

На правах рукописи

Дорохов Вадим Валерьевич

**ХАРАКТЕРИСТИКИ ФИЗИКО-ХИМИЧЕСКИХ ПРОЦЕССОВ И СОСТАВ
ДЫМОВЫХ ГАЗОВ ПРИ НИЗКОТЕМПЕРАТУРНОМ СЖИГАНИИ
КОМПОЗИЦИОННЫХ ПЕЛЛЕТИРОВАННЫХ И ЖИДКИХ ТОПЛИВ ИЗ
ОТХОДОВ**

Автореферат
диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

1.3.14 – Теплофизика и теоретическая теплотехника

Томск – 2025

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

Научный руководитель:

Стрижак Павел Александрович, доктор физико-математических наук, профессор, Федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования «Национальный исследовательский Томский политехнический университет», Научно-образовательный центр И.Н.Бутакова, профессор, г. Томск

Официальные оппоненты:

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

Богомолов Александр Романович, доктор технических наук, доцент, Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Кузбасский государственный технический университет Т.Ф. Горбачева», кафедра теплоэнергетики, заведующий, г. Кемерово

Ведущая организация: Федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования «Сибирский федеральный университет», г. Красноярск.

Защита диссертации состоится «21» мая 2025 г. в 10:00 на заседании диссертационного совета 24.2.347.04 при Федеральном государственном бюджетном образовательном учреждении высшего образования «Новосибирский государственный технический университет» по адресу: 630073, г. Новосибирск, пр. К. Маркса, 20, 1 корпус, конференц-зал.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке Новосибирского государственного технического университета и на сайте www.nstu.ru.

Автореферат разослан «__» марта 2025 г.

Ученый секретарь диссертационного совета,
доктор технических наук, доцент



Олеся Владимировна Боруш

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность. Несмотря на активное развитие систем получения энергии из возобновляемых источников, потребление ископаемых ресурсов для выработки энергии составляет более 80%. Добыча, транспорт и энергетическое использование ископаемых топлив наносят серьезный урон окружающей среде. Другой проблемой, связанной с использованием ископаемых топлив, является их исчерпаемость. Одним из возможных решений обозначенных проблем служит вовлечение промышленных и коммунальных отходов, биомассы и других горючих компонентов в энергетический сектор путем создания композиционных жидких и твердых топлив. Благодаря смешению различных групп отходов можно добиться нивелирования отрицательных эффектов и улучшения положительных свойств каждой из рассматриваемых групп отходов. В энергетическом секторе распространенными композиционными жидкими топливами являются водоугольные (ВУТ) и органоводоугольные (ОВУТ). По сравнению с углем и мазутом суспензионные топлива отличаются повышенными экологическими и экономическими индикаторами, а использование высокоэффективных (часто называют высокорекреационных), с точки зрения энергетики, добавок, позволяет им конкурировать с традиционными топливами по энергетическим индикаторам. Другим вариантом композиционных топлив являются пеллеты и брикеты на основе отходов. Благодаря совместному пеллетированию и брикетированию биомассы и угольных отходов удается добиться увеличения теплоты сгорания получаемого топлива.

Степень разработанности темы исследования. В области термической конверсии низкосортных топлив и отходов углеобогащения, деревоперерабатывающего и сельскохозяйственной отрасли промышленности, коммунальных отходов, а также отработанных продуктов нефтепереработки наиболее значимые результаты получены известными специалистами: 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., Дектерев А.А., Деягин 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., 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. Однако, неизученными в полной мере остаются процессы термической конверсии пеллетированных и жидких композиционных топлив на основе различных групп отходов. Учитывая широкую номенклатуру сырья, потенциально пригодного для создания композиционных топлив, а также влияние каждой конкретной добавки на итоговые характеристики композиционного топлива, целесообразным

представляется комплексное исследование энергетических, экологических и технико-экономических характеристик композиционных топлив с использованием методик мультикритериального анализа.

Цель диссертационной работы – определение условий и способов снижения антропогенного воздействия объектов энергетики на окружающую среду при применении пеллетированных и жидких композиционных топлив на основе отходов углеобогащения, деревоперерабатывающего и сельскохозяйственной отрасли промышленности, коммунальных отходов, а также отработанных продуктов нефтепереработки.

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

1) Определение номенклатуры основных продуктов сгорания в составе дымовых газов объектов энергетики, работающих на традиционных видах топлива, и влияния данных продуктов сгорания на здоровье человека и состояние окружающей среды;

2) Анализ современных технологий снижения концентраций продуктов сгорания в составе дымовых газов, а также методов утилизации и преобразования продуктов сгорания из состава дымовых газов;

3) Определение номенклатуры компонентов из числа различных групп отходов и их рациональных концентраций в составе пеллетированных и жидких композиционных топлив с учетом их экологических, энергетических и технико-экономических характеристик;

4) Разработка экспериментальных методик и создание стендов для исследований характеристик термического разложения и окисления пеллетированных и жидких композиционных топлив, а также состава продуктов их сгорания.

5) Определение характеристик термической конверсии и состава продуктов сгорания композиционных топлив с учетом их состава, температуры окислительной среды в камере сгорания, а также совокупности других факторов и эффектов, оказывающих влияние на характеристики термического окисления и состав продуктов сгорания, на основе результатов параметрических экспериментальных исследований;

6) Формулирование обобщающих критериальных выражений, определяющих эффективность использования пеллетированных и жидких композиционных топлив с учетом их экологических, энергетических и технико-экономических характеристик;

7) Сравнительный анализ показателей эффективности традиционных и альтернативных композиционных топлив в пеллетированном и жидком агрегатном состояниях;

8) Проведение тестирования предложенных технических решений на полноразмерных стендах с выявлением потенциальных синергетических эффектов;

9) Разработка технических решений для снижения антропогенного воздействия объектов энергетики на окружающую среду при применении пеллетированных и жидких композиционных топлив на основе отходов углеобогащения, деревоперерабатывающего и сельскохозяйственного комплекса, коммунальных отходов, а также отработанных продуктов нефтепереработки;

10) Формулирование рекомендаций по использованию результатов диссертационного исследования.

Научная новизна работы

1. Разработаны научные основы и технические решения для снижения антропогенного воздействия объектов энергетики на состояние окружающей среды, заключающиеся в создании пеллетированных и жидких композиционных топлив на основе угольных, деревоперерабатывающих, сельскохозяйственных и коммунальных отходов, отработанных продуктов нефтепереработки, а также низкосортных топлив.

2. Определены перечень компонентов смесевых топлив и их рациональные концентрации.

3. Установлены кинетические характеристики термического разложения и окисления, а также состав дымовых газов при сжигании пеллетированных и жидких композиционных топлив с использованием аналитического оборудования, лабораторных и испытательных стендов.

4. Сформулированы обобщающие мультикритериальные оценки для выделения номенклатуры композиционных топлив, учитывающих технико-экономические, энергетические и экологические показатели.

