

На правах рукописи



Романов Даниил Сергеевич

**ВЛИЯНИЕ ДОБАВОК НА СЕДИМЕНТАЦИОННУЮ УСТОЙЧИВОСТЬ И
ХАРАКТЕРИСТИКИ ТЕРМИЧЕСКОЙ КОНВЕРСИИ
КОМПОЗИЦИОННЫХ ЖИДКИХ ТОПЛИВ ИЗ ОТХОДОВ УГОЛЬНОЙ И
НЕФТЯНОЙ ПРОМЫШЛЕННОСТИ**

Автореферат
диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

1.3.14. Теплофизика и теоретическая теплотехника

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

Научный руководитель: **Стрижак Павел Александрович**, член-корреспондент РАН, доктор физико-математических наук, профессор

Официальные оппоненты: **Тугов Андрей Николаевич**, доктор технических наук, старший научный сотрудник, Акционерное общество «Всероссийский дважды ордена Трудового Красного Знамени теплотехнический научно-исследовательский институт», заведующий отделением парогенераторов и топочных устройств, г. Москва.

Марьяндышев Павел Андреевич, доктор технических наук, доцент, Федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования «Северный (Арктический) федеральный университет им. М.В. Ломоносова», профессор кафедры теплоэнергетики и теплотехники Высшей школы энергетики нефти и газа, г. Архангельск.

Ведущая организация: Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Федеральный исследовательский центр химической физики им. Н.Н. Семенова, г. Москва.

Защита состоится 6 мая 2026 года в 9 часов 30 минут на заседании диссертационного совета 24.1.123.01, созданного на базе Федерального государственного бюджетного учреждения науки Института теплофизики им. С.С. Кутателадзе Сибирского отделения Российской академии наук (ИТ СО РАН), по адресу: 630090, г. Новосибирск, пр. Академика Лаврентьева, д. 1.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке и на сайте ИТ СО РАН, www.itp.nsc.ru. Отзыв на автореферат, заверенный печатью учреждения, просьба отправлять на имя ученого секретаря диссертационного совета по адресу: 630090, г. Новосибирск, пр. Академика Лаврентьева, д. 1. (email:dissovet@itp.nsc.ru).

Автореферат разослан «__» _____ 2026 г.

Ученый секретарь
диссертационного совета,
д.ф-м.н., профессор РАН



Терехов Владимир
Викторович

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность. Несмотря на активное развитие систем генерации энергии из возобновляемых источников, мировое потребление ископаемых ресурсов для ее выработки составляет более 80%. Важной проблемой, связанной с использованием ископаемых топлив, является их исчерпаемость. Добыча, хранение, транспорт и энергетическое использование ископаемых топлив наносят серьезный урон окружающей среде. Одним из возможных решений обозначенных проблем служит вовлечение промышленных и коммунальных отходов, биомассы и других горючих компонентов в энергетический сектор путем создания композиционных жидких топлив. Благодаря смешению различных групп отходов можно добиться нивелирования отрицательных эффектов и улучшения положительных свойств каждой из рассматриваемых групп отходов, как энергетического сырья. Наиболее перспективными для энергетики являются композиционные жидкие топлива (КЖТ), в частности, водоугольные (ВУТ) и органоводоугольные (ОВУТ). По сравнению с углем и мазутом композиции ОВУТ отличаются повышенными экологическими и экономическими характеристиками, а использование высокорекреационных добавок позволяет им конкурировать с традиционными топливами. Для обеспечения стабильных и повышенных значений интегральных характеристик конверсии композиционных топлив активно применяются добавки. Наиболее перспективным решением является использование в качестве таких добавок углеродного сырья и растительных компонентов.

Степень разработанности темы исследования. В области термической конверсии низкосортных топлив и отходов углеобогащения и нефтепереработки, деревоперерабатывающей и сельскохозяйственной отраслей промышленности, коммунальных отходов наиболее значимые результаты получены коллективами под руководством известных специалистов: Алексеенко С.В., Аньшаков А.С., Баранова М.П., Богомоллов А.Р., Божеева Д.М., Бурдуков А.П., Ведрученко В.Р., Вершинина К.Ю., Глушков Д.О., Горлов Е.Г., Гурьянов А.И., Дектерев А.А., Делягин Г.Н., Дзюба Д.А., Дулин В.М., Жижаяев А.М., Жуйков А.В., Зайченко А.Ю., Заостровский А.Н., Киверин А.Д., Кузнецов Б.Н., Кузнецов Г.В., Кулагин В.А., Ларионов К.Б., Любов В.К., Мазной А.С., Мальцев Л.И., Маркович Д.М., Марьяндышев П.А., Мессерле В.Е., Минаков А.В., Мостовщиков А.В. Мурко В.И., Няшина Г.С., Овчинников Ю.В., Патраков Ю.Ф., Пузырев Е.М., Рыжков А.Ф., Салганский Е.А., Саломатов В.В., Свищев Д.А., Слюсарский К.В., Стрижак П.А., Сыродой С.В., Табакаев Р.Б., Терехов В.В., Тугов А.Н., Устименко А.Б., Федорова Н.И., Федяев В.И., Федяева О.Н., Фролов С.М., Ходаков Г.С., Чернецкий М.Ю., Шарыпов О.В., Шмаков А.Г., Штым К.А., Янковский С.А., Яновский Л.С., Яковлев В.А., Donghai X., Han D., Jelita R., Meng Z., Vassilev S.V., Wang X., Zhou H. и др. Неизученными в полной мере остаются процессы термической конверсии КЖТ на основе различных групп отходов. Учитывая широкую номенклатуру сырья, потенциально пригодного для создания КЖТ, а также влияние каждой конкретной добавки на итоговые характеристики смесового топлива, целесообразным представляется комплексное исследование энергетических, экологических и технико-экономических характеристик смесовых топлив, а также их

седиментационной устойчивости с использованием методик мультикритериального анализа.

Цель диссертационной работы – определение влияния добавок на седиментационную устойчивость композиционных жидких топлив и теплофизические характеристики процессов их полного жизненного цикла по результатам экспериментальных и теоретических исследований и испытаний на разноразмерных установках с приближением к топочной среде котельных агрегатов.

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

1. Определение основных физико-химических свойств композиционных жидких топлив и их компонентов при варьировании температуры в условиях, приближенных к эксплуатации в топливно-энергетическом комплексе.
2. Разработка методики экспериментальных исследований седиментационной устойчивости и текучести топливных смесей при пониженных температурах и процессов их хранения и перевозки с применением разных видов транспорта.
3. Разработка методики экспериментальных исследований характеристик горения капель композиционных жидких топлив при интенсивном нагреве в условиях, приближенных к топкам котельных агрегатов, с использованием высокоскоростной видеорегистрирующей аппаратуры, бесконтактных оптических методов и газоаналитических систем.
4. Определение зависимостей интегральных характеристик горения капель композиционных топлив на всех этапах от группы основных параметров системы: температура, концентрации компонентов, условия конверсии объектов исследований, размеры многокомпонентных капель и др.
5. Проведение мультикритериальных оценок влияния жидких добавок на свойства и характеристики горения композиционных топлив при варьировании энергетических, экологических, экономических и эксплуатационных параметров.
6. Техничко-экономический анализ целесообразности перевода энергетических установок с традиционных топлив на смесевые из типичных отходов угольной и нефтяной промышленности с добавками биоконпонентов, промышленных масел и технических жидкостей.
7. Разработка рекомендаций по использованию результатов выполненных научных исследований для развития технологий термической конверсии композиционных жидких топлив в камерах сгорания энергоустановок.

Научная новизна работы. По результатам экспериментов, стендовых испытаний и теоретических исследований установлены основные характеристики процессов приготовления, хранения, транспортировки и горения композиционных топлив на основе отходов угольной и нефтяной промышленности в условиях изменения компонентного состава и внешних факторов. Определен компонентный состав смесевых топлив, рекомендуемых к использованию в условиях пониженных температур внешней среды. Получены прогностические выражения на основе установленных функциональных связей для расчета необходимых параметров хранения и транспортировки композиционных жидких топлив в условиях пониженных температур внешней среды. Установлены рациональные условия транспортировки композиционных топлив автомобильным, железнодорожным и водным транспортом с и без принудительного перемешивания. Определены

условия интенсификации термической конверсии смесевых топлив на основе отходов углеобогащения и нефтедобычи за счет добавок дизельного топлива, лигносульфоната натрия, отработанных промышленных масел и др. Установлены рациональные комбинации топлив нефтяного происхождения с добавками для повышения полноты их выгорания и минимизации антропогенных выбросов при использовании в топках котельных агрегатов. Обоснованы соотношения концентраций компонентов топливных смесей, обеспечивающие максимальные синергетические эффекты их взаимного влияния для совместного использования в топках котельных агрегатов и двигателях внутреннего сгорания.

Практическая значимость работы. Предложены и апробированы методики обеспечения повышенной седиментационной устойчивости композиционных жидких топлив для температурного диапазона $-5-25^{\circ}\text{C}$, типичного для добывающих регионов, в течение длительных периодов эксплуатации. Предложены методики транспортировки композиционного жидкого топлива посредством трубопроводных, автомобильных, железнодорожных и водных систем в температурном диапазоне $-5-25^{\circ}\text{C}$ с обеспечением нормативных требований по седиментационной устойчивости. Определены рациональные тепловые условия термической конверсии отходов нефтяной и угольной отраслей промышленности на удаленных от централизованных систем энергоснабжения объектах с контролем характеристик процессов хранения, транспорта, распыления и горения и обеспечением пониженных эмиссионных параметров. Получены мультикритериальные оценки эффективности термической конверсии композиционных топлив на полном жизненном цикле их эксплуатации по результатам тестирования на разноразмерных экспериментальных стендах и испытательных установках. Подготовлены заявки на РИДы с испытательными стендами для исследования процессов транспортировки композиционных жидких топлив в условиях пониженных температур (ниже 0°C). Создана инфраструктура для исследования эффективности композиционных жидких топлив по их полному жизненному циклу. Результаты диссертационной работы используются промышленными партнерами (ООО «Алавеста Групп», АО «Монитек», АО «Станция Экибазтузская ГРЭС-2») при решении задач расширения топливной номенклатуры за счет вовлечения вторичных ресурсов, а также в образовательном процессе при подготовке бакалавров, магистрантов, аспирантов и докторантов в Национальном исследовательском Томском политехническом университете.

Положения и основные результаты, выносимые на защиту:

1. Транспортировка композиционных жидких топлив по трубопроводу в температурном диапазоне $-5-25^{\circ}\text{C}$ реализуема при $Re > 1$. Использование ПАВ, полимеров и жидких добавок в составе КЖТ позволяет обеспечить повышение седиментационной устойчивости на 50–80% и снижение вязкости на 30%. Определены рациональные и предельные условия транспортировки КЖТ автомобильным, железнодорожным и водным транспортом с и без принудительного перемешивания.

2. Предельная доля добавки (лигносульфонат натрия, соевый лецитин, отработанные промышленные масла, рапсовое и талловое масла, дизельное топливо и др.) не более 5% масс позволяет увеличить продолжительность сохранения стабильного состава топливных композиций на основе отходов

угольной и нефтяной отраслей промышленности на 50–70% и снизить инерционность их зажигания на 10–15%.

3. Применение технических жидкостей (метиловый спирт, техническая вода и др.) в качестве добавок к композиционным топливам на основе отходов нефтедобычи позволяет снизить инерционность зажигания на 20–40% и увеличить полноту их выгорания более чем на 40%.

