенда, использованного для определения характеристик деформации и разрушения капель водоугольных (ВУТ) и органоводоугольных (ОВУТ) топливных композиций.

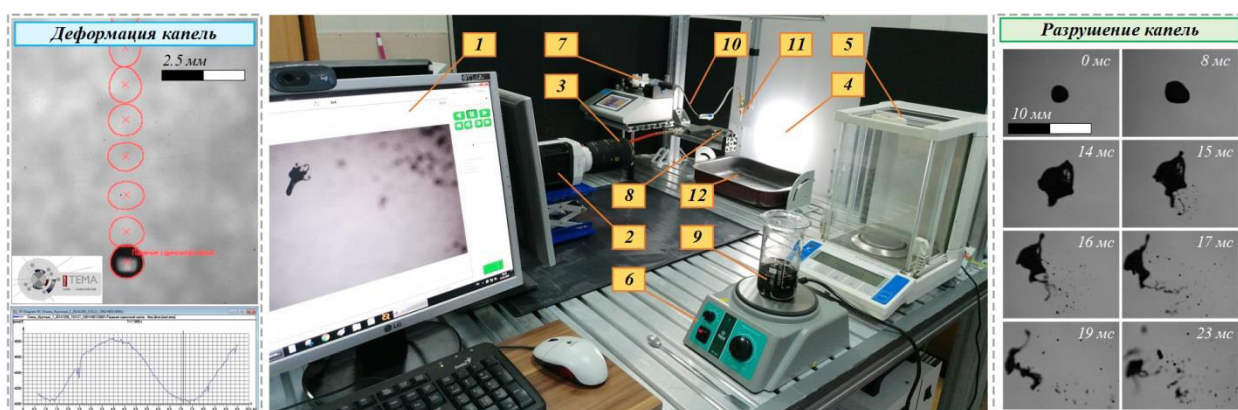


Рис. 3.1. Внешний вид экспериментального стенда: 1 – персональный компьютер (ПК); 2 – видеокамера; 3 – макрообъектив; 4 – светодиодный прожектор; 5 – лабораторные весы; 6 – лабораторный магнитный перемешиватель; 7 – шприцевой

насос; 8 – сопло воздушного компрессора; 9 – капля исследуемой композиции; 10 – канал подачи топлива; 11 – дозирующий наконечник; 12 – емкость для сбора исследуемого состава

Исследованы топливные составы, реологические и теплофизические свойства которых установлены по результатам экспериментов п. 2 настоящего отчета. На первом этапе исследований (определение характеристик деформации) исследовалось гравитационное осаждение капель под действием силы тяжести в воздушной среде. Варьировались высота, с которой сбрасывались капли, их начальные диаметры и температура. Регистрация процессов деформации выполнялась высокоскоростной видеокамерой. В результате обработки видеозаписей опытов с использованием программного комплекса «Тема Automotive» определены изменяющиеся в полете формы капель, их максимальные поперечные и продольные размеры (амплитуда деформации), а также динамика изменения площади продольного (вдоль направления движения) сечения капли. Типичные результаты экспериментов представлены на рис. 3.2.

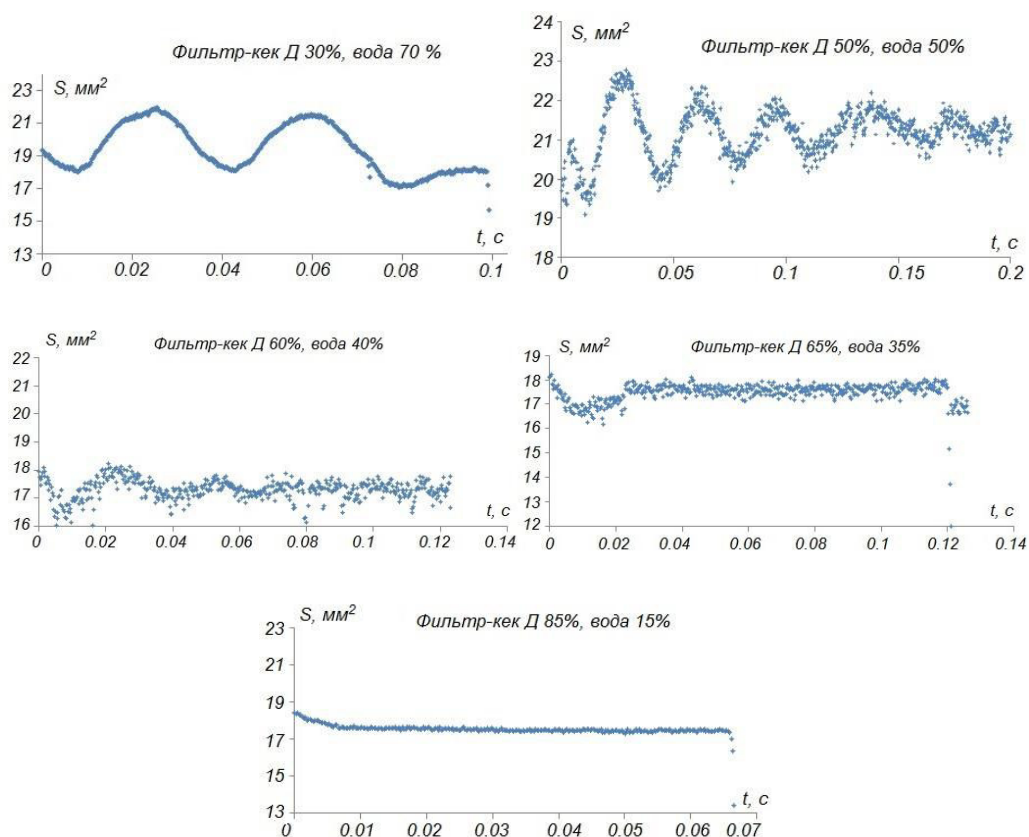


Рис. 3.2. Изменения площади продольного сечения капель топливных композиций

На втором этапе экспериментов на свободно падающую каплю топливной суспензии импульсно воздействовал ориентированный по нормали к траектории ее движения воздушный поток, генерируемый компрессором. При открытии запорной задвижки перед соплом формировался кратковременный мощный импульсный поток воздуха. Давление в ресивере компрессора варьировалось от 1 до 8 атм, что соответствует диапазону скоростей движения потока воздуха 3.44–15.12 м/с. По результатам обработки экспериментов с использованием данных о вязкости, плотности и поверхностном натяжении топлив выполнена критериальная оценка критических условий дробления капель в газовом потоке (табл. 3.1).

Табл. 3.1. Значения критических чисел Вебера и Рейнольдса, соответствующих разрушению капель композиционных топлив при воздействии воздушного потока

Наименование состава	$We_{кр}$	$Re_{кр}$	Наименование состава	$We_{кр}$	$Re_{кр}$
Фильтр-кек угля марки Д 35%, вода 61%, опилки 4%	571.9	29.8	Фильтр-кек угля марки Д 50%, вода 47.5%, турбинное масло 2.5%	399.8	14.4
Фильтр-кек угля марки Д 50%, вода 50%, турбинное масло 5%	861.8	32.2	Фильтр-кек угля марки Д 50%, вода 40%, турбинное масло 10%	572.4	5.32
Фильтр-кек угля марки Д 50%, вода 50%	354.8	29.7	Фильтр-кек Д 40%, вода 60%	390.4	85.6
Фильтр-кек угля марки Д 37%, вода 61%, опилки 2%	477.2	27.7	Уголь марки Д 40%, вода 60%	442.9	56.8
Бурый уголь 40% (80 мкм), вода 60%	384.6	57.2	Уголь марки Д 50%, вода 50%	479.4	55.9
Бурый уголь 40% (100 мкм), вода 60%	418.7	37.3	Уголь марки Д 45%, вода 55%	530.1	56
Бурый уголь 40% (140 мкм), вода 60%	402.7	45.1	Фильтр-кек угля марки Д 60%, вода 40%	нет	разрушения

4. Фрагментация капель органоводоугольных композиций

Экспериментально установлены характеристики процесса фрагментации (вследствие подвода теплоты) капель нескольких перспективных составов ВУТ и ОВУТ при использовании трех схем с доминированием конвективного, кондуктивного и радиационного нагрева (в потоке разогретого газа, на разогретой подложке и в муфельной печи). Нагрев в потоке разогретого воздуха реализован при использовании воздухонагревателя (Leister LHS 61, максимальная температура воздуха на выходе 700 °С) и нагнетателя вихревого потока высокого давления (Leister Robust с расходом воздуха при 20 °С до 1200 л/мин) с возможностью

регулирования скорости движения разогретого воздуха. Продолжением выходного патрубка воздухонагревателя являлся полый цилиндрический канал из кварцевого стекла, в который на держателе в виде тонкой нихромовой проволоки диаметром 0.2 мм вводились капли ВУТ и ОВУТ. Схема нагрева с разогретой подложкой реализовывалась с использованием высокочастотного индукционного нагревателя ВЧ-15АВ (мощность 15 кВт, диапазон частот 30–100 кГц). Одиночные капли ВУТ и ОВУТ помещались на подложку из нержавеющей стали марки 12Х18Н10Т в углубление в верхней ее части цилиндрической формы диаметром 5.5 мм и глубиной 2 мм. Схема с доминированием радиационной составляющей реализована в трубчатой печи Nabertherm R 50/250/13 (максимальная температура 1300 °С), источником излучения в которой являются стенки керамической трубки. Капли ВУТ и ОВУТ помещались в разогретую среду на держателе аналогично схеме с потоком воздуха.