Практическая значимость работы заключается в обосновании возможности использования пеллетированных и жидких композиционных топлив на основе различных групп отходов и низкосортного сырья для генерации тепловой энергии с целью снижения антропогенного воздействия энергетического сектора на состояние окружающей среды. Для широкой группы пеллетированных и жидких композиционных топлив определены энергетические, экологические и технико-экономические параметры, позволяющие обосновывать рациональность использования данных топлив на энергетических объектах. Благодаря вовлечению компонентов из числа различных групп отходов можно добиться снижения стоимости топлива, и, как следствие, получаемой тепловой энергии. Вовлечение отходов в топливный сектор позволит минимизировать площади отвалов для угольных отходов и отработанных нефтепродуктов, а также утилизировать накапливаемые объемы коммунальных и лесопромышленных отходов.

Методология и методы исследования. Для изучения стадий и характеристик горения компонентов и приготовленных композиционных топлив применен термогравиметрический анализатор METTLER-TOLEDO TGA/DSC 3+. Для определения характеристик зажигания и горения, а также состава дымовых газов композиционных топлив использовались несколько спроектированных экспериментальных стендов на основе высокоскоростных видеокамер, газоаналитического оборудования и ИК-спектрометра.

Положения и основные результаты, выносимые на защиту:

1) Для интенсификации термического разложения и окисления композиционных топлив предложен подход, основанный на использовании добавок в виде биомассы и нефтяных отходов в малых концентрациях (5–10%), позволяющий снизить предельные температуры иницирования горения на 5–7%, максимальные температуры выгорания – на 5–15%, варьировать относительные

изменения значений энергии активации термического разложения и окисления на 25–55%;

2) Разработаны научные основы технологии секвестирования концентраций оксидов углерода, азота и серы в составе дымовых газов при выработке тепловой энергии, базирующейся на взаимном влиянии совокупности компонентов жидких и пеллетированных композиционных топлив на основе коммунальных и промышленных отходов на физико-химические и фазовые превращения при их термической конверсии. Использование композиционных топлив позволяет снизить в составе дымовых газов концентрации оксидов углерода на 5–30%, оксидов азота – на 25–80%, оксидов серы – на 35–150%;

3) Создан программно-аппаратный комплекс и разработан с его применением способ регистрирования компонентного состава дымовых газов, заключающийся в комбинации газоаналитического оборудования и ИК-спектроскопии. Комбинация средств измерения обеспечивает увеличение быстродействия системы, а также большую селективность измерений в быстропротекающих процессах термической конверсии композиционных топлив;

4) Результаты определения характеристик термической конверсии и состава дымовых газов показали, что наиболее эффективными топливными смесями являются “Угольный шлак 50%, вода 45%, опилки 5%” и “Угольный шлак 50%, вода 45%, отработанное турбинное масло 5%”. Целесообразно организовывать режим их термической конверсии при температурах окислительной среды 700–900 °С и коэффициенте избытка воздуха 1,67–1,78 в камере сгорания;

5) С применением испытательных стендов обоснована целесообразность вовлечения в топливно-энергетический сектор композиционных топлив с обеспечением расширения сырьевой базы, снижения стоимости получаемой энергии и утилизации отходов без снижения эффективности работы энергоустановок. Реализация данного подхода позволяет уменьшить концентрации в дымовых газах оксидов азота на 40–55%, а оксидов серы – на 60–400% по сравнению со сжиганием пылеугольного топлива.

Достоверность результатов диссертационного исследования подтверждается оценками систематических и случайных погрешностей измеряемых величин, а также использованием высокоточного современного оборудования и программно-аппаратных комплексов.

Связь работы с научными программами и грантами. Диссертационные исследования с твердыми смесями в виде пеллетов выполнены при поддержке гранта Российского научного фонда № 23-79-10098 «Пеллетированные и брикетированные топлива из промышленных, сельскохозяйственных и коммунальных отходов». Исследования процессов термической конверсии композиционных жидких топлив из отходов проведены в рамках гранта Министерства науки и высшего образования Российской Федерации, Соглашение № 075-15-2024-543 от 24.04.2024 «Фундаментальные исследования процессов горения и детонации в перспективных технологиях энергетики и двигателестроения».

Личный вклад автора состоит в планировании экспериментальных исследований, выборе методов и средств регистрации определяемых параметров,

проведении экспериментов и обработке полученных результатов, оценке систематических и случайных погрешностей, анализе и обобщении полученных экспериментальных данных, разработке рекомендаций по использованию результатов диссертационного исследования. В совместных публикациях вклад автора преобладающий, результаты получены лично автором либо при его непосредственном участии. Представление изложенных в диссертации и выносимых на защиту результатов, полученных в совместных исследованиях, согласовано с соавторами.

Апробация работы. Основные результаты диссертационных исследований докладывались и обсуждались в рамках следующих симпозиумов и конференций: II Всероссийская с международным участием конференция "Бутаковские чтения" (г. Томск, 2022 г.); III Всероссийская с международным участием конференция "Бутаковские чтения" (г. Томск, 2023 г.); XVII Всероссийская (IX Международная) научно-техническая конференция студентов, аспирантов и молодых ученых "Энергия-2022" (г. Иваново, 2022 г.); XXVIII Международный молодежный научный симпозиум имени академика М.А. Усова «Проблемы геологии и освоения недр» (г. Томск, 2024 г.); VII Минский международный коллоквиум по физике ударных волн, горения и детонации (г. Минск, 2023 г.); I Всероссийская конференция с международным участием "Енисейская теплофизика" (г. Красноярск, 2023 г.); 17-я Научная конференция по горению и взрыву (г. Москва, 2024 г.); XXXVIII Сибирский теплофизический семинар (г. Новосибирск, 2022 г.); XL Сибирский теплофизический семинар (г. Новосибирск, 2024 г.); The 3d International Conference on Physics and Chemistry of Combustion and Processes in Extreme Environments (ComPhysChem'24) (г. Самара, 2024 г.); 11 международный симпозиум «Неравновесные процессы, плазма, горение и атмосферные явления» (г. Сочи, 2024 г.), XII Всероссийская конференция с международным участием «Горение топлива: теория, эксперимент, приложения» (г. Новосибирск, 2024 г.).

Публикации. Основные положения и результаты диссертации опубликованы в 25 научных работах, из них 5 научных статей в изданиях, в которых должны быть опубликованы основные научные результаты диссертаций на соискание ученой степени кандидата наук (перечень ВАК), 7 – в изданиях, индексируемых в международных базах данных Scopus и/или Web of Science, 12 – в трудах всероссийских и международных конференций, 1 патент на изобретение.

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 261 страницах печатного текста, содержит 62 рисунка, 34 таблицы, 1 приложение.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении обоснована актуальность темы диссертационного исследования, сформулированы цель и задачи исследования, практическая значимость результатов и научная новизна, а также выделен личный вклад автора в проведенном исследовании.

В первой главе проанализированы объемы антропогенных выбросов, генерируемых предприятиями топливно-энергетического сектора. Рассмотрены

современные способы их снижения. Выделено негативное влияние антропогенных выбросов на здоровье людей и состояние окружающей среды. Проанализированы способы очистки дымовых газов, применяемые в циклах работы ТЭС, сформулированы их достоинства и недостатки. Определено современное состояние исследований в области композиционных топлив, основные достижения и нерешенные задачи в этой сфере, а также направления дальнейшего развития.