4. Частичное (до 15%) замещение нефтяного компонента на добавку растительного происхождения в составе смесового топлива позволяет улучшить процессы его термической конверсии в топках котельных агрегатов и двигателях (уменьшение расхода топлива на 10–15%, увеличение полноты выгорания на 15–20%, снижение концентраций антропогенных выбросов на 30–50%).

5. Выполненный технико-экономический анализ позволил обосновать целесообразность перевода котельных агрегатов с нефтяных жидких топлив (мазут) на смесовые из типичных отходов угольной и нефтяной промышленности с добавками биоконпонентов (растительные масла и эфиры) и технических жидкостей (метиловый спирт, техническая вода, отработанные масла и др.).

Достоверность результатов подтверждается оценкой систематических и случайных погрешностей измерений, удовлетворительной повторяемостью результатов экспериментов при идентичных начальных параметрах системы, а также использованием современного высокоточного оборудования. Сформулированные по результатам проведения экспериментальных и численных исследований выводы и заключения согласуются с известными теоретическими и экспериментальными представлениями специалистов в области композиционных жидких топлив.

Связь работы с научными программами и грантами. Диссертационные исследования выполнены при поддержке Российского научного фонда, проект № 18-73-00013 «Определение эффективных условий зажигания и сжигания композиционных топлив на основе промышленных отходов для улучшения энергетических и экологических индикаторов работы энергетических объектов», Министерства науки и высшего образования Российской Федерации, соглашение № И-23-075-67362-1-0409 «Фундаментальные исследования процессов горения и детонации применительно к развитию основ энерготехнологий», соглашение № И-23-075-67362-1-0409 «Фундаментальные исследования процессов горения и детонации в перспективных технологиях энергетики и двигателестроения».

Личный вклад автора состоит в разработке методик экспериментальных исследований характеристик хранения, транспорта и термической конверсии композиционных жидких топлив; проектировании и создании стендов; постановке и планировании экспериментов; проведении серий измерений; обработке полученных данных; оценке неопределённостей измерений; анализе и обобщении результатов исследований; разработке рекомендаций по их практическому применению; взаимодействию с индустриальными партнерами; апробации результатов исследований на научных мероприятиях и при опубликовании статей.

Апробация работы. Основные положения, результаты и выводы диссертационной работы докладывались и обсуждались на научных мероприятиях: Всероссийская научно-техническая конференция «Энергия 2022», г. Иваново, 2022 г.; XI Всероссийская научная конференция «Фундаментальные и прикладные

проблемы современной механики», г. Томск, 2022 г.; Всероссийская конференция с международным участием «Бутаковские чтения», г. Томск, 2022–2025 г.; Международный научный симпозиум имени академика М.А. Усова «проблемы геологии и освоения недр», г. Томск, 2022–2025 г.; Всероссийская конференция «Сибирский теплофизический семинар», г. Новосибирск, 2023–2025 г.; XXII Менделеевский съезд по общей и прикладной химии, Сириус, 2024 г.; XVII Минский международный форум по теплообмену, г. Минск, 2024 г.; 3-я международная конференция «Физика и химия горения и экстремальных процессов», г. Самара, 2024 г.; Всероссийский форум «XIV семинар вузов по теплофизике и энергетике», г. Красноярск, 2025 г.; 13-й Средиземноморский симпозиум по горению, г. Корфу, Греция, 2025 г.

Публикации. Основные результаты диссертации опубликованы в виде 27 печатных работ, в том числе 7 – в отечественных журналах из списка, рекомендованного ВАК РФ, 12 статей в международных журналах (входят в 1 квартиль Web of Science).

Структура и объем работы. Диссертационная работа состоит из введения, четырех глав, заключения, списка принятых сокращений и условных обозначений, списка используемой литературы из 346 наименований. Диссертация изложена на 204 страницах печатного текста, содержит 67 рисунков, 18 таблиц, 1 приложение.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении обоснована актуальность тематики диссертационной работы, выделены нерешенные до настоящего времени задачи в области композиционных жидких топлив, сформулированы цель и задачи исследований, отражены практическая значимость, новизна работы, личный вклад автора.

В первой главе проанализированы современные представления о композиционных жидких топливах, технологиях их хранения, транспортировки, термической конверсии в котельных агрегатах и двигателях внутреннего сгорания. Определены основные достижения в мире, нерешенные задачи в данной области, а также проблемы, ограничивающие использование КЖТ на объектах энергогенерации. Перечислены перспективные добавки. Для комплексного учета влияния различных добавок в каждой главе диссертации представлены пояснения по созданным стендам и авторским экспериментальным методикам, адаптированным под отраслевые условия хранения, транспортировки и горения композиционных жидких топлив с привязкой к отраслям и регионам.

Во второй главе приведены результаты исследований основных закономерностей и характеристик хранения и транспортировки КЖТ. Методики измерения вязкости, статической и динамической стабильности топлив адаптированы с целью изучения характеристик текучести жидкости при пониженных температурах. В § 2.1 установлены оптимальные температурные режимы, в которых композиционные жидкие топлива остаются стабильными на протяжении 7 суток хранения без принудительного перемешивания. Определены классы текучести для исследуемых топливных композиций. Представлено описание разработанных методик проведения исследований, элементов стенда (рисунок 1), оценок погрешностей измерений, результатов исследования

закономерностей транспортировки топлив по трубопроводу, определения вязкости и стабильности топливных смесей.

По результатам обобщения преимуществ и недостатков конструкций опытных установок спроектированы стендовые системы для проведения диссертационных исследований. Для измерения реологических свойств исследуемых топливных смесей использовался ротационный вискозиметр Brookfield DV3T (диапазон измерения $1...6 \cdot 10^6$ мПа·с, точность ± 1 %, воспроизводимость $\pm 0,2$ %). Измерение вязкости осуществлялось при помощи

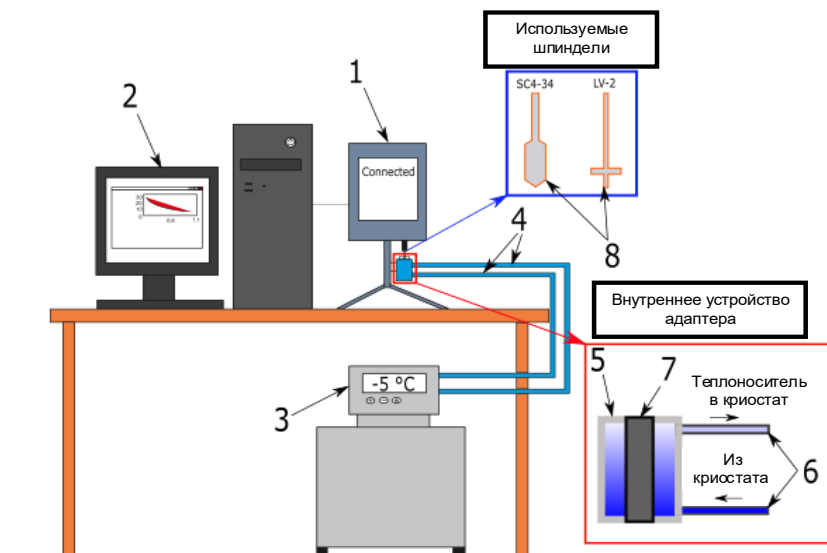


Рисунок 1 – Схема стенда для определения реологических характеристик суспензии: 1 – ротационный вискозиметр; 2 – компьютер; 3 – криостат; 4 – шланги для организации циркуляции теплоносителя; 5 – теплоизолированный цилиндрический кожух; 6 – входной и выходной штуцеры; 7 – камера для топливной суспензии; 8 – шпиндели.

шпинделя LV-2 (диапазон измерения $200-400000$ мПа·с), совместно с теплоизолированным цилиндрическим кожухом (высота 150 мм, с отверстием диаметром 20 мм для размещения пробирки до 50 мл), и шпинделя SC4-34 (диапазон измерений $24...600 \cdot 10^3$ мПа·с, точность ± 1 %, воспроизводимость $\pm 0,2$ %), работающего совместно с SSA адаптером (кожухом со встроенной камерой для образцов объемом до 16 мл). Для измерений в диапазоне скоростей сдвига $0.01-70$ с⁻¹ использовался шпиндель SC4-34, при $70-380$ с⁻¹ – шпиндель LV-3. Для варьирования температуры измеряемых образцов использовался криостат Kiss K6 Huber. Измерение реологических свойств образцов проводилось при тех же температурах, что и определение стабильности, т.е. при -5 °С, 0 °С, 5 °С и 25 °С. Перед непосредственным измерением образцы выдерживались в адаптере SSA или в пробирке, помещенной в теплоизолированный цилиндрический кожух, в течение 10 минут для установления заданной температуры.

На рисунке 2 показаны результаты определения значений 100-WSR (чем выше полученное значение, тем меньше фазовое разделение) для КЖТ при температурах -5 °С и 0 °С после термостатирования в течение 72 часов. При -5 °С для составов № 3, 5, 6, 8 и 9 не зарегистрированы признаки фазового разделения, а их текучесть соответствует классу текучести В, подходящему для промышленного применения. При этой же температуре для составов № 2, 7, 10 зарегистрирована слабая степень фазового разделения, т.е. высокие значения 100-WSR (более 90 %). В случае температуры термостатирования 0 °С в тех же самых составах, а также № 1 и № 2 не зарегистрировано отделение слоя несущей среды. Составы № 7 и № 10 расслаивались незначительно, показатель $100-WSR \geq 90$ %.