Процессы нагрева, испарения и фрагментации капель ВУТ и ОВУТ регистрировались с помощью высокоскоростной камеры Phantom Miro C110 (915 кадров в секунду (кадр/с) при 1280 x 1024; динамический диапазон 12 бит; КМОП сенсор – 1.3 Мпикс). Частота съемки при проведении экспериментов составляла 1000 кадров в секунду при разрешении 512x512 пикселей. Полученные по результатам экспериментов видеофрагменты обрабатывались в программном обеспечении Phantom Camera Control. При обработке регистрировались времена задержки начала распада капель, их начальные размеры, а также размеры вторичных капель после фрагментации. Систематические погрешности определения параметров не превышали 0.001 с и 0.025 мм, соответственно. Размер капель регистрировался в момент их ввода в зону нагрева.

С использованием трех экспериментальных стендов с разными доминирующими механизмами нагрева установлены экспериментальные зависимости времен задержки фрагментации капель нескольких перспективных составов ВУТ и ОВУТ от группы факторов: температура греющей среды, скорость движения воздушного потока, компонентный состав, начальные размеры капель. Под временем задержки распада принят интервал времени между вводом капель ВУТ и ОВУТ в зону нагрева до начала их фрагментации (отрыв первого вторичного фрагмента). Также установлены характеристики вторичных капель, образующихся при фрагментации

исходных капель ВУТ и ОВУТ: распределения вторичных фрагментов по размерам, их средний размер, увеличение общей площади поверхности капель по сравнению с начальной (до распада). Типичные результаты экспериментальных исследований в условиях нагрева в муфельной печи представлены на рис. 4.1.

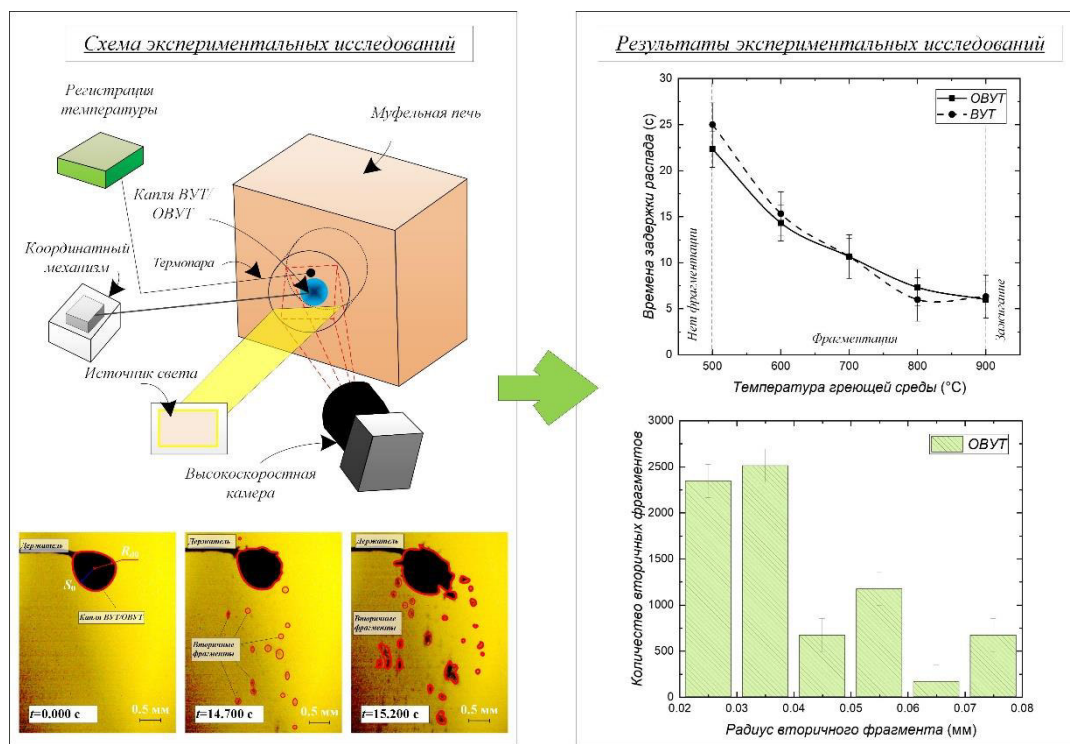


Рис. 4.1. Схема проведения экспериментов по фрагментации капель топлив и типичные результаты исследований на примере нагрева в муфельной печи

Проведены экспериментальные исследования с группой компонентных составов:
 1 – фильтр-кек Д 50 %, вода 50%, 2 – фильтр-кек Д 50 %, вода 45%, турбинное масло 5%, 3 – уголь Д 50%, вода 50%, 4 – уголь Д 50%, вода 45%, турбинное масло 5%, 5 – уголь Д 40%, вода 60%, 6 – уголь Д 60%, вода 40%, 7 – уголь Д 50%, вода 40%, турбинное масло 10%, 8 – уголь Д 38%, вода 60%, древесные опилки 2% , 9 – уголь Д 36%, вода 60%, древесные опилки 4%, 10 – уголь Д 50%, вода 49%, неонол 1%, 11 – уголь Д 50%, вода 49,75%, неонол 0,25%, 12 – уголь Д 50%, вода 49,75%, TWEEN 80 0,25%, 13 – уголь Д 50%, вода 48,4%, крахмал 1.6%, 14 – уголь Д 50%, вода 45%, турбинное масло 5%, 15 – уголь Д 50%, вода 45%, древесные опилки 5%, 16 – уголь Д 50%, вода 45%, ореховая шелуха 5%, 17 – фильтр-кек Д 50%, вода 45%, древесные опилки 5%, 18 – фильтр-кек Д 50%, вода 45%, ореховая шелуха

5%. Также исследовано влияние тонины помола в диапазоне 80–140 мкм на примере состава: бурый уголь 50%, вода 50%.

Основные закономерности, установленные в экспериментах по исследованию фрагментации капель ВУТ и ОВУТ, заключаются в следующем. Во-первых, фрагментация капель ВУТ и ОВУТ происходит при полном испарении влаги из приповерхностных слоев композиции. Этот вывод необходимо учитывать при прогнозировании теоретических значений времен задержки фрагментации капель ВУТ и ОВУТ. Во-вторых, составы на основе каменных и бурых углей фрагментировали при нагреве и полном выходе влаги из них в отличие от составов на основе фильтр-кеков. В-третьих, важную роль в процессе фрагментации играет температура внешней среды. Процессы фрагментации реализуются, как правило, до момента зажигания топливных композиций. Установлен диапазон температур, при которых стабильно реализуется распад капель. Этот диапазон соответствует низкотемпературному зажиганию (до 900 °С). В-четвертых, на распад капель ВУТ и ОВУТ оказывают влияние их исходные размеры: чем мельче капли, тем быстрее они фрагментируют. В-пятых, распад капель ВУТ и ОВУТ наиболее эффективен (наибольшее количество вторичных фрагментов с наименьшим размером) при обтекании капель потоком высокотемпературных газов (в реальных топливных технологиях это схема реализуется при движении капель ВУТ и ОВУТ в топочной камере). В-шестых, тонина помола угольных частиц очень важна при фрагментации, минимальный размер вторичных фрагментов соответствует минимальному начальному размеру угольных частиц в композиции.

Наиболее важным результатом проведенных экспериментальных исследований по изучению фрагментации капель ВУТ и ОВУТ для реальных топливных технологий является увеличение площади поверхности ВУТ и ОВУТ после распада (фрагментации). Повышение значения этого параметра позволяет увеличить тепловыделение в единицу времени, т.е. тепловую мощность установок. На рис. 4.2 показаны типичные зависимости отношения площадей поверхности S_1/S_0 от температуры греющей среды в условиях радиационного нагрева в муфельной печи для трех наиболее перспективных составов: 1 – уголь Д 50%, вода 45%, турбинное масло 5%, 2 – уголь Д 50%, вода 45%, опилки 5%, 3 – уголь Д 50%, вода 45%, ореховая шелуха 5%.