Во второй главе приведено описание экспериментальных стендов и методик, используемых в диссертационном исследовании. Представлен перечень сырья для изготовления композиционных топлив. Описаны методики изготовления пеллетированных и жидких композиционных топлив. В качестве основного компонента при создании топливных пеллет выбрана диспергированная древесина (сосновые опилки), являющаяся типичным отходом деревоперерабатывающей отрасли промышленности. В качестве дополнительных компонентов использовались шлам угля марки К, торф, картон, пластик, а также смесь картона с пластиком и смесь сельскохозяйственных отходов растительного происхождения в виде соломы и рисовой шелухи. Доля добавочных компонентов в составе пеллетированного топлива варьировалась в диапазоне 5–15 масс.%. Основным компонентом для приготовления суспензионных топлив являлся угольный шлам угля марки К (коксующийся). Также для сопоставления результатов изготавливались суспензионные топлива на основе каменного угля марки К. Дополнительными твердыми компонентами при приготовлении суспензионных топлив выступали солома и диспергированная древесина. В качестве жидких компонентов использовались отработанное турбинное масло, отработанное моторное масло и отработанное кулинарное масло. Для изучения стадий и характеристик горения компонентов и приготовленных композиционных топлив применен термогравиметрический анализатор METTLER-TOLEDO TGA/DSC 3+. На основе полученных термогравиметрических профилей исследуемых топлив определялись значения энергии активации (E_a) и константы скорости реакции (k_0). Для определения характеристик горения и состава дымовых газов композиционных топлив использовался стенд, схема которого представлена на рисунке 1. В качестве камеры сгорания использовалась трубчатая муфельная печь. Характеристики процесса зажигания определялись при помощи высокоскоростной видеокамеры.

Для определения концентраций основных компонентов дымовых газов использовался газоанализатор Тест-1. Помимо указанного газоанализатора использовался ИК-спектрометр ИнфраЛЮМ ФТ-08. Для определения максимальных температур горения (T_b) использовался тепловизор Testo 885-2. Для определения удельной энергии сгорания исследуемых композиционных топлив

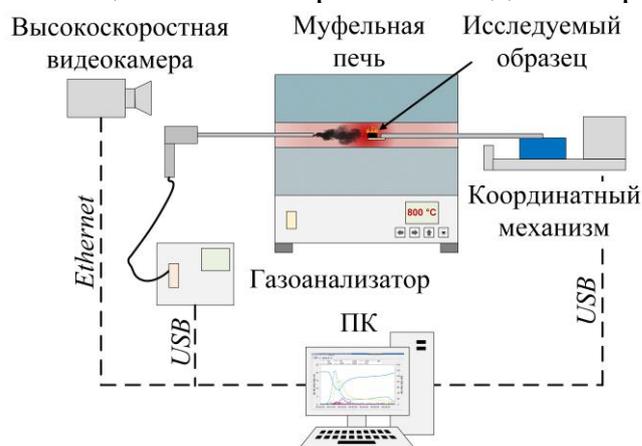


Рисунок 1 – Схема экспериментального стенда для определения характеристик горения и состава дымовых газов композиционных топлив

использовался адиабатический бомбовый калориметр АБК-1В, устройство заправки кислородом УЗК-30м, аналитические высокоточные весы Vibra AF 225DRCE, ПК с предустановленным ПО.

В третьей главе приведены основные результаты экспериментальных исследований, выполненных при помощи лабораторных стендов и аналитических приборов. В § 3.1 приведены результаты термогравиметрического исследования и установлены кинетические характеристики термического окисления композиционных топлив. Для выявления взаимного влияния компонентов в составе композиционного топлива рассматривалось термическое окисление следующих суспензий: «50% угольный шлам, 40% вода, 10% отработанное турбинное масло»; «угольный шлам 50%, вода 40%, опилки 10%»; «40% угольный шлам, 40% вода, 10% отработанное турбинное масло, 10% опилки». Кривые TG–DTG приведены на рисунке 2. Для исследования взаимодействий угольного шлама и добавок (биомассы и отработанного масла) при совместном сжигании применялась методика расчета относительных отклонений между теоретическими и экспериментальными кривыми ТГ. В рамках данной методики отклонение кривой TG рассчитывалось с применением выражений:

$$TG_{cal} = x_1 TG_{exp_1} + x_2 TG_{exp_2} + \dots + x_n TG_{exp_n}; \Delta TG = (TG_{exp} - TG_{cal}) / TG_{exp} \cdot 100\%,$$

где TG_{cal} и TG_{exp} – расчетное и экспериментальные значения для смеси; $x_1 \dots x_n$ – доля компонента (угольного шлама, воды, биомассы, масла) в смеси; $TG_{exp_1} \dots TG_{exp_n}$ – экспериментальные значения TG, полученные для отдельных компонентов смеси. При отсутствии взаимодействия между отдельными компонентами смеси, относительный показатель ΔTG будет стремиться к нулю. Если ΔTG имеет отрицательное значение, то расчетное значение оказалось выше экспериментального, что указывает на наличие взаимодействия компонентов смесевых топлив и подразумевает усиление реакции окисления всей смеси. Положительное значение ΔTG , напротив, говорит о присутствии ингибирующего эффекта на процесс термического окисления. На рисунке 3 приведены относительные отклонения между теоретическими и экспериментальными термогравиметрическими кривыми композиционных топлив. Характер кривых ΔTG (рисунок 3) указывает на наличие синергетических эффектов взаимодействия компонентов суспензий. Выделены три интервала, на которых наиболее выражены данные взаимодействия. Первый соответствует стадии испарения влаги. В присутствии отработанного турбинного масла процесс обезвоживания угольной смеси интенсифицировался вследствие более высоких скоростей испарения горючей жидкости. При добавлении опилок установленный эффект становился менее выраженным, так как биомасса удерживала впитанную влагу. Несмотря на это, отклонение экспериментальных данных от расчетных достаточно большое и составляет до 38%, что говорит о положительном влиянии добавок на процесс обезвоживания смеси и ее дальнейший прогрев. Второй участок связан с выделением и сгоранием летучих веществ из используемых добавок. Здесь отмечена одна очень важная закономерность. Для смеси «угольный шлам 50%, вода 40%, опилки 10%» значение пика на втором участке положительное. Данный результат отражает умеренное влияние компонентов смеси друг на друга.

Интенсивность процессов дегазации и сжигания летучих веществ из биомассы на данном этапе ингибировалась угольным шламом.