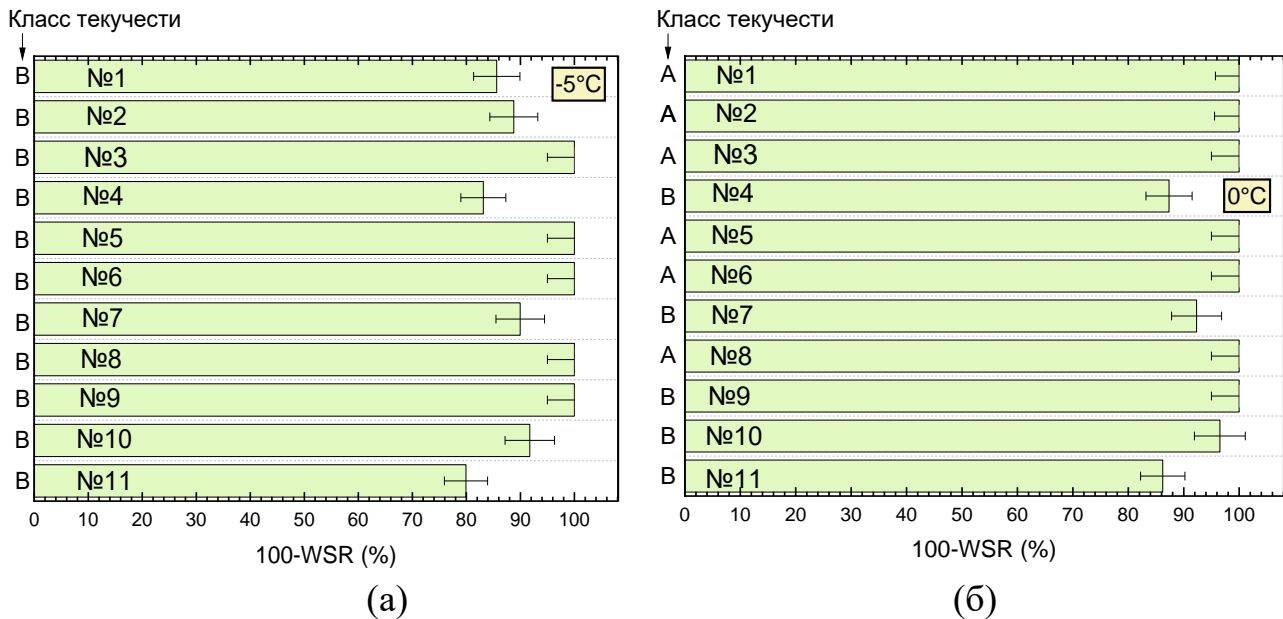


Рисунок 2 – Фазовое разделение КЖТ после 72-часового термостатирования при температурах - 5 °С (а) и 0 °С (б): №1: 50% угольный шлам, 48% вода, 1% лигнитовый полимер, 1% АФ 9-12; №2: 50% угольный шлам, 48% вода, 1% пирофосфат натрия, 1% АФ 9-12; №3: 50% угольный шлам, 48% вода, 1% пирофосфат натрия, 1% ОП7; №4: 50% уголь, 49.4% вода, 0.1% УФР, 0.5% ОП7; №5: 50% уголь, 49.4% вода, 0.1% лигнитовый полимер, 0.5% ОП7; №6: 50% уголь, 49.4% вода, 0.1% пирофосфат натрия, 0.5% ОП7; №7: 50% уголь, 49.9% вода, 0.1% УФР; №8: 50% уголь, 49.2% вода, 0.5% лигнитовый полимер, 0.3% АФ 9-12; №9: 50% уголь, 49.1% вода, 0.6% пирофосфат натрия, 0.3% АФ 9-12; №10: 50% уголь, 48.6% вода, 0.4% УФР, 1% АФ 9-12; №11: 50% уголь, 48.4% вода, 0.6% лигнитовый полимер, 1% ОП7.

В § 2.2 представлены результаты изучения характеристик процесса транспортировки топливных композиций по трубопроводу при варьировании их температуры. Опыт взаимодействия с промышленными партнерами показал, что для них актуальны исследования параметров транспортировки топлива в условиях пониженных температур по трубопроводу малого сечения (миниканалу). На рисунке 3 представлена схема и внешний вид созданного стенда.

Для изучения поведения вязкости потока КЖТ в трубопроводе вычислялись значения чисел Рейнольдса (Re) с применением выражения:

$$Re = \frac{\rho U_{КЖТ} D}{\mu_{КЖТ}(\gamma_{char})} \quad (1)$$

где ρ – плотность КЖТ, кг/м³; $\mu_{КЖТ}(\gamma_{char})$ – эффективная динамическая вязкость КЖТ при γ_{char} .

По результатам исследований установлено, что относительные значения вязкости составов на основе угля довольно стабильно воспроизводятся (R^2 около 0.7) при значительном понижении температуры топлива. Поскольку абсолютные значения динамической вязкости после теплообменника для суспензий на основе угля при $T_T = -5$ °С примерно в два раза ниже, чем в случае составов на основе угольного шлама, то и рост значений относительной динамической вязкости при уменьшении температуры топлива является сравнительным низким.

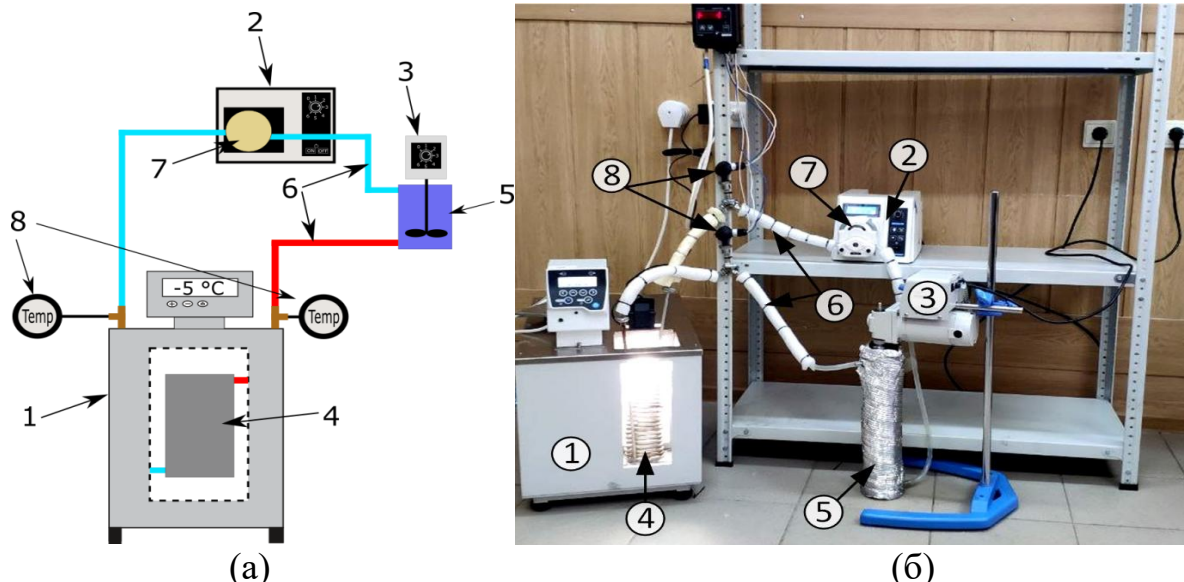


Рисунок 3 – Схема (а) и внешний вид (б) стенда для регистрации характеристик транспортировки суспензий: 1 – низкотемпературный термостат; 2 – перистальтический насос; 3 – верхнеприводная мешалка; 4 – погружной теплообменник; 5 – резервуар (буферный бак) для КЖТ; 6 – тракты движения КЖТ для воспроизведения движения по трубопроводам; 7 – головка перистальтического насоса; 8 – температурные датчики.

Результаты позволяют утверждать об эффективности функционирования выбранной комбинации «регулятор вязкости – ПАВ» даже в случае отрицательных температур топлива. Функциональность добавок к КЖТ при существенном понижении температуры выделена на рисунке 4. Рассмотрены 4 топливные композиции на основе угольного шлама и угля: КЖТ#1: 50% угольный шлам, 48% вода, 1% лигнитовый полимер, 1% неонол АФ 9–12; КЖТ#2: 50% угольный шлам, 48% вода, 1% пирофосфат натрия, 1% ОП7; КЖТ#3: 50% уголь, 48.4% вода, 0.6% лигнитовый полимер, 1% ОП7; КЖТ#4: 50% уголь, 49.1% вода, 0.6% пирофосфат натрия, 0.3% неонол АФ 9–12; Показано, как возрастают значения динамической вязкости КЖТ (при $T_T \approx 25 \text{ }^\circ\text{C}$) в условиях снижения характерной скорости сдвига вследствие уменьшения скорости движения потока в трубопроводе. Масштабное поведение значений $\mu_{\text{КЖТ}}$ как функции от Re удовлетворительно описывается экспоненциальным асимптотическим законом. Таким образом, при $T_T \approx 25 \text{ }^\circ\text{C}$ вязкость КЖТ зависит прежде всего от значений G_H и прогнозируется достаточно точно. Не проявляются признаки влияния природы твердых частиц и действия дисперсантов.

При математической обработке и обобщении результатов экспериментальных исследований получено прогностическое уравнение для зависимости вязкости топлив, протекающих в миканале, от числа Рейнольдса:

$$[\mu_{rel}]_{3,4} = 1.1 + 3.2 \cdot 0.1^{Re} \quad (2)$$

Существенно меняются результаты при понижении температуры топлива даже на $30 \text{ }^\circ\text{C}$ (рисунок 4б). В первую очередь, значения $[\mu_{rel}]_{3,4}$ для КЖТ на основе угля и шлама существенно отличаются, что позволяет заключить о разном проявлении действия дисперсантов при отрицательной температуре. КЖТ#1 и КЖТ#2 на основе шлама показали кратный рост вязкости и местами даже увеличение на порядок. Рассматриваемые составы на основе угольного шлама

можно охарактеризовать как менее целесообразные к транспортировке по трубопроводу в исследуемом диапазоне Re .

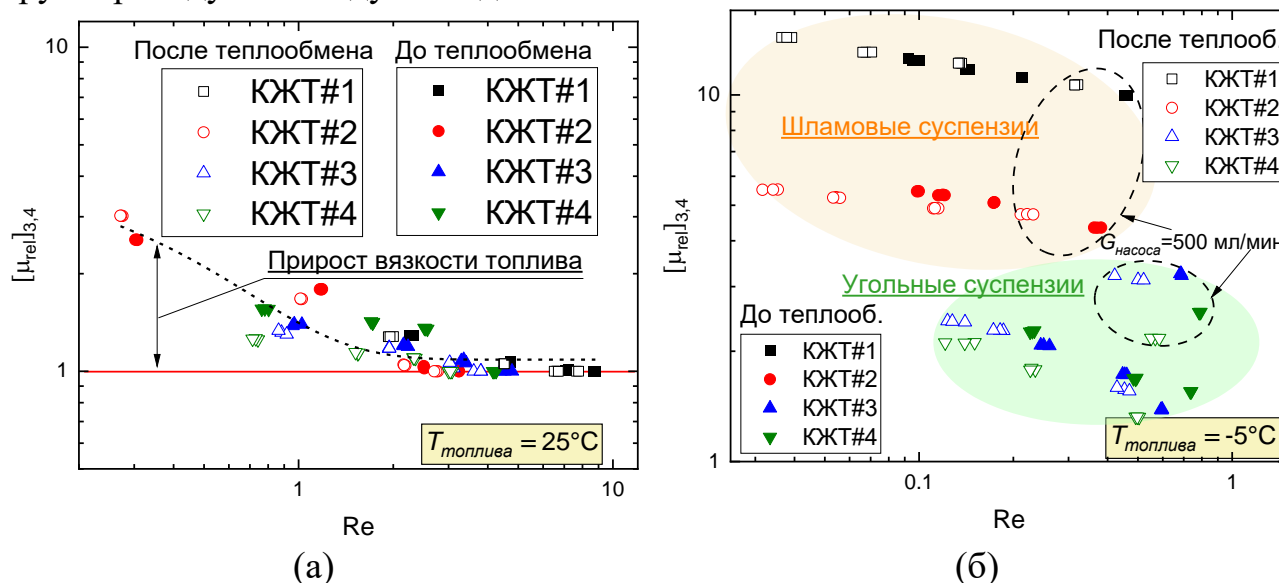


Рисунок 4 – Относительные вязкости до и после теплообменника при температуре топлива около $25^\circ C$ (а) и $-5^\circ C$ (б), рассчитанные через динамическую вязкость образца при $25^\circ C$.

Рассматриваемые составы на основе угольного шлама можно охарактеризовать как менее целесообразные к транспортировке по трубопроводу в исследуемом диапазоне Re . Важный, с практической точки зрения, результат получен для составов на основе угля. Их динамическая вязкость в условиях сильного снижения температуры и скорости движения потока жидкости (вследствие падения расхода жидкости) может оставаться сопоставимой с вязкостью при комнатной температуре. Адаптивное регулирование расхода жидкости на насосе может быть обеспечено, например, за счет использования предложенного выше подхода с определением критического отношения между числами Рейнольдса. Представленные обобщенные результаты по транспортировке КЖТ трубопроводным транспортом в лабораторных условиях позволяют констатировать, что выбор дисперсантов при приготовлении КЖТ следует проводить с адаптивным учетом варьирования температуры топлива. Установление механизма действия различных дисперсантов при понижении температуры является важной задачей. Известные механизмы, как правило, основаны на расчетах энергии взаимодействия с применением классической и общей теории Дерягина, Ландау, Фервея, Овербека (DLVO). Основные движущие силы (электростатического отталкивания, притяжения Ван-дер-Ваальса), определяющие диспергирование суспензий, а вместе с тем и их реологию, учитываются при комнатной температуре. Данное экспериментальное исследование показывает необходимость в измерениях, по крайней мере, дзета-потенциала частиц при адсорбции диспергирующих и смачивающих добавок на их поверхности в условиях пониженных и отрицательных температур топлива, как основного слагаемого при определении общей энергии взаимодействия между частицами в суспензии. В рамках диссертационной работы сформулированы рекомендации по перечню контролируемых параметров при транспорте КЖТ.