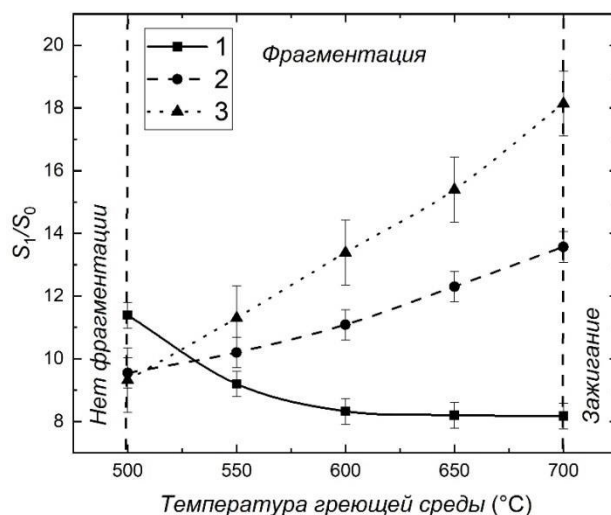


Рис. 4.2 Типичные зависимости отношения площади поверхности после и до фрагментации S_1/S_0 от температуры воздуха в муфеле для трех составов: 1 – уголь Д 50%, вода 45%, турбинное масло 5%, 2 – уголь Д 50%, вода 45%, опилки 5%, 3 – уголь Д 50%, вода 45%, ореховая шелуха 5%

Результаты выполненных экспериментов важны для развития топливных технологий распыления топлив в котельных агрегатах. Следует отметить, что фрагментация капель топлив наиболее эффективна при низкотемпературном зажигании. Для высокотемпературных процессов необходимо обеспечить предварительное первичное распыление ВУТ и ОВУТ при относительно невысоких температурах (250–900 °С) для полной фрагментации капель топлив, а затем продолжить подачу вторичных фрагментов после распада исходных капель в высокотемпературную зону топочной среды.

Эффективность энергогенерации в теплоэнергетике, в первую очередь, характеризуется параметрами сжигания топлива в котлах. Основными из них являются скорости горения и полнота выгорания топлива. В рамках перспективных технологий сжигания органоводоугольных топливных композиций существенная роль отводится этапам подготовки топлива к сжиганию и его распыления в топке. Чем меньше размер капель, тем больше эффективная площадь его поверхности, к которой подводится энергия от внешнего источника и с которой компоненты топлива, формирующие горючую парогазовую смесь. Широко известные способы механического распыления жидких (эмульсионных и суспензионных) топлив имеют ограничения по предельным (минимальным) размерам генерируемых капель

(как правило, их диаметр не менее нескольких сотен микрометров). Вследствие многокомпонентной структуры капель ОБУТ, в том числе за счет добавки воды (пары которой оказывают положительное влияние на экологические характеристики дымовых газов), длительность индукционного периода и процесса выгорания горючих компонентов (для капли композиционного топлива) в совокупности существенно превышает продолжительность пребывания частиц типичного твердого топлива размером около 80 мкм в зоне горения (для конструкций современных котлов), что является причиной снижения эффективности процесса топливосжигания из-за химического, физического и механического недожога. Перспективным направлением решения этой проблемы является увеличение эффективной площади поверхности суспензионного топлива, распыляемого в топке котла, в результате вторичного измельчения капель (до размеров в несколько десятков микрометров) в процессе интенсивного нагрева в режимах микро-взрыва или паффинга (длительное и частичное диспергирование капли), характеризующихся минимальными затратами энергии и времени. К настоящему времени установлены механизмы и характеристики протекания этих процессов для большой группы топливных эмульсий и суспензий, но основные положения теории, применимые на практике для прогнозирования гарантированного протекания микро-взрыва или паффинга топливных композиций произвольного компонентного состава, не разработаны.

На основе результатов анализа группы характеристик отдельных компонентов (табл. 4.1) смесей (температура начала кипения, скорость испарения, поверхностное натяжение, свободная поверхностная энергия, смачиваемость) и экспериментальных исследований процессов тепломассопереноса при нагреве группы горючих и негорючих (для расширения границ применения теории) многокомпонентных составов, в том числе с добавлением мелкодисперсных твердых горючих частиц, в высокотемпературной неподвижной воздушной среде сформулированы основные положения реализации микро-взрывного диспергирования и паффинга.

Экспериментальные исследования выполнены с использованием высокоскоростной видеорегистрации. Для капель многокомпонентных (горючих и негорючих) составов выделены четыре механизма (рис. 4.3) протекания физико-

химических процессов при нагревании в высокотемпературной (600–1000 °С) воздушной среде в условиях, когда они расположены на тонком держателе (рис. 4.3) и стальной подложке.

Табл. 4.1. Четыре группы жидкостей, разделенные по составляющим поверхностного натяжения и входящие в состав многокомпонентных смесей

Жидкость	Полярная составляющая, мН/м	Дисперсная составляющая, мН/м
1 группа (полярные жидкости)		
Вода	46.4	26.4
Муравьиная кислота	34.6	22.4
Моноэтаноламин	29.4	18.8
2 группа (дисперсные жидкости с высоким значением полярной составляющей)		
Глицерол	26.4	37.0
Этиленгликоль	17.6–21.3	26.4–30.9
3 группа (дисперсные жидкости с низким значением полярной составляющей)		
Ацетон	3.1	22.1
Этиловый спирт	3.3	19.0
4 группа (дисперсные жидкости)		
Дийодметан	0–2.6	47.4–50.8
Додекан	0	25.4
Машинное масло	1.6	24.8–25.9
Компрессорное масло	2.7	28.6–30.3
Турбинное масло	0–2.1	28.4

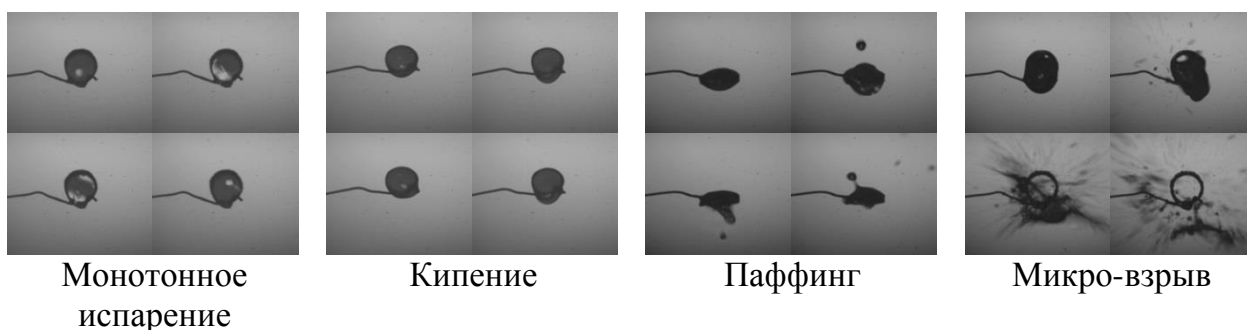


Рис. 4.3. Типичные кадры видеogramм, иллюстрирующие четыре механизма протекания физико-химических процессов при нагревании капель многокомпонентных составов

Для практического приложения в рамках органоводоугольных технологий сформулированы основные рекомендации по обеспечению условий протекания

четырёх выявленных механизмов (рис. 4.3) при зажигании капель многокомпонентных топлив:

I. Зажигание капли топлива в условиях монотонного испарения. В процессе прогрева капли компоненты, входящие в состав топливной смеси, не достигают температуры кипения.

II. Зажигание капли топлива в условиях интенсивного испарения при кипении. В процессе прогрева капли только легкокипящий компонент, входящий в многокомпонентную топливную смесь, достигает температуры кипения. Реализуется при смешении жидких компонентов в пределах одной группы, выделенной в табл. 4.1: полярные; дисперсные с высоким значением полярной составляющей; дисперсные с низким значением полярной составляющей; дисперсные. Также реализуется при смешении жидких компонентов с частичной растворимостью (в пределах разных групп, выделенных в табл. 4.1: группа 1 + группа 2; группа 1 + группа 3; группа 2 + группа 3; группа 2 + группа 4; группа 3 + группа 4).

III. Зажигание капли топлива в условиях паффинга. Обязательно достижение условий интенсивного парообразования на поверхности раздела компонентов, входящих в топливную смесь. Реализуется при смешении нерастворимых (или плохо растворимых) жидких компонентов, характеризующихся выделенными диапазонами изменения поверхностного натяжения (в пределах разных групп, выделенных в табл. 4.1: группа 1 + группа 4; группа 1 + группа 2; группа 2 + группа 4).

IV. Зажигание капли топлива в условиях микро-взрывного диспергирования. Обязательно достижение условий интенсивного парообразования на поверхности раздела компонентов, входящих в топливную смесь. Реализуется при смешении нерастворимых жидких компонентов, характеризующихся поверхностным натяжением (в пределах групп, выделенных в табл. 4.1: группа 1 + группа 4).

Также установлено, что при нагреве в высокотемпературной воздушной среде капель органоводоугольных топлив, содержащих мелкодисперсные твердые горючие компоненты, будут протекать идентичные растворам и эмульсиям физико-химические процессы. Мелкодисперсные твердые горючие компоненты не влияют на реализацию процессов паффинга или микро-взрывного диспергирования капель в условиях зажигания топливных суспензий. Таким образом, наиболее типичные топливные составы, характеризующиеся высокой интенсивностью процесса

горения и полнотой выгорания в условиях микро-взрывного диспергирования капель при стандартных температурах сжигания углеводородных топлив, должны обязательно содержать два жидких компонента, один из которых является полярным и легкокипящим (например, вода), другой – дисперсным (например, автомобильное, компрессорное, турбинное и другие масла нефтяного происхождения).