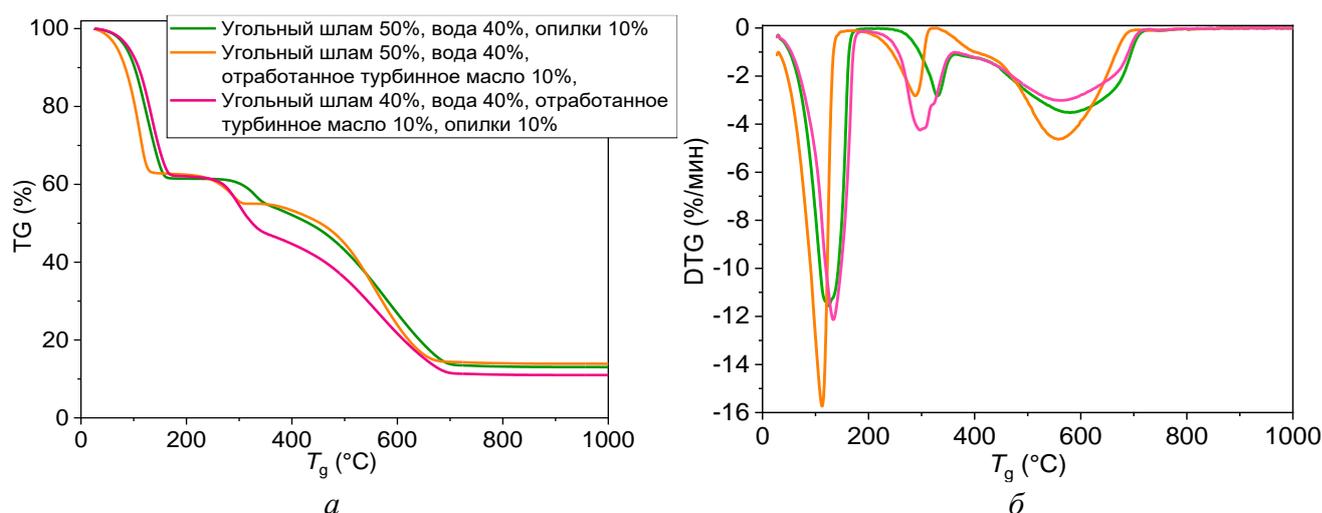


Рисунок 2 – TG (a) и DTG (б) кривые суспензионных топлив с добавками турбинного масла и биомассы при скорости нагрева 20 °С/мин.

Опилки обладают более высокой реакционной способностью, чем угольный шлам. При совместном сжигании раннее выделение летучих веществ и их сгорание приводило к возникновению разницы температур между частицами угольного шлама и опилками. Тепло, выделяющееся при сгорании летучих из биомассы, активно поглощалось частицам шлама, тем самым скорость реакции окисления биомассы снижалась, замедлялся выход летучих компонентов. Более того, мелкие частицы угольного шлама покрывали поверхность частиц биомассы при их смешивании.

Это препятствовало диффузии летучих веществ биомассы наружу, что приводило к снижению скорости их выделения. Присутствие отработанного турбинного масла нивелировало данные тенденции. Для смеси «40% угольный шлам, 40% вода, 10% отработанное турбинное масло, 10% опилки» обнаружен противоположный эффект, при котором экспериментальная кривая TG оказалась меньше расчетной,

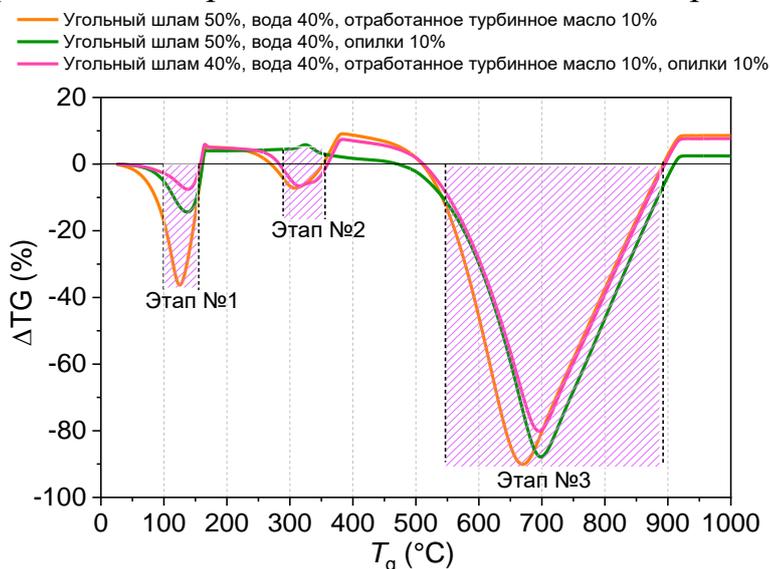


Рисунок 3 – Отклонение теоретических и экспериментальных кривых ТГ суспензионных топлив при скорости нагрева 20 °С/мин.

что говорит о возникающих синергетических эффектах между опилками и маслом в составе смеси. Применение двух высокореакционных компонентов приводило к формированию газового облака, горение которого сопровождалось выделением достаточно большого количества энергии, достаточного для окисления находящихся в глубинных слоях навески опилок. Третья стадия связана, в

основном, со сжиганием углеродного остатка угольного шлама. На данном этапе регистрировались масштабные стимулирующие горение эффекты, вызванные присутствием добавок в смеси. Максимальная разница между теоретическими и экспериментальными данными составляла 87%, т.е. регистрируемая в ходе эксперимента потеря массы образца оказалась практически вдвое ниже, чем рассчитанное значение. Полученный результат указывает на взаимодействие между добавками и шламом, которое объясняется тепловыми и каталитическими эффектами при их совместном сжигании. Например, относительно низкая температура воспламенения полукокса из биомассы и количество теплоты, выделяющееся при его сгорании, способствовали окислению частиц шлама. Соединения щелочноземельных металлов в биомассе могли выступать в качестве катализаторов, способствующих окислению частиц шлама.

При кинетическом анализе характеристик термического окисления (энергия активации, константа скорости реакции) выделены три этапа: (i) 200–300 °С – сжигание летучих компонентов из биомассы и горючих жидкостей; (ii) 300–450 °С – горение коксовой части биомассы и начало выхода летучих веществ из угольного шлама; (iii) 450–800 °С – выгорание полукокса биомассы, летучих угольного шлама и коксового остатка угольных частиц. Процесс окисления высоколетучих топлив (биомассы и масел) заканчивался до 600 °С. Поэтому для них третья стадия ограничивалась диапазоном температур 450–600 °С. Установлено, что энергия активация сухого угольного шлама в диапазоне температуры 300–800 °С практически не изменялась и составила около 81 кДж/моль. Аналогичный результат получен и для смесей угольного шлама с водой, для которых требовались повышенные температуры для интенсификации процессов зажигания. При этом значения E_a для суспензий на участке 300–450 °С превышали установленные значения для сухого шлама, причем с увеличением доли воды разница возрастала (от 37% до 48%). На всем диапазоне температур энергия активации для сухих смесей угольного шлама и опилок снижалась с увеличением содержания биомассы. Высокое содержание биомассы приводило к высвобождению большего количества летучих веществ при более низкой температуре. Интенсифицировался тепломассоперенос, реакция горения смешанных образцов ускорялась, о чем и свидетельствует снижение энергии активации. Положительный эффект добавок соломы и опилок в составе водоугольных суспензий выражается в том, что процесс выделения летучих для данных топлив начинался при более низких температурах (на участке 200–300 °С) в сравнении с водоугольной суспензией без добавок. При этом величина энергии активации для данного процесса на 11–50% ниже. Установлено, что энергия активации для суспензионного топлива с добавкой соломы ниже, чем для смеси «угольный шлам 50%, вода 40%, опилки 10%», при том же количестве биомассы.