В § 2.3 представлены результаты опытов по определению седиментационной устойчивости исследовавшихся композиционных жидких топлив при

воспроизведении условий их транспортировки. Использованы три установки (рисунок 5). Первая включала центрифугу «ПЭ-6900» (максимальная скорость вращения 4000 об/мин). Вторая базировалась на применении шейкера «ЭКРОС-6500» (диапазон частот горизонтальных колебаний платформы 20-200 кол/мин). В качестве третьей использовалась виброплощадка «СМЖ-539» (амплитуда колебаний 0.35–0.5 мм, частота колебаний 10–70 Гц). Применение трех схем позволило приблизить условия протекания основных процессов к перевозке КЖТ различным транспортом: автомобильный, водный, железнодорожный.

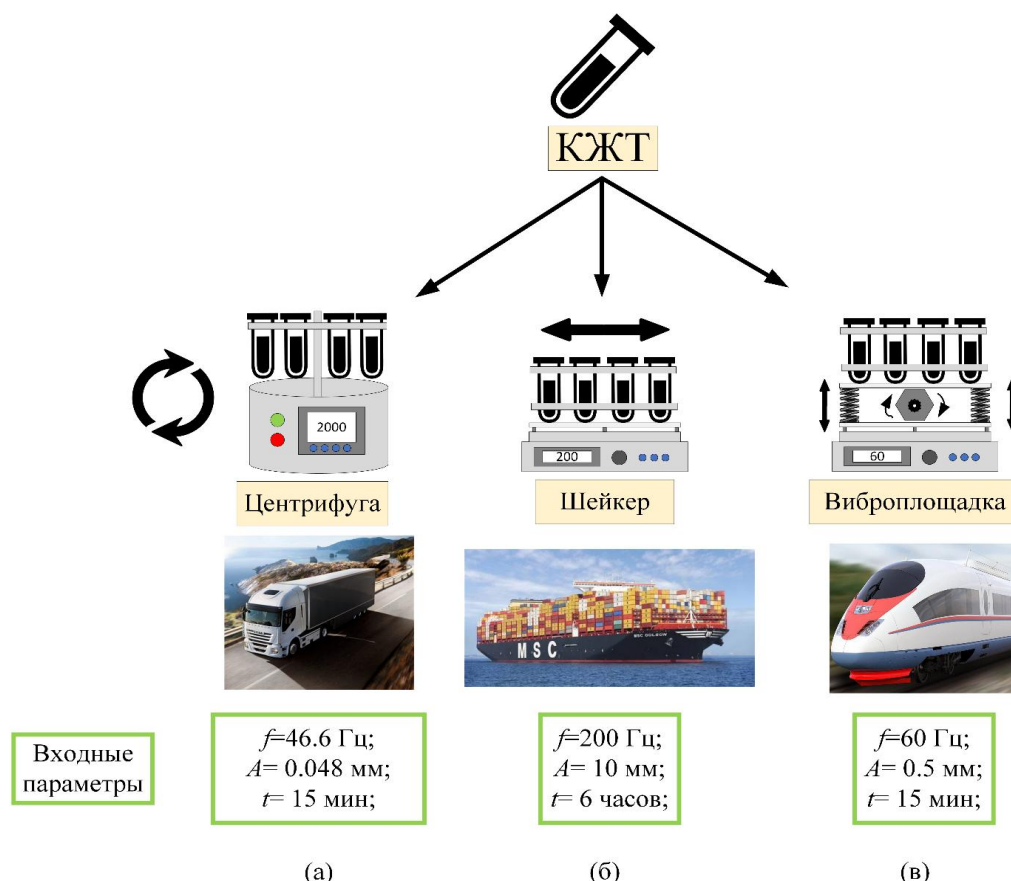


Рисунок 5 – Установки для определения влияния внешних воздействий на седиментацию суспензий: (а) центробежные силы; (б) горизонтальные колебания; (в) вертикальные колебания.

Для суспензий рассчитаны значения модифицированного числа Бонда (Bo), учитывающие передвижение твердых частиц в суспензиях, и вклад диспергирующих агентов под влиянием силы внешнего воздействия (рисунок 6а) и без (рисунок 6б). Эти значения представлены при максимально возможных временах, рассмотренных для каждого из типов внешнего воздействия. В случае без внешней нагрузки седиментационная устойчивость КЖТ оценена в течение 72 часов. При вычислении числа Bo использованы значения коэффициента поверхностного натяжения σ , измеренные после прикладывания внешней нагрузки. Учтены определенные установленные различия в значениях поверхностного натяжения при сравнении со случаем без внешней нагрузки, что в целом согласуется с выводами о десорбции диспергирующих агентов с поверхности твердых частиц при внешнем воздействии. Эти выводы, в свою очередь, соответствуют сформулированному выше предположению о нарушении функции ПАВ в рассматриваемой коллоидной системе при внешнем воздействии.

При обобщении результатов исследования седиментационной устойчивости КЖТ в безразмерном виде и разработке эмпирического подхода к прогнозированию седиментации твердых частиц в водных растворах ПАВ и диспергирующих агентов с учетом фактора внешнего воздействия выполнена модификация критерия подобия – число Бонда (Bo):

$$Bo = \left(\frac{L}{\lambda_c} \right)^2 = \frac{gL^2\Delta\rho}{\sigma}, \quad (3)$$

где λ_c ($\lambda_c = \sqrt{\sigma/\Delta\rho g}$) – капиллярная длина, (мм), $\Delta\rho$ – разница между плотностью суспензии ρ_{slurry} и плотностью воды (997 кг/м^3 при $25 \text{ }^\circ\text{C}$), L – характеристическая длина пути проходимого частицами в процессе седиментации.

Модифицированный критерий подобия в данном исследовании необходим для характеристики процесса движения (седиментации) твердых частиц в объеме водных растворов ПАВ и диспергирующих агентов. Модификация осуществлялась за счет приравнивания характеристической длины (L , м), используемой при расчете Bo , к длине пути, который проходили частицы при внешнем воздействии. Значения L характеризовали перемещение твердых частиц в водных растворах в процессе седиментации.

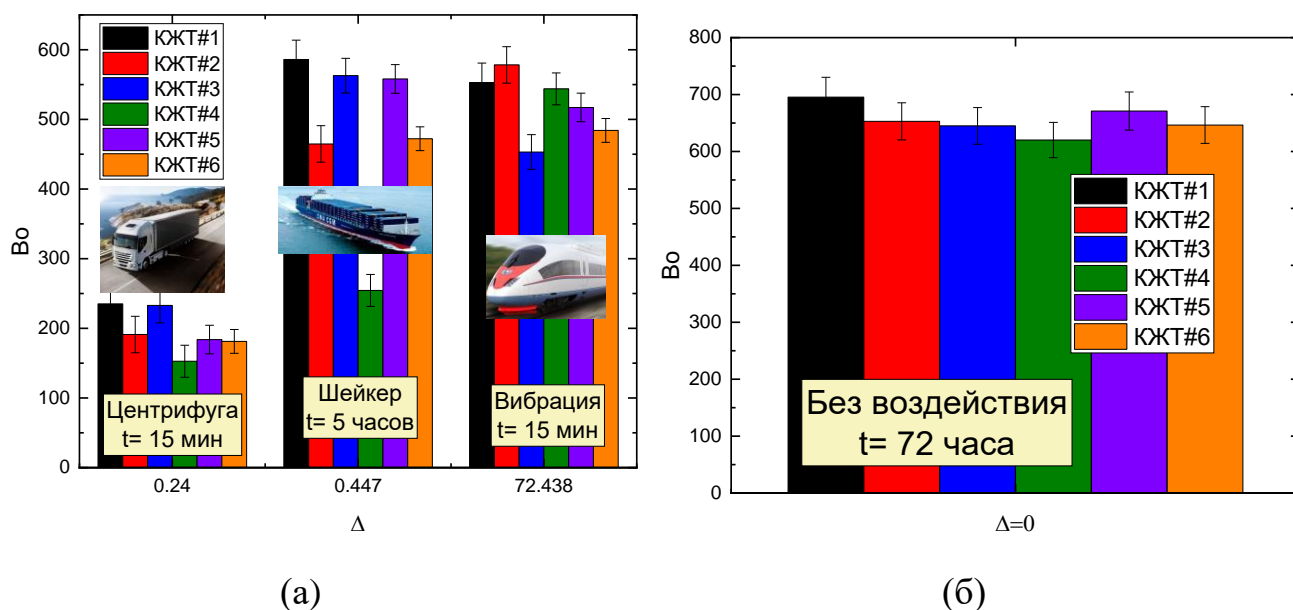


Рисунок 6 – Значения числа Bo при прикладывании максимальной силы внешнего воздействия в зависимости от его типа: (а) центрифуга ($f \approx 2000$ об/мин), шейкер ($f \approx 200$ кол/мин), виброплощадка ($f \approx 60$ Гц); значения числа Bo для образцов, не подвергающихся внешнему воздействию (б).

Результаты исследований показали, что чем выше значения модифицированного числа Bo , тем устойчивее образцы КЖТ к седиментации при соотношении с силой поверхностного натяжения. Значения числа Bo приведены в зависимости от нормированной силы внешнего воздействия, определяющей интенсивность нагрузки. Так, за счет взаимосвязанного учета сил внешнего воздействия и поверхностного натяжения появляется возможность объективно охарактеризовать седиментационную устойчивость КЖТ с учетом процессов,

которые протекают на межфазной границе. При наименее интенсивном воздействии в тестах с центрифугой менее устойчивым является КЖТ#4, а наиболее устойчивым КЖТ#1; числа Bo для составов отличаются примерно в 1.5 раза. Показатель устойчивости КЖТ#3 довольно близок к показателю КЖТ#1. С учетом погрешности определения Bo отличия составляют несколько процентов. Аналогичный результат получен для композиций КЖТ#5 и КЖТ#6.

В третьей главе приведены основные результаты экспериментальных исследований характеристик горения композиционных жидких топлив на основе отходов углеобогащения с жидкими стабилизирующими добавками. Проведена оценка полного жизненного цикла КЖТ, который включает этапы: приготовление, хранение, распыление, термическая конверсия, нейтрализация выбросов. Выполнены мультикритериальные оценки эффективности КЖТ. Для контроля параметров горения применен стенд (рисунок 7). Трубчатая муфельная печь (максимальная температура нагрева до 1100 °С, внутренний диаметр муфельной трубы 30 мм) использовалась в качестве камеры сгорания. Высокоскоростная видеокамера (частота записи не менее 400 fps при разрешении 768×768 пикселей, минимальная межкадровая задержка 198.4 мкс), применялась для регистрации характеристик процессов зажигания и горения. Для определения концентраций антропогенных выбросов использовался газоанализатор. Устройство линейного перемещения применялось для ввода образцов в камеру сгорания.