5. Распыление органоводоугольных композиций

С использованием экспериментального стенда (рис. 5.1) выполнен цикл исследований по определению характеристик процесса распыления перспективных составов ОВУТ. Стенд представлял собой прозрачную камеру, выполненную из разных видов стекла (для работы видеокамеры, равномерного освещения и др.), размерами 1×0.5×0.6 м. В камере осуществлялось распыление ВУТ и ОВУТ. Для распыления использовались разработанные и сконструированные коллективом исполнителей форсунки, основанные на эффекте Коанда [5]. Конструкция форсунок позволяет впрыскивать жидкие и пылевидные топлива. За счет регулирования угла поворота распылительного устройства возможно варьирование дисперсности капель и угла раскрытия факела.

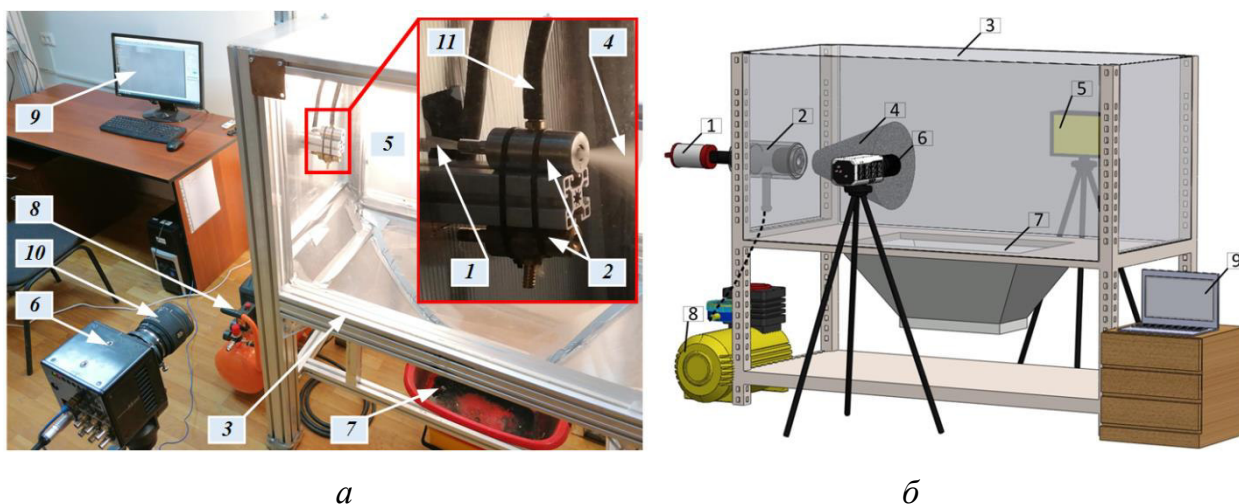
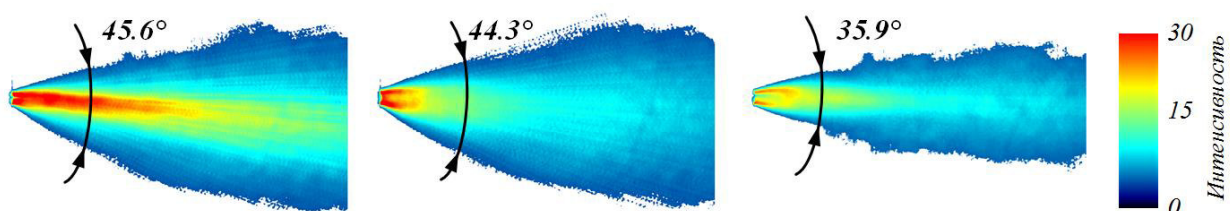


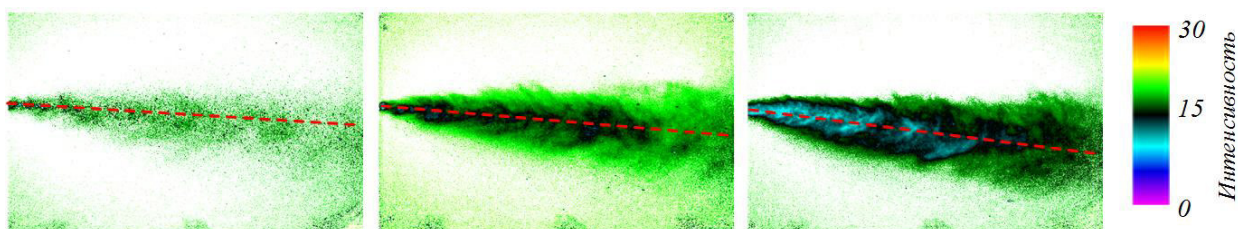
Рис 5.1. Внешний вид (а) и схема (б) экспериментального стенда (1 – шток для нагнетания исследуемого топлива; 2 – распылительные форсунки; 3 – прозрачная камера для распыления топлива; 4 – факел; 5 – система прожекторов; 6 – высокоскоростная видеокамера; 7 – емкость для сбора распыляемой жидкости; 8 – воздушный компрессор; 9 – персональный компьютер; 10 – объектив; 11 – шланг подачи воздуха на форсунку)

Для подсветки регистрационной области использовались три прожектора «Multiled PT-V9 GS Vites» (количество светодиодов – 24; световой поток – 7700 Люмен; мощность – 84 Вт, угол рассеивания – 30°). Для видеорегистрации характеристик распыления применялись видеокамеры «Phantom MIRO M310» и «Photron MINI UX100» (тип изображения – монохромное; максимальное разрешение 1280×800 пикс.; максимальная скорость съемки – $6.5 \cdot 10^5$ кадров в секунду; максимальная разрядность изображения – 12 бит).

В ходе экспериментов регистрировались (рис. 5.2): углы раскрытия факела, траектории и скорости движения капель в камере, радиусы капель. По результатам анализа светимости определен компонентный состав капель, вычислена кинетическая энергия вторичных фрагментов. Для определения углов раскрытия факела и траекторий капель использовалось ПО «DaVis» с программным пакетом для LIF обработки данных. С целью оценки скоростей движения и размеров капель применялось ПО «Actual Flow», использовались программные пакеты «Shadow Photography» и «Particle Image Velocimetry». Средние значения систематических погрешностей определения основных параметров и характеристик составили: скорости движения – 0.11 м/с, радиусы капель – 0.0083 мм, углы раскрытия факела – 0.8°.



а



б

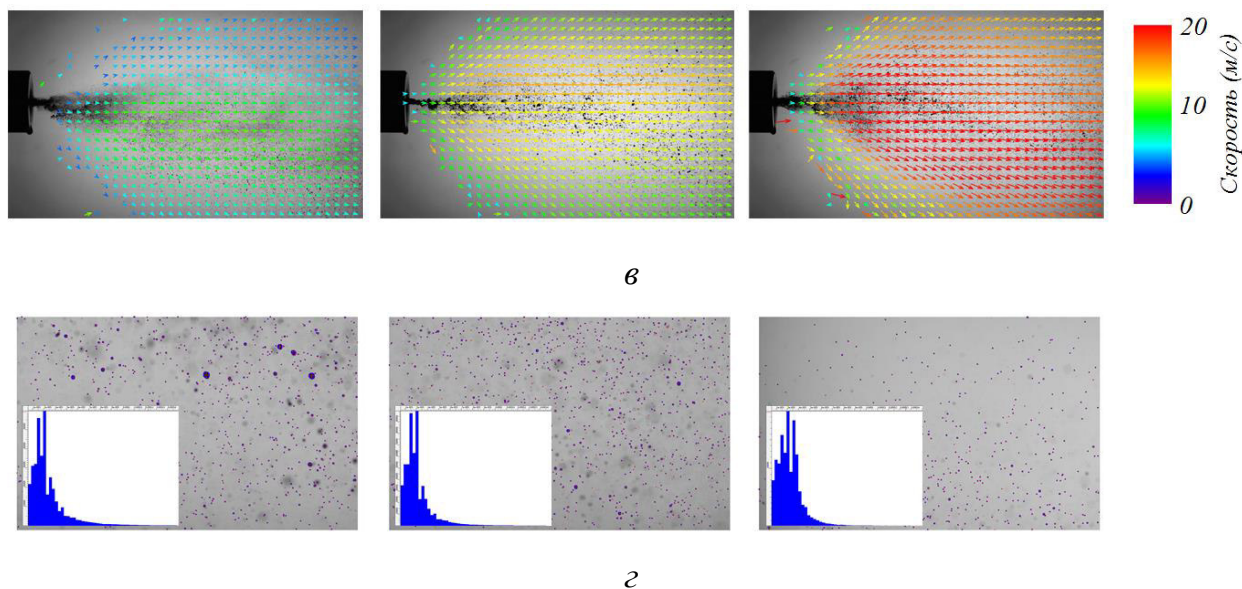


Рис. 5.2. Типичные видеокadres экспериментов и результаты исследований: *а* – угол раскрытия факела; *б* – траектории движения капель и форма факела; *в* – скорости движения капель; *г* – размеры капель

Исследована группа перспективных составов ВУТ и ОВУТ: 1 – фильтр-кек Д 40%, вода 60%; 2 – фильтр-кек Д 50 %, вода 50%; 3 – фильтр-кек Д 60 %, вода 40%; 4 – фильтр-кек Д 50 %, вода 45%, турбинное масло 5%; 5 – 18 – фильтр-кек Д 40%, вода 55%, древесные опилки 5%, 6 – уголь Д 50%, вода 50% (на примере угля марки Д также исследовано влияние тонины помола в диапазоне 80–140 мкм). Результаты экспериментов позволили установить как общие тенденции рассматриваемых процессов, так и специфические закономерности распыления органоводоугольных топливных композиций.