В § 3.2 определены зависимости концентраций продуктов сгорания в составе дымовых газов при сжигании твердых и жидких композиционных топлив в модельной камере сгорания от температуры и состава окислительной среды, состава и схемы сжигания композиционного топлива. Таблица 1 иллюстрирует значения зарегистрированных концентраций антропогенных газов, образующихся при сжигании топлив, при варьировании массы навески и температуры в камере

сгорания. Анализ зарегистрированных значений показал, что сжигание угля характеризуется максимальными выбросами загрязняющих веществ вне зависимости от массы навески и температуры в камере сгорания. При сжигании суспензий, средние концентрации CO₂ ниже на 12–52%, SO₂ – 24–90%, NO_x – 28–60% по сравнению с углем. Снижение концентраций загрязняющих веществ при горении суспензий объясняется совокупностью причин: составом исходных компонентов; содержанием влаги; температурным режимом горения; дополнительными синергетическими эффектами, основанными на взаимодействии компонентов дымовых газов, выделяющихся при горении компонентов топлив, с парами воды и компонентами золы.

Таблица 1 – Зарегистрированные значения концентраций антропогенных выбросов при сжигании исследованных топлив на единицу массы угля

Компонент		CO ₂ , %	SO ₂ , ppm	NO, ppm	CO ₂ , %	SO ₂ , ppm	NO, ppm	CO ₂ , %	SO ₂ , ppm	NO, ppm	CO ₂ , %	SO ₂ , ppm	NO, ppm	CO ₂ , %	SO ₂ , ppm	NO, ppm
Масса топлива, г	T _г , °C	Уголь 100%			Уголь 50%, вода 50%			Угольный шлам 50%, вода 50%			Угольный шлам 50%, вода 45%, опилки 5%			Угольный шлам 50%, вода 45%, отработанное турбинное масло 5%		
		700	4,73	35	194	3,29	3,5	90	3,37	7	91	3,57	4	108	4,29	9
0,15	800	6,82	77	226	5,87	16	139	4,79	16	128	5,29	15	165	5,07	39	157
	900	8,84	90	327	6,51	31	196	6,77	35	167	5,73	34	172	6,36	50	186
	700	6,29	32	153	3,96	8	107	3,77	11	110	3,45	6	92	4,18	10	106
0,30	800	10,98	76	236	7,13	30	145	5,59	38	143	5,27	21	145	6,59	39	160
	900	12,38	97	410	9,02	51	228	7,93	61	188	6,37	45	193	8,26	63	262
	700	6,02	31	197	4,46	12	111	4,77	21	119	4,22	13	109	4,88	18	127
0,45	800	10,01	89	290	6,15	33	178	6,29	33	160	5,57	30	144	5,93	49	169
	900	12,04	121	450	9,17	79	258	8,87	90	205	6,23	62	204	7,76	92	272

Содержание исходной серы, азота и углерода в суспензиях ниже ввиду того, что 45–50% смеси составляла вода. Однако установлены условия, при которых снижение концентраций не пропорционально количеству замещенного водой угольного компонента. Например, снижение концентраций оксидов углерода или азота для суспензий с примесью масла несколько меньше, чем 50%. Данный результат обусловлен отличающимися от угля характеристиками сгорания данной суспензии. Наличие масла в ней интенсифицировало процессы зажигания и последующего горения, высокая теплотворная способность жидкости увеличивала температуру в зоне горения, топливо быстрее прогревалось и лучше сгорало. Также в ходе проведения экспериментов регистрировался эффект микро-взрывного разрушения (диспергирования) капель суспензии с примесью масла. Данный процесс обусловлен нагревом капли, при котором интенсифицировались физико-химические превращения, вызывающие ее разрушение. При нагревании вода в каплях испарялась первой, так как она более летучая, чем масло. Испарение приводило к микро-взрывному разрушению углеводородной основы. Это происходило при температуре, значительно превышающей температуру кипения воды. Микро-взрывное дробление увеличивало полноту выгорания топлива за счет того, что мелкие фрагменты исходных капель имели лучшие характеристики

(главным образом, меньшую инерционность) процесса зажигания. Также увеличивалась площадь поверхности реагирования топлива с окислителем. Следовательно, интенсифицировалось горение за счет усиления перемешивания воздуха и топлива. Степень выгорания такой суспензии выше, чем у угля. Большая часть содержащихся в суспензии углерода, азота и серы вступили в реакции окисления и разложения. Установлены условия, при которых снижение рассматриваемых выбросов выше 45–50%. Данный результат объясняется возникающими при горении химическими взаимодействиями между отдельными компонентами смесевых топлив. Например, присутствие водяного пара в газовой среде в процессе сжигания водосодержащих топлив влияло на физическую и химическую кинетику горения. В процессе испарения воды снижалась температура пламени. Более низкая температура непосредственно влияла на динамику выхода NO_x и SO_x (снижалась скорость их формирования), так как механизм образования данных оксидов сильно зависит от температуры, причем с ее ростом зависимость становится нелинейной. О данной тенденции свидетельствовали результаты экспериментов, полученные в процессе сжигания топлив при трех разных температурах в камере сгорания (таблица 1). Также из-за наличия воды увеличивалось количество свободных радикалов H_2 и OH , которые способствовали восстановлению NO . Дополнительным фактором, влияющим на снижение эмиссии оксидов серы и азота, является взаимодействие элементов минеральной части угольного шлама и биомассы с оксидами азота и серы. Это является основной причиной того, что именно для суспензии с опилками зафиксированы самые низкие значения концентрации оксидов серы при горении (таблица 1).

В § 3.3 определен состав дымовых газов и выполнено сопоставление результатов измерений с использованием ИК-спектрометрии, масс-спектрометрии и газоанализатора. Для сравнения полученных при помощи газоанализатора и ИК-спектрометра результатов выбраны концентрации основных компонентов газовой смеси: CO_2 , CO , CH_4 . Сравнительная оценка результатов, полученных с применением нескольких газоаналитических систем, проводилась в несколько этапов. На первом определялось отношение средних концентраций газового компонента к их максимальным значениям, зарегистрированным при помощи газоанализатора. Аналогичный расчет проводился для значений, полученных при помощи ИК-спектрометра. На заключительном этапе определялась сходимость результатов как отношение показателей газоанализатора к показателям спектрометра. Пример подобного расчета для опилок представлен ниже:

$$CO_{2\ relative}(\text{ГА}) = \frac{CO_{2\ average}}{CO_{2\ max}} = \frac{3.88\%}{15.52\%} \approx 0.25; \quad (1)$$

$$CO_{2\ relative}(\text{ИК}) = \frac{CO_{2\ average}}{CO_{2\ max}} = \frac{4.02}{13.54} \approx 0.29; \quad (2)$$

$$R_{CO_2} = \frac{CO_{2\ relative}(\text{ГА})}{CO_{2\ relative}(\text{ИК})} = \frac{0.25}{0.29} \approx 0.86. \quad (3)$$

Исходя из результатов, представленных в таблице 2, видно, что при измерении концентраций оксидов углерода двумя системами удается добиться удовлетворительной сходимости результатов. Отклонения между устройствами не превышают 20%. Также проведены аналогичные расчеты для концентраций CH_4 . Однако в этом случае добиться высокой сходимости результатов не удалось. Причиной этого является то, что оптический датчик метана, установленный в газоанализаторе, включает в концентрацию CH_4 также и другие углеводороды, полосы поглощения которых накладываются на полосы поглощения метана. В этом случае ИК-спектрометрия является более надежным средством измерения углеводородов.