На рисунке 8 представлены установленные зависимости времени задержки газофазного и гетерогенного зажигания капель топлив от температуры в камере. Данные показатели особенно важны при определении расходов топлива в камеру сгорания и времени нахождения топлива до полного выгорания. В случае неправильной настройки котельного агрегата возникает большая вероятность срыва пламени и затухания котла, что приводит к прекращению процесса генерации



Рисунок 7 – Схема стенда для определения характеристик зажигания и горения композиционных жидких топлив

тепловой энергии. Заметное ускорение (на 15–20%) стадий газофазного и гетерогенного зажигания зарегистрировано при применении в составе суспензии лигносульфоната натрия и отработанного турбинного масла. Последнее наиболее эффективно интенсифицировало горение за счет пониженной температуры воспламенения и повышенной теплотворной способности.

Интенсивное тепловыделение на этапе газофазного горения паров масла и летучих компонентов приводит к росту скоростей всех эндо- и экзотермических реакций, что ускоряет выполнение условий зажигания коксового остатка. Рапсовое масло, лигносульфонат натрия и дизельное топливо в меньшей степени влияли на газофазное и гетерогенное зажигание суспензии на основе угольного шлама.

Суспензия с добавлением соевого лецитина характеризовалась наибольшими значениями времени задержки газофазного и гетерогенного зажигания (рисунок 8). Соевый лецитин не является высокорекреакционным компонентом (в отличие, например, от турбинного масла), поэтому не дает эффекта ускорения зажигания. Лецитин, по природе являясь эмульгирующим агентом, действует как стабилизатор суспензии. За счет этих свойств и невысокой термической реактивности лецитин может замедлять испарение воды на начальной стадии нагрева топлива (рисунок 8а). Все исследуемые смеси проявляли близкую чувствительность к изменению температуры в печи – наблюдалось снижение τ_{d1} и τ_{d2} , в среднем, в 1.5–1.6 раз при увеличении температуры от 700 °С до 900 °С.

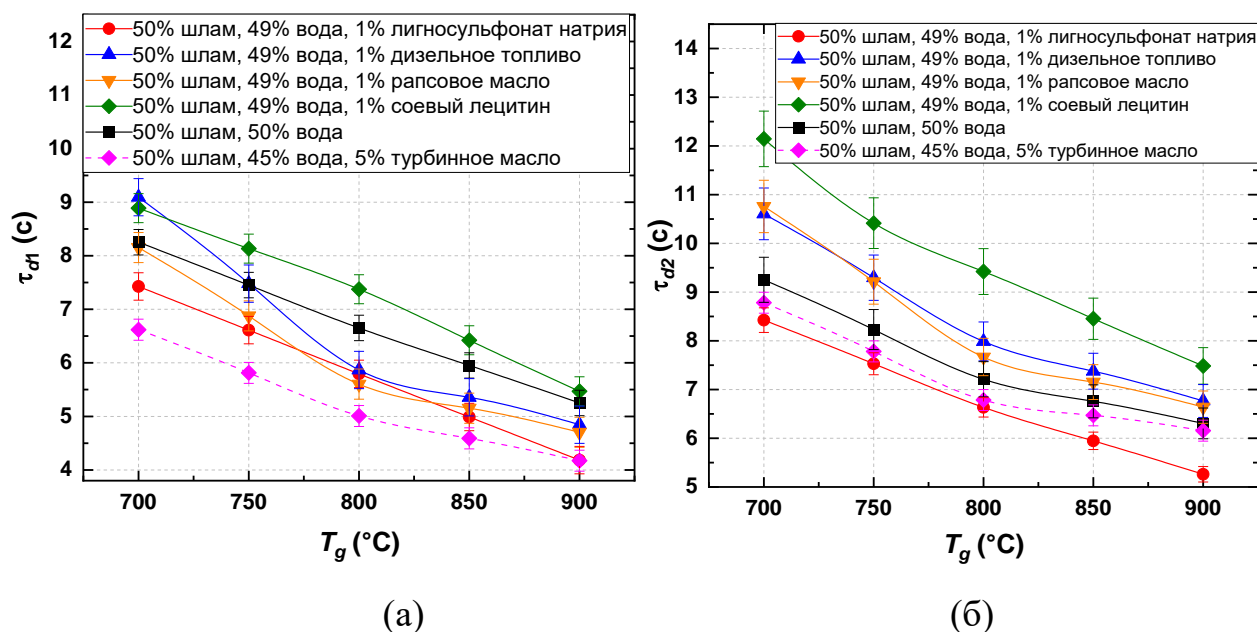


Рисунок 8 – Зависимости времен задержки газофазного (а) и гетерогенного зажигания (б) от температуры в камере сгорания для смесей на основе угольного шлама с добавками

На основе экспериментальных данных вычислены относительные показатели, характеризующие определенные приоритеты использования суспензий на основе угольного шлама. Рассчитаны показатели по категориям: (а) вязкость и стабильность; (б) горение; (в) эмиссия (учтены NO, SO₂, CO и CO₂). Итоговая эффективность топлива оценивалась на основе данных показателей и стоимости. Расчет относительных показателей основан на использовании многокритериальной оценки, а именно метода средневзвешенных сумм.

На рисунке 9 представлена диаграмма со значениями показателей эффективности топливных смесей по каждой группе выбранных критериев, а также итоговый относительный показатель, рассчитанный на основе всех характеристик и себестоимости топлива. Несмотря на вариации отдельных составляющих, итоговый показатель эффективности суспензий был достаточно близким и менялся в ограниченном диапазоне 0.76–0.91.

Показано, что факторы разной природы могут взаимно компенсировать вклад друг друга. Так, например, суспензия на основе угольного шлама без добавок, имея низкий относительный показатель по вязкости и стабильности, имеет достаточно высокий итоговый показатель (0.86) за счет низкой стоимости и меньших антропогенных выбросов. Суспензия с составом «50% угольный шлам, 45% вода,

5% турбинное масло» получила максимальный рейтинг практически по всем составляющим, а также в интегральной оценке ($A_n \approx 0.91$).

Если рассмотреть оставшиеся топлива, то наиболее перспективной по комплексу характеристик ($A_n \approx 0.86$) является смесь с добавлением лигносульфоната натрия. Наименьшая итоговая эффективность ($A_n \approx 0.76$) характерна суспензии с добавлением соевого лецитина.

В четвертой главе приведены основные результаты экспериментальных исследований термической конверсии композиционных топлив на основе

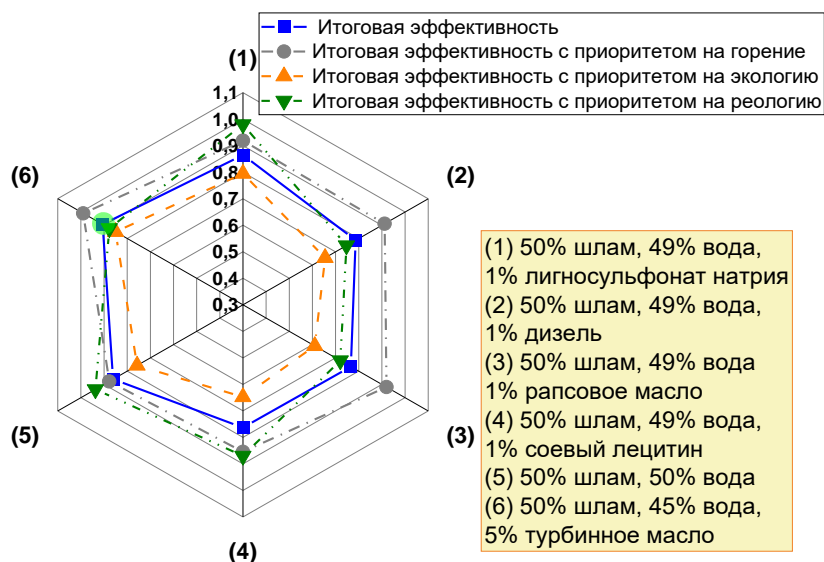


Рисунок 9 – Относительные показатели эффективности суспензий



Рисунок 10 – Внешний вид топливных смесей на основе нефтешлама после статического хранения в течение 7 суток

в течение 7 суток. В настоящем исследовании срок хранения обусловлен средним регламентным временем хранения топлив на объектах энергогенерации (до 7 суток), а также возможностью логистических поставок дополнительных компонентов к удаленным объектам, расположенным в труднодоступных районах вблизи нефтеперерабатывающих заводов и нефтяных месторождений. При хранении формировались три слоя разной плотности (рисунок 10): твердые примеси – наиболее плотный нижний; тяжелые фракции нефти (парафины, нафтены, смолы, асфальтены) – средний; смесь легких углеводородных фракций и воды – верхний.

В экспериментах с нагревом капель регистрировалась стадийность процесса, характерная многим смесевым топливам, а также частицам твердых и каплям жидких топлив. Оба периода могут сопровождаться эффектами фрагментации и

углеводородного топлива и отходов нефтедобычи с добавкой технических жидкостей и компонентов растительного происхождения. В § 4.1 приведены результаты экспериментов по сжиганию композиционных топлив на основе нефтешлама с добавками технических жидкостей и метиловых эфиров жирных кислот растительных масел. Нефтешлам является многокомпонентным отходом, включающим не только разные фракции нефти, но также примеси воды и твердых частиц, смеси на его основе седиментируют (рисунок 10).

Топливные смеси статически выдерживались в закрытых емкостях при нормальных условиях в

микровзрыва в зависимости от состава топлива и внешних условий. Фрагментация – самопроизвольное разделение исходной капли топлива на более мелкие – частичное или полное. Полное дробление исходной капли считалось микровзрывом. Фрагментация обусловлена многокомпонентностью состава топлива, и, как следствие, разницей в летучести, плотности, температурах кипения компонентов, возникновением центров нуклеации, инициирующих в совокупности локальные вскипания компонентов, рост внутреннего давления и последующую фрагментацию капли. В настоящем исследовании для капли нефтешлама без добавок выделены характерные температурные границы отдельных режимов

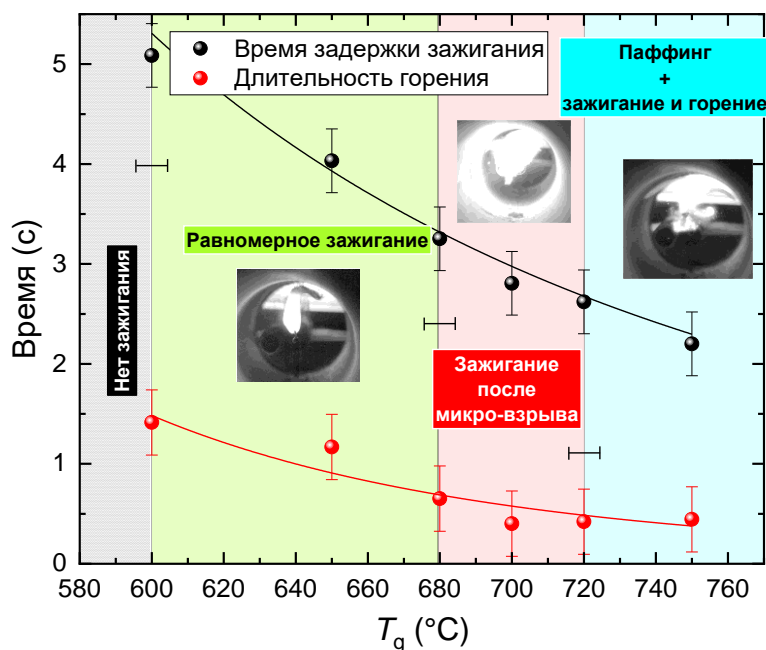


Рисунок 11 – Зависимости времени задержки зажигания и длительности горения капель КЖТ на основе нефтешлама от температуры в камере сгорания

(рисунок 11).