Зарегистрировано, что размеры генерируемых капель в потоке варьируются в диапазоне 0.015–0.6 мм. Показано, что увеличение угла поворота распылительного устройства в диапазоне 0.25–2 оборота приводит к увеличению средних размеров капель (на 30–50% при давлении воздуха 4 бар и на 70–210% при давлении воздуха 8 бар), а рост давления воздуха приводит к снижению средних размеров на 2–60%. Установлено, что увеличение концентрации КЕК Д в составе ВУТ в диапазоне 40–60% приводит к росту среднего размера капель на 11%. Увеличение тонины помола угля марки Д (в диапазоне 80–140 мкм) в составе ВУТ, напротив, приводит к снижению среднего размера капель на 5%. При этом наибольший средний радиус капель (0.054–0.056 мм) зарегистрирован для наиболее вязких составов (3 и 5), а

наименьший (0.023–0.024 мм) – для состава 6 с тониной помола 140 мкм. Установлено, что при варьировании угла поворота распылительного устройства (0.25–2 оборота) и давления воздуха (4–8 бар) углы раскрытия факела изменяются в диапазоне 39–63°. Рост концентрации фильтр-кека угля марки Д в составе ВУТ (составы 1-3) практически не влияет на значение среднего угла раскрытия факела, а для состава 6 увеличение тонины помола угля приводит к росту того же параметра на 8–10°. Наибольшие средние значения угла раскрытия факела зарегистрированы для составов 4 и 6 (тонина помола – 140 мкм), наименьшие – для состава 5. Установлено, что независимо от типа состава при распылении ВУТ и ОВУТ отклонение потока от первоначальной траектории движения составляет 1–7° (наибольшее отклонение траектории соответствует давлению воздуха 4 бар и углу поворота распылительного устройства 0.25 оборота, наименьшее – при 8 бар и 1.5 оборота). При этом рост средних размеров капель в потоке, как правило, увеличивает отклонение потока при прочих равных параметрах в диапазоне 2–6%. Анализ результатов экспериментов показал, что для исследованных топлив обеспечение максимальных значений скоростей движения потока достигается при давлении воздуха 8 бар и угле поворота распылительного устройства 1.5 оборота. Минимальные значения скоростей движения потока зарегистрированы при угле поворота распылительного устройства 0.25 оборота и давлении воздуха в диапазоне 4–8 бар. При этом абсолютные максимальные значения скорости движения потока (11–13 м/с) зарегистрированы для составов 3, 4, 5 и 6 (тонина помола 120 мкм), а минимальные (5–6 м/с) – для состава 1. При этом установлено, что при подлете к противостоящей (напротив форсунки) стенке камеры скорости движения капель снижаются в 1.5–2 раза относительно начальных значений.

По результатам выполненного цикла экспериментов вычислены безразмерные критерии (показатели эффективности), иллюстрирующие оптимальные характеристики распыления ВУТ и ОВУТ (исходя из условий максимального угла раскрытия факела и минимального размера генерируемых капель). Основываясь на результатах экспериментов по определению времен задержки зажигания капель водоугольных топлив [6], а также с учетом результатов настоящих экспериментов проведена оценка протяженности камеры сгорания, достаточной для зажигания капель ВУТ и ОВУТ, а также необходимые для этого условия. Установлено, что

при обеспечении минимального размера капель (0.024–0.026 мм), а также с учетом зарегистрированных эффектов торможения капель протяженность топочной камеры должна составлять: при скорости потока 20 м/с –2–2.1 м; для 15 м/с –1.6–1.8 м; при 10 м/с –1.4–1.5 м; для 5 м/с –1.1–1.2 м. Для реальных котлоагрегатов целесообразной может быть установка предтопка.

6. Характеристики газовых выбросов и золы при сжигании органоводоугольных композиций

С целью изучения экологических характеристик сжигания композиционных топлив использованы следующие составы: (1) фильтр-кек угля марки Д 50%, вода 50%; (2) фильтр-кек угля марки Д 50%, вода 45%, отработанное турбинное масло 5%; (3) фильтр-кек угля марки Д 45%, вода 50%, опилки 5%; (4) фильтр-кек угля марки Д 45%, вода 50%, ореховая шелуха 5%. Считается, что биомасса является экологически привлекательным типом топлива, поэтому в рамках данного раздела выбрано два вида биомассы.

Результаты экспериментальных исследований представлены на рис. 6.1. Концентрации диоксида углерода (рис. 6.1,*а*) для всех суспензий соизмеримы, так как фактическое содержание углерода в топливах примерно одинаковое. Максимальные значения зафиксированы для суспензии с добавкой масла. Полученный результат можно объяснить высокой теплотворной способностью данного компонента, что повышает степень выгорания композиции.

С увеличением температуры зарегистрирован рост концентраций H_2 (рис. 6.1,*в*). Наличие воды в суспензиях приводит к появлению свободных радикалов Н и ОН в зоне горения. С ростом температуры этот эффект усиливается. Причем у композиций без добавки биомассы зависимость концентраций H_2 от температуры носит экспоненциальный характер. Так, при температуре 900 °С максимальное значение водорода зарегистрировано для суспензии с примесью турбинного масла. При более высоких температурах (свыше 800 °С) происходит активное разложение масла, что приводит к скачку концентрации H_2 . Также можно отметить связь концентраций H_2 (рис. 6.1,*в*) и CH_4 (рис. 6.1,*г*). Зависимость выбросов метана от температуры для всех исследуемых составов имеет характерную точку перегиба, которая соответствует 800 °С. При дальнейшем росте температуры концентрации

выбросов заметно снижаются. Полученный результат обусловлен следующими реакциями: $\text{CH}_4 + \text{H}_2\text{O} \rightarrow \text{CO} + 3\text{H}_2$ ($t \geq 800$ °C), $\text{CH}_4 \rightarrow \text{C} + 2\text{H}_2$ ($t \geq 900$ °C). В результате образуются дополнительные радикалы водорода при высоких температурах.

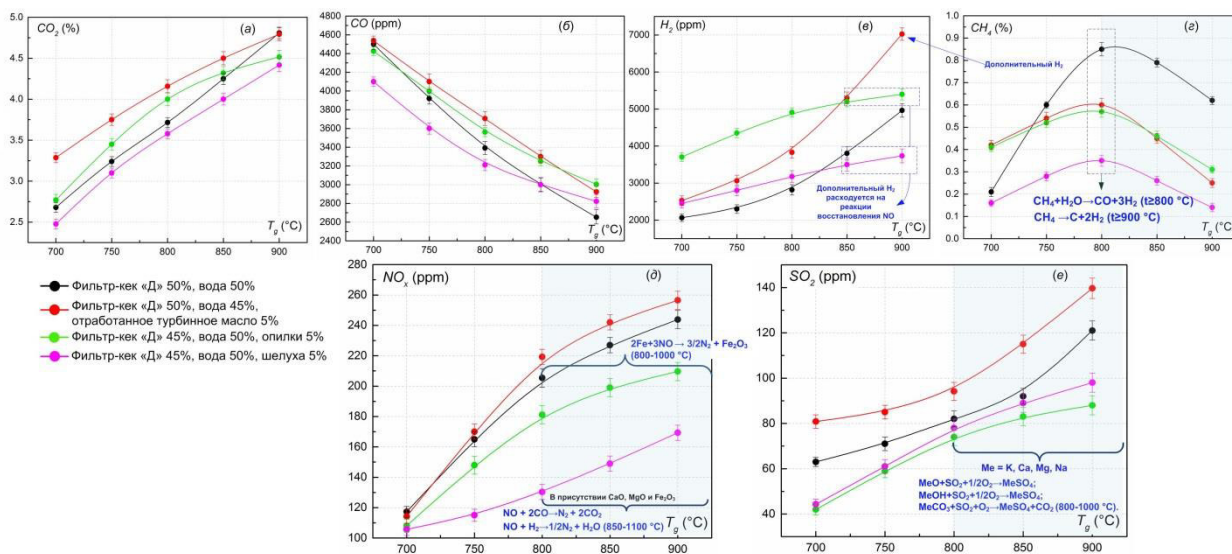


Рис. 6.1. Средние концентрации оксидов углерода CO_2 (а) и CO (б), водорода H_2 (в), метана CH_4 (г), оксидов серы SO_2 (д) и оксидов азота NO_x (е)

Экологически перспективными оказались суспензии с добавками биомассы. Сжигание подобных суспензий позволяет снизить концентрации оксидов серы и азота от 9 до 33 % относительно традиционной водоугольной суспензии. Замена даже небольшой доли угольного компонента биомассой выгодна, так как снижается серо- и азотосодержание смеси. Особое внимание следует уделить влиянию содержания соединений щелочных металлов в биомассе, которые могут приводить к дополнительным реакциям восстановления NO_x и выходу SO_2 в золу. Высокая концентрация воды в топливе и температура в печи также увеличивает активность окислов металлов. Полученный результат обусловлен тем, что при добавке ореховой скорлупы, содержание железа в которой в 5 раз выше, чем в опилках, концентрации NO_x ниже на 19–28% относительно ОБУТ с опилками, и на 30–36% относительно ВУТ без добавок (рис.6.1,д). Также присутствие CaO , MgO и Fe_2O_3 в угле и кеке приводит к образованию активного слоя, который при температурах выше 850 °C может катализировать восстановление NO за счет реакций $\text{NO} + \text{CO} \rightarrow 1/2\text{N}_2 + \text{CO}_2$ и $\text{NO} + \text{H}_2 \rightarrow 1/2\text{N}_2 + \text{H}_2\text{O}$. Подобное взаимодействие NO с H_2 при высоких температурах может объяснить характер изменения

концентраций H_2 (рис. 6.1,д) для топлив с биомассой. Часть H_2 расходуется на реакции восстановления NO , поэтому в зоне высоких температур не имеет такого скачка концентраций, как у ВУТ и ОВУТ с примесью масла.