Таблица 2 – Сопоставление результатов, полученных при помощи газоанализатора и ИК-спектрометра

Состав	CO ₂ relative (ГА)	CO ₂ relative (ИК)	CO relative (ГА)	CO relative (ИК)	CH ₄ relative (ГА)	CH ₄ relative (ИК)	R_{CO_2}	R_{CO}	R_{CH_4}
100% Угольный шлак	0,77	0,77	0,73	0,75	-	-	1	0,97	-
100% Опилки	0,25	0,29	0,17	0,17	0,34	0,16	0,86	1,00	2,13
100% Отработанное турбинное масло	0,32	0,32	0,24	0,20	0,32	0,23	1,00	1,2	1,39
50% Угольный шлак, 50% вода	0,75	0,80	0,58	0,60	-	-	0,88	0,97	-
50% Угольный шлак, 40% вода, 10% опилки	0,4	0,45	0,37	0,38	-	-	0,89	0,97	-
50% Угольный шлак, 40% вода, 10% отработанное турбинное масло	0,54	0,64	0,23	0,22	-	-	0,84	1,05	-
40% Угольный шлак, 40% вода, 10% опилки, 10% отработанное турбинное масло	0,46	0,52	0,20	0,19	-	-	0,88	1,05	-

В § 3.4 рассчитаны значения относительных показателей эффективности исследуемых композиционных топлив с учетом энергетических, экологических и технико-экономических параметров. Экспериментально определенные значения характеристик процессов зажигания и горения исследуемых жидких композиционных топлив и угля при температурах окислительной среды 700–900 °С представлены в таблице 3. Композиционные топлива на основе угля и угольного шлама демонстрируют снижение времен задержки газофазного зажигания на величину до 1,7 раз по сравнению со сжиганием угольного топлива. Наибольшее преимущество композиционных топлив над углем с точки зрения сокращения времен задержки зажигания наблюдается в диапазоне температур окислительной среды 700–800 °С. Использование добавок отработанного турбинного масла и опилок характеризуется снижением времен задержки газофазного зажигания на величину до 25% по сравнению с топливными суспензиями на основе угля и угольного шлама. Другим важным преимуществом композиционных топлив с добавками опилок и турбинного масла является снижение температур зажигания топливной смеси по сравнению с углем. Так, при использовании добавки опилок температура зажигания снизилась на 31%, а при использовании турбинного масла – на 41%. Данный результат согласуется с результатами термогравиметрического исследования и демонстрирует положительное влияние добавок опилок и турбинного масла на значения характеристик процессов зажигания и горения.

Таблица 3 – Характеристики зажигания и горения топлив.

Состав	τ_{d1} , с	τ_{d2} , с	T_{ign} , °С	CO ₂ , %	NO _x , ppm	SO ₂ , ppm	Q, МДж/кг	A, %	T _b , °С
700 °С									
Уголь 100%	11,1	37,9	535	6,29	153	32	25,79	69	990
Угольный шлам 50%, вода 50%	8,1	9,1	490	3,77	110	11	9,62	82	875
Уголь 50%, вода 50%	8,0	8,5	455	3,96	107	8	12,89	86	980
Угольный шлам 50%, вода 45%, опилки 5%	7,5	9,1	410	3,45	92	6	10,52	84	915
Угольный шлам 50%, вода 45%, турбинное масло 5%	6,6	8,8	380	4,18	106	10	11,87	86	930
800 °С									
Уголь 100%	6,5	34,1	535	10,98	236	76	25,79	79	1035
Угольный шлам 50%, вода 50%	6,8	7,5	490	5,59	143	38	9,62	85	960
Уголь 50%, вода 50%	5,2	6,5	455	7,13	145	30	12,89	92	1015
Угольный шлам 50%, вода 45%, опилки 5%	5,5	7,4	410	5,27	145	21	10,52	86	972
Угольный шлам 50%, вода 45%, турбинное масло 5%	5	6,7	380	6,59	160	39	11,87	86,5	980
900 °С									
Уголь 100%	4	29,5	535	12,38	410	97	25,79	82	1115
Угольный шлам 50%, вода 50%	5,5	6,3	490	7,93	188	61	9,62	86,5	1055
Уголь 50%, вода 50%	4,9	6,3	455	9,02	228	51	12,89	92,5	1080
Угольный шлам 50%, вода 45%, опилки 5%	4,1	5,5	410	6,37	193	45	10,52	86,5	1079
Угольный шлам 50%, вода 45%, турбинное масло 5%	4,2	6,2	380	8,26	262	63	11,87	86,6	1095

Увеличение показателя выгорания (A) при использовании композиционных топлив обусловлено снижением общей зольности топливной смеси относительного угля. По сравнению с суспензионными топливами на основе угольных компонентов и воды, вовлечение в состав композиционных топлив высокорекреакционных компонентов в виде опилок и турбинного масла, приводит к увеличению максимальной температуры горения (T_b), и, как следствие, способствует увеличению показателя выгорания за счет большей температуры в зоне горения.

На рисунке 4а представлены диаграммы, отображающие нормированные значения определяемых характеристик зажигания и горения исследуемых топлив. Диаграммы представлены для температуры окислительной среды в камере сгорания 800 °С. Важно отметить, что по 7 из 9 регистрируемых характеристик уголь уступает исследуемым композиционным топливам. Ключевым преимуществом угольного топлива является его высокая теплота сгорания (Q), нормированное значение которой выше на 50–63% относительно рассматриваемых композиционных топлив. Также уголь характеризуется наибольшей максимальной температурой горения. Нормированные значения данного параметра выше на величину до 12% по сравнению с композиционными топливами. Наилучшими экологическими характеристиками обладает композиционное топливо с добавкой опилок, по сравнению с углем нормированные значения CO₂ оказались выше на 44–53%, NO_x – на 40–54%, а SO₂ – на 49–81%. На рисунке 4б представлены относительные показатели эффективности исследуемых топлив при различных

температурах окислительной среды в камере сгорания. На всем исследуемом температурном диапазоне наибольшим показателем эффективности характеризуется композиционное топливо на основе угольного шлама и опилок. По сравнению с углем, относительный показатель эффективности такого топлива выше на 32–42%. Причиной этого служат наилучшие экологические характеристики топлива с добавкой опилок, демонстрируемые на всем исследуемом температурном диапазоне (таблица 3). Также такое топливо обладает высокими характеристиками зажигания, незначительно (на величину до 12%) уступая композиционному топливу с добавкой турбинного масла. Таким образом, можно сделать заключение о том, что использование композиционных топлив на основе угля и угольных отходов является высокоэффективной альтернативой традиционному угольному топливу.