В частности, общей границей выполнения условий зажигания каплей топлив на основе нефтешлама (как с добавками, так и без) являлась температура около 600 °С. При пониженной температуре зажигание каплей не реализовывалось в условиях эксперимента. Равномерное зажигание и выгорание

реализовывалось в диапазоне температур 600–680 °С. Зажигание капли с микро-взрывной

фрагментацией и выгоранием регистрировалось при температуре в камере 680–720 °С.

При температурах в камере сгорания выше 720 °С процессы вскипания реализовывались интенсивно. В этом диапазоне еще до зажигания регистрировались эффекты фрагментации капли. Микрокапли заполняли объем камеры сгорания и интенсивно испарялись. Затем реализовывалось зажигание паров и выгорание топлива, сопровождающееся взрывами микрокапель.

На рисунке 12 представлены диаграммы для времени задержки зажигания каплей топлив на основе нефтешлама с разными добавками при минимальной температуре окислительной среды в камере сгорания. В таких условиях достаточно наглядно выражено влияние эффекта добавления компонентов на длительность эндотермической стадии при нагреве капли нефтешлама. В частности, смеси с дизельным топливом и метанолом характеризуются минимальными временами зажигания. В зависимости от доли этих добавок (5–15%), снижение времени задержки зажигания каплей составляло 20–50% относительно нефтешлама без добавок (рисунок 12а). Дополнительное обводнение нефтешлама технической водой свыше 5% приводило к достаточно существенному росту инерционности зажигания капли топлива – до 44%, что обусловлено значительной теплоемкостью

воды и дополнительным потреблением теплоты на ее парообразование. Использование биокомпонентов в сочетании с нефтешламом ухудшило динамику зажигания капли топлива. В частности, при невысокой температуре воздуха (600 °С) времена задержки зажигания капель с метиловыми эфирами жирных кислот различных масел увеличивались на 16–87% (рисунок 12б). Выраженный эффект замедления зажигания зарегистрирован при нагреве капель на основе нефтешлама и метиловых эфиров жирных кислот (МЭЖК) отработанного кулинарного масла. Остальные биокомпоненты оказали сопоставимое влияние на скорости окислительных реакций на этапе зажигания капли топлива. В отличие от спирта и дизельного топлива, метиловые эфиры, полученные из растительных масел, являются более сложными по составу с преобладанием двух–трех метиловых эфиров основных кислот того или иного масла. Их компоненты характеризуются разной летучестью, теплофизическими свойствами и углеводородной структурой, что влияет на длительность эндотермической стадии, а также на количество энергии, потребляемой на деструкцию связей и переход веществ из жидкого в газообразное состояние.

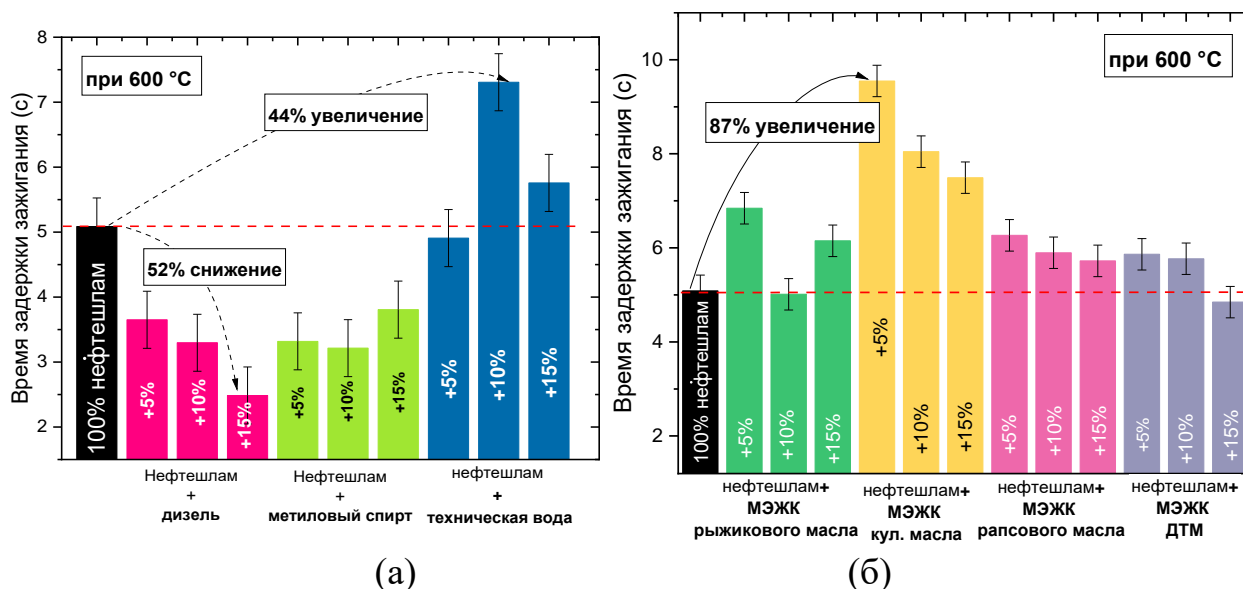


Рисунок 12 – Времена задержки зажигания капель топливных смесей на основе нефтешлама с добавками дизельного топлива, спирта и воды (а) и метиловых эфиров жирных кислот масел (б) при температуре в камере сгорания 600 °С

На рисунке 13 представлены отношения концентраций углекислого и угарного газов в составе продуктов сгорания топлив на основе нефтешлама с разными добавками. Значения CO_2 и CO , принятые для вычисления указанного соотношения, представляли средние концентрации соответствующих газов за весь период горения образцов. Полученные безразмерные значения показывают, насколько полно происходит выгорание топлива.

При увеличении температуры окислительной среды до 650 °С регистрировался положительный эффект от использования добавки дизельного топлива – соотношение CO_2/CO возросло на 15% относительно нефтешлама без добавок. Соотношение CO_2/CO при использовании добавок МЭЖК увеличилось на 12–41% по сравнению со сжиганием нефтешлама. Увеличение температуры с 600 °С до 750 °С привело к росту CO_2/CO на 5–29%. Соответственно, чем выше отношение

CO_2/CO в дымовых газах, тем эффективнее происходит выгорание топлива. Причинами более качественного выгорания образца топлива является увеличение эффективной поверхности реагирования и рост температуры в зоне реакции с достаточным подводом кислорода, т.е. при улучшении смешивания.

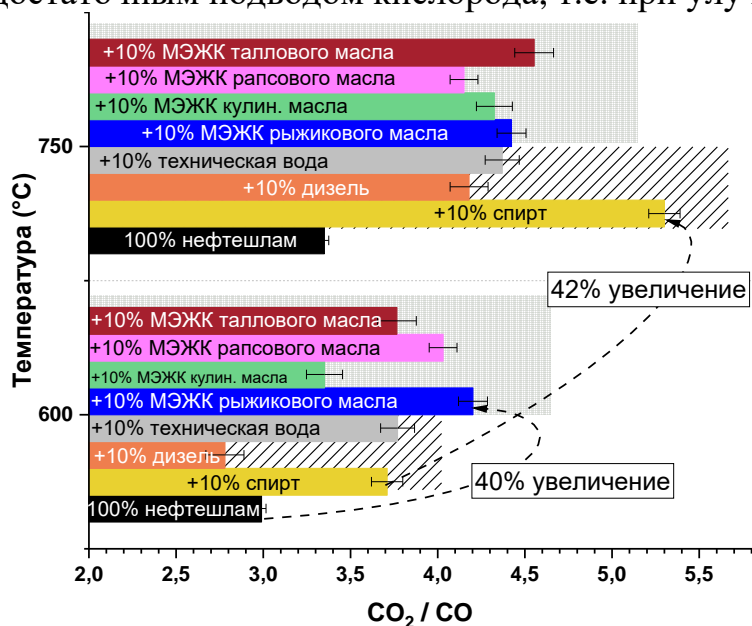


Рисунок 13 – Отношение концентраций оксидов углерода при сжигании смесей на основе нефтешлама при температурах в камере сгорания 600 °C и 750 °C

Результаты, полученные при сжигании капель, а также зарегистрированные выбросы оксидов углерода подтверждают, что добавление нового компонента в нефтешлам способствует этим эффектам. При этом масштаб влияния может варьироваться в широком диапазоне. Даже при относительно невысокой температуре (600 °C) использование добавок способствовало росту CO_2/CO в 1.1–1.4 раз, то есть эти компоненты улучшили процесс полного окисления углерода.

Исключением являлась добавка дизельного топлива. В данном случае соотношение CO_2/CO снижалось на 7% относительно нефтешлама без добавок при температуре 600 °C.

В § 4.2 приведены результаты экспериментов по сжиганию композиционных топлив с добавками МЭЖК и промышленных масел. На рисунке 14 представлены отношения оксидов углерода в составе дымовых газов при сжигании композиционных топлив на основе исследуемых масел и их МЭЖК при температуре окислительной среды 550 °C. Использование топлив с добавлением МЭЖК масел характеризовалось более высокими значениями CO_2/CO в сравнении с дизельным топливом без добавок, а также топливами с добавлением масел. Наилучшими показателями по выгоранию образца характеризовались смеси с добавками МЭЖК дистиллированного таллового масла и рапсового масла. В частности, использование 10% МЭЖК дистиллированного таллового масла обеспечило рост отношения CO_2/CO в 2.6 раз в сравнении с дизельным топливом. Использование добавок МЭЖК рапсового и рыжикового масел приводило к росту отношения CO_2/CO в составе дымовых газов. При увеличении доли МЭЖК рапсового масла от 5% до 15% отношение CO_2/CO увеличивалось на 8%, а при использовании МЭЖК рыжикового масла – на 21%. По сравнению со сжиганием дизеля, использование МЭЖК рапсового масла способствовало росту отношения CO_2/CO до 2 раз, а МЭЖК рыжикового масла – до 1.4 раз.