При сжигании угольной суспензий с биомассой интенсифицируются реакции взаимодействия оксидов серы с оксидами и гидроксидами металлов (K, Ca, Mg, Na) ($t \geq 850$ °C). Продуктами этих реакций являются сульфаты активных металлов, которые осаждаются в виде частиц на стенках камеры или же выпадают в золу. В опилках соединений металлов больше, чем в ореховой шелухе, поэтому и концентрации SO_x для данного состава минимальны (рис. 6.1,е).

В рамках данного исследования проведен химический анализ золы (ГОСТ 10538-87). Результаты представлены в табл. 6.1. Установлено, что зола, формирующаяся при сжигании суспензий с добавками биомассы, содержит в своем составе больше оксидов Fe, Ca, Mg. Также для данных топлив установлено повышенное содержание SO_3 (относительно ОВУТ с турбинным маслом). Данный оксид характеризует подвижные компоненты S в топливе, которые улавливаются в зольную часть в виде сульфатов, снижая, таким образом, концентрации SO_2 в газовой смеси. Повышенное содержание CaO и MgO в золе также подтверждает гипотезу о реакциях взаимодействия оксидов серы с соединениями данных металлов и выпадением последних в зольный остаток.

Табл. 6.1. Результаты химического анализа золы

Наименование состава		SiO ₂ , %	(Al ₂ O ₃ + TiO ₂), %	Fe ₂ O ₃ , %	SO ₃ , %	CaO, %	MgO, %	Итог, %
95% (филт-кек угля Д, вода)	5% опилки	64.3	20.8	5.4	1.0	2.8	1.8	96.0
	5% ореховая шелуха	62.5	20.4	5.8	1.4	3.4	2.4	95.9
	5% отработанное масло	63.7	19.7	5.7	1.8	3.3	1.9	96.1

7. Математическое моделирование горения капель органоводоугольных композиций

После анализа и обобщения результатов выполненных экспериментов разработана модель, описывающая зажигание капли ОВУТ в потоке окислителя (рис. 7.1). При моделировании учитывались все установленные в опытах стадии

зажигания капли ОБУТ. При моделировании в качестве компонентов ОБУТ рассматривались фильтр-кеки 5 разных марок, характеристики которых подробно изучены коллективом ранее и опубликованы в [7–11]. В качестве жидких горючих компонентов ОБУТ использованы отработанные касторовое, компрессорное, турбинное, моторное, трансформаторное масла, водонефтяная эмульсия, мазут. Варьировались размеры капли, скорость и температура потока окислителя, вид и свойства горючих компонентов топлива, их концентрации. Начальная температура принята равной 300 К. Капля ОБУТ сферична и неподвижна. Ее обтекает поток высокотемпературных газов с заданной и малой скоростью U_g (0.5–3 м/с).

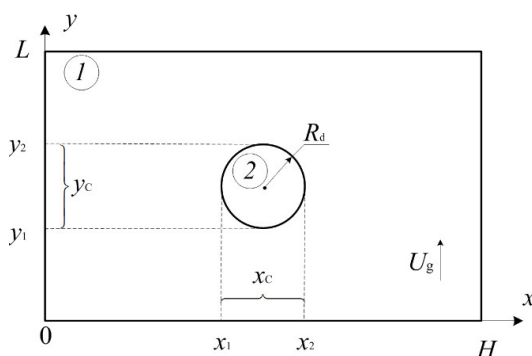


Рис. 7.1. Схема области решения задачи для моделирования зажигания капли ОБУТ: 1 – разогретый поток окислителя, 2 – капля топлива

Значение скорости испарения жидких компонентов ОБУТ задавалось в соответствии с полученными экспериментальными данными. Сопряжение декартовой и сферической систем координат выполнялось с использованием подхода, изложенного в [12]. Система уравнений решалась с использованием пакета Ansys Fluent методом конечных элементов [12]. Для анализа взаимодействия движущейся частицы с парогазовой смесью выбиралась область размерами $L=10 \cdot 10^{-3}$ м, $H=30 \cdot 10^{-3}$ м.

На рис. 7.2 представлены типичные температурные поля в рассматриваемой системе. Установлено, что зажигание капли ОБУТ происходит на участке ее поверхности со стороны набегающего потока. Можно сделать вывод о зарождении очага горения в этой области. Затем по направлению движения потока окислителя происходит распространение фронта горения.

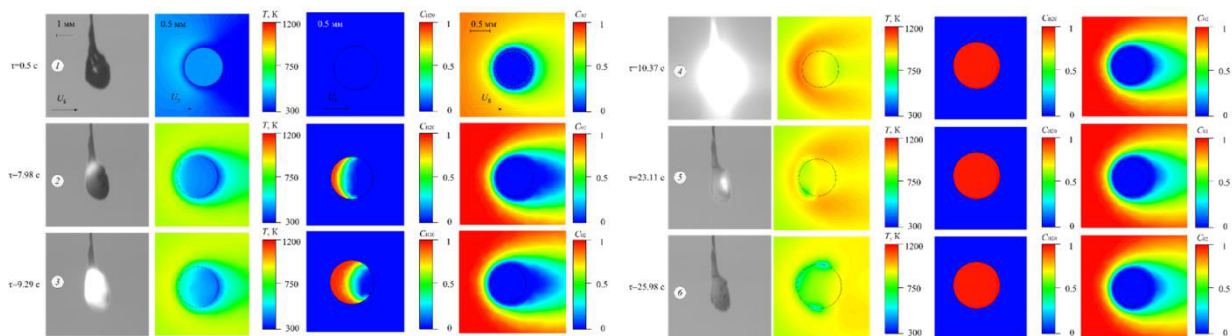


Рис. 7.2. Рассчитанные температурные и концентрационные поля, а также кадры видеogramм при прогреве, зажигании и горении капли ОВУТ в потоке окислителя (сравнение экспериментальных и теоретических результатов исследований)

Температуры в центре каплей ОВУТ удовлетворительно соответствовали экспериментальным трендам. Установленные отличия связаны с тем, что в реальных условиях скорости испарения воды и жидких горючих (масла, нефтепродукты и другие) компонентов не постоянны, а зависят от температуры и меняются в процессе нагрева. Вследствие известных ограничений коммерческих пакетов (в т.ч. Ansys Fluent) при моделировании использовались постоянные во времени значения скоростей испарения горючих и негорючих жидкостей.

По результатам численного анализа установлены параметры модели тепломассопереноса и фазовых превращений, определяющим образом влияющие на характеристики зажигания (времена задержки зажигания, максимальная температура при зажигании и время полного выгорания частицы). В этой связи можно сформулировать обоснованный вывод о том, что пакет Ansys Fluent может быть эффективно использован для определения основных характеристик зажигания ОВУТ в топках паровых и водогрейных котлов при использовании полученных в экспериментах [13] скоростей испарения воды и жидких горючих компонентов топливной суспензии при высоких температурах внешней газовой среды.

8. Относительные показатели эффективности топлив

Ниже приведены результаты анализа интегральных показателей эффективности топливных суспензий, выполненного на основе результатов экспериментальных исследований. Оценка проводилась с использованием подходов многофакторного анализа [14], в основе которого лежит приведение к безразмерному виду величин,

характеризующих разные аспекты применения топлив и имеющих различные единицы измерения. Применялся метод взвешенных сумм (weight sum method) [15], предполагающий сложение безразмерных величин с разными весовыми коэффициентами. Значения рассчитанных показателей не превышают единицы. Чем выше значение, тем более эффективно топливо.

8.1. Фрагментация капель топливных композиций

Среди всех рассмотренных условий (схема и механизм нагрева, температура и др.) и вариаций компонентного состава топлива наименьшим временем дробления (4.67 с) характеризовалась суспензия «50% уголь марки Д, 45% вода, 5% опилки» при нагреве в муфельной печи в условиях температуры 700 °С. Наибольшее время дробления (45 с) имел состав «50% уголь марки Д, 45% вода, 5% ореховая шелуха» при нагреве на подложке с температурой 300 °С.