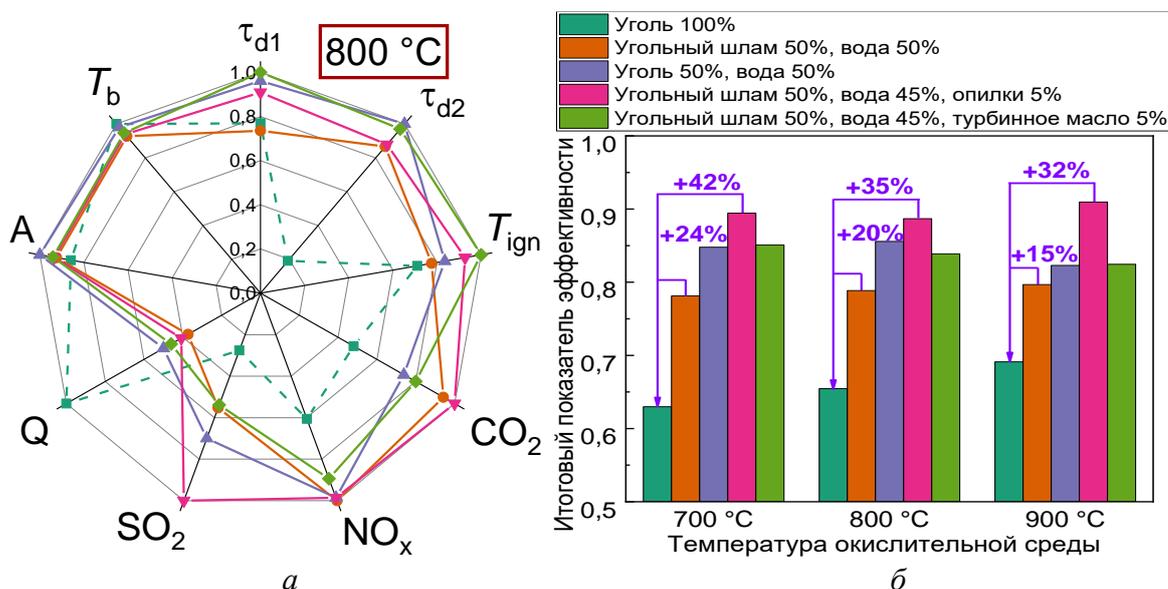


Рисунок 4 – Относительные показатели эффективности исследуемых жидких композиционных топлив и угля

Наиболее эффективным составом композиционного топлива является «угольный шлам 50%, вода 45%, опилки 5%», высокий относительный показатель эффективности демонстрируют композиционные топлива «угольный шлам 50%, вода 45%, турбинное масло 5%» и «уголь 50%, вода 50%». Наибольшее преимущества относительно угля при использовании композиционных топлив удастся достичь при реализации условий низкотемпературного сжигания (при температурах окислительной среды до 800 °C) за счет использования высокорекреакционных добавок в виде опилок и турбинного масла.

В четвертой главе приведены основные результаты экспериментальных исследований, выполненных на полноразмерных стендах. В § 4.1 приведены результаты экспериментов по сжиганию композиционных топлив на основе угля и угольного шлама в модельной камере сгорания котлоагрегата. Размеры камеры сгорания составляли 500x500x200 мм. Коэффициент избытка воздуха в камере сгорания поддерживался в диапазоне 1,3–1,7 при помощи дутьевого вентилятора. Расход угольного топлива, подаваемого в камеру сгорания при помощи форсуночного устройства, составлял 2,4 кг/ч. Для зажигания угольного топлива,

подаваемого в камеру сгорания, использовалась подсветка факела метаном, подаваемым в камеру сгорания с расходом 0,62 м³/ч. Совместно с газом подавался воздух в форсуночное устройство, что позволяло реализовать первичную инжекцию. Поджог такой смеси реализовывался за счет протекания газовой смеси через два параллельно расположенных электрода, между которыми возникало короткое замыкание, приводящее к появлению электрической дуги и зажиганию газовой смеси. При замещении угля угольным шламом в составе композиционного топлива средние концентрации CO₂ в составе дымовых газов снизились на 7–10% ввиду снижения углеродосодержания топливной смеси. Помимо этого, при сжигании угольного шлама в составе дымовых газов содержалось на 10–12% больше CO, чем при сжигании каменного угля, что свидетельствует о меньшей степени выгорания топлива. Максимальные концентрации NO_x регистрировались при сжигании пылеугольного топлива. При сжигании водоугольной смеси концентрации NO_x снизились на 51–55%, а при сжигании смеси на основе угольного шлама – на 37–41%. Использование композиционного топлива с добавкой опилок позволило снизить концентрации оксидов серы в составе дымовых газов практически в 4 раза по сравнению с пылеугольным топливом и в 2,5 раза по сравнению с топливной смесью на основе угольного шлама и воды.

В § 4.2 приведены результаты экспериментов по сжиганию древесных пеллет с добавками твердых коммунальных отходов в камере полноразмерного испытательного стенда. Модельная камера сгорания размерами 250x250x400 мм спроектирована и собрана из нержавеющей стали толщиной 5 мм, с отверстиями для размещения зонда газоанализатора и подвода воздуха. Наибольшие максимальные температуры в камере сгорания регистрировались при горении пеллет без добавок. Данный результат обусловлен интенсивным пламенным горением пеллет «100% опилки», что приводило к локальному кратковременному подъему температуры в зоне горения. Пеллеты с добавками картона и пластика, а также их смеси, характеризовались большей средней температурой в камере сгорания ввиду большей плотности образцов, и, как следствие, более длительного и равномерного тления. Учитывая незначительные изменения максимальных (не более 4 °C) и средних (не более 5 °C) температур, можно говорить об эффективном замещении доли опилок на отходы в составе пеллет без значительных изменений температурного режима работы объекта генерации тепловой энергии. Установлено, что максимальные концентрации CO₂ (7,9%) регистрировались при сжигании пеллет с добавкой картона. При этом средние концентрации CO₂ при использовании пластика и смеси картона и пластика были выше на 6%. Максимальное содержание CO (0,72%) регистрировалось при сжигании пеллет, в составе которых содержалась смесь пластика и картона. Максимальные концентрации оксидов азота (54 ppm) регистрировались при сжигании пеллет с добавкой пластика на этапе пламенного горения и по временному интервалу соответствовали максимальным концентрациям CO₂. При этом, несмотря на меньшие (39 ppm) пиковые концентрации NO_x при сжигании пеллетированного топлива без добавок, средние концентрации оксидов азота для всех топлив не различались более, чем на 5 ppm. В ходе данного эксперимента выбросы оксидов

серы практически отсутствовали, концентрации SO_2 не превышали 3 ppm. Полученные результаты позволяют сделать заключение, что при испытаниях в модельной камере сгорания не регистрировалось существенного различия в составе продуктов сгорания и концентрациях газовых веществ при варьировании типа добавки. Показано, что в условиях промышленного использования возможно применение любой добавки из числа отходов в составе древесных пеллет без значительного изменения состава газовых продуктов сгорания.

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

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

1) Определена номенклатура основных антропогенных выбросов, образующихся при сжигании традиционных ископаемых энергоресурсов объектами энергетики. Установлено влияние продуктов сгорания ископаемых топлив на здоровье людей и состояние окружающей среды.

2) Проанализированы современные технологии снижения антропогенных выбросов, внедряемые на объектах энергетического сектора, а также современных альтернативных способов преобразования и утилизации газовых выбросов, заключающийся в использовании твердых и жидких композиционных топлив.

3) Определена номенклатура компонентов из числа отходов и их концентрации в составе композиционных топлив. Доли добавочных компонентов в составе композиционных топлив выбраны в диапазоне 5–15%. Разработаны подходы к созданию пеллетированных и жидких композиционных топлив.

4) Разработаны экспериментальные методики и спроектированы стенды для исследования характеристик термической конверсии композиционных топлив.