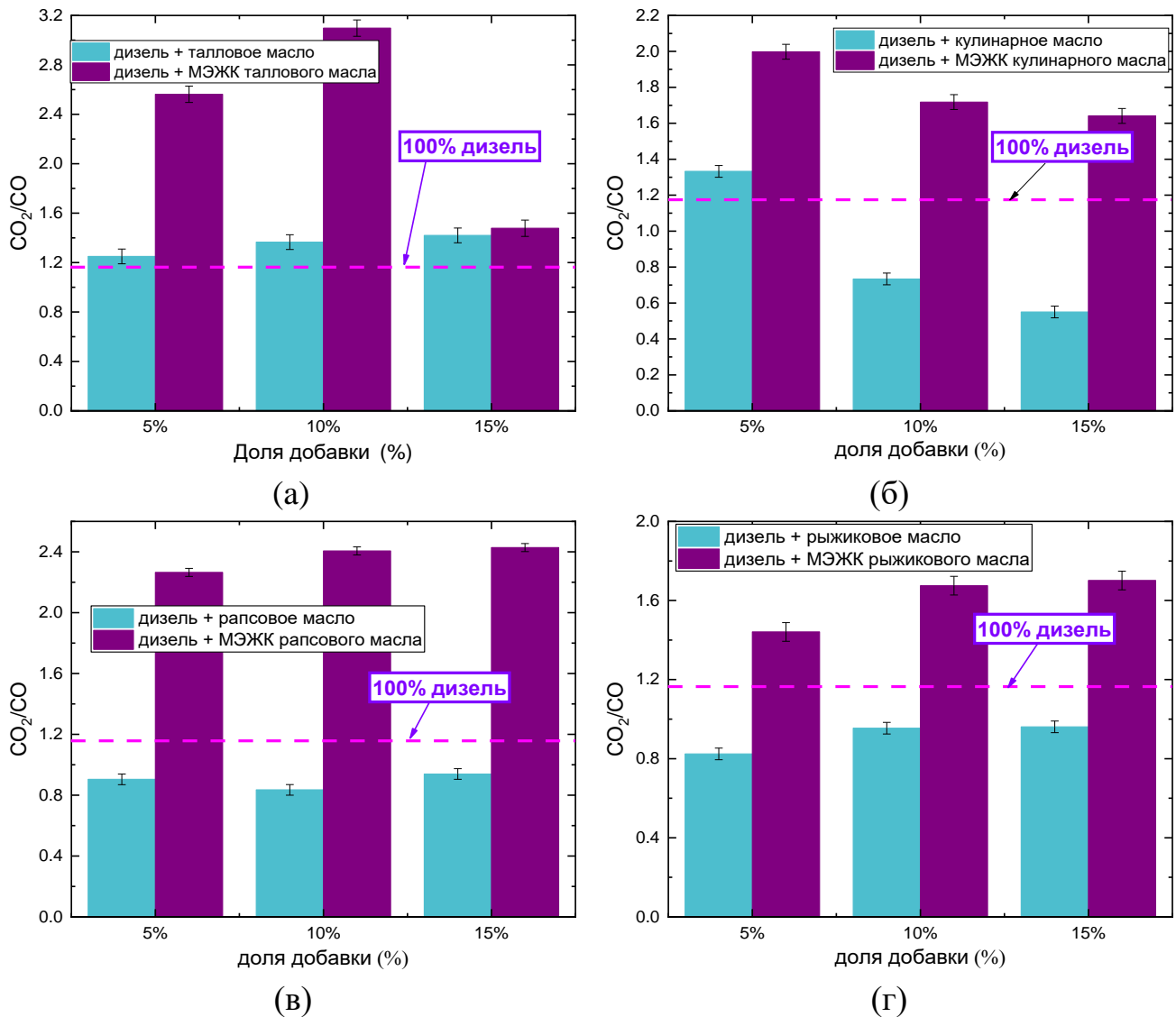


Рисунок 14 – Отношения оксидов углерода в составе дымовых газов при сжигании смесевых топлив в модельной камере сгорания при 550°С при варьировании доли добавки: с дистиллированным талловым маслом и его МЭЖК (а); с отработанным кулинарным маслом и его МЭЖК (б); с рапсовым маслом и его МЭЖК (в); с рыжиковым маслом и его МЭЖК (г)

Оценка эффективности сжигания КЖТ в дизельном двигателе проводилась на стенде, представленном на рисунке 15. Применялся одноцилиндровый дизельный двигатель с воздушным охлаждением (рабочий объем 300 см³; максимальная мощность 7 л.с.; максимальный крутящий момент 13.6 Н·м при 2500 об/мин). Основными элементами стенда являлись двигатель; емкость для приготовления и хранения композиционного топлива с верхнеприводной мешалкой; топливный насос; газоанализатор для определения состава продуктов сгорания; термоэлектрический преобразователь (тип К, диапазон измерений 0–1200 °С) для определения температуры уходящих дымовых газов; компьютер для сбора и обработки данных. Варьируемыми параметрами являлись состав композиционных топлив и режим работы ДВС. Установка использовалась с целью проверки работоспособности двигателя на смесевом топливе, анализа показателей выгорания и оценки возможности масштабирования экспериментов.

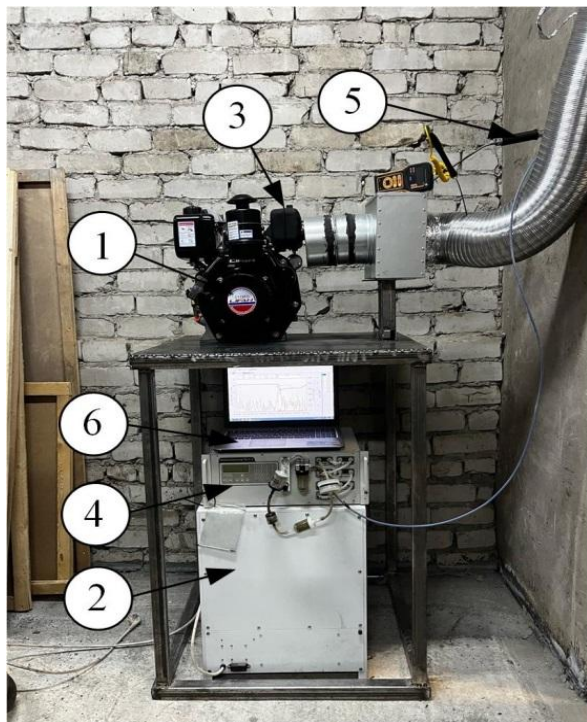
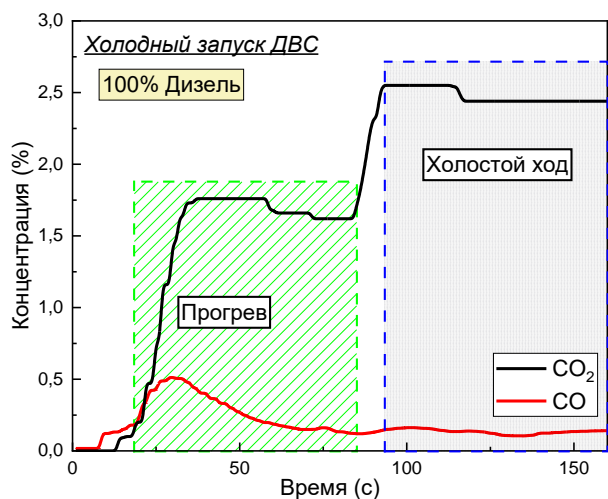


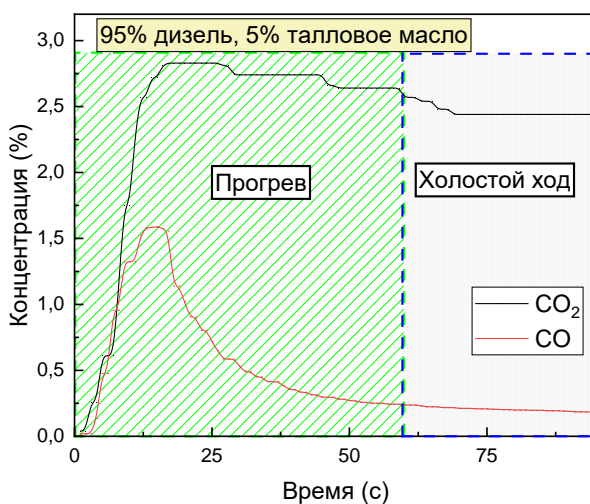
Рисунок 15 – Стенд с дизельной установкой: 1 – двигатель внутреннего сгорания; 2 – емкость для приготовления и хранения топливных смесей; 3 – топливный насос; 4 – газоанализатор; 5 – термоэлектрический преобразователь; 6 – ПК

В режиме холостого хода двигатель поддерживает собственную работу на минимально допустимых оборотах, необходимых для поддержания рабочих процессов и привод вспомогательных механизмов. На рисунке 15а представлены тренды концентраций CO_2 и CO в составе продуктов сгорания в ходе холодного запуска двигателя на дизельном топливе без добавок. Выделено два участка, соответствующих работе двигателя при прогреве и в режиме холостого хода. Режим прогрева характеризовался экстремальными значениями концентрации монооксида углерода (около 0.52%) в составе дымовых газов в интервале времени 25–35 с. Далее содержание CO в составе продуктов сгорания снижалось.

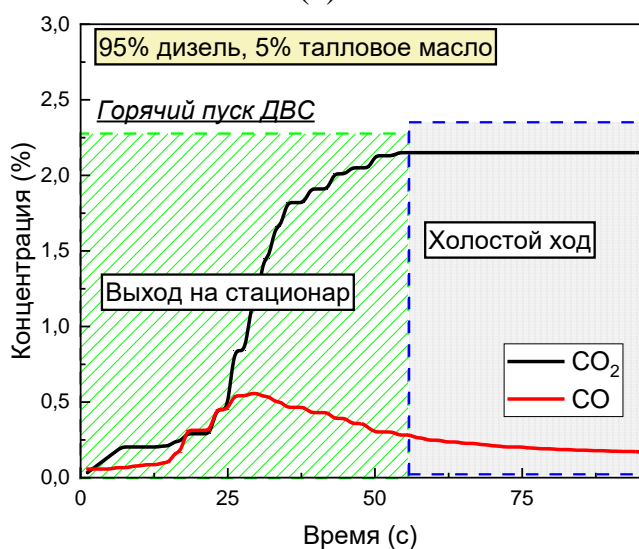
Содержание CO_2 в составе продуктов сгорания варьировалось в диапазоне 1.37–1.76% на этапе прогрева. После того, как достигалась рабочая температура, двигатель начинал работать в режиме стабильного холостого хода. Содержание CO_2 устанавливалось в диапазоне 2.40–2.55%, а содержание CO составляло 0.11–0.14%. Длительность прогрева составила около 1 мин. На рисунке 15б представлены тренды концентраций CO_2 и CO в составе продуктов сгорания в ходе холодного запуска двигателя на смеси «95% дизель, 5% дистиллированное талловое масло». Как и в случае работы на дизельном топливе, длительность прогрева составила около 1 мин. Однако в отличие от работы двигателя на дизельном топливе, режим прогрева характеризовался наибольшим содержанием в составе продуктов сгорания CO_2 (до 2.83%) и CO (до 1.53%), а после установления режима холостого хода выбросы ди- и монооксида углерода снизились до 2.44% и 0.17%, соответственно. На рисунке 15в представлены тренды для случая горячего запуска двигателя на смеси «95% дизель, 5% дистиллированное талловое масло». Двигатель запускался после 2-ух минутной остановки. Время прогрева составило около 50 с. Как и в предыдущем случае, максимальное содержание CO регистрировалось на этапе прогрева (порядка 0.56%), после чего содержание CO в составе продуктов сгорания снижалось до 0.16%. В свою очередь, концентрации CO_2 в ходе эксперимента не превышали 2.15%, достигающиеся в режиме холостого хода. Можно сделать заключение, что при горячем запуске двигателя при использовании смесевое топлива содержание оксидов углерода в составе продуктов сгорания сопоставимо с результатами, полученными при холодном пуске двигателя на дизельном топливе.



(а)



(б)



(в)

Рисунок 16 – Тренды концентраций оксидов углерода в ходе работы двигателя: (а) холодный пуск на дизеле; (б) холодный пуск на смешевом топливе; (в) горячий пуск на смешевом топливе

В пятой главе приведены основные результаты анализа перспектив перевода типичной энергетической установки с традиционных на КЖТ. Выполненный тепловой расчет топки газомазутного котла подтверждает возможность успешной замены проектных видов жидких топлив на топливные суспензии в котлах средней и малой мощности. Полученные результаты позволят использовать материалы диссертации при проектировании и настройке работы блоков и систем котельных агрегатов, адаптированных под КЖТ с разным сырьевым составом. Энергетические характеристики композиционных топлив на основе угольных отходов позволяют поддерживать температуру

продуктов сгорания на уровне, соответствующем традиционным топливам. Расчетная температура продуктов сгорания топливной суспензии «50% угольный шлак, 45% вода, 5% отработанное турбинное масло» на выходе из топки составила 1010 °С. Абсолютное тепловое напряжение топки (200 кВт/м³) находится в рекомендованном для шлакующих видов топлива диапазоне 150–350 кВт/м³.