Наибольшее соотношение $S_1/S_0=40.08$ достигнуто при нагреве состава «50% кек Д, 45% вода, 5% ореховая шелуха» в потоке воздуха с температурой 550 °С и скоростью движения 2 м/с. Дробление капель топлив на основе фильтр-кеков не регистрировалось в случае нагрева в муфельной печи и на подложке вне зависимости от условий и компонентного состава смеси.

Интегральный показатель эффективности дробления рассчитывался как сумма двух безразмерных показателей (по минимизации времени задержки дробления и по максимизации соотношения S_1/S_0) с весовыми коэффициентами 0.5. При рассмотрении всех составов и условий эксперимента установлено, что наибольшей эффективностью дробления (0.766) характеризовался состав «50% кек угля марки Д, 45% вода, 5% ореховая шелуха» при нагреве в потоке газов с температурой 550°С и скоростью 2 м/с. Наименьшая эффективность дробления характерна для смеси «50% кек угля марки Д, 45% вода, 5% ореховая шелуха» при нагреве на подложке температурой 300 °С.

При радиационном нагреве в муфеле максимальной эффективностью дробления (0.723) обладал состав «49.9% уголь марки Д, 0.1% полимер ксантан, 50% вода» при 800 °С. При нагреве на подложке наиболее эффективное дробление (0.185) характерно суспензии «50% уголь Д, 45% вода, 5% турбинное масло» при 600 °С.

8.2. Распыление топливных композиций

Интегральный показатель, учитывающий минимизацию давления при распылении и максимизацию угла раскрытия факела форсунки, имеет наименьшее значение (0.468) для состава «40% фильтр-кек угля марки Д, 5% опилки, 55% вода». Наибольшее значение (0.688) характерно смеси «50% уголь марки Д (140 мкм), 50% вода».

С использованием полученных экспериментальных данных рассчитывались критические (достаточные для дробления) значения числа Вебера и Рейнольдса для каждого из топлив. Затем выбирались смеси, имеющие минимальные значения безразмерных критериев. Все остальные топлива сопоставлялись с эталонными. Рассчитывались относительные показатели, характеризующие число Рейнольдса/Вебера суспензий относительно «эталонного» значения (т.е. минимального). По критерию минимизации числа Вебера наилучшим оказался состав «50% фильтр-кек угля марки Д, 50% вода», по критерию минимизации числа Рейнольдса – «50% фильтр-кек угля марки Д, 40% вода, 10% турбинное масло». Интегральный показатель, учитывающий минимизацию этих двух критериев подобия, рассчитывался как сумма двух относительных показателей по числу Вебера и Рейнольдса с весовыми коэффициентами 0.5. Наилучшее топливо по данному интегральному показателю имело состав «50% фильтр-кек угля марки Д, 40% вода, 10% турбинное масло».

8.3. Вязкость и стабильность топливных композиций

Наименьшей вязкостью (106.891 мПа·с) при скорости сдвига слоя 100 с^{-1} характеризовался состав «40% фильтр-кек угля марки К, 60% вода». Наибольшая вязкость характерна топливу «45% фильтр-кек угля марки К, 47.5% вода, 5% опилки, 2.5% турбинное масло». Наиболее стабильными смесями стали смеси с добавкой турбинного масла и опилок. Смесь «50% уголь марки Д, 49% вода, 1% неонол» наименее стабильна. Интегральный показатель рассчитывался как сумма двух безразмерных составляющих (по минимальной вязкости и максимальной стабильности) с весовыми коэффициентами 0.5. Наиболее высокий показатель (0,87) имеет топливо «40% фильтр-кек угля марки К, 60% вода», наименьшее значение (0.440) у состава «50% уголь марки Д, 49% вода, 1% неонол».

8.4. Зажигание и горение топливных композиций

Минимальная зольность (2.06%) типична для топлива «50% бурый уголь, 50% вода». Максимальную теплоту сгорания (16.44 МДж/кг) и температуру горения (около 1092 °С) имеет состав «50% фильтр-кек Д, 35% вода, 15% турбинное масло». Наименьшие температура (≈ 380 °С) и время задержки зажигания (около 4.8 с при 700 °С) характерны смеси «50% уголь Б2 (80 мкм), 50% вода». Расчет безразмерных показателей по каждой из вышеперечисленных характеристик проводился относительно топлив с максимальными показателями эффективности. Затем для каждой суспензии рассчитывался интегральный показатель зажигания и горения, представляющий сумму пяти безразмерных показателей с весовыми коэффициентами 0.2. Смесь «50% уголь Б2 (80 мкм), 50% вода» имеет наилучший (0.908) интегральный показатель зажигания и горения. Меньшее значение (0.500) имеет состав «60% кек угля марки Ж, 40% вода».

8.5. Антропогенные выбросы

Наименьшие концентрации CO₂ (3.16%) и CO (1669,414 ppm) регистрировались при сжигании состава «50% фильтр-кек угля марки Г, 50% вода»; H₂ (3521.513 ppm) – «60% фильтр-кек К, 40% вода»; SO₂ (88 ppm) – «45% фильтр-кек угля марки К, 50% вода, 5% опилки»; NO_x (169.33 ppm) – «45% фильтр-кек угля марки Д, 50% вода, 5% ореховая шелуха». Эти значения получены при температуре 900 °С.

Расчет безразмерных показателей для всех топлив по пяти вышеперечисленным загрязнителям проводился относительно топлив с наименьшими выбросами. Интегральный показатель экологической эффективности представлял сумму полученных относительных показателей по каждому химическому соединению с весовыми коэффициентами 0.2. Смесь «50% фильтр-кек угля марки Г, 50% вода» имеет наиболее высокий интегральный показатель (равен 0.876). Самое малое значение (0.604) имеет состав «50% фильтр-кек угля марки Д, 45% вода, 5% турбинное масло».

8.6. Обобщенный показатель эффективности топлив

При вычислении значений итогового показателя эффективности топлив использованы следующие группы критериев (в скобках указаны пояснения относительно того, что является желательным для улучшения эффективности):

1. Стоимость (минимизация);

2. Энергетические характеристики: удельная теплота сгорания (высокое значение); зольность (минимальное значение); время задержки зажигания (минимизация); температура зажигания (минимизация); температура горения (высокое значение).
3. Экологические характеристики: концентрация NO_x в дымовых газах (минимизация); концентрация SO_2 в дымовых газах (минимизация); концентрация CO_2 в дымовых газах (минимизация); концентрация CO в дымовых газах (минимизация); концентрация H_2O в дымовых газах (минимизация).
4. Реологические характеристики: вязкость (минимизация); стабильность (максимизация).
5. Распыление: числа Вебера и Рейнольдса (минимизация); давление распыления (минимизация); угол раскрытия факела (максимизация).
6. Дробление и фрагментация: время до реализации условий дробления (минимизация); соотношение площадей поверхности топлива S_1/S_0 (максимизация).

На основе интегральных показателей, рассчитанных в каждой из вышеперечисленных категорий, вычислялся итоговый показатель, объединяющий их все. При расчете рассмотрены два основных сценария:

1. Все категории параметров имеют одинаковый приоритет. В данном случае проводилось суммирование всех интегральных показателей эффективности ($x_1, x_2, x_3 \dots x_6$) с равными весовыми коэффициентами ($a_1, a_2, a_3 \dots a_6$):

$$D = a_1x_1 + a_2x_2 + a_3x_3 + a_4x_4 + a_5x_5 + a_6x_6.$$

2. Приоритет распределяется неравномерно. В этом случае приоритет с соответствующим весовым коэффициентом 0.5 отдавался одному из шести интегральных показателей. Остальные пять составляющих получали равномерно распределенный весовой коэффициент (по 0.1).

В случае равного приоритета всех групп характеристик наибольшей эффективностью (0.621) характеризуется состав «50% фильтр-кек угля марки Г, 50% вода».

Наибольшая эффективность (0.708) при приоритете низкой стоимости – состав «50% фильтр-кек угля марки Г, 50% вода».

Наибольшая эффективность (0.708) при приоритете характеристик зажигания и горения – состав «50% уголь Б2 (80 мкм), 50% вода».

Наибольшая эффективность (0.723) при приоритете экологических характеристик зажигания и горения – состав «50% фильтр-кек угля марки Г, 50% вода».

Наибольшая эффективность (0.703) при приоритете стабильности и снижения вязкости – состав «50% фильтр-кек угля марки Д, 50% вода».

Наибольшая эффективность (0.461) при приоритете эффективности дробления капель – состав «50% фильтр-кек Д, 50% вода».

Наибольшая эффективность (0.610) при приоритете экологических характеристик зажигания и горения – состав «50% фильтр-кек угля марки Г, 50% вода».