5) Определены характеристики термической конверсии, а также состав продуктов сгорания композиционных топлив различного компонентного состава при варьировании температуры окислительной среды в камере сгорания.

6) Сформулированы обобщающие выражения, позволяющие определить эффективность использования пеллетированных и жидких композиционных топлив с учетом их энергетических, экологических и технико-экономических характеристик.

7) Выполнен сравнительный анализ показателей эффективности традиционных и альтернативных композиционных топлив. Наибольшим показателем относительной эффективности в исследуемом температурном диапазоне окислительной среды в камере сгорания характеризуется композиционное топливо «угольный шлак 50%, вода 45%, опилки 5%». Данный результат обуславливается его наилучшими экологическими характеристиками и высокими значениями по другим рассматриваемым параметрам. По сравнению с углем, эффективность данного композиционного топлива оказалась выше на 32–42% в зависимости от температуры окислительной среды в камере сгорания. Наименьшим относительным показателем эффективности среди композиционных топлив на всем исследуемом температурном диапазоне характеризуется топливная суспензия на основе угольного шлама и воды. По сравнению с углем,

относительный показатель эффективности данного композиционного топлива оказался выше на 15–24%.

8) Результаты экспериментов по сжиганию композиционных топлив в камерах сгорания полноразмерных стендов подтверждают заключения о перспективности их внедрения в энергетический сектор. По сравнению с пылеугольным топливом, выбросы CO_2 снизились на величину до 60%, выбросы NO_x – до 55%, а выбросы оксидов серы уменьшились на величину до 4 раз при использовании композиционных топлив. При сжигании pelletированных топлив на основе диспергированной древесины и различных коммунальных отходов установлено, что при внедрении последних в состав топлива с массовой концентрацией не более 15% не наблюдается значительных различий в составе дымовых газов. Соответственно, это позволяет расширить сырьевую базу для изготовления pelletированных топлив, а также выбирать состав исходя из эксплуатационных свойств получаемого топлива и доступности используемых компонентов.

9) Разработана концептуальная схема сжигания композиционных топлив на основе различных групп отходов, позволяющая добиться снижения антропогенных выбросов, а также стоимости генерируемой тепловой энергии. Применение предложенного подхода позволяет расширить сырьевую базу топливно-энергетического сектора и утилизировать накопившиеся и вновь образующиеся объемы угольных, промышленных и сельскохозяйственных отходов.

10) Сформулированы рекомендации по использованию результатов диссертационного исследования.

ОСНОВНЫЕ ПУБЛИКАЦИИ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ

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

1. **Дорохов, В.В.** Процессы образования и подавления оксидов азота при горении угольного шлама и композиционных топлив на его основе/ Г.В. Кузнецов, В.В. Дорохов, К.Ю. Вершинина, П.А. Стрижак // Физика горения и взрыва. – 2024.

2. **Дорохов, В.В.** Термическое разложение и горение композиционных pelletированных топлив/ В.В. Дорохов, К.Ю. Вершинина, Г.С. Няшина, Д.С. Романов, В.В. Скорюпин, Д.К. Шведов // Горение и взрыв. – 2023. – № 4. – С. 90–99.

3. **Дорохов, В.В.** Исследование характеристик термического разложения перспективных жидких биотоплив методом ТГА-ДСК/ В.В. Дорохов, Д.В. Антонов, Г.С. Няшина // Кокс и химия. – 2022. – № 7. – С. 44–50. = Dorokhov, V.V. Thermal decomposition of promising liquid biofuels: TGA and DSC data/ D.V. Antonov, V.V. Dorokhov, G.S. Nyashina // Coke and chemistry. – 2022. – V.65. – P. 295–301.

4. **Дорохов, В.В.** Антропогенные выбросы при сжигании капель перспективных жидких биотоплив/ В.В. Дорохов, Д.В. Антонов, Г.С. Няшина, Д.С. Романов // Кокс и химия. – 2022. – № 4. – С. 23–30. = Dorokhov, V.V. Anthropogenic emissions in the combustion of liquid biofuel droplets/ D.V. Antonov, V.V. Dorokhov, G.S. Nyashina, D.S. Romanov // Coke and chemistry. – 2022. – V.65. – P. 137–143.

5. **Дорохов, В.В.** Исследование влияния связывающих добавок на эксплуатационные характеристики пеллет на основе древесных отходов/ В.В. Дорохов, К.Ю. Вершинина, Г.С. Няшина, Д.С. Романов // Кокс и химия. – 2024. – № 2. – С. 32–40. = Dorokhov, V.V. Influence of binders on the properties of pellets based on wood waste/ V.V. Dorokhov, K.Y. Vershinina, G.S. Nyashina, D.S. Romanov // Coke and chemistry. – 2024. – V.67. – P. 104–111.

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

1. **Dorokhov, V.V.** Anthropogenic emissions from coal-water slurry combustion: Influence of component composition and registration methods / V. V. Dorokhov, G.S. Nyashina, P.A. Strizhak // Environmental Research. – 2023. – V. 223. – P. 115444.

2. **Dorokhov, V.V.** Composition of a gas and ash mixture formed during the pyrolysis and combustion of coal-water slurries containing petrochemicals / V.V. Dorokhov, G.V. Kuznetsov, G.S. Nyashina, P.A. Strizhak // Environmental Pollution. – 2021. – V. 285. – P. 117390.

3. **Dorokhov, V.V.** Combustion and mechanical properties of pellets from biomass and industrial waste / V. V. Dorokhov, G.S. Nyashina, D.S. Romanov, P.A. Strizhak // Renewable Energy. – 2024. – V. 228. – P. 120625.

4. Nyashina, G.S. Emissions from the combustion of high-potential slurry fuels / G.S. Nyashina, V.V. Dorokhov, G.V. Kuznetsov, P.A. Strizhak // Environmental Science and Pollution Research. – 2022. – V. 29, № 25. – P. 37989–38005.

5. **Dorokhov, V.V.** Thermogravimetric, kinetic study and gas emissions analysis of the thermal decomposition of waste-derived fuels / V. V. Dorokhov, G.S. Nyashina, P.A. Strizhak // Journal of Environmental Sciences. – 2024. – V. 137. – P. 155–171.

6. **Dorokhov, V.V.** Relative energy efficiency indicators calculated for high-moisture waste-based fuel blends using multiple-criteria decision-making / V. V. Dorokhov, G. V. Kuznetsov, K.Y. Vershinina, P.A. Strizhak // Energy. – 2021. – V. 234. – P. 121257.

7. **Dorokhov, V.V.** Physical characteristics and combustion behavior of pellets from sawdust and refuse-derived fuel / V. V. Dorokhov, G.S. Nyashina, D.K. Shvedov, P.A. Strizhak // Fuel. – 2024. – V. 377. – P. 132810.

Патент на изобретение

1. **Дорохов В.В.**, Няшина Г.С., Стрижак П.А., Кузнеченкова Д.А. Стенд для исследования процессов сжигания и пиролиза композиционного жидкого топлива // Патент на изобретение, 15.05.2024, RU2829043 C1

Издание подготовлено в авторской редакции.

Отпечатано на участке цифровой печати

Издательства Томского государственного университета

Заказ № 7750 от «14» марта 2025 г. Тираж 100 экз.

г. Томск, Московский тр. 8, тел. (3822) 53-15-28

publish.tsu.ru