Предлагаемые технологические решения по использованию КЖТ позволяют не только вовлекать отходы различных отраслей промышленности в энергетический сектор, но и развивать известные технологии топливосжигания. При разработке технологических решений учитывались не только характеристики процессов горения топлив (длительность горения, теплота сгорания, антропогенные выбросы), но и транспортировки топлив к котельным агрегатам от мест приготовления и хранения топлив. На рисунке 16 представлена схема с демонстрацией этапов полного жизненного цикла КЖТ на основе угольного шлама

с добавками отходов и КЖТ на основе дизельного топлива и нефтешлама с добавками биокомпонентов и технических жидкостей.

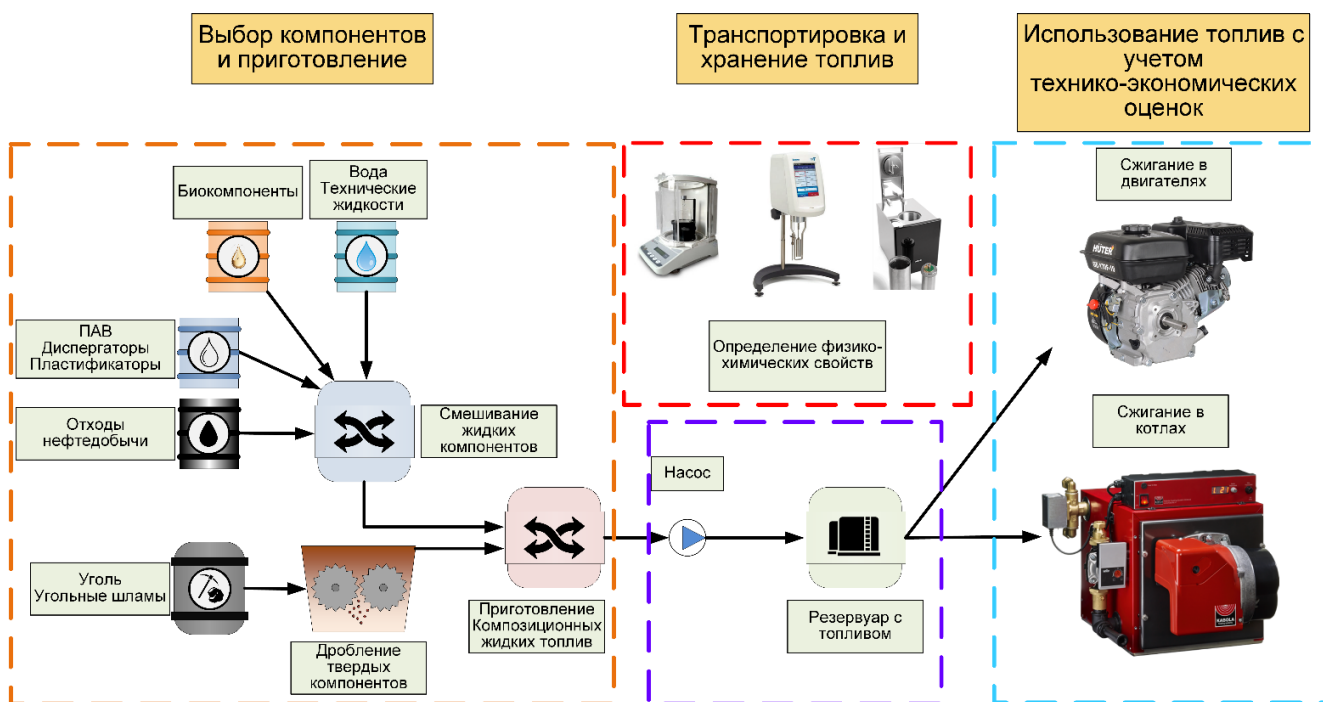


Рисунок 16 – Схема полного жизненного цикла КЖТ от приготовления до использования в котельных и двигательных установках

Предложенное решение подразумевает применение системы топливоприготовления с использованием ПАВ, стабилизаторов, пластификаторов и добавок. Компоненты в заданных пропорциях смешиваются в емкости с применением установленного гомогенизатора. После перемешивания при помощи насоса топливная смесь перекачивается по трубопроводу в распределительный узел, при помощи которого можно выбирать варианты использования топлива. В рамках диссертации отработаны типичные для отраслей и регионов смеси компонентов, выбраны наиболее рациональные для промышленных партнеров, предложены мультикритериальные алгоритмы для выбора сырья для КЖТ.

В **заключении** подведены основные итоги диссертационного исследования и сформулированы выводы.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

1. По результатам изучения фазового поведения и реологии суспензионных топлив при пониженных и отрицательных температурах определены оптимальные по компонентному составу топливные образцы и функциональные добавки (ОП-7, Неонол АФ 9-12, пирофосфат натрия, лигнитовый полимер) к ним, которые одновременно обеспечивают высокую стабильность, приемлемую, с практической точки зрения текучести (не ниже класса В), и понижают относительную эффективную вязкость (менее 1000 мПа·с).
2. Использование стабилизирующих добавок (дизельное топливо, соевый лецитин, отработанное турбинное масло, лигносульфонат натрия, рапсовое масло) в качестве дополнительных компонентов КЖТ позволяет увеличить

седиментационную устойчивость смесей на 50–70% и инициировать процесс термической конверсии в режиме горения суспензий в камере быстрее на 10–15% в зависимости от используемого компонента.

3. Обоснована возможность применения смесевых топлив на основе нефтешламов в распылительных системах, что позволит существенно расширить диапазоны их технологического применения. Использование добавок (в широком диапазоне концентраций) усиливает поверхностную микро-фрагментацию в низкотемпературном диапазоне (до 700 °С) и микровзрыв при более высоких (более 700 °С) температурах. При переходе от лабораторной установки к испытательной камере с бóльшим объемом сжигаемого топлива качество выгорания существенно улучшилось – соотношение CO_2/CO возросло в 2.5–2.6 раз. Это подтвердило положительный синергетический эффект при переносе лабораторных решений на полноразмерные стенды.
4. Обоснована целесообразность применения жидких добавок растительного происхождения в составе КЖТ вместо и дополнительно к нефтяным. В частности, использование добавки в виде растительных масел и их эфиров в смеси с нефтяными топливами приводило к снижению задержки зажигания на 25–77% относительно исходных смесевых топлив при варьировании температуры в диапазоне 500–650 °С. По качеству выгорания, оцениваемому через отношение CO_2/CO в составе дымовых газов, смеси с добавками растительного происхождения были наилучшими. По сравнению со сжиганием топлив на основе добавок нефтяного происхождения, использование метиловых эфиров жирных кислот рапсового масла способствовало росту отношения CO_2/CO до 2 раз, а рыжикового масла – до 1.4 раз.
5. Проведенные испытания на разноразмерных стендах с энергетическими и двигательными установками позволили обосновать правомерность заключений, сделанных на основе экспериментальных исследований в лаборатории и выделить масштабные синергетические и коллективные эффекты, которые можно обеспечить при применении композиционных жидких топлив.
6. Выполнен тепловой расчет топки газомазутного котла, который подтверждает возможность использования альтернативных смесевых топлив в котлах средней и малой мощности, который обосновал целесообразность перевода энергоустановок с нефтяных топлив на смесевые из отходов угольной и нефтяной промышленности с добавками биокомпонентов, промышленных масел и технических жидкостей. Энергетические характеристики композиционных топлив на основе угольных отходов позволяют поддерживать температуру продуктов сгорания на выходе из топочного устройства на уровне (1000–1100 °С), соответствующем проектным топливам.
7. Разработаны рекомендации по использованию результатов научных исследований при развитии технологий термической конверсии композитных жидких топлив в камерах энергетических и двигательных установок (топочные устройства энергетических блоков, дизельные генераторы др.).

ОСНОВНЫЕ ПУБЛИКАЦИИ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ

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

1. Романов, Д.С. О возможности использования жидких биотоплив с добавками растительных масел и эфиров жирных кислот / Г.В. Кузнецов, Д.С. Романов, П.А. Стрижак // Теплофизика и аэромеханика. – 2025. –Т. 32. –№2. С. 387–400.

2. Романов, Д.С. Утилизация угольных флотационных отходов и отходов лесопереработки при сжигании в виде смеси и в составе водосодержащей суспензии / В.В. Дорохов, Д.С. Романов, К.Ю. Вершинина, В.В. Медведев // Кокс и химия. – 2019. – № 5. – С. 38–46.

3. Романов, Д.С. Экологические и энергетические характеристики горения композиционных топлив на основе торфа, нефти и воды / В.В. Дорохов, К.Ю. Вершинина, Г.С. Няшина, Д.С. Романов // Химия твердого топлива. – 2019. – № 5. – С. 44–52.

4. Романов, Д.С. Многофакторный анализ энергетической утилизации угольных, нефтяных и растительных отходов в составе топливных смесей / В.В. Дорохов, К.Ю. Вершинина, П.А. Стрижак, Д.С. Романов // Физика горения и взрыва. – 2022. – № 4. – С. 97–106.

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

1. Romanov, D.S. Stabilized fuel slurries based on fine coal slime: Rheology, combustion and feasibility study / D.S. Romanov, V.V. Dorokhov, K.Y. Verшинina, P.A. Strizhak // Fuel. – 2024. – V. 356. – N. 129560.

2. Romanov, D.S. Stability and rheology of carbon-containing composite liquid fuels under subambient temperatures / M.V. Piskunov, D.S. Romanov, P.A. Strizhak // Energy. – 2023. – V. 278, Part A. – N. 127912.

3. Romanov, D.S. Rheology, ignition, and combustion performance of coal-water slurries: Influence of sequence and methods of mixing / D.S. Romanov, K.Y. Verшинina, V.V. Dorokhov, P.A. Strizhak // Fuel. – 2022. – V. 322. – P. 124294.

4. Romanov, D.S. Rheological characteristics and stability of fuel slurries based on coal processing waste, biomass and used oil / D.S. Romanov, K.Y. Verшинina, G.V. Kuznetsov, P.A. Strizhak // Fuel. – 2021. – V. 302. – N. 121203.

5. Romanov, D.S. Low reynolds number carbon-containing composite liquid fuel pipeline transportation under sub-ambient and subzero temperatures / M.V. Piskunov, D.S. Romanov, D.A. Verkhodanov, P.A. Strizhak // Chemical Engineering Research and Design. – 2024. – V. 203. – P. 547–559.

6. Romanov, D.S. Oil sludge fuel mixtures with additives of fossil and biomass origin: energy and operational parameters / D.S. Romanov, K.Y. Verшинina, V.V. Dorokhov, P.A. Strizhak // Energy. – 2024. – V. 36. – N. 134643.

7. Romanov, D.S. Mixtures of diesel fuel and liquid bioadditives for boilers and engines: basic operational and energy indicators / D.S. Romanov, K.Y. Verшинina, V.V. Dorokhov, P.A. Strizhak, N.A. Khomutov // Clean Technologies and Environmental Policy. – 2025. – V. 27. – P. 7525–7554.