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В результате выполнения первого этапа исследований получены запланированные результаты и достигнуты требуемые индикаторы. В частности, установлены характеристики распыления (количество, размеры, скорости и траектории движения, компонентный состав капель, их кинетическая энергия, размеры факела и др.) перспективных топливных композиций из кеков, шламов, углей, отработанных масел, биомассы и других компонентов; экспериментально определены значения вязкости, показатели расслаиваемости, фрагментации (количество, размеры, скорости движения, кинетическая энергия, компонентный состав капель, площади поверхности, объем облака вторичных фрагментов и др.); характеристики зажигания (предельная температура, времена задержки, предельные давления и др.) и горения (скорости горения, максимальные температуры, газовые антропогенные выбросы, зольные отложения и др.). Подготовленные 4 статьи по результатам исследований направлены в международные журналы первого квартала, индексируемые базами данных Web of Science и Scopus. Две статьи прошли рецензирование, одна из них принята к опубликованию, вторая находится у редакторов, ожидается решение. К отчету приложена соответствующая информация от редакторов и полные версии 4 статей. Доля молодых исследователей в коллективе исполнителей составила 90.1 %.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Loureiro L.M.E.F., Gil P.B.F., Vieira de Campos F.V., Nunes L.J.R., Ferreira J.M.F. Dispersion and flow properties of charcoal oil slurries (ChOS) as potential renewable industrial liquid fuels // *Energy Inst.* – 2018. V. 91. – P. 978–83. <https://doi.org/10.1016/j.joei.2017.08.001>.
2. He Q., Xie D., Xu R., Wang T., Hu B. The utilization of sewage sludge by blending with coal water slurry // *Fuel.* – 2015. – V. 159. P. 40–4. <https://doi.org/10.1016/j.fuel.2015.06.071>.
3. 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. – V. 104. – P. 57–66. <https://doi.org/10.1016/j.fuproc.2012.07.006>.
4. Li Y.X., Li B.Q. Study on the ultrasonic irradiation of coal water slurry // *Fuel.* – 2000. – V. 79. – P. 235–41. [https://doi.org/10.1016/S0016-2361\(99\)00157-X](https://doi.org/10.1016/S0016-2361(99)00157-X).
5. Allen D., Smith B.L. Axisymmetric Coanda-assisted vectoring // *Experiments in Fluids.* – 2009. – V. 46. – No. 55. <https://doi.org/10.1007/s00348-008-0536-y>
6. Vershinina K.Yu., Kuznetsov G.V., Strizhak P.A. Characteristics of the ignition of organic coal–water fuels for boiler installations // *Solid Fuel Chemistry.* – 2017. – V. 51. – P. 95–100. <https://doi.org/10.3103/S0361521917020112>.
7. Glushkov D.O., Syrodoy S.V., Zhakharevich A.V., Strizhak P.A. Ignition of promising coal-water slurry containing petrochemicals: Analysis of key aspects // *Fuel Process. Technol.* – 2016. – V. 148. – P. 224–235. <https://doi.org/10.1016/j.fuproc.2016.03.008>.
8. Glushkov D.O., Strizhak P.A., Vershinina K.Yu. Minimum temperatures for sustainable ignition of coal water slurry containing petrochemicals // *Appl. Therm. Eng.* – 2016. – V. 96. – P. 534–546. <https://doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2015.11.125>.
9. Glushkov D.O., Strizhak P.A., Chernetskii M.Y. Organic coal-water fuel: Problems and advances (Review) // *Therm. Eng.* – 2016. – V. 63. – P. 707–717. <https://doi.org/10.1134/S0040601516100037>.
10. Пащенко Д.И. CFD-моделирование рабочих процессов солнечного подогревателя воздуха в Ansys Fluent // *ИФЖ.* – 2019. – Т. 92. №. 1.– С. 77–83.
11. Валиуллин Т.Р., Вершинина К.Ю., Медведев В.В., Озерова И.П. Зажигание витающих капель органоводоугольных топлив // *ИФЖ.* – 2019. – Т. 92. – № 1. – С. 236–248.

12. Kuznetsov G.V., Strizhak P.A. Heat and mass transfer at ignition of liquid fuel droplets spreading over the surface of massive hot bodies // *J. Eng. Thermophys.* – 2010 – V. 19. – P. 75-84. <https://doi.org/10.1134/S1810232810020037>.
13. Kuznetsov G.V., Kuybin P.A., Strizhak P.A. Estimation of the numerical values of the evaporation constants of water droplets moving in a high-temperature gas flow // *High Temp.* – 2015. – V. 53. – P. 254-258. <https://doi.org/10.1134/S0018151X15020133>.
14. Kumar A., Sah B., Singh A.R., Deng Y., He X., Kumar P. A review of multi criteria decision making (MCDM) towards sustainable renewable energy development // *Renew Sustain Energy Rev.* – 2017. – V. 69. – P. 596–609. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2016.11.191>.
15. Wimpler C., Hejazi G., Fernandes E. de O., Moreira C., Connors S. Multi-Criteria Decision Support Methods for Renewable Energy Systems on Islands // *J Clean Energy Technol.* – 2015. – V. 3. – P. 185–95. <https://doi.org/10.7763/jocet.2015.v3.193>.

ПРИЛОЖЕНИЕ А

Перечень статей, подготовленных по результатам выполнения первого этапа НИР и направленных в редакции международных журналов первого квартала, индексируемых Web of Science и Scopus.

№ п/п	Авторы, название, научное издание	Статус
1	<i>Авторы:</i> Antonov D.V., Vershinina K.Yu., Kuznetsov G.V., Strizhak P.A. <i>Название:</i> Mathematical modeling of the ignition of a drop of organic coal fuel <i>Журнал:</i> Journal of Engineering Physics and Thermophysics	Направлена в редакцию 12.10.2020. Принята к публикации по результатам рецензий 15.11.2020 (скан-копия письма из редакции прилагается)
2	<i>Авторы:</i> Vershinina, K.Yu., Shevyrev, S.A., Strizhak, P.A. <i>Название:</i> Promising components of coal-water slurries containing petrochemicals <i>Журнал:</i> Energy	Направлена в редакцию 03.10.2020. В редакцию направлен ответ 17.11.2020 на первый этап рецензий (подтверждение прилагается)
3	<i>Авторы:</i> Antonov D.V., Kuznetsov G.V., Fedorenko R.M., Strizhak P.A. <i>Название:</i> Micro-explosion of a two-component droplet: how the initial temperature of the water core affects the breakup conditions and outcomes <i>Журнал:</i> Powder Technology	Направлена в редакцию 01.10.2020. Редакцией присвоен номер POWTEC-S-20-03692
4	<i>Авторы:</i> Vershinina K.Yu., Nyashina G.S., Strizhak P.A. <i>Название:</i> Lab-scale combustion of high-moisture fuels from peat, coal waste and milled lignite <i>Журнал:</i> Waste and Biomass Valorization	Направлена в редакцию 06.10.2020. Редакцией присвоен номер WAVE-D-20-01139

A.V. Luikov Institute of Heat and Mass Transfer of the National Academy of Sciences of Belarus
Journal of Engineering Physics and Thermophysics (Inzhenerno-Fizicheskii Zhurnal, in Russian)

15, P.Brovka Street, Minsk, 220072, Belarus
Call: +375 (17) 284-21-31, +375 (17) 284-23-31,
Fax: +375 (17) 292-25-13
iepter@itmo.by

No 22-2020

November, 15, 2020

Dear Authors,

We inform you that the article "Mathematical modeling of ignition of a droplet of organic coal-water fuel" (by D.V. Antonov, K.Yu. Verшинina, G.V. Kuznetsov, and P.A. Strizhak) has been accepted for publication in the Journal of Engineering Physics.

Chief

Editor

L.N. Shemet



Energy

Coal and petroleum-derived components for high-moisture fuel slurries --Manuscript Draft--

Manuscript Number:	EGY-D-20-08258R1
Article Type:	Full length article
Keywords:	fuel slurry; industrial waste; coal slime; ignition; combustion
Corresponding Author:	Pavel Strizhak, Professor Tomsk Polytechnic University: Nacional'nyj issledovatel'skij Tomskij politehniceskij universitet Tomsk, RUSSIAN FEDERATION
First Author:	Ksenia Vershinina, PhD
Order of Authors:	Ksenia Vershinina, PhD Sergey Shevyrev, PhD Pavel Strizhak, Professor
Abstract:	Slurry fuels based on coal and waste oil can be a viable alternative to coal in terms of environmental, cost, and energy performance. This paper presents a database of promising components for such fuels based on the experimental characteristics of their ignition and combustion. When analyzing the properties of high-potential components, we classified those components into four groups in terms of normalized ash and sulfur content. The components within each group have comparable ignition characteristics: ignition delay, duration of complete combustion, maximum combustion temperature, and minimum ignition temperature. Using the newly created database and results of experiments on highly heterogeneous fuels, one can predict the conditions and special aspects of their combustion in power plants of various capacities. The key outcome of the research is the procedural database and algorithm for selecting combustible components of slurry fuels with high relative efficiency for the heat and electricity generation in typical coal-fired power stations and boiler plants.

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.	Гайдукова (Яшутина) Ольга Сергеевна	1993	инженер-исследователь		да
11.	Антонов Дмитрий Владимирович	1996	инженер-исследователь		да

Общая численность участников проекта – 11 чел.

Доля аспирантов и молодых ученых (до 39 лет) в общей численности участников проекта из ТПУ составляет 90.1%, что соответствует целевому значению показателя результатов выполнения СЧ НИР.